



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής

ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΤΑΘΜΩΝ ΚΟΙΝΟΧΡΗΣΤΩΝ ΠΟΔΗΛΑΤΩΝ



Διπλωματική Εργασία

Κατερίνα Δελιαλή

Επιβλέπουσα: Βλαχογιάννη Ελένη, Επίκουρη Καθηγήτρια Σχολής Πολιτικών
Μηχανικών ΕΜΠ

Συνεπιβλέπων: Κεπατσόγλου Κωνσταντίνος, Επίκουρος Καθηγητής Σχολής
Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2016

Κατερίνα Δελιαλή

«Βέλτιστος Σχεδιασμός Δικτύου Σταθμών Κοινόχρηστων Ποδηλάτων»

Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο,

Αθήνα 2016.

Katerina Deliali

“Optimal Design of Bike-sharing System”

Department of Transportation Planning and Engineering,

National Technical University of Athens,

Greece 2016

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της Διπλωματικής μου εργασίας συνεπάγεται το τέλος της φοιτητικής μου πορείας. Νιώθω λοιπόν, την ανάγκη να ευχαριστήσω όλα τα άτομα που συνέβαλαν στην ολοκλήρωση και των δύο.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου κα Ελένη Βλαχογιάννη και τον συνεπιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Κεπαπτσόγλου. Μου δώσανε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα πραγματικά ενδιαφέρον και σημαντικό θέμα. Με τις συμβουλές τους και τη διαρκή καθοδήγηση τους συνέβαλαν καθοριστικά στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Κυρίως, όμως, τους ευγνωμονώ για το χρόνο που αφιέρωσαν στο να μου δώσουν εφόδια και συμβουλές για την ζωή μου μετά την αποφοίτηση.

Θέλω ακόμη να ευχαριστήσω τους γονείς μου, τα αδέρφια μου, τη γιαγιά και τον παππού μου που ο καθένας με τον τρόπο του μου στάθηκε αυτά τα χρόνια. Τέλος, ευχαριστώ όλους τους φίλους μου που κάνανε με την παρουσία τους την περίοδο αυτή της ζωής μου αξέχαστη.

ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΤΑΘΜΩΝ ΚΟΙΝΟΧΡΗΣΤΩΝ ΠΟΔΗΛΑΤΩΝ

Κατερίνα Δελιαλή

Επιβλέπουσα : Βλαχογιάννη Ελένη

Συνεπιβλέπων: Κεπαπτσόγλου Κωνσταντίνος

Σύνοψη

Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας είναι η δημιουργία ενός προτύπου για το βέλτιστο σχεδιασμό ενός δικτύου σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων με σκοπό την εξυπηρέτηση χρηστών προς και από το Μετρό. Οι εγκαταστάσεις απόθεσης/παραλαβής ποδηλάτων στο Μετρό είναι γνωστές ως Bike-and-Ride. Το πρόβλημα που διερευνάται, ανήκει στην κατηγορία της Χωροθέτησης Εγκαταστάσεων και αντιμετωπίζεται με το μοντέλο Σταθερού Κόστους, που έχει ως στόχο τον περιορισμό του κόστους εγκατάστασης και μετακίνησης με ταυτόχρονη μεγιστοποίηση της εξυπηρετούμενης ζήτησης. Η τελική λύση του προβλήματος περιλαμβάνει τους ανοιχτούς σταθμούς, τη σύνδεση τους και το πλήθος των ποδηλάτων σε αυτούς ανά περίοδο λειτουργίας του συστήματος. Για την ανάλυση ευαισθησίας εξετάστηκαν διαφορετικά σενάρια ως προς τους παράγοντες του μοντέλου.

Λέξεις κλειδιά : κοινόχρηστα ποδήλατα, χωροθέτηση εγκαταστάσεων, μοντέλο Σταθερού Κόστους, συνδυασμένη μετακίνηση, χρήσεις γης

OPTIMAL DESIGN OF BIKE-SHARING SYSTEM

Katerina Deliali

Supervisor: Eleni Vlahogianni

Co supervisor: Konstantinos Kepaptsoglou

Abstract

This thesis aims to determine the optimal location of Bike-sharing stations. The network of stations to be design will serve as a connection between metro stations and demand points in its coverage area. Bike stations near a Metro station are known as Bike-and-Ride facilities. Locating bike-share schemes was tackled with a Fixed-Charged Facility Location Model, which produces optimal decisions with respect to the considered costs. The model is developed and tested in the Athens network of metro stations. The outcomes of the model are: the optimal set of stations to operate, the connection among them and the number of bikes per station, per time period. A sensitivity analysis was performed by testing different scenarios.

Key words: bike-sharing, bike and ride, facility location models, optimization, land use

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται η δημιουργία ενός βέλτιστου δικτύου σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων (Bike-sharing System) στην εμβέλεια των σταθμών του Μετρό, ώστε να εξυπηρετούνται οι διαδρομές από και προς αυτό. Οι σταθμοί ποδηλάτων πλησίον σταθμών Μετρό, ή τρένων γενικότερα, είναι γνωστοί ως εγκαταστάσεις Bike-and-Ride. Η χωροθέτηση σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων ανήκει στην κατηγορία των προβλημάτων Χωροθέτησης Εγκαταστάσεων και αντιμετωπίζεται με ένα από τα μοντέλα της κατηγορίας αυτής. Συγκεκριμένα, επιλέχτηκε το μοντέλο Σταθερού Κόστους, που προσδιορίζει τις βέλτιστες τοποθεσίες περιορίζοντας το κόστος εγκατάστασης και μετακίνησης. Το πρόβλημα επιλύθηκε με το υπολογιστικό εργαλείο OpenSolver.

Για το πλαίσιο της εργασίας, το πρότυπο μοντέλο Σταθερού Κόστους τροποποιήθηκε και επεκτάθηκε για να προσαρμοστεί στις ανάγκες του προβλήματος. Οι σταθμοί χωροθετούνται σε σημεία και συνδέονται μεταξύ τους, ώστε, αφενός να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος και αφετέρου, να μεγιστοποιείται η εξυπηρετούμενη ζήτηση. Τα δεδομένα του προβλήματος είναι το δίκτυο του μετρό, οι υποψήφιες θέσεις εγκατάστασης σταθμών ποδηλάτων στην εμβέλεια του Μετρό, η χωρητικότητα όλων των υποψήφιων σταθμών, οι αποστάσεις μεταξύ αυτών, το κόστος εγκατάστασης, ο διαθέσιμος στόλος ποδηλάτων και η συνολική ημερήσια ζήτηση. Οι υποψήφιες θέσεις χωροθέτησης σταθμών στην εμβέλεια των στάσεων του Μετρό προσδιορίστηκαν βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων, που λαμβάνουν υπόψη την ύπαρξη ελεύθερου χώρου, την απόσταση από σταθμό Μετρό και το ανάγλυφο της τοποθεσίας. Η ζήτηση των υποψήφιων θέσεων εκτιμήθηκε με βάση τις αναπτυσσόμενες χρήσεις γης. Η βέλτιστη λύση περιλαμβάνει το σύνολο των θέσεων στις οποίες θα χωροθετηθεί σταθμός, την αντιστοίχιση σημείων ζήτησης με «ανοιχτούς» σταθμούς Μετρό, τα απαιτούμενα ποδήλατα ανά σταθμό και ανά περίοδο λειτουργίας του συστήματος.

Με σκοπό την ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου δημιουργήθηκαν διαφορετικά σενάρια. Την σημαντικότερη επίδραση στην τελική λύση έχει το μέγεθος του στόλου,

που καθορίζει τους σταθμούς Μετρό θα γίνουν εγκαταστάσεις Bike-and-Ride. Η διακύμανση των τιμών της ημερήσιας συνολικής ζήτησης των υποψήφιων περιοχών καθορίζει σε ποιες από αυτές θα χωροθετηθεί σταθμός κοινόχρηστων ποδηλάτων. Η επιρροή των υπολοίπων παραγόντων, δηλαδή της χωρητικότητας και του κόστους ανά θέση πρόσδεσης ποδηλάτου, έχει πολύ μικρή συνεισφορά στην τελική λύση και επηρεάζουν μονάχα την σύνδεση μεταξύ των σημείων του δικτύου και σε καμία περίπτωση το πλήθος αυτών.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.1 Ποδήλατο και Αστικές Μετακινήσεις	1
1.2 Συστήματα Κοινόχρηστων Ποδηλάτων	2
1.2.1 Χαρακτηριστικά Λειτουργίας.....	3
1.2.3 Επικρατούσες τάσεις, Βέλτιστες Πρακτικές και εξελίξεις.....	6
1.2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα εφαρμογής.....	9
1.3 Η Έννοια του «bike&ride»	10
1.4 Η περίπτωση της Ελλάδας	12
1.5 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας.....	15
1.6 Δομή Διπλωματικής Εργασίας	15
2.1 Το πρόβλημα της Χωροθέτησης Εγκαταστάσεων	17
2.1.1 Βασικά μοντέλα χωροθέτησης.....	19
2.2 Μοντέλα Χωροθέτησης Σταθμών Κοινόχρηστων Ποδηλάτων.....	33
2.3 Συμπεράσματα Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης	36
3.1 Γενικά	39
3.2 Επιλογή υποψηφίων θέσεων χωροθέτησης.....	39
3.2.1 Περιοχή Μελέτης.....	39
3.2.2 Κριτήρια Επιλογής Υποψήφιων Θέσεων.....	41
3.2.3 Προσδιορισμός Ζήτησης Των Υποψήφιων Θέσεων.....	43
3.2.4 Καθορισμός Διαδρομών	49
4.1 Διαμόρφωση Προβλήματος Σταθερού Κόστους.....	51
4.2 Κανονικοποίηση όρων αντικειμενικής συνάρτησης.....	54
4.3 Εισαγωγή Δεδομένων	56
4.4 Εξαγομενα Μοντελου	58
4.5 Εργαλειο επιλυσης	60
5.1 Διαμόρφωση Σεναρίων	65
5.2 Αποτελέσματα	69
5.2.1 Βασικό Σενάριο	69
5.1.2 Μοναδιαίο Κόστος	74
5.1.3 Χωρητικότητα	76
5.3.4 Πλήθος Ποδηλάτων	78
5.1.5 Ζήτηση.....	79
5.2 Συνοψη Αποτελεσματος.....	82
6.1 Γενικά	85
6.2 Βασικά Συμπεράσματα	86
6.3 προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	87
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	89

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΕΙΚΟΝΑ 1: ΣΤΑΘΜΟΣ-VELIB, PARIS.	7
ΕΙΚΟΝΑ 2: ΣΤΑΘΜΟΣ ΜΕ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ BIKE&RIDE- ΠΗΓΗ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ	11
ΕΙΚΟΝΑ 3: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	40
ΕΙΚΟΝΑ 4: ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΘΕΣΕΩΝ ΣΤΑΘΜΕΥΣΗΣ ΠΟΔΗΛΑΤΩΝ (ΠΗΓΗ: BICYCLE PARKING MANUAL/ THE DANISH CYCLIST FEDERATION).....	42
ΕΙΚΟΝΑ 5: ΜΕΝΟΥ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	62
ΕΙΚΟΝΑ 6:MENU OPEN SOLVER	63
ΕΙΚΟΝΑ 7: ΔΙΚΤΥΟ ΣΤΑΘΜΩΝ ΚΟΙΝΟΧΡΗΣΤΩΝ ΠΟΔΗΛΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΒΑΣΙΚΟΥ ΣΕΝΑΡΙΟΥ	71

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1: Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΟΙΝΟΧΡΗΣΤΩΝ ΠΟΔΗΛΑΤΩΝ (2000-2010) (ΠΗΓΗ MIDGLEY,2011).	3
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2: ΛΟΓΟΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΜΕ ΠΟΔΗΛΑΤΟ ΣΤΗ ΜΕΛΒΟΥΡΝΗ ΚΑΙ ΤΗ ΜΠΡΙΣΜΕΗΝ (ΠΗΓΗ: FISHMAN ET AL.,2016)	9
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3: ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΚΟΙΝΟΧΡΗΣΤΩΝ ΠΟΔΗΛΑΤΩΝ ΣΤΟΝ ΑΣΤΙΚΟ ΙΣΤΟ- ΠΗΓΗ VASSI AND VLASTOS (2014)	10
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4: ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ HUB AND SPOKE – ΠΗΓΗ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ ...	30
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5: ΠΛΗΘΥΣΜΙΑΚΗ ΠΥΡΑΜΙΔΑ ΕΛΛΑΔΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΕΤΟΣ 2016 , ΠΗΓΗ:POPULATIONPYRAMID.NET	46

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΚΟΣΤΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΝΟΣ BIKE-SHARING SYSTEM, BICING ΒΑΡΚΕΛΩΝΗ (ΠΗΓΗ: OBIS HANDBOOK, 2011).....	5
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΚΟΣΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΝΟΣ BIKE-SHARING SYSTEM, BICING ΒΑΡΚΕΛΩΝΗ (ΠΗΓΗ: OBIS HANDBOOK, 2011).....	6
ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΥΠΟΨΗΦΙΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΣΤΑΘΜΩΝ BS ΣΤΗΝ ΕΜΒΕΛΕΙΑ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ	42
ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΖΗΤΗΣΗ ΥΠΟΨΗΦΙΩΝ ΘΕΣΕΩΝ.....	47
ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΧΡΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ	48
ΠΙΝΑΚΑΣ 6: ΧΡΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΛΚΥΟΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ	48
ΠΙΝΑΚΑΣ 7: ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΣΗΜΕΙΩΝ Μ,Σ	50
ΠΙΝΑΚΑΣ 8: ΑΡΙΘΜΟΣ DOCKS ΑΝΑ ΣΤΑΘΜΟ ΜΕΤΡΟ.....	58
ΠΙΝΑΚΑΣ 9: ΠΟΔΗΛΑΤΑ ΑΝΑ ΣΤΑΘΜΟ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΡΩΤΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ T1.	59
ΠΙΝΑΚΑΣ 10: ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΟΔΗΛΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΣΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ.....	66
ΠΙΝΑΚΑΣ 11: ΖΗΤΗΣΗ ΑΝΑ ΥΠΟΨΗΦΙΑ ΘΕΣΗ ΩΣ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ	66
ΠΙΝΑΚΑΣ 12: ΣΤΑΘΜΟΙ ΜΕΤΡΟ ΟΡΙΣΜΕΝΟΙ ΩΣ BIKE&RIDE ΓΙΑ ΔΥΟ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ S_{MAX}	67
ΠΙΝΑΚΑΣ 13: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΟΡΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΓΙΑ ΔΥΟ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ S_{MAX}	69
ΠΙΝΑΚΑΣ 14: ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ-ΔΙΚΤΥΟ ΣΤΑΘΜΩΝ BS ΚΑΙ ΠΟΔΗΛΑΤΑ ΚΑΘΕ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	70
ΠΙΝΑΚΑΣ 15: ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ-ΚΑΤΑΝΟΜΗ 300 ΠΟΔΗΛΑΤΩΝ ΑΝΑ ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ ΣΤΟΥΣ ΑΝΟΙΧΤΟΥΣ ΣΤΑΘΜΟΥΣ	73
ΠΙΝΑΚΑΣ 16: ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ- ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΞΥΠΗΡΕΤΟΥΜΕΝΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΑΝΑ ΘΕΣΗ ΑΝΑ ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ	74

ΠΙΝΑΚΑΣ 17: ΣΕΝΑΡΙΟ ΚΟΣΤΟΥΣ- ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΟΡΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ	75
ΠΙΝΑΚΑΣ 18: ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΞΕΤΑΣΗΣ ΚΟΣΤΟΥΣ-ΑΥΞΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΑΝΑ DOCK.....	75
ΠΙΝΑΚΑΣ 19: ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΞΕΤΑΣΗΣ ΚΟΣΤΟΥΣ-ΣΤΑΘΜΟΙ ΜΕΤΡΟ ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΤΩΝ DOCKS	76
ΠΙΝΑΚΑΣ 20: ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΞΕΤΑΣΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ- ΤΙΜΕΣ ΟΡΩΝ Α.Σ. ΣΤΙΣ 4 ΕΠΙΛΥΣΕΙΣ.....	77
ΠΙΝΑΚΑΣ 21: ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΞΕΤΑΣΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ- ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΟΡΩΝ Α.Σ.....	77
ΠΙΝΑΚΑΣ 22: ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΞΕΤΑΣΗΣ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΣΤΟΛΟΥ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	78
ΠΙΝΑΚΑΣ 23: ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΞΕΤΑΣΗΣ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΣΤΟΛΟΥ- ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΞΥΠΗΡΕΤΟΥΜΕΝΗΣ ΖΗΤΗΤΗΣ.....	79
ΠΙΝΑΚΑΣ 24: ΣΕΝΑΡΙΟ ΖΗΤΗΣΗΣ- ΤΙΜΕΣ ΟΡΩΝ Α.Σ. ΤΩΝ ΔΥΟ ΕΠΙΛΥΣΕΩΝ.....	80
ΠΙΝΑΚΑΣ 25: ΣΕΝΑΡΙΟ ΖΗΤΗΣΗΣ- ΕΞΥΠΗΡΕΤΟΥΜΕΝΕΣ ΗΜΕΡΗΣΙΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ	81
ΠΙΝΑΚΑΣ 26: ΣΕΝΑΡΙΟ ΖΗΤΗΣΗΣ- ΠΛΗΘΟΣ ΑΝΟΙΧΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ.....	81
ΠΙΝΑΚΑΣ 27: ΣΕΝΑΡΙΟ ΖΗΤΗΣΗΣ- ΣΗΜΕΙΑ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΟΔΗΛΑΤΩΝ	82

1.1 ΠΟΔΗΛΑΤΟ ΚΑΙ ΑΣΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ

Το ποδήλατο αποτελεί ένα μέσο μετακίνησης που τα τελευταία χρόνια κερδίζει διαρκώς έδαφος. Σήμερα, υπολογίζεται πως οι ποδηλάτες ανά τον κόσμο ξεπερνούν το ένα δισεκατομμύριο. Η χρήση του ποδηλάτου σε καθημερινή βάση προωθείται, καθώς αυτή επιφέρει σημαντικά οφέλη στον άνθρωπο, αλλά και στο περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, το ποδήλατο είναι το μόνο μέσο μεταφοράς που δεν επιβαρύνει τον ατμοσφαιρικό αέρα, δεν καταναλώνει ενέργεια κατά τη λειτουργία του και παράλληλα βελτιώνει τη φυσική κατάσταση του χρήστη. Επομένως, δεν είναι λίγοι όσοι τάσσονται υπέρ της ένταξης του ποδηλάτου στον συγκοινωνιακό σχεδιασμό με στόχο την επίλυση προβλημάτων που εμφανίζονται στο αστικό τοπίο. Καθώς το ποδήλατο δεν προκαλεί κυκλοφοριακή συμφόρηση, απαιτεί ελάχιστο χώρο στάθμευσης, δε δημιουργεί κάποιου είδους περιβαλλοντική όχληση (καυσαέρια, ηχορύπανση), προάγει τη βιώσιμη αστική κινητικότητα.

Σαφώς, παρά τα όσα θετικά εγγυάται η χρήση ποδηλάτου, υπάρχουν ορισμένοι αποτρεπτικοί παράγοντες. Το ποδήλατο, ειδικά στις περιπτώσεις που δεν συνοδεύεται από τις αντίστοιχες υποδομές και η χρήση του δεν συμβαδίζει με το οδικό περιβάλλον, κρίνεται επικίνδυνο. Οι χρήστες οφείλουν σε κάθε περίπτωση να είναι εξοπλισμένοι με τα ατομικά μέτρα προστασίας (κράνος, επιγονατίδες, φώτα κατά τις νυχτερινές ώρες). Επιπλέον, η χρήση ή μη ποδηλάτου επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες και τη μορφολογία του εδάφους. Οι μη εξοικειωμένοι χρήστες αναζητούν επίπεδο έδαφος και ιδανικές καιρικές συνθήκες ώστε να προτιμήσουν το ποδήλατο.

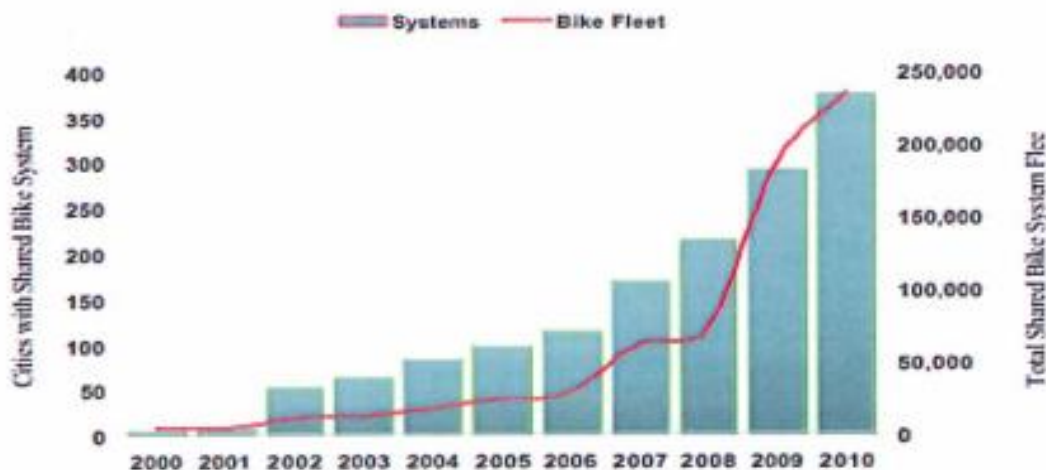
Σε πολλές πόλεις ανά τον κόσμο επιδιώκεται η εδραίωση του ποδηλάτου σε βασικό μέσο μετακίνησης. Στην Ευρώπη σε αυτό τον τομέα πρωτοστατεί η Ολλανδία και στην συνέχεια η Δανία. Η ένταξη του ποδηλάτου απαιτεί την εφαρμογή πληθώρας μέτρων στον συγκοινωνιακό και πολεοδομικό σχεδιασμό αλλά και την ύπαρξη κατάλληλων υποδομών.

1.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΟΙΝΟΧΡΗΣΤΩΝ ΠΟΔΗΛΑΤΩΝ

Μια από τις σημαντικότερες κινήσεις για την προώθηση του ποδηλάτου είναι η εγκατάσταση και λειτουργία συστημάτων αυτόματης μίσθωσης δημόσιας χρήσης ποδηλάτων. Η αντίστοιχη αγγλική ορολογία είναι bike-sharing system (BSS), είτε public bicycle system, είτε bike share scheme ή η πιο πρόσφατη, Smart Bikes (DeMaio, 2009). Στη διεθνή βιβλιογραφία συναντά κανείς αρκετούς ορισμούς. Ο ακόλουθος αποσαφηνίζει με πληρότητα την έννοια αυτή: «Το σύστημα ενοικιαζόμενων ποδηλάτων (bike sharing system-BSS) είναι ένα αυτοεξυπηρετούμενο (self-service) δημόσιο σύστημα βραχυχρόνιας ενοικίασης ποδηλάτων, που μπορεί να εξυπηρετεί μετακινήσεις από ένα σημείο σε ένα άλλο, χωρίς υποχρέωση επιστροφής του ποδηλάτου στην αφετηρία. Μέσω αυτού οι χρήστες των κοινόχρηστων ποδηλάτων απολαμβάνουν την ευκολία και όλα τα πλεονεκτήματα που προσφέρει το ποδήλατο, χωρίς να επιβαρύνονται με το κόστος αγοράς, συντήρησης, χρήσης ή κάποια από τις ευθύνες που συνεπάγεται η ιδιοκτησία ενός ποδηλάτου» (OBIS HANDBOOK, 2011). Ικανοποιητικός ως προς την επεξήγηση είναι και ο ορισμός που εμφανίζεται στη Wikipedia: «ποδήλατα που μπορούν να ενοικιαστούν από ένα συγκεκριμένο χώρο και στην συνέχεια να σταθμευτούν σε κάποιο διαφορετικό. Όλα τα ποδήλατα είναι δικτυωμένα μεταξύ τους, η χρήση τους γίνεται με αυτοματοποιημένο τρόπο και είναι βραχυχρόνια».

Η πρώτη χώρα που εφήρμοσε αυτό το σύστημα ήταν η Ολλανδία το 1965 στην πόλη του Άμστερνταμ. Πολλές πόλεις σε παγκόσμιο επίπεδο έχουν προχωρήσει στην παραχώρηση δημοσίων ποδηλάτων προς ενοικίαση με χαρακτηριστικότερα παραδείγματα το Παρίσι, τη Βαρκελώνη, το Βερολίνο, το Πόρτλαντ στις Ηνωμένες Πολιτείες, το Μόντρεαλ, το Hangzhou στην Κίνα και το Τόκυο. Σύμφωνα, μάλιστα, με το σχετικό χάρτη "Bike Sharing World Map", το Μάιο του 2016 ο αριθμός των πόλεων στις οποίες έχει εφαρμοστεί το Bike Sharing είναι 1029. Ακόμη, σύμφωνα με τη μελέτη που πραγματοποίησε ο Larsen (2013), η ανάπτυξη του συστήματος των κοινόχρηστων ποδηλάτων παρουσιάζει τους μεγαλύτερους ρυθμούς συγκριτικά με την ανάπτυξη οποιουδήποτε άλλου μέσου.

Αυτή την στιγμή η Γαλλία αποτελεί παγκοσμίως τη χώρα με τις περισσότερες πόλεις που διαθέτουν σύστημα ενοικίασης ποδηλάτων. Το πρόγραμμα Velib του Παρισιού είναι από τα μεγαλύτερα συστήματα στον κόσμο διαθέτοντας στους χρήστες 20.000 ποδήλατα μέσω 1.800 σταθμών ενοικίασης (<http://www.velib.paris/>).



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1: Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΟΙΝΟΧΡΗΣΤΩΝ ΠΟΔΗΛΑΤΩΝ (2000-2010) (ΠΗΓΗ MIDGLEY,2011).

1.2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Τα συστήματα κοινόχρηστων ποδηλάτων δίνουν τη δυνατότητα παραλαβής ενός ποδηλάτου από ένα σημείο Α, που θεωρείται η αρχή της μετακίνησης, και την απόθεση του σε ένα σημείο Β, πλησίον του προορισμού του χρήστη. Να επισημανθεί στο σημείο αυτό πως το σημείο παραλαβής και απόθεσης του ποδηλάτου δεν απαιτείται να συμπίπτουν. Η χρονική διάρκεια της μετακίνησης είναι αυτή που θα καθορίσει τη χρέωση του χρήστη από το σύστημα και σε γενικές γραμμές είναι βραχυχρόνια, δεν υπερβαίνει δηλαδή τη μισή ώρα. Μάλιστα, η πολιτική χρέωσης, άλλα και η τοποθεσία των σημείων παραλαβής/απόθεσης είναι τέτοια ώστε η πλειοψηφία των χρηστών να μην υπερβαίνει τη μισή ώρα. Γίνεται σαφές, πως τα BSS είναι ο πλέον κατάλληλος τρόπος για σημειακές μετακινήσεις στην πόλη (point-to-point).

Θα πρέπει να διαχωριστεί η λειτουργία αυτού του συστήματος από την ενοικίαση ποδηλάτων με την ευρύτερη έννοια. Στη δεύτερη περίπτωση, ο χρήστης εξυπηρετείται αποκλειστικά από ένα συγκεκριμένο ποδήλατο το οποίο κι έχει στην κατοχή του για χρονικό διάστημα ανάλογο της μιας ημέρας ή εβδομάδας. Στην περίπτωση των bike-sharing systems ένα ποδήλατο χρησιμοποιείται από πολλούς διαφορετικούς χρήστες μέσα στη μέρα. Τέλος, το ποδήλατο μπορεί να επιστραφεί σε οποιονδήποτε σταθμό.

Όσον αφορά στη χρέωση, όπως αναφέρθηκε, είναι ανάλογη με τη χρονική διάρκεια της χρήσης. Βέβαια, ανά τον κόσμο το κάθε σύστημα έχει υιοθετήσει διαφορετική πολιτική χρέωσης. Στο Παρίσι, λόγω χάρη έχει επικρατήσει η εξής τακτική: προκειμένου κανείς να χρησιμοποιήσει το σύστημα, απαιτείται η εγγραφή του σε

αυτό, με πιστωτική κάρτα ή μέσω του διαδικτύου. Η εγγραφή για μια μέρα κοστίζει ένα ευρώ, πέντε ευρώ για μια εβδομάδα και με είκοσι-εννιά ο χρήστης μπορεί να μετακινείται για ένα έτος μέσω του Velib (<http://www.velib.paris/>). Παρά τις όποιες διαφορές, υπάρχει ένα μοτίβο όσον αφορά στην πολιτική τιμολόγησης. Κατά το πρώτο μισάωρο χρήσης, δεν υπάρχει χρέωση πράγμα που δίνει κίνητρο στον ποδηλάτη να πραγματοποιήσει μικρού μήκους διαδρομή. Η τιμή ανά ώρα, ή ανά χρονική περίοδο δεν αυξάνεται αναλογικά, το οποίο σημαίνει, όπως φαίνεται και από την περίπτωση του Παρισιού, ότι αξίζει κανείς να πάρει ετήσια κάρτα ακόμη και αν θα κάνει χρήση του συστήματος μόνο έξι μήνες.

Συνολικά, υπάρχουν δύο τρόποι για να εκμισθώσει κανείς ποδήλατο από ένα ΣΕΠ:

- Έκδοση ηλεκτρονικής κάρτας και καταβολή χρηματικού ποσού στον αρμόδιο φορέα. Η κάρτα εισάγεται στην αντίστοιχη υποδοχή του μηχανήματος
- Χρήση πιστωτικής κάρτας σε μηχανήμα του σταθμού την στιγμή της ενοικίασης

Βασικό τμήμα της λειτουργίας των BSS, είναι η ανακατανομή των ποδηλάτων μεταξύ των σταθμών. Κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι απαραίτητο να παρακολουθείται η κίνηση σε κάθε σταθμό και να προγραμματίζεται η αναδιανομή των ποδηλάτων ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Αυτό, διότι ορισμένοι σταθμοί τείνουν να αδειάζουν ενώ ταυτόχρονα σε άλλους παρατηρείται ανεπάρκεια του χώρου στάθμευσης. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με τη βοήθεια μικρών φορτηγών συνήθως καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου λειτουργίας και σίγουρα κατά το πέρας της. Η διαδικασία της αναδιανομής των ποδηλάτων αποτελεί λειτουργική απόφαση του συστήματος σε αντίθεση με τη ν επιλογή τοποθεσίας και αριθμού στόλου που χαρακτηρίζονται ως στρατηγικές αποφάσεις.

Η συντήρηση του συστήματος είναι επίσης πολύ σημαντική διότι εξασφαλίζει την ομαλή λειτουργία του. Είναι δυνατό να γίνει με τη συνεργασία της εκάστοτε δημοτικής αρχής και της εταιρίας που το εγκατέστησε. Στο πλαίσιο της συντήρησης οι υπηρεσίες που πρέπει να παρασχεθούν είναι συνοπτικά οι εξής:

- Τακτική συντήρηση του κάθε ποδηλάτου και του κάθε σταθμού.
- Καθημερινή ανακατανομή ποδηλάτων για λόγους αποσυμφόρησης συγκεκριμένων σταθμών και συμπλήρωσης ποδηλάτων σε άλλους με υψηλότερη ζήτηση.
- Συντήρηση του λογισμικού του κάθε σταθμού με προσθήκη νέων εκδόσεων και ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας τους ανάλογα την κάθε περίπτωση.

Το κεφάλαιο που απαιτείται να διατεθεί ώστε να κατασκευαστεί ένα Bike-sharing system εξαρτάται σε μεγάλο από την περιοχή εφαρμογής και όπως είναι φυσικό από το μέγεθος του συστήματος. Παίζει ιδιαίτερο ρόλο η μορφή του δαπέδου ή εδάφους όπου θα εγκατασταθεί ο σταθμός. Πολύ ενδεικτικά, εάν επεκτείνεται ένας υφιστάμενος σταθμός, ο χώρος για κάθε νέο ποδήλατο ανέρχεται στα 200-300 ευρώ. Όσο δυσχεραίνει το δάπεδο τόσο αυξάνει το μοναδιαίο κόστος εγκατάστασης. Στην περίπτωση μάλιστα που απαιτείται και διαπλάτυνση πεζοδρομίου, το κόστος εγκατάστασης δέκα θέσεων ανέρχεται στα 14.000 ευρώ. (*Bicycle Parking Manual*- the Danish Cyclist Federation).

Το κόστος συντήρησης και λειτουργίας ενός αυτοματοποιημένου συστήματος κοινόχρηστων ποδηλάτων εξαρτάται από το μέγεθος του συστήματος και ακόμη από το ύψος των ενοικίων κάθε σημείου εγκατάστασης. Πέρα από τον σταθμό, το κάθε ποδήλατο απαιτεί ετησίως για συντήρηση ένα ποσό που κυμαίνεται στα 150€ (DeMaio, 2011).

Στους παρακάτω δύο πίνακες φαίνονται ενδεικτικά το κόστος τοποθέτησης και λειτουργίας του BSS της Βαρκελώνης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΚΟΣΤΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΝΟΣ BIKE-SHARING SYSTEM, BICING ΒΑΡΚΕΛΩΝΗ (ΠΗΓΗ: OBIS HANDBOOK, 2011)

ΥΠΟΔΟΜΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ	ΜΕΡΙΔΙΟ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ
1. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΑΘΜΟΥ: ΤΕΡΜΑΤΙΚΟΙ, ΣΗΜΕΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΛΕΙΔΩΜΑΤΟΣ, ΣΤΑΘΜΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ, ΕΡΓΑΤΙΚΑ ΕΔΑΦΟΥΣ, ΚΑΛΩΔΙΩΣΗ	70%
2. ΠΟΔΗΛΑΤΑ	17%
3. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΡΓΑΣΙΩΝ	6%
4. ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ	5%
5. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ	2%

ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΚΟΣΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΝΟΣ BIKE-SHARING SYSTEM, BICING ΒΑΡΚΕΛΩΝΗ
(ΠΗΓΗ: OBIS HANDBOOK, 2011)

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ	ΜΕΡΙΔΙΟ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ
1. ΑΝΑΔΙΑΝΟΜΗ ΠΟΔΗΛΑΤΩΝ	30%
2. ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΠΟΔΗΛΑΤΩΝ	22%
3. ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΣΤΑΘΜΟΥ	20%
4. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ	14%
5. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ	13%
6. ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ	1%

1.2.3 ΕΠΙΚΡΑΤΟΥΣΕΣ ΤΑΣΕΙΣ, ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ

Η ευρεία διάδοση των ΣΕΠ έγινε εφικτή μετά την ανάπτυξη κατάλληλων λογισμικών συστημάτων αφενός για την ηλεκτρονική πληρωμή και αφετέρου για την παρακολούθηση των διαθέσιμων οχημάτων ή θέσεων ανά σταθμό. Ακόμη, τα συστήματα πλέον, ταυτοποιούν το χρήστη και ασφαλίζουν πιο αποτελεσματικά τα ποδήλατα στους σταθμούς και έτσι εξαλείφθηκαν φαινόμενα κλοπής ποδηλάτων. Τα σημερινά συστήματα ανήκουν στην τρίτη γενιά των bike-share schemes το χαρακτηριστικό της οποίας είναι η ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών.

Ενώ η τρίτη γενιά έφερε αυτοματισμούς, η τέταρτη αντλεί την υφιστάμενη εμπειρία για να σχεδιάσει συστήματα με αυξημένη αποτελεσματικότητα και χρηστικότητα που περιλαμβάνουν βελτιώσεις σε (μεταξύ άλλων): ενεργειακή τροφοδοσία Σταθμών, διανομή ποδηλάτων, ηλεκτρική υποβοήθηση του πεταλιού και δυναμικά συστήματα real time παρακολούθησης βασισμένα στην τεχνολογία των smartphones (Cyclopolis.gr).

Τα συστήματα κοινόχρηστων ποδηλάτων πρωτοεμφανίστηκαν στην Ολλανδία στα τέλη της δεκαετίας του 1960. Μέχρι σήμερα, που έχουν υιοθετηθεί από πολλές πόλεις σε παγκόσμιο επίπεδο, υπάρχει στη διεθνή βιβλιογραφία ένα σύνολο κανόνων εφαρμογής που εγγυώνται σε μεγάλο βαθμό την απόδοση του συστήματος. Έπειτα από παρατήρηση υφιστάμενων εγκαταστάσεων είναι να δυνατόν να προκύψουν συμπεράσματα για το αν η εκάστοτε επέμβαση ευνόησε ή όχι τη λειτουργία ενός συστήματος bike-share. Με τον όρο «απόδοση του συστήματος» δε νοείται

απαραίτητα η οικονομική απόδοση αυτού, αλλά γενικότερα, εάν ικανοποιεί τους πρωταρχικούς του στόχους.

ΕΙΚΟΝΑ 1: ΣΤΑΘΜΟΣ-VELIB, PARIS.



Μια καθοριστική παράμετρος, κατά πολλούς η πρώτη σε σημασία, για την επιτυχή λειτουργία ενός συστήματος κοινόχρηστων ποδηλάτων είναι η τοποθεσία των σταθμών. Ένα σύστημα σταθμών Bike-Sharing αποτελεί ένα δίκτυο, του οποίου οι κόμβοι είναι οι σταθμοί και οι συνδέσεις του είναι οι διαδρομές μεταξύ των σταθμών. Για την σωστή λειτουργία του δικτύου κρίνεται απαραίτητο οι κόμβοι και οι μεταξύ τους συνδέσεις να έχουν οριστεί έτσι ώστε να ικανοποιούν τους χρήστες του. Εμμέσως, συμπεραίνεται πως πρωτίστως πρέπει να οριστεί ποιοι θα είναι οι επικείμενοι χρήστες του συστήματος, άρα ποια ανάγκη τους ωθεί να μετακινούνται και ποια είναι τα χαρακτηριστικά αυτής της μετακίνησης. Βάσει αυτών των στοιχείων τοποθετούνται οι σταθμοί.

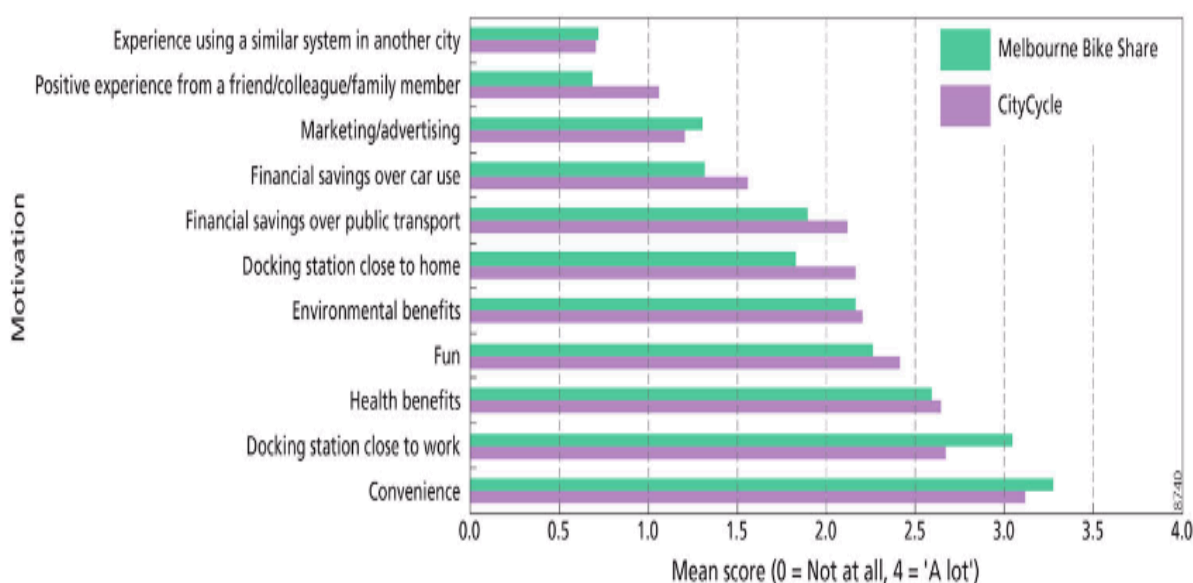
Σχετικά με την τοποθεσία ενός σταθμού, έχει διαπιστωθεί πως θα πρέπει να είναι σε ορατά και κεντρικά σημεία. Αυτό διευκολύνει τους χρήστες που δεν είναι εξοικειωμένοι με κάποια περιοχή. Επιπλέον, κατά πολλούς ένα εύκολα ορατό σημείο θεωρείται ασφαλές, σε αντίθεση με κάποιο απόμερο. Τέλος, οι σταθμοί γίνονται ελκυστικότεροι όταν βρίσκονται σε πολύ μικρή απόσταση από σημεία που συγκεντρώνουν κόσμο σε όλη τη διάρκεια της ημέρας. Τέτοια σημεία είναι υπηρεσίες, πανεπιστήμια, εμπορικά κέντρα, σταθμοί τραίνων ή Μετρό.

Ένα άλλο στοιχείο που επηρεάζει ιδιαίτερα την αποδοχή ή όχι του συστήματος BS είναι η πυκνότητα του δικτύου των σταθμών. Σε πόλεις που το δίκτυο είναι πυκνό,

εξυπηρετείται πρακτικά κάθε είδους μετακίνηση. Όσο πιο αραιά τοποθετούνται οι σταθμοί ενώνουν λιγότερα ζεύγη προέλευσης προορισμού.

Για την αποδοχή των χρηστών, θα πρέπει η απόσταση των σταθμών από τα σημεία προέλευσης-προορισμού να είναι μικρή. Αντίστοιχα, θα πρέπει και οι αποστάσεις μεταξύ αρχικού και τελικού σταθμού να βρίσκονται εντός συγκεκριμένων ορίων. Στην έρευνα των Fishman et al (2016), αναφέρεται πως οι χρήστες χρησιμοποιούν σταθμό, μόνο εάν αυτός βρίσκεται μέχρι 500 μέτρα από το σημείο προέλευσης ή προορισμού τους. Στη μελέτη των Li et al. (2009) προτείνεται πως οι χρήστες στην πλειοψηφία τους είναι σε θέση να υλοποιήσουν μια διαδρομή από 2 έως 4 χιλιόμετρα με ποδήλατο. Μικρότερες των δύο χιλιομέτρων αποστάσεις κρίνονται ασύμφορες όταν το δίκτυο δεν αναμένεται ιδιαίτερα πυκνό.

Πέρα από τη μορφή του δικτύου όπως σχολιάστηκε προηγουμένως, τα συστήματα Bike-and-Share, θα είναι αποτελεσματικά ως μέσα μεταφοράς εφόσον συνοδεύονται από αντίστοιχες πολιτικές προώθησης ποδηλάτου. Η παράμετρος αυτή αναφέρεται από τον De Maio (2011) ως ένα από τα βασικά σημεία που θα καθορίσουν την επιτυχία του συστήματος. Οι πολιτικές προώθησης ποδηλάτου σχετίζονται αφενός με την υποδομή για την ασφαλή κυκλοφορία των ποδηλάτων όπως είναι οι ποδηλατολωρίδες, θέσεις στάθμευσης, σήμανση, αφετέρου αναφέρονται σε κινήσεις που δίνουν προτεραιότητα στο ποδήλατο έναντι των άλλων μέσων. Οι πολιτικές αυτές εγγυώνται την ασφάλεια των ποδηλατών και των υπολοίπων χρηστών της οδού και παράλληλα καθιστούν το ποδήλατο ένα αξιόπιστο και γρήγορο μέσο. Επομένως, ένα τέτοιο σύστημα δε μπορεί παρά να είναι μέρος στρατηγικού σχεδιασμού για τις μεταφορές μιας πόλης ή μιας περιοχής.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2: ΛΟΓΟΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΜΕ ΠΟΔΗΛΑΤΟ ΣΤΗ ΜΕΛΒΟΥΡΝΗ ΚΑΙ ΤΗ ΜΠΡΙΣΜΕΗΝ (ΠΗΓΗ: FISHMAN ET AL.,2016)

Τέλος, η επιτυχία ενός συστήματος εξαρτάται από το αρχικό διαθέσιμο κεφάλαιο και η εμπειρία έχει δείξει πως η κοινοπραξία ιδιωτικού και δημόσιου τομέα προάγει τη βιωσιμότητα του συστήματος (DeMaio, 2011). Η συνεισφορά του ιδιωτικού τομέα σχετίζεται με την παροχή του απαραίτητου κεφαλαίου για τη κατασκευή λειτουργία και συντήρηση των σταθμών και ποδηλάτων. Ουσιαστικά οι ιδιωτικές εταιρίες είναι οι χορηγοί αυτών των συστημάτων που διαχειρίζονται από δημόσιους φορείς.

1.2.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Τα bike-sharing systems έγιναν δημοφιλή γιατί συνοδεύονται από ορισμένα πλεονεκτήματα έναντι των ιδιωτικών ποδηλάτων. Ως προς το ίδιο το ποδήλατο, είναι λειτουργικό και για τα δύο φύλα με ρυθμιζόμενο ύψος σέλας κι ανταποκρίνεται έτσι σε όλους τους πιθανούς χρήστες. Ακόμη, το χρώμα και ο εξοπλισμός (μπροστινό-οπίσθιο φως, προειδοποιητικό κουδουνάκι) των ποδηλάτων τα καθιστούν ασφαλή κατά τις νυχτερινές ώρες. Επιπλέον εξοπλισμός, όπως ανθεκτικό κι ευρύχωρο καλάθι, φτερά-λασπωτήρες υπάρχει εξ αρχής σε αυτά, διευκολύνοντας τους χρήστες.

Η εξυπηρέτηση μέσω δημόσιων ποδηλάτων αντί της αγοράς ενός ιδιωτικού, είναι πολύ πιο συμφέρουσα. Τα πρώτα σε ετήσια βάση κοστίζουν περί τα 30€, ενώ η αγορά ποδηλάτου είναι πολύ πιο ακριβή και αυξάνεται λόγω της συντήρησης και της αγοράς εξοπλισμού. Ειδικά στην περίπτωση όπου το δίκτυο είναι πυκνό, οι συνδρομητές των BSS μετακινούνται γρήγορα και ευέλικτα οπουδήποτε μέσα στην πόλη.

Συνολικά, πέρα από την συνειδητή προσπάθεια από μέρους της πολιτείας να περιορίσει τη χρήση του αυτοκινήτου με τα όσα οφέλη επιφέρει αυτή η κίνηση, προσφέρει σε όλους τους πολίτες ανεξαιρέτως ένα ακόμη τρόπο δημόσιας μετακίνησης. Η εφαρμογή και λειτουργία των BSS έχει δηλαδή και κοινωνικό σκέλος. Το ιδιωτικό ποδήλατο δεν είναι εφικτό οικονομικά για όλους όπως αναλύθηκε προηγουμένως, σε αντίθεση με τα κοινόχρηστα ποδήλατα.

Ειδικότερα δε, εάν τα τελευταία, εξοπλιστούν με ηλεκτρική υποβοήθηση, αυτομάτως γίνονται κατάλληλα για ακόμη μεγαλύτερο πλήθος χρηστών. Για παράδειγμα, η ηλεκτρική υποβοήθηση απευθύνεται σε άτομα που για ποικίλους λόγους η φυσική τους κατάσταση τους περιορίζει στο να επιλέξουν να μετακινηθούν με ποδήλατο, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των ηλικιωμένων. Τα ηλεκτρικά ποδήλατα μπορούν ακόμη να χρησιμοποιηθούν σε περιοχές με έντονο λοφώδες ανάγλυφο.

Επιπλέον, κατά το Βλαστό (2012), η εφαρμογή του συστήματος των κοινόχρηστων ποδηλάτων δε διευκολύνει μόνο τη καθημερινότητα των κατοίκων μιας πόλης αλλά αποτελεί κι ένα χρήσιμο «εργαλείο» για κάθε τουρίστα που έχει ως στόχο την ανακάλυψη σημείων στη πόλη στα οποία δε προσεγγίζουν τα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς, με οικονομικό κι ευχάριστο τρόπο.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3: ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΚΟΙΝΟΧΡΗΣΤΩΝ ΠΟΔΗΛΑΤΩΝ ΣΤΟΝ ΑΣΤΙΚΟ ΙΣΤΟ- ΠΗΓΗ VASSI AND VLASTOS (2014)

1.3 Η ΈΝΝΟΙΑ ΤΟΥ «BIKE&RIDE»

Το bike&ride αναφέρεται στην συνδυασμένη μετακίνηση με ποδήλατο και δημόσια συγκοινωνία. Σταθμοί και στάσεις μέσων δημόσιας αστικής ή υπεραστικής συγκοινωνίας προσφέρουν χώρο στάθμευσης ποδηλάτων ώστε οι χρήστες των Μ.Μ.Μ. να προσέρχονται στις στάσεις με ποδήλατο ή να αποχωρούν από αυτές με αυτό τον τρόπο. Για να είναι αυτό εφικτό αλλά και ελκυστικό στο κοινό θα πρέπει οι χώροι στάθμευσης να είναι λειτουργικοί, να προσφέρουν ασφάλεια και προστασία από τις καιρικές συνθήκες.

Το πιο σύνηθες είναι το ποδήλατο να τροφοδοτεί συγκεκριμένες στάσεις μέσων μαζικής μεταφοράς, που έχουν κατάλληλο χώρο στάθμευσης ποδηλάτων, και αυτές μπορεί να είναι λεωφορειακές στάσεις, σταθμοί Μετρό ή τραίνου. Στην περίπτωση

αυτή, γίνεται λόγος για access trip, δηλαδή πρόσβαση στο μέσο. Το αντίθετο είναι γνωστό με τον όρο egress trip, αποχώρηση από το μέσο. Η τάση αυτή προωθείται στα πλαίσια ελάττωσης της χρήσης αυτοκινήτου και έχει τις ρίζες στην Ολλανδία, παρόλο που πλέον έχει λάβει διεθνείς διαστάσεις. Το ποδήλατο είναι πολύ πιο αποτελεσματικό, γρήγορο και ευέλικτο σε σχέση με το περπάτημα ή τη δημόσια συγκοινωνία όταν πρόκειται να χρησιμοποιήσει κανείς σταθμούς μετρό ή τραίνου (προαστιακού σιδηρόδρομου). Έτσι, ένα ορθά σχεδιασμένο σύστημα συγκοινωνίας βασισμένο στην συνδυασμένη χρήση ποδηλάτου και Μ.Μ.Μ. θα μπορούσε να ανταγωνιστεί το αυτοκίνητο (Keijer and Rietveld, 2000; Brunsing, 1997).

ΕΙΚΟΝΑ 2: ΣΤΑΘΜΟΣ ΜΕ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ BIKE&RIDE- ΠΗΓΗ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ



Το κύριο μειονέκτημα του bike&ride είναι πως η μετακίνηση με ποδήλατο συμβαίνει μονάχα στο ένα άκρο της συνολικής διαδρομής. Είτε κάποιος θα προσέλθει με ποδήλατο σε σταθμό για να επιβιβαστεί στο τρένο, είτε θα αφήνει ποδήλατο στον σταθμό αποβίβασης για να φτάσει με αυτό στον τελικό του προορισμό. Το ιδανικό θα ήταν να υπάρχει ποδήλατο και στα δύο άκρα της διαδρομής.

Οι Martens et al. (2004) ανέλυσαν δεδομένα σχετικά με τις ημερήσιες μετακινήσεις κατοίκων τριών χωρών της Ολλανδίας, Γερμανίας και Αγγλίας με σκοπό να προσδιορίσουν τα χαρακτηριστικά των διαδρομών και των χρηστών του bike&ride. Καθεμία από τις χώρες προσφέρει τη δυνατότητα B&R, αλλά σε διαφορετικό ποσοστό

και με τελείως διαφορετικές πολιτικές προώθησης της ποδηλασίας γενικότερα, χωρίς όμως αυτό να επηρεάζει τα χαρακτηριστικά των μετακινούμενων. Ένα από τα συμπεράσματα ήταν πως αυτή η μορφή μετακίνησης επιλέγεται από εργαζόμενους και φοιτητές-μαθητές, δηλαδή άτομα που κάνουν σε καθημερινή βάση συγκεκριμένη μετακίνηση και αναζητούν το πιο οικονομικό και ταυτόχρονα γρήγορο τρόπο για αυτή. Σε κάθε περίπτωση πάντως οι μετακινούμενοι διατίθενται να καλύψουν αποστάσεις της τάξης των 2-4 χιλιομέτρων με το ποδήλατο. Ένα ακόμη σημαντικό συμπέρασμα της ίδιας έρευνας είναι πως η ιδιοκτησία αυτοκινήτου δεν αποτελεί παράγοντα αποφυγής του ποδηλάτου, αρκεί η προτίμηση του τελευταίου να είναι συμφέρουσα. Το οποίο δηλώνει πως το αυτοκίνητο μπορεί να αντικατασταθεί ευκολότερα από ότι θεωρείται. Τέλος, η ανάλυση των δεδομένων έδειξε πως σε περιοχές όπου η δημόσια συγκοινωνία δεν είναι τόσο τακτική, όπως τα προάστια, το bike&ride επιλέγεται σε μεγαλύτερο ποσοστό από το κέντρο της πόλης.

1.4 Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

Ο Δήμος Κερκυραίων έθεσε σε λειτουργία το πρώτο Σύστημα Κοινόχρηστων Ποδηλάτων στην Ελλάδα, το 2010, έχοντας ως παράδειγμα αντίστοιχα ευρωπαϊκά προγράμματα. Το σύστημα της Κέρκυρας είναι πλήρως αυτοματοποιημένο κάτι που δεν ισχύει για όλους τους Δήμους που ακολούθησαν. Για παράδειγμα, στη Ναύπακτο και στη Ν. Ερυθραία Αττικής, όπου τα BSS δεν είναι αυτοματοποιημένα, οι χρήστες αναγκάζονται να χρησιμοποιούν τις δημοτικές υπηρεσίες προκειμένου να καταβάλουν το αντίτιμο της εκμίσθωσης.

Μέχρι σήμερα ο αριθμός των Δήμων ανά τη χώρα, στους οποίους λειτουργούν bike-share schemes, έχει ξεπεράσει τους είκοσι. Στην αύξηση αυτή συνέβαλε καθοριστικά το Πράσινο Ταμείο και δευτερευόντως, οι δύο εταιρείες που δραστηριοποιούνται στο χώρο αυτό, η EasyBike και η Cyclopolis. Η χρηματοδότηση έγινε σε όλες τις περιπτώσεις από τους ίδιους πόρους του Ταμείου και η υλοποίηση πραγματοποιήθηκε από τους δικαιούχους Δήμους.

Η EasyBike ασχολείται με την παροχή εξοπλισμού για την εγκατάσταση και τη λειτουργία του συστήματος κοινόχρηστων ποδηλάτων. Τα προϊόντα της χαρακτηρίζονται από εργονομία και υψηλή ποιότητα. Τα επιμέρους στοιχεία του συστήματος είναι τα ποδήλατα, οι σταθμοί μίσθωσης, οι βάσεις στάθμευσης των οχημάτων πλησίον των σταθμών και τέλος το λογισμικό διαχείρισης και χρέωσης των υπηρεσιών (πηγή easybike.gr). Το συνολικό κόστος που απαιτείται για την εγκατάσταση κάθε συστήματος είναι ανάλογο με την έκδοση των μοντέλων που χρησιμοποιούνται, πέρα από το μέγεθος του αυτού. Ενδεικτικά αναφέρεται πως

στους Δήμους Αιγιαλείας και Αρχαίας Ολυμπίας το κόστος του ενός ποδηλάτου, σύμφωνα με την προσκόμιση των σχετικών δικαιολογητικών εκτιμήθηκε στα 390€.

Όσον αφορά στους δήμους της Αττικής, Αυτοματοποιημένα Συστήματα με Κοινόχρηστα Ποδήλατα υπάρχουν στο δήμο Μαραθώνα-Νέας Μακρής, στο Μαρούσι, στο Μοσχάτο, στη Νέα Σμύρνη, στο Κερατσίνι και στη Νέα Ερυθραία, όπου εκεί συγκεκριμένα δεν είναι αυτοματοποιημένο. Το πλήθος των ποδηλάτων και των σταθμών που έχουν εγκατασταθεί, διαφέρει στις παραπάνω περιοχές, καθώς αυτές παρουσιάζουν ανομοιομορφία ως προς αρκετά χαρακτηριστικά, όπως η καταλληλότητα του οδικού δικτύου και οι χρήσεις γης που αναπτύσσονται. Προσεγγιστικά, υπάρχουν από τέσσερις έως έξι σταθμοί με τουλάχιστον δέκα ποδήλατα ανά σταθμό. Θα πρέπει να σημειωθεί πως, όπου είναι εφικτό, ένας τουλάχιστον σταθμός τοποθετείται πλησίον στάσης Μέσων Μαζικής Μεταφοράς ώστε να το ένα σύστημα να συμβαδίζει με το άλλο. Τα υπόλοιπα σημεία παραλαβής-απόθεσης ποδηλάτων βρίσκονται σε τοπικά-υπερτοπικά κέντρα του εκάστοτε Δήμου, όπως για παράδειγμα σε πλατείες, πολιτιστικά ή αθλητικά κέντρα, δημόσιες υπηρεσίες.

Η προαναφερθείσα αντιμετώπιση γίνεται με γνώμονα τα πολεοδομικά χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής και είναι ιδιαίτερα συντηρητική, αφού είναι αμφιλεγόμενη η μακροπρόθεσμη αποδοχή από τους πολίτες. Άλλωστε, η ανάπτυξη bikes schemes ήταν πιλοτική στην πλειοψηφία των περιπτώσεων. Επιπλέον, είναι φανερό από τη θέση των σταθμών στο χάρτη πως η χρήση αρκετών εξ αυτών έχει σχεδιασθεί να είναι η εξής: οι ενδιαφερόμενοι παραλαμβάνουν ένα ποδήλατο από τον σταθμό και πραγματοποιούν μια σύντομη διαδρομή στην εμβέλεια αυτού και η μετακίνηση τερματίζεται επιστρέφοντας το ποδήλατο στον ίδιο σταθμό. Άρα η τοποθέτηση Bike Stations δεν αποσκοπεί κατ' ανάγκη στη δημιουργία άκρων μετακίνησης, δηλαδή στην εξυπηρέτηση ροών μεταξύ σημείων προέλευσης προορισμού.

Ένα διαφωτιστικό παράδειγμα αποτελεί το σύστημα BS στον Κεραμικό (Γκάζι), που είναι και ο πρώτος του Δήμου Αθηναίων. Υπάρχει ένας σταθμός με δέκα ποδήλατα. Η ανυπαρξία άλλου σταθμού στην ευρύτερη περιοχή δηλώνει πως τα ποδήλατα προσφέρονται για μια περιήγηση στην περιοχή κάλυψης του σταθμού και επιστροφή στο σημείο έναρξης.

Δεδομένου ότι στους εν λόγω Δήμους δεν υπάρχει ολοκληρωμένο και συμπαγές δίκτυο ποδηλατοδρόμων ικανό να υποστηρίξει την ευρεία χρήση των ποδηλάτων, η προσέγγιση που εφαρμόστηκε για τη χωροθέτηση των σταθμών, κρίνεται λογική. Οι θέσεις παραλαβής των ποδηλάτων έπρεπε να είναι σε κεντρικά, γνωστά και χαρακτηριστικά σημεία της κάθε περιοχής. Έτσι, οι χρήστες του συστήματος έχουν

ξεκάθαρη εικόνα της τοποθεσίας των σταθμών άρα και των διαδρομών που μπορούν να πραγματοποιήσουν με τα κοινόχρηστα ποδήλατα.

Εφόσον το σύστημα δημόσιων ποδηλάτων επεκταθεί, η χωροθέτηση των νέων εγκαταστάσεων ή η αύξηση της δυναμικότητας των υφιστάμενων, θα πρέπει να αποτελούν μέρος στρατηγικού σχεδιασμού. Μονάχα έτσι θα επιτευχθεί σωστή κατανομή των πόρων, θα ικανοποιηθεί η ζήτηση και θα μπορέσει το ποδήλατο να πάρει ρόλο ισάξιο των λοιπών μέσων μεταφοράς στον τομέα των αστικών μετακινήσεων. Για το σκοπό αυτό, θα πρέπει να είναι ξεκάθαρο ποια πληθυσμιακή ομάδα αποσκοπεί να εξυπηρετήσει η χωροθέτηση σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων και κατ' επέκταση ποια σημεία θα συνδέσει ή ποιες περιοχές θα καλύπτει. Η αντιμετώπιση διαφοροποιείται σημαντικά ανά περίπτωση. Για παράδειγμα, οι τουρίστες έχουν χαρακτηριστικά διαφορετικές ανάγκες από τους μετακινούμενους προς και από την εργασία (commuters) κάποιες εκ των οποίων αφορούν στην ώρα αιχμής της ζήτησης, που με την σειρά της επηρεάζει την αναδιανομή των ποδηλάτων, στις αποστάσεις μεταξύ των σταθμών ακόμα και στην πολιτική χρέωσης (Palomares, 2013).

Η Αθήνα είναι μια πόλη με σοβαρά κυκλοφορικά προβλήματα. Το οδικό της δίκτυο κρίνεται γενικά ανεπαρκές για το πλήθος των ιδιωτικών αυτοκινήτων, όπως επίσης ανεπαρκείς είναι οι διαθέσιμοι χώροι στάθμευσης. Το αποτέλεσμα είναι η περιβαλλοντική, ηχητική και αισθητική όχληση. Παρόλα αυτά, το ένα τρίτο των διαδρομών που εκτελούνται καθημερινά στην Αθήνα, έχουν μήκος που κυμαίνεται στα δύο χιλιόμετρα και κάλλιστα τμήμα αυτών θα μπορούσε να αντικατασταθεί με ποδήλατο (Βλαστός, 2006). Λαμβάνοντας υπόψη την παρατηρούμενη μείωση του αριθμού των ιδιωτικών αυτοκινήτων και μοτοσυκλετών, από την αρχή της κρίσης μέχρι και σήμερα (Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία, 2016) το ποδήλατο είναι μια οικονομική εναλλακτική. Τα οφέλη αυτής της αλλαγής, εφόσον υλοποιηθεί, αναμένονται θετικά για το περιβάλλον, τον ατμοσφαιρικό αέρα αλλά και την εικόνα της πόλης.

Τα συστήματα κοινόχρηστων ποδηλάτων που έχουν υλοποιηθεί σε διάφορους Δήμους της Αττικής αλλά και της υπόλοιπης Ελλάδας, ικανοποιούν την ζήτηση για ενδοδημοτικές μετακινήσεις. Ιδιαίτερα όμως στα προάστια, υπάρχει σε καθημερινή βάση μεγάλη ροή επιβατών προς το μετρό. Η ζήτηση αυτή καλύπτεται είτε μέσω λεωφορειακών γραμμών που εξυπηρετούν την κάθε περιοχή είτε με το ιδιωτικό αυτοκίνητο. Η υλοποίηση ενός συστήματος κοινόχρηστων ποδηλάτων με στόχο τη λειτουργία bike & ride, θα αποτελέσει εναλλακτική μορφή μετακίνησης, η οποία με σωστό σχεδιασμό μπορεί να ανταγωνιστεί το αυτοκίνητο και σίγουρα να δώσει λύση στο πρόβλημα της δημόσιας λεωφορειακής συγκοινωνίας.

Συνολικά λοιπόν, στην Ελλάδα και κατ' επέκταση στην Αθήνα η τόνωση την δημόσιας με ένα νέο μέσο, ευέλικτο και οικονομικό μπορεί να αποφέρει ορισμένα πλεονεκτήματα στην πόλη.

1.5 ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η συγκεκριμένη Διπλωματική Εργασία ασχολείται με την διατύπωση ενός μαθηματικού μοντέλου για τη χωροθέτηση σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων στην Αθήνα, που θα εξυπηρετούν την κίνηση προς και από τους σταθμούς του Μετρό. Οι σταθμοί ποδηλάτων στο Μετρό αποτελούν εγκαταστάσεις Bike&Ride όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, και πρωτεύων στόχος της παρούσας προσέγγισης είναι η αντιμετώπιση του προβλήματος της αποχώρησης από το μέσο (egress trip) που αποτελεί το κύριο μειονέκτημα των εν λόγω εγκαταστάσεων. Δευτερευόντως, επιδιώκεται ολοκληρωμένη παρουσίαση μιας μεθοδολογίας για τη δημιουργία ενός δικτύου σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων του οποίου η λειτουργία αναμένεται να τροφοδοτεί το Μετρό.

Η μεθοδολογία που αναπτύσσεται προσδιορίζει τις βέλτιστες θέσεις για τη χωροθέτηση σταθμών Bike-sharing, τόσο στο δίκτυο του μετρό, όσο και στην περιοχή κάλυψης αυτού. Η επιλογή αυτών των σημείων πραγματοποιείται με στόχο την εξυπηρέτηση της ζήτησης κάνοντας βέλτιστη διανομή των πόρων και περιορίζοντας το κόστος μετακίνησης. Το μοντέλο εφαρμόζεται στο δίκτυο του Μετρό της Αθήνας. Συγκεκριμένα, ως περιοχή μελέτης ορίζεται το τμήμα της γραμμής 3 του Μετρό (μπλε γραμμή) μεταξύ των σταθμών Δουκίσσης Πλακεντίας-Συντάγματος. Βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων χωροθέτησης επιλέγονται οι υποψήφιες θέσεις για την παραλαβή/απόθεση ποδηλάτων στην ακτίνα επιρροής των σταθμών.

1.6 ΔΟΜΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

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

Κεφάλαιο 1: αποτελεί το εισαγωγικό κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας όπου γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των συστημάτων κοινόχρηστων ποδηλάτων και της έννοιας της συνδυασμένης μετακίνησης Bike&Ride. Έπειτα, εξηγείται ο σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας.

Κεφάλαιο 2: στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αρχικά εισαγωγή στην έννοια της χωροθέτησης εγκαταστάσεων. Στην συνέχεια, ακολουθεί η παρουσίαση οκτώ

μοντέλων χωροθέτησης καθώς και μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τη χωροθέτηση σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων. Στο τέλος του κεφαλαίου επιλέγεται το κατάλληλο μοντέλο για την επίλυση του παρόντος προβλήματος.

Κεφάλαιο 3: στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται η συλλογή των δεδομένων του προβλήματος. Σύμφωνα με κατάλληλα κριτήρια προσδιορίζονται στο υπό μελέτη τμήμα της Αττικής οι υποψήφιες θέσεις χωροθέτησης σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων και τα χαρακτηριστικά αυτών.

Κεφάλαιο 4: στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η επέκταση και τροποποίηση του μαθηματικού μοντέλου χωροθέτησης που επιλέχθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο, ώστε να ενσωματώνει τις ανάγκες του συγκεκριμένου προβλήματος χωροθέτησης. Αναλύεται επίσης, ο τρόπος με τον οποίο εισάγονται τα δεδομένα στο μοντέλο και ακόμη, ποια είναι τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Στο τέλος του κεφαλαίου, παρουσιάζεται το εργαλείο επίλυσης που θα χρησιμοποιηθεί.

Κεφάλαιο 5: στο κεφάλαιο αυτό συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα επίλυσης του μαθηματικού μοντέλου. Πέρα από την παράθεση αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου και για ο σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν και εξετάστηκαν διαφορετικά σενάρια.

Κεφάλαιο 6: αυτό είναι και το τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας, όπου γίνεται μια σύνοψη της διαδικασίας για την αντιμετώπιση και επίλυση του προβλήματος χωροθέτησης. Στο τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

2.1 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ

Το συγκεκριμένο πρόβλημα χωροθέτησης εντάσσεται στην ευρύτερη κατηγορία των Facility Location Problems (FLP).

Η χωροθέτηση εγκαταστάσεων (facility location) αποτελεί ένα σύνηθες πρόβλημα στη διαδικασία της λήψης αποφάσεων και, συνεπώς, απαντάται και στην επιχειρησιακή έρευνα. Πρόκειται για στρατηγική απόφαση ή με άλλα λόγια μέρος στρατηγικού σχεδιασμού, διότι η τοποθεσία μιας εγκατάστασης θα καθορίσει τη μετέπειτα πορεία και λειτουργία της. Η επιλογή χωροθέτησης εγκαταστάσεων μπορεί να διεκπεραιωθεί αποτελεσματικά με τη χρήση μοντέλων βελτιστοποίησης τα οποία είναι διεθνώς γνωστά με την ονομασία facility location models. Κατά τους ReVelle and Eiselt (2008), Daskin (2008, 1995), οι μεταβλητές απόφασης αυτών των μοντέλων εκφράζουν τη χωρητικότητα, την τοποθεσία, την περιοχή κάλυψης μιας οποιασδήποτε εγκατάστασης, επομένως και ενός συστήματος bike-sharing.

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

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

Στο τομέα των μεταφορών, οι βασικότεροι στόχοι ενός προβλήματος βελτιστοποίησης είναι αφενός η μείωση του κόστους και του χρόνου μετακίνησης, που βέβαια στο κόστος μπορεί να συμπεριλαμβάνεται η έννοια του χρόνου, κι αφετέρου η αύξηση της ποσότητας των αγαθών που μετακινούνται χρησιμοποιώντας το υπό μελέτη δίκτυο. Ανάλογα πάλι το είδος του προβλήματος, τα αγαθά αντιπροσωπεύουν αντικείμενα ή άτομα.

Για την επίλυση των προβλημάτων χωροθέτησης αναπτύσσεται ένα κατάλληλο μοντέλο βελτιστοποίησης, που αποτελείται από την αντικειμενική συνάρτηση, τους περιορισμούς και τις μεταβλητές. Η αντικειμενική συνάρτηση μεγιστοποιείται ή ελαχιστοποιείται, κάτι που εξαρτάται από τον απώτερο σκοπό του προβλήματος. Χωρίς να είναι απολύτως δεσμευτικό, συνηθίζεται να γίνεται ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης σε περιπτώσεις όπου η χωροθέτηση σχετίζεται με το δημόσιο τομέα, ενώ αυτή μεγιστοποιείται όταν εμπλέκεται κάποιος ιδιωτικός φορέας. Η εξήγηση είναι πως οι ιδιωτικές εταιρίες αποσκοπούν στην μεγιστοποίηση των κερδών τους χωρίς απαραίτητα να καλύπτεται η συνολική ζήτηση, σε αντίθεση με τους δημόσιους φορείς που δεσμεύονται να εξυπηρετήσουν όλους τους πιθανούς χρήστες. Μάλιστα, στην ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης αποζητείται η ελαχιστοποίηση του κόστους μετακίνησης.

Κατά τους Rahman and Smith (2000), κάθε πρόβλημα χωροθέτησης μπορεί να αντιμετωπιστεί με διαφορετικούς τρόπους και κατ' αυτό τρόπο μεταβάλλονται οι πρακτικές επίλυσης λόγω των διαφορετικών προτύπων χωροθέτησης-κατανομής (location-allocation models) που εφαρμόζονται κάθε φορά. Υπάρχει όμως ένα γενικότερο μεθοδολογικό πλαίσιο, το οποίο εφαρμόζεται στα περισσότερα προβλήματα χωροθέτησης και ακολουθεί τα εξής στάδια εφαρμογής:

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

Τα μοντέλα χωροθέτησης είναι δύσκολο να επιλυθούν, τουλάχιστον κατά το βέλτιστο τρόπο. Στις περιπτώσεις όπου υπεισέρχονται πολλές μεταβλητές, γίνονται δυσεπίλυτα ακόμη και τα βασικά μοντέλα. Επιπλέον, τα μοντέλα αυτά είναι πλήρως ορισμένα, μιας και η δομική τους μορφή, δηλαδή η αντικειμενική συνάρτηση, οι μεταβλητές και οι περιορισμοί καθορίζονται από το συγκεκριμένο πρόβλημα που διερευνάται. Κατά

συνέπεια, δεν υπάρχει κάποιο μαθηματικό μοντέλο γενικής μορφής που να ενδείκνυται για κάθε περίπτωση χωροθέτησης. Για το λόγο αυτό στην συνέχεια θα αναλυθούν τα βασικά μοντέλα χωροθέτησης και θα επιλεγεί αυτό που ανταποκρίνεται καλύτερα στις ανάγκες αυτής της εργασίας.

2.1.1 ΒΑΣΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ

Σε αυτή την υποενότητα θα παρουσιαστούν 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 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. Γίνεται αντιληπτό πως η απόσταση μεταξύ των χωροθετημένων εγκαταστάσεων είναι καθοριστικής σημασίας, όπως επίσης είναι και ορισμένα ακόμη χαρακτηριστικά, όπως ο χρόνος και το κόστος μιας διαδρομής ή η ικανοποίηση της ζήτησης.

Στα προβλήματα το δίκτυο είναι γνωστό και χωροθετούνται εγκαταστάσεις με απώτερο σκοπό τη βελτιστοποίηση κάποιου στόχου.

ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ (MAXIMUM DISTANCE MODELS)

Σε κάποια προβλήματα χωροθέτησης η μέγιστη απόσταση είναι γνωστή εκ των προτέρων. Στη βιβλιογραφία της χωροθέτησης εγκαταστάσεων αυτή η a priori δεδομένη μέγιστη απόσταση αναφέρεται ως «καλυπτόμενη» απόσταση, ενώ η ζήτηση εντός της καλυπτόμενης απόστασης την κοντινότερης εγκατάστασης ονομάζεται «καλυμμένη» (Hamacher&Drezner, 2002). Σημαντική υπόθεση αυτού του μέτρου της μέγιστης απόστασης αποτελεί πως η ζήτηση ικανοποιείται όταν η εγκατάσταση είναι εντός αυτής, δεν ικανοποιείται όμως στην αντίθετη περίπτωση.

ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΣΥΝΟΛΟΥ ΚΑΛΥΨΗΣ (SCLP- SET COVERING LOCATION PROBLEM)

Το πρόβλημα συνόλου κάλυψης αποτελεί το πρώτο πρόβλημα κάλυψης τοποθεσίας (Toregas et al. 1971). Βασικός στόχος αυτού είναι η χωροθέτηση του ελάχιστου αριθμού εγκαταστάσεων ώστε να καλυφθεί όλη η ζήτηση των κόμβων. Για τη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος αυτού είναι απαραίτητος ο καθορισμός των παρακάτω δεδομένων και συνόλων.

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

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

D_{ij} = η απόσταση μεταξύ των ij ,

D_c = η απόσταση κάλυψης

$N_i = \{ J | d_{ij} < d_c \}$ το σύνολο όλων των υποψήφιων θέσεων που μπορούν να καλύψουν την ζήτηση στο i

Και η μεταβλητή απόφαση που λαμβάνει μόνο τις τιμές 0 και 1

$X_j = 1$ εάν η εγκατάσταση χωροθετηθεί στο j , αλλιώς 0.

Με τους παραπάνω συμβολισμούς, το πρόβλημα συνόλου κάλυψης μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$\text{Minimize: } \sum_{j \in J} x_j \quad (1)$$

s.t.:

$$\sum_{j \in N_i} x_j \geq 1 \forall i \in I \quad (2)$$

$$x_j \in \{0,1\} \forall j \in J \quad (3)$$

Στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης (1) είναι η ελαχιστοποίηση του αριθμού των εγκαταστάσεων που θα χωροθετηθούν. Ο περιορισμός (2) επιβεβαιώνει το γεγονός πως κάθε κόμβος ζήτησης καλύπτεται από μια τουλάχιστον εγκατάσταση, ενώ ο περιορισμός (3) ενισχύει την απόφαση χωροθέτησης με ένα ναι ή όχι. Στην περίπτωση που συμπεριληφθούν στην ΑΣ συγκεκριμένα κόστη χωροθέτησης ως συντελεστές των μεταβλητών απόφασης, τότε αυτή μπορεί να γενικευτεί και ο απώτερος σκοπός θα είναι πλέον η ελαχιστοποίηση του σταθερού κόστους της διαμόρφωσης της χωροθέτησης.

Σύμφωνα με τους Carey&Johnson (1979) και οι δύο παραπάνω εκδοχές του μοντέλου συνόλου κάλυψης είναι NP-hard (not deterministic polynomial time-hard), δηλαδή προβλήματα τουλάχιστον τόσο «δύσκολα» όσο οποιοδήποτε πρόβλημα κλάσης NP.

Στην τελευταία περιλαμβάνονται όλα τα προβλήματα των οποίων η λύση μπορεί να επαληθευτεί πολυωνυμικά (verifiable).

Οι περιορισμοί του μοντέλου συνόλου κάλυψης προϋποθέτουν πως κάθε σημείο ζήτησης καλύπτεται από μια αντίστοιχη εγκατάσταση. Στην πραγματικότητα όμως, αυτή η απαίτηση μπορεί να είναι υλοποιήσιμη με τη χωροθέτηση πολλών εγκαταστάσεων, κάτι που ενδέχεται να μην είναι οικονομικά βιώσιμο. Επιπλέον, έχει αναπτυχθεί μια πληθώρα από κανόνες για την ελάττωση του μεγέθους του πίνακα που εκφράζει το πρόβλημα (Daskin, 1995). Το μοντέλο αυτό σύμφωνα με τη διατύπωση που προηγήθηκε μέσω των σχέσεων (1)-(3), υποθέτει πως οι υποψήφιος θέσεις εγκατάστασης βρίσκονται στους κόμβους ενός δικτύου. Ένα σχέδιο χωροθέτησης χαμηλότερου κόστους θα ήταν εφικτό στην περίπτωση που οι εγκαταστάσεις χωροθετούνταν κατά μήκος των τόξων του δικτύου.

Οι Church&Meadows (1979) παρουσίασαν μια μέθοδο τροποποίησης του αρχικού δικτύου, με τρόπο τέτοιο ώστε να επιτρέπεται η χωροθέτηση εγκαταστάσεων σε οποιοδήποτε σημείο κατά των τόξων του δικτύου, εξακολουθώντας να επιλύουν το πρόβλημα χρησιμοποιώντας τη διατύπωση (1)-(3). Η μέθοδος αυτή αυξάνει κατά έναν πεπερασμένο αριθμό κόμβων το αρχικό δίκτυο, οι οποίοι χωροθετούνται κατά μήκος των τόξων του δικτύου.

ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΑΛΥΨΗΣ (MCLP- MAXIMAL COVERING LOCATION PROBLEM)

Το πρόβλημα του συνόλου κάλυψης που διατυπώθηκε παραπάνω βασίζεται στην παραδοχή πως όλοι οι κόμβοι ζήτησης πρέπει να εξυπηρετηθούν, ανεξαρτήτως κόστους. Καθώς αυτή η παραδοχή δεν είναι ρεαλιστική σε πολλές περιπτώσεις, αφού το σύνηθες είναι να λαμβάνεται υπόψη ο προϋπολογισμός. Για το σκοπό αυτό διατυπώθηκε το πρόβλημα μέγιστης κάλυψης, από τους Church&ReVelle (1974), για τη χωροθέτηση ενός προκαθορισμένου αριθμού εγκαταστάσεων έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η ζήτηση.. Ο αριθμός αυτός συμβολίζεται με p . Ουσιαστικά, το συγκεκριμένο μοντέλο απευθύνεται σε στον σχεδιασμό εγκαταστάσεων οι οποίες έχουν ένα ανώτατο όριο στον αριθμό των μονάδων που θα χωροθετηθούν. Επομένως, είναι γνωστό πως ίσως δεν καλυφθεί όλη η ζήτηση, επιδιώκεται όμως η κάλυψη του μέγιστου δυνατού ποσοστού.

Για τη διατύπωση αυτού του μοντέλου προστίθενται στα δεδομένα που εισήχθησαν στο set covering problem, τους εξής όρους:

h_i = η ζήτηση στον κόμβο i ,

p = ο αριθμός των εγκαταστάσεων προς χωροθέτηση

$z_i = 1$ εάν ο κόμβος ζήτησης i καλύπτεται, 0 εάν όχι

$$\text{Maximize: } \sum_{i \in I} z_i h_i \quad (4)$$

s.t.:

$$\sum_{j \in N_i} x_j - z_i \geq 0 \forall i \in I \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = p \quad (6)$$

$$x_j \in \{0,1\} \forall j \in J \quad (7)$$

$$z_i \in \{0,1\} \forall i \in I \quad (8)$$

Στόχος την αντικειμενικής συνάρτησης (4) είναι η μεγιστοποίηση των κόμβων ζήτησης i που θα εξυπηρετηθούν, άρα επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της καλυπτόμενης ζήτησης. Ο περιορισμός (5) εξασφαλίζει ότι η ζήτηση στον κόμβο i δε θεωρείται καλυμμένη εάν δε χωροθετηθεί εγκατάσταση σε μία από τις υποψήφιες θέσεις που καλύπτει τον κόμβο i . Ο περιορισμός (6) εκφράζει το άνω όριο στον αριθμό των εγκαταστάσεων, ενώ οι (7),(8) αναφέρονται στη δυαδική φύση των αποφάσεων χωροθέτησης αι της κάλυψης της ζήτησης των κόμβων, αντίστοιχα. Τέλος, να σημειωθεί ότι οι περιορισμοί (5) και (7) επιτρέπουν την αντικατάσταση του (8) με $z_i \leq 1$, χωρίς απώλεια της γενικότητας.

Το πρόβλημα μέγιστης κάλυψης (MCLP) μπορεί να δεχτεί τη χωροθέτηση εγκαταστάσεων και στα τόξα του δικτύου, όπως γίνεται και στο πρόβλημα συνόλου κάλυψης (SCLP). Το δίκτυο τότε τροποποιείται όπως έχουν προτείνει οι Church&Meadows, και το πρόβλημα επιλύεται σύμφωνα με τη διατύπωση (4)-(8) που παρουσιάστηκε παραπάνω. Το MCLP είναι και αυτό NP-hard (Megiddo et al. 1983), αλλά μπορεί να επιλυθεί αποτελεσματικά χρησιμοποιώντας ευρετικούς αλγορίθμους.

Στην εισαγωγή των προβλημάτων μέγιστης απόστασης αναφέρθηκε πως υπάρχει μια μέγιστη απόσταση πέρα από την οποία η εξυπηρέτηση δεν είναι αποδεκτή. Οι Church&ReVelle διατύπωσαν το πρόβλημα MCLP λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό εγγύτητας. Όρισαν:

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

$M_i = \{ j | d_{ij} < D_c \}$ το σύνολο όλων των υποψήφιων θέσεων που μπορούν να καλύψουν την ζήτηση στο i

Και στη διατύπωση (4)-(8) προστέθηκε ο περιορισμός:

$$\sum_{j \in M_i} x_j \geq 1 \forall i \in I \quad (9)$$

Τα δύο πρότυπα που σχολιάστηκαν το MCLP και το SCLP θεωρούν πως η καλυπτόμενη απόσταση D_c είναι ένα σταθερό προκαθορισμένο μέγεθος. Αυτό αληθεύει σε πολλές περιπτώσεις, υπάρχουν όμως και εξαιρέσεις και τότε η καλυπτόμενη απόσταση αποτελεί στόχο και όχι δεδομένο. Για παράδειγμα, οι δημόσιες υπηρεσίες μπορεί να επιθυμούν να ελαχιστοποιήσουν τη μέγιστη απόσταση για λόγους ισότητας των πολιτών. Άλλες υπηρεσίες όπως σχολεία ή ε σταθμοί, μπορεί να έχουν μια επιθυμητή απόσταση και μια άλλη απόσταση πέρα από την οποία η εξυπηρέτηση να μην είναι αποδεκτή. Τα μοντέλα που θα παρουσιασθούν παρακάτω απευθύνονται σε τέτοιες περιπτώσεις σχεδιασμού.

ΠΡΟΒΛΗΜΑ P-KENTRΩΝ (P-CENTER PROBLEM)

Το πρόβλημα των P-διακέντρων (Hakimi, 1964) αντιμετωπίζει το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης της μέγιστης απόστασης που απέχει κάθε κόμβος ζήτησης από την πλησιέστερη εγκατάσταση, με την προϋπόθεση ότι χωροθετείται συγκεκριμένος αριθμός εγκαταστάσεων (P). Αποτελεί ένα από τα γνωστά NP-hard προβλήματα χωροθέτησης. Οι πελάτες-χρήστες ανατίθενται σε P εγκαταστάσεις με απώτερο σκοπό την ελαχιστοποίηση της μέγιστης απόστασης μεταξύ ενός πελάτη και της εγκατάστασης στην οποία έχει ανατεθεί. Το μοντέλο αυτό έχει πολυάριθμες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα τη χωροθέτηση πυροσβεστικών κρουών. Ωστόσο, μέχρι σήμερα δεν υπάρχει κάποια αρκετά ικανοποιητική ακριβής ή ευρετική μέθοδος που να μπορεί να επιλύσει προβλήματα πολλών μεταβλητών.

Υπάρχουν αρκετές παραλλαγές του προβλήματος P-Διακέντρων. Αρχικά διακρίνονται το “vertex” και το “absolute” p-center problem, όπου το πρώτο περιορίζει τις υποψήφιες θέσεις εγκατάστασης στους κόμβους του δικτύου, ενώ το δεύτερο επιτρέπει την εγκατάσταση σε οποιοδήποτε σημείο εντός των τόξων του δικτύου. Οι δύο παραλλαγές του μοντέλου μπορεί να είναι ή όχι σταθμισμένες ως προς την ζήτηση. Όταν δεν υπάρχει στάθμιση, όλοι οι κόμβοι ζήτησης επεξεργάζονται ισοδύναμα. Στην αντίθετη περίπτωση, η ζήτηση λειτουργεί ως συντελεστής βάρους.

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

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

$Y_{ij} = 1$ αν ο κόμβος ζήτησης i έχει ανατεθεί στην εγκατάσταση του κόμβου j , 0 διαφορετικά

Το p-center problem μπορεί να διατυπωθεί ως ακολούθως:

$$\text{Minimize: } W \quad (10)$$

$$\text{s.t.: } \sum_{j \in J} x_j = p \quad (11)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \forall i \in I \quad (12)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0, \forall i \in I, j \in J \quad (13)$$

$$W - \sum_{i=1}^n h_i d_{ij} y_{ij} \geq 0 \forall i \in I \quad (14)$$

$$x_j \in \{0,1\} \forall j \in J \quad (15)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \forall i \in I, j \in J \quad (16)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (10) έχει στόχο την ελαχιστοποίηση της μέγιστης απόστασης σταθμισμένης ως προς την ζήτηση μεταξύ κάθε κόμβου ζήτησης και της πλησιέστερης σε αυτόν εγκατάστασης με δυνατότητα εξυπηρέτησης. Ο περιορισμός (11) ορίζει ότι πρόκειται να χωροθετηθούν P εγκαταστάσεις. Ο περιορισμός (12) εξασφαλίζει ότι κάθε κόμβος ζήτησης θα ανατεθεί σε μια ακριβώς εγκατάσταση, η οποία βέβαια θα έχει δυνατότητα εξυπηρέτησης. Το τελευταίο γίνεται εφικτό μέσω του περιορισμού (13), δηλαδή η ανάθεση κόμβων ζήτησης μόνο σε εγκαταστάσεις που έχουν οριστεί ως «ανοιχτές». Ο περιορισμός (14) ορίζει το κατώτατο όριο της μέγιστης σταθμισμένης απόστασης σε σχέση με την ζήτηση, η οποία ελαχιστοποιείται. Ο περιορισμός (15) ορίζει τη μεταβλητή χωροθέτησης ω δυαδική και ο (16) εξασφαλίζει πως η ζήτηση σε έναν κόμβο μπορεί να ανατεθεί μόνο σε μία εγκατάσταση. Γίνεται όμως να αντικατασταθεί με την σχέση $Y_{ij} \geq 1$, για κάθε i, j , αφού ο (13) εγγυάται ότι $Y_{ij} \leq 1$. Σε περίπτωση όπου τα Y_{ij} λαμβάνουν κλασματική τιμή, της οποίας η φυσική σημασία είναι πως μέρος της ζήτησης στο i ανατίθεται στο j , μπορεί απλά ο κόμβος i να ανατεθεί στην πλησιέστερη σε αυτόν εγκατάσταση με δυνατότητα εξυπηρέτησης.

Το πρόβλημα των P -διακέντρων μπορεί να επιλυθεί σε πολυωνυμικό χρόνο για σταθερές τιμές του P , αλλά είναι NP-hard για μεταβλητές τιμές αυτού (Garey & Johnson, 1979).

ΠΡΟΒΛΗΜΑ P-ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ (THE P-DISPERSION PROBLEM- PDP)

Τα μοντέλα που σχολιάστηκαν παραπάνω, αφορούν στην απόσταση μεταξύ των νέων εγκαταστάσεων και της ζήτησης και παραδέχονται πως η εγγύτητα σε μια εγκατάσταση είναι επιθυμητή. Αντίθετα, το πρόβλημα P -Διασποράς, διαφέρει σε δύο σημεία από τα παραπάνω προβλήματα (Kuby, 1987). Αρχικά, αφορά μόνο την απόσταση μεταξύ νέων εγκαταστάσεων και δεύτερον, βασικός στόχος αποτελεί η μεγιστοποίηση της ελάχιστης απόστασης μεταξύ κάθε ζεύγους εγκαταστάσεων.

Για τη διατύπωση του μοντέλου αυτού απαιτείται μια επιπλέον μεταβλητή M καθώς και μια μεταβλητή απόφασης, η D .

M = μια μεγάλη σταθερά

D = η ελάχιστη απόσταση μεταξύ κάθε ζεύγους εγκαταστάσεων

Έτσι, η διατύπωση του λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

Maximize D (17)

s.t.:

$$\sum_{j \in J} x_j = p \quad (18)$$

$$D + (M - d_{ij})x_i + (M - d_{ij})x_j \leq 2M - d_{ij} \quad \forall i, j \in J \text{ με } i < j \quad (19)$$

$$\sum_{j \in M_i} x_j \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (20)$$

Στόχος την αντικειμενικής συνάρτησης (17) αποτελεί η μεγιστοποίηση της απόστασης μεταξύ των δύο πιο κοντινών εγκαταστάσεων. Ο περιορισμός (18) ορίζει ότι P εγκαταστάσεις θα χωροθετηθούν. Ο περιορισμός (19) ορίζει τον ελάχιστο διαχωρισμό μεταξύ κάθε ζεύγους εγκαταστάσεων, ενώ ο περιορισμός (20) αποτελεί έναν τυπικό περιορισμό πληρότητας. Στην περίπτωση που x_i ή x_j είναι ίσα με μηδέν, ο περιορισμός (19) δεν είναι δεσμευτικός, αλλά όταν και οι δύο όροι ισούνται με τη μονάδα, ο περιορισμός αυτός ισοδυναμεί με $D \leq d_{ij}$. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η μεγιστοποίηση του D να οδηγεί στη μεγαλύτερη δυνατή μεγιστοποίηση της μικρότερης απόστασης μεταξύ των εγκαταστάσεων.

ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ Ή ΜΕΣΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ (TOTAL OR AVERAGE DISTANCE MODELS)

Σε όλες τις περιπτώσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω, βασικός στόχος ήταν η ελαχιστοποίηση της μέγιστης απόστασης. Συχνά όμως το πρόβλημα της χωροθέτησης εγκαταστάσεων είναι ορθότερο να δίνει έμφαση στην ελαχιστοποίηση της συνολικής απόστασης μεταξύ των κόμβων ζήτησης και των εγκαταστάσεων. Τα μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη αυτή την απαίτηση θα σχολιαστούν στην ακόλουθη ενότητα.

ΠΡΟΒΛΗΜΑ P-ΔΙΑΜΕΣΩΝ (P-MEDIAN PROBLEM)

Ένα τυπικό μοντέλο αυτής της κατηγορίας είναι το πρόβλημα P-διαμέσων, το οποίο αναπτύχθηκε από το Hakimi (1964). Εντοπίζει τις τοποθεσίες των P εγκαταστάσεων με τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται η συνολική απόσταση, σταθμισμένη ως προς την ζήτηση, μεταξύ των κόμβων ζήτησης και των εγκαταστάσεων στις οποίες έχουν ανατεθεί.

Η διατύπωση του μοντέλου είναι η εξής:

$$\text{Minimize } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_i d_{ij} y_{ij} \quad (21)$$

s.t.:

$$\sum_{j \in J} x_j = p \quad (22)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \forall i \in I \quad (23)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0, \forall i \in I, j \in J \quad (24)$$

$$x_j \in \{0,1\} \forall j \in J \quad (25)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \forall i \in I, j \in J \quad (26)$$

Όπως αναφέρθηκε, η αντικειμενική συνάρτηση (21) αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση της συνολικής απόστασης σταθμισμένης ως προς την ζήτηση. Οι περιορισμοί (22), (23), (24) λειτουργούν ακριβώς με τον ίδιο τρόπο όπως οι (11), (12), (13) του προβλήματος των P-Διακέντρων, ενώ οι περιορισμοί (25),(26) είναι ίδιοι με τους (15),(16).

Η παραπάνω διατύπωση σύμφωνα με τους Toregas&ReVelle (1972) ελαχιστοποιεί ακόμα τη μέση απόσταση μεταξύ των εγκαταστάσεων και της ζήτησης. Θεωρεί όμως ότι οι πιθανές τοποθεσίες εγκαταστάσεων αποτελούν κόμβοι του δικτύου. Πάλι, όπως αναφέρθηκε στο p-center problem, έτσι και το p-median για σταθερές τιμές του P είναι επιλύσιμο σε πολυωνυμικό χρόνο, ενώ γίνεται NP-hard για μεταβλητές τιμές αυτού.

ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ (FIXED CHARGE LOCATION PROBLEM)

Το p-median problem βασίζεται σε κάποιες παραδοχές που κατά τους Hamacher & Drezner (2002) δεν είναι κατάλληλες σε ορισμένα προβλήματα χωροθέτησης. Αρχικά,

θεωρεί πως κάθε πιθανή θέση έχει τα ίδια σταθερά κόστη για τη χωροθέτηση μιας εγκατάστασης σε αυτή. Έπειτα, κάνει την παραδοχή πως οι εγκαταστάσεις προς χωροθέτηση δεν έχουν την ικανότητα εξυπηρέτησης της ζήτησης που τους αντιστοιχεί. Στη βιβλιογραφία, τέτοιου είδους προβλήματα αναφέρονται ως “uncapacitated problems”, δηλαδή προβλήματα περιορισμένης χωρητικότητας. Στον αντίποδα αυτών βρίσκονται τα “capacitated problems”, στα οποία οι εγκαταστάσεις δεν έχουν περιορισμένη χωρητικότητα. Τέλος, το p-median problem, όπως και όλα τα προβλήματα της μορφής “p-”, υποθέτουν πως είναι εξ αρχής γνωστό το πλήθος p των εγκαταστάσεων που θα χωροθετηθούν.

Το πρόβλημα σταθερού κόστους, αντιθέτως, δεν στηρίζεται σε αυτές τις τρεις παραδοχές και συνεπώς η επίλυση του είναι εφικτή με τη «χαλάρωση» τους. Ο αντικειμενικός στόχος του μοντέλου αυτού είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους εγκατάστασης και μετακίνησης. Έπειτα από την εφαρμογή του μοντέλου FCLP καθορίζεται ο βέλτιστος αριθμός και η τοποθεσία των εγκαταστάσεων και η ζήτηση που θα εξυπηρετεί η καθεμία.

Η συνήθης μορφή του FCLP είναι η ακόλουθη:

$$\text{Minimize } \sum_{j \in J} f_j x_j + a \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} y_{ij} \quad (27)$$

s.t.:

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \forall i \in I \quad (28)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0, \forall i \in I, j \in J \quad (29)$$

$$\sum_{j \in J} h_i y_{ij} \leq C_j x_j \forall i \in I \quad (30)$$

$$x_j \in \{0,1\} \forall j \in J \quad (31)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \forall i \in I, j \in J \quad (32)$$

Όπου:

F_j = το σταθερό κόστος χωροθέτησης μιας εγκατάστασης σε μια υποψήφια θέση i

Q_i = η χωρητικότητα μιας εγκατάστασης στη θέση i

a = το κόστος ανά μονάδα ζήτησης ανά μονάδα απόστασης

Η αντικειμενική συνάρτηση στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του σταθερού κόστους χωροθέτησης των εγκαταστάσεων και του συνολικού κόστους μετακίνησης που πρέπει να εξυπηρετηθεί. Ο δεύτερος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης μπορεί να αναφέρεται σε απόσταση σταθμισμένη ως προς την ζήτηση και συνεπώς, να λάβει τη μορφή $\sum_i d_{ij} y_{ij}$.

Ο περιορισμός (28) όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο πρόβλημα, διασφαλίζει πως κάθε κόμβος ζήτησης (ή χρήστης του συστήματος) θα ανατεθεί σε μια εγκατάσταση, ενώ ο (29) εγγυάται πως η ζήτηση ανατίθεται μόνο σε εγκαταστάσεις που λειτουργούν. Οι περιορισμοί (31),(32) εκφράζουν τη δυαδική φύση των μεταβλητών απόφασης και στην περίπτωση χαλάρωσης του περιορισμού (32) το μοντέλο παύει να είναι Single Allocation, δηλαδή η ζήτηση μπορεί να ανατεθεί σε περισσότερες από μια εγκαταστάσεις. Τέλος, ο περιορισμός (30) απαγορεύει την ανάθεση ζήτησης σε εγκαταστάσεις που είναι πλήρης, με άλλα λόγια αναθέτει την ζήτηση σε εγκαταστάσεις με δυνατότητα εξυπηρέτησης. Εάν παραλειφθεί ο τελευταίος, το μοντέλο θα είναι uncapacitated. Πρακτικά ο περιορισμός (30) εμπεριέχει τον (29), ωστόσο όταν ο τελευταίος συμπεριλαμβάνεται ενισχύεται η «χαλάρωση» του γραμμικού προγραμματισμού του μοντέλου.

ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΠΛΗΜΝΗΣ (HUB LOCATION PROBLEM)

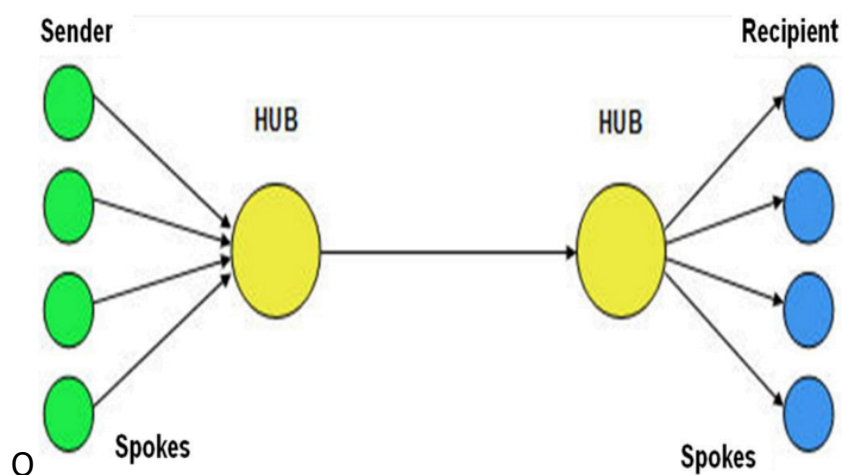
Στην πρώιμη βιβλιογραφία της επιχειρησιακής έρευνας, ως πλήμνη (hub) ορίζεται είτε μια κεντρική εγκατάσταση είτε μια κεντρική αποθήκη (το δεύτερο συναντάται κυρίως στις μεταφορές αγαθών). Έτσι, ένας κόμβος-hub αποτελεί μια κεντρική εγκατάσταση που χωροθετείται στο κέντρο ενός συνόλου περιοχών οι οποίες παρουσιάζουν ζήτηση για κάποια μεταφορά. Ωστόσο, ο Goldman (1969) όρισε μια εγκατάσταση hub ως ένα «κέντρο». Στη μελέτη του χωροθέτησε εγκαταστάσεις σε σημεία hub, με απώτερο

σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους μετακίνησης, και με τον τρόπο αυτό διατύπωσε ένα γενικό πρόβλημα χωροθέτησης hubs.

Όλες οι μεταφορές απαιτούν ένα δίκτυο από διασυνδέσεις μεταξύ των σημείων προέλευσης/προορισμού. Ένα τέτοιο δίκτυο είναι το Hub and Spoke Network, όπου ως spoke αναφέρονται τα σημεία με τα οποία είναι συνδεδεμένα οι κεντρικές μονάδες hub. Σημαντική εφαρμογή τέτοιων δικτύων συναντάται στις αερομεταφορές αλλά και στα δίκτυα Logistics. Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται μια τυπική μορφή τέτοιου δικτύου που αποσαφηνίζει τη λειτουργία του.

Οι συνδέσεις μεταξύ των πηγών και των προορισμών αντικαθιστώνται με λιγότερες έμμεσες συνδέσεις στην περίπτωση του Hub&Spoke. Τα μοντέλα αυτής της μορφής αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους σε συνάρτηση με την απόσταση (O'Kelly 1986a-b, Campbell 1990, 1994). Ο αριθμός των μεταβλητών απόφασης είναι πολύ μεγάλος, όπως και οι λύσεις σε αυτά τα υποπροβλήματα είναι ιδιαίτερα αλληλοεξαρτώμενες.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4: ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ HUB AND SPOKE – ΠΗΓΗ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ



Το βασικό P-Hub μοντέλο χωροθέτησης έχει διατυπωθεί ως εξής, χρησιμοποιώντας τους παρακάτω συμβολισμούς:

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

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

X_j = 1 αν στο j χωροθετηθεί hub, αλλιώς 0

Y_{ij} = 1 αν η ζήτηση στον κόμβο i ανατεθεί στην πλήμνη στο j , αλλιώς:

Minimize

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_i \left(\sum_{k \in N} c_{ik} y_{ik} + \sum_{m \in N} c_{jm} y_{jm} + \sum_{k \in N} \sum_{l \in N} c_{kl} y_{ik} y_{jl} \right) \quad (33)$$

S.t.:

$$\sum_{j \in J} x_j = p \quad (34)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \forall i \in I \quad (35)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0, \forall i \in I, j \in J \quad (36)$$

$$x_j \in \{0,1\} \forall j \in J \quad (37)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \forall i \in I, j \in J \quad (38)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του αθροίσματος του κόστους μετακίνησης των συνδέσμων ik , kl , lj όπου τα σημεία k, l είναι υποψήφιος θέσεις για τη χωροθέτηση hubs, ενώ τα i, j συμβολίζουν την πηγή και τον προορισμό αντίστοιχα. Οι περιορισμοί (34)-(38) είναι ίδιοι με τους (22)-(26) του P-median problem.

Ακόμη και ένα μεσαίου μεγέθους πρόβλημα χωροθέτησης πλήμνης παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες στην επίλυση του κατά το βέλτιστο τρόπο και για το λόγο αυτό οι Ernst & Krishnamoorthy (1996) πρότειναν ευρετικούς αλγορίθμους για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων.

Τέλος, υπάρχουν και κάποιες παραλλαγές του p-Hub problem. Ο Campbell (1992) στην εργασία του παρουσίασε τέσσερα μαθηματικά μοντέλα για τις παραλλαγές του προβλήματος αυτού, δηλαδή την εύρεση και χωροθέτηση πλημνών σε ένα δίκτυο σε

συνδυασμό με την πλήρη ανάπτυξη του υπό μελέτη δικτύου. Με βάση κυρίως την αντικειμενική συνάρτηση κόστους, παρουσίασε και ανέλυσε τέσσερις διακριτές παραλλαγές του προβλήματος. Οι υποκατηγορίες αυτές είναι:

- Το πρόβλημα διαμέσου P-πλημνών
- Το πρόβλημα χωροθέτησης πλήμνης με περιορισμό στην χωρητικότητα
- Το πρόβλημα κέντρου P-πλημνών
- Το πρόβλημα κάλυψης πλήμνης

THE MAXISUM LOCATION PROBLEM

Το συγκεκριμένο μοντέλο αναζητά τις τοποθεσίες των P-εγκαταστάσεων έχοντας σκοπό τη μεγιστοποίηση της συνολικής απόστασης, σταθμισμένης ως προς την ζήτηση. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα μοντέλα της μέσης απόστασης, τα οποία επιθυμούν να ελαχιστοποιήσουν την συνολική απόσταση.

Η μορφή του είναι η ακόλουθη:

$$\text{Maximize } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_i d_{ij} y_{ij} \quad (39)$$

S.t.:

$$\sum_{j \in J} x_j = p \quad (40)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \forall i \in I \quad (41)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0, \forall i \in I, j \in J \quad (42)$$

$$\sum_{k=1}^m y_{i[k]} - x_{i[m]} \geq 0 \quad i \in I, m = 1, 2, \dots, N-1 \quad (43)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (44)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (45)$$

Ο τρόπος με τον οποίο διατυπώνεται το maxisum location problem είναι ίδιος με του p-median problem, πλην της εξής σημαντικής διαφοράς. Η αντικειμενική συνάρτηση (39) μεγιστοποιεί την συνολική απόσταση, ενώ στο p-median problem στόχος ήταν η ελαχιστοποίηση αυτής. Αυτή η διαφορά υποχρεώνει την ζήτηση να ανατεθεί στην πλέον απομακρυσμένη εγκατάσταση. Για το λόγο αυτό, έχει προστεθεί ο περιορισμός (43) που επιβεβαιώνει ότι οι απαιτήσεις της ζήτησης ανατίθενται στην πλησιέστερη εγκατάσταση. Ο περιορισμός (43) αναφέρει επίσης, πως αν η m πλησιέστερη εγκατάσταση στον κόμβο ζήτησης i έχει δυνατότητα εξυπηρέτησης, τότε η ζήτηση του i θα ανατεθεί σε αυτήν ή σε πλησιέστερη εγκατάσταση.

2.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΣΤΑΘΜΩΝ ΚΟΙΝΟΧΡΗΣΤΩΝ ΠΟΔΗΛΑΤΩΝ

Η χωροθέτηση εγκαταστάσεων είναι απόφαση στρατηγικού χαρακτήρα και καθορίζεται βάσει των πρωταρχικών στόχων που εξυπηρετεί. Όπως επισημάνθηκε και προηγουμένως, ένα μαθηματικό μοντέλο χωροθέτησης εγκαταστάσεων μπορεί να έχει τους εξής σκοπούς: την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, την ελαχιστοποίηση του κόστους μετακίνησης και τέλος, την μεγιστοποίηση της καλυπτόμενης ζήτησης. Η κατάλληλη αντιμετώπιση είναι μέσω των μοντέλων σταθερού κόστους, του P-median problem και μοντέλων μεγιστοποίησης συνολικής κάλυψης, αντίστοιχα (Frade and Rebeiro, 2015). Ανάλογα με το αν υπάρχουν περιορισμοί αναφορικά με την χωρητικότητα της εγκατάστασης, διακρίνονται τα uncapacitated και capacitated models.

Όσον αφορά στη χωροθέτηση συστημάτων κοινόχρηστων ποδηλάτων, έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες προσεγγίσεις στο παρελθόν που στηρίζονται σε μοντέλα χωροθέτησης εγκαταστάσεων (FLP).

Οι Lin and Yang (2010) διαμόρφωσαν ένα μοντέλο βελτιστοποίησης μη γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού για τη χωροθέτηση σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων. Η συμβολή τους είναι πολύ σημαντική διότι, η μελέτη τους ήταν η πρώτη που βασίστηκε στα μοντέλα Χωροθέτησης Εγκαταστάσεων (Facility Location Problems) σχετικά με το bike-sharing και κατ' επέκταση η πρώτη μελέτη που διατύπωσε τη μαθηματική μορφή ενός τέτοιου μοντέλου. Καθώς λοιπόν η διατύπωση που παρουσίασαν οι Lin and Yang (2011) στηρίζεται στις αρχές του Facility Location, αφορά σε στρατηγικό σχεδιασμό. Μέχρι στιγμής, στη διεθνή βιβλιογραφία μονάχα υπήρχαν αναφορές σχετικά με καλές πρακτικές ως προς τη λειτουργία συστημάτων bike-sharing.

Η κωδικοποίηση του δικτύου στο πρόβλημα είναι αυτή του Hub and Spoke Network. Θεωρείται λοιπόν, πως η ζήτηση μεταξύ i, j θα ικανοποιηθεί τοποθετώντας σταθμούς BS στα σημεία k, l όπου το k είναι πλησίον των i , ενώ το l πλησίον των j . Στόχος του μοντέλου είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους που αντιστοιχεί στην κατασκευή, εφαρμογή και λειτουργία αυτών των συστημάτων. Το ενδιαφέρον της προσέγγισης τους είναι πως λαμβάνουν υπόψη, ως κόστος κατασκευής, τη δημιουργία ποδηλατοδρόμου μεταξύ των υποψήφιων σταθμών, στις περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει ήδη. Ακόμη, στο μοντέλο συνυπολογίζεται η ασφάλεια και η διαθεσιμότητα στόλου. Όσον αφορά στον προσδιορισμό της ζήτησης, θεωρούνται γνωστές οι στοχαστικές τιμές αυτής μεταξύ των i, j .

Το μειονέκτημα της προαναφερθείσας έρευνας, αφορά στην υπόθεση που γίνεται σχετικά με τη διαρκή διαθεσιμότητα ποδηλάτων και ελεύθερων θέσεων στους σταθμούς, δεν αντιμετωπίζεται λοιπόν το πρόβλημα την αναδιανομής ποδηλάτων μεταξύ των σταθμών. Όπως αναφέρθηκε, η αναδιανομή των ποδηλάτων μεταξύ των σταθμών γίνεται ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος, ώστε να έχουν σταθμοί τόσα ποδήλατα ή άδειες θέσεις για να ικανοποιήσουν την ζήτηση του αμέσως επόμενου χρονικού βήματος. Οι Lin et al. (2011) παρουσιάζουν μια βελτιωμένη επέκταση του προηγούμενου μοντέλου. Η βασική διαφοροποίηση είναι πως λαμβάνει υπόψη το απόθεμα ποδηλάτων στους σταθμούς. Ακριβέστερα, υπολογίζονται οι τοποθεσίες χωροθέτησης BS καθώς και ο αριθμός τους, ο σχεδιασμός ποδηλατολωρίδων μεταξύ των σταθμών και το απόθεμα ποδηλάτων ανά σταθμό για την εξυπηρέτηση της ζήτησης. Η διαμόρφωση του μοντέλου είναι αυτή του Hub Location Problem, αποσκοπώντας στη μείωση του συνολικού κόστους ταξιδιού, του κόστους κατασκευής σταθμών, του κόστους του αποθέματος ποδηλάτων ανά σταθμό και τέλος, δίνεται «πέναντι» στην περίπτωση ανικανοποίητης ζήτησης. Μέσω των περιορισμών που διαμορφώνουν το πρόβλημα, επιδιώκεται η μείωση, αν όχι εξάλειψη, της πιθανότητας να μην υπάρχουν διαθέσιμα

ποδήλατα σε κάθε σταθμό κατά τη διάρκεια της αναδιανομής αυτών μεταξύ των σταθμών. Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε άπληστος ευρετικός αλγόριθμος (Greedy Heuristic) ο οποίος εντόπισε μια σχετικά βέλτιστη λύση (near optimal solution).

Οι Martinez et al (2012) καθώς διαπίστωσαν πως δεν υπήρχε μέχρι πρότινος μια μελέτη μεγάλης κλίμακας σχετικά με τη χωροθέτηση σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων, εργάζονται στην κατεύθυνση αυτή και ασχολούνται με το σχεδιασμό ενός τέτοιου συστήματος και εξετάζουν την εφαρμογή του στη Λισαβόνα. Συγκεκριμένα, προτείνουν ένα μοντέλο μικτού-ακέραιου προγραμματισμού που επιλύεται με ευρετικές μεθόδους και αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση των κερδών του συστήματος. Το μοντέλο υπολογίζει την τοποθεσία, τον αριθμό των σταθμών, το μέγεθος του μικτού στόλου, δηλαδή πόσα συμβατικά και ηλεκτρικά ποδήλατα απαιτούνται. Το γεγονός ότι λαμβάνει υπόψη την αναδιανομή των ποδηλάτων μέσα στη μέρα, τον στόλο που απαιτείται ώστε να εξυπηρετηθούν οι χρήστες με γνώμονα τη μεγιστοποίηση των κερδών του συστήματος, αποτελεί μια πολύ καλή προσέγγιση της λειτουργίας των Bike Share Scemes σε ημερήσια βάση.

Υιοθετώντας αρκετά στοιχεία του παραπάνω μοντέλου, όπως τη λογική της μεγιστοποίησης των κερδών του συστήματος και την αναδιανομή των ποδηλάτων μεταξύ των σταθμών, οι Frade & Ribeiro (2012) διατύπωσαν ένα μοντέλο βασισμένο στις αρχές του Maximal Covering Problem (MCP). Στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης αποτελεί η μεγιστοποίηση της καλυπτόμενης ζήτησης. Η περιοχή εφαρμογής του προβλήματος χωρίζεται σε ζώνες για τις οποίες είναι γνωστή η ζήτηση μετακινήσεων, δηλαδή γένεση και έλξη. Σε κάθε ζώνη προσδιορίζεται, εάν υπάρχει, το μέγεθος του σταθμού και τα ποδήλατα που θα έχει, χωρίς όμως να ορίζεται η ακριβής τοποθεσία αυτού. Το τελευταίο αποτελεί πρόταση των συγγραφέων για μελλοντική έρευνα μιας και οι ίδιοι αναγνωρίζουν την έλλειψη αυτή στο μοντέλο τους. Η διανομή ποδηλάτων και η διαμόρφωση του μεγέθους του στόλου πραγματοποιούνται έτσι ώστε σε βάθος ενός χρόνου το σύστημα να έχει κάνει απόσβεση των εξόδων κατασκευής και λειτουργίας του, αλλά και να παράγει κέρδη. Τα προηγούμενα είναι εξαγόμενα αποτελέσματα του προβλήματος και για το λόγο αυτό, ως δεδομένα απαιτούνται τα πάσης φύσεως οικονομικά στοιχεία που σχετίζονται με τα BSS.

Στη βιβλιογραφία συγκαταλέγονται ορισμένες έρευνες σχετικά με τη χωροθέτηση σταθμών δημόσιων ποδηλάτων των οποίων η προσέγγιση δεν στηρίζεται στα Facility Location Models. Οι σημαντικότερες εξ αυτών θα αναφερθούν συνοπτικά παρακάτω για λόγους πληρότητας κάλυψης του θέματος.

Οι Romero et al. (2012) συσχετίζουν τα κοινόχρηστα ποδήλατα με τα ιδιωτικά αυτοκίνητα εφαρμόζοντας μια συνδυασμένη μέθοδο προσομοίωσης-βελτιστοποίησης για τη χωροθέτηση των σταθμών. Εξετάζοντας την συμπεριφορά των χρηστών του δικτύου, προσδιόρισαν τις διαδρομές και τις μετακινήσεις που θα μπορούσαν να γίνουν αποκλειστικά με ποδήλατο και βάσει αυτών χωροθετήθηκαν οι σταθμοί στο επόμενο στάδιο της μελέτης.

Μια εξίσου ενδιαφέρουσα προσέγγιση προτάθηκε από τους Palomares et al. (2012), βασισμένη στα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS-approach). Η εκτίμηση της ζήτησης και της χωρικής κατανομής της στην περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκε αντλώντας δεδομένα από τις χρήσεις γης και βάσει της ζήτησης εφαρμόστηκαν τα μοντέλα location-allocation για τη χωροθέτηση των σταθμών.

Όπως έχει φανεί από τα προηγούμενα, αναπόσπαστο κομμάτι της λειτουργίας των BSS είναι η αναδιανομή των ποδηλάτων ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα για τη διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας τους. Οι έρευνες σχετικά με αυτή τη διαδικασία υπερτερούν αριθμητικά και προηγούνται αυτές που πραγματεύονται τη χωροθέτηση σταθμών, κάτι που εν μέρει δηλώνει το εξής. Η χωροθέτηση των σταθμών στο παρελθόν γινόταν ανεξάρτητα από τη χρήση μοντέλων, παρόλα αυτά το πρόβλημα της αναδιανομής ήταν από τα αρχικά στάδια αυτών των συστημάτων πρωτεύουσας σημασίας. Στην συγκεκριμένη εργασία, λαμβάνεται υπόψη η αναδιανομή με την έννοια ότι θα πρέπει να είναι γνωστό σε κάθε σταθμό ποια είναι η διαθεσιμότητα ποδηλάτων και κενών θέσεων, αλλά δεν είναι μέσα στους στόχους να βρεθεί η πλήρης διαδικασία αναδιανομής αυτών. Για το λόγο αυτό δε θα γίνει αναφορά στις έρευνες που αφορούν στην ανάπτυξη τέτοιου είδους μοντέλων.

2.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

Τα κοινόχρηστα ποδήλατα, εφόσον ενσωματωθούν στον συγκοινωνιακό σχεδιασμό αναμένεται να αποτελέσουν ένα επιπλέον μέσο δημόσιας αστικής μετακίνησης. Ως τέτοιο, το σύστημα σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων οφείλει να σχεδιασθεί με μέριμνα στα εξής στοιχεία, το οποία ενδέχεται να είναι αντικρουόμενα μεταξύ τους: α) το κόστος του φορέα κατασκευής, β) το κόστος των χρηστών του και γ) τα εξωτερικά κόστη. Ως κόστος φορέα νοείται η επένδυση που πραγματοποιείται από μέρους του για την κατασκευή, εγκατάσταση και λειτουργία ενός συστήματος συγκοινωνιών, ενώ το κόστος για το χρήστη του ίδιου συστήματος είναι ο χρόνος μετακίνησης, που σχετίζεται και με τη διανυόμενη απόσταση αλλά και το οικονομικό κόστος. Τέλος, ως εξωτερικά νοούνται τα κόστη που επιφέρουν συνέπειες στο περιβάλλον είτε το κοινωνικό σύνολο.

Σκοπός της χωροθέτησης είναι η μεγιστοποίηση του αριθμού των σημείων-σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων, μιας και με τον τρόπο αυτό αυξάνεται ο αριθμός των εξυπηρετούμενων περιοχών, αλλά με το μικρότερο δυνατό κόστος. Καθώς η εγκατάσταση και λειτουργία BSS γίνεται κάτω από ένα συγκεκριμένο προϋπολογισμό και υπάρχει προκαθορισμένος αριθμός ποδηλάτων που θα δοθούν στο σύστημα, θεωρείται πως το καταλληλότερο μοντέλο χωροθέτησης είναι αυτό του σταθερού κόστους (Fixed Charge Location Problem). Το ίδιο μοντέλο λαμβάνει επίσης υπόψη την απόσταση των εγκαταστάσεων και προσπαθεί να την ελαχιστοποιήσει.

Το πρόβλημα που εξετάζεται, θα ήταν αδύνατο να επιλυθεί με κάποιο από τα μοντέλα που χωροθετούν δεδομένο αριθμό εγκαταστάσεων P , μιας και δεν είναι γνωστός. Άρα, αυτά απορρίφθηκαν. Επιπλέον, τα μοντέλα μέγιστης απόστασης παρόλο που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν, από την άποψη ότι είναι γνωστή η απόσταση κάλυψης των σταθμών Bike Share, απορρίπτονται επίσης γιατί αγνοούν το κόστος του χρήστη και του φορέα. Λαμβάνοντας υπόψη τα τελευταία, αιτιολογείται η επιλογή του μοντέλου σταθερού κόστους ως καταλληλότερου.

Οι έρευνες σχετικά με τη χωροθέτηση σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων εστιάζουν στην ανάπτυξη μοντέλων τα οποία ενσωματώνουν πολλά από τα στοιχεία που συνδέονται με τη λειτουργία των BSS. Τα αποτελέσματα επομένως, είναι ρεαλιστικά και μπορούν να εφαρμοστούν στην πράξη. Παρόλα αυτά μέχρι στιγμής, δεν έχει παρουσιαστεί μία μεθοδολογία για την σύνδεση του ποδηλάτου με κάποιο άλλο μέσο μεταφοράς. Τα χαρακτηριστικά της συνδυασμένης μετακίνησης ποδηλάτου-Μετρό καθιστούν απαραίτητη τη διατύπωση ενός νέου μαθηματικού μοντέλου αλλά και την ανάπτυξη μεθοδολογίας συλλογής των απαραίτητων στοιχείων.

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το ζητούμενο της εργασίας είναι η χωροθέτηση σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων ώστε να δημιουργηθεί ένα σύστημα εγκαταστάσεων Bike-and-Ride στο Μετρό της Αθήνας. Προτού γίνει η διατύπωση του μαθηματικού μοντέλου για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος, είναι απαραίτητο να περιγραφεί και να αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο θα προσδιοριστούν αρχικά οι υποψήφιες θέσεις χωροθέτησης και τα χαρακτηριστικά αυτών.

Η χωροθέτηση εγκαταστάσεων αποτελεί ένα πολυδιάστατο πρόβλημα του οποίου η μεθοδολογική προσέγγιση ποικίλει ανάλογα με τις ανάγκες του εκάστοτε προβλήματος. Η μεθοδολογία που θα εφαρμοστεί καθορίζει τη βέλτιστη τοποθεσία των λειτουργικών μονάδων με βάση κάποιες χωρικά κατανεμημένες προϋποθέσεις, οι οποίες αφορούν σε χαρακτηριστικά του χώρου ή του περιβάλλοντος, που αποτελεί το χωρικό σύστημα ζήτησης υπηρεσιών.

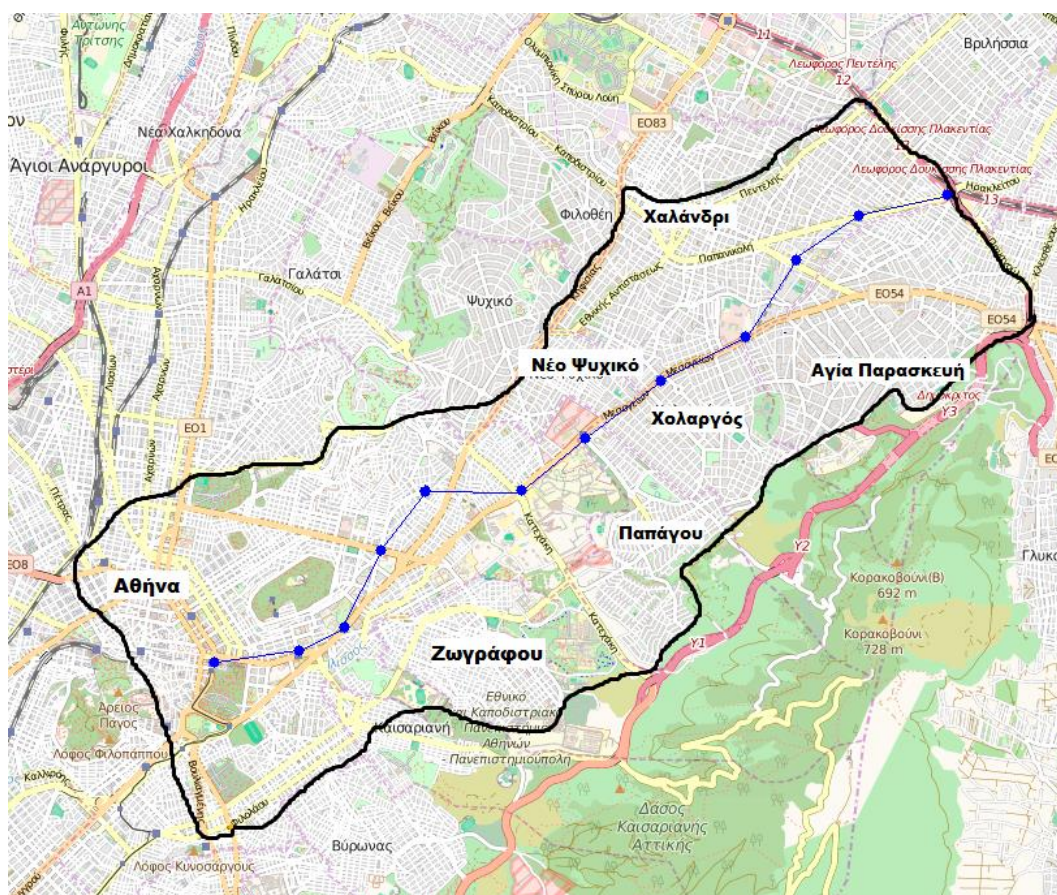
Πέρα από τη διαμόρφωση της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών, σε ένα πρόβλημα χωροθέτησης είναι απαραίτητο να ορισθεί ένα αρχικό σύνολο στοιχείων τα οποία έπειτα θα βελτιστοποιηθούν. Τα παραπάνω στοιχεία ορίζονται βάσει κριτηρίων τα οποία με την σειρά τους διαφοροποιούνται ανάλογα με τις ανάγκες του προβλήματος. Τα κριτήρια είναι εξίσου καθοριστικά για την εύρεση της βέλτιστης λύσης όσο είναι και η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος.

3.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΠΟΨΗΦΙΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ

3.2.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Το τμήμα του δικτύου του Μετρό που θα μελετηθεί είναι από τον σταθμό Δουκίσσης Πλακεντίας μέχρι και τον σταθμό στην Πλατεία Συντάγματος, πρόκειται λοιπόν για δώδεκα υποψήφιες θέσεις εγκαταστάσεων Bike&Ride. Ο αριθμός αυτό είναι αρκετά μεγάλος ώστε να μελετηθεί σωστά και με πληρότητα το πρόβλημα που εξετάζεται στην συγκεκριμένη εργασία και να προκύψουν εύλογα συμπεράσματα σχετικά με την εφαρμογή του.

ΕΙΚΟΝΑ 3: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ



Ως περιοχή μελέτης ορίζεται η περιοχή επιρροής ή εξυπηρέτησης των παραπάνω σταθμών. Πιο συγκεκριμένα, η περιοχή μελέτης οριοθετείται στο βορειοανατολικό άκρο από την Αττική οδό, βορειοδυτικά από τη Λεωφόρο Πεντέλης και στην συνέχεια Δυτικά από τη Λεωφόρο Κηφισίας. Συνολικά λοιπόν, στην υπό μελέτη περιοχή ανήκουν οι Δήμοι Αγίας Παρασκευής, Χαλανδρίου, Χολαργού-Παπάγου, Ψυχικού και ο Δήμος Αθήνας. Η απεικόνιση της περιοχής όπου θα εξεταστεί η δημιουργία συστήματος σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων φαίνεται στην Εικόνα 3.

Θεωρείται πως κάθε στάση μετρό έχει ακτίνα κάλυψης δύο χιλιομέτρων. Σε αυτή την περιοχή θα βρεθούν οι υποψήφιες θέσεις για τη χωροθέτηση σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων με σκοπό την εξυπηρέτηση της κίνησης προς και από τους σταθμούς του μετρό. Η επιλογή των παραπάνω τοποθεσιών θα γίνει ακολουθώντας ορισμένα κριτήρια τα οποία προτείνονται διεθνώς για τη χωροθέτηση σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων και όσον αφορά στο πρακτικό σκέλος, θα χρησιμοποιηθεί το λογισμικό ArcGIS (Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών) καθώς και το εργαλείο Google Maps.

Στην συνέχεια αναλύεται πώς επιλέχθηκαν οι υποψήφιες θέσεις, που χάριν συντομίας θα αναφέρονται ως Σj, πώς υπολογίστηκε η ζήτηση και χρονική κατανομή της κατά τις ώρες λειτουργίας του συστήματος και τέλος, ποιες είναι οι προτεινόμενες διαδρομές για τη μετάβαση από κάποιο Σj στο μετρό και αντίστροφα.

3.2.2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΥΠΟΨΗΦΙΩΝ ΘΕΣΕΩΝ

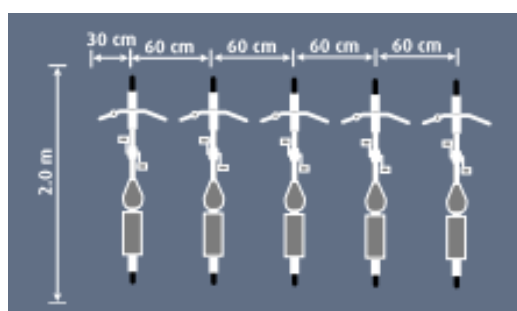
Εντός της οριοθετημένης περιοχής (Εικόνα 3) και εξαιρώντας από αυτή όσες τοποθεσίες βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη των τετρακοσίων μέτρων από τους σταθμούς Μετρό, ορίζονται πιθανές θέσεις σταθμών BS. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η πλειοψηφία των ανθρώπων θα προτιμήσει να χρησιμοποιήσει μια στάση BS εφόσον αυτή βρίσκεται σε απόσταση μέχρι πεντακόσια μέτρα από το σημείο προέλευσης ή προορισμού τους. Με την ίδια λογική, λαμβάνοντας όμως μια συντηρητικότερη τιμή, δηλαδή τετρακόσια μέτρα, θεωρείται πως κάποιος μπορεί να κινηθεί πεζός σε μια ακτίνα τετρακοσίων μέτρων από το Μετρό. Επομένως, στην ακτίνα αυτή δε θα υπάρχει κανένας σταθμός BS.

Προτού αναφερθεί κάποιο άλλο κριτήριο χωροθέτησης, θα πρέπει να εξαιρεθούν από την οριοθετημένη περιοχή τα τμήματα που λόγω μορφολογίας εδάφους δεν ενδείκνυνται για ποδηλασία. Είναι πολύ σημαντικό να διασφαλιστεί πως τηρούνται οι απαιτήσεις για τις μέγιστες αποδεκτές κλίσεις εδάφους, να μην υπερβαίνει δηλαδή μέγιστη κλίσης 6‰. Έτσι, εντός των δακτυλίων που έχουν δημιουργεί με κέντρα τους σταθμούς Μετρό, εξετάστηκε το ανάγλυφο και αποκλείστηκαν κάποια τμήματα. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα των εξαιρουμένων τμημάτων είναι ο λόφος του Λυκαβηττού και η όμορη γειτονιά της Κυψέλης, γειτονιές των δήμων Αγίας Παρασκευής και Χολαργού-Παπάγου. Για τον ίδιο λόγο δε θα μελετηθεί τελικώς ο σταθμός μετρό «Πανόρμου», καθώς βρίσκεται σε ιδιαίτερα λοφώδη τοποθεσία κάτι που αποκλείει ακόμα και τις κοντινές σε αυτόν υποψήφιες θέσεις χωροθέτησης BS. Η παραπάνω διαδικασία ολοκληρώθηκε κάνοντας χρήση των χαρτών της Google.

Εφόσον από τις περιοχές επιρροής των σταθμών Μετρό έχουν προσδιορισθεί τα κατάλληλα τμήματα για ποδηλασία, είναι δυνατό να αναζητηθούν κατάλληλα οικοδομικά τετράγωνα για τη χωροθέτηση σημείων παραλαβής/ απόθεσης ποδηλάτων. Οι σταθμοί BS μπορούν να χωροθετηθούν σε μόνο σε δημόσιους χώρους στους οποίους υπάρχει μάλιστα και κατάλληλος διαθέσιμος χώρος. Πιο συγκεκριμένα θα πρέπει να υπάρχει ικανός χώρος για την στάθμευση δέκα με δεκαπέντε περίπου ποδηλάτων. Ο ακριβής αριθμός θέσεων στάθμευσης θα καθοριστεί σε επόμενο στάδιο της Εργασίας, όταν εφαρμοστεί το μαθηματικό

μοντέλο. Ανάλογα με τα σενάρια που θα εξεταστούν ο αριθμός των θέων στάθμευσης ενδέχεται να μεταβληθεί σε κάποιο σταθμό. Κρίνεται λοιπόν, πως η τιμή των δέκα έως δεκαπέντε ποδηλάτων είναι ικανοποιητική, ώστε να γίνει εκτίμηση του απαιτούμενου χώρου, αλλά και για να ικανοποιήσουν την ζήτηση. Τα τετραγωνικά μέτρα που αντιστοιχούν στην έκταση του σταθμού βάσει αυτής της παραδοχής ανέρχονται σε είκοσι ένα. Με τη βοήθεια του ArcGIS εντοπίσθηκαν σε πρώτη φάση τα σημεία της περιοχής μελέτης που πληρούν αυτά τα χαρακτηριστικά, δηλαδή δημόσια έκταση με τον απαιτούμενο ελεύθερο χώρο.

ΕΙΚΟΝΑ 4: ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΘΕΣΕΩΝ ΣΤΑΘΜΕΥΣΗΣ ΠΟΔΗΛΑΤΩΝ (ΠΗΓΗ: BICYCLE PARKING MANUAL/ THE DANISH CYCLIST FEDERATION)



Στην συνέχεια, μεταξύ των σημείων που προσδιορίστηκαν στο προηγούμενο στάδιο, είναι επιθυμητό να βρεθούν εκείνα που συγκεντρώνουν στην ακτίνα επιρροής τους μικτές χρήσεις γης, άρα αποτελούν κόμβους έλξης και προορισμού. Πάλι, ως ακτίνα επιρροής θα ληφθεί η ακτίνα των τετρακοσίων μέτρων. Η απαίτηση για μικτές χρήσης γης υπάρχει για δύο λόγους: αφενός, είναι ορθότερο να δοθεί έμφαση στην ταυτόχρονη εξυπηρέτηση ροών προς και από το μετρό, αφετέρου παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον η αντιμετώπιση της αναδιανομής των ποδηλάτων στην περίπτωση που υπάρχει ταυτόχρονη ζήτηση στα δύο άκρα μετακίνησης. Να σημειωθεί όμως, πως εξαιτίας του χαρακτήρα της πλειοψηφίας των Δήμων που μελετώνται, σε μεγαλύτερη συχνότητα απαντώνται οικόπεδα περιοχές γενικής ή αμιγούς κατοικίας, άρα είναι αναμενόμενο τα περισσότερα σημεία να συγκεντρώνουν ζήτηση προέλευσης στην αρχή λειτουργίας του συστήματος.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΥΠΟΨΗΦΙΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΣΤΑΘΜΩΝ BS ΣΤΗΝ ΕΜΒΕΛΕΙΑ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ

Σj	ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΔΗΜΟΣ
1	ΠΛΑΤΕΙΑ ΥΔΡΑΣ	ΑΓΙΑΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ
2	ΠΛΑΤΕΙΑ ΑΓΙΑΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ	ΑΓΙΑΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ

3	ΠΑΡΚΟ ΟΔΟΥ ΧΙΟΥ	ΑΓΙΑΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ
4	ΦΙΛΙΚΗΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑΣ	ΑΓΙΑΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ
5	ΠΛΑΤΕΙΑ ΚΟΡΑΗ	ΑΓΙΑΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ
6	ΠΛΑΤΕΙΑ ΤΣΑΚΟΥ	ΑΓΙΑΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ
7	ΡΙU VERDE ΠΑΡΚΟ	ΧΟΛΑΡΓΟΥ-ΠΑΠΑΓΟΥ
8	ΠΑΡΚΟ ΟΔΟΥ ΟΛΥΜΠΟΥ	ΧΑΛΑΝΔΡΙΟΥ
9	ΑΙΓΛΗ ΚΙΝ/ΦΟΣ	ΧΑΛΑΝΔΡΙΟΥ
10	ΠΛΑΤΕΙΑ ΔΟΥΡΟΥ	ΧΑΛΑΝΔΡΙΟΥ
11	ΑΓΙΑ ANNA	ΧΑΛΑΝΔΡΙΟΥ
12	ΕΘΝΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΣ	ΧΑΛΑΝΔΡΙΟΥ
13	ΠΑΡΚΟ ΟΔΟΥ ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΥ	ΧΑΛΑΝΔΡΙΟΥ
14	ΠΑΡΚΟ ΟΔΟΥ ΤΡΙΦΥΛΛΙΑΣ	ΧΑΛΑΝΔΡΙΟΥ
15	ΠΛΑΤΕΙΑ ΑΓΙΑΣ ΣΟΦΙΑΣ	ΨΥΧΙΚΟΥ
16	ΦΑΡΟΣ ΨΥΧΙΚΟΥ	ΨΥΧΙΚΟΥ
17	ΕΜΠ-ΚΟΚΚΙΝΟΠΟΥΛΟΥ	ΑΘΗΝΑΙΩΝ (ΓΟΥΔΗ)
18	ΠΛΑΤΕΙΑ ΑΓΙΟΥ ΘΩΜΑ	ΑΘΗΝΑΙΩΝ (ΓΟΥΔΗ)
19	ΑΛΣΟΣ ΠΑΓΚΡΑΤΙΟΥ	ΑΘΗΝΑΙΩΝ (ΠΑΓΚΡΑΤΙ)
20	ΠΑΡΚΟ ΟΔΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ	ΚΑΙΣΙΑΡΙΑΝΗΣ
21	ΕΘΝΙΚΟ ΜΟΥΣΕΙΟ-ΟΔ.ΤΟΣΙΤΣΑ	ΑΘΗΝΑΙΩΝ
22	ΒΑΡΒΑΚΕΙΟΣ ΑΓΟΡΑ	ΑΘΗΝΑΙΩΝ
23	ΠΛΑΤΕΙΑ ΚΟΥΜΟΥΝΔΟΥΡΟΥ	ΑΘΗΝΑΙΩΝ

Οι τοποθεσίες που επιλέχθηκαν συγκεντρώνονται στον Πίνακα 3. Από εδώ και στο εξής και οι υποψήφιες θέσεις χωροθέτησης σταθμών ποδηλάτων στην εμβέλεια του Μετρό θα αναφέρονται με τον συμβολισμό Σ_j . Ο δείκτης j παίρνει τιμές από 1 έως 23, οι οποίες αναφέρονται στην Πλατεία Ύδρας και την Πλατεία Κουμουνδούρου, αντίστοιχα.

3.2.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΨΗΦΙΩΝ ΘΕΣΕΩΝ

Για κάθε μία από τις τοποθεσίες του προηγούμενου πίνακα (3), θα υπολογισθεί η ζήτηση για μετακινήσεις προς και από τους σταθμούς Μετρό έχοντας ως μέσο το

ποδήλατο. Η μεθοδολογία που προτείνεται για τον υπολογισμό της ζήτησης βασίζεται στις υφιστάμενες χρήσεις γης. Τα δεδομένα που είναι διαθέσιμα για την περιοχή μελέτης και εφαρμογής του μοντέλου περιλαμβάνουν τα πληθυσμιακά στοιχεία αυτής καθώς και τις υπάρχουσες χρήσεις γης. Πιο συγκεκριμένα, είναι γνωστός ο πληθυσμός κάθε Δήμου και η ηλικιακή κατανομή των κατοίκων της Αττικής. Όσον αφορά στις χρήσεις γης, είναι γνωστό από τα Γενικά Πολεοδομικά Σχέδια των Δήμων με μεγάλη λεπτομέρεια ποιες είναι αυτές και από εκεί εξάγονται ορισμένα συμπεράσματα που στην συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη τον πληθυσμό χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της ζήτησης.

Μια πολύ βασική παραδοχή που γίνεται είναι η εξής: εξετάζεται και επιδιώκεται να προσδιοριστεί η γένεση και η έλξη μετακινήσεων των παραπάνω υποψήφιων θέσεων, που το ένα άκρο αυτών των μετακινήσεων είναι κάποιος από τους εξεταζόμενους σταθμούς Μετρό. Επισημαίνεται επομένως, πως δεν είναι το ζητούμενο να βρεθεί από ποια στάση μετρό i καταφθάνει κόσμος στην περιοχή j . Το ζητούμενο είναι να γίνει μια εύλογη εκτίμηση του πλήθους που καταφθάνει στην περιοχή j με μετρό. Έχοντας επισημάνει αυτό το λεπτό σημείο, στην συνέχεια περιγράφεται ο τρόπος προσδιορισμού της ζήτησης.

Οι υποψήφιος θέσεις έχουν ακτίνα κάλυψης ίση με 400 μέτρα. Εντός αυτής της περιμέτρου υπολογίζεται ο μόνιμος πληθυσμός και γίνεται μία εκτίμηση του αριθμού των ατόμων που καταφθάνει στην περιοχή για κάποια δραστηριότητα, όπως εργασία ή αναψυχή. Θεωρείται πως σε καθημερινή βάση μετακινούνται εκτός της περιοχής κατοικίας τους άτομα ηλικίας 18 έως 65 ετών. Οι μετακινήσεις τους μπορεί να έχουν σκοπό την εργασία, της εκπαίδευση, τον αθλητισμό, την αναψυχή και την ψυχαγωγία. Καθώς στην παρούσα εργασία εξετάζεται συνδυασμένη μετακίνηση ποδηλάτου-Μετρό θα πρέπει οι διαδρομές που μελετώνται να έχουν το ανάλογο μήκος. Οι ενδοδημοτικές μετακινήσεις δεν ενδιαφέρουν στα πλαίσια του συγκεκριμένου προβλήματος, γιατί σε καμία περίπτωση δεν περιλαμβάνουν μετακίνηση με Μετρό. Ακόμη θεωρείται πως οι χρήστες του συστήματος Bike Share έχουν μικρότερο ηλικιακό εύρος, δηλαδή είναι μεταξύ 18 και 55 ετών. Τέλος, με βάση στατιστικά δεδομένα ευρωπαϊκών χωρών με υφιστάμενες υποδομές για το ποδήλατο, για την περίπτωση της Αθήνας το ποσοστό των ημερήσιων διαδρομών με ποδήλατο λαμβάνεται ίσο με 3% (<http://www.ibike.org/>). Οι πόλεις που εξετάστηκαν έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με την Αθήνα ως προς το μέγεθος, τον πληθυσμό και τη νοοτροπία απέναντι στο ποδήλατο.

Οι παραγόμενες μετακινήσεις που αντιστοιχούν σε κάθε μία από τις υποψήφιος θέσεις οφείλονται στο μόνιμο πληθυσμό που κατοικεί στην περιοχή κάλυψης των θέσεων. Όπως εξηγήθηκε παραπάνω, οι πιθανοί χρήστες έχουν ηλικία από 18 μέχρι 55 έτη.

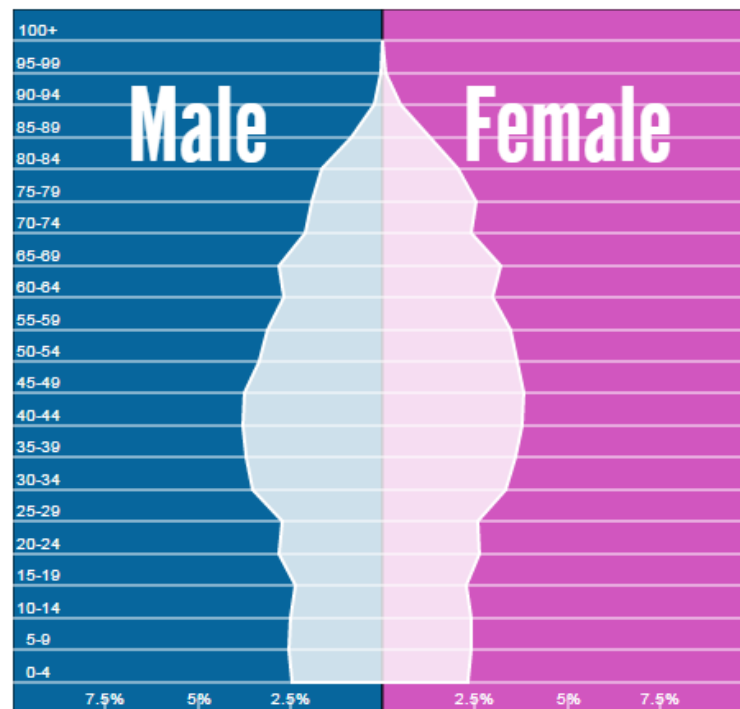
Από την ηλικιακή πυραμίδα του Νομού Αττικής προκύπτει ποιο ποσοστό του συνολικού πληθυσμού έχει ηλικία μεταξύ 18-55 έτη. Εξ αυτών, το 3% θα μεταβεί στο Μετρό με ένα δημόσιο ποδήλατο.

Οι ελκυσόμενες μετακινήσεις της υποψήφιας θέσης Σ_j προκύπτουν λαμβάνοντας υπόψη τη δυναμική των λειτουργιών που αναπτύσσονται εντός της ακτίνας κάλυψης της Σ_j . Για τον υπολογισμό των ελκυσόμενων μετακινήσεων εξετάζονται οι υπερτοπικές λειτουργίες, γιατί αυτές προσελκύουν κόσμο εκτός ορίων του Δήμου. Υπολογίζονται οι θέσεις εργασίας σε υπηρεσίες και καταστήματα, και επίσης, για τα καταστήματα, τα πανεπιστήμια, τα μουσεία, τους χώρους αναψυχής υπολογίζεται η χωρητικότητα (Institute of Transportation Engineers. Trip Generation. 9th Edition, Washington, DC, 2012). Το 3% των ατόμων που καταφθάνουν στην περιοχή Σ_j χρησιμοποιεί το σύστημα κοινόχρηστων ποδηλάτων. Εκτιμάται ξεχωριστά ο αριθμός των εργαζομένων από τον αριθμό των επισκεπτών γιατί η κάθε ομάδα έχει διαφορετικά ωράρια προσέλευσης και αποχώρησης.

Η συνολική ημερήσια ζήτηση των είκοσι τριών υποψήφιας θέσεων χωροθέτησης σταθμού BS αποτυπώνεται στον Πίνακα 4. Η ζήτηση κάθε θέσης αντιστοιχεί σε διαδρομές που έχουν ως αφετηρία ή προορισμό τον σταθμό κοινόχρηστων ποδηλάτων αυτής της θέσης. Για παράδειγμα, έχει εκτιμηθεί ότι στην πλατεία Ύδρας (Σ_1) έρχονται ή αποχωρούν 130 άτομα με ποδήλατο.

Μία τυπική ημέρα λειτουργίας του συστήματος διαιρείται σε έξι χρονικές περιόδους . Στο τέλος κάθε μιας πραγματοποιείται η διαδικασία της αναδιανομής των ποδηλάτων, ώστε στην αμέσως επόμενη περίοδο να υπάρχουν στους σταθμούς τα απαιτούμενα ελεύθερα docks και ποδήλατα. Στην πράξη η αναδιανομή των ποδηλάτων γίνεται σε μικρά χρονικά διαστήματα, για παράδειγμα ανά μία ώρα. Στα πλαίσια της εργασίας, μια τέτοια ακρίβεια θα αύξανε τον υπολογιστικό φόρτο χωρίς να προσδώσει χρήσιμες πληροφορίες για την εφαρμογή του μοντέλου. Οι έξι περίοδοι θεωρούνται αντιπροσωπευτικές και διαρκούν δυόμισι ώρες. Για την αναδιανομή των ποδηλάτων πρέπει να είναι γνωστές οι τιμές των ελκυσόμενων και παραγόμενων μετακινήσεων ανά θέση j και ανά χρονική περίοδο T .

**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5: ΠΛΗΘΥΣΜΙΑΚΗ ΠΥΡΑΜΙΔΑ ΕΛΛΑΔΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΕΤΟΣ 2016 ,
ΠΗΓΗ:POPULATIONPYRAMID.NET**



Η χρονική κατανομή της ζήτησης έγινε με εύλογες παραδοχές και χωρίς επιπλέον υπολογισμούς. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 5-6. Σε ένα τυχαίο κελί του Πίνακα 5, καταγράφεται το πλήθος των ατόμων που έχουν ως αφετηρία μια υποψήφια θέση Σ_j τη χρονική περίοδο T_t . Αντίστοιχα, σε ένα τυχαίο κελί του Πίνακα 6, υπάρχει η πληροφορία για το πλήθος των ατόμων που θέλουν να μεταβούν από κάποιο Μετρό στη θέση Σ_j κατά τη χρονική περίοδο T_t .

ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΖΗΤΗΣΗ ΥΠΟΨΗΦΙΩΝ ΘΕΣΕΩΝ

Σj	ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΖΗΤΗΣΗ
1	ΠΛΑΤΕΙΑ ΥΔΡΑΣ	130
2	ΠΛΑΤΕΙΑ ΑΓΙΑΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ	160
3	ΠΑΡΚΟ ΟΔΟΥ ΧΙΟΥ	130
4	ΦΙΛΙΚΗΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑΣ	120
5	ΠΛΑΤΕΙΑ ΚΟΡΑΗ	135
6	ΠΛΑΤΕΙΑ ΤΣΑΚΟΥ	110
7	ΡΙU VERDE ΠΑΡΚΟ	120
8	ΠΑΡΚΟ ΟΔΟΥ ΟΛΥΜΠΟΥ	130
9	ΑΙΓΛΗ ΚΙΝ/ΦΟΣ	150
10	ΠΛΑΤΕΙΑ ΔΟΥΡΟΥ	190
11	ΑΓΙΑ ΑΝΝΑ	150
12	ΕΘΝΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΣ	150
13	ΠΑΡΚΟ ΟΔΟΥ ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΥ	140
14	ΠΑΡΚΟ ΟΔΟΥ ΤΡΙΦΥΛΛΙΑΣ	130
15	ΠΛΑΤΕΙΑ ΑΓΙΑΣ ΣΟΦΙΑΣ	155
16	ΦΑΡΟΣ ΨΥΧΙΚΟΥ	170
17	ΕΜΠ-ΚΟΚΚΙΝΟΠΟΥΛΟΥ	200
18	ΠΛΑΤΕΙΑ ΑΓΙΟΥ ΘΩΜΑ	150
19	ΑΛΣΟΣ ΠΑΓΚΡΑΤΙΟΥ	150
20	ΠΑΡΚΟ ΟΔΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ	130
21	ΕΘΝΙΚΟ ΜΟΥΣΕΙΟ-ΟΔ.ΤΟΣΙΤΣΑ	160
22	ΒΑΡΒΑΚΕΙΟΣ ΑΓΟΡΑ	170
23	ΠΛΑΤΕΙΑ ΚΟΥΜΟΥΝΔΟΥΡΟΥ	150

ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΧΡΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ

	ΓΕΝΕΣΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΑΝΑ ΘΕΣΗ ΑΝΑ ΠΕΡΙΟΔΟ					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Σ1	20	15	10	10	10	15
Σ2	20	12	15	12	12	10
Σ3	20	15	15	10	5	10
Σ4	10	10	10	10	10	10
Σ5	15	15	10	10	5	10
Σ6	15	10	5	5	10	10
Σ7	10	10	5	10	10	15
Σ8	20	15	15	10	5	10
Σ9	25	15	15	10	10	5
Σ10	20	18	10	20	16	10
Σ11	20	15	10	10	20	5
Σ12	20	10	10	10	15	10
Σ13	20	15	15	10	10	10
Σ14	20	10	10	10	15	10
Σ15	15	15	10	15	15	10
Σ16	20	15	15	10	5	10
Σ17	0	5	20	30	10	5
Σ18	20	15	15	10	10	10
Σ19	15	20	10	10	10	5
Σ20	20	15	10	10	10	15
Σ21	10	15	20	15	10	5
Σ22	15	15	10	15	15	10
Σ23	15	15	10	10	10	10

ΠΙΝΑΚΑΣ 6: ΧΡΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΛΚΥΟΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ

	ΕΛΞΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ ΑΝΑ ΘΕΣΗ ΑΝΑ ΠΕΡΙΟΔΟ					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Σ1	0	5	10	15	10	10
Σ2	15	15	15	12	12	10
Σ3	10	10	10	15	5	5
Σ4	0	5	10	25	10	10
Σ5	5	10	10	20	10	15
Σ6	0	0	15	15	10	15
Σ7	0	5	15	10	15	15
Σ8	10	10	10	15	5	5
Σ9	5	5	10	20	10	20
Σ10	12	18	10	20	16	20
Σ11	5	15	15	20	10	5
Σ12	15	15	10	10	20	5
Σ13	10	10	10	15	10	5
Σ14	15	15	10	10	20	10
Σ15	15	15	15	20	10	15
Σ16	10	10	10	15	5	5
Σ17	35	35	25	15	10	10
Σ18	15	15	10	15	10	5
Σ19	10	15	15	15	5	20
Σ20	0	5	10	15	10	10
Σ21	20	20	20.0	10	10	5
Σ22	15	15	15	20	10	15
Σ23	15	15	15	15	5	15

3.2.4 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΔΡΟΜΩΝ

Στο σημείο αυτό θα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο υπολογίστηκε το μήκος της διαδρομής μεταξύ των σταθμών Μετρό και των υποψήφιων θέσεων παραλαβής/απόθεσης ποδηλάτων εκτός δικτύου μετρό.

Στην περίπτωση που σε όλη την υπό μελέτη περιοχή υπήρχε δίκτυο ποδηλατοδρόμων είναι σαφές πως η διαδρομή για τη μετάβαση προς και από το μετρό θα ήταν μέσω αυτού. Επειδή όμως κάτι τέτοιο δεν ισχύει, πλην ελαχίστων εξαιρέσεων όπως είναι τμήμα του Δήμου Αγίας Παρασκευής, ορίζονται ειδικές διαδρομές για την σύνδεση των σημείων μετακίνησης. Οι διαδρομές που προτείνονται και τα μήκη που υπεισέρχονται στο υπολογιστικό σκέλος του προβλήματος δεν είναι κατ' ανάγκη τα πλέον σύντομα.

Η επιλογή της συντομότερης διαδρομής θα είχε ως αποτέλεσμα την είσοδο των ποδηλατών σε μεγάλες οδικές αρτηρίες όπου οι συνθήκες είναι ακατάλληλες για ποδήλατα, τόσο για λόγους ασφάλειας όσο και για λόγους αναπτυσσόμενης ενέργειας. Αντίστοιχα, στην συντομότερη διαδρομή μπορεί να συμπεριλαμβάνεται οδικό τμήμα με κλίση άνω του 6%, που επίσης είναι ακατάλληλο για την κίνηση ποδηλάτου. Για το λόγο αυτό προτείνονται συγκεκριμένες διαδρομές.

Τα κριτήρια επιλογής μια διαδρομής είναι τα εξής:

- Όριο ταχύτητας όχι μεγαλύτερο από 30 χιλιόμετρα την ώρα
- Κλίση εδάφους μικρότερη ή ίση με 6%
- Οδοί μονής κατεύθυνσης
- Κατά το δυνατόν ευθεία διαδρομή

Να σημειωθεί ότι η προτεινόμενη διαδικασία κρίνεται απαραίτητη ως πιο ρεαλιστική. Στην περίπτωση όπου σε όλο το εξεταζόμενο οδικό δίκτυο υπήρχαν ποδηλατοδρόμοι, η χάραξη και τελική κατασκευή αυτών θα ενσωμάτωνε τα κριτήρια που αναφέρθηκαν.

Πάντα με γνώμονα την συντομότερη διαδρομή, εξετάζεται εάν καλύπτονται τα παραπάνω κριτήρια. Εάν κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει, γίνεται προσπάθεια εύρεσης της καταλληλότερης διαδρομής εξετάζοντας τα χαρακτηριστικά των γειτονικών οδικών τμημάτων. Για παράδειγμα, καμία διαδρομή δεν γίνεται κατά μήκος των μεγάλων λεωφόρων της περιοχής μελέτης, αλλά χρησιμοποιούνται τμήματα παράλληλα σε αυτές όπου το όριο των ταχυτήτων είναι σαφέστατα χαμηλότερο. Στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων Σ και Μ. όπως έχει αναφερθεί, με

Σj αναφέρονται οι είκοσι τρεις υποψήφιες θέσεις χωροθέτησης στην εμβέλεια των έντεκα σταθμών του Μετρό, οι οποίοι συμβολίζονται με Μ.

ΠΙΝΑΚΑΣ 7: ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΣΗΜΕΙΩΝ Μ,Σ

DIST.ij	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
Σ1	2.5	3.5	2.3	2.8	4.4	5.1	5.8	6.6	7.1	7.6	8.4
Σ2	1.9	1.5	1	1.6	2.7	3.6	5	5.8	6.3	6.9	7.5
Σ3	1.4	3.1	2.4	2.6	4.2	5.2	6.7	7.3	8.8	8.6	9.3
Σ4	1.5	2.1	2.6	3.2	5.2	5.9	7.1	7.9	8.7	8.5	9.3
Σ5	3.6	2.4	1.5	0.9	2.5	3.4	4.8	6.2	6.3	7.2	8.6
Σ6	4.2	3.1	2.4	1.1	2.5	3.4	4.7	5.8	6.9	7.1	8.9
Σ7	5.2	4.5	3.6	2.2	1.6	1.1	1.3	4.8	4.9	5.5	6.7
Σ8	1.3	1.1	1.2	2.6	3.3	4.7	5.6	7.8	8.3	8.9	9.4
Σ9	1.9	1.3	1.8	3.1	4.6	5.2	5.9	6.9	6.9	7.5	8.2
Σ10	3.3	2.1	1.4	2.2	2.3	3.3	4.6	5.7	5.9	6.5	7.2
Σ11	4.5	3.1	2.2	2	1.7	2.4	3.1	5.3	6.7	7.3	8.2
Σ12	5.3	3.9	3.2	2.6	1.6	1.7	2.2	3.7	5.7	6.4	7.1
Σ13	5	3.6	2.8	2.3	1.3	2.1	2.3	4.8	5	5.5	7
Σ14	4.9	3.2	2.4	1.5	1.7	2.1	2.9	4.4	5.3	5.7	6.3
Σ15	5	4.6	3.4	3.2	1.9	1.2	1.3	2.7	3.8	4.6	5.5
Σ16	5.9	5.2	4.3	3.4	2.2	1.8	1.6	3.7	3.9	4.4	5.3
Σ17	7	6.7	6.1	4.5	3.6	2.9	1.2	2.7	2.8	3.4	5.5
Σ18	9.1	7.5	6.7	5.2	4.3	3.3	2.1	1.3	1.3	1.9	2.4
Σ19	11.6	9.6	8.7	7.9	1.2	6.4	5.6	4.7	1.4	1.1	1.5
Σ20	10.5	9.3	8.4	7.7	7.1	6.7	5.6	4.5	1.1	1.1	2.1
Σ21	9.6	8.6	8	7.2	6.4	5.8	5.1	2.3	3.6	2.6	1.8
Σ22	12.3	11.6	10.8	9.2	7.7	6.2	5.4	4.1	3.2	2.4	1.6
Σ23	11.9	11.2	10.7	9.9	7.8	6.4	5.8	4.7	3.7	2.9	1.7

4.1 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ

Το πρόβλημα Σταθερού Κόστους (Fixed Charge Location Problem), κρίθηκε το καταλληλότερο για την αντιμετώπιση του προβλήματος που πραγματεύεται η συγκεκριμένη εργασία. Για ακόμη καλύτερη αποτύπωση του προβλήματος της χωροθέτησης σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων μέσω του μαθηματικού μοντέλου, η αρχική μορφή του FCLP (Κεφάλαιο 2) τροποποιείται μερικώς. Η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί έχουν ως εξής:

MINIMIZE:

$$\sum_{i \in I} X_i F_i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Y_{ij} d_{ij} - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Y_{ij} D_j \quad (0)$$

Subject to:

$$\sum_{i \in I} Y_{ij} \leq 1 \quad j \in J \quad (1)$$

$$Y_{ij} \leq X_i \quad j \in J, i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} D_j Y_{ij} S_i \leq S_{\max} \quad i \in I \quad (3)$$

$$\text{Fleet size} = N \quad (4)$$

$$Y_{ij} = \{0,1\} \quad j \in J, i \in I \quad (5)$$

$$X_i = \{0,1\} \quad i \in I \quad (6)$$

$$m_{it} = S_i Y_{ij} \frac{D_{dest,jt}}{\sum_{j \in J} D_{jt} Y_{ij}} \quad j \in J, i \in I, t \in T \quad (7)$$

$$m_{jt} = S_i Y_{ij} \frac{D_{or,jt}}{\sum_{j \in J} D_{jt} Y_{ij}} \quad j \in J, i \in I, t \in T \quad (8)$$

Όπου:

X_i, **Y_{ij}** = μεταβλητές απόφασης του προβλήματος και λαμβάνουν τις τιμές 0 ή 1. Το X_i ισούται με 1 εάν χωροθετηθεί εγκατάσταση στην τοποθεσία i, διαφορετικά ισούται με 0. Αντίστοιχα, για όλα i=1, το Y_{ij} είναι 1 αν η υποψήφια εγκατάσταση στο j εξυπηρετείται από το i.

F_i = το κόστος που απαιτείται για την εγκατάσταση κάθε σταθμού εκμίσθωσης ποδηλάτων στον σταθμό Μετρό i. Για την ακρίβεια το F_i εκφράζει το άθροισμα του

σταθερού κόστους εγκατάστασης ενός σταθμού συν το κόστος για τα docks του σταθμού.

D_j = η συνολική ζήτηση ανά ημέρα που αντιστοιχεί σε κάθε υποψήφια θέση (Σ_j).

D_{jt} = η συνολική ζήτηση ανά περίοδο t κάθε υποψήφιας θέσης (Σ_j).

$D_{or, jt}$ ή $D_{dest, jt}$ = η ζήτηση προέλευσης ή προορισμού, αντίστοιχα, για κάθε υποψήφια θέση Σ_j ανά χρονική περίοδο t .

S_{max} = ο μέγιστος αριθμός ποδηλάτων που θα διατεθεί για κάθε σταθμό. Το S εκφράζει τα ποδήλατα που θα καταναμεθούν σε κάθε υποσύστημα.

m_{it}, m_{jt} = ο αριθμός ποδηλάτων ανά σημείο i ή j αντίστοιχα σε κάθε χρονική περίοδο t .

Να σημειωθεί πως από εδώ και στο εξής, ως υποσύστημα θα αναφέρεται κάθε σταθμός Μετρό που θα λειτουργεί ως Bike and Ride, μαζί με τις θέσεις εκτός Μετρό που συνδέονται με αυτόν.

Η αντικειμενική συνάρτηση (0) είναι ένα άθροισμα τριών όρων. Οι δύο πρώτοι όροι συνάδουν με την κλασσική μορφή συνάρτησης του προβλήματος σταθερού κόστους. Εκφράζουν δηλαδή την ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης και την απόσταση μεταξύ των σημείων i, j , αντίστοιχα. Ο τρίτος όρος που προστέθηκε για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος αντιπροσωπεύει την εξυπηρετούμενη ζήτηση. Εισάγεται στην αντικειμενική συνάρτηση με αρνητικό πρόσημο διότι πρόκειται για πρόβλημα ελαχιστοποίησης, ενώ είναι επιθυμητό η συγκεκριμένη ποσότητα να μεγιστοποιείται.

Το παρόν πρόβλημα υπόκειται σε οκτώ περιορισμούς. Οι περιορισμοί (5) και (6) αφορούν στις μεταβλητές απόφασης του προβλήματος και εγγυώνται πως αυτές θα λάβουν μόνο τις τιμές 0 και 1. Ο περιορισμός (1) έχει τροποποιηθεί για να ανταποκρίνεται στις ανάγκες της παρούσας εργασίας. Κανονικά, ισχύει μονάχα ως ισότητα και διαβεβαιώνει πως κάθε σημείο ζήτησης θα αντιστοιχισθεί σε μια εγκατάσταση. Στο πρόβλημα όμως, ο στόχος είναι να καθορίσει το μοντέλο τις θέσεις εγκατάστασης σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων ώστε να εξυπηρετείται κατά το βέλτιστο τρόπο η ζήτηση. Επομένως, δεν είναι απαραίτητο όλες οι υποψήφιες εγκαταστάσεις εκτός σταθμών μετρό να εξυπηρετούνται. Για το λόγο αυτό αντί της ισότητας επιλέγεται η ανισότητα και προκύπτει πως όλη η ζήτηση μιας υποψήφιας θέσης j θα εξυπηρετείται από ένα σταθμό i (single allocation). Ο περιορισμός (2) με την σειρά του, βεβαιώνει πως η ζήτηση ανατίθεται σε ανοιχτές εγκαταστάσεις i .

Οι περιορισμοί (3) και (4) σχετίζονται με το διαθέσιμο αρχικό στόλο του συστήματος. Ορίζεται ένας αριθμός N -ποδηλάτων που θα διανεμηθούν σε όλο το δίκτυο. Όσο αυξάνεται ο αριθμός N , τόσο περισσότερες εγκαταστάσεις θα ορίζονται ως ανοιχτές. Βέβαια, εάν δεν τεθεί ένα όριο στον αριθμό των ποδηλάτων που θα εξυπηρετούν κάθε σταθμό i και τα σημεία j που επικοινωνούν με αυτόν, το μοντέλο θα ανάγει όλη την ζήτηση σε ελάχιστο αριθμό σταθμών και ίσως ο διαθέσιμος στόλος υπερβαίνει τη χωρητικότητα αυτών των σταθμών. Θεωρείται επομένως, πως κάθε σταθμός μετρώ ορισμένος ως σημείο bike&ride μαζί με τα σημεία παραλαβής/απόθεσης ποδηλάτων που συνδέεται, έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει με ένα μέγιστο αριθμό ποδηλάτων, ο οποίος αντιπροσωπεύεται από το S_{max} . Τα νούμερα N και S_{max} αλληλοεξαρτώνται, αλλά περαιτέρω ανάλυση σχετικά με την τιμή τους και την σχέση του θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο.

Κάτι που αξίζει να τονιστεί ιδιαίτερα, είναι πως η τιμή του διαθέσιμου στόλου N υπεισέρχεται με τη μορφή περιορισμού και είναι αυτός ο περιορισμός που αναγκάζει να τεθούν σε λειτουργία κάποιες από τις εξεταζόμενες υποψήφιες θέσεις Bike Share. Χωρίς αυτόν, η συγκεκριμένη διατύπωση του Μοντέλου Σταθερού Κόστους θα έδινε μονάχα μηδενική τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση, θέτοντας όλες τις μεταβλητές απόφασης ίσες με το μηδέν. Το τελευταίο είναι αναμενόμενο, αφού ο περιορισμός (1) έχει τροποποιηθεί σε σχέση με την μορφή που λαμβάνει στην κανονική διατύπωση του FCLP, δηλαδή να ισχύει ως ισότητα.

Οι δύο τελευταίοι περιορισμοί του προβλήματος αποτελούν μέρος των εξαγόμενων στοιχείων του. Μέσω αυτών, ορίζεται το πλήθος των ποδηλάτων ανά θέση ανά χρονική περίοδο.

4.2 ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΟΡΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ

Όπως φάνηκε από τη μορφή της, η αντικειμενική συνάρτηση είναι το άθροισμα τριών διαφορετικών όρων μιας και πρόκειται για βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων (multi-objective optimization). Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί κανονικοποίηση (normalization) της αντικειμενικής συνάρτησης.

Η μέθοδος που ακολουθείται είναι αυτή που προτείνουν οι Proos et al. (2001):

$$Z_{i,norm} = Z_{k,norm} = \frac{Z_k}{|Z_{k,Max}|} \quad (9)$$

Σε αυτή τη μέθοδο οι νέοι κανονικοποιημένοι όροι της Α.Σ. προκύπτουν ως τη διαίρεση της αρχικής τους τιμής με την απόλυτη μέγιστη δυνατή τιμή που μπορούν να λάβουν, χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί του προβλήματος. Σύμφωνα με τους Marler and Arora (2004), η τιμή $Z_{k,max}$ μπορεί να είναι είτε το απόλυτο μέγιστο της συνάρτησης Z , εάν υπάρχει, είτε μια προσέγγισή του, βασιζόμενη στην κρίση του μηχανικού (engineering intuition). Το αποτέλεσμα της κανονικοποίησης αυτής είναι αδιάστατοι όροι που κυμαίνονται στο διάστημα $[0,1]$ (προφανώς υπό την προϋπόθεση ότι $Z_{k,max} \neq 0$).

Η κανονικοποίηση αυτής της μορφής συνεπάγεται τα εξής πλεονεκτήματα:

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

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

(γ) Δε μεταβάλλει την ουσία της αντικειμενικής συνάρτησης. Με δεδομένο ότι η αντικειμενική συνάρτηση μετατρέπεται σε ένα άθροισμα της μορφής $\sum_{k=1}^n Z_{k,norm}$, όπου τα $Z_{k,max}$ είναι σταθερά, συμπεραίνεται ότι η ελαχιστοποίηση κάθε όρου μπορεί να επιτευχθεί αποκλειστικά με ελαχιστοποίηση του ίδιου του Z_k .

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

Κατά την κανονικοποίηση, κάθε όρος Z_k αντικαθίσταται από τον αντίστοιχό του (σχέση (9)). Επομένως, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός ή εκτίμηση των μέγιστων και ελάχιστων δυνατών τιμών των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης. Ακολουθώντας, περιγράφεται το σκεπτικό με το οποίο υπολογίζεται η μέγιστη τιμή κάθε όρου:

1. Κόστος i-εγκατάστασης: ως $Z_{i,max}$ θα ληφθεί η μέγιστη τιμή που παίρνει η συνάρτηση κόστους
2. Απόσταση μεταξύ σημείων ij : ως $Z_{i,max}$ θα ληφθεί η μέγιστη τιμή που συναντάται στο μητρώο αποστάσεων
3. Ζήτηση υποψήφιας θέσης j : ως $Z_{i,max}$ θα ληφθεί το μέγιστο ποσοστό ζήτησης

4.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Τα δεδομένα του προβλήματος που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς παρουσιάζονται συγκεντρωτικά παρακάτω:

- 1) Το τμήμα του δικτύου του Μετρό όπως έχει οριστεί (Κεφάλαιο 3) με κάθε σταθμό να συμβολίζεται με M_i
- 2) Οι είκοσι τρεις υποψήφιες θέσεις χωροθέτησης σταθμών παραλαβής/απόθεσης ποδηλάτων εκτός του δικτύου Μετρό στις οποίες αντιστοιχεί ο δείκτης j και συμβολίζονται με Σ_j
- 3) Η ζήτηση προέλευσης-προορισμού για καθένα σημείο j και η χρονική κατανομή της κατά την περίοδο λειτουργίας του συστήματος
- 4) Το μητρώο αποστάσεων μεταξύ των i, j
- 5) Η τιμή του στόλου N και του μέγιστου αριθμού ποδηλάτων ανά στάση Μετρό S_{max}
- 6) Το πλήθος των docks ανά στάση μετρό που εκφράζει τη χωρητικότητα $Capacity(i)$
- 7) Το κόστος κατασκευής για κάθε σταθμό και το κόστος κάθε επιπλέον θέσης στάθμευσης

Στην συνέχεια, εξηγείται αναλυτικότερα η εισαγωγή των δεδομένων στο μαθηματικό μοντέλο.

Η ζήτηση στο μοντέλο εισάγεται ως συνολική ζήτηση ανά ημέρα ανά υποψήφια θέση Σ_j , το άθροισμα δηλαδή της έλξης και γένεσης μετακινήσεων κάθε σημείου. Σε πρώτη φάση, κατά την επιλογή των σημείων που θα γίνουν σταθμοί κοινόχρηστων ποδηλάτων, κρίσιμη κρίνεται η συνολική ζήτηση κάθε σημείου και αυτή μετέχει στους υπολογισμούς ως ποσοστό της συνολικής ζήτησης της υπό μελέτη περιοχής. Σύμφωνα με τη μαθηματική έκφραση, είναι επιθυμητό πέρα από τα κοντινά σημεία στο μετρό, να προτιμηθούν εκείνα στα οποία συγκεντρώνονται τα υψηλότερα ποσοστά ζήτησης. Σε δεύτερη φάση, χρειάζεται να είναι γνωστές οι ακριβείς τιμές έλξης-γένεσης ανά υποψήφιο σταθμό και ανά χρονική περίοδο λειτουργίας του συστήματος εκμίσθωσης ποδηλάτων. Τα δεδομένα αυτά απαιτούνται για την

τοποθέτηση ποδηλάτων ανά σταθμό –πλέον έχουν προσδιοριστεί οι θέσεις όπου θα χωροθετηθεί σύστημα εκμίσθωσης- και για τον υπολογισμό της ανακατανομής των ποδηλάτων σε κάθε χρονική περίοδο.

Η χρονική διάρκεια λειτουργίας του συστήματος κοινόχρηστων ποδηλάτων διαιρείται σε έξι περιόδους. Γίνεται η υπόθεση πως λειτουργεί από τις οκτώ το πρωί μέχρι τις έντεκα το βράδυ. Οι έξι περίοδοι είναι ίδιας χρονικής διάρκειας, η καθεμία διαρκεί δυόμισι ώρες. Το ορθότερο ως προς την ακρίβεια θα ήταν να πραγματοποιείται αναδιανομή των ποδηλάτων στο σύστημα ανά μία ώρα. Στα πλαίσια της εργασίας όμως αυτό απλά αυξάνει τον υπολογιστικό φόρτο χωρίς να προσφέρει επιπλέον πληροφορίες για την συμπεριφορά του μοντέλου. Επομένως, οι έξι περίοδοι κρίνονται αντιπροσωπευτικές.

Η τιμή του διαθέσιμου στόλου στο σύστημα δεν είναι σταθερή. Θα οριστούν διάφορες τιμές στα διαφορετικά σενάρια που θα εξεταστούν στην συνέχεια. Όπως υπογραμμίστηκε στο 4^ο Κεφάλαιο, η τιμή του διαθέσιμου στόλου N είναι πολύ καθοριστική για την επίλυση του προβλήματος και τον καθορισμό των βέλτιστων σημείων. Ακόμη, η τιμή του N είναι αλληλένδετη με την τιμή S_{max} , που εκφράζει το μέγιστο αριθμό ποδηλάτων ανά υποσύστημα. Τα σενάρια αποσκοπούν μεταξύ άλλων να προσδιορίσουν την σχέση μεταξύ των αυτών τιμών.

Για το κόστος εγκατάστασης λαμβάνεται υπόψη μια σταθερή τιμή που εκφράζει το απαιτούμενο σταθερό ποσό για έναν σταθμό. Ανεξάρτητα δηλαδή από το μέγεθος της εγκατάστασης, υπάρχει το κόστος του ηλεκτρονικού μηχανήματος με το οποίο πραγματοποιείται η πληρωμή, η αναγνώριση και ταυτοποίηση των χρηστών όταν αυτοί εξυπηρετούνται από το σύστημα. Η τιμή αυτή για τα πλαίσια της εργασίας έχει θεωρηθεί 3000 ευρώ. Σε αυτή προστίθεται το κόστος κάθε επιπλέον θέσης παραλαβής/απόθεσης που είναι 350 ευρώ. Έτσι λοιπόν, το κόστος εγκατάστασης κάθε σταθμού είναι το άθροισμα των δύο προαναφερθέντων όρων.

Όσον αφορά στον αριθμό των θέσεων (docks), εκφράζουν το μέγιστο ελεύθερο χώρο στις στάσεις μετρό για τη στάθμευση ποδηλάτων. Σε γενικές γραμμές ο αριθμός αυτό κυμαίνεται στις είκοσι με τριάντα θέσεις ανά στάση, ανάλογα με το διαθέσιμο χώρο που υπάρχει. Όπως αναφέρθηκε στο 3ο Κεφάλαιο, το ένα dock καταλαμβάνει 1,4 τετραγωνικά μέτρα. Η διαθέσιμη χωρητικότητα των στάσεων του μετρό θα αξιοποιηθεί πλήρως, παρόλο που το πλήθος των ποδηλάτων στο σταθμό δε θα είναι τόσο. Οι τιμές που καταγράφονται στον Πίνακα 8 και μετέχουν στην υπολογιστική διαδικασία αντιπροσωπεύουν το ογδόντα τοις εκατό της πραγματικής χωρητικότητας του κάθε σταθμού. Στην συνέχεια, όταν παρουσιαστούν τα αριθμητικά αποτελέσματα, φαίνεται πως σε ορισμένους σταθμούς το πλήθος ποδηλάτων στην

αρχή κάποιας χρονικής περιόδου υπερβαίνει τις θέσεις, σύμφωνα με τον πίνακα. Αυτή η μικρή υπέρβαση όμως δε μπορεί να αποτελέσει λόγο για απόρριψη της λύσης μιας και άλλωστε στην κατασκευή σταθμών Bike Share πάντα υπάρχει μέριμνα για περίσσεια χωρητικότητα (Frade et al., 2015).

Στα σημεία εκτός δικτύου Μετρό δε λαμβάνεται υπόψη το κόστος χωροθέτησης διότι κρίνεται πως δεν επηρεάζει την επιλογή των σημείων. Στην περίπτωση των στάσεων του μετρό, απαιτείται πολύ περισσότερος χώρος άρα και κόστος για τη δημιουργία θέσεων παραλαβής/απόθεσης μιας κι εκεί θα συγκεντρώνεται πιο μεγάλος αριθμός ποδηλάτων συγκριτικά με τα σημεία εκτός Μετρό. Για το λόγο αυτό, δίνεται έμφαση στο να περιοριστεί το κόστος για τη χωροθέτηση σταθμών Bike Share στις στάσεις του Μετρό.

ΠΙΝΑΚΑΣ 8: ΑΡΙΘΜΟΣ DOCKS ΑΝΑ ΣΤΑΘΜΟ ΜΕΤΡΟ

Μ/	ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΣΤΑΘΜΟΥ	ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ
1	ΔΟΥΚΙΣΣΗΣ ΠΛΑΚΕΝΤΙΑΣ	25
2	ΧΑΛΑΝΔΡΙ	30
3	ΑΓΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ	30
4	ΝΟΜΙΣΜΑΤΟΚΟΠΕΙΟ	30
5	ΧΟΛΑΡΓΟΣ	25
6	ΕΘΝΙΚΗ ΑΜΥΝΑ	25
7	ΚΑΤΕΧΑΚΗ	25
8	ΑΜΠΕΛΟΚΗΠΟΙ	20
9	ΜΕΓΑΡΟ ΜΟΥΣΙΚΗΣ	25
10	ΕΥΑΓΓΕΛΙΣΜΟΣ	30
11	ΣΥΝΤΑΓΜΑ	30

Όσον αφορά στην κανονικοποίηση των όρων, η μέγιστη τιμή της ζήτησης αντιστοιχεί σε ποσοστό 5,9% της συνολικής και, συνεπώς, οι όροι θα διαιρεθούν με αυτό την τιμή. για να προκύψουν οι κανονικοποιημένοι, ο οποίοι εισέρχονται στο μοντέλο. Ομοίως, η μέγιστη τιμή του κόστους είναι ίση με 10.800€ και με αυτή θα διαιρεθούν οι όροι του κόστους. Με τον ίδιο τρόπο προκύπτουν οι κανονικοποιημένοι όροι της απόστασης.

4.4 ΕΞΑΓΟΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η επίλυση του προβλήματος σταθερού κόστους θα ορίσει ανάλογα με τους διαθέσιμους πόρους, σε ποια σημεία της υπό μελέτης περιοχής θα χωροθετηθούν σταθμοί Bike Share. Αναλυτικότερα, αναμένεται να προσδιοριστούν ποιοι σταθμοί Μετρό θα προσφέρουν δυνατότητα Bike and Ride και ποια σημεία του δικτύου θα

εξυπηρετούνται από αυτές τις εγκαταστάσεις. Επομένως, σε πρώτη φάση, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης εξάγει τα βέλτιστα «ανοιχτά» σημεία του δικτύου.

Μέρος των εξαγόμενων αποτελεσμάτων είναι το πλήθος των ποδηλάτων που αντιστοιχεί σε κάθε «ανοιχτό» σταθμό Μετρό αλλά και πώς αυτός αριθμός κατανέμεται στο υποσύστημα μέσα στη μέρα για να εξυπηρετήσει την ζήτηση. Όπως έχει αναφερθεί, η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως *relocating*. Για την αρχή κάθε χρονικής περιόδου είναι γνωστά τα ποδήλατα που πρέπει να είναι στους «ανοιχτούς» σταθμούς.

Στον Πίνακα 9 παρουσιάζεται η ανάθεση ποδηλάτων στους σταθμούς κατά την πρώτη χρονική περίοδο λειτουργίας του συστήματος. Όπως φαίνεται, σε κάθε σταθμό Μετρό M αντιστοιχούν δύο σειρές. Στην πρώτη σειρά καταγράφεται ο αριθμός των ποδηλάτων που πρέπει να υπάρχει στην στάση Σ για να εξυπηρετηθεί η ζήτηση από το Σ στο M . στην συγκεκριμένη περίπτωση, κατά την πρώτη χρονική περίοδο $T1$, στα σημεία Σ_1 και Σ_3 υπάρχουν 15 ποδήλατα. Οι δύο αυτοί σταθμοί εξυπηρετούνται από το Μετρό M_1 . Κάθε δεύτερη σειρά του ίδιου πίνακα αναφέρεται στις ελκυσόμενες μετακινήσεις των θέσεων Σ . στα κελιά αυτά καταγράφεται ο αριθμός των ποδηλάτων που θα είναι στο Μετρό για να εξυπηρετήσουν τους χρήστες που αποχωρούν από αυτό. Αντίστοιχα, για τη θέση Σ_1 δεν υπάρχουν ποδήλατα ενώ για στην Σ_3 διατίθενται επτά.

ΠΙΝΑΚΑΣ 9: ΠΟΔΗΛΑΤΑ ΑΝΑ ΣΤΑΘΜΟ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΡΩΤΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ $T1$.

T1	Σ_1	Σ_2	Σ_3	Σ_4	Σ_5	Σ_6	Σ_7	Σ_8	Σ_9	Σ_{10}
M1	15	0	15	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0
M2	0	0	0	0	0	0	0	12	15	0
	0	0	0	0	0	0	0	6	3	0
M3	0	15	0	0	11	0	0	0	0	0
	0	11	0	0	4	0	0	0	0	0
M4	0	0	0	14	0	21	14	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
M6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ανάλογα με τα ποδήλατα των «ανοιχτών» σταθμών ανά χρονική περίοδο λειτουργίας του συστήματος, είναι εφικτός ο προσδιορισμός της εξυπηρετούμενης ζήτησης. Εφόσον, η ζήτηση θεωρείται σταθερή για κάθε σημείο, δε μεταβάλλεται δηλαδή σε σχέση με το πλήθος του διαθέσιμου στόλου, εξετάζεται για τις μεταβολές της τιμής του τελευταίου, ποιο είναι το εξυπηρετούμενο ποσοστό διαδρομών. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί, πως η εκτίμηση του προηγούμενου ποσοστού δεν είναι απόλυτα ακριβής για τον εξής λόγο: η ζήτηση ανά θέση αναφέρεται σε μία χρονική περίοδο μερικών ωρών, άρα στην πράξη υπάρχει κατανομή αυτής της ζήτησης μέσα στην εν λόγω χρονική διάρκεια, κάτι που αγνοείται στα πλαίσια της εργασίας. Αυτό που υπολογίζεται όμως, είναι ποιο ποσοστό της ζήτησης εξυπηρετείται στην ακραία, υποθετική περίπτωση όπου οι δυνητικοί χρήστες του συστήματος καταφθάνουν ταυτόχρονα σε κάποιο σταθμό BS. Καθώς θα εξεταστούν διαφορετικά σενάρια ως προς το μέγεθος του διαθέσιμου στόλου, έχει νόημα να εξεταστεί παράλληλα πώς αυτά επιδρούν στην ικανοποίηση των χρηστών.

4.5 ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Για την επίλυση του προβλήματος επιλέχθηκε το εργαλείο βελτιστοποίησης OpenSolver. Το τελευταίο αποτελεί πρακτικά μια νέα, βελτιωμένη και πιο ισχυρή έκδοση του πρόσθετου εργαλείου (add-in tool) Solver της Microsoft Excel.

Ο Solver του Excel δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να επιλύσει προβλήματα βελτιστοποίησης στο υπολογιστικό φύλλο του Excel. Είναι ένα ιδιαίτερα εύχρηστο εργαλείο, η λύση του οποίου έχει υψηλή ακρίβεια, όταν φυσικά είναι εφικτή. Το μειονέκτημα έχει να κάνει με το γεγονός ότι ο Solver μπορεί να χειριστεί μέχρι διακόσιες μεταβλητές, κάτι που για πολλά προβλήματα είναι ανεπαρκές (Mason, 2010). Αυτή η ανεπάρκεια είναι ένα από τα ελαττώματα του Solver που καταργεί το δωρεάν, πρόσθετο εργαλείο OpenSolver.

Ο OpenSolver προσφέρει τη δυνατότητα επίλυσης μοντέλων γραμμικού και ακέραιου προγραμματισμού με το λογισμικό βελτιστοποίησης CBC. Το CBC έχει αναπτυχθεί από την ομάδα που είναι γνωστή ως COIN-OR (Computational Infrastructure for OR) και πρόκειται για λογισμικό ανοικτού κώδικα.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, τα δεδομένα του μοντέλου εισάγονται σε υπολογιστικό φύλλο του Microsoft Excel και στην συνέχεια, τα κελιά ανάλογα με το τι αντιπροσωπεύουν, αντιστοιχίζονται στις κατάλληλες θέσεις του παραθύρου του OpenSolver. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6, θα πρέπει να οριστεί το κελί που εμπεριέχει την τιμή την αντικειμενικής συνάρτησης και έπειτα να σημειωθεί εάν επιδιώκεται μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση αυτής της ποσότητας. Μετά ορίζονται

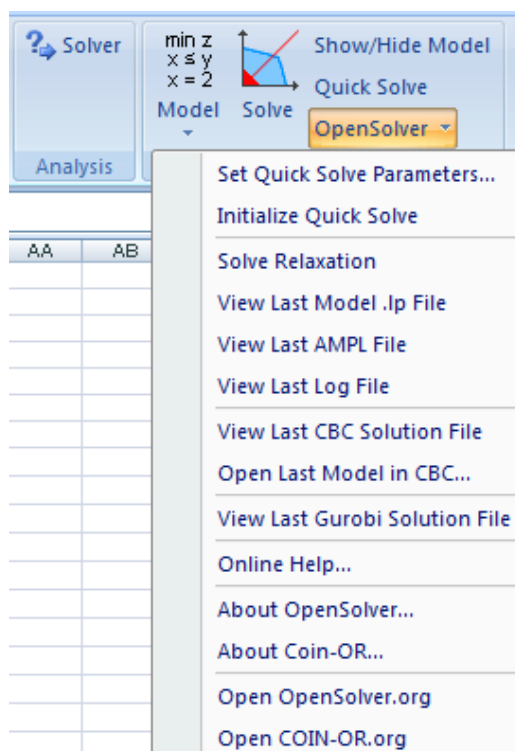
τα κελιά των οποίων η τιμή επιτρέπεται να αλλάξει (variables cells) με σκοπό να βρεθεί η βέλτιστη λύση και τέλος, σημειώνονται τα κελιά και οι αντίστοιχοι περιορισμοί. Για να εισαχθεί ένας περιορισμός στο μοντέλο του Solver επιλέγονται πρώτα τα κελιά των οποίων η τιμή υπόκειται σε περιορισμό (Left Hand Side), η σχέση που ορίζει ο περιορισμός και τέλος, τα κελιά που περιέχουν τις επιθυμητές ή επιτρεπτές τιμές (Right Hand Side).

Στο ίδιο παράθυρο (Εικόνα 5) δίνεται και η επιλογή της ανάλυσης ευαισθησίας. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, όπως και σε όλα τα προβλήματα των οποίων οι μεταβλητές απόφασης λαμβάνουν μονάχα δυαδικές τιμές, η πραγματοποίηση ανάλυσης ευαισθησίας του μοντέλου μέσω του Solver είναι αδύνατη.

Από τον χρήστη ορίζονται επίσης ο χρόνος επίλυσης και ο αριθμός των επαναλήψεων. Είναι προεπιλεγμένα τα νούμερα 100 δευτερόλεπτα και 100 επαναλήψεις αλλά αρκετές φορές ενδέχεται να μην προσδιορίζεται λύση εντός αυτών των ορίων. Ακόμη, ο χρήστης μπορεί να επέμβει στην ανοχή (tolerance), αλλά όχι στην ακρίβεια, η οποία έχει την τιμή 0.00001.

Κατά την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου της παρούσας εργασίας, ο αριθμός επαναλήψεων λήφθηκε ίσος με 600 όπως επίσης και τα δευτερόλεπτα που εκφράζουν το μέγιστο χρόνο επίλυσης. Στις δύο προηγούμενες παραμέτρους δόθηκε μια μάλλον συντηρητική τιμή, χωρίς όμως αυτό να προκαλεί κάποιο πρόβλημα. Σε ορισμένες επιλύσεις του συγκεκριμένου προβλήματος η βέλτιστη λύση δεν ήταν εφικτό να βρεθεί σε επαναλήψεις λιγότερες από 300 ή σε χρόνο μικρότερο των τεσσάρων λεπτών. Έτσι, οι δοθείσες τιμές εγγυώνται ότι θα βρεθεί λύση, εάν φυσικά αυτό είναι εφικτό.

ΕΙΚΟΝΑ 5: ΜΕΝΟΥ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ



Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται το μενού των εργαλείων Solver και OpenSolver αντίστοιχα, όπως φαίνονται στο Task Bar. Η επιλογή «Model» οδηγεί στο παράθυρο της Εικόνας 5, με την επιλογή «Solve» ξεκινά η εφαρμογή της επαναληπτικής διαδικασίας για τον προσδιορισμό της λύσης. Τότε, στο υπολογιστικό φύλλο οι μεταβλητές απόφασης τίθενται ίσες με μηδέν, μέχρις ότου λάβουν την τελική τους τιμή. Να σημειωθεί πως ακόμα και όταν το πρόβλημα δεν έχει εφικτή λύση, δηλαδή σύμφωνα με τους περιορισμούς, αυτή αποτυπώνεται στο υπολογιστικό φύλλο στα αντίστοιχα κελιά.

Εφόσον ο χρήστης έχει μορφοποιήσει το μοντέλο του γίνεται να το δει διαγραμματικά, δηλαδή με κατάλληλα χρώματα και σχέσεις αλληλουχίας που εμφανίζονται στο υπολογιστικό φύλλο. Αυτό είναι εφικτό κάνοντας κλικ στην επιλογή «Show Model».

Μια από τις επεκτάσεις του OpenSolver είναι η επιλογή «Quick Solve». Αλλάζοντας μόνο ορισμένες τιμές, για παράδειγμα μιας παραμέτρου, το συγκεκριμένο πλήκτρο οδηγεί στην επίλυση του προβλήματος σε πολύ μικρότερο χρόνο, αφού εντοπίζει τα σημεία-κελιά που δεν επηρεάζονται από την αλλαγή. Γίνονται, δηλαδή, μόνο οι νέοι, επιπρόσθετοι έλεγχοι.

Τέλος, η τρίτη επιλογή του προηγούμενου μενού, περιέχει διάφορες επιπλέον εντολές. Μεταξύ άλλων, ο χρήστης μπορεί να επέμβει στο μοντέλο ή να δει αρχεία με

εξαγόμενα αποτελέσματα. Ακόμη, μέσω αυτού του μενού ο χρήστης οδηγείται στην ιστοσελίδα του OpenSolver.

ΕΙΚΟΝΑ 6:MENU OPEN SOLVER

OpenSolver - Model

What is AutoModel? AutoModel

AutoModel is a feature of OpenSolver that tries to automatically determine the problem you are trying to optimise by observing the structure of the spreadsheet. It will turn its best guess into a Solver model, which you can then edit in this window.

Objective Cell: ☐ maximise ☒ minimise ☐ target value:

Variable Cells:

Constraints:

- <Add new constraint>
- \$B\$2:\$B\$12 bin
- \$B\$33:\$X\$43 bin
- \$B\$33:\$X\$43 <= \$B\$50:\$X\$60
- \$B\$45:\$X\$45 <= \$B\$47:\$X\$47
- \$Z\$63:\$Z\$73 <= \$AB\$63:\$AB\$73
- \$Z\$74 = \$Z\$76

=

☐ Make unconstrained variable cells non-negative

☒ Show named ranges

5.1 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ

Με σκοπό την ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου στις τιμές των παραγόντων του διαμορφώνονται και εξετάζονται διαφορετικά σενάρια. Αρχικά, ορίζεται το βασικό σενάριο και τα υπόλοιπα θα προκύψουν μεταβάλλοντας ένα από τα δεδομένα του βασικού σεναρίου, ενώ τα υπόλοιπα θα διατηρούνται σταθερά. Επομένως, το βασικό σενάριο θα αποτελέσει σημείο αναφοράς για τις μετέπειτα μεταβολές των παραγόντων.

Σε κάθε σενάριο αμετάβλητο παραμένει το δίκτυο των υποψήφιων θέσεων χωροθέτησης σταθμών και το μητρώο αποστάσεων των σημείων του δικτύου. Επομένως, σε όλα τα σενάρια θα υπάρχουν έντεκα σταθμοί Μετρό με τον συμβολισμό M_i και είκοσι τρία σημεία στην εμβέλεια του Μετρό, με τον συμβολισμό Σ_j . Οι αποστάσεις μεταξύ των i, j δε θα μεταβληθούν σε κανένα σενάριο. Τέλος, σταθερός θα παραμείνει και ο μέγιστος αριθμός S_{max} ποδηλάτων που θα δοθεί σε ένα υποσύστημα. Υπενθυμίζεται ότι ως υποσύστημα έχει οριστεί ένας σταθμός Μετρό M_i και οι σταθμοί ποδηλάτων στην εμβέλεια του Μετρό που συνδέονται με τον M_i .

Οι παράγοντες που θα μεταβληθούν είναι το κόστος εγκατάστασης ενός σταθμού, η χωρητικότητα των σταθμών BS στις στάσεις του Μετρό, το μέγεθος του στόλου ποδηλάτων στο σύστημα και η ζήτηση των υποψήφιων θέσεων. Συνολικά θα διαμορφωθούν τέσσερα επιπλέον σενάρια πέρα από το βασικό. Στο πρώτο σενάριο θα μεταβληθεί η τιμή του κόστους εγκατάστασης, στο δεύτερο η χωρητικότητα των σταθμών στα σημεία M , στο τρίτο ο διαθέσιμος στόλος και στο τέταρτο η συνολική ημερήσια ζήτηση ανά σημείο Σ .

Το βασικό σενάριο διαμορφώνεται ως εξής: ο διαθέσιμος στόλος αποτελείται από 300 ποδήλατα. Για τον πληθυσμό την υπό μελέτη περιοχή ο αριθμός αυτό κρίνεται κατάλληλος λαμβάνοντας υπόψη το πλήθος ποδηλάτων παρόμοιες περιπτώσεις πόλεων (Midgley, 2011). Το κόστος εγκατάστασης κάθε σταθμού αποτελείται από

δύο όρους, το σταθερό κόστος και το κόστος ανά θέση παραλαβής (dock). Οι τιμές τους για το βασικό σενάριο είναι 3000€ και 350€, αντίστοιχα. Η χωρητικότητα των υποψήφιων σταθμών BS στο δίκτυο του Μετρό φαίνεται στον Πίνακα 10 και τέλος η ζήτηση παρουσιάζεται στον Πίνακα 11. Η ζήτηση στην υπολογιστική διαδικασία υπεισέρχεται ως ποσοστό της συνολικής ζήτησης της εξεταζόμενης περιοχής.

ΠΙΝΑΚΑΣ 10: ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΟΔΗΛΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΣΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟ

Μ/	ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ
1	25
2	30
3	30
4	30
5	25
6	25
7	25
8	20
9	25
10	30
11	30

ΠΙΝΑΚΑΣ 11: ΖΗΤΗΣΗ ΑΝΑ ΥΠΟΨΗΦΙΑ ΘΕΣΗ ΩΣ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ

Σj	ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΖΗΤΗΣΗ	% ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ
1	ΠΛΑΤΕΙΑ ΥΔΡΑΣ	130	3,8
2	ΠΛΑΤΕΙΑ ΑΓΙΑΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ	160	4,7
3	ΠΑΡΚΟ ΟΔΟΥ ΧΙΟΥ	130	3,8
4	ΦΙΛΙΚΗΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑΣ	120	3,6
5	ΠΛΑΤΕΙΑ ΚΟΡΑΗ	135	4,0
6	ΠΛΑΤΕΙΑ ΤΣΑΚΟΥ	110	3,3
7	ΡΙU VERDE ΠΑΡΚΟ	120	3,6
8	ΠΑΡΚΟ ΟΔΟΥ ΟΛΥΜΠΟΥ	130	3,8
9	ΑΙΓΛΗ ΚΙΝ/ΦΟΣ	150	4,4
10	ΠΛΑΤΕΙΑ ΔΟΥΡΟΥ	190	5,6
11	ΑΓΙΑ ANNA	150	4,4
12	ΕΘΝΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΣ	150	4,4
13	ΠΑΡΚΟ ΟΔΟΥ ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΥ	140	4,1
14	ΠΑΡΚΟ ΟΔΟΥ ΤΡΙΦΥΛΛΙΑΣ	130	3,8
15	ΠΛΑΤΕΙΑ ΑΓΙΑΣ ΣΟΦΙΑΣ	155	4,6
16	ΦΑΡΟΣ ΨΥΧΙΚΟΥ	170	5,0
17	ΕΜΠ-ΚΟΚΚΙΝΟΠΟΥΛΟΥ	200	5,9
18	ΠΛΑΤΕΙΑ ΑΓΙΟΥ ΘΩΜΑ	150	4,4
19	ΑΛΣΟΣ ΠΑΓΚΡΑΤΙΟΥ	150	4,4
20	ΠΑΡΚΟ ΟΔΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ	130	3,8
21	ΕΘΝΙΚΟ ΜΟΥΣΕΙΟ-ΟΔ.ΤΟΣΙΤΣΑ	160	4,7
22	ΒΑΡΒΑΚΕΙΟΣ ΑΓΟΡΑ	170	5,0
23	ΠΛΑΤΕΙΑ ΚΟΥΜΟΥΝΔΟΥΡΟΥ	150	4,4

Η τιμή του μέγιστου αριθμού ποδηλάτων ανά υποσύστημα, $S_{\max}$, μέχρις στιγμής δεν έχει προσδιοριστεί. Θα βρεθεί έπειτα από ορισμένες δοκιμές και σύγκριση των αποτελεσμάτων. Για τον προσδιορισμό της χρησιμοποιούνται τα δεδομένα των προηγούμενων πινάκων. Στο σύστημα αναμένεται να κυκλοφορούν 300 κοινόχρηστα ποδήλατα. Μια πρώτη εύλογη τιμή για το $S_{\max}$ είναι να ληφθεί ίσο με 50. Με σκοπό να επαληθευτεί η επιλογή του $S_{\max}=50$, εξετάζονται επιπλέον τιμές κοντά σε αυτή. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η περίπτωση $S_{\max}=40$ και $S_{\max}=60$. Τα αποτελέσματα του μοντέλου θα αιτιολογήσουν την τελική επιλογή. Ουσιαστικά αποζητείται η τιμή του $S_{\max}$ για την οποία γίνεται βέλτιστη κατανομή των πόρων, που αυτό άλλωστε είναι το ζητούμενο της εργασίας, και παράλληλα δεν υπερβαίνεται η χωρητικότητα των σταθμών.

Για $S_{\max}=60$ σε κάθε σταθμό ανατίθενται περισσότερα ποδήλατα από τις υπάρχουσες θέσεις. Επομένως η τιμή αυτή απορρίπτεται χωρίς να ληφθεί υπόψη η κατανομή των πόρων. Μεταξύ των τιμών 50 και 40, όπως φαίνεται στον Πίνακα 12, το όριο των σαράντα ποδηλάτων απαιτεί έναν παραπάνω «ανοιχτό» σταθμό Μετρό, το οποίο συνεπάγεται υψηλότερο κόστος εγκατάστασης. Να σημειωθεί ακόμη, ότι για $S_{\max}=50$ τα ποδήλατα οριακά δεν υπερβαίνουν τη χωρητικότητα των σταθμών, άρα δεν υπάρχει νόημα να εξεταστούν τιμές μεγαλύτερες του πενήντα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 12: ΣΤΑΘΜΟΙ ΜΕΤΡΟ ΟΡΙΣΜΕΝΟΙ ΩΣ BIKE&RIDE ΓΙΑ ΔΥΟ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ $S_{\max}$

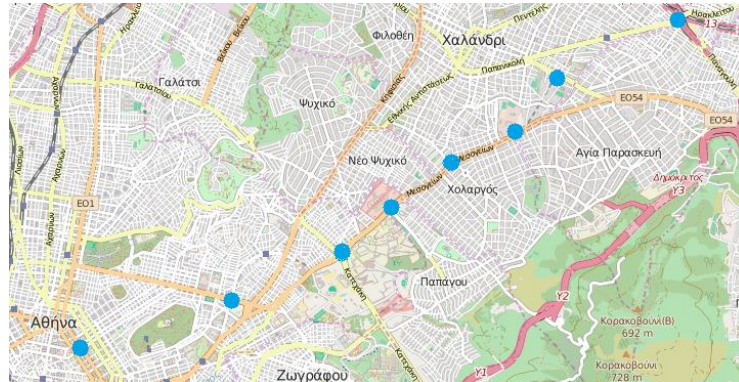
Στ. Μετρό	$S_{\max}=40$	$S_{\max}=50$
M1	+	+
M2		+
M3	+	
M4	+	+
M5	+	+
M6	+	
M7	+	+
M8	+	
M9		+
M10		
M11	+	+

Η περίπτωση διαφορετικών ορίων $S_{\max}$ ανά σταθμό, για παράδειγμα σε σχέση με την χωρητικότητα αυτών, έπειτα από δοκιμές κρίθηκε ακατάλληλη. Γενικά, με οποιαδήποτε τιμή του ορίου ξεπερνάει το 50, γίνεται υπέρβαση της χωρητικότητας ορισμένων σταθμών. Επομένως, δημιουργείται για το δεδομένο πρόβλημα, ένα άνω όριο στην τιμή του $S_{\max}$.

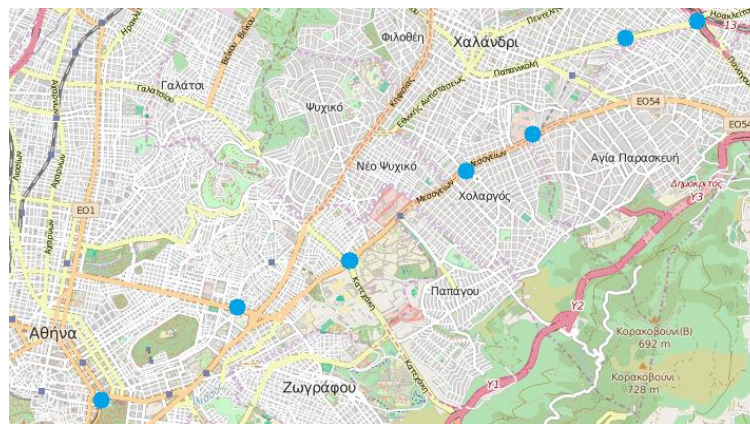
Παρατηρώντας την αριθμητική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (Α.Σ.) και των τριών όρων της (Πίνακας 13) για τις επιλύσεις $S_{\max}=40$ και 50, φαίνεται ότι οι όροι

στην πρώτη περίπτωση είναι πιο επιβαρυνμένοι. Συνολικά, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι μικρότερη για $S_{\max}=50$ ομοίως είναι οι όροι που εκφράζουν το κόστος εγκατάστασης και απόστασης και απόστασης. Με το όριο των πενήντα ποδηλάτων ανά υποσύστημα, περιορίζεται το κόστος εγκατάστασης αλλά και το κόστος μετακίνησης. Η μείωση στον όρο της απόστασης δηλώνει πως οι σταθμοί j συνδέονται με τους κοντινότερους i . Να σημειωθεί ότι, ο όρος της εξυπηρετούμενης ζήτησης είναι σταθερός και στις δύο περιπτώσεις, άρα δεν επηρεάζει την επιλογή.

ΕΙΚΟΝΑ 7: ΣΤΑΘΜΟΙ ΜΕΤΡΟ ΟΡΙΣΜΕΝΟΙ ΩΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ B&R ΓΙΑ $S_{\max}=40$



ΕΙΚΟΝΑ 8: ΣΤΑΘΜΟΙ ΜΕΤΡΟ ΟΡΙΣΜΕΝΟΙ ΩΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ B&R ΓΙΑ $S_{\max}=50$



Συνεπώς, στο βασικό σενάριο θα επιλεγεί η τιμή $S_{\max}=50$. Η τιμή αυτή εγγυάται ότι τα ποδήλατα που θα βρίσκονται στους επιμέρους σταθμούς κάθε υποσυστήματος δε θα υπερβαίνουν τη χωρητικότητα αυτών. Ο όρος αυτός παραμένει αμετάβλητος σε όλα τα επόμενα σενάρια.

ΠΙΝΑΚΑΣ 13: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΟΡΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΓΙΑ ΔΥΟ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ S_{max}

ΟΡΟΙ	$S_{max}=40$	$S_{max}=50$
Α.Σ.	-6,612	-7,765
ΚΟΣΤΟΣ	7,027778	6,352
ΑΠΟΣΤΑΣΗ	3,260163	2,780
ΖΗΤΗΣΗ	16,9	16,9

Τα τέσσερα σενάρια διαμορφώνονται ως εξής:

- i. Σενάριο κόστους: αρχικά εξετάζεται η αύξηση των δύο επιμέρους τιμών του κόστους κατά 20% και κατά 50%. Έπειτα, εξετάζεται η μεταβολή του μοναδιαίου κόστους εγκατάστασης, δηλαδή του κόστους ανά dock. Η μεταβολή αυτή είναι 50% και 75%.
- ii. Σενάριο χωρητικότητας: σε πρώτη φάση εξετάζεται η υπόθεση πως όλες οι στάσεις του Μετρό διαθέτουν ίσο χώρο για σταθμούς ποδηλάτων. Στην συνέχεια, η πραγματική χωρητικότητα των σταθμών ποδηλάτων στις στάσεις του Μετρό μεταβάλλεται κατά 20%.
- iii. Σενάριο διαθέσιμου στόλου ποδηλάτων: μεταβάλλεται ο αριθμός των ποδηλάτων που εξυπηρετούν το σύστημα από 100 έως 500.
- iv. Σενάριο ζήτησης: μεταβάλλεται η τιμή της συνολικής ημερήσιας ζήτησης ορισμένων υποψήφιων θέσεων χωροθέτησης.

5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

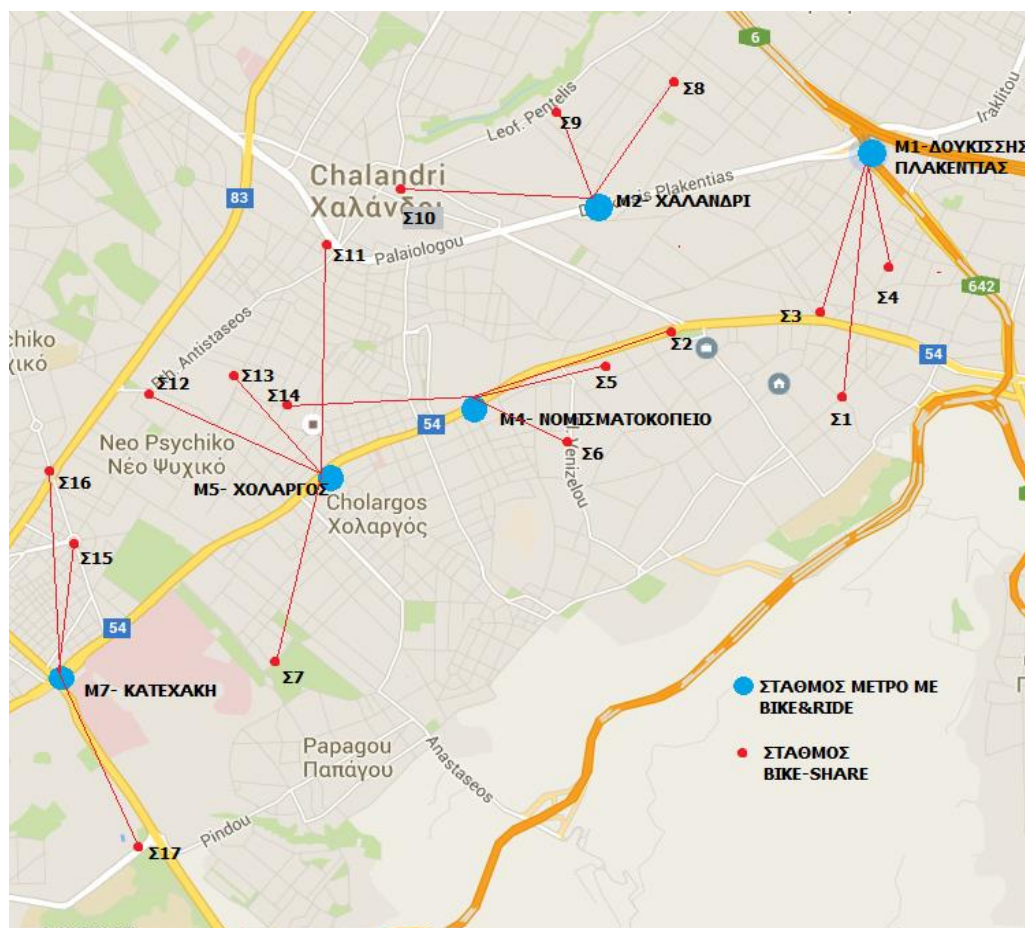
5.2.1 ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ

Με τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, στο βασικό σενάριο ορίζονται ως εγκαταστάσεις Bike&Ride οι σταθμοί του Μετρό Δουκίσσης Πλακεντίας, Χαλανδρίου, Νομισματοκοπείο, Χολαργός, Κατεχάκη, Μέγαρο Μουσικής και Σύνταγμα. Όλες οι υποψήφιες θέσεις στην εμβέλεια του Μετρό επιλέγονται για τη χωροθέτηση σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων. Συνεπώς, εξυπηρετείται η συνολική ζήτηση. Η σύνδεση των σταθμών παρουσιάζεται στον Πίνακα 14, αλλά και στις Εικόνες 7, 8.

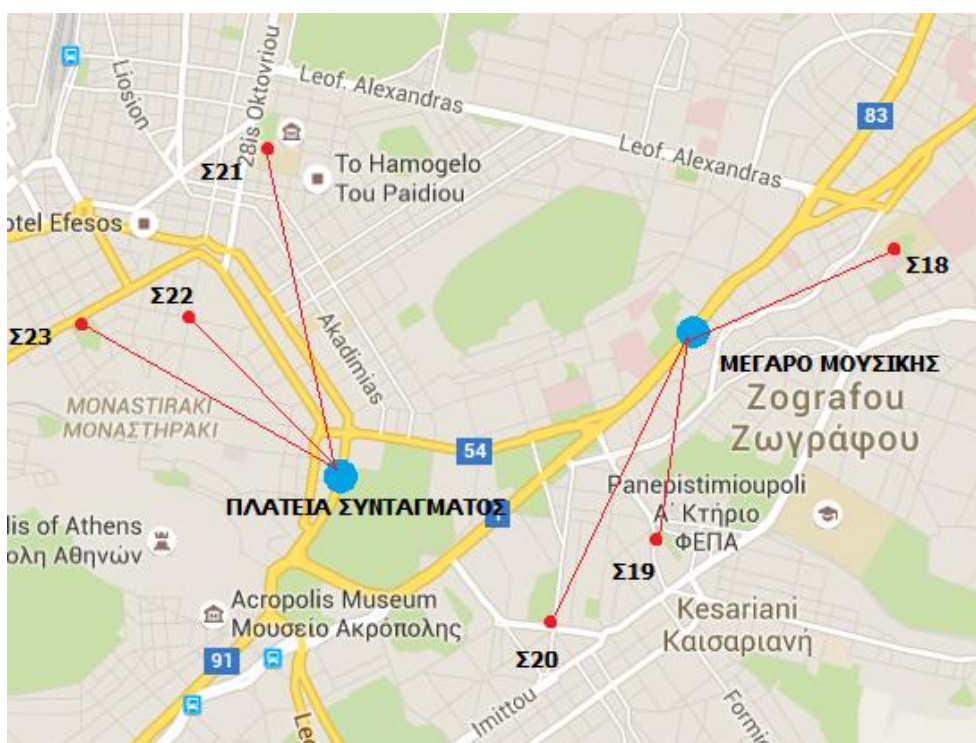
ΠΙΝΑΚΑΣ 14: ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ-ΔΙΚΤΥΟ ΣΤΑΘΜΩΝ BS ΚΑΙ ΠΟΔΗΛΑΤΑ ΚΑΘΕ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

ΑΝΟΙΧΤΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ	ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ j	ΠΟΔΗΛΑΤΑ
M1	1,3,4	34
M2	8,9,10	42
M3		
M4	2,5,6,14	46
M5	7,11,12,13	50
M6		
M7	15,16,17	47
M8		
M9	18,19,20	38
M10		
M11	21,22,23	43

ΕΙΚΟΝΑ 9: ΔΙΚΤΥΟ ΣΤΑΘΜΩΝ ΚΟΙΝΟΧΡΗΣΤΩΝ ΠΟΔΗΛΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΒΑΣΙΚΟΥ ΣΕΝΑΡΙΟΥ



ΕΙΚΟΝΑ 7: ΔΙΚΤΥΟ ΣΤΑΘΜΩΝ ΚΟΙΝΟΧΡΗΣΤΩΝ ΠΟΔΗΛΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΒΑΣΙΚΟΥ ΣΕΝΑΡΙΟΥ



Στον Πίνακα 15 επίσης φαίνεται η διανομή των ποδηλάτων μεταξύ των επτά υποσυστημάτων που προέκυψαν.

Η διαφορά στον αριθμό των ποδηλάτων που παρατηρείται μεταξύ των υποσυστημάτων οφείλεται στην ζήτηση των σημείων που εξυπηρετεί κάθε ένας σταθμός Bike&Ride. Επίσης, το αναμενόμενο ήταν, εφόσον κάθε υποσύστημα μπορεί να δεχτεί μέχρι 50 ποδήλατα και τα διαθέσιμα είναι 300, να λειτουργήσουν έξι υποσυστήματα με πενήντα ποδήλατα στο καθένα. Η ύπαρξη ενός ακόμη υποσυστήματος ίσως μειώνει την τιμή του όρου των αποστάσεων και δίνει καλύτερη τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση παρά την αύξηση του κόστους εγκατάστασης.

Η τελική λύση ως προς την σύνδεση των σταθμών κρίνεται λογική στην πλειοψηφία των περιπτώσεων. Αυτό που θα ήταν αναμενόμενο, δεδομένου της μικρής απόστασης, είναι η σύνδεση του σταθμού ποδηλάτων στο σημείο Σ14-πάρκο οδού Τριφυλλίας με το Μετρό του Χολαργού αντί για το Νομισματοκοπείο. Βέβαια, ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλών παραγόντων έχει σκοπό την επίτευξη του βέλτιστου συνολικού αποτελέσματος.

Σχετικά με την κατανομή των ποδηλάτων στους σταθμούς BS του συστήματος, σε ορισμένες περιπτώσεις γίνεται υπέρβαση της χωρητικότητας. Υπενθυμίζεται όμως πως, η χωρητικότητα που μετέχει στους υπολογισμούς είναι το ογδόντα τοις εκατό

της συνολικής άρα, το συγκεκριμένο μέγεθος στόλου δεν προκαλεί προβλήματα ως προς τη χωρητικότητα.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η εξέταση της ικανοποίησης της ζήτησης ανά χρονική περίοδο έχει νόημα παρά μόνο στην ακραία περίπτωση, όπου όλοι χρήστες ταυτόχρονα επιθυμούν να μετακινηθούν. Επομένως, αν οι περίοδοι ήταν περισσότερες και συνεπώς μικρότερης διάρκειας, η εξυπηρετούμενη ζήτηση με τον τρόπο που υπολογίστηκε θα προέκυπτε μεγαλύτερη.

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα και λαμβάνοντας υπόψη την χρονική κατανομή της ζήτησης (Κεφάλαιο 3), υπολογίστηκε η εξυπηρετούμενη ζήτηση για το στόλο των 300 ποδηλάτων. Κατά μέσο όρο, εξυπηρετείται το 53% αυτής.

Αναλυτικότερα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στον Πίνακα 16. Κάθε κελί του αποτυπώνει το ποσοστό της εξυπηρετούμενης ανά σταθμό ανά χρονική περίοδο. Για τον υπολογισμό αυτό λαμβάνεται υπόψη η ζήτηση κάθε θέσης ανά χρονική περίοδο και ο αριθμός των ποδηλάτων που υπάρχουν στην εκάστοτε θέση την ίδια χρονική περίοδο. Για εξυπηρετούμενη ζήτηση 0.56, δηλαδή 56% σημαίνει πως υπάρχουν τόσα ποδήλατα ώστε να εξυπηρετήσουν το 56% των χρηστών.

ΠΙΝΑΚΑΣ 15: ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ-ΚΑΤΑΝΟΜΗ 300 ΠΟΔΗΛΑΤΩΝ ΑΝΑ ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ ΣΤΟΥΣ ΑΝΟΙΧΤΟΥΣ ΣΤΑΘΜΟΥΣ

	ΠΟΔΗΛΑΤΑ ΑΝΑ ΘΕΣΗ ΑΝΑ ΠΕΡΙΟΔΟ					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Σ1	11	8	5	4	7	8
Σ2	9	7	7	6	8	6
Σ3	11	8	8	4	3	6
Σ4	6	6	5	4	7	6
Σ5	7	8	5	5	3	6
Σ6	7	5	2	2	7	6
Σ7	5	5	3	5	7	11
Σ8	7	8	9	4	3	6
Σ9	9	8	9	4	7	3
Σ10	7	9	6	9	11	6
Σ11	10	8	6	5	9	4
Σ12	10	5	6	5	7	7
Σ13	10	8	8	5	5	7
Σ14	9	7	8	5	3	8
Σ15	0	5	5	5	10	6
Σ16	7	7	5	7	9	8
Σ17	0	2	10	14	6	4
Σ18	10	7	8	5	7	6
Σ19	7	9	9	5	7	3
Σ20	9	7	7	5	7	9
Σ21	5	7	7	8	7	4
Σ22	7	7	7	8	11	7
Σ23	7	7	7	5	7	7

M1	6	11	16	22	17	14
M2	10	17	18	24	21	27
M4	17	22	25	27	36	28
M5	15	24	28	29	25	21
M7	28	29	26	23	15	23
M9	12	16	19	23	17	21
M11	24	22	24	23	18	25

ΠΙΝΑΚΑΣ 16: ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ- ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΞΥΠΗΡΕΤΟΥΜΕΝΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΑΝΑ ΘΕΣΗ ΑΝΑ ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ

N=300	ΕΞΥΠΗΡΕΤΟΥΜΕΝΗ ΖΗΤΗΣΗ ΑΝΑ ΘΕΣΗ ΑΝΑ ΠΕΡΙΟΔΟ					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Σ1	0.56	0.53	0.50	0.40	0.70	0.53
Σ2	0.45	0.58	0.47	0.50	0.67	0.60
Σ3	0.56	0.53	0.53	0.40	0.60	0.60
Σ4	0.56	0.60	0.50	0.40	0.70	0.60
Σ5	0.47	0.53	0.50	0.50	0.60	0.60
Σ6	0.47	0.50	0.40	0.40	0.70	0.60
Σ7	0.50	0.50	0.60	0.50	0.70	0.73
Σ8	0.37	0.53	0.60	0.40	0.60	0.60
Σ9	0.37	0.53	0.60	0.40	0.70	0.60
Σ10	0.37	0.50	0.60	0.45	0.69	0.60
Σ11	0.50	0.53	0.60	0.50	0.45	0.80
Σ12	0.50	0.50	0.60	0.50	0.47	0.70
Σ13	0.50	0.53	0.53	0.50	0.50	0.70
Σ14	0.45	0.70	0.80	0.50	0.20	0.80
Σ15	0.00	0.33	0.50	0.33	0.67	0.60
Σ16	0.35	0.47	0.33	0.70	1.80	0.80
Σ17	-	0.40	0.50	0.47	0.60	0.80
Σ18	0.50	0.47	0.53	0.50	0.70	0.60
Σ19	0.47	0.45	0.90	0.50	0.70	0.60
Σ20	0.45	0.47	0.70	0.50	0.70	0.60
Σ21	0.50	0.47	0.35	0.53	0.70	0.80
Σ22	0.47	0.47	0.70	0.53	0.73	0.70
Σ23	0.47	0.47	0.70	0.50	0.70	0.70
M1	0.60	0.55	0.53	0.40	0.68	0.56
M2	0.37	0.40	0.60	0.44	0.68	0.60
M4	0.49	0.55	0.50	0.47	0.69	0.56
M5	0.50	0.53	0.56	0.53	0.45	0.70
M7	0.47	0.48	0.52	0.46	0.60	0.77
M9	0.48	0.46	0.54	0.51	0.68	0.60
M11	0.48	0.44	0.48	0.51	0.72	0.71

5.1.2 ΜΟΝΑΔΙΑΙΟ ΚΟΣΤΟΣ

Διερευνάται η μεταβολή των τιμών 300€, 350€ που χρησιμοποιούνται στο βασικό σενάριο και εκφράζουν το κόστος εγκατάστασης σταθμού και θέσης παραβολής. Αρχικά, εξετάζεται η περίπτωση ταυτόχρονης αύξησης των δύο τιμών. Γίνεται μια επίλυση για αύξηση του κόστους κατά 20% η οποία συμβολίζεται με [1] και μια δεύτερη επίλυση, [2], στην οποία το συνολικό κόστος αυξάνεται κατά 50%. Τα

αποτελέσματα των επιλύσεων συγκρίνονται με αυτά του βασικού σεναρίου στον Πίνακα 17.

Η ταυτόχρονη αύξηση των δύο επιμέρους τιμών κόστους δεν επιφέρει καμία αλλαγή στους όρους και την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με το βασικό σενάριο. Επίσης, δεν υπάρχει καμία αλλαγή ως προς τη λειτουργία των υποψήφιων σταθμών. Είναι περιττό να εξεταστεί η περίπτωση της μείωσης των τιμών. Οι όροι της αντικειμενικής συνάρτησης κανονικοποιούνται και όπως εξηγήθηκε στο 4^ο Κεφάλαιο κάθε όρος κόστους διαιρείται με το μέγιστο όρο κόστους που προκύπτει. Λόγω της κανονικοποίησης, η ταυτόχρονη αύξηση των τιμών του συνδυαστικού κόστους απαλείφεται και για το λόγο αυτό δε μεταβάλλεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 17: ΣΕΝΑΡΙΟ ΚΟΣΤΟΥΣ- ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΟΡΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ

ΟΡΟΙ	ΒΑΣΙΚΟ	[1] ΣΥΝ.ΚΟΣΤΟΣ+20%		[2] ΣΥΝ.ΚΟΣΤΟΣ +50%	
	ΤΙΜΕΣ	ΤΙΜΕΣ	ΜΕΤΑΒΟΛΗ	ΤΙΜΕΣ	ΜΕΤΑΒΟΛΗ
Α.Σ.=	-7,77	-7,77	0%	-7,77	0%
ΚΟΣΤΟΣ=	6,35	6,35	0%	6,35	0%
ΑΠΟΣΤΑΣΗ=	2,78	2,78	0%	2,78	0%
ΖΗΤΗΣΗ=	16,9	16,9	0%	16,9	0%

Εξετάζεται επίσης, η μεταβολή του μοναδιαίου κόστους ανά θέση παραβολής. Στον Πίνακα 18 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των λύσεων και η μεταβολή των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης. Μεταβλήθηκε η τιμή του κόστους των docks κατά 50% και 75%, επιλύσεις [3], [4] αντίστοιχα. Να σημειωθεί ότι για μεταβολές μικρότερες του 50% η δεν υπήρχε καμία αλλαγή στη λύση σε σχέση με το βασικό σενάριο.

ΠΙΝΑΚΑΣ 18: ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΞΕΤΑΣΗΣ ΚΟΣΤΟΥΣ-ΑΥΞΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΑΝΑ DOCK

ΟΡΟΙ	ΒΑΣΙΚΟ	[3]+50% κόστος ανά dock		[4]+75% κόστος ανά dock	
	ΤΙΜΕΣ	ΤΙΜΕΣ	ΜΕΤΑΒΟΛΗ	ΤΙΜΕΣ	ΜΕΤΑΒΟΛΗ
Α.Σ.=	-7,77	-7,77	0%	-7,83	(-)0,75%
ΚΟΣΤΟΣ=	6,35	6,35	0%	6,18	(-)2,7%
ΑΠΟΣΤΑΣΗ=	2,78	2,79	(+)0,3%	2,89	(+)4%
ΖΗΤΗΣΗ=	16,9	16,9	0%	16,9	0%

Από τον προηγούμενο πίνακα προκύπτει ότι το μοναδιαίο κόστος δεν έχει μεγάλη επίδραση στην τελική λύση. Ακόμα και για αύξηση της τιμής του κατά 75%, οι όροι της αντικειμενικής συνάρτησης μεταβάλλονται έως 4%. Η μέγιστη μεταβολή, αύξηση, παρατηρείται στον όρο της απόστασης που σημαίνει ότι σε σχέση με το βασικό σενάριο, αλλάζει η σύνδεση των σημείων i,j. Κάποια σημεία j ανατίθενται σε μακρινότερα σημεία i. Βέβαια, η επιβάρυνση του όρου της απόστασης γίνεται με

σκοπό να περιοριστεί ο όρος του κόστους εγκατάστασης, ο οποίος μειώνεται. Λόγω της υψηλής αύξησης του μοναδιαίου κόστους, το μοντέλο στοχεύει να βρει την πιο οικονομική λύση, ακόμα κι αν αυτό απαιτεί να επιβαρυνθεί το κόστος μετακίνησης.

Στον Πίνακα 19, φαίνεται η αλλαγή των στάσεων του Μετρό στις οποίες θα αποτελέσουν μέρος του συστήματος Bike-sharing. Λόγω αυτής της αλλαγής επιβαρύνεται ο όρος της απόστασης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 19: ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΞΕΤΑΣΗΣ ΚΟΣΤΟΥΣ-ΣΤΑΘΜΟΙ ΜΕΤΡΟ ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΤΩΝ DOCKS

ΣΤΑΘΜΟΙ ΜΕΤΡΟ		ΣΕΝΑΡΙΑ		
ΟΝΟΜΑ	ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ	ΒΑΣΙΚΟ	[3]	[4]
ΔΟΥΚ. ΠΛ.	25	M1	M1	M1
ΧΑΛΑΝΔΡΙ	30	M2	M2	M2
ΑΓ.ΠΑΡ.	30	M3	M3	M3
ΝΟΜΙΣΜ.	30	M4	M4	M4
ΧΟΛΑΡΓΟΣ	25	M5	M5	M5
ΕΘΝ.ΑΜΥΝΑ	25	M6	M6	M6
ΚΑΤΕΧΑΚΗ	25	M7	M7	M7
ΑΜΠΕΛΟΚ.	20	M8	M8	M8
Μ.ΜΟΥΣΙΚΗΣ	25	M9	M9	M9
ΕΥΑΓΓΕΛ.	30	M10	M10	M10
ΣΥΝΤΑΓΜΑ	30	M11	M11	M11

"ΚΛΕΙΣΤΟΙ" ΣΤΑΘΜΟΙ

Η αύξηση του κόστους των docks προκαλεί ορισμένες αλλαγές ως προς την επιλογή των «ανοιχτών» σταθμών. Στο βασικό σενάριο, λειτουργούν τρεις σταθμοί χωρητικότητας τριάντα θέσεων, που είναι η μέγιστη που παρατηρείται. Στο σενάριο [4], ενώ το πλήθος των «ανοιχτών» σταθμών δεν έχει αλλάξει, λειτουργούν οι δύο σταθμοί μέγιστης χωρητικότητας.

Τέλος, να σημειωθεί πως σε όλα τα προηγούμενα σενάρια, όλες οι περιοχές Σj εξυπηρετούνται. Η μόνη αλλαγή σχετικά με αυτές αφορά στον σταθμό μετρό με τον οποίο συνδέονται.

5.1.3 ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ

Στους επόμενους πίνακες παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των εξής τροποποιήσεων: πρώτα, επιλύεται το πρόβλημα με όλους τους σταθμούς Μετρό να έχουν ίση χωρητικότητα, αρχικά 25 θέσεων και έπειτα 30 θέσεων (Πίνακας 20). Στην συνέχεια, διερευνάται η αύξηση και μείωση κατά είκοσι τοις εκατό της χωρητικότητας κάθε σταθμού, όπως αυτή έχει οριστεί στο Βασικό Σενάριο (Πίνακας 21).

ΠΙΝΑΚΑΣ 20: ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΞΕΤΑΣΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ- ΤΙΜΕΣ ΟΡΩΝ Α.Σ. ΣΤΙΣ 4 ΕΠΙΛΥΣΕΙΣ

ΟΡΟΙ	ΣΕΝΑΡΙΑ- ΤΙΜΕΣ ΟΡΩΝ Α.Σ.				
	ΒΑΣΙΚΟ	[1] Cap=25	[2] Cap=30	[3] Cap+20%	[4] Cap-20%
A.Σ.=	-7,77	-7,15	-7,15	-7,75	-7,78
ΚΟΣΤΟΣ=	6,35	7	7	6,19	6,36
ΑΠΟΣΤΑΣΗ=	2,78	2,75	2,75	2,96	2,76
ΖΗΤΗΣΗ=	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9

ΠΙΝΑΚΑΣ 21: ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΞΕΤΑΣΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ- ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΟΡΩΝ Α.Σ.

ΣΕΝΑΡΙΑ- % ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΟΡΩΝ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΒΑΣΙΚΟ				
ΟΡΟΙ	[1] Cap=25	[2] Cap=30	[3] Cap+20%	[4] Cap-20%
A.Σ.=	-7,93	-7,93	-0,17	0,15
ΚΟΣΤΟΣ=	10,20	10,20	-2,61	0,07
ΑΠΟΣΤΑΣΗ=	-1,17	-1,17	6,43	-0,58
ΖΗΤΗΣΗ=	0	0	0	0

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, στην περίπτωση όπου η χωρητικότητα όλων των σταθμών είναι ίδια, η τελική λύση είναι ακριβώς η ίδια. Σε καθένα λοιπόν από τα σενάρια [1]-[2], η τελική λύση διαμορφώνεται αποκλειστικά από το δεύτερο όρο της Α.Σ., δηλαδή την απόσταση μεταξύ των σημείων i, j . Για το λόγο αυτό, η αντιστοιχία ij δεν μεταβάλλεται ούτε το πλήθος των ποδηλάτων ανά σταθμό. Παρατηρείται ακόμη, πως η τιμή του όρου της απόστασης παρουσιάζει βελτίωση της τάξης του 1,17% σε σχέση με το βασικό σενάριο, αλλά αντίθετα, ο όρος του κόστους επιβαρύνεται κατά 10%.

Τελειώς διαφορετική συμπεριφορά ως προς τα εξαγόμενα έχει η αντικειμενική συνάρτηση στην περίπτωση όπου η μεταβολή της χωρητικότητας είναι ποσοστό αυτής του βασικού σεναρίου. Πρώτον, σε αντίθεση με το αναμενόμενο, η ποσοστιαία αύξηση των θέσεων ανά σταθμό, μεταβάλλει την αντικειμενική συνάρτηση. Αξιοπρόσεκτο επίσης είναι, πως η τελική λύση είναι διαφορετική στην περίπτωση αύξησης κατά 20% από ότι στην ισόποση μείωση. Η αύξηση του αριθμού των θέσεων κατά 20% μεταβάλλει εντονότερα τους όρους του κόστους και της απόστασης της αντικειμενικής συνάρτησης. Για την ακρίβεια, διατηρώντας το 80% των θέσεων, οι όροι της Α.Σ. επηρεάζονται λιγότερο από 1%. Η μεταβολή στον όρο της απόστασης, σηματοδοτεί διαφορετική ανάθεση σταθμών j σε i σε σχέση με το βασικό σενάριο.

5.3.4 ΠΛΗΘΟΣ ΠΟΔΗΛΑΤΩΝ

Στα προηγούμενα σενάρια, ο αριθμός των ποδηλάτων του συστήματος ήταν σταθερός και ίσος με 300. Ανεξάρτητα από τις τιμές των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης, οι σταθμοί που ορίστηκαν ως «ανοιχτοί» ήταν επτά. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα πως το πλήθος των εγκαταστάσεων Bike&Ride συνδέεται με το πλήθος των ποδηλάτων. Στην υποενότητα αυτή, θα επιχειρηθεί, μεταξύ άλλων, να διερευνηθεί η προαναφερθείσα σχέση. Εξετάζεται η επίδραση του διαφορετικού αριθμού των ποδηλάτων που διατίθενται στο σύστημα.

Στον Πίνακα 22, συνοψίζονται τα αποτελέσματα των επιλύσεων με τον αριθμό των διατιθέμενων ποδηλάτων να παίρνει τιμές 100, 200, 400, 480. Συγκεκριμένα, καταγράφονται οι τιμές των όρων την αντικειμενικής συνάρτησης, η μεταβολή τους σε σχέση με το βασικό σενάριο, όπου διατίθενται 300 ποδήλατα και τέλος, το πλήθος των ανοιχτών σταθμών, δηλαδή όσων ορίζονται ως B&R.

Γίνεται εύκολα αντιληπτό πως υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ του πλήθους των ανοιχτών σταθμών και του πλήθους των ποδηλάτων. Στην τιμή των 450 ποδηλάτων ορίζονται όλοι σταθμοί του μετρό ως ανοιχτοί ενώ στην τιμή των 100 ποδηλάτων λειτουργούν εξυπηρετούν μόνο τρεις σταθμοί.

ΠΙΝΑΚΑΣ 22: ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΞΕΤΑΣΗΣ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΣΤΟΛΟΥ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

N	A.Σ.	Κόστος	Απόσταση	Συν. Ζήτηση	Ανοιχτοί
300	-7.77	6.35	2.78	16.9	7
100	-10.66	2.84	3.41	16.9	3
% Μετ.	27.1	-55.3	22.5	0	-57.1
200	-9.40	4.51	2.98	16.9	5
% Μετ.	21.04	-28.94	7.31	0	-28.6
400	-5.88	7.87	3.15	16.9	9
% Μετ.	-24.3	23.8	13.5	0	28.6
450	-4.04	9.87	2.99	16.9	11
% Μετ.	-48.0	55.3	7.6	0	57.1
480	-3.65	9.87	3.38	16.9	11
% Μετ.	-53.0	55.3	21.6	0	57.1

Ακόμη, μεταβάλλοντας το μέγεθος του στόλου παρατηρούνται οι σημαντικότερες μέχρι τώρα μεταβολές στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης αλλά και των όρων της. Όπως είναι αναμενόμενο, όσα περισσότερα ποδήλατα διατίθενται, τόσο περισσότερο επιβαρύνεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Αντίστοιχα, επιβαρύνεται όρους του κόστους κατασκευής σταθμών, αφού οι τελευταίοι πληθαίνουν. Σχετικά με το κόστος της διανυόμενης απόστασης, παρατηρείται πως

αυξάνεται για οποιαδήποτε τιμή ποδηλάτων. Αυτό αιτιολογείται στην περίπτωση όπου ο στόλος αποτελείται από 100 και 200 ποδήλατα, διότι οι σταθμοί σε λειτουργία είναι λιγότεροι άρα μια υποψήφια θέση j δεν αντιστοιχίζεται στον πιο κοντινό της σταθμό. Αντιθέτως, δεν είναι τόσο εύκολη η αιτιολόγηση όταν το πλήθος του στόλου αυξάνεται σε σχέση με το βασικό.

Το πλήθος των «ανοιχτών σταθμών Μετρό» επηρεάζεται και από την τιμή του ορίου $S_{\max}$, όπως φάνηκε προηγουμένως στην σύγκριση των τιμών $S_{\max} = 40$ και 50 . Όσο μεγαλύτερο είναι το όριο αυτό, τόσα περισσότερα ποδήλατα ανατίθενται στο κάθε υποσύστημα B&R, και συνεπώς το πλήθος τους μειώνεται. Για δεδομένη τιμή $S_{\max}$ το πλήθος των «ανοιχτών» σταθμών καθορίζεται αποκλειστικά από τα διαθέσιμα ποδήλατα.

Οι είκοσι τρεις υποψήφιες θέσεις ορίζονται όλες τους ως ανοιχτές ακόμη και στην περίπτωση όπου το ένα τρίτο των αρχικών ποδηλάτων διατίθεται στο σύστημα. Όλες οι θέσεις εξυπηρετούνται, αλλάζει όμως διαρκώς το πλήθος των ποδηλάτων ανά σταθμό και ανά χρονική περίοδο, κάτι που επιδρά στο ποσοστό της εξυπηρετούμενης ανά περίοδο ζήτησης. Στον Πίνακα 23 παρουσιάζεται η εν λόγω επίδραση.

ΠΙΝΑΚΑΣ 23: ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΞΕΤΑΣΗΣ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΣΤΟΛΟΥ- ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΞΥΠΗΡΕΤΟΥΜΕΝΗΣ ΖΗΤΗΤΗΣ

ΣΤΟΛΟΣ	ΕΞΥΠ.ΖΗΤ.
100	10.65%
200	26.60%
300	53%
480	72.40%

Όσο αυξάνεται ο στόλος αυξάνεται και η πιθανότητα να εξυπηρετηθεί κάποιος χρήστης του συστήματος BS. Τα ποδήλατα σε κάθε στάση θα είναι περισσότερα, άρα μια τυχαία χρονική στιγμή είναι δυνατό να χρησιμοποιήσουν ποδήλατο περισσότεροι χρήστες.

5.1.5 ΖΗΤΗΣΗ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προηγούμενων επιλύσεων, η συνολική ημερήσια ζήτηση εξυπηρετείται. Καθώς αυτό αποτελεί βέλτιστη λύση, είναι αποδεκτό. Παρόλα αυτά, δημιουργείται ένας προβληματισμός σχετικά με τη λειτουργία του περιορισμού (1) της συγκεκριμένης διατύπωσης του μοντέλου Σταθερού Κόστους (Κεφάλαιο 4). Σύμφωνα με αυτό τον περιορισμό, δεν είναι υποχρεωτικό να χωροθετείται σταθμός BS σε όλες τις υποψήφιες τοποθεσίες της περιοχής εμβέλειας του Μετρό. Βέβαια,

μέχρι στιγμής οι λύσεις που έχουν προκύψουν ορίζουν όλες τις τοποθεσίες ως ανοιχτές. Το αποτέλεσμα είναι πως η ζήτηση καλύπτεται σε ποσοστό 100%.

Στο σενάριο αυτό θα εξεταστεί περαιτέρω η λειτουργία του παραπάνω περιορισμού. Όπως έχει εξηγηθεί στο Κεφάλαιο 4, η ζήτηση στην αντικειμενική συνάρτηση υπεισέρχεται ως ποσοστό της συνολικής. Μεταβάλλοντας επομένως, ποσοστιαία την ζήτηση των θέσεων, δε θα υπήρχε καμία απολύτως επίδραση στη λύση, αφού το ποσοστό ζήτησης που συγκεντρώνει κάποιο σημείο θα παρέμενε το ίδιο. Για το λόγο αυτό, ακολουθείται μια διαφορετική προσέγγιση.

Η μέση τιμή της συνολικής ημερήσιας ζήτησης είναι 147 μετακινήσεις ανά ημέρα. Επομένως, αυξάνεται η ζήτηση των περιοχών που συγκεντρώνουν από 150 μετακινήσεις και πάνω. Πρόκειται για δεκατρείς υποψήφιες θέσεις οι οποίες σημειώνονται στον Πίνακα 5.19 με διαφορετικό χρώμα. Στις περιοχές όπου η ζήτηση είναι υψηλότερη από τη μέση, εξετάζεται η περίπτωση αύξησης της ζήτησης κατά 100% [1] και έπειτα κατά 50% [2] ώστε να διερευνηθεί εάν η τελική λύση οφείλεται στην αριθμητική τιμή της ζήτησης. Να σημειωθεί πως μεταβολές μικρότερες του 50% δεν επέφεραν τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Στον Πίνακα 24 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο επιλύσεων συγκριτικά με το βασικό σενάριο. Όπως φαίνεται, περιορίζονται οι εξυπηρετούμενες περιοχές κάτι που αποτυπώνεται στη μείωση του όρου της ζήτησης. Παρόλο που το ποσοστό αύξησης της ζήτησης των δεκατριών περιοχών στις δύο επιλύσεις διαφέρει πολύ, ο όρος της ζήτησης στην αντικειμενική συνάρτηση παραμένει σχεδόν ίδιος. Αυτό βέβαια, δεν σημαίνει ότι η εξυπηρετούμενη ζήτηση παραμένει ίδια στις επιλύσεις [1], [2]. Το ποσοστό μεταβολής της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης στις περιπτώσεις [1], [2] παρουσιάζει ελάχιστη διαφορά, η μεταβολή όμως είναι πολύ σημαντική καθώς είναι μεγαλύτερη από 90%. Οι όροι του κόστους και της απόστασης μειώνονται συγκριτικά με το βασικό σενάριο, άρα επιτυγχάνεται καλύτερη αξιοποίηση των πόρων. Όσον αφορά στον όρο της απόστασης, σε σχέση πάντα με το βασικό σενάριο, το δίκτυο που δημιουργείται στις επιλύσεις [1] και [2] έχει συνδέσμους μικρότερου μήκους.

ΠΙΝΑΚΑΣ 24: ΣΕΝΑΡΙΟ ΖΗΤΗΣΗΣ- ΤΙΜΕΣ ΟΡΩΝ Α.Σ. ΤΩΝ ΔΥΟ ΕΠΙΛΥΣΕΩΝ

ΟΡΟΙ	ΒΑΣΙΚΟ	[1]+100% ζήτηση		[2]+50% ζήτηση	
	ΤΙΜΕΣ	ΤΙΜΕΣ	ΜΕΤΑΒΟΛΗ	ΤΙΜΕΣ	ΜΕΤΑΒΟΛΗ
Α.Σ.	-7.77	-0.57	92.66	-0.5	93.56
ΚΟΣΤΟΣ	6.35	6.03	-5.07	5.9	-7.11
ΑΠΟΣΤΑΣΗ	2.78	1.9	-31.67	2.1	-24.47
ΖΗΤΗΣΗ	16.9	8.5	-49.70	8.5	-49.70

Στον πίνακα 25 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σχετικά με τις συνολικές εξυπηρετούμενες μετακινήσεις. Στο βασικό σενάριο, καθώς σε όλες τις υποψήφιες περιοχές χωροθετείται σταθμός ποδηλάτων, θεωρείται ότι καλύπτεται η συνολική ζήτηση. Στις δύο επόμενες επιλύσεις, που περιλαμβάνουν αύξηση ζήτησης συγκεκριμένων περιοχών, καλύπτεται τμήμα της ζήτησης. Η αύξηση της ζήτησης μεταφράζεται σε αύξηση των συνολικών ημερήσιων μετακινήσεων, όμως καθώς δεν αποτελούν όλες οι περιοχές τμήμα του δικτύου σταθμών, οι εξυπηρετούμενες μετακινήσεις μειώνονται. Συγκεκριμένα, για διπλασιασμό της ζήτησης των δεκατριών περιοχών, εξυπηρετείται το 64% της συνολικής ζήτησης, ενώ κατά την επίλυση [2] εξυπηρετείται το 80% της ζήτησης. Συνολικά λοιπόν, όσο η ζήτηση των υποψήφιων σημείων χωροθέτησης σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων παρουσιάζει μια ομοιομορφία, όλα εξ αυτών θα οριστούν ως «ανοιχτοί» σταθμοί. Στο βασικό σενάριο το ποσοστό ζήτησης κάθε σημείου ως προς την συνολική κυμαίνεται από 3,2-5,9%. Στην επίλυση [1] τα αντίστοιχα ποσοστά είναι 2-8%, παρουσιάζουν δηλαδή μεγαλύτερο εύρος. Ομοίως, στην επίλυση [2] είναι 2,4-6,7%. Όσο το εύρος είναι μικρό, οι υποψήφιες θέσεις εξυπηρετούνται.

ΠΙΝΑΚΑΣ 25: ΣΕΝΑΡΙΟ ΖΗΤΗΣΗΣ- ΕΞΥΠΗΡΕΤΟΥΜΕΝΕΣ ΗΜΕΡΗΣΙΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ

Σενάρια	Βασικό	[1]	[2]
Συν.Μετακινήσεις	3380	5485	4432
Εξυπηρετούμενες	3380	3535	3380
%εξυπηρέτησης	1	0.64	0.8

Αν και μεταξύ των αριθμητικών αποτελεσμάτων δεν παρατηρείται σημαντική διαφορά (Πίνακας 24), τα δύο σενάρια διαφοροποιούνται σε μεγάλο βαθμό ως προς την επιλογή των ανοιχτών σταθμών και την αντιστοιχία των σημείων j σε i . Υπενθυμίζεται ότι ο δείκτης i αναφέρεται στις στάσεις του Μετρό και ο j στις υποψήφιες θέσεις στην εμβέλεια του Μετρό. Στον Πίνακα 26 παρουσιάζεται το πλήθος των σταθμών του δικτύου. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η αύξηση της ζήτησης συγκεκριμένων περιοχών έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του αριθμού των καλυπτόμενων περιοχών. Από 23 περιοχές γίνονται 17 κι έπειτα 15, καθώς αυξάνεται η ζήτηση.

ΠΙΝΑΚΑΣ 26: ΣΕΝΑΡΙΟ ΖΗΤΗΣΗΣ- ΠΛΗΘΟΣ ΑΝΟΙΧΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ

Σενάρια	Βασικό		[1]		[2]	
ΑΝΟΙΧΤΟΙ	i	j	i	j	i	j
ΣΤΑΘΜΟΙ	7	23	7	15	7	17

Στον Πίνακα 27 απεικονίζονται οι είκοσι τρεις υποψήφιες περιοχές και όσες από αυτές ορίζονται ως σταθμοί BS σε καθένα από τα δύο σενάρια [1], [2]., Σημειώνονται

επίσης, όσες εξ αυτών είχαν ζήτηση μεγαλύτερη από τη μέση τιμή και άρα, η ζήτηση του μεταβλήθηκε.

ΠΙΝΑΚΑΣ 27: ΣΕΝΑΡΙΟ ΖΗΤΗΣΗΣ- ΣΗΜΕΙΑ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΟΔΗΛΑΤΩΝ

Κωδικός	[1]	[2]
Σ1	+	
Σ2		+
Σ3	+	+
Σ4		
Σ5	+	+
Σ6		+
Σ7	+	
Σ8	+	+
Σ9	+	
Σ10	+	+
Σ11	+	
Σ12		+
Σ13		+
Σ14	+	
Σ15	+	+
Σ16	+	+
Σ17	+	+
Σ18	+	+
Σ19	+	+
Σ20	+	+
Σ21		+
Σ22		+
Σ23		+

αύξηση συνολικής ζήτησης

Προηγουμένως, αυξήθηκε η ζήτηση δεκατριών περιοχών, δηλαδή σε περισσότερες από τις μισές. Οι ίδιες αυξήσεις διατηρούνται όμως σε λιγότερες περιοχές, στο ένα τρίτο αυτών, ώστε να διερευνηθεί η συμπεριφορά του μοντέλου σε αυτή την περίπτωση. Επιδρώντας στην τιμή ζήτησης επτά περιοχών, η τελική λύση ορίζει όλες τις υποψήφιες θέσεις ως ανοιχτούς σταθμούς. Σε αυτή την περίπτωση το εύρος του ποσοστού ζήτησης κάθε περιοχής σε σχέση με την συνολική είναι 2,3-4,3%. Συνεπώς επαληθεύεται ότι η ομοιομορφία στις τιμές της ζήτησης ανά υποψήφια θέση καθορίζει το αν θα εξυπηρετηθούν όλες.

5.2 ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Το μοντέλο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία έχει ως δεδομένα εισόδου τη χωρητικότητα των σταθμών του Μετρό, το συνδυαστικό κόστος κατασκευής αυτών, το μέγεθος του στόλου ποδηλάτων, τις αποστάσεις μεταξύ των υποψήφιων θέσεων και την ζήτηση των τελευταίων. Ορισμένα από τα

δεδομένα εισαγωγής επιδρούν σημαντικότερα στη διαμόρφωση της τελικής λύσης του προβλήματος.

Ως μέγιστος επιτρεπτός αριθμός ποδηλάτων ανά υποσύστημα ορίστηκε η τιμή των πενήντα ποδηλάτων. Έπειτα από δοκιμές διαπιστώθηκε ότι εάν το προηγούμενο όριο αυξανόταν πέρα του 50, τα ποδήλατα σε ορισμένους σταθμούς ξεπερνούσαν τη χωρητικότητά τους. Το αξιοπρόσεκτο σχετικά με το όριο S_{max} και το διαθέσιμο στόλο στο σύστημα είναι πως η τιμή του πρώτου καθορίζει το μέγιστο αποδεκτό πλήθος ποδηλάτων, για το δεδομένο αριθμό σταθμών. Για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος το S_{max} λήφθηκε ίσο με 50.

Ταυτόχρονη μεταβολή στις τιμές του κόστους σταθμού και του κόστους του ενός dock (σημείο απόθεσης ποδηλάτων) δεν επιφέρουν καμία αλλαγή στην αντικειμενική συνάρτηση, άρα ούτε και στην τελική λύση. Η μεταβολή του κόστους των docks, επηρεάζει αν και σε πολύ μικρό βαθμό την τελική λύση. Συγκεκριμένα 75% αύξηση της χρηματικής τιμής ενός dock μεταβάλλει κατά 0.75% την αντικειμενική συνάρτηση, 3% και 4% τους όρους του κόστους και της απόστασης, αντίστοιχα. Συνεπώς, στην περίπτωση όπου όλες οι υποψήφιες θέσεις έχουν το ίδιο κόστος, η τελική λύση διαφοροποιείται ελάχιστα. Η αλλαγή που παρατηρείται έχει να κάνει με την σύνδεση των υποψήφιων θέσεων.

Η χωρητικότητα των σταθμών παρόλο που σχετίζεται με τον ίδιο όρο της αντικειμενικής συνάρτησης, όπως και το κόστος, έχει διαφορετική επίδραση στη διαμόρφωση της λύσης. Έχει αναφερθεί πως η χωρητικότητα ανά σταθμό είναι διαφορετική και εξετάστηκε η περίπτωση της μείωσης και αύξησης αυτής κατά 20%. Η αντικειμενική συνάρτηση είναι πιο ευαίσθητη σε αύξηση της χωρητικότητας παρά σε μείωση. Ακόμη, φαίνεται πως η χωρητικότητα των σταθμών του Μετρό δεν καθορίζει πόσοι εξ αυτών θα λειτουργήσουν. Αλλάζει πάλι η σύνδεση μεταξύ των υποψήφιων σταθμών και αυτό αποτυπώνεται στις μεταβολές του όρου της απόστασης.

Το πλήθος των ανοιχτών σταθμών εξαρτάται αποκλειστικά από τα ποδήλατα που διατίθενται στο σύστημα, εφόσον το S_{max} είναι σταθερό σε όλη την πορεία της εργασίας. Κάνοντας υπολογισμούς μονάχα με τις τιμές 100, 200, 300, 400 φαίνεται πως για κάθε εκατό ποδήλατα οι ανοιχτοί σταθμοί αυξάνονται κατά δύο. Δημιουργείται η εντύπωση πως η σχέση τους είναι καθαρά γραμμική, κάτι που δεν είναι απολύτως σωστό, όπως φάνηκε στο σχετικό διάγραμμα.

Η συνολική ημερήσια ζήτηση κάθε υποψήφιας θέσης επηρεάζει το αν αυτή θα οριστεί ως σταθμός κοινόχρηστων ποδηλάτων. Για την ακρίβεια, όσο υπάρχει μια

ομοιομορφία στις τιμές της ζήτησης, όλες εξ αυτών αποτελούν βέλτιστα σημεία για τη χωροθέτηση σταθμών. Προκαλώντας σημαντικές αυξήσεις στις κρίσιμες θέσεις, μεταβλήθηκε το πλήθος αυτών που θα γίνουν σταθμοί. Όσο αυξάνεται η ζήτηση συγκεκριμένων θέσεων από το σύνολο των υποψηφίων, οι τελικές θέσεις που θα οριστούν ως σταθμοί ποδηλάτων μειώνονται. Βέβαια, στην τελική λύση δεν μετέχουν όλες οι περιοχές στις οποίες η ζήτηση έχει χαρακτηριστικά υψηλή τιμή. Έτσι, η τελική εξυπηρετούμενη ζήτηση μειώνεται σημαντικά.

6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία ασχολήθηκε με το βέλτιστο σχεδιασμό ενός δικτύου σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων με σκοπό την εξυπηρέτηση των μετακινούμενων προς και από το Μετρό. Οι σταθμοί ποδηλάτων που βρίσκονται σε κάποιο Μετρό είναι γνωστοί με τον όρο εγκαταστάσεις Bike-and-Ride. Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε ως πρόβλημα χωροθέτησης εγκαταστάσεων και συνεπώς, διατυπώθηκε μαθηματικά χρησιμοποιώντας το κατάλληλο πρότυπο μοντέλο αυτής της κατηγορίας. Σκοπός της επίλυσης ήταν να περιοριστεί το κόστος κατασκευής και το κόστος απόστασης, εξυπηρετώντας ταυτόχρονα την ζήτηση.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας, παρουσιάστηκε το πρόβλημα της χωροθέτησης εγκαταστάσεων και τα μοντέλα που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία, με σκοπό να προσδιοριστεί εκείνο που ανταποκρίνεται καλύτερα στις ανάγκες της παρούσας εργασίας. Επίσης, μελετήθηκαν παρόμοιες προσεγγίσεις σχετικά με τα δίκτυα σταθμών σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων και διαχωρίστηκαν αυτές που χρησιμοποιούν μοντέλα χωροθέτησης από τις υπόλοιπες.

Για την επίλυση του προβλήματος απαιτούνται δεδομένα και έτσι, ορίστηκε ως περιοχή μελέτης τμήμα του δικτύου του Μετρό της Αθήνας και οι περιοχές κάλυψης αυτού. Καθώς στην συγκεκριμένη εργασία δεν πραγματοποιείται συγκοινωνιακή μελέτη, δεν ήταν απαραίτητο να εξεταστεί το συνολικό δίκτυο του Μετρό, αλλά ένα αντιπροσωπευτικό τμήμα του. Με τη χρήση του λογισμικού ArcGIS βρέθηκαν κατάλληλα σημεία υποψήφια για τη χωροθέτηση σταθμών Bike Sharing. Για αυτά υπολογίστηκε με εύλογες παραδοχές η ζήτηση που συγκεντρώνουν.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, περιγράφεται το διαμορφωμένο (τροποποιημένο?) μοντέλο Σταθερού Κόστους το οποίο θα επιλυθεί χρησιμοποιώντας το εργαλείο OpenSolver. Η πρότυπη διατύπωση του μοντέλου Fixed Charged L.P., τροποποιήθηκε και επεκτάθηκε, τόσο ως προς την αντικειμενική συνάρτηση όσο και στους περιορισμούς. Τα εξαγόμενα της επίλυσης είναι πρώτον τα βέλτιστα σημεία χωροθέτησης σταθμών

κοινόχρηστων ποδηλάτων, η σύνδεση σημείων εκτός Μετρό με σταθμούς Μετρό και το πλήθος των ποδηλάτων ανά σταθμό και ανά περίοδο λειτουργίας του συστήματος.

Λόγω της ύπαρξης δυαδικών μεταβλητών, το λογισμικό με το οποίο λειτουργεί ο OpenSolver αδυνατεί να πραγματοποιήσει τη διαδικασία της ανάλυσης ευαισθησίας. Για το λόγο αυτό ήταν απαραίτητο να εξεταστούν διαφορετικά σενάρια ώστε στην συνέχεια να προσδιοριστεί η επιρροή του κάθε παράγοντα στη διαμόρφωση της λύσης. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η επίδραση του κόστους εγκατάστασης, του αριθμού των θέσεων πρόσδεσης ποδηλάτων ανά σταθμό, του μεγέθους του στόλου και τέλος, της ζήτησης.

6.2 ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία αποτελεί, στο βαθμό που γνωρίζουμε, την πρώτη προσέγγιση για τη δημιουργία δικτύου σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων με σκοπό την προώθηση της συνδυασμένης μετακίνησης Bike-and-Ride. Αντιμετωπίζεται το κύριο μειονέκτημα του Bike-and-Ride, που έχει να κάνει με τη δυνατότητα μετακίνησης με ποδήλατο είτε για την πρόσβαση στο μέσο είτε για την αποχώρηση. Παρουσιάζεται μια λεπτομερής αντιμετώπιση του προβλήματος που λαμβάνει υπόψη τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των συστημάτων κοινόχρηστων ποδηλάτων αλλά και τα χαρακτηριστικά της μετακίνησης προς και από το Μετρό. Συνδυάζοντας τα παραπάνω στοιχεία, επιτυγχάνεται μια ρεαλιστική απεικόνιση.

Η προτεινόμενη μέθοδος είναι εύχρηστη και ευέλικτη τόσο ως προς την συλλογή δεδομένων αλλά και την επίλυση. Το μοντέλο του Σταθερού Κόστους εξυπηρετεί δύο διαφορετικά συμφέροντα. Αφενός, περιορίζει το κόστος εγκατάστασης, μεριμνώντας για τον προϋπολογισμό και αφετέρου, περιορίζοντας την απόσταση μετακίνησης μεταξύ των σημείων ζήτησης και εξυπηρέτησης, μειώνει το χρόνο μετακίνησης. Ένα πλεονέκτημα της προσέγγισης που προτάθηκε, έχει να κάνει με την ζήτηση. Η ζήτηση υπεισέρχεται στο μοντέλο ως ποσοστό της συνολικής, επομένως ακόμα και αν τα νούμερα δεν είναι πραγματικά, αυτό δεν επηρεάζει την τελική λύση. Αρκεί βέβαια, να τηρούνται οι σωστές αναλογίες μεταξύ των διαφορετικών σημείων.

Το OpenSolver ως εργαλείο καθιστά την αναπαράσταση του προβλήματος εύκολη, χωρίς περιθώριο να προκληθούν υπολογιστικά λάθη. Τα αποτελέσματα έχουν ακρίβεια ενώ για το συγκεκριμένο πρόβλημα, ο μέγιστος υπολογιστικός χρόνος δεν υπερέβη τα τέσσερα λεπτά. Έτσι, η εξέταση πολλών διαφορετικών σεναρίων ήταν κάθε άλλο παρά χρονοβόρα διαδικασία.

6.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΕΤΑΙΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Εφόσον πλέον έχει εξεταστεί συνολικά η προσέγγιση της παρούσας εργασίας σχετικά με τη χωροθέτηση σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων, σε αυτή την ενότητα γίνονται προτάσεις που αφορούν είτε σε επέκταση του μοντέλου είτε σε βελτίωση της προσέγγισης που παρουσιάστηκε.

Αρχικά, θα ήταν σκόπιμο να επιλυθεί το ίδιο πρόβλημα με διαφορετικό υπολογιστικό εργαλείο, ώστε να διαπιστωθεί εάν υπάρχει ή όχι σημαντική απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων. Βελτίωση των αποτελεσμάτων ίσως προέκυπτε και από την εισαγωγή της πραγματικής προέλευσης προορισμού του δικτύου που διερευνήθηκε. Η εκτίμηση των μετακινήσεων από τις χρήσεις γης ενέχει ανακρίβειες και σίγουρα, δεν παρέχει αρκετή λεπτομέρεια για τη χρονική κλίμακα που διερευνάται σε ένα πρόβλημα ανάθεσης στόλου. Υπενθυμίζεται ότι στην παρούσα εργασία, η χρονική κατανομή της ζήτησης έχει υποθετικά νούμερα βασισμένα σε εύλογες παραδοχές. Η διαδικασία της ανάθεσης στόλου σε ζήτηση απαιτεί πιο λεπτομερείς προσεγγίσεις.

Στην συγκεκριμένη εργασία δίνεται έμφαση στην τροφοδοσία του Μετρό μέσω των συστημάτων Bike-sharing. Όπως αναφέρθηκε, έχει γίνει η παραδοχή ότι η ζήτηση προκύπτει από διάφορες περιοχές στην εμβέλεια των σταθμών. Η προσέγγιση αυτή δε λαμβάνει υπόψη τα «κύματα» επιβατών που επιβατών που φτάνουν στο Μετρό. Εν μέρει βέβαια, αυτή η παράλειψη οφείλεται στην απουσία δεδομένων ζήτησης.

Έχοντας δεδομένα για την ζήτηση, αποκτά ενδιαφέρον να εξεταστεί η σχέση αυτής με τη χωρητικότητα των εγκαταστάσεων. Στην παρούσα εργασία, η χωρητικότητα των σταθμών ήταν σταθερή και γνωστή εκ των προτέρων και αυτό οδήγησε στην επιλογή των 300 ποδηλάτων ως στοιχείο του βασικού σεναρίου. Έχει ενδιαφέρον να διαμορφωθεί το πλήθος των ποδηλάτων και η χωρητικότητα των σταθμών ώστε να ανταποκρίνονται στην ζήτηση.

Στην παρούσα προσέγγιση υπολογίζονται μεταξύ άλλων, τα ποδήλατα που πρέπει να είναι σε κάθε σταθμό στην αρχή κάθε περιόδου λειτουργίας του συστήματος. Η επέκταση του προβλήματος μπορεί και έχει νόημα να συνοδεύεται από έναν αλγόριθμο που υπολογίζει τη διαδρομή για την αναδιανομή των ποδηλάτων, ώστε να γίνεται στον ελάχιστο δυνατό χρόνο. Σε πραγματικά συστήματα, στις ώρες αιχμής το relocating πρέπει να πραγματοποιείται ακόμη και σε διάστημα μισής ώρας, αν κάποιος σταθμός εξαντλεί τη χωρητικότητά του ή μένει χωρίς ποδήλατα. Η διαδικασία της αναδιανομής ποδηλάτων μεταξύ των σταθμών είναι απόφαση λειτουργικού χαρακτήρα και εξασφαλίζει την ικανοποίηση της ζήτησης και την αξιοπιστία του

συστήματος. Επομένως, για να γίνει σωστά, απαιτούνται ακριβή δεδομένα σχετικά με την ζήτηση.

Ένας βασικός περιορισμός κατά την επιλογή των υποψήφιων θέσεων για τη χωροθέτηση σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων σχετίζεται με το ανάγλυφο της περιοχής αλλά και τις κατά μήκος κλίσεις στις διαδρομές που συνδέουν τους σταθμούς. Το πρόβλημα του ανάγλυφου μπορεί να αντιμετωπισθεί με τα ηλεκτρικά ποδήλατα. Θα ήταν ενδιαφέρον να λυθεί εφαρμοστεί η προσέγγιση της παρούσας εργασίας με δύο είδη ποδηλάτων. Η αξιοποίηση του ηλεκτρικού στόλου απαιτεί μεγαλύτερη προσοχή, καθώς αυτά έχουν το τριπλάσιο κόστος αγοράς από τα συμβατικά.

Πολύ συχνά στον συγκοινωνιακό σχεδιασμό υπάρχει αβεβαιότητα που σχετίζεται με τους παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη, οι οποίοι δεν είναι πάντοτε μετρήσιμοι. Για την αντιμετώπιση των αγνώστων παραγόντων γίνονται παραδοχές. Ο χειρισμός της αβεβαιότητας είναι εφικτός με κατάλληλα μοντέλα (under uncertainty models) τα οποία λαμβάνουν υπόψη την έλλειψη επαρκούς γνώσης. Η αβεβαιότητα κυρίως αναφέρεται στην ζήτηση, στην προσφορά, ή στην οικονομική απόδοση. Το ίδιο πρόβλημα επομένως μπορεί να επιλυθεί με επιπλέον περιορισμούς αβεβαιότητας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- AASHTO Executive Committee, 1999. *Guide got the Development of Bicycle Facilities*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC
- Balinski M. L., 1965. *Integer Programming: Methods, uses computations*. Management Science 12(3) 253-313.
- Brunsing, 1997
- Campel J. F., 1990. *Locating transportation terminal to serve an expanding demand*. Transportation Research Part B: Methological 23(3) 173-192
- Campel J. F., 1994. *Integer programming formulations of discrete hub locations problems*. European Journal of Operational Research 72(2) 377-405
- Church, R.L., ReVelle, C.R., 1974. *The maximal covering location problem*. Pap. Reg. Sci. 32, 101–118.
- Church, R.L. & Meadows, M.E., 1979. *Location modelling utilizing maximum service distance criteria*. Geographical Analysis, 11(4), 358-373
- Church, R. L. & ReVelle, C. R., 1979. *The maximal covering location problem*. Papers in regional science, 32(1), 101-118
- Colornj, A., Dorigo, M., & Maniezzo, V., 1991. *Distributed optimization by ant colonies*. In Proceedings of the first European conference on artificial life (Vol. 142, pp. 134-142).
- Daskin, M.S., 1995. *Network and Discrete Location*. John Wiley and Sons, Chichester, United Kingdom.
- Daskin, M. S., 2000. *A new approach to solving the vertex p-center problem to optimality: Algorithm and computational results*. Communications of the Operations Research Society of Japan, 45 (9), 428-436.
- Daskin, M.S., 2008. *What You Should Know About Location Modeling*,
- DeMaio, P. (2003). *Smart bikes: public transportation for the 21st century*. Transportation Quarterly, 57(1), 9e11.
- Demaio, P., 2009. *Bike-sharing: history, impacts, models of provision, and future*. J. Public Transport. 12, 41–56.
- Ernst, A. T., & Krishnamoorthy, M. 1996. *Efficient algorithms for the uncapacitated single allocation p-hub median problem*. Location Science , 4(3), 139-154.
- European Commission, 1999. *Cycling: The Way Ahead for Towns and Cities*. Publications Office of the European Union, Luxembourg.

- Fishman, E., Washington, S., Haworth, N., 2014. *Bike share's impact on car use: evidence from the United States, Great Britain, and Australia*. Transport. Res. Part D Transport. Environ. 31, 13–20.
- Frade, I., Ribeiro, A., 2015. *Bike-sharing: A maximal covering location approach*. Transportation Research Part a 82 216-227
- Garey, M. R., & Johnson, D. S. (1979). *Computer and intractability: a guide to theory of NP-completeness*. S. Francisco.
- García-Palomares, J.C., Gutiérrez, J., Latorre, M., 2012. *Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: a GIS approach*. Appl. Geogr. 35, 235–246.
- Ghaziri H., 1991. *Solving routing problems by a self-organizing map*. 79 Artificial Neural Networks. pp. 829-834
- Hakimi, S. L. 1964. *Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph*. Operations research, 12(3), 450-459.
- Hakimi, S. L. 1965. *Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems*. Operations Research, 13(3), 462-475.
- Hamacher, H. W., & Drezner, Z. 2002. Facility location: applications and theory. Springer Science & Business Media
- Handy, S.L., Xing, Y., Buehler, T.J., 2010. *Factors associated with bicycle ownership and use: a study of six small U.S. cities*. Transportation (Amst.) 37, 967–985.
- Heinen, E., van Wee, B., & Maat, K. (2010). *Commuting by bicycle: an overview of the literature*. Transport Reviews, 30(1), 59e96.
- Institute of Transportation Engineers. *Trip Generation*. 9th Edition, Washington, DC, 2012
- Keijer, A., Rietveld, A., 2000. *How do people get to the railway station; The Dutch experience*. Transportation Planning and Technology, Vol. 23, Issue 3
- Klose, A., Drexl, A., 2005. *Facility Location Model for distribution system design*. European Journal of Operational Research.
- Larsen J., 2013. *Bike sharing programs hit the streets in over 500 cities worldwide*. Earth Policy Institute
- Laporte, G., Nickel, S., Saldanha da Gama, F., 2015. *Location Science*. Springer
- Lin, J.-R., Yang, T.-H., 2010. *Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints*. Transport. Res. Part E Logist. Transport. Rev. 47

- Lin, J.-R., Yang, T.-H., Chang, Y.-C., 2011. *A hub location inventory model for bicycle sharing system design: formulation and solution*. Comput. Ind. Eng.
- Lu, C.-C., 2013. *Robust multi-period fleet allocation models for bike-sharing systems*. Netw. Spat. Econ.
- Marler, R.T., Arora, J., 2004. *Survey of Multi-Objective Optimization Methods for Engineering*.
- Martinez, L.M., Caetano, L., Eiró, T., Cruz, F., 2012. *An optimization algorithm to establish the location of stations of a mixed fleet biking system: an application to the City of Lisbon*. Procedia – Soc. Behav. Sci. 54, 513–524.
- Mason, A., 2010. *Open Source Optimization for Excel*. Proceeding of the 45th Annual Conference of the ORSNZ.
- Midgley, P. (2011). Bicycle-sharing schemes: *Enhancing sustainable mobility in urban areas*. Background Paper No. 8, CSD19/2011/BP8, Commission on Sustainable Development. United Nations.
- Plastria, 1995. *Facility location: application and theory*.
- Proos, K. A., Stevens, G.P., Querin, O.M., Xie, Y.M., 2001. *Multicriterion evolutionary structural optimization using the weighted and the global criterion methods*. AIAA J. 39, 2006-2012
- Rahman, S., Smith, D., 2000. *Use location-allocation models in health service development planning in developing nations*. European Journal of operational Research, Vol. 123, 437-452
- ReVelle, C.S., Eiselt, H.a., 2005. *Location analysis: a synthesis and survey*. Eur. J. Oper. Res. 165, 1–19.
- Romero, J., Ibeas, A., Moura, J., 2012. *A simulation–optimization approach to design efficient systems of bike-sharing*. Procedia – Soc. Behav. Sci.
- Sayarshad, H., Tavassoli, S., Zhao, F., 2012. *A multi-periodic optimization formulation for bike planning and bike utilization*. Appl. Math. Model. 36, 4944– 4951.
- Vassi, A., 2014 *A Review And Critical Assessment Of Cycling Infrastructures Across Europe*
- Βλαστός Θ., Μηλάκης Δ., Αθανασόπουλος Κ., 2004. *Το ποδήλατο σε 17 ελληνικές πόλεις. Οδηγός εκπόνησης μελετών*.

Διαδικτυακές Πηγές

Bike sharing World Map:

https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1UxYw9YrwT_R3SGsktJU3D-2GpMU&hl=en

DeMaio, 2011. *Five Things Every Mayor Should Know Before Starting a Bike Sharing Program*. <http://www.shareable.net/blog/>

Ηλικιακή Πυραμίδα για την Ελλάδα του 2016:

<http://www.un.org/en/development/desa/population/>

Συστήματα κοινόχρηστων ποδηλάτων στην Ελλάδα: χαρακτηριστικά, λειτουργία, διαχείριση, τοποθεσία, τεχνολογία :<http://www.cyclopolis.gr/> και <http://www.easybike.gr/?lang=el>

Τιμολογιακή πολιτική συστήματος Velib: <http://www.velib.paris/Abonnements-tarifs>

Χάρτες: www.openstreetmap.org

OBIS, 2011. Optimizing Bike-sharing in European Cities - a handbook. : <https://ec.europa.eu/energy/intelligent/project>

Cycling Embassy of Denmark and the Danish Bicycle Federation. *Bicycle Parking Manual*. : www.cycling-embassy.dk