



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Αποδοτική Διαχείριση Στόλου Οχημάτων Μέσω Παροχής
Κινήτρων σε Συστήματα Διαμοιρασμού Οχημάτων Απλής
Διαδρομής**

Δαμιανός Μ. Κυπριάδης-Σπυριδωνίδης

Επιβλέπουσα : **Αθανασία Αλωνιστιώτη, Επίκουρη Καθηγήτρια**

ΑΘΗΝΑ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2016

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αποδοτική Διαχείριση Στόλου Οχημάτων Μέσω Παροχής Κινήτρων σε Συστήματα
Διαμοιρασμού Οχημάτων Απλής Διαδρομής

Δαμιανός Μ. Κυπριάδης-Σπυριδωνίδης

A.M.: M1325

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: Αθανασία Αλωνιστιώτη, Επίκουρη Καθηγήτρια

Οκτώβριος 2016

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα συστήματα διαμοιρασμού οχημάτων παρέχουν τη δυνατότητα μετακίνησης με χρήση αυτοκινήτου ή ποδηλάτου χωρίς την ταυτόχρονη υποχρέωση απόκτησης οχήματος. Σε συνδυασμό με τις δημόσιες συγκοινωνίες μπορούν να παράσχουν ολοκληρωμένες υπηρεσίες μετακίνησης δίνοντας τη δυνατότητα μεταφοράς σε οποιοδήποτε σημείο μιας πόλης. Όμως η ορθή λειτουργία των συστημάτων αυτών απαιτεί λεπτομερή σχεδιασμό τόσο κατά το στάδιο εγκατάστασής τους όσο και κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους. Η εργασία αυτή πραγματεύεται το πρόβλημα της ανισοκατανομής του στόλου των οχημάτων κατά τη διάρκεια της ημέρας. Πιο συγκεκριμένα, λόγω της κίνησης των χρηστών παρατηρείται συσσώρευση οχημάτων σε σημεία χαμηλής ζήτησης με παράλληλη έλλειψη σε σημεία υψηλής ζήτησης. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, υλοποιήθηκε ένας μηχανισμός ανάθεσης οχημάτων που παρέχει κίνητρα στους χρήστες έτσι ώστε να μεταβάλλουν κάποιες από τις προτιμήσεις του ταξιδιού τους, όπως το σταθμό αφετηρίας, το σταθμό τερματισμού, την ώρα αναχώρησης, έτσι ώστε να λειτουργήσουν πιο αποδοτικά για το σύστημα. Σε αντάλλαγμα του επιπλέον χρόνου που θα σπαταλήσουν σε περίπτωση που δεχθούν να συμμετέχουν στο μηχανισμό, το προτεινόμενο εναλλακτικό ταξίδι παρέχεται με έκπτωση. Αναπτύχθηκαν δύο σχήματα παροχής κινήτρων. Και στα δύο σχήματα ο χρήστης δηλώνει το αν είναι διατεθειμένος να συμμετέχει και στην περίπτωση που δεχθεί δηλώνει την απόσταση που είναι διατεθειμένος να περπατήσει και το χρόνο που διατίθεται να ξοδέψει ώστε να προσεγγίσει έναν σταθμό που βρίσκεται μακρύτερα από αυτόν του σταθμού αφετηρίας και του σταθμού τερματισμού. Η διαφορά των δύο σχημάτων έγκειται στο γεγονός ότι στο πρώτο την αποζημίωση που θα δώσει το σύστημα την αποφασίζει το ίδιο, ενώ στο δεύτερο σχήμα ο χρήστης δηλώνει το ποσό με το οποίο θέλει να αποζημιωθεί. Η αποδοχή ή όχι ενός ταξιδιού και το ύψος της αποζημίωσης υπολογίζονται συναρτήσει της προτεραιότητας που έχει μια μετακίνηση, δηλαδή του κατά πόσο η μετακίνηση αυτή οδηγεί στην επιθυμητή κατανομή των οχημάτων στους σταθμούς. Για την αξιολόγηση των δύο σχημάτων υλοποιήθηκε ένας προσομοιωτής διακριτών γεγονότων. Μέσω του προσομοιωτή εφαρμόστηκαν τα δύο σχήματα παροχής κινήτρων σε ένα πραγματικό σύστημα, το Capital BikeShare στην Ουάσινγκτον των Ηνωμένων Πολιτειών. Η εφαρμογή των σχημάτων όπως αποδείχθηκε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, αυξάνει τον αριθμό των ταξιδιών που μπορούν να υλοποιηθούν και έχει οφέλη τόσο για τους χρήστες όσο και για το σύστημα. Το κόστος που καλούνται να πληρώσουν οι χρήστες μειώνεται, αλλά ταυτόχρονα αυξάνεται το συνολικό κέρδος του συστήματος.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Αλγόριθμοι, Βελτιστοποίηση

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: συστήματα διαμοιρασμού οχημάτων, σχήμα παροχής κινήτρων, διαχείριση στόλου οχημάτων, θεωρία παιγνίων

ABSTRACT

Vehicle Sharing Systems form an alternative means of transportation providing users the opportunity to travel by car or by bike without the need of owning a vehicle by themselves. Complementary usage with public transportation offers integrated transportation services lowering the environmental footprint of urban mobility. However there are many problems and challenges that a vehicle sharing system operator has to deal with. This work focuses on the problem of fleet distribution and fleet balancing. Specifically, during the day and due to users transportation patterns, depletion of vehicles may occur at stations of high demand whereas surplus of vehicles at stations of low demand. In order to alleviate the aforementioned problem, a vehicle allocation mechanism, offering incentives to users, has been developed. Users who are willing to participate in the vehicle allocation mechanism are rewarded with a discount in order to change their trip preferences, such as the origin station or/and the destination station or/and the departure time. Two schemes for incentivizing users have been developed. Both schemes require user's declaration of participating in the incentivization scheme and in case they are willing to participate, the extra time and distance they are willing to spend and walk in order to reach a station that is further from the one closest to them. The two schemes mainly differ in the way the discount is calculated and offered. According to the first scheme the discount is decided by the scheme, whereas users involved in the second scheme declare the discount they want to be offered. A discrete event simulator has been implemented so as to evaluate the performance of the incentivization schemes. The system where the two schemes have been applied is the Capital BikeShare system, deployed in the city of Washington DC. Simulation results revealed the fruitful impact of the incentivization schemes on the performance of the system in terms of trip acceptance. Furthermore the mechanism has beneficial impact both to the users and to the system. Trips are offered to the users with lower price while at the same time the revenue of the system increases.

SUBJECT AREA: Algorithms, Optimization

KEYWORDS: vehicle sharing systems, incentivization scheme, fleet management, game theory

Στους γονείς μου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα της εργασίας, την Επίκουρη Καθηγήτρια Αθανασία Αλωνιστιώτη για την πολύτιμη συμβολή της και την αμέριστη συμπαράστασή της. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Καθηγήτρια Πάντζιου Γραμματή, τον Αναπληρωτή Καθηγητή Γαβαλά Δαμιανό και τον Επίκουρο Καθηγητή Κωνσταντόπουλο Χαράλαμπο για την ουσιαστική καθοδήγηση και τις καίριες επισημάνσεις τους καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον φίλο και συνεργάτη Αλέξανδρο Αγγελόπουλο που με την επικοινωνιακή συνεργασία που είχαμε συνέβαλε σημαντικά στην ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	11
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
1.1 Συστήματα Διαμοιρασμού Οχημάτων	12
1.2 Ιστορική Αναδρομή	12
1.3 Προβλήματα - Προκλήσεις.....	13
1.4 Δομή της Παρούσης Εργασίας.....	14
2. ΑΛΓΟΡΙΘΜΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΜΟΙΡΑΣΜΟΥ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	15
2.1 Στρατηγικός Σχεδιασμός Συστημάτων	16
2.2 Παροχή Κινήτρων Για Μετακίνηση Οχημάτων.....	20
2.3 Επιχειρησιακή Μετακίνηση Οχημάτων	25
3. ΣΧΗΜΑΤΑ ΠΑΡΟΧΗΣ ΚΙΝΗΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΘΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	31
3.1 Ανάθεση Οχημάτων στους Χρήστες.....	32
3.1.1 Μεταβλητές του Προβλήματος	32
3.1.2 Χειρισμός των Αιτημάτων Κράτησης.....	34
3.1.3 Μηχανισμός Ανάθεσης Οχημάτων.....	35
3.1.4 Παροχή Κινήτρων στους Χρήστες.....	37
3.1.5 Προσδιορισμός Προτεραιοτήτων	42
3.2 Αξιολόγηση - Αποτελέσματα	43
3.2.1 Περιβάλλον Εφαρμογής των Σχημάτων Παροχής Κινήτρων	51
3.2.2 Αποτελέσματα	51
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	59
ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ	60
ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	61

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Βασικά προβλήματα των συστημάτων διαμοιρασμού οχημάτων	16
Σχήμα 3.1: Σύνολο προσβάσιμων σταθμών	32
Σχήμα 3.2: Γραφική αναπαράσταση του προβλήματος ανάθεσης των οχημάτων.....	36
Σχήμα 3.3: Μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων του προσομοιωτή.....	45
Σχήμα 3.4: Οντότητες που λαμβάνουν μέρος στην διαδικασία της προσομοίωσης.....	45
Σχήμα 3.5: UML διάγραμμα ακολουθίας για τη διαδικασία εγγραφής χρήστη	46
Σχήμα 3.6: UML διάγραμμα ακολουθίας για το αίτημα ενοικίασης ποδηλάτου	47
Σχήμα 3.7: UML διάγραμμα ακολουθίας για το αίτημα εμφάνισης προτεινόμενων ταξιδιών	48
Σχήμα 3.8: UML διάγραμμα ακολουθίας για το αίτημα επιβεβαίωσης ενοικίασης ποδηλάτου.....	48
Σχήμα 3.9: UML διάγραμμα ακολουθίας για το αίτημα ακύρωσης ενοικίασης ποδηλάτου	49
Σχήμα 3.10: UML διάγραμμα ακολουθίας των μηνυμάτων κατά την έναρξη του ταξιδιού	50
Σχήμα 3.11: UML διάγραμμα ακολουθίας των μηνυμάτων κατά τον τερματισμό του ταξιδιού.....	50
Σχήμα 3.12: Απορριφθέντα αιτήματα συναρτήσει του ποσοστού συμμετεχόντων στο μηχανισμό.....	52
Σχήμα 3.13: Ποσοστό απορριφθέντων αιτημάτων ανά ώρα λειτουργίας.....	53
Σχήμα 3.14: Επίδραση του μηχανισμού στο κόστος που καταβάλουν οι χρήστες.....	53
Σχήμα 3.15: Επίδραση του μηχανισμού στο κέρδος του συστήματος	54
Σχήμα 3.16: Απόδοση του μηχανισμού συναρτήσει του αριθμού των αιτημάτων που επεξεργάζεται ταυτόχρονα.....	55
Σχήμα 3.17: Απόδοση του μηχανισμού συναρτήσει του επιτρεπόμενου χρόνου κράτησης του οχήματος.....	55
Σχήμα 3.18: Απόδοση του μηχανισμού με χρήση του δεύτερου σχήματος συναρτήσει της αιτούμενης από τους χρήστες αποζημίωση.....	57

Σχήμα 3.19: Κέρδος συστήματος με χρήση του δεύτερου σχήματος συναρτήσει της αιτούμενης από τους χρήστες αποζημίωση.....	57
Σχήμα 3.20: Κόστος χιλιομέτρου συναρτήσει της αιτούμενης από τους χρήστες αποζημίωση.....	58

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία διενεργήθηκε κατά τα έτη 2014 έως και 2016 στο τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Μέρος της δουλειάς που παρουσιάζεται έχει γίνει στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού προγράμματος Movesmart και έχει παρουσιασθεί στο συνέδριο "IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)" με τίτλο "Incentivization Schemes for Vehicle Allocation in One-Way Vehicle Sharing System".

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Συστήματα Διαμοιρασμού Οχημάτων

Τα συστήματα διαμοιρασμού οχημάτων είναι συστήματα που παρέχουν στους χρήστες τη δυνατότητα ενοικίασης οχημάτων για χρονικό διάστημα ή απόσταση που εκείνοι επιθυμούν. Τα οχήματα προς ενοικίαση είναι κυρίως αυτοκίνητα και ποδήλατα. Τα τελευταία χρόνια, με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρικών οχημάτων, έχουν εγκατασταθεί συστήματα που παρέχουν προς ενοικίαση ηλεκτρικά οχήματα. Η μορφή των συστημάτων αυτών ποικίλει, τόσο ως προς τη δομή τους όσο και ως προς τις παρεχόμενες υπηρεσίες. Υπάρχουν συστήματα στα οποία τα οχήματα μπορούν να ενοικιαστούν και να επιστραφούν από συγκεκριμένα σημεία, τους σταθμούς. Οι σταθμοί αυτοί μπορεί να είναι στεγασμένοι χώροι αλλά και υπαίθριες συγκεντρωμένες θέσεις στάθμευσης. Για συστήματα ποδηλάτων οι σταθμοί αποτελούνται από διαδοχικούς πυλώνες στους οποίους κλειδώνονται τα ποδήλατα. Ειδικά για συστήματα που λειτουργούν με ηλεκτρικά οχήματα, οι σταθμοί είναι εφοδιασμένοι με κατάλληλες υποδομές ώστε να μπορεί να γίνει η επαναφόρτιση των οχημάτων. Στα συστήματα που δεν υπάρχουν σταθμοί (free floating systems), τα οχήματα μπορούν να ενοικιαστούν από οποιοδήποτε σημείο, συνήθως εντός μιας καθορισμένης περιοχής (service area). Η επιστροφή των οχημάτων πρέπει να γίνει και πάλι εντός της περιοχής αυτής. Συνήθως όμως παρέχεται η δυνατότητα κατά τη διάρκεια ενοικίασης το όχημα να μπορεί να βγει και εκτός της προκαθορισμένης περιοχής. Τα συστήματα ποικίλουν και ως προς το είδος των ταξιδιών που επιτρέπουν να εκτελούνται. Σε κάποια επιτρέπονται μόνο ταξίδια μετ' επιστροφής (round trip), στα οποία ο χρήστης έχει την υποχρέωση να επιστρέψει το όχημα στο σημείο/σταθμό από όπου το παρέλαβε. Σε άλλα συστήματα παρέχεται η δυνατότητα ταξιδιών απλής διαδρομής (one way trip), στα οποία το σημείο/σταθμός αφετηρίας μπορεί να διαφέρει από αυτό του τερματισμού. Για την απόκτηση δικαιώματος χρήσης των οχημάτων, απαιτείται συνήθως εγγραφή στο σύστημα. Η απόκτηση πρόσβασης στα οχήματα μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπου, όπως μέσω RFID καρτών και στα πιο σύγχρονα συστήματα μέσω εφαρμογών για κινητές συσκευές. Στην τελευταία περίπτωση μπορεί να γίνει μελλοντική κράτηση ενός οχήματος έτσι ώστε να είναι εξασφαλισμένη η διαθεσιμότητα του την επιθυμητή ώρα και στο επιθυμητό μέρος.

1.2 Ιστορική Αναδρομή

Η ιδέα των συστημάτων διαμοιρασμού οχημάτων δεν είναι πρόσφατη. Τα πρώτα συστήματα εμφανίστηκαν μετά τα μέσα του προηγούμενου αιώνα. Συγκεκριμένα το πρώτο σύστημα με ποδήλατα δημιουργήθηκε στο Άμστερνταμ το 1965. Το συγκεκριμένο σύστημα αποτελείτο από δεκάδες λευκά ποδήλατα, εξ ου και η ονομασία White Bikes, τα οποία βρίσκονταν διεσπαρμένα στην πόλη, ξεκλειδωτά και ελεύθερα να χρησιμοποιηθούν από τον καθένα. Μετά από πολλά κλεμμένα και κατεστραμμένα ποδήλατα το εγχείρημα εγκαταλείφθηκε. Η επόμενη προσπάθεια εγκατάστασης και λειτουργίας συστήματος ποδηλάτων έγινε αρκετά χρόνια μετά το 1995 στην πόλη της Κοπεγχάγης, το σύστημα Copenhagen's Bycyklen ή City Bikes, όπου και πάλι λόγω φθορών και κλεμμένων ποδηλάτων τερματίστηκε η λειτουργία του. Την επόμενη χρονιά στην πόλη του Πόρτσμουθ εμφανίστηκε ένα μικρό σύστημα διαμοιρασμού ποδηλάτων που λογίζεται ως το πρώτο που αντιμετώπισε το πρόβλημα των κλοπών. Το συγκεκριμένο σύστημα που απευθυνόταν αποκλειστικά στη φοιτητική κοινότητα του πανεπιστημίου, παρείχε πρόσβαση στα ποδήλατα μέσω μαγνητικής κάρτας. Δύο χρόνια αργότερα και συγκεκριμένα το 1998 στη Ρεν της Γαλλίας αναπτύχθηκε το πρώτο σύστημα μεγάλης κλίμακας που χρησιμοποιούσε RFID κάρτες και μαγνητικές κάρτες για την πρόσβαση στα ποδήλατα. Το σύστημα αυτό αποτελείτο από 200 ποδήλατα και 25 σταθμούς και η ενοικίαση των ποδηλάτων ήταν χωρίς χρέωση. Το 2005 στη Λυών της

Γαλλίας εγκαθιδρύθηκε από την εταιρία JCDecaux ένα σύστημα ποδηλάτων με την ονομασία Vélo'n, αποτελούμενο από 1500 ποδήλατα. Το 2007 στη Γαλλία και πάλι και συγκεκριμένα στο Παρίσι ξεκίνησε να λειτουργεί ένα σύστημα 6000 ποδηλάτων, το Vélib'. Την ίδια χρονιά εμφανίζεται το πρώτο σύστημα στην πόλη της Βαρκελώνης στην Ισπανία. Το 2008 εμφανίζεται το πρώτο σύγχρονο σύστημα διαμοιρασμού ποδηλάτων στην Ουάσιγκτον των Ηνωμένων Πολιτειών με δέκα σταθμούς και 120 ποδήλατα. Την ίδια χρονιά εγκαθιδρύονται συστήματα στο Μόντρεαλ του Καναδά και στην Κίνα. Τις επόμενες χρονιές εγκαταστάθηκαν και επεκτάθηκαν αντίστοιχα συστήματα σε πολλές χώρες με αποτέλεσμα το 2015 ο συνολικός αριθμός ποδηλάτων να ξεπερνάει κατά πολύ το 1.000.000 παγκοσμίως [1], [2].

Το πρώτο σύστημα διαμοιρασμού αυτοκινήτων εμφανίστηκε στη Ζυρίχη της Ελβετίας το 1948 με την ονομασία Sefage. Το σύστημα αυτό καθώς και συστήματα που αναπτύχθηκαν τις επόμενες δεκαετίες, όπως Procotip (Γαλλία, 1971 ως 1973), Witkar (Άμστερνταμ, 1974 ως 1988), Green Cars (Αγγλία, 1977 ως 1984), Bilpoolen (Σουηδία, 1976 ως 1979), Vivallabil (Σουηδία, 1983 ως 1998) και bilkooperativ (Σουηδία, 1985 ως 1990) δεν είχαν τα επιθυμητά αποτελέσματα και αργά ή γρήγορα τερματίστηκε η λειτουργία τους. Στη Βόρεια Αμερική εμφανίστηκαν κάποια πειραματικά προγράμματα διαμοιρασμού αυτοκινήτων τη δεκαετία του 80, Mobility Enterprise (1983 ως 1986) και Short Term Auto Rental Service (1983 ως 1985), έως τα τέλη του 1990 όπου εγκαταστάθηκαν δύο συστήματα με την ονομασία Flexcar και Zipcar. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούσαν σταθμούς από όπου οι χρήστες μπορούσαν να παραλάβουν και να επιστρέψουν τα οχήματα που νοίκιαζαν. Το 2002 στη Σιγκαπούρη δημιουργήθηκε ένα από τα πιο γνωστά συστήματα διαμοιρασμού αυτοκινήτων με την ονομασία Diracc, του οποίου η λειτουργία τερματίστηκε έξι χρόνια αργότερα το 2008. Έκτοτε έχουν γίνει αρκετά εγχειρήματα εγκατάστασης και λειτουργίας συστημάτων διαμοιρασμού αυτοκινήτων σε διάφορες χώρες, όπως CityCarshare, CarShare, Communauto στη Βόρεια Αμερική, Autolib, Stadtmobil στην Ευρώπη καθώς και συστήματα που δραστηριοποιούνται σε παραπάνω από μία χώρες και ηπείρους με πιο γνωστό την car2go [3], [4].

1.3 Προβλήματα - Προκλήσεις

Από τη σύντομη ιστορική αναδρομή που έγινε στην προηγούμενη ενότητα και λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι αρκετά από τα συστήματα που δημιουργήθηκαν λειτούργησαν μόνο για λίγα χρόνια, γίνεται αντιληπτό ότι πολλά είναι τα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά τη διάρκεια λειτουργίας των συστημάτων αυτών. Ενδεικτικό του παραπάνω γεγονότος είναι ότι στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής την περίοδο από το 1997 έως το 2009 ξεκίνησαν 34 νέα εγχειρήματα συστημάτων διαμοιρασμού οχημάτων εκ των οποίων τα 15 τερματίστηκαν, έχοντας σαν αποτέλεσμα απώλεια της τάξης του 50%.

Οι κλοπές των οχημάτων και κυρίως των ποδηλάτων στα πρώτα συστήματα που δημιουργήθηκαν, είναι μια από τις βασικές αιτίες τερματισμού των συστημάτων. Σε μεταγενέστερα βέβαια συστήματα με την εισαγωγή μεθόδων ταυτοποίησης και επαλήθευσης των χρηστών το φαινόμενο αυτό μπόρεσε να αντιμετωπιστεί. Το κόστος εγκατάστασης αλλά και συντήρησης των συστημάτων αυτών αποτέλεσε και αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα ως προς τη βιωσιμότητά τους. Επίσης η παροχή και διατήρηση μιας ικανοποιητικής ποιότητας υπηρεσιών, με άμεσο αντίκτυπο στην αποδοχή των συστημάτων από τους χρήστες, είναι παράγοντας που συντελεί στην ομαλή και αποδοτική λειτουργία τους. Ο όρος ποιότητα υπηρεσιών αναφέρεται κυρίως στη διαθεσιμότητα των οχημάτων, στη δυνατότητα δηλαδή να βρει ένας χρήστης την επιθυμητή ώρα και στο επιθυμητό σημείο ένα διαθέσιμο όχημα. Επίσης για συστήματα με σταθμούς ζητούμενο δεν είναι μόνο η διαθεσιμότητα οχημάτων στο σταθμό

αφετηρίας αλλά και η εύρεση ελεύθερης θέσης στάθμευσης στο σταθμό τερματισμού. Η διαθεσιμότητα δηλαδή είναι συνάρτηση του συνολικού αριθμού οχημάτων, του αριθμού των σταθμών, της χωρητικότητας τους καθώς και των θέσεων στις οποίες εγκαθίστανται οι σταθμοί. Το φαινόμενο αυτό είναι ακόμα πιο έντονο στα συστήματα απλής διαδρομής. Τα συστήματα αυτά λόγω της κίνησης των χρηστών οδηγούνται συχνά σε ανισομερή κατανομή των οχημάτων. Έτσι παρατηρείται μεγάλη συσσώρευση οχημάτων σε σημεία με χαμηλή ζήτηση και αντίστοιχα έλλειψη σε σημεία υψηλής ζήτησης. Για παράδειγμα κατά τη διάρκεια μιας ημέρας και συγκεκριμένα το πρωί θα υπάρχει μεγάλη ζήτηση από τα περίχωρα μιας πόλης προς το κέντρο και αντίστοιχα μετά το μεσημέρι από το κέντρο προς τα περίχωρα, όταν οι άνθρωποι επιστρέφουν από τις δουλειές τους. Αποτέλεσμα αυτού είναι η έλλειψη οχημάτων, όπως επίσης και η έλλειψη θέσεων στάθμευσης κατά τις ώρες αιχμής.

Οι παραπάνω παράγοντες καταδεικνύουν τις δυσκολίες και τα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά την εγκατάσταση και λειτουργία των συστημάτων. Σημαντικές αποφάσεις πρέπει να ληφθούν ως προς τον μέγεθος του στόλου των οχημάτων, το πλήθος των σταθμών και των σημείων εγκατάστασης αυτών. Επίσης απαραίτητη είναι η εφαρμογή μεθόδων ανακατανομής των οχημάτων έτσι ώστε να μπορεί να καλυφθεί η ζήτηση των χρηστών. Η ανακατανομή των οχημάτων μπορεί να γίνει είτε από το ίδιο το σύστημα, όπου εργαζόμενοι αναλαμβάνουν την εργασία αυτή, είτε από τους χρήστες. Στην πρώτη περίπτωση η διαδικασία υλοποιείται με τη χρήση κάποιου φορτηγού οχήματος στο οποίο φορτώνονται τα οχήματα και ανακατανέμονται στους σταθμούς. Η διαδικασία αυτή περιπλέκεται στην περίπτωση συστημάτων διαμοιρασμού αυτοκινήτων, αφού είναι εύκολα αντιληπτή η δυσκολία στη μετακίνηση των αυτοκινήτων, σε αντίθεση με τα ποδήλατα, όπου ένας ικανοποιητικός αριθμός αυτών μπορεί να μεταφερθεί με το φορτηγό του συστήματος. Στη δεύτερη περίπτωση, περίπτωση κατά την οποία οι χρήστες αναλαμβάνουν την ανακατανομή των οχημάτων, το σύστημα παρέχει κίνητρα στους χρήστες ώστε να αλλάξουν είτε το σημείο/σταθμό από το οποίο θα παραλάβουν το όχημα, είτε το σημείο/σταθμό στο οποίο θα το επιστρέψουν είτε ακόμα και την ώρα εκκίνησης του ταξιδιού.

1.4 Δομή της Παρούσης Εργασίας

Η δομή της εργασίας αυτής έχει ως εξής: στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται λεπτομερέστερα τα προβλήματα στα οποία πρέπει να ανταπεξέλθουν οι διαχειριστές των συστημάτων διαμοιρασμού οχημάτων. Εν συνεχεία παρουσιάζονται σχεδιαστικές και αλγοριθμικές λύσεις που έχουν προταθεί για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών καθώς και για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας των συστημάτων. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η συμβολή της εργασίας αυτής στο θέμα της βελτιστοποίησης της κατανομής των οχημάτων. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ένας μηχανισμός ανάθεσης οχημάτων με παροχή κινήτρων στους χρήστες έτσι ώστε να πραγματοποιήσουν μετακινήσεις οχημάτων που συντελούν σε μια αποδοτικότερη κατανομή αυτών στους σταθμούς, αυξάνοντας έτσι τη διαθεσιμότητα τους. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και αναλύονται δύο σχήματα παροχής κινήτρων. Ακολούθως περιγράφεται η εφαρμογή των δύο σχημάτων σε ένα πραγματικό σύστημα διαμοιρασμού ποδηλάτων μέσω της υλοποίησης ενός προσομοιωτή. Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού, παρατίθενται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μηχανισμού. Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την εργασία αυτή.

2. ΑΛΓΟΡΙΘΜΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΜΟΙΡΑΣΜΟΥ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Τα συστήματα διαμοιρασμού οχημάτων είναι πολύπλοκα συστήματα των οποίων η ομαλή λειτουργία απαιτεί κατάλληλη μέριμνα από την πλευρά των διαχειριστών των συστημάτων αυτών. Βασικό μέλημα ενός τέτοιου συστήματος είναι η όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματική ικανότητα ανταπόκρισης στη ζήτηση οχημάτων από τους χρήστες. Η ζήτηση αυτή να μην αρκετές φορές τείνει να ακολουθεί κάποια πρότυπα, αλλά από την άλλη πλευρά δε μπορεί κανείς να υποτιμήσει και να παραβλέψει τη στοχαστικότητα αυτής. Επίσης τα συστήματα αυτά θα πρέπει να έχουν την ικανότητα να προσαρμόζονται σε ενδεχόμενη αύξηση των χρηστών τους και άρα της ζήτησης για οχήματα. Παράλληλα όμως όλες αυτές οι ενέργειες θα πρέπει να γίνουν διατηρώντας χαμηλό το κόστος λειτουργίας έτσι ώστε να μην τίθεται σε αμφιβολία η βιωσιμότητά τους. Για παράδειγμα η εγκατάσταση σταθμών ποδηλάτων σε κάθε οικοδομικό τετράγωνο μιας περιοχής θα μπορούσε να καλύψει σε ένα πολύ μεγάλο ποσοστό τη ζήτηση. Όμως τόσο το κόστος της εγκατάστασης όσο και το κόστος συντήρησης ενός τόσο μεγάλου συστήματος είναι αποτρεπτικό για την ομαλή λειτουργία και βιωσιμότητά του.

Οι προκλήσεις που έχει να αντιμετωπίσει και τα προβλήματα που πρέπει να επιλύσει ένας διαχειριστής συστήματος διαμοιρασμού οχημάτων εκτείνονται σε όλο το φάσμα και τη διάρκεια ζωής του συστήματος. Πρέπει να ληφθούν αποφάσεις και να επιλυθούν προβλήματα τόσο κατά τη διάρκεια εγκατάστασης του συστήματος όσο και κατά τη διάρκεια λειτουργίας αυτού. Όπως αναφέρεται και στο [5] ο σχεδιασμός και η λειτουργία των συστημάτων διαμοιρασμού ποδηλάτων/αυτοκινήτων μπορούν να διαχωριστούν σε τρία επίπεδα όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 2.1 και αναλύεται παρακάτω:

- **Στρατηγικός σχεδιασμός δικτύου:** Περιλαμβάνει τις αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν κατά την εγκατάσταση του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, κατά το στάδιο αυτό λαμβάνονται αποφάσεις ως προς τον αριθμό των απαιτούμενων σταθμών, τη χωρητικότητα σε οχήματα, τις θέσεις που θα εγκατασταθούν καθώς και το συνολικό αριθμό των οχημάτων που θα χρησιμοποιηθούν και την κατανομή αυτών στους σταθμούς.
- **Πολιτικές Παροχής Κινήτρων:** Εδώ περιλαμβάνονται οι αποφάσεις σχετικά με την πολιτική χρέωσης που θα υιοθετηθεί καθώς και τα κίνητρα που θα προσφερθούν στους χρήστες ώστε να αποφασίσουν να λειτουργήσουν προς όφελος του συστήματος. Τα κίνητρα δηλαδή, χρηματικά ή μη, που θα δοθούν ώστε να δεχθεί ένας χρήστης να αλλάξει κάποιες από τις προτιμήσεις του ταξιδιού του, όπως το σταθμό αφετηρίας ή/και το σταθμό τερματισμού ή/και το χρόνο αναχώρησης καθώς επίσης και το να δεχθεί να μοιραστεί ένα ταξίδι με ένα άλλο χρήστη με παρόμοιες προτιμήσεις ταξιδιού.
- **Διαχειριστικά Θέματα:** Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται σχεδιαστικά θέματα που αφορούν την ανακατανομή των οχημάτων από το ίδιο το σύστημα. Παρά το σωστό σχεδιασμό του συστήματος βάσει των αναγκών και παρόλα τα κίνητρα που δίνονται στους χρήστες η δυνατότητα κάλυψης της ζήτησης είναι πολλές φορές αδύνατη χωρίς τη παρεμβολή του συστήματος. Στις περιπτώσεις αυτές θα πρέπει να μετακινηθούν οχήματα από σταθμούς με πλεόνασμα σε αυτούς με έλλειψη. Η διαδικασία αυτή δεν είναι τετριμμένη και εγείρει ζητήματα ως προς την επιλογή των σταθμών από τους οποίους θα αφαιρεθούν ποδήλατα και του αριθμού των ποδηλάτων που θα μετακινηθούν από κάθε σταθμό. Επίσης πρέπει να αποφασιστεί ο αριθμός των φορτηγών οχημάτων του συστήματος που επιτελούν την ανακατανομή των οχημάτων καθώς και η διαδρομή που αυτά θα

ακολουθήσουν έτσι ώστε να μειωθεί η διανυόμενη απόσταση και άρα το κόστος και ο χρόνος που απαιτείται για τη διαδικασία αυτή.



Σχήμα 2.1: Βασικά προβλήματα των συστημάτων διαμοιρασμού οχημάτων

2.1 Στρατηγικός Σχεδιασμός Συστημάτων

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που ανακύπτουν κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος διαμοιρασμού οχημάτων έχουν προταθεί ποικίλες προσεγγίσεις και τρόποι λύσης αυτών. Έχουν αναπτυχθεί λύσεις που μοντελοποιούν και επιλύουν το πρόβλημα ως γραμμικό πρόβλημα, ευρετικές (heuristic) μέθοδοι, προσεγγίσεις με χρήση τεχνικών εξόρυξης δεδομένων (data mining) καθώς και τεχνικές που βασίζονται σε συστήματα που κάνουν χρήση γεωγραφικών δεδομένων (GIS).

Η πρώτη δουλειά που ασχολήθηκε με το πρόβλημα του στρατηγικού σχεδιασμού ενός συστήματος διαμοιρασμού ποδηλάτων είναι αυτή που περιγράφεται στο [6]. Δεδομένου ενός συνόλου από τοποθεσίες αφετηρίας και προορισμού, ενός συνόλου από υποψήφιες θέσεις στις οποίες μπορούν να τοποθετηθούν οι σταθμοί ποδηλάτων και δεδομένης της ζήτησης για ζευγάρια σταθμών αφετηρίας τερματισμού αναζητείται η λύση που θα περιλαμβάνει τις θέσεις των σταθμών, τους ποδηλατόδρομους που θα πρέπει να δημιουργηθούν και τα μονοπάτια/διαδρομές που θα πρέπει να ακολουθήσουν οι χρήστες για να ταξιδέψουν από σταθμό σε σταθμό με το χαμηλότερο δυνατό κόστος. Το κόστος λογίζεται τόσο ως το κόστος που θα χρειαστεί να επενδυθεί ώστε να δημιουργηθούν οι απαραίτητες εγκαταστάσεις, όσο και το κόστος των

χρηστών. Ποιο συγκεκριμένα το κόστος επένδυσης αποτελείται από το κόστος εγκατάστασης των σταθμών, το κόστος δημιουργίας των ποδηλατόδρομων, το κόστος της αγοράς του απαραίτητου αριθμού ποδηλάτων για τη λειτουργία του συστήματος καθώς και του κόστους της αγοράς επιπλέον ποδηλάτων για την κάλυψη της ζήτησης σε ώρες αιχμής. Το επίπεδο της ποιότητας παροχής υπηρεσιών στους χρήστες αξιολογείται βάσει του βαθμού κάλυψης της ζήτησης, καθορίζοντας κάποιο κόστος ποινή για τις περιπτώσεις που δεν καλύπτεται η ζήτηση καθώς και του κόστους ταξιδιού. Το πρόβλημα μοντελοποιήθηκε ως ένα μη γραμμικό ακέραιο πρόβλημα.

Μοντελοποίηση ως μικτό ακέραιο γραμμικό πρόβλημα υιοθετείται στο **Error! Reference source not found.** για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης της θέσης στην οποία πρέπει να τοποθετηθούν οι σταθμοί ποδηλάτων καθώς και της εύρεσης του κατάλληλου μεγέθους του στόλου των ποδηλάτων. Στην εργασία αυτή λαμβάνονται επίσης υπόψη οι μετακινήσεις ποδηλάτων που γίνονται από το ίδιο το σύστημα μεταξύ των σταθμών. Το κόστος της μετακίνησης λογίζεται ως ένας επιπλέον παράγοντας κόστους του συστήματος, το οποίο όμως δεν περιλαμβάνεται ως μεταβλητή απόφασης στη μοντελοποίηση του ακέραιου γραμμικού προβλήματος. Στη συνέχεια προτείνεται ένα αλγοριθμικό μοντέλο το οποίο υπολογίζει τις μέρες της λειτουργίας του συστήματος, διατηρώντας τη διάσταση των δεδομένων από προηγούμενες επαναλήψεις του γραμμικού προγράμματος και ενημερώνει το σχεδιασμό του συστήματος έως ότου η διαμόρφωση του συστήματος προσεγγίσει ένα ισοζύγιο κέρδους, παράγοντας έτσι μια σταθερή και βέλτιστη διαμόρφωση.

Η εύρεση των βέλτιστων τοποθεσιών για την εγκατάσταση σταθμών έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί το κέρδος συστημάτων διαμοιρασμού αυτοκινήτων μιας διαδρομής μελετάται στο [8]. Το κέρδος του συστήματος προέρχεται από την ενοικίαση των οχημάτων έναντι κάποιου χρηματικού ποσού ενώ στο κόστος του συστήματος συμπεριλαμβάνονται το κόστος συντήρησης των σταθμών και των οχημάτων, το κόστος επισκευής των οχημάτων καθώς και το κόστος μετακίνησης των οχημάτων. Στο σύστημα που μελετάται, ανακατανομές των οχημάτων από το ίδιο το σύστημα, γίνονται μόνο κατά το τέλος της ημέρας, σε αντίθεση με άλλες δουλειές, όπως [9], [10], όπου έμφαση δινόταν στη βελτιστοποίηση αυτών των διαδικασιών. Υλοποιήθηκαν τρία μεικτά γραμμικά προβλήματα (MIP) τα οποία καθορίζουν το βέλτιστο αριθμό σταθμών, τη βέλτιστη θέση αυτών και των βέλτιστη χωρητικότητα αυτοκινήτων που πρέπει να έχουν. Κάθε ένα από τα γραμμικά προβλήματα αντιστοιχεί σε διαφορετικές πολιτικές επιλογής ταξιδιών. Σύμφωνα με την πρώτη πολιτική, ο διαχειριστής του συστήματος είναι ελεύθερος να επιλέξει ή να απορρίψει αιτήσεις για ενοικιάσεις αυτοκινήτων βάσει της μεγιστοποίησης του κέρδους του. Στη δεύτερη πολιτική όλα τα αιτούμενα ταξίδια γίνονται αποδεκτά, ενώ στην τρίτη πολιτική απορρίπτονται αυτά για τα οποία δεν υπάρχει όχημα διαθέσιμο στο σταθμό αφετηρίας. Οι τρεις πολιτικές αυτές μελετήθηκαν και αξιολογήθηκαν στην πόλη της Λισαβόνας, στην Πορτογαλία.

Ένα γενικό μοντέλο για την υποστήριξη λήψης αποφάσεων στρατηγικού σχεδιασμού (αριθμό και τοποθεσία των απαιτούμενων σταθμών) αλλά και αποφάσεων που αφορούν το βέλτιστο αριθμό οχημάτων σε συστήματα διαμοιρασμού αυτοκινήτων απλής διαδρομής, λαμβάνοντας υπόψη μετακινήσεις οχημάτων από το ίδιο το σύστημα, παρουσιάζεται στο [11]. Το πρόβλημα μοντελοποιήθηκε ως ένα ακέραιο γραμμικό πρόγραμμα, του οποίου η αντικειμενική συνάρτηση στοχεύει στη μεγιστοποίηση του συνολικού κέρδους του συστήματος. Το συνολικό κέρδος προέρχεται από τη χρέωση για την ενοικίαση των οχημάτων αφαιρώντας το κόστος του συστήματος (κόστος από χρήστες που δε μπορούν να εξυπηρετηθούν, κόστος λειτουργίας των οχημάτων, κόστος εγκατάστασης σταθμών και κόστος μετακίνησης από το σύστημα οχημάτων) και το κόστος των χρηστών. Το κόστος των χρηστών θεωρείται ανάλογο του χρόνου που ξοδεύουν για να προσεγγίσουν ένα σταθμό από το αρχικό σημείο στο οποίο βρίσκονται

και του χρόνου που χρειάζεται να ξοδέψουν για να φτάσουν από το σταθμό προορισμού στην τερματική επιθυμητή τοποθεσία.

Λόγω της πολυπλοκότητας των συστημάτων διαμοιρασμού ποδηλάτων η εύρεση ακριβούς λύσης στα προβλήματα που καλείται να λύσει ένας διαχειριστής είναι δύσκολη. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί προσεγγιστικές μέθοδοι αντιμετώπισης τους. Στο [12] προσεγγίστηκε το πρόβλημα σχεδιασμού των συστημάτων ως ένα πρόβλημα εύρεσης τοποθεσιών κεντρικών σταθμών (hub location inventory problem) [13], το οποίο λαμβάνει υπόψη το επίπεδο κάλυψης προτείνοντας έναν άπληστο αλγόριθμο για την αποδοτική επίλυσή του. Ο αλγόριθμος επεξεργάζεται διαδοχικά την τοποθέτηση σταθμών ποδηλάτου δεδομένου ενός συνόλου ποδηλατόδρομων και την εγκατάσταση ποδηλατόδρομων δεδομένου ενός συνόλου σταθμών ποδηλάτου. Πιο συγκεκριμένα όλοι οι σταθμοί ποδηλάτων και όλοι οι ποδηλατόδρομοι στην αρχή θεωρούνται ως ανοιχτοί, δηλαδή επιλεγμένοι προς εγκατάσταση στο σύστημα. Στη συνέχεια ο αλγόριθμος σε κάθε επανάληψή του αφαιρεί τον τρέχοντα ανοιχτό σταθμό, ο οποίος αν κλείσει θα έχει ως αποτέλεσμα τη μέγιστη μείωση του συνολικού κόστους. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται έως ότου καμία νέα μείωση του συνολικού κόστους να είναι εφικτή. Όμοια οι ποδηλατόδρομοι αφαιρούνται έως ότου η αφαίρεση ενός νέου ποδηλατόδρομου να μην οδηγεί σε μείωση του συνολικού κόστους. Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του αλγορίθμου παρουσιάζουν μία απόκλιση από τη βέλτιστη λύση της τάξης του 2%.

Η εύρεση των βέλτιστων τοποθεσιών για την εγκατάσταση των σταθμών συστήματος διαμοιρασμού αυτοκινήτων έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η συνολική απόδοση του συστήματος μελετήθηκε στο [14]. Ως απόδοση του συστήματος λογίζεται ο μέσος αριθμός των χρηστών που εξυπηρετούνται ανά ημέρα. Στο σύστημα που μελετάται επιτρέπονται μόνο ταξίδια στα οποία ο σταθμός αφετηρία συμπίπτει με το σταθμό τερματισμού, δηλαδή ο χρήστης πρέπει να επιστρέψει το όχημα από εκεί που το πήρε. Πρώτα υλοποιήθηκε ένα μοντέλο γραμμικής οπισθοδρόμησης (linear regression model) έτσι ώστε να μπορέσουν να προσδιοριστούν οι παράγοντες κλειδιά της ζήτησης οι οποίοι επηρεάζουν την απόδοση των σταθμών. Για την εξαγωγή συμπερασμάτων χρησιμοποιήθηκαν παρελθοντικά δεδομένα από το σύστημα Auto Bleue που λειτουργεί στην Νίκαια της Γαλλίας. Έπειτα υλοποιήθηκε ένα μικτό ακέραιο τετραγωνικό πρόγραμμα (MIQP). Ο στόχος του μαθηματικού μοντέλου είναι η μεγιστοποίηση του συνόλου της απόδοσης των επιλεγμένων σταθμών (επιλέγεται ένας μόνο αριθμός n από το συνολικό πλήθος k των υποψήφιων σταθμών, όπου οι υποψήφιοι σταθμοί τοποθετούνται στο κέντρο προκαθορισμένων περιοχών της πόλης). Η απόφαση που πρέπει να ληφθεί από το μοντέλο έχει να κάνει με το αν θα τοποθετηθούν περισσότεροι σταθμοί σε περιοχές που παρουσιάζουν μεγάλη ζήτηση ή αν θα τοποθετηθούν σταθμοί σε περιοχές με μικρότερη ζήτηση οι οποίες όμως δεν καλύπτονται από άλλους σταθμούς. Παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη πολλών σταθμών σε περιοχές που παρουσιάζουν μεγάλη ζήτηση δεν έχει ως αποτέλεσμα ανάλογη αύξηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος, αφού τείνουν να λειτουργούν εις βάρος των υπολοίπων σταθμών. Έπειτα υλοποιήθηκε ένας ευρετικός αλγόριθμος για την επίλυση του προβλήματος. Ο αλγόριθμος εκτιμάει πρώτα τους πιο αποδοτικούς σταθμούς, βασιζόμενος σε όλες τις παραμέτρους εκτός από την απόσταση και τη χρήση μέσων μαζικής μεταφοράς. Στην πρώτη εκτέλεση του αλγορίθμου και οι k σταθμοί λογίζονται ως σταθμοί που πρέπει να ανοιχθούν. Στο σημείο αυτό υπολογίζεται η συμβολή των δημόσιων συγκοινωνιών και της απόστασης στην απόδοση του συστήματος. Στην επόμενη επανάληψη του αλγορίθμου επιλέγονται οι n καλύτερες τοποθεσίες για την εγκατάσταση των σταθμών. Στο σημείο αυτό υπολογίζεται και πάλι η συμβολή των δημόσιων συγκοινωνιών και της απόστασης με το δεδομένο ότι μόνο αυτοί οι n σταθμοί θα είναι ανοιχτοί. Έπειτα από τις αλλαγές στην αντικειμενική συνάρτηση που έγιναν

στην επανάληψη αυτή του αλγορίθμου, επιλέγονται και πάλι n τοποθεσίες για την εγκατάσταση των σταθμών. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου το σύνολο των n επιλεγμένων σταθμών παραμείνει αμετάβλητο μεταξύ των διαδοχικών επαναλήψεων του αλγορίθμου.

Στο [15] μελετάται το πρόβλημα του προσδιορισμού του μεγέθους του στόλου που απαιτείται και της κατανομής αυτού στους σταθμούς σε ένα σύστημα διαμοιρασμού αυτοκινήτων. Στο σύστημα αυτό επιτρέπονται ενοικιάσεις αυτοκινήτων απλής διαδρομής μεταξύ των σταθμών του συστήματος. Ο προσδιορισμός του αριθμού των σταθμών, των θέσεων που αυτοί θα εγκατασταθούν και της χωρητικότητά τους δεν αποτελούν αντικείμενο έρευνας της συγκεκριμένης δουλειάς. Ο χειρισμός του προβλήματος της μη αποδοτικής κατανομής που δημιουργείται στα συστήματα που επιτρέπουν ταξίδια απλής διαδρομής απαιτεί την ύπαρξη ενός διαχειριστή του συστήματος. Η δουλειά του διαχειριστή είναι να προτείνει στους χρήστες που είναι πρόθυμοι να αλλάξουν το σταθμό προορισμού τους, να κατευθυνθούν σε κάποιον άλλο σταθμό, έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή κατανομή οχημάτων στους σταθμούς. Το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης του κόστους επιλύεται αναπτύσσοντας προσέγγιση προσομοιωμένης ανόπτησης (simulated annealing), όπου η συνάρτηση κόστους λαμβάνει υπόψη τη διαχείριση του συστήματος μετακίνησης και το κόστος των χρηστών, το κόστος δηλαδή των οχημάτων και το συνολικό χρόνο αναμονής των χρηστών αντίστοιχα.

Μια διαφορετική προσέγγιση στο πρόβλημα της εύρεσης των καταλληλότερων σημείων για την εγκατάσταση των σταθμών γίνεται στην εργασία [16]. Παρουσιάζεται ένα μοντέλο βασισμένο σε Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (GIS), όπου ο χώρος στον οποίο θα εγκατασταθούν οι σταθμοί έχει διαιρεθεί σε ένα πλέγμα. Οι περιοχές του πλέγματος που παρουσιάζουν μεγάλη προτεραιότητα είναι αυτές οι οποίες είναι πιο κατάλληλες για την εγκατάσταση των σταθμών. Είναι οι περιοχές στις οποίες αν εγκατασταθούν σταθμοί θα αποφέρουν τα μέγιστα οφέλη τόσο για τους τρέχοντες όσο και για τους μελλοντικούς πιθανούς χρήστες του συστήματος. Το σύστημα αυτό μελετήθηκε για την πόλη του Μόντρεαλ στον Καναδά.

Στη εργασία [17] προτείνεται μία μέθοδος βασισμένη επίσης σε Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών έτσι ώστε να υπολογιστεί η χωρική κατανομή της πιθανής ζήτησης για ταξίδια, να προσδιοριστούν οι θέσεις των σταθμών, να καθοριστεί η χωρητικότητα του κάθε σταθμού και να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά της ζήτησης σε κάθε σταθμό. Η προσέγγιση του προβλήματος αυτή έγινε σε τέσσερα στάδια. Στο πρώτο στάδιο υπολογίζεται η κατανομή της εκτιμώμενης ζήτησης των χρηστών, η οποία εξάγεται βάσει του πληθυσμού της περιοχής και του πλήθους των εργαζομένων που εργάζονται σε κάθε κτίριο της περιοχής. Έπειτα εφαρμόζονται μοντέλα τοποθέτησης-επανατοποθέτησης (π-μέσος και μέγιστης κάλυψης) καθορίζοντας έτσι τους σταθμούς των οποίων η εγκατάσταση κρίνεται απαραίτητη, τις υποψήφιες τοποθεσίες και τον συνολικό αριθμό των σταθμών που πρέπει να εγκατασταθούν. Έχοντας καθορίσει τις τοποθεσίες των σταθμών και την εκτιμώμενη ζήτηση για κάθε σταθμό υπολογίζεται η χωρητικότητα του κάθε σταθμού. Στο τέταρτο και τελευταίο στάδιο προσδιορίζεται η προσβασιμότητα του κάθε σταθμού. Η μετρική αυτή αποτελεί ένα μέτρο της χρησιμότητας του σταθμού, του συνδυασμού δηλαδή της ζήτησης που παρουσιάζει ο σταθμός και της απόστασης από τους πιθανούς σταθμούς αφετηρίας/τερματισμού των χρηστών. Με τον τρόπο αυτό δίνεται η δυνατότητα να κατηγοριοποιηθούν οι σταθμοί βάσει της προτεραιότητας που παρουσιάζουν, βοηθώντας έτσι στην απομάκρυνση αυτών με μικρή προσβασιμότητα.

Μια διαφορετική προσέγγιση στο πρόβλημα του στρατηγικού σχεδιασμού με χρήση του τεχνικών εξόρυξης δεδομένων παρουσιάζεται στο [6]. Στην εργασία αυτή γίνεται χρήση τεχνικών εξόρυξης δεδομένων αλλά και τεχνολογιών γεωγραφικών δεδομένων έτσι

ώστε να αποκτηθεί κατάλληλη γνώση για τη λειτουργία των σταθμών ποδηλάτων η οποία και θα μπορεί να υιοθετηθεί στο σχεδιασμό των συστημάτων διαμοιρασμού ποδηλάτων. Δεδομένα που συλλέγονται σχετικά με την λειτουργία των σταθμών οδηγούν στην ομαδοποίηση των σταθμών σε συστάδες (clusters) βάσει προτύπων που ακολουθούν οι διαδικασίες ενοικίασης και επιστροφής ποδηλάτων από/σε αυτούς. Η συγκεκριμένη ανάλυση φανερώνει χωροχρονικές εξαρτήσεις των διαδικασιών ενοικίασης και επιστροφής ποδηλάτων στους σταθμούς, οδηγώντας έτσι στην υπόθεση ότι τα πρότυπα χρήσης των σταθμών και οι τύποι των χρηστών που χρησιμοποιούν συγκεκριμένους σταθμούς βασίζονται στη θέση των σταθμών. Αν η υπόθεση αυτή αποδειχθεί τότε τα πρότυπα χρήσης των ήδη ενεργών σταθμών μπορούν να εφαρμοστούν και σε καινούργιους σταθμούς βάσει της θέσης αυτών, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα υποστήριξης στρατηγικών αποφάσεων σχετικά με τα συστήματα διαμοιρασμού ποδηλάτων.

2.2 Παροχή Κινήτρων Για Μετακίνηση Οχημάτων

Στο [18] ένα σύστημα διαμοιρασμού ποδηλάτων μοντελοποιείται ως ένα στοχαστικό δίκτυο και η απόδοσή του στη σταθερή κατάσταση αναλύεται χρησιμοποιώντας θεωρία μέσου πεδίου (mean field theory). Συγκεκριμένα στη μοντελοποίηση αυτή ορίζονται N σταθμοί ποδηλάτων καθένας εκ των οποίων μπορεί να φιλοξενήσει ως K το πολύ ποδήλατα. Αρχικά κάθε σταθμός έχει s ποδήλατα, με συνέπεια να υπάρχουν συνολικά στο σύστημα sN ποδήλατα. Επίσης ο ρυθμός αφίξεων χρηστών σε κάθε σταθμό ορίζεται ίσος με λ (συμμετρική περίπτωση) και ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση ενός ταξιδιού μεταξύ δύο οποιονδήποτε σταθμών ακολουθεί εκθετική κατανομή με παράμετρο μ . Το ποσοστό των προβληματικών σταθμών (άδειοι και πλήρως γεμάτοι σταθμοί) καθορίζεται κατά το σταθερό στάδιο του συστήματος. Συγκεκριμένα αποδεικνύεται ότι το ποσοστό των προβληματικών σταθμών στο προαναφερθέν στάδιο ελαχιστοποιείται όταν ο αρχικός αριθμός ποδηλάτων σε κάθε σταθμό είναι $s = K/2 + \lambda/\mu$ και λαμβάνει την ελάχιστη τιμή $2/(K+1)$. Το αποτέλεσμα αυτό δεν είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικό αφού προκειμένου να επιτευχθεί χαμηλό ποσοστό προβληματικών σταθμών απαιτείται μεγάλη χωρητικότητα των σταθμών, γεγονός που δεν είναι πάντοτε εφικτό, λόγω περιορισμών χώρου για την κατασκευή των σταθμών καθώς επίσης και περιορισμών κόστους. Το ποσοστό αυτό δεν βελτιώνεται ούτε και στην περίπτωση που οι χρήστες έχουν γνώση των προβληματικών σταθμών και χρησιμοποιούν άλλους σταθμούς για να εξυπηρετηθούν. Η απόδοση του συστήματος βελτιώνεται σε μεγάλο βαθμό, όταν υιοθετούνται πολιτικές παροχής κινήτρων στους χρήστες. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η περίπτωση όπου αρχικά οι χρήστες επιλέγουν τυχαία το σταθμό στον οποίο θα αφήσουν το ποδήλατο και τελικά τους προσφέρονται κίνητρα ώστε να επιλέξουν το σταθμό με τα λιγότερα ποδήλατα. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης της περίπτωσης αυτής έδειξαν σημαντική βελτίωση της απόδοσης του συστήματος, μείωση δηλαδή των προβληματικών σταθμών. Βελτίωση παρατηρείται ακόμα και όταν μόνο ένα ποσοστό χρηστών αποδέχεται να αλλάξει το σταθμό τερματισμού και να επιλέξει αυτόν που του προτείνεται από το σύστημα. Τέλος μελετήθηκε και η περίπτωση που ο αριθμός αφίξεων χρηστών στους σταθμούς δεν είναι ίδιος. Στην περίπτωση αυτοί οι σταθμοί ομαδοποιήθηκαν σε δύο συστάδες όπου η μεν πρώτη είχε χαμηλότερο ρυθμό αφίξεων από τη δεύτερη. Η απόδοση του συστήματος στην περίπτωση αυτή είναι πολύ χειρότερη σε σχέση με τη συμμετρική περίπτωση όταν το σύστημα λειτουργεί χωρίς παροχή κινήτρων. Βέβαια ακόμα και η εφαρμογή της παροχής κινήτρων δεν βελτιώνει αισθητά την απόδοση, κάνοντας αναπόφευκτη τη χρήση κάποιου οχήματος για την ανακατανομή από το σύστημα των ποδηλάτων.

Στο σύστημα διαμοιρασμού ποδηλάτων που μελετάται στο **Error! Reference source not found.** παρέχονται κίνητρα στους χρήστες για να παραδώσουν το ποδήλατο που

ενοικίασαν σε διαφορετικό σταθμό από αυτόν που επιθυμούν οι ίδιοι. Τα κίνητρα προσφέρονται στους χρήστες βάσει πολιτικών χρέωσης που καθορίζονται με βάση την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος. Επίσης πέρα από τα παρεχόμενα κίνητρα το σύστημα επιτελεί περιοδικά και ανακατανομές ποδηλάτων με χρήση ενός αριθμού φορητών οχημάτων. Αρχικά χρησιμοποιούνται παρελθοντικά δεδομένα του συστήματος για την κατασκευή των στατιστικών στοιχείων της ζήτησης των χρηστών για ποδήλατα. Κατασκευάζεται δηλαδή ο ρυθμός αφίξεων των χρηστών σε κάθε σταθμό και για κάθε ώρα και μέρα της εβδομάδας. Έπειτα καθορίζονται οι διαδρομές των φορητών οχημάτων που θα χρησιμοποιηθούν για την ανακατανομή των ποδηλάτων. Η μοντελοποίηση του προβλήματος έγινε με τη θεώρηση αιτιοκρατικών (deterministic) ροών στο δίκτυο. Ορίστηκε επίσης μία συνάρτηση χρησιμότητας (utility function) για κάθε σταθμό, η οποία καθορίζει το όφελος που θα επιφέρει στο σύστημα μια αναχώρηση ή άφιξη ποδηλάτου σε ένα σταθμό μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Το όφελος που υπολογίζει η συνάρτηση αυτή εξάγεται συναρτήσει του αριθμού των χρηστών που αναμένεται να εξυπηρετηθούν στο εγγύς μέλλον. Έπειτα μελετάται το σύστημα για την περίπτωση που μόνο ένα φορητό όχημα λαμβάνει μέρος στην ανακατανομή των ποδηλάτων. Το όχημα αυτό κατά τη διαδικασία αυτή μπορεί να επισκεφθεί μόνο ένα συγκεκριμένο μικρό αριθμό σταθμών. Η εύρεση των σταθμών που θα επισκεφθεί το όχημα γίνεται με τη χρήση μιας άπληστης μεθόδου όπου με αφετηρία πάντα ένα συγκεκριμένο σημείο (καλείται ως σταθμός διατήρησης) χτίζεται ένα δέντρο με κορυφές τους προς επίσκεψη σταθμούς. Ένας αριθμός σταθμών προστίθεται κάθε φορά έτσι ώστε η αύξηση της συνάρτησης χρησιμότητας σε σχέση με το προστιθέμενο κόστος που επιφέρει η προσθήκη των σταθμών να είναι σχετικά υψηλή. Έχοντας κατασκευάσει το δέντρο επιλύεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης για κάθε διαδρομή που εκκινεί από το σταθμό που βρίσκεται στην κορυφή του δέντρου και καταλήγει στους σταθμούς που βρίσκονται στα φύλλα αυτού. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης (quadratic problem) συμβάλλει στο να γίνει πιο αποδοτική η διαδικασία φόρτωσης/εκφόρτωσης των ποδηλάτων από το φορητό που συμμετέχει. Στη συνέχεια έχοντας λύσει το πρόβλημα για ένα μόνο φορητό, το πρόβλημα γενικεύεται για την περίπτωση πολλών οχημάτων που συμμετέχουν στη διαδικασία ανακατανομής. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού ακολουθήθηκε μια μέθοδος που επεξεργαζόταν σειριακά τα οχήματα, όπως ακριβώς για την περίπτωση ενός μόνο οχήματος. Τέλος μελετάται το πρόβλημα του προσδιορισμού μιας πολιτικής χρέωσης η οποία να έχει το χαμηλότερο χρηματικό κόστος και παράλληλα να διατηρεί σε ικανοποιητικό επίπεδο την κατανομή των ποδηλάτων στους σταθμούς. Βασική υπόθεση στο σημείο αυτό είναι ότι οι χρήστες λογίζονται ως ορθολογικά σκεπτόμενοι (rational thinkers), με την έννοια ότι σταθμίζουν την προτεινόμενη χρηματική αποζημίωση έτσι ώστε να επιλέξουν κάποιον άλλο σταθμό για να αφήσουν το ποδήλατο με το κόστος του να διανύσουν την παραπάνω απόσταση που απαιτείται μέχρι τον εναλλακτικό αυτό σταθμό. Η εύρεση της βέλτιστης πολιτικής χρέωσης μοντελοποιείται ως ένα πρόβλημα προγνωστικού ελέγχου (Model Predictive Control). Πιο συγκεκριμένα, για ένα χρονικό ορίζοντα καθορίζονται οι καλύτερες πολιτικές χρέωσης στις διάφορες χρονικές στιγμές του διαστήματος αυτού. Έπειτα υιοθετούνται οι πολιτικές που αφορούν την τρέχουσα χρονική στιγμή. Για το επόμενο χρονικό βήμα επιλύεται και πάλι το πρόβλημα δεδομένου ότι στο ενδιάμεσο μπορεί να έχει αλλάξει η κατάσταση του συστήματος.

Το πρόβλημα της ανακατανομής των οχημάτων με τη συμβολή των χρηστών σε σύστημα διαμοιρασμού αυτοκινήτων μελετάται στο **Error! Reference source not found.** Ποιο συγκεκριμένα μελετάται και αξιολογείται το πως επηρεάζεται η απόδοση του συστήματος με την εφαρμογή χρηματικών κινήτρων. Τα χρηματικά αυτά κίνητρα στοχεύουν στο να μεταβάλλουν την συμπεριφορά των χρηστών και να τους ευθυγραμμίσουν κατά το δυνατόν με τις τρέχουσες ανάγκες του δικτύου. Η λύση που προτείνεται βασίζεται σε ένα μοντέλο ενός συστήματος διαμοιρασμού ηλεκτρικών

οχημάτων το οποίο αναπτύχθηκε σε ένα πλαίσιο Χρονικού Δικτύου Petri (Timed Petri Net). Στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι τα TPNs χρησιμοποιούν γραφική και μαθηματική περιγραφή για την αναπαράσταση τόσο των στατικών όσο και των δυναμικών στοιχείων του συστήματος που μοντελοποιούν. Η γραφική αναπαράσταση δίνει τη δυνατότητα του σχεδιασμού και της αξιολόγησης του συστήματος, ενώ η μαθηματική περιγραφή συντελεί στη δυνατότητα προσομοίωσης του συστήματος σε περιβάλλον λογισμικού, παρέχοντας τη δυνατότητα αλλαγής και εφαρμογής διαφόρων συνθηκών και παραμέτρων. Οι στρατηγικές ανακατανομής οχημάτων που προτάθηκαν και αξιολογήθηκαν στην εργασία αυτή εφαρμόστηκαν σε πραγματικό περιβάλλον και συγκεκριμένα σε ένα σύστημα διαμοιρασμού ηλεκτρικών οχημάτων στο Πορντενόνε της Ιταλίας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι όταν το σύστημα αγνοεί τις τρέχουσες συνθήκες και απλώς προτείνει στους χρήστες να επιστρέψουν τα οχήματά τους το συντομότερο δυνατό δεν επιτυγχάνεται η επιθυμητή κατανομή οχημάτων στους σταθμούς. Όταν όμως παρέχονται στους χρήστες κίνητρα τα οποία βασίζονται στην παρατήρηση του συστήματος και των τρεχουσών συνθηκών που επικρατούν, παρατηρείται αύξηση του αριθμού των χρηστών που μπορούν να ικανοποιηθούν και άρα βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος.

Ένας μηχανισμός παροχής κινήτρων στους χρήστες έτσι ώστε να αλλάξουν κάποιες από τις προτιμήσεις του ταξιδιού τους με αντάλλαγμα οικονομικά οφέλη παρουσιάζεται στο [21]. Πιο συγκεκριμένα ένας μηχανισμός που βασίζεται σε πληθοπορισμό (crowdsourcing) προτείνει στους χρήστες να αλλάξουν είτε το σταθμό αφετηρίας είτε το σταθμό τερματισμού και να επιλέξουν κάποιον που είναι πιο επωφελής για το σύστημα. Μια εφαρμογή για κινητές συσκευές χειρίζεται τα αιτήματα των χρηστών για ενοικίαση οχήματος. Η εφαρμογή αυτή προωθεί τα αιτήματα στο βασικό στοιχείο του συστήματος το Incentives Deployment Scheme (IDS). Το IDS επικοινωνεί με το σύστημα διαμοιρασμού οχημάτων έτσι ώστε να λάβει και να αξιολογήσει την τωρινή και μελλοντική/εκτιμώμενη κατάσταση του συστήματος και να αποφασίζει αν πρέπει να προσφέρει κίνητρα στους χρήστες ώστε να αλλάξουν κάποιες από τις προτιμήσεις τους. Το σύστημα υπόκειται σε περιορισμούς ως προς το συνολικό ποσό που μπορεί να διαθέσει για την αποζημίωση των χρηστών όταν εκείνοι αποδέχονται τα προσφερόμενα κίνητρα. Έτσι για να μεγιστοποιηθεί η αποτελεσματικότητα του συστήματος σχεδιάστηκε ένας δυναμικός μηχανισμός χρέωσης χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση ελαχιστοποίησης μετάνοιας (regret minimization) για μάθηση κατά τη λειτουργία του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό το σύστημα μπορεί να μαθαίνει ποια είναι κάθε φορά η πιο αποδοτική πολιτική χρέωσης που πρέπει να εφαρμόσει. Οι χρήστες θεωρούνται ως στρατηγικοί παίχτες που μπορεί να δηλώσουν λανθασμένα/ψευδή στοιχεία στο σύστημα, όπως για παράδειγμα ψεύτικη αρχική θέση, έτσι ώστε να μεγιστοποιήσουν το προσωπικό τους κέρδος, την αποζημίωση δηλαδή που θα λάβουν από το σύστημα. Ο έλεγχος της απόδοσης του προτεινόμενου συστήματος έγινε με την υλοποίηση ενός προσομοιωτή και με τη χρήση παρελθοντικών στοιχείων καθώς και στοιχείων που ελήφθησαν απευθείας από τους χρήστες. Επιπλέον το σύστημα μελετήθηκε και σε πραγματικό περιβάλλον σε μια πόλη της Ευρώπης για περίοδο 30 ημερών σε συνεργασία με μια εταιρεία διαμοιρασμού ποδηλάτων.

Στο [22] παρουσιάζεται μια μοντελοποίηση συστήματος διαμοιρασμού οχημάτων ως ένα κλειστό δίκτυο ουρών (closed queuing network). Στη θεώρηση αυτή τα οχήματα λογίζονται ως οι πελάτες του δικτύου και κάθε σταθμός οχημάτων λογίζεται ως εξυπηρετητής του συστήματος. Ο τρόπος εξυπηρέτησης γίνεται με τη σειρά προσέλευσης, FIFO. Ο χρόνος εξυπηρέτησης ισούται με το χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ δυο διαδοχικών αφίξεων στο σύστημα. Οι αφίξεις χρηστών στους σταθμούς μοντελοποιήθηκαν ως Poisson διαδικασίες. Επίσης θεωρείται ότι κάθε σταθμός συνδέεται με οποιονδήποτε άλλο σταθμό του συστήματος. Κάθε όχημα που συμμετέχει

σε ταξίδι ακολουθεί κάποια από τις διαδρομές προς ένα άλλο σταθμό βάσει μιας πιθανότητας. Εδώ να σημειωθεί ότι ο χρήστης πάντα βρίσκει θέση στάθμευσης στο σταθμό προορισμού. Για το σταθμό αφετηρίας, αν ο χρήστης δε βρει διαθέσιμο όχημα εγκαταλείπει το σύστημα. Ο χρόνος ταξιδιού μεταξύ δύο σταθμών i, j ακολουθεί εκθετική κατανομή με παράμετρο $1/\mu_{ij}$. Κάθε ζεύξη σταθμών του δικτύου (i, j) μοντελοποιείται ως ένας κόμβος με άπειρο αριθμό εξυπηρετητών και με ρυθμό εξυπηρέτησης ίσο με $n \cdot \mu_{ij}$ όπου n ο αριθμός των οχημάτων που ταξιδεύουν από το σταθμό i προς το σταθμό j . Ο στόχος της συγκεκριμένης μελέτης είναι να υπολογιστεί ο βέλτιστος αριθμός των οχημάτων που απαιτούνται έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί το συνολικό κέρδος. Για τον υπολογισμό του κέρδους αυτού, υπολογίζεται το κέρδος ανά μονάδα χρόνου που αποκτάται από την ενοικίαση ενός οχήματος. Επίσης συνυπολογίζεται και ένα κόστος συντήρησης των οχημάτων καθώς και ένα κόστος για τις περιπτώσεις που ένας χρήστης δε μπορεί να βρει όχημα στο σταθμό αφετηρίας. Αποδεικνύεται ότι η συνάρτηση κέρδους είναι μια κοίλη (concave) συνάρτηση της οποίας η μέγιστες τιμές (βέλτιστο κέρδος) εξάγουν δύο τουλάχιστον λύσεις. Για τον υπολογισμό των λύσεων αυτών χρησιμοποιείται ανάλυση μέσης τιμής (mean value analysis).

Η εφαρμογή ενός μοντέλου χρέωσης/κοστολόγησης σε σύστημα διαμοιρασμού οχημάτων προτείνεται και αναλύεται στο [23]. Το σύστημα μοντελοποιείται ως ένα κλειστό δίκτυο ουρών, όπου κάθε σταθμός μοντελοποιείται ως ένας εξυπηρετητής που εξυπηρετεί τους χρήστες με τη σειρά που αυτοί αφικνούνται στο σταθμό (FIFO). Ο χρόνος εξυπηρέτησης ισούται με το χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ της άφιξης δύο χρηστών στο σύστημα. Οι αφίξεις των χρηστών στους σταθμούς μοντελοποιήθηκαν ως Poisson διαδικασίες. Οι σταθμοί έχουν πεπερασμένη χωρητικότητα κάθε ένας από αυτούς συνδέεται με οποιονδήποτε άλλο σταθμό του συστήματος. Ο γράφος δηλαδή που έχει ως κόμβους τους σταθμούς του συστήματος είναι ένας πλήρης γράφος. Κάθε χρήστης που αφικνείται σε ένα σταθμό επιλέγει το σταθμό προορισμού βάσει μιας πιθανότητας. Επίσης γίνεται η παραδοχή ότι όταν ένας χρήστης ενοικιάζει ένα αυτοκίνητο από ένα σταθμό, τότε στο σταθμό προορισμού είναι βέβαιο ότι θα βρει ελεύθερη θέση στάθμευσης για να επιστρέψει το όχημα, θεωρώντας ότι έχει κάνει κάποια εκ των προτέρων κράτηση. Για την εφαρμογή και εύρεση του πιο αποδοτικού σχήματος χρέωσης, ο χρόνος λειτουργίας του συστήματος έχει χωριστεί σε χρονοθυρίδες των οποίων η διάρκεια ακολουθεί μια συγκεκριμένη κατανομή. Το σύστημα θεωρήθηκε ότι παρουσιάζει περιοδικότητα και οι χρεώσεις για την ενοικίαση των αυτοκινήτων για κάθε σύνδεση δύο σταθμών θα πρέπει να καθορίζονται μόνο για χρονοθυρίδες εντός καθορισμένου χρόνου λειτουργίας του συστήματος. Το πρόβλημα ανάγεται σε μια Μαρκοβιανή διαδικασία απόφαση, όπου πρέπει να καθοριστούν οι ενέργειες που θα εκτελεστούν σε κάθε στιγμή της λειτουργίας του συστήματος. Οι αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν αντιστοιχούν στην κοστολόγηση της χρήσης του "δρόμου/συνδέσμου" δύο σταθμών, η οποία κοστολόγηση έχει επίπτωση στη χρήση του συγκεκριμένου δρόμου από τους χρήστες του συστήματος. Η Μαρκοβιανή διαδικασία παρουσιάζει μια πληθώρα καταστάσεων με αποτέλεσμα τη δυσκολία επίλυσης εντός λογικού χρόνου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε μια προσεγγιστική μέθοδος, όπου η τυχαία/στοχαστική ζήτηση για κάθε σύνδεση σταθμών αντικαθίσταται από συνεχείς ροές με προκαθορισμένο ρυθμό. Έτσι το πρόβλημα ανάγεται σε ένα συνεχές γραμμικό πρόβλημα του οποίου η λύση μεγιστοποιεί το άθροισμα της ζήτησης κάθε συνδέσμου ενός σταθμού του δικτύου.

Στο [24] μελετάται το κατά πόσο η συμβολή των χρηστών στη διαδικασία ανακατανομής των οχημάτων μπορεί να οδηγήσει σε επιθυμητή κατάσταση ένα σύστημα διαμοιρασμού οχημάτων. Συγκεκριμένα δεν μελετώνται τα κίνητρα ή οι πολιτικές

χρέωσης που θα υιοθετηθούν ώστε να πείσουν τους χρήστες να αλλάξουν τις προτιμήσεις του ταξιδιού τους, αλλά ερευνάται η ικανότητα των χρηστών να ανακαταναείμουν το σύστημα χωρίς τη χρήση φορητών οχημάτων. Εισάγονται τέσσερις διαφορετικές στρατηγικές για την ανακατανομή των ποδηλάτων, όπου οι στρατηγικές αυτές διαφέρουν μεταξύ τους ως προς το βαθμό αλληλεπίδρασης του συστήματος με τους χρήστες και το βαθμό παρεμβολής στη λήψη αποφάσεων σχετικά με το ταξίδι που πρόκειται να υλοποιήσουν. Στην πρώτη στρατηγική το σύστημα δεν αλληλεπιδρά καθόλου με τους χρήστες, αφήνοντας τους ελεύθερους να επιλέξουν το σταθμό εκκίνησης και τερματισμού. Στην περίπτωση αυτή οι χρήστες προκειμένου να νοικιάσουν ένα ποδήλατο μεταβαίνουν στον κοντινότερο από αυτούς σταθμό. Αν ο σταθμός είναι άδειος μεταβαίνουν στον αμέσως κοντινότερο και αν και αυτός είναι άδειος εγκαταλείπουν το σύστημα. Αντίστοιχα κατά τον τερματισμό επισκέπτονται το σταθμό που είναι εγγύτερος στο σημείο που θέλουν να φτάσουν και αν δεν υπάρχει θέση στάθμευσης επισκέπτονται τον αμέσως επόμενο σταθμό μέχρι να βρουν κάποιο με ελεύθερη θέση στάθμευσης. Στη δεύτερη στρατηγική, με την ονομασία ελάχιστη παρεμβολή, έχοντας ορίσει τους γειτονικούς σταθμούς κάθε σταθμού, όταν ένας χρήστης δεν βρει ποδήλατο ή θέση στάθμευσης, το σύστημα τον ανακατευθύνει στο σταθμό με τα περισσότερα ποδήλατα ή με τις περισσότερες ελεύθερες θέσεις αντίστοιχα. Στην τρίτη στρατηγική οι χρήστες που θέλουν να συνεργαστούν με το σύστημα, αφού προσέλθουν στον κοντινότερο σταθμό, μέσω μιας διεπαφής που υπάρχει εγκατεστημένης σε κάθε σταθμό ενημερώνονται σε ποιο σταθμό να κατευθυνθούν ώστε να παραλάβουν ποδήλατο. Η τέταρτη στρατηγική διαφέρει από την προηγούμενη ως προς τον τρόπο επικοινωνίας των χρηστών με το σύστημα. Στην περίπτωση αυτή οι χρήστες ενημερώνονται μέσω μιας εφαρμογής για κινητές συσκευές σε ποιο σταθμό να κατευθυνθούν, χωρίς να χρειάζεται να μεταβούν πρώτα στον κοντινότερο σταθμό και έπειτα να μάθουν από που πρέπει να παραλάβουν το ποδήλατο. Η τελευταία αυτή στρατηγική μελετήθηκε επίσης και με μια τροποποίηση βάσει της οποίας το σύστημα οδηγεί το χρήστη στον κοντινότερο εναλλακτικό σταθμό αν το ποσοστό των ελεύθερων ποδηλάτων είναι κάτω του 50% και το ποσοστό των ελεύθερων θέσεων στάθμευσης άνω του 50% για τους σταθμούς αφετηρίας και τερματισμού αντίστοιχα. Σημαντικοί παράγοντες για τη μελέτη των στρατηγικών αυτών είναι η ακτίνα r στην οποία αναζητούνται γειτονικοί σταθμοί ενός σταθμού και το ποσοστό των χρηστών οι οποίοι είναι διατεθειμένοι να συνεργαστούν. Για τη μοντελοποίηση του τελευταίου ορίζεται η ποσότητα $c \in [0,1]$, που καλείται συνεργασία χρηστών και αντιστοιχεί στο ποσοστό των χρηστών που είναι διατεθειμένοι να συνεργαστούν, να τροποποιήσουν δηλαδή κάποιες από τις προτιμήσεις του ταξιδιού τους. Για την τρίτη στρατηγική η ποσότητα c αντιστοιχεί στην πιθανότητα κάποιος χρήστης να χρησιμοποιήσει τη διεπαφή που υπάρχει στους σταθμούς ακόμα και αν δεν αντιμετωπίζει κάποιο πρόβλημα ως προς τη διαθεσιμότητα ποδηλάτων. Για τις επόμενες στρατηγικές η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί στην πιθανότητα ένας χρήστης να κάνει χρήση της κινητής εφαρμογής. Για την αξιολόγηση των στρατηγικών ορίζεται η μετρική του επιπέδου υπηρεσιών (service level) που αντιστοιχεί στο ποσοστό των χρηστών που δεν αντιμετωπίζουν κάποιο πρόβλημα κατά την ενοικίαση ποδηλάτου. Είναι δηλαδή το ποσοστό των χρηστών που βρίσκουν να νοικιάσουν ποδήλατο στο σταθμό αφετηρίας και επίσης βρίσκουν ελεύθερη θέση στάθμευσης στο σταθμό προορισμού. Οι στρατηγικές αυτές αξιολογήθηκαν σε ένα περιβάλλον που προσομοιώνει το Barclays Cycle Hire στο Λονδίνο. Από τα αποτελέσματα εξάγεται το συμπέρασμα ότι το επίπεδο υπηρεσιών μπορεί να προσεγγίσει το 100% μόνο εάν ένα μεγάλο ποσοστό των χρηστών δεχθεί να συνεργαστεί. Εντούτοις ακόμα και αν μόλις το 25% των χρηστών συνεργαστεί με περιορισμένη χρήση φορητών οχημάτων που ανακαταנέμουν τα ποδήλατα, η ποιότητα υπηρεσιών μπορεί να ξεπεράσει το 90%. Τέλος αν ένα σύστημα μπορεί να προσφέρει τέτοια κίνητρα στους χρήστες ώστε το

ποσοστό αυτών που δέχονται να συνεργαστούν να φτάσει το 50% τότε η ποιότητα υπηρεσιών μπορεί να παραμείνει σε υψηλά επίπεδα.

2.3 Επιχειρησιακή Μετακίνηση Οχημάτων

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες ενότητες, ένας βασικός παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση των δικτύων διαμοιρασμού οχημάτων είναι η αδυναμία κάλυψης της ζήτησης κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους. Ο αριθμός των ποδηλάτων που μπορούν να βρεθούν σε κάθε σταθμό είναι συγκεκριμένος και περιορίζεται από τη μέγιστη χωρητικότητα του σταθμού. Ο αριθμός αυτός υπάρχει πιθανότητα να μην μπορεί να ικανοποιήσει την αυξημένη ζήτηση για ενοικίαση οχημάτων σε ώρες αυξημένης ζήτησης (ώρες αιχμής), με αποτέλεσμα ένα ποσοστό των χρηστών να μη μπορεί να ικανοποιηθεί από το σύστημα. Το φαινόμενο της έλλειψης οχημάτων είναι ακόμη πιο έντονο σε συστήματα που επιτρέπουν ταξίδια απλής διαδρομής, ταξίδια στα οποία ο σταθμός αφετηρίας και ο σταθμός τερματισμού διαφέρουν. Σε αυτά τα συστήματα λόγω της μη ομοιομορφίας που παρατηρείται στην κίνηση των χρηστών το σύστημα οδηγείται σε καταστάσεις όπου υπάρχει πληθώρα οχημάτων σε σταθμούς με χαμηλή ζήτηση και παράλληλα έλλειψη οχημάτων σε σταθμούς με υψηλή ζήτηση. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού πέρα από την υιοθέτηση κατάλληλων πολιτικών χρέωσης και παροχής κινήτρων στους χρήστες, όπως περιγράφηκε και στην προηγούμενη ενότητα είναι αναγκαία και η μετακίνηση οχημάτων μεταξύ των σταθμών από το ίδιο το σύστημα. Η διαδικασία της μετακίνησης οχημάτων από το σύστημα μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο βασικές κατηγορίες: στατική [25] ανακατανομή και δυναμική ανακατανομή [26]. Στην πρώτη περίπτωση η ανακατανομή των οχημάτων από σταθμούς με πλεόνασμα σε σταθμούς με έλλειψη γίνεται κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν και το σύστημα δε χρησιμοποιείται, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η ανακατανομή μπορεί να γίνει και κατά τη διάρκεια της ημέρας. Κατά την εκτέλεση των διαδικασιών αυτών δύο είναι οι βασικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη: ο αριθμός των οχημάτων που θα μεταφερθούν από σταθμό σε σταθμό καθώς και το κόστος της όλης διαδικασίας αυτής. Στις περισσότερες περιπτώσεις το κόστος της ανακατανομής κρίνεται υποδεέστερο της πιθανότητας αδυναμίας ικανοποίησης των χρηστών με αποτέλεσμα να μην λαμβάνεται υπόψη.

Στο [27] μελετάται το πρόβλημα της στατικής ανακατανομής σε συστήματα διαμοιρασμού ποδηλάτων. Το πρόβλημα μοντελοποιείται ως ένα πρόβλημα παραλαβής και παράδοσης με χρήση ενός οχήματος περιορισμένης χωρητικότητας (Single Vehicle Capacitated Pickup and Delivery Problem). Στη μοντελοποίηση αυτή ένα όχημα συγκεκριμένης χωρητικότητας εξομαλύνει την ανισομερή κατανομή ποδηλάτων στους σταθμούς με το να μεταφέρει ποδήλατα από τους σταθμούς με πλεόνασμα στους σταθμούς με έλλειψη. Όπως προαναφέρθηκε, υιοθετείται στατική διαδικασία ανακατανομής των ποδηλάτων. Επιτελείται δηλαδή η όλη διαδικασία κατά τη διάρκεια της νύχτας όταν και το σύστημα δεν χρησιμοποιείται από τους χρήστες. Σκοπός είναι να βρεθεί η διαδρομή ελάχιστου κόστους για το όχημα που εκτελεί την ανακατανομή των ποδηλάτων καθώς επίσης και ο αριθμός των ποδηλάτων που αφαιρούνται από τους σταθμούς με πλεόνασμα και ο αριθμός των ποδηλάτων που προστίθενται στους σταθμούς με έλλειψη. Για κάθε σταθμό υπάρχει ένα συγκεκριμένος αριθμός ποδηλάτων ο οποίος θεωρείται αναγκαίος για την ικανοποίηση της ζήτησης κάθε στιγμή. Με το πέρας της διαδικασίας, αφού το όχημα έχει ολοκληρώσει τη διαδρομή του, στόχος είναι κάθε σταθμός να έχει τον επιθυμητό αυτό αριθμό ποδηλάτων. Αρχικά για την επίλυση του προβλήματος προτείνεται ένα ακριβές μοντέλο το οποίο όμως είναι δύσκολο να επιλυθεί (intractable). Για το λόγω αυτό χαλαρώνεται (relaxation) το μοντέλο, λαμβάνοντας έτσι ένα ακέραιο πρόγραμμα με εκθετικό αριθμό περιορισμών. Το πρόγραμμα αυτό λύνεται με χρήση αλγορίθμου διακλάδωσης και αποκοπής (branch and cut algorithm), από τον οποίο εξάγεται ένα κάτω φράγμα της λύσης. Πέρα από την

προσέγγιση αυτή προτείνεται και ένας ευρετικός μηχανισμός αναζήτησης, αναζήτηση απαγορευμένων καταστάσεων (tabu search), για την εύρεση εφικτών λύσεων. Ο μηχανισμός αναζήτησης ενσωματώνει τέσσερις διαφορετικές δομές γειτόνων. Η λίστα απαγορευμένων καταστάσεων περιέχει έναν αριθμό ακμών οι οποίες είχαν αφαιρεθεί προηγουμένως κατά τη διάρκεια της τοπικής αναζήτησης. Για την κατασκευή της αρχικής λύσης του ευρετικού αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις. Στην πρώτη προσέγγιση η λύση βρίσκεται μέσω μιας άπληστης (greedy) ευρετικής διαδικασίας ενώ στη δεύτερη προσέγγιση μια αρχική λύση βρίσκεται βάσει του ακέραιου γραμμικού προγράμματος. Οι αλγόριθμοι που εκτελούνται είναι ο branch-and-cut αλγόριθμος για την επίλυση του ακέραιου προγράμματος καθώς επίσης και οι δύο εκδόσεις της ευρετικής αναζήτησης απαγορευμένων καταστάσεων. Για την εφαρμογή και την αξιολόγηση των αλγορίθμων χρησιμοποιήθηκαν στιγμιότυπα δικτύου βασιζόμενα στη δουλειά που έγινε στο [28]. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ευρετική αναζήτηση που ενσωματώνει τη λύση του ακέραιου προγράμματος παράγει λύσεις καλύτερης ποιότητας, δηλαδή λύσεις χαμηλότερου κόστους σε σχέση με την άπληστη ευρετική διαδικασία. Από την άλλη οι τελευταία είναι πιο αποδοτική ως προς το χρόνο εκτέλεσης. Επιπλέον η ευρετική αναζήτηση δίνει αποτελέσματα αρκετά κοντά στη βέλτιστη λύση, της τάξης του 5%.

Στο [25] μελετάται επίσης το πρόβλημα της στατικής ανακατανομής των ποδηλάτων κατά τη διάρκεια της νύχτας με χρήση ενός αριθμού οχημάτων. Στόχος του προβλήματος αυτού είναι να βρεθούν οι διαδρομές τις οποίες θα ακολουθήσουν τα οχήματα που εκτελούν τη διαδικασία της ανακατανομής με το μικρότερο δυνατό κόστος. Η συνάρτησης κόστους είναι ένας βεβαρυμμένος συνδυασμός μιας κυρτής συνάρτησης βάσει των εκτιμώμενων περιπτώσεων κατά τις οποίες το σύστημα δε θα μπορεί να εξυπηρετήσει τους χρήστες και του κόστους της διαδρομής των οχημάτων. Προτείνονται δύο μοντελοποιήσεις του προβλήματος ως μεικτά ακέραια γραμμικά προβλήματα, μία με βάση τις ακμές (arc-indexed formulation) και μία με βάση το χρόνο (time-indexed formulation). Στην πρώτη μοντελοποίηση ένα όχημα δε μπορεί να επισκεφθεί δύο φορές ένα σταθμό και επίσης δε μπορεί να περιμένει σε κάποιο σταθμό. Οι θεωρήσεις αυτές συμβάλλουν στη μείωση του αριθμού των μεταβλητών απόφασης του γραμμικού προβλήματος με αποτέλεσμα τη δυνατότητα εύρεσης αποδοτικών λύσεων. Στη δεύτερη μοντελοποίηση η χρονική περίοδος μελέτης του συστήματος διαιρείται σε μικρότερα χρονικά διαστήματα και οι μεταβλητές απόφασης της προηγούμενης μοντελοποίησης επεκτείνονται με τη χρήση ενός ακόμη δείκτη, του χρονικού δείκτη. Επιπλέον οι περιορισμοί της πρώτης μοντελοποίησης δεν ισχύουν στη δεύτερη. Με τον τρόπο αυτό ο χώρος λύσεων της τελευταίας επεκτείνει το χώρο λύσεων της πρώτης. Δεδομένου της υπολογιστικής πολυπλοκότητας των δυο μοντελοποιήσεων αναπτύχθηκε μια ευρετική μέθοδος δύο φάσεων. Στην πρώτη φάση χαλαρώνεται ο περιορισμός της μετακίνησης ακέραιου αριθμού ποδηλάτων κατά τη διάρκεια της ανακατανομής, δίνοντας έτσι έμφαση στην εύρεση των κατάλληλων διαδρομών που πρέπει να ακολουθήσουν τα οχήματα. Στη δεύτερη φάση εισάγεται ο περιορισμός του ακέραιου αριθμού ποδηλάτων που πρέπει να μετακινηθούν. Οι μεταβλητές απόφασης που σχετίζονται με τις διαδρομές των οχημάτων λαμβάνονται ως σταθερές οι οποίες έχουν υπολογιστεί από τη λύση που εξήχθη κατά την πρώτη φάση. Ο έλεγχος και η αξιολόγηση των αλγορίθμων έγινε με χρήση δεδομένων από το ένα σύστημα στο Παρίσι με την ονομασία Velib, το οποίο αποτελείται από 60 περίπου σταθμούς και δύο οχήματα που εκτελούν το έργο της ανακατανομής των ποδηλάτων και από ένα ακόμη σύστημα που δραστηριοποιείται στην Ουάσινγκτον των Ηνωμένων Πολιτειών, το Capital BikeShare, το οποίο την περίοδο της μελέτης αποτελούνταν από 104 σταθμούς και δύο οχήματα. Για χρόνο μελέτης δύο ωρών λειτουργίας του συστήματος τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι η πρώτη μοντελοποίηση σε συνδυασμό με την ευρετική προσέγγιση των δύο φάσεων είναι η πιο αποδοτική προσέγγιση.

Στο [29] μελετάται το πρόβλημα της ανακατανομής σε συστήματα διαμοιρασμού αυτοκινήτων και συγκεκριμένα σε συστήματα που δεν υπάρχουν σταθμοί, αλλά τα οχήματα βρίσκονται διεσπαρμένα εντός μια προκαθορισμένης περιοχής. Οι στρατηγικές ανακατανομής που προτείνονται κατηγοριοποιούνται βάσει του ποιος είναι αυτός που εκτελεί τη διαδικασία. Συγκεκριμένα προτείνονται στρατηγικές όπου οι χρήστες αναλαμβάνουν να ανακατανεύουν τα αυτοκίνητα. Για το σκοπό αυτό τους παρέχονται κίνητρα έτσι ώστε να αλλάξουν την περιοχή στην οποία θα αφήσουν το αυτοκίνητο που έχουν νοικιάσει, όπως επίσης τους προτείνεται να μοιραστούν ένα αυτοκίνητο με κάποιον άλλο χρήστη του οποίου οι επιλογές ταξιδιού (αφετηρία, προορισμός) ως ένα βαθμό συμπίπτουν. Η άλλη κατηγορία στρατηγικών είναι αυτή που επιτελείται από το σύστημα. Στην περίπτωση αυτή εργαζόμενοι της εταιρείας αναλαμβάνουν να μετακινήσουν τα αυτοκίνητα από περιοχές με πλεόνασμα αυτοκινήτων σε περιοχές με έλλειψη. Η πρώτη κατηγορία είναι πιο κερδοφόρα για το σύστημα, αφού το σύστημα δεν επιβαρύνεται με το κόστος μετακίνησης των αυτοκινήτων. Όμως υπάρχει ο περιορισμός ότι οι χρήστες μπορεί να αρνηθούν να αλλάξουν τις επιλογές του ταξιδιού τους. Η δεύτερη κατηγορία επιβαρύνει το σύστημα με το επιπλέον κόστος της μετακίνησης των οχημάτων καθώς και των εργαζομένων που θα επιτελέσουν το έργο αυτό, αλλά παραμένει πιο αξιόπιστη λόγω του ότι μπορεί να ελεγχθεί πλήρως από το ίδιο το σύστημα. Για την αξιολόγηση των δύο κατηγοριών μελετήθηκαν ένας αλγόριθμος που βασίζεται στην ανακατανομή βάσει των χρηστών και παρουσιάστηκε στο [30] και ένας ακόμη αλγόριθμος που βασίζεται στην ανακατανομή των οχημάτων από το σύστημα και παρουσιάστηκε στο [31]. Μετέπειτα αναπτύσσεται ένας αλγόριθμος δύο φάσεων για την επίλυση του προβλήματος της ανακατανομής των αυτοκινήτων. Στην πρώτη φάση βάσει πραγματικών συλλεγμένων δεδομένων δημιουργούνται διάφορα σενάρια σχετικά με τη ζήτηση αυτοκινήτων ανά περιοχή. Για κάθε σενάριο υπολογίζεται ο βέλτιστος αριθμός αυτοκινήτων ανά περιοχή και παράγεται ένα σύνολο από στρατηγικές ανακατανομής των αυτοκινήτων. Στη δεύτερη φάση συγκρίνεται ο τρέχον αριθμός αυτοκινήτων σε κάθε περιοχή με τον βέλτιστο αριθμό που υπολογίστηκε κατά το προηγούμενο στάδιο. Αν οι δύο αυτές τιμές διαφέρουν τότε υιοθετείται κατάλληλη στρατηγική που είχε παραχθεί στο προηγούμενο στάδιο.

Το πρόβλημα της δυναμικής ανακατανομής οχημάτων έτσι ώστε να γίνει δυνατή η όσο τη δυνατόν μεγαλύτερη κάλυψη της ζήτησης σε έκτακτες περιπτώσεις πραγματεύεται η εργασία [32]. Για παράδειγμα όταν ένα όχημα δεσμευθεί για την παροχή υπηρεσιών, εγκαταλείποντας έτσι τη θέση του, τα υπόλοιπα οχήματα θα πρέπει να ανακατανεμηθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να καλύψουν το μέγιστο δυνατό πληθυσμό. Το πρόβλημα μοντελοποιείται ως ένα Πρόβλημα Ανακατανομής Μέγιστης Εκτιμώμενης Κάλυψης. Η είσοδος του προβλήματος αυτού αποτελείται από το σύνολο n των οχημάτων και έναν βεβαρυμμένο κατευθυνόμενο γράφο $G = (V, A)$. Το σύνολο των κορυφών V αποτελείται από δύο υποσύνολα, όπου το πρώτο υποσύνολο V_w είναι οι θέσεις στις οποίες μπορεί να βρίσκονται τα οχήματα και το δεύτερο V_d είναι οι θέσεις στις οποίες μπορεί να προκύψει ζήτηση για όχημα. Ένα όχημα που ανήκει στο σύνολο V_w μπορεί να καλύψει μία θέση που ανήκει στο υποσύνολο V_d , αν μπορεί να προσεγγίσει τη συγκεκριμένη θέση εντός ενός καθορισμένου χρονικού διαστήματος. Σε κάθε θέση που ανήκει στο υποσύνολο V_d έχει αποδοθεί μια τιμή ζήτησης, η οποία αντιστοιχεί στην αναγκαιότητα κάλυψης της από κάποιο όχημα. Έτσι σκοπός είναι για κάθε ακέραιο $k \leq n$ να ανατεθούν k οχήματα στις κορυφές του συνόλου V_w ικανοποιώντας τον περιορισμό ως προς το μέγιστο επιτρεπτό αριθμό μετακινήσεων οχημάτων έτσι ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή κάλυψη. Ο υπολογισμός όλων των $k \leq n$ αναθέσεων οχημάτων στις κορυφές του υποσυνόλου V_w χρησιμεύει στο να γίνουν γνωστές εκ των προτέρων όλες οι πιθανές μετακινήσεις οχημάτων σε

περίπτωση που κάποιο όχημα δεσμευτεί. Πιο συγκεκριμένα όταν ένα όχημα δεσμευτεί το ποιες μετακινήσεις θα πραγματοποιηθούν ώστε να υπάρξει κα πάλι η επιθυμητή κάλυψη εξάγονται άμεσα χωρίς περαιτέρω επεξεργασία, μιας και έχουν ήδη προϋπολογιστεί. Η εκτιμώμενη κάλυψη ορίζεται ως $\sum_{k=1}^n \rho_k c_k$, όπου η ποσότητα ρ_k αντιστοιχεί στην πιθανότητα ακριβώς k οχήματα να είναι διαθέσιμα και η ποσότητα c_k δηλώνει την κάλυψη που προκύπτει από τα k αυτά οχήματα. Για τον έλεγχο και την αξιολόγηση του μηχανισμού αυτού χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά δεδομένα από τις ιατρικές υπηρεσίες της πόλης του Μόντρεαλ, για ένα σχετικά μικρό αριθμό οχημάτων $3 \leq n \leq 6$. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο μέσος χρόνος απόκρισης του συστήματος στα διάφορα γεγονότα που προκύπτουν δεν ξεπερνάει τα 10 λεπτά ακόμα και στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται τρία μόνο οχήματα. Το μειονέκτημα της δουλειά αυτής είναι ότι παρόλο που υπολογίζεται εκ των προτέρων κάθε πιθανή ανάθεση των $k \leq n$ οχημάτων στις κορυφές του V_w , δεν έχουν υπολογιστεί οι διαδρομές που θα ακολουθήσουν τα οχήματα όταν ένα από αυτά δεσμευτεί. Επίσης η προσέγγιση αυτή δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεγάλο πλήθος n οχημάτων, δεδομένου ότι ο χρόνος εκτέλεσης του ακέραίου προγράμματος απαιτεί εκθετικό χρόνο.

Στο [26] μελετάται το πρόβλημα της δυναμικής ανακατανομής ποδηλάτων. Στο σύστημα αυτό η ανακατανομή των ποδηλάτων δε γίνεται το βράδυ που η ζήτηση είναι πολύ μικρή ως καθόλου, αλλά και κατά τη διάρκεια της ημέρας, όταν και η χρήση του συστήματος είναι αυξημένη. Σκοπός της μελέτης αυτής είναι η εξαγωγή διαδρομών για τα οχήματα που ανακατανέμουν τα ποδήλατα έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν περιπτώσεις αδυναμίας εξυπηρέτησης των χρηστών από το σύστημα (μη εύρεση ποδηλάτου προς ενοικίαση ή/και μη εύρεση θέσης στάθμευσης κατά την επιστροφή του ποδηλάτου). Ο χρόνος διαιρείται σε περιόδους και εισάγεται ένα χώρο-χρονικό δίκτυο. Οι κόμβοι του δικτύου αντιστοιχούν στους σταθμούς του συστήματος σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο, ενώ μια ακμή αντιστοιχεί σε μια μετάβαση από ένα σταθμό σε μια χρονική περίοδο σε έναν άλλο σταθμό την εκτιμώμενη χρονική περίοδο. Στη συνέχεια προτείνεται μια μοντελοποίηση του προβλήματος ως ένα μεικτό ακέραιο γραμμικό πρόγραμμα (Mixed Integer Linear Program), με τον αριθμό των ποδηλάτων που μεταφέρονται με ένα όχημα (ακμή που ενώνει δυο κόμβους) να λογίζονται ως ροές (flows). Δεδομένης της δυσκολίας επίλυσης του γραμμικού προγράμματος, προτείνεται μια ευρετική προσεγγιστική μέθοδος από την οποία εξάγονται εφικτές λύσεις καθώς και ένα κάτω φράγμα αυτής. Στη συνέχεια εφαρμόζονται δύο αποσύνθεσεις (decomposition) του προβλήματος. Συγκεκριμένα εφαρμόζεται η αποσύνθεση που παρουσιάζεται στο [33], (Dantzig-Wolfe αποσύνθεση) και λαμβάνεται ένα κάτω φράγμα από την επίλυση της χαλάρωσης του προβλήματος. Στη συνέχεια προτείνεται μια νέα μοντελοποίηση του προβλήματος εφαρμόζονται την Benders αποσύνθεση, [34]. Λαμβάνοντας υπόψη τη διαδικασία που εφαρμόστηκε στην Dantzig-Wolfe αποσύνθεση, λαμβάνεται μια εφικτή λύση. Δεδομένου της ανυπαρξίας στιγμιότυπων για δυναμική ανακατανομή ποδηλάτων, δημιουργήθηκαν 120 στιγμιότυπα ώστε να μπορέσουν να ελεγχθούν οι προτεινόμενες προσεγγίσεις. Τα στιγμιότυπα περιείχαν 25, 50 και 100 σταθμούς, ο χρόνος εκτέλεσης τέθηκε ίσος με 2 ώρες, κάθε χρονική περίοδος ίση με 2 ή 5 λεπτά και ο διαθέσιμος αριθμός οχημάτων που επιτελούν το έργο της ανακατανομής των ποδηλάτων ίσος με 5. Το μεικτό ακέραιο γραμμικό πρόγραμμα συγκρίθηκε με της ευρετικές προσεγγίσεις σε συνδυασμό με τα δύο σχήματα αποσύνθεσης. Το γραμμικό πρόγραμμα επιλύθηκε με χρήση μιας εμπορικής εφαρμογή επίλυσης γραμμικών προβλημάτων, με μέγιστο επιτρεπτό χρονικό περιθώριο τα 30 λεπτά. Από τα αποτελέσματα διαφάνηκε ότι η ευρετική μέθοδος είναι πιο αποδοτική από το γραμμικό πρόγραμμα για όλα τα στιγμιότυπα που χρησιμοποιήθηκαν, εκτός των πολύ μικρών. Το κάτω φράγμα της λύσης που εξάγεται από την ευρετική μέθοδο είναι υψηλότερο από τη λύση που δίνει το γραμμικό πρόγραμμα. Η λύση αυτή αντιστοιχεί στη λύση

χαμηλότερου κόστους. Επίσης ο χρόνος εκτέλεσης της ευρετική μεθόδου δεν υπερέβη σε μέση τιμή τα 6 λεπτά ακόμη και για τα μεγάλα στιγμιότυπα. Ένα μειονέκτημα της δουλειάς αυτής είναι ότι δε λαμβάνει καθόλου υπόψη το χρόνο που απαιτείται για να φορτωθούν και να ξεφορτωθούν τα ποδηλάτα που συμμετέχουν τη διαδικασία ανακατανομής. Ο χρόνος αυτός δεν είναι αμελητέος συγκρινόμενος με το χρόνο που απαιτείται για την εκτέλεση της διαδρομής και είναι ανάλογος του αριθμού των ποδηλάτων που φορτώνονται/εκφορτώνονται.

Το πρόβλημα της στατικής ανακατανομής σε συστήματα διαμοιρασμού ηλεκτρικών οχημάτων μελετάται στο [35]. Οι συγγραφείς της εργασίας αυτής θεωρούν ότι οι ανακατανομές των οχημάτων γίνονται ταυτόχρονα, δηλαδή οι εργαζόμενοι που θα επιτελέσουν τη διαδικασία βρίσκονται στους σταθμούς από τους οποίους θα αφαιρεθούν αυτοκίνητα και εκκινούν τη διαδικασία την ίδια χρονική στιγμή. Στη διαδικασία της ανακατανομής δε λαμβάνεται υπόψη το επίπεδο της μπαταρίας των αυτοκινήτων. Στόχος είναι με το πέρας της ανακατανομής οι σταθμοί να αποκτήσουν τον επιθυμητό αριθμό αυτοκινήτων. Σχετικά με τον αριθμό αυτοκινήτων που απαιτείται να υπάρχει σε κάθε σταθμό έχουν γίνει δύο διαφορετικές θεωρήσεις. Στην πρώτη θεώρηση στόχος είναι όλοι οι σταθμοί να αποκτήσουν τον ίδιο αριθμό αυτοκινήτων, ενώ στη δεύτερη ο αριθμός που κάθε σταθμός πρέπει να αποκτήσει καθορίζεται από τη ζήτηση του σταθμού ή αλλιώς από το ρυθμό αφίξεως των χρηστών για ενοικίαση αυτοκινήτου σε κάθε σταθμό. Ο αριθμός αφίξεως των χρηστών είναι μια ποσότητα γνωστή εκ των προτέρων και έχει αποκτηθεί μέσα από παρατήρηση του συστήματος κατά τη διάρκεια λειτουργίας του. Βάσει του επιλεγμένου σχήματος ανακατανομής δημιουργείται ένα διάνυσμα ανακατανομής, το οποίο περιέχει τον επιθυμητό αριθμό αυτοκινήτων μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας. Στη συνέχεια αναπτύσσεται ένας ευρετικός αλγόριθμος μέσω του οποίου λαμβάνεται απόφαση για τον προορισμό του κάθε αυτοκινήτου μετά από αντιστοίχιση των σταθμών με πλεόνασμα οχημάτων σε αυτούς με έλλειψη. Η αντιστοίχιση αυτή γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μειωθεί η συνολική απόσταση που διανύεται από τα οχήματα και άρα το συνολικό κόστος της διαδικασίας. Για κάθε όχημα σχηματίζεται μια λίστα με τους πιθανούς σταθμούς στους οποίους θα μπορούσε να μετακινηθεί και οι οποίοι παρουσιάζουν έλλειψη αυτοκινήτων. Οι πιθανοί αυτοί σταθμοί κατηγοριοποιούνται βάσει της απόστασής τους από το όχημα, με το σταθμό που είναι πιο κοντά να βρίσκεται στην κορυφή της λίστας. Αντίστοιχα κάθε σταθμός έχει επίγνωση του αριθμού των οχημάτων που χρειάζεται για να φτάσει στην επιθυμητή κατάσταση και διατηρεί μια λίστα με τα οχήματα που τη δεδομένη στιγμή βρίσκονται σε άλλους σταθμούς και έχουν ανατεθεί σε αυτόν. Η διαδικασία της αντιστοίχισης των οχημάτων στους σταθμούς εκκινεί εξετάζοντας το πρώτο από τα οχήματα που λαμβάνουν μέρος στην ανακατανομή. Βάσει της λίστας των πιθανών σταθμών του οχήματος, εξετάζεται αν μπορεί να μετακινηθεί σε αυτόν που βρίσκεται στην κορυφή της λίστας. Αν ο σταθμός αυτός έχει λιγότερα οχήματα από τον επιθυμητό αριθμό τότε το όχημα αυτό προστίθεται στη λίστα του σταθμού με τα οχήματα. Αλλιώς αφαιρείται από τη λίστα του σταθμού το όχημα που βρίσκεται πιο μακριά από το σταθμό. Εν συνεχεία το όχημα που αφαιρέθηκε εξετάζει τη δυνατότητα μετακίνησής του στον επόμενο σταθμό από αυτούς που βρίσκονται στη λίστα του. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για όλα τα οχήματα. Κατά τον τερματισμό αυτής, το σύνολο των μετακινήσεων που εξάγεται είναι αυτό με τη μικρότερη απαιτούμενη προς διάνυση απόσταση.

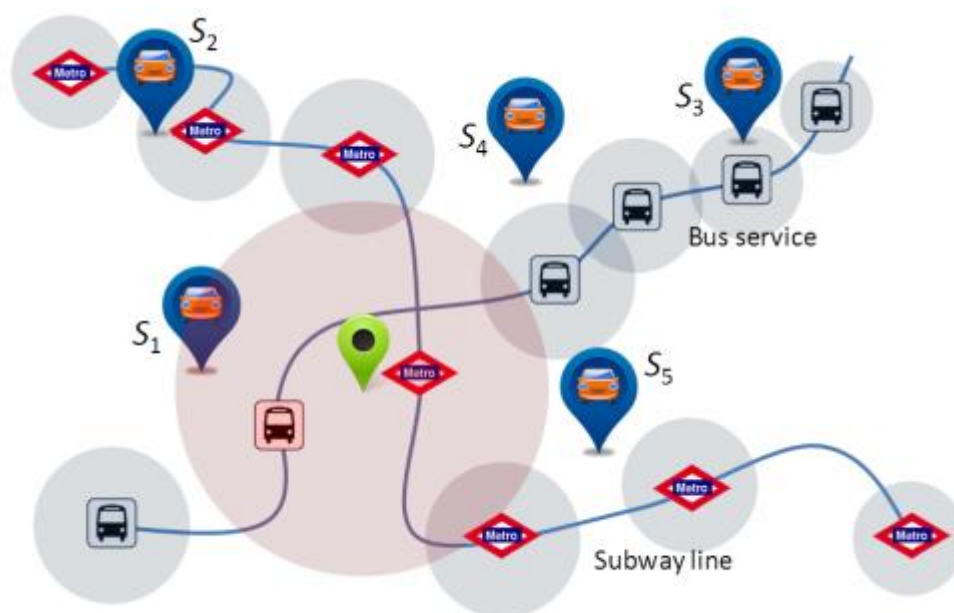
Η εργασία που παρουσιάζεται στο [36] αποτελεί επέκταση της δουλειάς που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ένα σχήμα που βασίζεται σε ομαδική ανακατανομή αυτοκινήτων και προτείνεται μια λύση βάσει ενός γενετικού αλγορίθμου. Οι ανακατανομές που προκύπτουν πρέπει να ολοκληρωθούν εντός ενός χρονικού ορίου. Κάθε πλάνο ανακατανομής, ένα σύνολο δηλαδή

ανακατανομών ηλεκτρικών οχημάτων από σταθμούς με πλεόνασμα σε σταθμούς με έλλειψη, αναπαρίσταται από ένα δάνυσμα ακέραιων τιμών στο οποίο θα τρέξουν οι διαδικασίες του γενετικού αλγορίθμου, όπως διασταύρωση (crossover), επιλογή (selection), αναπαραγωγή (reproduction), μετάλλαξη (mutation). Οι οδηγοί που συμμετέχουν στη διαδικασία ανακατανομής, θεωρούνται ότι κινούνται σε ομάδες των m ατόμων, εκ των οποίων ένας από αυτούς οδηγεί το αυτοκίνητο που ακολουθεί μια διαδρομή που διέρχεται από τους σταθμούς που παρουσιάζουν πλεόνασμα οχημάτων. Με την άφιξη σε ένα σταθμό, τα υπόλοιπα $m-1$ άτομα της ομάδας αποβιβάζονται και οδηγούν $m-1$ αυτοκίνητα προς τους προκαθορισμένους σταθμούς με έλλειμμα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου ολοκληρωθεί η ανακατανομή των οχημάτων. Από τα αποτελέσματα εξάγεται το συμπέρασμα ότι κάθε αύξηση στον αριθμό των εργαζομένων που συμμετέχουν στην ανακατανομή μειώνει δραστικά την διανυόμενη απόσταση.

3. ΣΧΗΜΑΤΑ ΠΑΡΟΧΗΣ ΚΙΝΗΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΘΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται το πρόβλημα της ανάθεσης οχημάτων στους χρήστες ενός συστήματος διαμοιρασμού οχημάτων απλής διαδρομής. Στόχος είναι η αντιμετώπιση του προβλήματος της μη ισορροπημένης κατανομής των οχημάτων στους σταθμούς του συστήματος κατά τη διάρκεια της ημέρας έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η διαθεσιμότητα οχημάτων και θέσεων στάθμευσης. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται δύο σχήματα ανάθεσης οχημάτων στους χρήστες τα οποία βασίζονται στην παροχή κινήτρων ώστε αυτοί να λειτουργήσουν προς όφελος του συστήματος συμβάλλοντας στην κατανομή των οχημάτων στους σταθμούς που θα εξασφαλίζει σε μεγάλο βαθμό τη διαθεσιμότητα οχημάτων και θέσεων στάθμευσης σε όλους τους σταθμούς ακόμη και κατά τις ώρες αιχμής.

Για να αποκτήσει πρόσβαση ο χρήστης σε ένα από τα οχήματα θα πρέπει να εκπληρώσει μια διαδικασία κράτησης, δηλώνοντας το σημείο αφετηρίας, το σημείο τερματισμού καθώς και την ώρα αναχώρησης. Η διαδικασία κράτησης είναι θεμελιώδης στην αντιμετώπιση του προβλήματος. Βάσει των κρατήσεων γίνεται αποδοτικότερος συντονισμός, μειώνεται η αβεβαιότητα και γίνεται καλύτερη πρόβλεψη της μελλοντικής κατάστασης του συστήματος. Αφού το σύστημα λάβει το αίτημα κράτησης υπολογίζει τον κοντινότερο σταθμό από το σημείο αφετηρίας και αντίστοιχα τον κοντινότερο σταθμό από το σημείο τερματισμού. Να σημειωθεί ότι ως κοντινότερος σταθμός ορίζεται ο σταθμός που είναι πιο κοντά στο δηλωθέν σημείο του χρήστη αλλά και παρέχει τη δυνατότητα πραγματοποίησης του αιτούμενου ταξιδιού (να υπάρχει δηλαδή διαθέσιμο όχημα στο σταθμό αφετηρίας και ελεύθερη θέση στάθμευσης στο σταθμό τερματισμού). Έπειτα αν ο χρήστης είναι διατεθειμένος να συμμετάσχει στο μηχανισμό παροχής κινήτρων το σύστημα θα υπολογίσει τους επιπλέον εναλλακτικούς σταθμούς που είναι προσβάσιμοι από το χρήστη, σχηματίζοντας έτσι το σύνολο των εφικτών ταξιδιών (feasible trips). Για τον υπολογισμό των υποψήφιων εναλλακτικών σταθμών λαμβάνεται υπόψη το κατά πόσο είναι διατεθειμένος ο χρήστης να περπατήσει ώστε να μπορέσει να προσεγγίσει τους πιο απομακρυσμένους αυτούς σταθμούς. Αυτό σημαίνει ότι ο χρήστης έχει δηλώσει εκ των προτέρων το χρόνο που είναι διατεθειμένος να ξοδέψει και την απόσταση που είναι διατεθειμένος να περπατήσει μέχρι κάποιο σταθμό αφετηρίας ή από κάποιο σταθμό τερματισμού στην επιθυμητή τοποθεσία που θέλει να καταλήξει. Επίσης αν ο χρήστης είναι διατεθειμένος να χρησιμοποιήσει τις αστικές συγκοινωνίες, τότε στο σύνολο των προσβάσιμων σταθμών μπαίνουν και αυτοί που μπορούν να προσεγγισθούν με χρήση των συγκοινωνιών εντός του χρονικού διαστήματος που έχει δηλώσει ότι διατίθεται να ξοδέψει. Για παράδειγμα έστω οι σταθμοί s_1 , s_2 , s_3 , που απέχουν 4, 10 και 6 λεπτά αντίστοιχα από το σημείο αφετηρίας του χρήστη και έστω οι σταθμοί d_1 , d_2 , d_3 που απέχουν 5, 7, και 12 λεπτά από το σημείο τερματισμού. Αν ο χρήστης είναι διατεθειμένος να ξοδέψει 12 λεπτά για να προσεγγίσει τους σταθμούς τότε το σύνολο των εφικτών ταξιδιών θα αποτελείται από τα εξής ζεύγη σταθμών $\{(s_1, d_1), (s_1, d_2), (s_3, d_1)\}$. Η έννοια του συνόλου των εφικτών ταξιδιών απεικονίζεται σε μια πιο γενική περίπτωση στο Σχήμα 3.1. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας αυτής το σύνολο των εφικτών ταξιδιών μπορεί άμεσα να μεταφραστεί ως ένα σύνολο εφικτών μετακινήσεων από ένα σταθμό με διαθέσιμα οχήματα προς ένα άλλο σταθμό με ελεύθερες θέσεις στάθμευσης κατά τις αντίστοιχες χρονικές στιγμές της ενοικίασης και της επιστροφής του οχήματος. Έτσι έχοντας μεταφράσει ένα αίτημα για ενοικίαση οχήματος σε ένα σύνολο εφικτών μετακινήσεων, ο μηχανισμός θα αναζητήσει την μετακίνηση που είναι πιο αποδοτική για το σύστημα.



Σχήμα 3.1: Σύνολο προσβάσιμων σταθμών

Για την επίτευξη του στόχου αυτού ανατίθεται ένα βάρος σε κάθε μετακίνηση, το οποίο βάρος υποδεικνύει την αναγκαιότητα της μετακίνησης αυτής. Όσο μεγαλύτερη δηλαδή είναι η αναγκαιότητα μιας μετακίνησης τόσο μεγαλύτερη είναι το βάρος που ανατίθεται σε αυτήν ή αλλιώς τόσο μεγαλύτερη είναι η προτεραιότητα υλοποίησής (relocation priority) της. Η προτεραιότητα μετακίνησης είναι συνάρτηση των διαθέσιμων οχημάτων στο σταθμό αφετηρίας και των διαθέσιμων θέσεων στάθμευσης στο σταθμό τερματισμού κατά τις χρονικές στιγμές εκκίνησης και τερματισμού του ταξιδιού αντίστοιχα.

Προκειμένου να είναι πιο αποδοτικός ο μηχανισμός παροχής κινήτρων που υλοποιήθηκε, χειρίζεται τα αιτήματα για ενοικίαση οχήματος κατά ομάδες. Συλλέγοντας δηλαδή έναν αριθμό αιτημάτων δίνεται η δυνατότητα να εξάγει αποτελέσματα λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμό των οχημάτων/θέσεων στάθμευσης ανά ζεύγη ενός συνόλου σταθμών και όχι ενός μόνο ζεύγους σταθμών αφετηρίας και τερματισμού. Έτσι παρέχεται η δυνατότητα μιας πιο ολοκληρωμένης εικόνας του συστήματος βελτιώνοντας τις προϋποθέσεις για μια πιο επωφεληή χρήση των οχημάτων τόσο για τους χρήστες όσο και για το διαχειριστή του συστήματος. Κάτι που μεταφράζεται σε αύξηση της ικανοποίησης των αιτημάτων για ενοικίαση σε ότι αφορά τους χρήστες και σε αύξηση του κέρδους σε ότι αφορά το σύστημα. Τέλος πρέπει να αναφερθεί πως στην εξαγωγή των προτεινόμενων ταξιδιών από το μηχανισμό λαμβάνονται επιπλέον υπόψη περιορισμοί που έχουν να κάνουν με το συνολικό ποσό που μπορεί να διαθέσει το σύστημα στους χρήστες για την προσφορά των κινήτρων καθώς και η γενικότερη συμπεριφορά του συστήματος και πιο συγκεκριμένα οι αυξομειώσεις στη διάρκεια της ημέρας του αριθμού των οχημάτων στους σταθμούς.

3.1 Ανάθεση Οχημάτων στους Χρήστες

3.1.1 Μεταβλητές του Προβλήματος

Έστω S το σύνολο των σταθμών του συστήματος διαμοιρασμού οχημάτων, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$. Σε κάθε σταθμό αναθέτουμε τις παρακάτω μεταβλητές:

- c_i : η χωρητικότητα του σταθμού s_i , δηλαδή ο μέγιστος αριθμός οχημάτων που μπορεί να χωρέσει ο σταθμός ή αλλιώς ο αριθμός των θέσεων στάθμευσης.
- $o_i(t)$: ο εκτιμώμενος/προβλεπόμενος αριθμός οχημάτων του σταθμού s_i τη χρονική στιγμή t . Η τιμή της $o_i(t)$ για $t' < t$ μπορεί να υπολογιστεί εύκολα από τις κρατήσεις οχημάτων που έχουν γίνει και σχετίζονται με το σταθμό s_i είτε ως αφετηρία είτε ως τερματισμό έως και τη χρονική αυτή στιγμή t' .
- $w_i(t)$: ο επιθυμητός αριθμός οχημάτων στο σταθμό s_i τη χρονική στιγμή t . Είναι ο αριθμός οχημάτων που θα πρέπει να υπάρχει στο σταθμό αυτό τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή έτσι ώστε ο σταθμός αυτός να μπορεί να ικανοποιήσει την ζήτηση για οχήματα. Ο αριθμός αυτός εξάγεται από παρατήρηση του συστήματος για μεγάλο χρονικό διάστημα για διαφορετικές μέρες και ώρες αλλά και διαφορετικές περιόδους έτσι ώστε να μπορεί να σχηματιστεί μια ολοκληρωμένη εικόνα για τη ζήτηση οχημάτων. Πιθανές προσεγγίσεις για το πως μπορούν να εξαχθούν τα ιστορικά αυτά δεδομένα του συστήματος μπορούν να βρεθούν στα [37], [38].

Ορίζεται η μεταβλητή $s_i^a(t)$, όπου $a \in \{1, \dots, o_i(t)\}$ και αναφέρεται στη διαθεσιμότητα οχήματος στο σταθμό s_i κατά τη χρονική στιγμή t . Επίσης ορίζεται η μεταβλητή $s_i^e(t)$, όπου $e \in \{1, \dots, c_i - o_i(t)\}$ και αναφέρεται στον αριθμό των ελεύθερων θέσεων στάθμευσης στο σταθμό s_i τη χρονική στιγμή t . Είναι προφανές ότι το άθροισμα των μεταβλητών $s_i^a(t)$ και $s_i^e(t)$ κάθε χρονική στιγμή ισούται με τη χωρητικότητα c_i του σταθμού.

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, κάθε αίτημα για όχημα, έστω αυτό R_i , περιέχει την εξής πληροφορία:

- $sl(R_i)$: η αρχική τοποθεσία του χρήστη. Μπορεί να είναι η τρέχουσα θέση του ή η θέση στην οποία θα βρίσκεται μελλοντικά κατά τη στιγμή που θέλει να ξεκινήσει το ταξίδι του.
- $el(R_i)$: η τοποθεσία στην οποία θέλει να καταλήξει ο χρήστης.
- $st(R_i)$: η χρονική στιγμή της εκκίνησης του ταξιδιού
- $dt(R_i)$: η χρονική διάρκεια του ταξιδιού
- $icv(R_i)$: αποτελεί ένδειξη του εάν ο χρήστης θέλει να συμμετάσχει στο μηχανισμό παροχής κινήτρων
- $delay(R_i)$: ο μέγιστος επιπλέον χρόνος που ο χρήστης είναι διατεθειμένος να ξοδέψει για να εκτελέσει ένα εναλλακτικό ταξίδι που του προτείνεται από το σύστημα.
- $tol(R_i)$: είναι ο μέγιστος χρόνος που είναι διατεθειμένος ο χρήστης να ξοδέψει για να περπατήσει από και προς ένα σταθμό. Είναι η διαδρομή που δεν περιέχει όχημα, πάρα μόνο περπάτημα καθώς και μετακίνηση με τις δημόσιες συγκοινωνίες στην περίπτωση που ο χρήστης είναι διατεθειμένος να τις χρησιμοποιήσει.

Οι τέσσερις τελευταίες μεταβλητές είναι προαιρετικές και μπορούν να παραληφθούν από το αίτημα για ενοικίαση οχήματος. Συγκεκριμένα αν η μεταβλητή $dt(R_i)$ απουσιάζει τότε εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο χρήστης θέλει ένα όχημα για να ταξιδέψει απευθείας

από το σημείο $sl(R_i)$ στο $el(R_i)$, οπότε ως χρόνος διάρκειας της ενοικίασης ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται για να μετακινηθεί κάποιος με το όχημα από το σταθμό αφετηρίας στο σταθμό τερματισμού. Οι τρεις τελευταίες μεταβλητές αφορούν το προφίλ του χρήστη και αποθηκεύονται από το σύστημα. Η ύπαρξη τους σε ένα αίτημα ενοικίασης σημαίνει αλλαγή των χαρακτηριστικών του χρήστη, με αποτέλεσμα την άμεση ενημέρωση του προφίλ του και την αποθήκευση αυτών από το σύστημα.

3.1.2 Χειρισμός των Αιτημάτων Κράτησης

Με τη λήψη του αιτήματος ενοικίασης, R_i , το σύστημα διαμοιρασμού οχημάτων κατασκευάζει το σύνολο των εναλλακτικών ταξιδιών ή αλλιώς τα εφικτά ταξίδια T^{R_i} . Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η κατασκευή των εφικτών ταξιδιών είναι σύμφωνη με τα δηλωθέντα χαρακτηριστικά του χρήστη. Δηλαδή στο σύνολο αυτό υπάρχουν ζεύγη σταθμών αφετηρίας - τερματισμού για τα οποία ο χρόνος προσέγγισης από την αρχική τοποθεσία καθώς και ο χρόνος προς την τελική τοποθεσία του χρήστη είναι μικρότερος ή ίσος του χρόνου που έχει δηλώσει ότι θέλει να δαπανήσει. Στην περίπτωση που ο χρήστης δε θέλει να συμμετέχει στο μηχανισμό το σύνολο αυτό αποτελείται μόνο από ένα ζεύγος σταθμών, αυτούς που είναι κοντινότεροι στο αρχικό και τελικό σημείο του χρήστη. Έτσι για κάθε αίτημα R_i σχηματίζεται το σύνολο των προσβάσιμων ζευγών σταθμών B^{R_i} , όπου τα στοιχεία του $(s_p, s_d) \in S \times S$ και μπορούν να ικανοποιήσουν μία μετακίνηση οχήματος. Πρέπει δηλαδή ο σταθμός αφετηρίας να έχει διαθέσιμο όχημα και ο σταθμός τερματισμού διαθέσιμη θέση στάθμευσης.

Ο συνολικός χρόνος του ταξιδιού ενός χρήστη, έστω αυτός $\tau_p^d(R_i)$, από την αρχική τοποθεσία μέχρι την τελική τοποθεσία για την υλοποίηση του αιτήματος R_i με ένα όχημα από το σταθμό s_p έως το σταθμό s_d μπορεί να αναλυθεί σε τρία μέρη ως εξής:

$\tau_p^d(R_i) = \tau(sl(R_i) \rightarrow s_p) + \tau(s_p \rightarrow s_d) + \tau(s_d \rightarrow el(R_i))$, όπου $\tau(sl(R_i) \rightarrow s_p)$ ο χρόνος που χρειάζεται για να μετακινηθεί από το σημείο $sl(R_i)$ στο σταθμό αφετηρίας s_p , $\tau(s_p \rightarrow s_d)$ ο χρόνος οδήγησης από το σταθμό s_p στον σταθμό s_d και $\tau(s_d \rightarrow el(R_i))$ ο χρόνος για τη μετακίνηση από το σταθμό s_d στο σημείο τερματισμού $el(R_i)$. Έτσι το σύνολο των ζευγών των προσβάσιμων σταθμών B^{R_i} αποτελείται από ζεύγη (s_p, s_d) τα οποία ικανοποιούν τις παρακάτω συνθήκες:

$$\tau(sl(R_i) \rightarrow s_p) + \tau(s_d \rightarrow el(R_i)) \leq tol(R_i)$$

$$\tau_p^d(R_i) \leq \tau_{p^*}^d(R_i) + delay(R_i)$$

όπου p^* είναι ο δείκτης του σταθμού s_{p^*} ο οποίος είναι ο κοντινότερος του σταθμού $sl(R_i)$, από οποιονδήποτε άλλον σταθμό $s_x \in S$. Όμοια d^* είναι ο δείκτης του σταθμού s_{d^*} ο οποίος είναι κοντινότερος του σταθμού $el(R_i)$ από οποιονδήποτε σταθμό $s_y \in S$. Στη συνέχεια το ζεύγος σταθμός (s_p, s_d) θα αναφέρεται ως το κοντινότερο προς το χρήστη (user best) ζεύγος.

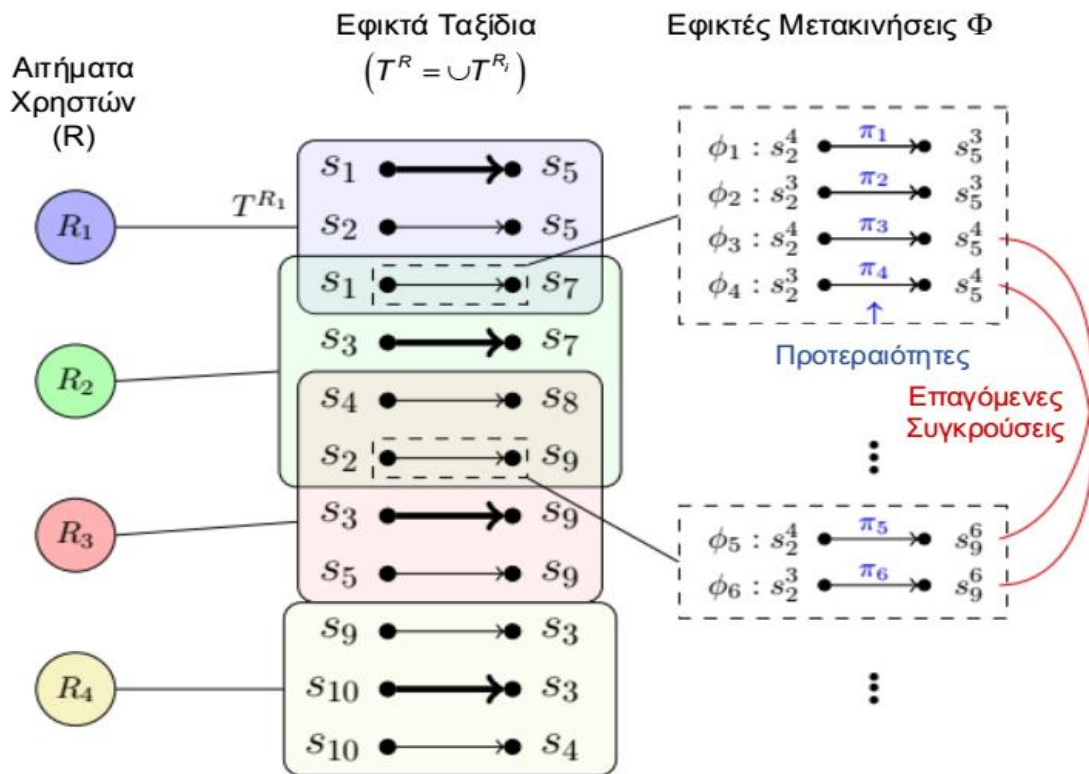
Συνοψίζοντας, κάθε αίτημα R_i αντιστοιχεί σε ένα σύνολο εφικτών ταξιδιών $tr(s_p, s_d, t_p, t_d) \in T^{R_i}$, όπου κάθε ταξίδι $T^{R_i} = \{tr(s_p, s_d, t_p, t_d) \mid (s_p, s_d) \in B^{R_i}\}$ ορίζεται μοναδικά από το ζεύγος (s_p, s_d) μεταξύ των οποίων μια μετακίνηση οχήματος λαμβάνει

χώρα κατά τις χρονικές στιγμές t_p και t_d . Στην περίπτωση των χρηστών που δε θέλουν να συμμετέχουν το σύνολο B^{R_i} αποτελείται μόνο από το ζεύγος σταθμών (s_p, s_d) το οποίο αντιστοιχεί στο συντομότερο ταξίδι για το χρήστη.

3.1.3 Μηχανισμός Ανάθεσης Οχημάτων

Όπως προαναφέρθηκε προκειμένου να είναι πιο αποδοτικός ο μηχανισμός, χειρίζεται ομάδες αιτημάτων. Έτσι έστω ένα σύνολο από αιτήματα $R = \{R_1, R_2, \dots, R_k\}$ που συγκεντρώθηκαν κατά τη διάρκεια ενός προκαθορισμένου χρονικού διαστήματος και τα οποία υποβάλλονται στο μηχανισμό προς επεξεργασία. Για κάθε $R_i \in R$ υπολογίζεται το σύνολο των εφικτών ταξιδιών $T^{R_i} = \{tr(s_p, s_d, t_p, t_d) \mid (s_p, s_d) \in B^{R_i}\}, i = 1, \dots, k$. Στόχος είναι να υπολογιστεί ένα σύνολο προτάσεων για ταξίδια, έστω M , και το οποίο θα βελτιστοποιεί το κέρδος του συστήματος. Να μεγιστοποιήσει δηλαδή τον αριθμό των ταξιδιών που μπορούν να πραγματοποιηθούν λαμβάνοντας υπόψη τις προτεραιότητες των μετακινήσεων των οχημάτων έτσι όπως έχουν προκύψει από τα αιτήματα των χρηστών, καθώς και το συνολικό χρηματικό ποσό που μπορεί το σύστημα να διαθέσει για την παροχή των κινήτρων στην περίπτωση που οι χρήστες δεχθούν το εναλλακτικό προτεινόμενο ταξίδι. Έπειτα για κάθε αίτημα $R_i \in R$ και για κάθε εφικτό ταξίδι $tr(s_p, s_d, t_p, t_d) \in T^{R_i}$ αν α είναι ένα διαθέσιμο όχημα στο σταθμό s_p τη χρονική στιγμή t_p και ε είναι μια διαθέσιμη θέση στάθμευσης στο σταθμό προορισμού s_d τη χρονική στιγμή t_d τότε η τριάδα $\phi = (R_i, s_p^a(t_p), s_d^\varepsilon(t_d))$ λογίζεται ως ένα υποψήφιο προτεινόμενο ταξίδι για να διεκπεραιώσει το αίτημα για ενοικίαση οχήματος R_i . Στην υποψήφια αυτή πρόταση $\phi = (R_i, s_p^a(t_p), s_d^\varepsilon(t_d))$ ανατίθεται ένα βάρος το οποίο αντιστοιχεί στην προτεραιότητα μετακίνησης π από το σταθμό s_p τη χρονική στιγμή t_p του οχήματος $\alpha(s_p^a(t_p))$ προς το σταθμό s_d τη χρονική στιγμή t_d και για τη θέση στάθμευσης $\varepsilon(s_d^\varepsilon(t_d))$. Η τιμή της ποσότητας π είναι συνάρτηση των ποσοτήτων/μεταβλητών $s_p, s_d, t_p, t_d, \alpha$ και ε , ο υπολογισμός της οποίας θα παρουσιαστεί λεπτομερέστερα στην ενότητα 3.1.4.

Ορίζεται για κάθε αίτημα $R_i \in R$ το σύνολο C_i που αποτελείται από όλα τα υποψήφια προτεινόμενα ταξίδια $(R_i, s_p^a(t_p), s_d^\varepsilon(t_d))$ στα οποία έχει ανατεθεί ένα βάρος, όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Ορίζεται επίσης το σύνολο V ως η ένωση των συνόλων C_i όλων των αιτημάτων $R_i \in R$. Τότε μία λύση στο πρόβλημα είναι ένα υποσύνολο M του συνόλου V και το οποίο ικανοποιεί διαφορετικά αιτήματα, η εκπλήρωση των οποίων απαιτεί μη συγκρουόμενους πόρους (διαφορετικά ταξίδια χρησιμοποιούν διαφορετικά οχήματα και διαφορετικές θέσεις στάθμευσης) και μεγιστοποιεί το άθροισμα των προτεραιοτήτων των αντίστοιχων εφικτών ταξιδιών. Συγκεκριμένα για κάθε C_i μόνο ένα από τα εφικτά ταξίδια που περιέχονται σε αυτό μπορεί να συμπεριληφθεί στη λύση του προβλήματος. Επίσης παρόλο που κάποιο από τα οχήματα όπως και κάποια από τις θέσεις στάθμευσης μπορεί να περιέχονται σε παραπάνω από ένα από τα εφικτά ταξίδια που ανήκουν στο σύνολο V , αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε ένα από τα τελικά προτεινόμενα ταξίδια της λύσης. Η προαναφερθείσα λογική παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Γραφική αναπαράσταση του προβλήματος ανάθεσης των οχημάτων

Το πρόβλημα μπορεί να θεωρηθεί και επομένως να λυθεί ως μια παραλλαγή του σταθμισμένου προβλήματος σύμπτυξης συνόλου (weighted 3-set packing problem) πάνω στο σύνολο V . Λύνοντάς το, βρίσκεται ένα υποσύνολο M του συνόλου V το οποίο αποτελείται από αμοιβαία αποκλειόμενες τριάδες οι οποίες μεγιστοποιούν του άθροισμα των προτεραιοτήτων των αντίστοιχων εφικτών ταξιδιών. Οι τριάδες αυτές του συνόλου M αντιστοιχούν σε αιτήματα για ενοικίαση οχημάτων τα οποία και μπορούν να πραγματοποιηθούν ταυτόχρονα, μιας και απαιτούν διαφορετικούς πόρους (οχήματα, θέσεις στάθμευσης). Δηλαδή για κάθε δύο διαφορετικές μεταξύ τους τριάδες $(R_i, s_p^\alpha(t_p), s_d^\epsilon(t_d))$ και $(R'_i, s_{p'}^{\alpha'}(t_{p'}), s_{d'}^{\epsilon'}(t_{d'}))$ ισχύει ότι $R_i \neq R'_i$ και $s_p^\alpha(t_p) \neq s_{p'}^{\alpha'}(t_{p'})$ και $s_d^\epsilon(t_d) \neq s_{d'}^{\epsilon'}(t_{d'})$.

Για την επίλυση του προβλήματος σύμπτυξης συνόλου υλοποιήθηκε ένας ευρετικός αλγόριθμος. Ο αλγόριθμος αυτός υπολογίζει τον γράφο τομής (intersection graph) $G=(V,E)$ του συνόλου V . Ο γράφος αυτός περιέχει ένα κόμβο για κάθε τριάδα (υποψήφια προτεινόμενα ταξίδια) του V και μια ακμή μεταξύ κόμβων οι οποίοι αναπαριστούν τεμνόμενα σύνολα. Ως βάρος κάθε κόμβου του γράφου G ανατίθεται η τιμή της υπολογισμένης προτεραιότητας της αντίστοιχης τριάδας του συνόλου V . Στην ουσία το πρόβλημα σύμπτυξης συνόλου ανάγεται στο πρόβλημα εύρεσης μέγιστου σταθμισμένου ανεξάρτητου συνόλου (maximum weight independent set, MWIS) στο γράφο $G=(V,E)$. Εδώ να σημειωθεί ότι ο γράφος G είναι ένας γράφος που δεν περιέχει ένα $K_{1,4}$ διμερή συνεπαγόμενο υπογράφο (4-claw free graph), δεδομένου ότι το σύνολο είναι μεγέθους τρία. Ο αλγόριθμος "Υπολογισμός Προτεινόμενων Ταξιδιών" (Αλγόριθμος 1) που παρουσιάζεται παρακάτω είναι ένας προσεγγιστικός αλγόριθμος

σταθερού παράγοντα για την επίλυση του MWIS προβλήματος στο βεβαρυμμένων κορυφών 4-claw free γράφο G . Ο αλγόριθμος πρώτα ταξινομεί του κόμβους του συνόλου V σε φθίνουσα κατάταξη βάσει των προτεραιοτήτων μετακίνησης π και μετέπειτα υλοποιεί μια άπληστη προσέγγιση για τον υπολογισμό του MWIS του γράφου G , του σύνολο δηλαδή M των προτεινόμενων ταξιδιών τα οποία μπορούν να πραγματοποιηθούν ταυτόχρονα από το μηχανισμό. Η περιγραφή του αλγορίθμου παρουσιάζεται ακολούθως, όπου ως σύνολο $N(A,B)$ ορίζεται το σύνολο
$$N(A,B) = \{v \in B : \exists u \in A \text{ τ.ω. } \{u,v\} \in E \text{ ή } u=v\}$$

Αλγόριθμος 1. Υπολογισμός Προτεινόμενων Ταξιδιών

Είσοδος: Βεβαρυμμένος Γράφος $G(V,E,\pi : V \rightarrow \mathbb{R})$

Έξοδος: Το σύνολο των Προτεινόμενων Ταξιδιών M

1: Διάταξε τους κόμβους του V σε φθίνουσα διάταξη ως προς π

2: $M \leftarrow \emptyset$

3: **Για κάθε** $\phi \in V$ ακολουθώντας τη διάταξη που αναφέρθηκε προηγουμένως **εκτέλεσε**

4: **Αν** $\phi \in V \setminus N(M,V)$ **τότε**

5: $M \leftarrow M \cup \{\phi\}$

6: **Τέλος Αν**

7: **Τέλος Για κάθε**

Αφού εξαχθούν τα ταξίδια τα οποία μπορούν να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα, στόχος είναι η ανάθεση ενός κινήτρου σε κάθε ένα από αυτά τα ταξίδια, έτσι ώστε να ενθαρρυνθούν οι χρήστες να αποδεχτούν το προτεινόμενο ταξίδι.

3.1.4 Παροχή Κινήτρων στους Χρήστες

Ο σχεδιασμός ενός αποδοτικού μηχανισμού παροχής κινήτρων ο οποίος θα αποφασίζει την οικονομική ανταμοιβή των χρηστών στην περίπτωση που αποδεχτούν την πρόταση του συστήματος, απαιτεί μια μοντελοποίηση του τρόπου συμπεριφοράς τόσο των χρηστών όσο και του συστήματος. Όπως έχει ήδη αναφερθεί το σύστημα χρειάζεται να ενθαρρύνει τους χρήστες ώστε να εκτελούν εκείνοι τις μετακινήσεις των οχημάτων έτσι ώστε να μειωθεί το κόστος των μετακινήσεων από το προσωπικό της εταιρίας. Έτσι αποσκοπεί στο να παρέχει κίνητρα στους χρήστες βασιζόμενο στις προτεραιότητες των μετακινήσεων των οχημάτων από σταθμό σε σταθμό, λαμβάνοντας υπόψη τη διακύμανση στη ζήτηση για οχήματα καθώς και για θέσεις στάθμευσης κατά τη διάρκεια της ημέρας. Από την άλλη, οι χρήστες που συμμετέχουν στο σχήμα παροχής κινήτρων κοστολογούν τον επιπλέον κόπο, εκφρασμένο σε επιπλέον χρόνο και απόσταση, ώστε να αλλάξουν τις προτιμήσεις τους (διαφορετικός σταθμός αφετηρίας και/ή σταθμός τερματισμού, διαφορετική χρονική στιγμή αναχώρησης). Συνεπώς προκειμένου να αυξηθεί η πιθανότητα να γίνει αποδεκτή η πρόταση του συστήματος από το χρήστη θα πρέπει η έκπτωση που του προσφέρεται να συμπίπτει με το πως έχει κοστολογήσει εκείνος τον επιπλέον κόπο που θα καταβάλει. Επίσης ο μηχανισμός θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις συμπεριφορές χρηστών κατά τις οποίες γίνεται προσπάθεια να ξεγελαστεί το σύστημα ώστε να αποκτηθεί μεγαλύτερο κέρδος καταβάλλοντας λιγότερο κόπο.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο διαφορετικά σχήματα για την παροχή κινήτρων στους χρήστες. Και τα δύο σχήματα λαμβάνουν υπόψη τους τον περιορισμό στο συνολικό χρηματικό ποσό που μπορεί να διατεθεί από το σύστημα για την απόδοση των χρηματικών κινήτρων. Στο πρώτο σχήμα για την εξαγωγή των κινήτρων δεν λαμβάνεται υπόψη το πόσο κοστολογεί ο κάθε χρήστης τον επιπλέον κόπο που θα καταβάλει για να αλλάξει τις προτιμήσεις του ταξιδιού του. Τα κίνητρα που δίνονται υπολογίζονται βάσει των προτεραιοτήτων των μετακινήσεων από τα προτεινόμενα ταξίδια του αλγορίθμου "Υπολογισμός Προτεινόμενων Ταξιδιών". Ο δεύτερος μηχανισμός υλοποιεί μια συνάρτηση χρησιμότητας (utility function) συσχετίζοντας κάθε υποψήφιο προτεινόμενο ταξίδι του συνόλου V με την προτεραιότητα της αντίστοιχης μετακίνησης οχήματος λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη το δηλωθέν από το χρήστη κόστος για να τροποποιήσει το αρχικό ταξίδι που ήθελε να πραγματοποιήσει. Έπειτα υπολογίζονται το σύνολο M των προτεινόμενων ταξιδιών και η ανταμοιβή (κίνητρα) με βάση την τιμή της συνάρτησης χρησιμότητας και του κόστους που δήλωσαν οι χρήστες.

Και τα δύο σχήματα παρουσιάζουν δυο σημαντικές ιδιότητες. Είναι αληθοφανή (truthful) και οι αποφάσεις τους είναι πάντα βασισμένες στο διαθέσιμο χρηματικό ποσό (budget feasible). Το δεύτερο σχήμα είναι επιπλέον ατομικά ορθολογικό (individual rational), δηλαδή κανένας χρήστης δε μπορεί να λάβει χρηματική ανταπόδοση μικρότερη από αυτήν που δήλωσε ότι θέλει να λάβει σε περίπτωση που αποδεχθεί ένα εναλλακτικό ταξίδι.

Σχήμα 1: Παροχή Κινήτρων Βάσει Προτεραιοτήτων

Το συνολικό ποσό, B , που είναι διαθέσιμο για επιστροφή προς τους χρήστες, ως χρηματική ανταμοιβή, ορίζεται ως ένα ποσοστό του συνολικού ποσού το οποίο πρόκειται να λάβει το σύστημα στην περίπτωση που πραγματοποιηθούν τα ταξίδια των αιτημάτων των χρηστών, του συνόλου δηλαδή R . Έστω $M = \{\phi_1, \dots, \phi_\ell\}$, $\ell \leq |R|$ η έξοδος του αλγορίθμου "Υπολογισμός Προτεινόμενων Ταξιδιών", το σύνολο δηλαδή των ταξιδιών τα οποία μπορούν να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα από το σύστημα. Έστω επίσης $R' = \{R_1, \dots, R_\ell\}$, $R' \subset R$, το σύνολο των διακριτών αιτημάτων χρηστών έτσι ώστε το αίτημα R_j να αντιστοιχεί στο προτεινόμενο ταξίδι ϕ_j , $j \in \{1, \dots, \ell\}$. Για κάθε $R_j \in R'$ ορίζεται ως z_j το κόστος το οποίο θα πληρώσει κάθε χρήστης σε περίπτωση που αποδεχθεί το αντίστοιχο προτεινόμενο ταξίδι. Το κόστος αυτό ορίζεται από το ίδιο το σύστημα διαμοιρασμού οχημάτων. Για παράδειγμα αν ο τρόπος κοστολόγησης των ταξιδιών γίνεται με βάση την απόσταση, τότε το κόστος z_j μπορεί να προσδιοριστεί βάσει την απόσταση μεταξύ των σταθμών αφετηρίας και τερματισμού του αιτήματος R_j του χρήστη, του ταξιδιού δηλαδή το οποίο είναι σύμφωνο με την αρχική δήλωση του χρήστη. Βάσει των προαναφερθέντων, το συνολικό ποσό που θα διατεθεί από το σύστημα προς τους χρήστες ως ανταπόδοση μπορεί να ισούται με $A \cdot \sum_{R_j \in R'} z_j$, όπου ο παράγοντας A είναι μια θετική σταθερά μικρότερη του ένα. Η σταθερά αυτή ορίζεται από το σύστημα και στην ουσία προσδιορίζει το ποσοστό των εσόδων του συστήματος το οποίο θα διατεθεί στους χρήστες.

Για τον προσδιορισμό του ποσού του χρηματικού κινήτρου που θα διατεθεί στους χρήστες ή αλλιώς του ποσοστού α_j του αρχικού κόστους z_j , $j \in \{1, \dots, \ell\}$ του ποσού που ήταν αρχικά να πληρώσει ο χρήστης, ορίζεται μία παράμετρος $b < 1$ η οποία υποδεικνύει το ελάχιστο ποσοστό του κόστους το οποίο πρέπει να πληρωθεί από κάθε χρήστη ο οποίος θα επιλέξει το προτεινόμενο ταξίδι που ανήκει στο σύνολο M . Για κάθε

$\phi_j \in M$ ορίζεται η αντίστοιχη προτεραιότητα του ταξιδιού, έστω π_j . Ορίζεται επίσης η φθίνουσα συνάρτηση α στο σύνολο των προτεραιοτήτων των μετακινήσεων ως εξής: $\alpha: \mathbb{R}_+ \rightarrow [b, 1]$, $\alpha(0) = 1$ και $\alpha(\infty) = b$. Ένα παράδειγμα της συνάρτησης αυτής, θα μπορούσε να είναι η συνάρτηση $\alpha(\pi) = b + (1 - b)e^{-\pi}$. Εναλλακτικά, αν οριστεί ως π_{\max} η ελάχιστη τιμή προτεραιοτήτων, η συνάρτηση α μπορεί να οριστεί ως $\alpha = [0, \pi_{\max}] \rightarrow [b, 1]$, $\alpha(\pi_{\max}) = b$, $\alpha(0) = 1$ και $\alpha(\pi) = 1 - (1 - b)\left(\frac{\pi}{\pi_{\max}}\right)$, $0 \leq \pi \leq \pi_{\max}$.

Τέλος τίθεται το ποσοστό α_j ίσο με $\alpha(\pi_j)$, $j = 1, \dots, \ell$ και προσδιορίζεται η παράμετρος b λύνοντας ως προς b την εξίσωση $\sum_{R_{ij} \in R'} \alpha_j z_j = \sum_{R_{ij} \in R'} z_j - B$. Από τα παραπάνω γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι προτάσεις του μηχανισμού αυτού είναι σύμφωνες με το διαθέσιμο χρηματικό ποσό B , το οποίο και δεν μπορούν να ξεπεράσουν.

Ως προς την ιδιότητα της αληθοφάνειας του σχήματος, αυτή μπορεί να ελεγχθεί ως εξής: αρχικά ορίζεται ο όρος κέρδος χρησιμότητας (utility gain) ως η ταυτόχρονη αύξηση της προσφερόμενης από το σύστημα έκπτωσης και η μείωση της απόστασης από το σημείο εκκίνησης προς το σταθμό αφετηρίας. Οι χρήστες παρόλο που δε δηλώνουν το ποσό που θέλουν να λάβουν ως ανταμοιβή ώστε να επιλέξουν το προτεινόμενο ταξίδι, μπορούν να δηλώσουν εσφαλμένα στοιχεία ως προς τις επιλογές του ταξιδιού. Μπορούν για παράδειγμα να δηλώσουν διαφορετικό σημείο εκκίνησης του ταξιδιού ή διαφορετικό σημείο τερματισμού. Μια τέτοια ενέργεια αλλάζει το σύνολο των προσβάσιμων σε αυτούς σταθμών και επομένως το σύνολο των υποψήφιων προτεινόμενων ταξιδιών. Σε περίπτωση εσφαλμένης δήλωσης της αρχικής θέσης στο χρήστη μπορεί να προσφερθεί το ίδιο ταξίδι, άρα και η ίδια έκπτωση είτε κάποιο διαφορετικό, με διαφορετικό σταθμό αφετηρίας για παράδειγμα. Ο σταθμός αυτός θα είναι σίγουρα πιο μακριά, αφού η πραγματική θέση του χρήστη είναι διαφορετική. Αν το ταξίδι αυτό έχει χαμηλότερη προτεραιότητα από το ταξίδι που θα έκανε αν είχε δηλώσει την πραγματική του θέση, θα λάβει μικρότερη έκπτωση, ενώ αν έχει μεγαλύτερη προτεραιότητα θα λάβει μεγαλύτερη έκπτωση. Όμως παρόλο που θα έχει λάβει μεγαλύτερη έκπτωση θα έχει περπατήσει μεγαλύτερη απόσταση για να προσεγγίσει τον πιο απομακρυσμένο σταθμό, άρα συνολικά η ποσότητα του κέρδους χρησιμότητας δε θα έχει αυξηθεί.

Σχήμα II – Παροχή Κινήτρων Βάσει Προτεραιοτήτων και Αιτούμενου Κόστους

Δεδομένου ενός συνόλου από αιτήματα για ενοικίαση οχημάτων $R = \{R_1, \dots, R_k\}$ και του αντίστοιχου συνόλου των εφικτών ταξιδιών V , όπως αυτό ορίστηκε στην ενότητα 3.1.3, συσχετίζεται κάθε υποψήφιο προτεινόμενο ταξίδι $\phi = (R_i, s_p^\alpha(t_p), s_d^\epsilon(t_d))$ που ανήκει στο σύνολο V με μία ποσότητα χρησιμότητας (utility) u_ϕ που αντιστοιχεί στην προτεραιότητα μετακίνησης του οχήματος $s_p^\alpha(t_p)$ προς τη θέση στάθμευση $s_d^\epsilon(t_d)$. Συγκεκριμένα, $u_\phi = D \cdot \pi_\phi$, όπου D είναι μία σταθερά και π_ϕ είναι η προτεραιότητα μετακίνησης. Επίσης συσχετίζεται το προτεινόμενο ταξίδι ϕ με ένα κόστος c_i το οποίο αντιστοιχεί στο χρηματικό ποσό με το οποίο ο χρήστης, με αντίστοιχο αίτημα R_i , κοστολογεί τον επιπλέον χρόνο που ξοδεύει ή την επιπλέον απόσταση που περπατάει προκειμένου να αλλάξει το σταθμό προορισμού ή/και το σταθμό τερματισμού. Να σημειωθεί ότι η ποσότητα c_i είναι μηδενική για την περίπτωση που ο χρήστης δε συμμετέχει στο μηχανισμό παροχής κινήτρων.

Ο Υπολογισμός Ταξιδιών και Αποζημιώσεων (Αλγόριθμος 3) υλοποιεί το Σχήμα II παροχής κινήτρων. Ο αλγόριθμος αυτός αποφασίζει το σύνολο των προτεινόμενων ταξιδιών και των αποζημιώσεων στους αντίστοιχους χρήστες λαμβάνοντας υπόψη το κόστος των χρηστών c_i , $i=1,\dots,k$, τις χρησιμότητες u_ϕ , $\phi \in V$, και του συνολικού χρηματικού ποσού B που μπορεί να αποδώσει ως αποζημίωση στους χρήστες το σύστημα. Οι αποζημιώσεις παρουσιάζουν ομοιομορφία, με την έννοια ότι αν ένα αίτημα R_i και του αντίστοιχου προτεινόμενου ταξιδιού $\phi = (R_i, s_p^\alpha(t_p), s_d^\varepsilon(t_d))$ γίνει αποδεκτό από το σύστημα τότε ο χρήστης θα αποζημιωθεί με μια ποσότητα $r_i = r \cdot u_\phi$, όπου ο συντελεστής r είναι ίδιος για όλα τα αιτήματα που γίνονται αποδεκτά. Φυσικά το συνολικό ποσό της αποζημίωσης για όλους δε θα πρέπει να ξεπερνάει την ποσότητα B .

Το σχήμα παροχής κινήτρων είναι εμπνευσμένο από το μηχανισμό που παρουσιάζεται στο [39]. Υπολογίζει το γράφο τομής $G = (V, E)$ του συνόλου V περιέχοντας ένα κόμβο για κάθε τριάδα (υποψήφιο προτεινόμενο ταξίδι) $\phi = (R_i, s_p^\alpha(t_p), s_d^\varepsilon(t_d))$ στο σύνολο V . Κάθε κορυφή ϕ του συνόλου V σχετίζεται με μία ποσότητα που ορίζεται ως $\rho\theta\mu\acute{o}\varsigma(\phi) = c_i / u_\phi$ και αντιστοιχεί στο ποσό που θα πρέπει να πληρώσει το σύστημα τον χρήστη ανά μονάδα χρησιμότητας. Έπειτα οι κόμβοι του συνόλου V ($|V| = K$) ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά με βάση την ποσότητα του $\rho\theta\mu\acute{o}\varsigma$. Δηλαδή αν ϕ_1, \dots, ϕ_k είναι η ταξινομημένη λίστα των κόμβων, τότε για $i < j$ ισχύει $\rho\theta\mu\acute{o}\varsigma(\phi_j) < \rho\theta\mu\acute{o}\varsigma(\phi_i)$.

Το σχήμα παροχής κινήτρων θεωρεί μια αντιμετάθεση σ των κόμβων του συνόλου V . Εκκινεί επεξεργαζόμενο τον αρχικό γράφο G . Αποτελείται από το πολύ K επαναλήψεις, όπου σε κάθε επανάληψη τροποποιείται ο γράφος G . Συγκεκριμένα, σε κάθε επανάληψη i υπολογίζεται ένα ανεξάρτητο σύνολο M του τρέχοντος γράφου G καθώς επίσης η χρησιμότητα $u(M) = \sum_{\phi \in M} u_\phi$ του συνόλου M . Για την κατασκευή του ανεξάρτητου συνόλου έχει υλοποιηθεί ο αλγόριθμος "Εύρεση Ανεξάρτητου Συνόλου" (Αλγόριθμος 2). Έπειτα εφόσον το γινόμενο $\rho\theta\mu\acute{o}\varsigma(\phi_i) \cdot u(M)$ ξεπερνάει την ποσότητα B ο κόμβος ϕ αφαιρείται από το γράφο, με την επόμενη επανάληψη να ακολουθεί.

Σε κάθε επανάληψη ο γράφος περιέχει κόμβους με τιμές μικρότερες ή ίσες της $\rho\theta\mu\acute{o}\varsigma(\phi_{i-1})$. Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν η ποσότητα $\rho\theta\mu\acute{o}\varsigma(\phi_i) \cdot u(M)$ είναι μικρότερη ή ίση του συνολικού ποσού διαθέσιμο για την αποζημίωση των χρηστών B .

Ο συντελεστής r τίθεται ίσος με $\min \left\{ \frac{B}{u(M)}, \rho\theta\mu\acute{o}\varsigma(\phi_{i-1}) \right\}$. Ο αλγόριθμος "Εύρεση

Ανεξάρτητου Συνόλου" λαμβάνει ως είσοδο μια αντιμετάθεση των κόμβων του συνόλου V . Όταν επεξεργάζεται ένας κόμβος του συνόλου V που αντιστοιχεί σε ένα υποψήφιο προτεινόμενο ταξίδι $\phi = (R_i, s_p^\alpha(t_p), s_d^\varepsilon(t_d))$ του αιτήματος R_i , τότε η τριάδα $\phi' = (R_i, s_{p'}^\alpha(t_{p'}), s_{d'}^\varepsilon(t_{d'})) \in V$ με την μεγαλύτερη τιμή της ποσότητας u_ϕ από όλα τα υποψήφια προτεινόμενα ταξίδια που αφορούν το αίτημα R_i επιλέγεται ώστε να προστεθεί στο ανεξάρτητο σύνολο M . Η τριάδα αυτή ϕ' ορίζεται ως προτεινόμενο ταξίδι του συνόλου M με τιμή χρησιμότητας ίση με $u^{R_i}(M)$. Το ανεξάρτητο σύνολο M

εξάγεται μετά την επεξεργασία όλων των κόμβων του V καθώς και των αντίστοιχων ποσοτήτων χρησιμότητας $u(M) = \sum_{\phi \in M} u^{\phi}(M)$.

Αλγόριθμος 2. Εύρεση Ανεξάρτητου Συνόλου

Είσοδος: Γράφος Τομής $G(V, E, u: V \rightarrow \mathbb{R})$, Αντιμετάθεση σ

Έξοδος: Ανεξάρτητο Σύνολο M του G

1: $M \leftarrow \emptyset$;

2: $K = |V|$;

3: **Για** $i \leftarrow 1$ έως K **εκτέλεσε**

4: **Αν** $\sigma(i) = (R_i, s_p^\alpha(t_p), s_d^\epsilon(t_d)) \in V$ **τότε**

5: Βρες την τριάδα $\phi' = (R_i, s_{p'}^{\alpha'}(t_{p'}), s_{d'}^{\epsilon'}(t_{d'})) \in V$ που να έχει μέγιστη τιμή για $u_{\phi'}$;

6: **Τέλος Αν**

7: $M \leftarrow M \cup \{\phi'\}$;

8: $V \leftarrow V \setminus N(\{\phi'\}, V)$;

9: **Τέλος Για**

Αλγόριθμος 3. Υπολογισμός Ταξιδιών και Αποζημιώσεων

Είσοδος: Γράφος Τομής $G(V, E, \text{ρυθμός}: V \rightarrow \mathbb{R})$, Συνολικό Χρηματικό Ποσό B , Αντιμετάθεση σ

Έξοδος: Το σύνολο των Προτεινόμενων Ταξιδιών M , Ρυθμός Αποζημίωσης r

1: $G'(V', E') \leftarrow G(V, E)$;

2: **Για** $i \leftarrow 1$ έως $|V|$ **εκτέλεσε**

3: $M \leftarrow$ Εύρεση Ανεξάρτητου Συνόλου(G', σ);

4: **Αν** $\text{ρυθμός}(\phi_i) \cdot u(M) \leq B$ **τότε**

5: $r \leftarrow \min \left\{ \frac{B}{u(M)}, \text{ρυθμός}(\phi_{i-1}) \right\}$;

6: έξοδος από το βρόχο;

7: **Τέλος Αν**

8: $V' \leftarrow V' \setminus \{\phi_i\}$;

9: **Τέλος Για**

Το συνολικό διαθέσιμο ποσό B για την αποζημίωση των χρηστών στον αλγόριθμο "Υπολογισμός Ταξιδιών και Αποζημιώσεων" υπολογίζεται όπως και στο σχήμα που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα με τη διαφορά ότι χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος "Εύρεση Ανεξάρτητου Συνόλου" αντί για τον αλγόριθμο "Υπολογισμός

Προτεινόμενων Ταξιδιών". Η έξοδος του σχήματος αυτού, όπως και του προηγούμενου σχήματος, είναι πάντα σύμφωνες με το διαθέσιμο ποσό και δεν το ξεπερνούν ποτέ. Δεν υπάρχει δηλαδή η πιθανότητα το συνολικό ποσό των αποζημιώσεων που επιστρέφονται στους χρήστες να είναι μεγαλύτερο του ποσού B . Για την απόδειξη του παραπάνω, έστω $r \cdot u^{R_i}(M)$ η αποζημίωση για κάθε αίτημα για ενοικίασης οχήματος R_i . Δεδομένου ότι $r \leq B/u(M)$ για τη συνολική αποζημίωση ισχύει ότι $\sum_{\phi \in M} r \cdot u^{R_i}(M) \leq B$.

Η αποζημίωση που προσφέρεται από το σχήμα αυτό σε κάθε χρήστη είναι πάντα σύμφωνη με την απαίτηση του ίδιου του χρήστη. Δεν μπορεί σε κάποιο αίτημα R_i να αποδοθεί λιγότερη αποζημίωση από το κόστος c_i που αντιστοιχεί στο πόσο κοστολογεί ο χρήστης τον επιπλέον κόπο που θα καταβάλει και χρόνο που θα αφιερώσει ώστε να πάει σε ένα διαφορετικό σταθμό αφετηρίας ή/και σταθμό προορισμού. Για την απόδειξη της ιδιότητας αυτής, έστω $G' = (V', E')$ ο γράφος μετά τον τερματισμό του μηχανισμού. Τότε για κάθε $\phi = (R_i, s_p^\alpha(t_p), s_d^\varepsilon(t_d)) \in V'$ ισχύει ότι $c_i/u_\phi \leq r$. Αν $\phi' = (R_i, s_p^{\alpha'}(t_p'), s_d^{\varepsilon'}(t_d')) \in V$ είναι ένα προτεινόμενο ταξίδι στο σύνολο M τότε ισχύει ότι $c_i/u^{R_i}(M) \leq r$. Συνεπώς $c_i \leq r \cdot u^{R_i}(M) = r_i$.

3.1.5 Προσδιορισμός Προτεραιοτήτων

Για τον προσδιορισμό των προτεραιοτήτων έστω το ζεύγος σταθμών s_p και s_d και έστω η μετακίνηση οχήματος από το σταθμό s_p στο σταθμό s_d κατά τις χρονικές στιγμές t_p και t_d αντίστοιχα. Ορίζεται η ποσότητα $\delta_p(t) = o_p(t_p) - w_p(t_p)$ ως το πλεόνασμα των οχημάτων ως προς το πλήθος των επιθυμητών οχημάτων στο σταθμό αφετηρίας κατά τη χρονική στιγμή t_p . Αντίστοιχα ορίζεται ως $\delta_d(t) = w_d(t_d) - o_d(t_d)$ το πλεόνασμα των ελεύθερων θέσεων στάθμευσης ως προς τον επιθυμητό αριθμό αυτών, στο σταθμό τερματισμού. Οι δύο αυτές ποσότητες χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της προτεραιότητας μετακίνησης ενός οχήματος $\alpha \in \{1, \dots, o_p(t_p)\}$ που ανήκει στο σταθμό s_p προς μια οποιαδήποτε θέση στάθμευσης $\varepsilon \in \{1, \dots, c_d - o_d(t_d)\}$ του σταθμού s_d . Οι προτεραιότητες αυτές μπορούν να χαρακτηριστούν και ως σημείο προς σημείο προτεραιότητες, αφού αναφέρονται σε συγκεκριμένα ζεύγη οχημάτων-θέσεων στάθμευσης και όχι γενικότερα από σταθμό σε σταθμό. Δηλαδή σε μια προτεραιότητα μετακίνησης από το σταθμό s_i στο σταθμό s_j μπορεί να δοθεί διαφορετική προτεραιότητα από μια άλλη μετακίνηση μεταξύ του ίδιου ζεύγους σταθμών και για τις ίδιες χρονικές στιγμές. Η ποσότητα $\delta_p^\alpha(t)$ χρησιμοποιείται για την αναφορά στο πλεόνασμα των οχημάτων αν όλα τα οχήματα $\{\alpha + 1, \dots, o_p(t_p)\}$ έχουν ήδη μετακινηθεί από το σταθμό s_p τη χρονική στιγμή t_p . Επίσης η ποσότητα $\delta_d^\varepsilon(t)$ χρησιμοποιείται αντίστοιχα αν όλες οι θέσεις στάθμευσης $\{\varepsilon + 1, \dots, c_d\}$ στο σταθμό s_d έχουν ήδη καλυφθεί κατά τη χρονική στιγμή t_d . Η συνάρτηση $\pi = \pi(s_p, s_d, t_p, t_d, \alpha, \varepsilon)$ θα ευνοεί τις μετακινήσεις όπου τόσο οι ποσότητες $\delta_p^\alpha(t)$ και $\delta_d^\varepsilon(t)$ είναι θετικές και αντιθέτως θα αποθαρρύνει τις μετακινήσεις όπου και οι δύο αυτές ποσότητες είναι μικρότερες του μηδενός. Στην περίπτωση που μία από τις δύο είναι μικρότερη του μηδενός, τότε ανατίθεται κάποια ενδιάμεση τιμή προτεραιότητας.

Η αναγκαιότητα των σημείο προς σημείο προτεραιοτήτων σε σύγκριση με των προτεραιοτήτων σταθμό προς σταθμό βασίζεται στην παρατήρηση ότι αν για ένα σύνολο μετακινήσεων από ένα σταθμό A σε ένα σταθμό B καθοριστεί υψηλή προτεραιότητα, τότε κάθε αλγόριθμος που βασίζεται στην εύρεση ενός μέγιστου βεβαρυμμένου ανεξάρτητου συνόλου θα μπορέσει εύκολα να επιλέξει τις προαναφερθείσες μετακινήσεις και να οδηγήσει το σύστημα στο επιθυμητό αριθμό οχημάτων για τους σταθμούς A και B, ενώ παράλληλα άλλες μετακινήσεις που δεν οδηγούν στην επιθυμητή κατανομή οχημάτων θα απορριφθούν. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πρέπει να μειώνεται η προτεραιότητα μετακίνησης όταν πλησιάζεται ο επιθυμητός αριθμός οχημάτων σε ένα σταθμό. Τα παραπάνω συμπεράσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στην παρακάτω αναλυτική μορφή της συνάρτησης προτεραιοτήτων $\pi(s_p^\alpha(t_p), s_d^\varepsilon(t_d)) =$

$$= \begin{cases} 0.5 \left(1 - \frac{\delta_p^\alpha(t_p) \delta_d^\varepsilon(t_d)}{w_p(t_p)(c_d - w_d(t_d))} \right) & , \delta_p^\alpha(t_p) < 0 \text{ και } \delta_d^\varepsilon(t_d) < 0 \\ 1.5 + \frac{\delta_p^\alpha(t_p) \varepsilon}{w_p(t_p) w_d(t_d)} & , \delta_p^\alpha(t_p) < 0 \text{ και } \delta_d^\varepsilon(t_d) > 0 \\ 1.5 + \frac{(c_p - \alpha) \delta_d^\varepsilon(t_d)}{(c_p - w_p(t_p))(c_d - w_d(t_d))} & , \delta_p^\alpha(t_p) > 0 \text{ και } \delta_d^\varepsilon(t_d) < 0 \\ 2 + \frac{\delta_p^\alpha(t_p) \delta_d^\varepsilon(t_d)}{(c_p - w_p(t_p)) w_d(t_d)} & , \delta_p^\alpha(t_p) > 0 \text{ και } \delta_d^\varepsilon(t_d) > 0 \end{cases}$$

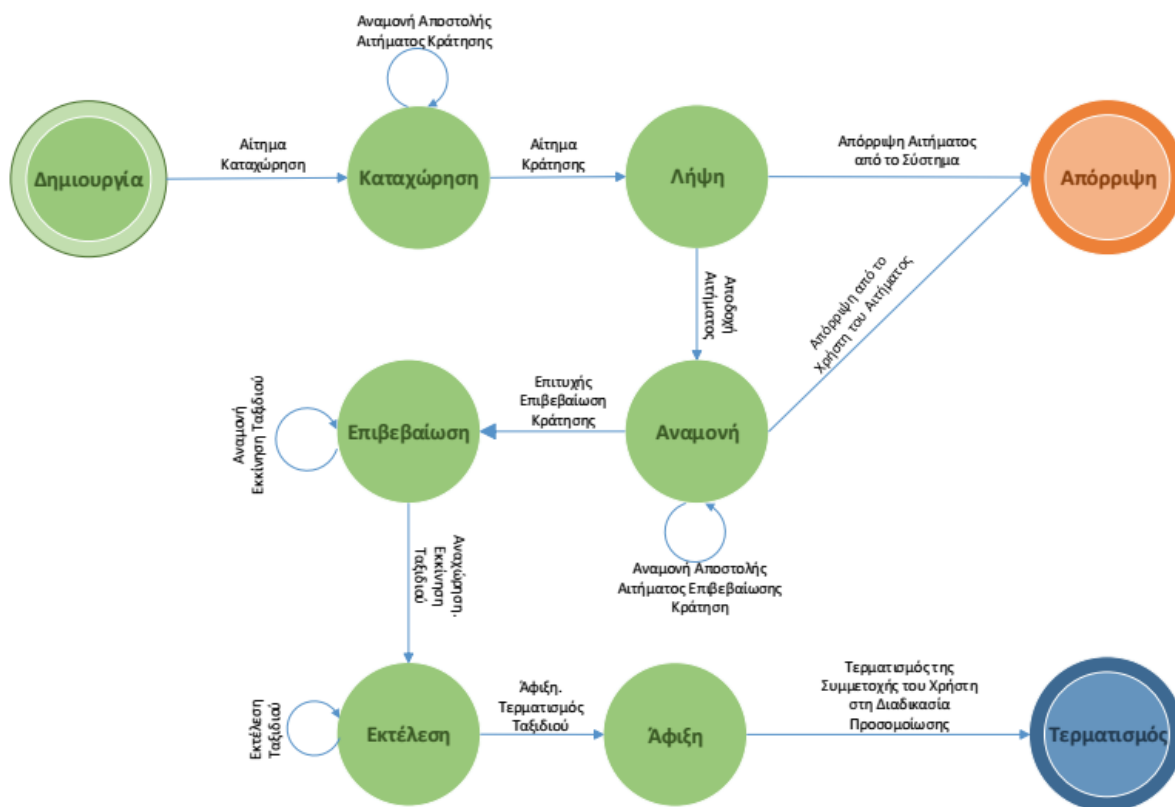
Το πεδίο τιμών όπως μπορεί να παρατηρηθεί είναι το σύνολο $[0, 1.5] \cup (2, 3]$. Για τα σημεία ασυνέχειας μπορούν να επιλεγούν ενδιάμεσες τιμές, όπως για παράδειγμα $\delta_p^\alpha(t) = 0, \delta_d^\varepsilon(t) = 0 \Rightarrow \pi(\cdot) = 1.75$.

3.2 Αξιολόγηση - Αποτελέσματα

Η αξιολόγηση των δύο μηχανισμών παροχής κινήτρων που περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες έγινε με την υλοποίηση ενός προσομοιωτή διακριτών γεγονότων (DES). Ο προσομοιωτής αναπτύχθηκε με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Java. Η βασική του λειτουργία είναι η δημιουργία και προσομοίωση χρηστών οι οποίοι πραγματοποιούν αιτήματα για ενοικίαση οχημάτων. Ο κάθε χρήστης που δημιουργείται κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης έχει κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως το σημείο από το οποίο θέλει να ξεκινήσει το ταξίδι του, το σημείο τερματισμού καθώς και το χρόνο αναχώρησης. Επίσης δηλώνει αν θέλει να συμμετέχει στο μηχανισμό παροχής κινήτρων και στην περίπτωση αυτή, δηλώνει επιπλέον και τον χρόνο που είναι διατεθειμένος να ξοδέψει για τη διαδρομή που δεν περιλαμβάνει όχημα (προς το σταθμό αφετηρία και από το σταθμό τερματισμού στο τερματικό σημείο). Οι ενέργειες των χρηστών κατά τη διάρκεια συμμετοχής τους στην προσομοίωση είναι συγκεκριμένες και ορίζονται βάσει μιας μηχανής πεπερασμένων καταστάσεων (FSM), η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3. Οι καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί ένας χρήστης είναι οι εξής:

- **Δημιουργία:** Είναι η αρχική κατάσταση στην οποία μπορεί να βρεθεί ένας χρήστης. Στο στάδιο αυτό δημιουργείται ο χρήστης και ορίζονται τα χαρακτηριστικά του που προαναφέρθηκαν.

- **Καταχώρηση:** Μετά τη δημιουργία ενός χρήστη γίνεται ένα αίτημα καταχώρησης στη βάση του συστήματος. Με το αίτημα αυτό δημιουργείται μια νέα καταχώρηση στη βάση δεδομένων του συστήματος και αποθηκεύονται οι προτιμήσεις του χρήστη. Έπειτα ο χρήστης μπορεί να παραμείνει στην κατάσταση αυτή ή να μεταβεί στην επόμενη αν πραγματοποιήσει ένα αίτημα για ενοικίαση οχήματος.
- **Λήψη:** στο στάδιο αυτό έχει πραγματοποιηθεί το αίτημα για ενοικίαση οχήματος και ο χρήστης έχει λάβει την απάντηση του συστήματος. Η απάντηση του συστήματος μπορεί να είναι θετική ή αρνητική. Στην πρώτη περίπτωση προτείνεται στο χρήστη ένα από τα ταξίδια που ανήκουν στο σύνολο των εφικτών ταξιδιών ενώ στη δεύτερη περίπτωση είτε λόγω έλλειψης οχήματος στο σταθμό εκκίνησης είτε λόγω έλλειψης θέσης στάθμευσης στο σταθμό τερματισμού είτε λόγω του ότι το αίτημα απορρίφθηκε από το μηχανισμό, ο χρήστης ειδοποιείται ότι το αίτημα του δεν μπορεί να ικανοποιηθεί.
- **Αναμονή:** Στο στάδιο αυτό βρίσκεται ο χρήστης αφού έχει λάβει την απάντηση του συστήματος και για όσο διάστημα δεν επιβεβαιώνει το αίτημα για ενοικίαση.
- **Επιβεβαίωση:** Στο στάδιο αυτό μεταβαίνει ο χρήστης μετά από ένα επιτυχές αίτημα για ολοκλήρωση/επιβεβαίωση του αιτήματος ενοικίασης. Αυτό σημαίνει ότι ένα όχημα στο σταθμό αφετηρίας καθώς και μια θέση στάθμευσης στο σταθμό τερματισμού δεσμεύονται. Το όχημα παραμένει δεσμευμένο/κλειδωμένο από τη στιγμή της λήψης του αιτήματος επιβεβαίωσης μέχρι τη στιγμή αναχώρησης και η θέση στάθμευσης μέχρι την άφιξη του οχήματος. Στη κατάσταση αυτή παραμένει μέχρι την εκκίνηση του ταξιδιού.
- **Εκτέλεση:** Στην κατάσταση αυτή βρίσκεται ο χρήστης από τη στιγμή της εκκίνησης του ταξιδιού μέχρι τη στιγμή του τερματισμού του ταξιδιού.
- **Άφιξη:** Ο τερματισμός του ταξιδιού συνεπάγεται τη μετάβαση του χρήστη στην κατάσταση αυτή. Στο σημείο αυτό το όχημα είναι και πάλι ελεύθερο και μπορεί να εκτελέσει ένα επόμενο ταξίδι.
- **Τερματισμός:** Είναι μια από τις δύο τελικές καταστάσεις του FSM και σημαίνει την επιτυχή ολοκλήρωση της διαδικασίας του αιτήματος για ενοικίαση οχήματος. Όταν ο χρήστης καταλήγει στην κατάσταση αυτή σημαίνει ότι ολοκλήρωσε επιτυχώς το αίτημα ενοικίασης καθώς και το ταξίδι του.
- **Απόρριψη:** Είναι τελική κατάσταση του FSM και η μετάβαση στην κατάσταση αυτή συνεπάγεται μη επιτυχή διαδικασία ενοικίασης οχήματος. Στην κατάσταση αυτή μεταβαίνει ο χρήστης από την κατάσταση *Λήψης* στην περίπτωση που το αίτημά του για ενοικίαση οχήματος απορριφθεί από το σύστημα. Επίσης μπορεί να μεταβεί στην κατάσταση αυτή από την κατάσταση *Αναμονή*. Για όσο χρόνο ο χρήστης δεν αποστέλλει ένα αίτημα επιβεβαίωσης για το ταξίδι που του έχει προταθεί, δεν παρέχεται καμία εγγύηση από το σύστημα ότι το ταξίδι του θα παραμείνει εφικτό μέχρι τη στιγμή που θα αποφασίσει να το επιβεβαιώσει. Κατά τη διάρκεια αυτή μπορεί το όχημα ή η θέση στάθμευσης που ήταν να του αποδοθούν να δοθούν τελικά σε κάποιον άλλο χρήστη από ένα μεταγενέστερο αίτημα ενοικίασης. Επίσης λόγω της άφιξης νέων αιτημάτων το προτεινόμενο από το σύστημα ταξίδι μπορεί να αλλάξει και η νέα πρόταση να μην τον ικανοποιεί, απορρίπτοντας και τερματίζοντας εκείνος τη διαδικασία ενοικίασης.



Σχήμα 3.3: Μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων του προσομοιωτή

Τα αιτήματα των χρηστών που γεννούνται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης αποστέλλονται σε έναν εξυπηρετητή για την περαιτέρω διαχείρισή τους. Η επικοινωνία του προσομοιωτή με τον εξυπηρετητή γίνεται καλώντας κάθε φορά κατάλληλες υπηρεσίες ιστού (web services). Οι υπηρεσίες ιστού δομήθηκαν ως RESTful υπηρεσίες και τα μηνύματα που αποστέλλονται μεταξύ του εξυπηρετητή και του προσομοιωτή μορφοποιήθηκαν ως JSON μηνύματα. Ο εξυπηρετητής τρέχει σε περιβάλλον Linux και χρησιμοποιήθηκε η MySQL ως σύστημα διαχείρισης βάσεων δεδομένων (DBMS). Ο μηχανισμός παροχής κινήτρων τρέχει στον εξυπηρετητή και υλοποιήθηκε με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού C++. Ο εξυπηρετητής υλοποιήθηκε στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος FP7 MOVESMART [40] και τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε να διαχειρίζεται τα αιτήματα του προσομοιωτή. Οι οντότητες που λαμβάνουν μέρος στη διαδικασία της προσομοίωσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.4.

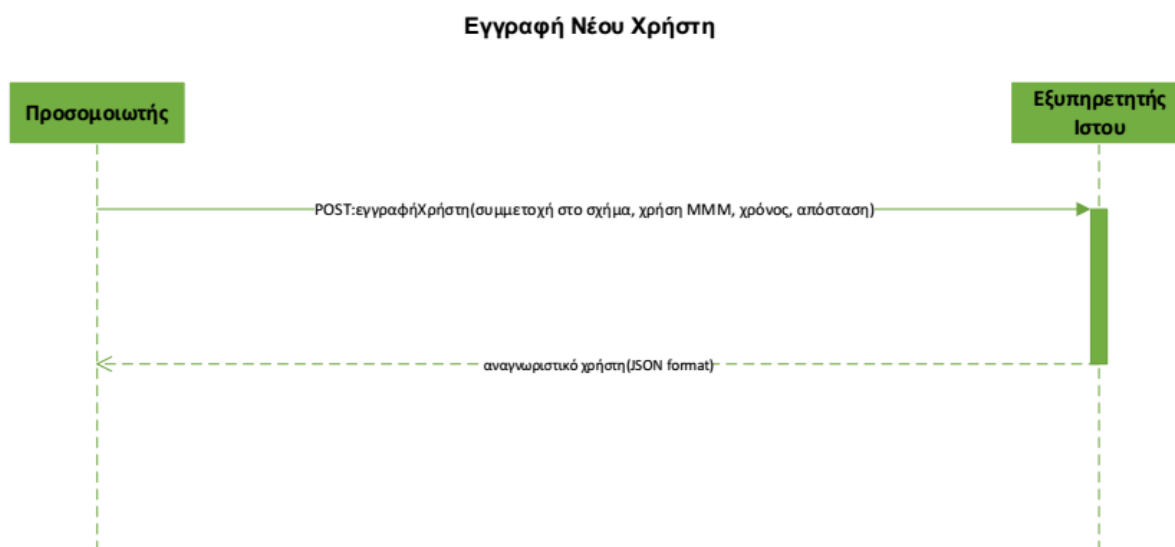


Σχήμα 3.4: Οντότητες που λαμβάνουν μέρος στην διαδικασία της προσομοίωσης

Η επικοινωνία του προσομοιωτή με τον εξυπηρετητή και συγκεκριμένα τα μηνύματα που ανταλλάσσονται για την διεκπεραίωση των απαραίτητων λειτουργιών παρουσιάζονται παρακάτω.

Καταχώρηση Νέου Χρήστη

Για την εγγραφή ενός χρήστη ο προσομοιωτής στέλνει ένα αίτημα εγγραφής στον εξυπηρετητή ιστού. Το αίτημα αυτό περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά του χρήστη και συγκεκριμένα την επιθυμία του για συμμετοχή στον μηχανισμό ανακατανομή οχημάτων καθώς και το εάν είναι πρόθυμος να χρησιμοποιήσει μέσα μαζικής μεταφοράς για να προσεγγίσει κάποιον σταθμό. Στην περίπτωση που είναι πρόθυμος να συμμετάσχει στο μηχανισμό το αίτημα περιλαμβάνει και το χρόνο που είναι διατεθειμένος να ξοδέψει καθώς και την απόσταση που θέλει να περπατήσει ώστε να προσεγγίσει ένα σταθμό. Το σύστημα αποκρίνεται με ένα μήνυμα επιβεβαίωσης το οποίο περιλαμβάνει και το αναγνωριστικό του χρήστη σε περίπτωση επιτυχούς εγγραφής ή με ένα μήνυμα σφάλματος σε περίπτωση που συνέβη κάποιο λάθος. Το αναγνωριστικό αυτό είναι μοναδικό για κάθε χρήστη.



Σχήμα 3.5: UML διάγραμμα ακολουθίας για τη διαδικασία εγγραφής χρήστη

Αίτημα για Ενοικίαση Οχήματος

Όπως προαναφέρθηκε η ενοικίαση οχήματος απαιτεί την αποστολή ενός αιτήματος προς το σύστημα. Το αίτημα αυτό περιλαμβάνει το αναγνωριστικό του χρήστη, την τοποθεσία από την οποία επιθυμεί να ξεκινήσει το ταξίδι του καθώς και την τοποθεσία τερματισμού και το χρόνο εκκίνησης. Το σύστημα αφού λάβει το αίτημα κατασκευάζει το σύνολο των εφικτών ταξιδιών και το αποστέλλει στο μηχανισμό για την περαιτέρω

διεκπεραίωση του αιτήματος. Η επικοινωνία του εξυπηρετητή με το μηχανισμό γίνεται μέσω υποδοχέων (sockets) και με χρήση του πρωτοκόλλου TCP. Η επιστροφή του μηχανισμού περιλαμβάνει το προτεινόμενο ταξίδι του συστήματος. Ο εξυπηρετητής έπειτα αποστέλλει τα στοιχεία του ταξιδιού στον χρήστη. Αυτά αποτελούνται από το αναγνωριστικό της κράτησης, το αναγνωριστικό του ταξιδιού, το σταθμό αφετηρίας και τερματισμού και την ώρα αναχώρησης. Επίσης στην περίπτωση που ο χρήστη συμμετέχει στο μηχανισμό, στην απόκριση περιλαμβάνεται επίσης και η έκπτωση που προσφέρεται στο χρήστη.

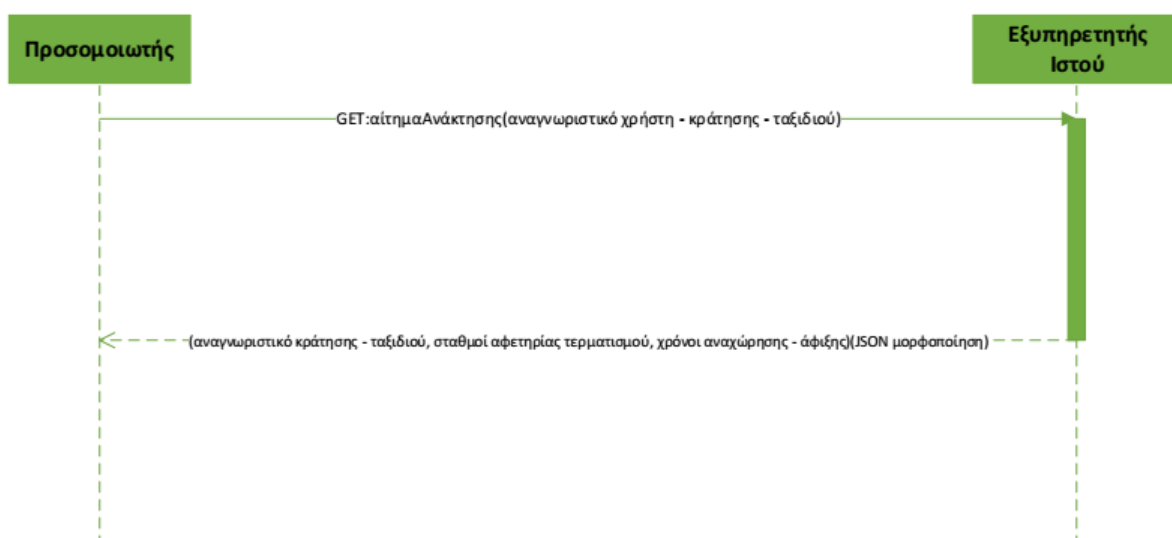


Σχήμα 3.6: UML διάγραμμα ακολουθίας για το αίτημα ενοικίασης ποδηλάτου

Ανάκτηση Προτεινόμενων Ταξιδιών

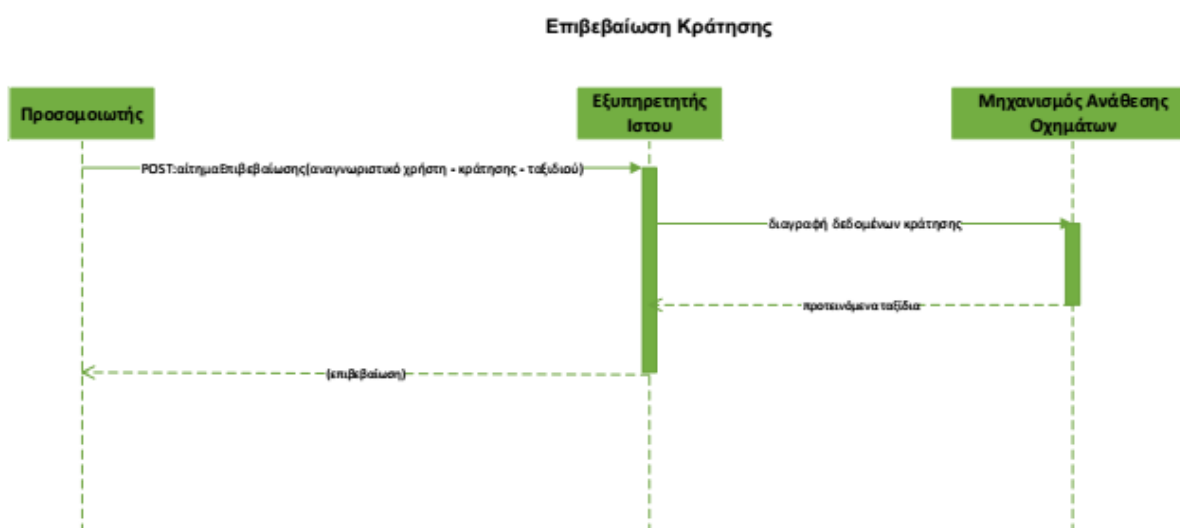
Η ανάκτηση των ταξιδιών ενός χρήστη γίνεται μέσω αιτήματος προς το σύστημα. Η απόκριση του εξυπηρετητή αποτελείται από το αναγνωριστικό της κράτησης, το αναγνωριστικό του ταξιδιού, τους σταθμούς αφετηρίας και τερματισμού, την ώρα εκκίνησης καθώς και την πιθανή έκπτωση που αποδόθηκε στο χρήστη για την επιλογή ενός εναλλακτικού ταξιδιού. Το αίτημα αυτό γίνεται κυρίως όταν ο χρήστης έχει ήδη αποστείλει ένα αίτημα ενοικίασης και δεν έχει επιβεβαιώσει ακόμη την κράτησή του. Κατά τη διάρκεια αυτή η πρόταση του μηχανισμού μπορεί να έχει αλλάξει ή ακόμη μπορεί να μην είναι δυνατόν να ικανοποιηθεί το αίτημά του

Ανάκτηση Προτεινόμενων Ταξιδιών



Σχήμα 3.7: UML διάγραμμα ακολουθίας για το αίτημα εμφάνισης προτεινόμενων ταξιδιών

Αίτημα Επιβεβαίωσης Κράτησης



Σχήμα 3.8: UML διάγραμμα ακολουθίας για το αίτημα επιβεβαίωσης ενοικίασης ποδηλάτου

Η επιβεβαίωση της κράτησης γίνεται μέσω αποστολής του αντίστοιχου αιτήματος. Το αίτημα περιλαμβάνει το αναγνωριστικό του χρήστη, το αναγνωριστικό της κράτησης καθώς και το αναγνωριστικό του ταξιδιού. Ο εξυπηρετητής προωθεί το αίτημα στον μηχανισμό ώστε να γίνουν οι κατάλληλες ενημερώσεις. Στο στάδιο αυτό μπορεί να τροποποιηθούν τα προτεινόμενα ταξίδια των χρηστών που δεν έχουν στείλει ακόμα

αιτήματα επιβεβαίωσης των κρατήσεών τους. Ο εξυπηρετητής αποκρίνεται με ένα μήνυμα επιβεβαίωσης.

Αίτημα Κατάργησης Κράτησης

Στην περίπτωση που ο χρήστης δε θέλει να αποδεχθεί την πρόταση του συστήματος ο προσομοιωτής στέλνει ένα αίτημα ακύρωσης της κράτησης. Το αίτημα περιλαμβάνει το αναγνωριστικό του χρήστη και το αναγνωριστικό της κράτησης. Όπως και στην περίπτωση του αιτήματος επιβεβαίωσης ο εξυπηρετητής προωθεί το αίτημα στο μηχανισμό, ώστε να γίνουν οι κατάλληλες ενημερώσεις.

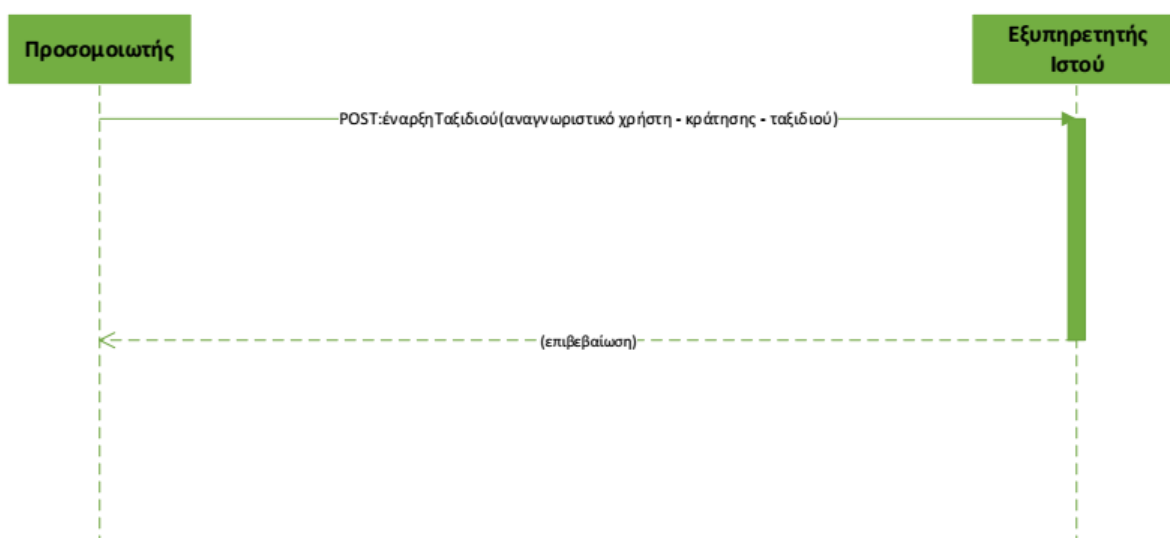


Σχήμα 3.9: UML διάγραμμα ακολουθίας για το αίτημα ακύρωσης ενοικίασης ποδηλάτου

Αίτημα Έναρξης Ταξιδιού

Κατά την έναρξη του ταξιδιού ενός χρήστη αποστέλλεται ένα μήνυμα στον εξυπηρετητή ώστε να γίνουν οι κατάλληλες ενημερώσεις του συστήματος. Το μήνυμα περιέχει το αναγνωριστικό χρήστη, το αναγνωριστικό της κράτησης και το αναγνωριστικό του ταξιδιού. Η διαδικασία αυτή πέρα από την ενημέρωση του συστήματος αντιστοιχεί στο ξεκλείδωμα του ποδηλάτου από το σταθμό αφετηρίας.

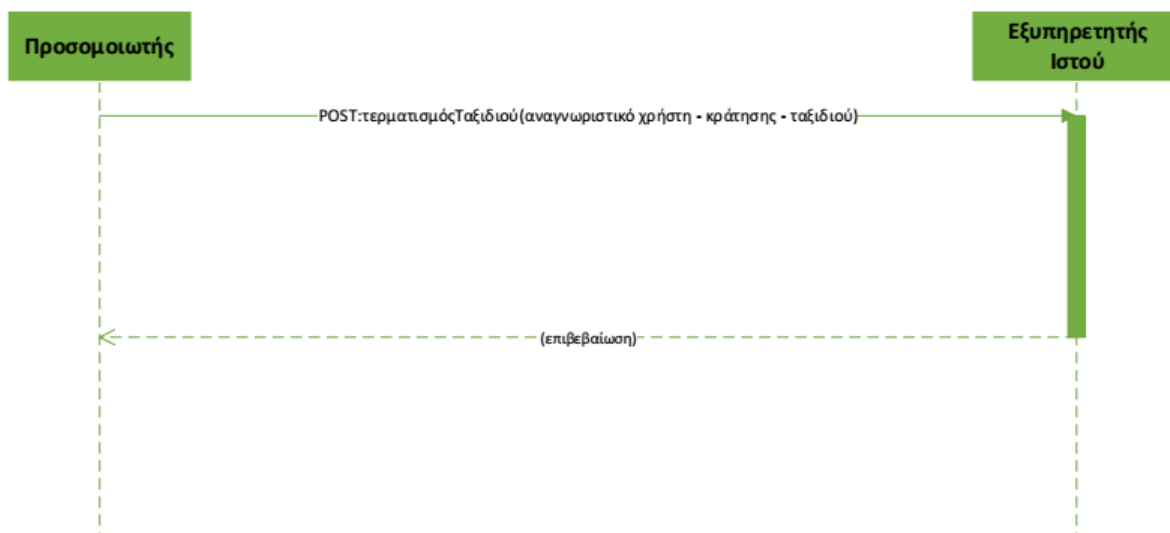
Έναρξη Ταξιδιού



Σχήμα 3.10: UML διάγραμμα ακολουθίας των μηνυμάτων κατά την έναρξη του ταξιδιού

Αίτημα Τερματισμού Ταξιδιού

Τερματισμός Ταξιδιού



Σχήμα 3.11: UML διάγραμμα ακολουθίας των μηνυμάτων κατά τον τερματισμό του ταξιδιού

Ο τερματισμός του ταξιδιού απαιτεί την αποστολή του αντίστοιχου μηνύματος από τον προσομοιωτή στον εξυπηρετητή ιστού. Όπως και στο αίτημα έναρξης ταξιδιού, το μήνυμα αποτελείται από το αναγνωριστικό χρήστη, το αναγνωριστικό της κράτησης και το αναγνωριστικό του ταξιδιού. Η διαδικασία αυτή προσομοιώνει τη διαδικασία κλειδώματος στο σταθμό τερματισμού.

3.2.1 Περιβάλλον Εφαρμογής των Σχημάτων Παροχής Κινήτρων

Για να είναι όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστη η αξιολόγηση και ο έλεγχος του μηχανισμού, αναζητήθηκε ένα πραγματικό σύστημα διαμοιρασμού οχημάτων με το οποίο και έγινε η σύγκριση. Το σύστημα αυτό, με την ονομασία Capital BikeShare [42], είναι ένα σύστημα διαμοιρασμού ποδηλάτων και λειτουργεί στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και συγκεκριμένα στην Ουάσιγκτον. Αποτελείται από 357 σταθμούς ποδηλάτων και από περισσότερα από 2800 ποδήλατα. Στον ιστότοπο (website) του συστήματος αυτού υπάρχουν αναρτημένα δεδομένα με όλα τα ταξίδια που έχουν γίνει κατά τη διάρκεια των προηγούμενων ετών. Για τη μελέτη του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα των ταξιδιών που έγιναν το τρίτο τρίμηνο του 2015, ένα σύνολο περισσότερων από 1.000.000 ταξίδια. Κάθε εγγραφή στο αρχείο αποτελείται από το σταθμό αφετηρίας, το σταθμό προορισμού, τη χρονική στιγμή της έναρξης του ταξιδιού καθώς και τη συνολική απόσταση και διάρκεια του ταξιδιού. Έτσι ταξινομώντας τα ταξίδια ανά σταθμό και ανά χρονική στιγμή εξήχθησαν συμπεράσματα σχετικά με τη ζήτηση ποδηλάτων για κάθε ώρα και μέρα της εβδομάδας. Κατασκευάστηκε δηλαδή με βάση τα πραγματικά δεδομένα ο ρυθμός άφιξης χρηστών στους σταθμούς προκειμένου να νοικιάσουν ένα ποδήλατο.

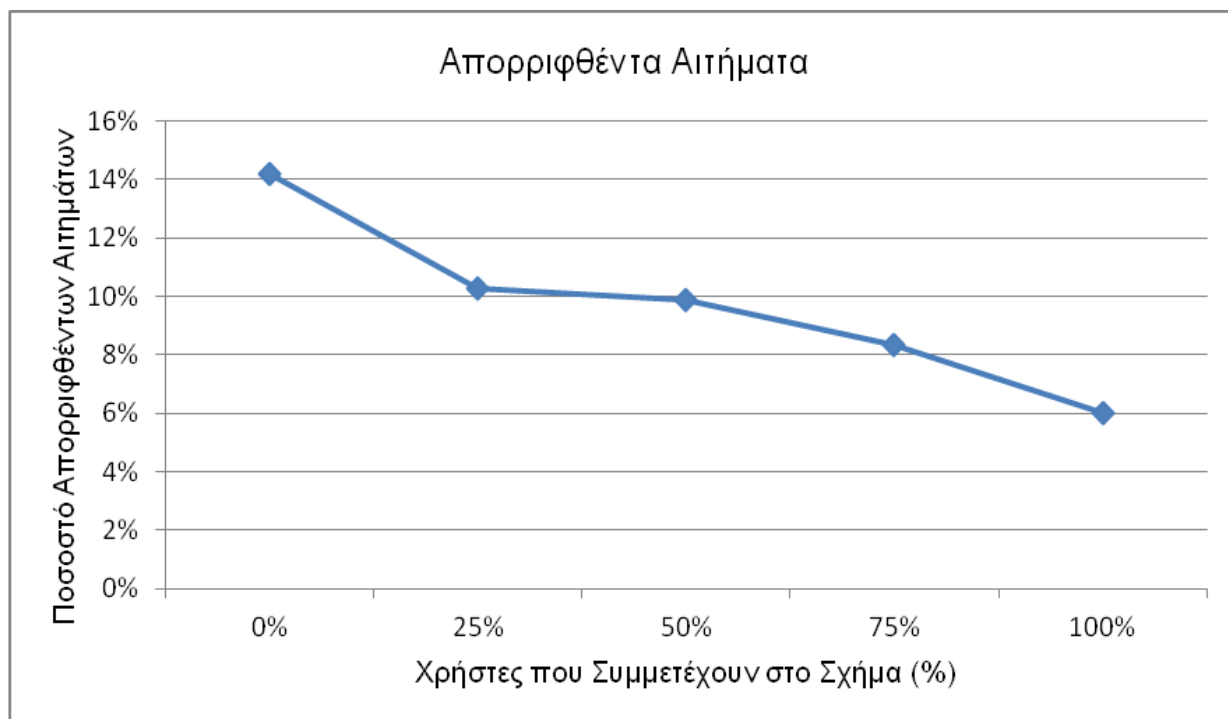
Οι ρυθμοί αυτοί άφιξης χρηστών μπορούν να θεωρηθούν ότι ακολουθούν κατανομή Poisson. Πιο συγκεκριμένα, δεδομένου ότι κατά τη διάρκεια της ημέρας οι ρυθμοί άφιξης μεταβάλλονται και δεν παραμένουν σταθεροί, πρέπει να προσεγγισθούν ως μη ομοιογενείς κατανομές Poisson. Για την προσομοίωση μη ομοιογενών κατανομών ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται από τους Lewis, Peter A., and Gerald S. Shedler [41] και ορίζεται ως διαδικασία εκλέπτυνσης (thinning process).

Σημαντικός παράγοντας για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τα αποτελέσματα του μηχανισμού αποτελεί και η αρχική κατανομή ποδηλάτων στους σταθμούς. Για το σχηματισμό μιας εικόνας όσο το δυνατόν πιο κοντά στην κατάσταση με την οποία εκκινεί το σύστημα κάθε μέρα, χρησιμοποιήθηκε μια υπηρεσία ιστού (web service) που παρέχεται από την ίδια την εταιρία και η οποία επιστρέφει σε πραγματικό χρόνο τον αριθμό των ποδηλάτων και των αντίστοιχων ελεύθερων θέσεων για κάθε σταθμό.

3.2.2 Αποτελέσματα

Η εξαγωγή συμπερασμάτων για την απόδοση του μηχανισμού έγινε αφού πραγματοποιήθηκαν επαναλαμβανόμενες εκτελέσεις της προσομοίωσης, το τελικό αποτέλεσμα των οποίων εξήχθη ως ο μέσος όρος των επιμέρους εκτελέσεων. Το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης αντιστοιχούσε σε χρονικό διάστημα από τις 9:00 πμ. έως και τις 3:00 μμ. Το χρονικό διάστημα αυτό περιλαμβάνει τις ώρες αιχμής όπως αυτές παρατηρήθηκαν από τα παρελθοντικά δεδομένα του συστήματος και κατά τις οποίες ώρες η πιθανότητα αδυναμίας του συστήματος ικανοποίησης των αιτημάτων των χρηστών είναι λογικό να είναι αυξημένη.

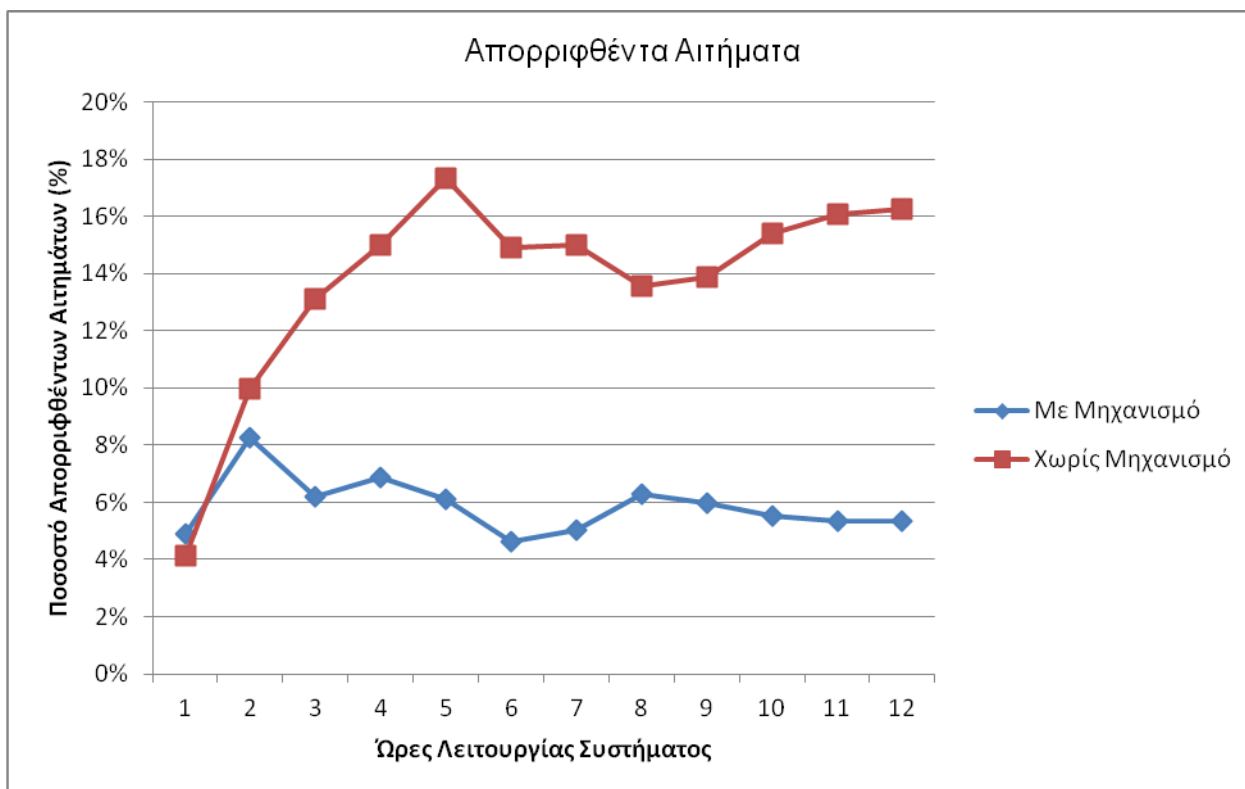
Στην πρώτη ομάδα πειραμάτων έγινε σύγκριση του μηχανισμού ανάθεσης ποδηλάτων με χρήση του πρώτου σχήματος για την παροχή κινήτρων με το σύστημα χωρίς το μηχανισμό, όπως λειτουργεί δηλαδή το σύστημα και τώρα. Αρχικά μελετήθηκε η απόδοση του συστήματος σε σχέση με το ποσοστό των χρηστών που θέλουν να συμμετέχουν στο μηχανισμό. Για την αξιολόγηση της απόδοσης χρησιμοποιήθηκε το ποσοστό των αιτημάτων για ενοικίαση ποδηλάτου που δεν μπόρεσαν να ικανοποιηθούν (Σχήμα 3.12). Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η συμμετοχή των χρηστών τόσο το ποσοστό των μη ικανοποιήσιμων αιτήσεων μειώνεται, άρα τόσο αυξάνονται τα ταξίδια που πραγματοποιούνται. Συγκεκριμένα το ποσοστό των αιτήσεων που απορρίπτονται μειώνεται από το 14% στην περίπτωση που δε συμμετέχει κανένας χρήστης στο 6% όταν όλοι οι χρήστες συμμετέχουν στο μηχανισμό.



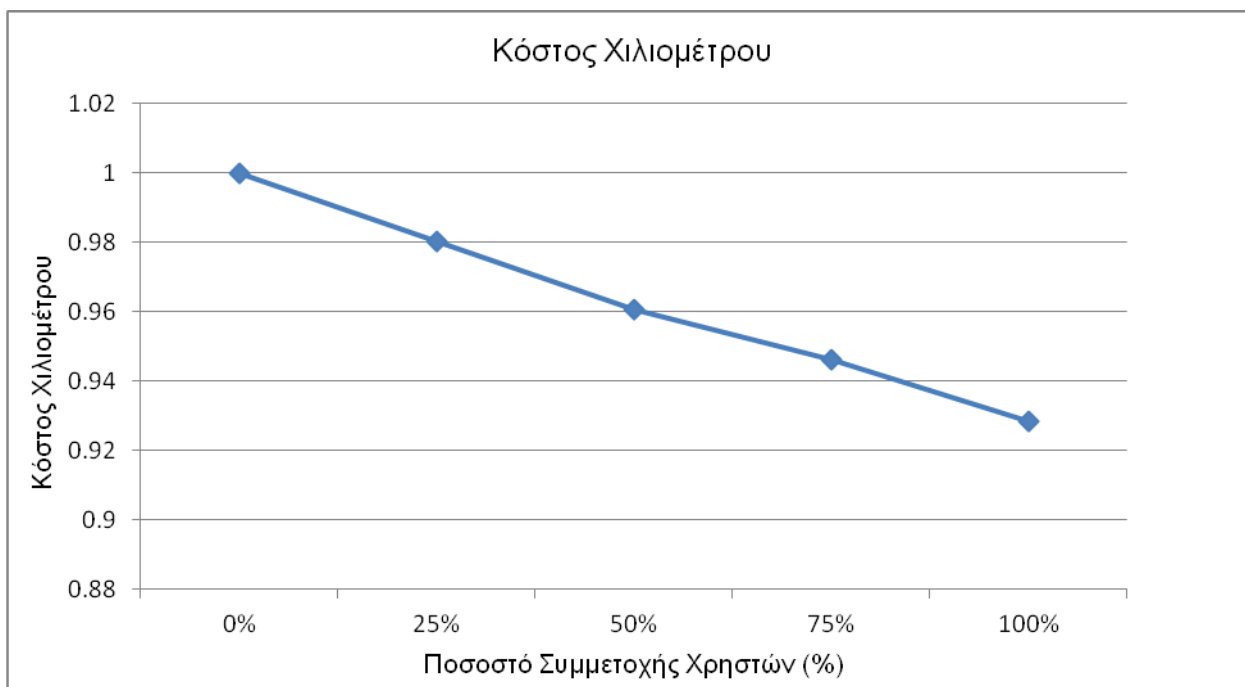
Σχήμα 3.12: Απορριφθέντα αιτήματα συναρτήσει του ποσοστού συμμετεχόντων στο μηχανισμό

Μελετήθηκε επίσης η διακύμανση του ποσοστού των απορριφθέντων αιτημάτων καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος. Το ποσοστό δηλαδή των μη ικανοποιήσιμων αιτημάτων μετά από συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα λειτουργίας, όπως μετά την πρώτη ώρα λειτουργίας τη δεύτερη και ου το καθεξής, μέχρι και για δώδεκα ώρες λειτουργίας. Στη σειρά εκτελέσεων αυτή συγκρίθηκαν οι περιπτώσεις όπου κανένας χρήστης δε συμμετείχε στο μηχανισμό και αυτή κατά την οποία όλοι οι χρήστες συμμετείχαν στο μηχανισμό. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών απεικονίζονται στο Σχήμα 3.13. Από το σχήμα παρατηρείται ότι καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος, ο μηχανισμός ανακατανομής οχημάτων καταφέρνει να διατηρήσει ένα σταθερό σχεδόν ρυθμό αιτημάτων που απορρίπτει, με αρκετά μικρές διακυμάνσεις. Αντιθέτως όταν το σύστημα λειτουργεί χωρίς το μηχανισμό ο ρυθμός απόρριψης είναι μεγαλύτερος, παρουσιάζοντας επιπροσθέτως και μεγάλες διακυμάνσεις.

Ο μηχανισμός πέρα από την αύξηση που επιφέρει στον αριθμό των ταξιδιών που ικανοποιούνται, έχει επωφελείς οικονομικές επιπτώσεις τόσο για τους χρήστες του συστήματος όσο και για το σύστημα το ίδιο. Στο Σχήμα 3.14 απεικονίζεται η μείωση του κόστους ανά χιλιόμετρο στις περιπτώσεις που οι χρήστες δέχονται να συμμετάσχουν στο μηχανισμό. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η συμμετοχή των χρηστών (ξεκινώντας από ποσοστό 25% συμμετεχόντων και καταλήγοντας σε ποσοστό 100%) το κόστος που καλούνται να καταβάλουν οι χρήστες ανά χιλιόμετρο μειώνεται συνεχώς. Ταυτόχρονα όμως το κέρδος του συστήματος αυξάνεται, όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 3.15. Για μικρό ποσοστό χρηστών που συμμετέχουν, το κέρδος του συστήματος δε βελτιώνεται, σε αντίθεση με το χρηματικό ποσό που καταβάλουν οι χρήστες, το οποίο είναι μειωμένο σε όλες τις περιπτώσεις. Όμως όσο το ποσοστό αυτό αυξάνεται και ειδικά όταν οι χρήστες που συμμετέχουν είναι περισσότεροι από αυτούς που δε λαμβάνουν μέρος στο μηχανισμό, τότε βελτιώνονται και τα συνολικά έσοδα του συστήματος. Παρόλο δηλαδή του ότι πολλά ταξίδια προσφέρονται στους χρήστες σε μειωμένη τιμή, το σύστημα βγαίνει κερδισμένο λόγω της αύξησης του συνολικού αριθμού αιτημάτων που ικανοποιούνται.

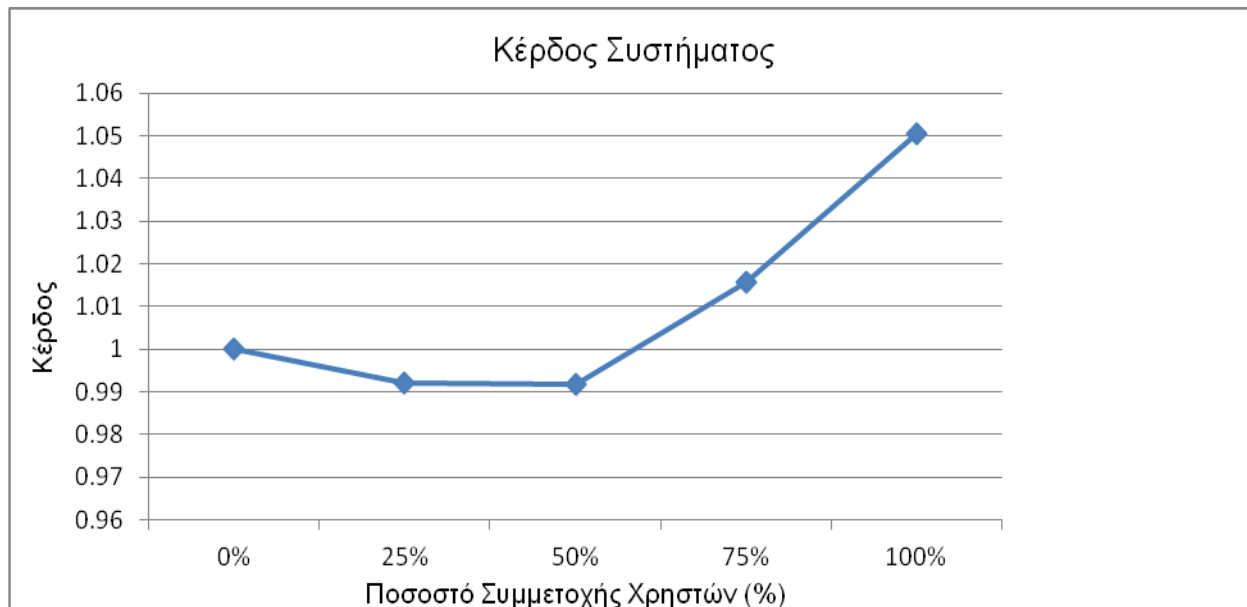


Σχήμα 3.13: Ποσοστό απορριφθέντων αιτημάτων ανά ώρα λειτουργίας



Σχήμα 3.14: Επίδραση του μηχανισμού στο κόστος που καταβάλουν οι χρήστες

Τα προηγούμενα πειράματα και αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν αφορούσαν τη σύγκριση της απόδοσης του μηχανισμού σε σχέση με το σύστημα που λειτουργεί χωρίς το μηχανισμό. Πέρα όμως από αυτή τη σειρά πειραμάτων διεξήχθησαν επιπλέον πειράματα για να μελετηθεί η επίδραση διαφόρων παραμέτρων στη συμπεριφορά του συστήματος.

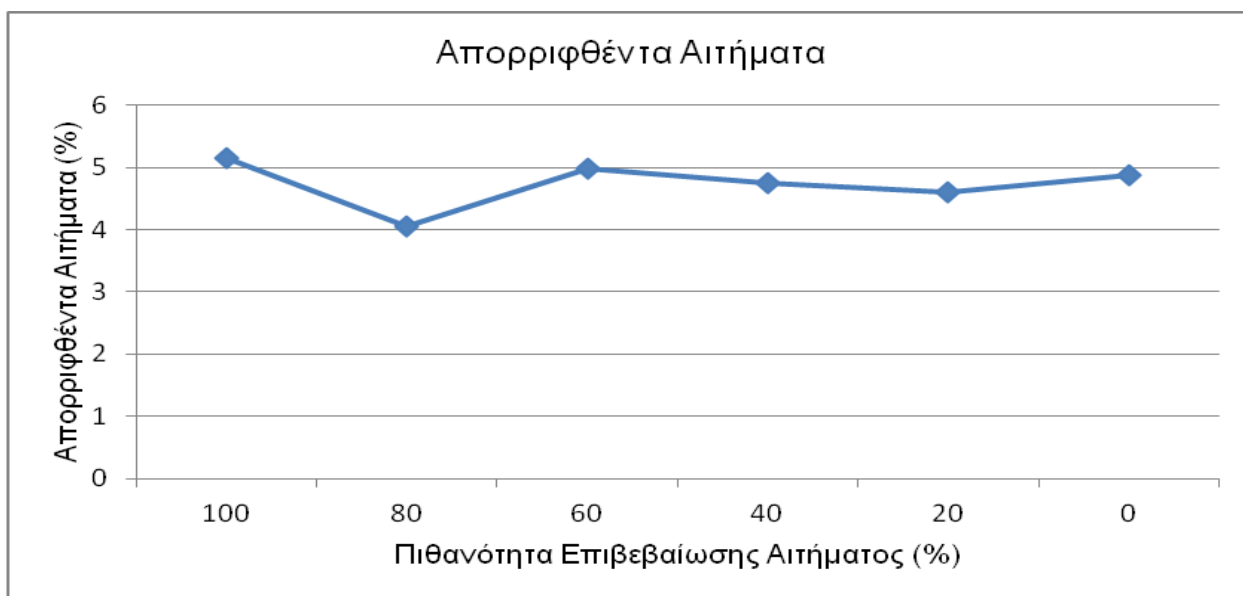


Σχήμα 3.15: Επίδραση του μηχανισμού στο κέρδος του συστήματος

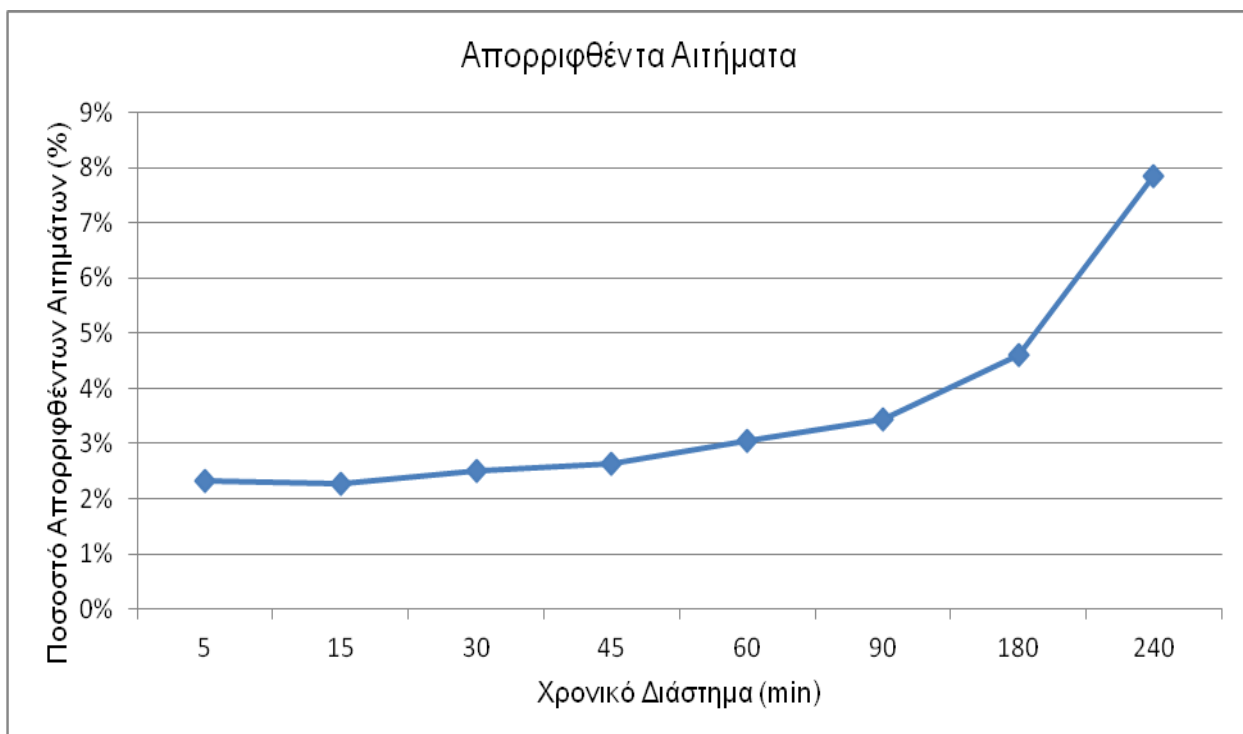
Στο Σχήμα 3.16 παρουσιάζεται η επίδραση που έχει στην απόδοση του συστήματος ο χρόνος κατά τον οποίο οι χρήστες παραμένουν στην κατάσταση "Αναμονής". Δηλαδή ο χρόνος που αφήνουν να περάσει μέχρι να στείλουν ένα αίτημα επιβεβαίωση μια κράτησης και αφού φυσικά έχει προηγηθεί το αίτημα ενοικίασης ποδηλάτου. Παρατηρείται ότι μια σύντομη αναμονή βελτιώνει την απόδοση του συστήματος, με τη λογική ότι δίνεται η δυνατότητα να συγκεντρωθούν περισσότερα αιτήματα με αποτέλεσμα να μπορεί ο μηχανισμός να προτείνει ταξίδια έχοντας μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα του συστήματος. Από την άλλη η συνεχής αύξηση του χρόνου αναμονής δε βελτιώνει ανάλογα και την απόδοση του συστήματος, αφού ναι μεν είναι περισσότερα τα αιτήματα που επεξεργάζεται ταυτόχρονα ο μηχανισμός, από την άλλη όμως ο αριθμός είναι μεγάλος οδηγώντας πιθανώς σε κορεσμό.

Επίσης μελετήθηκε η επίδραση που έχει στο μηχανισμό το χρονικό διάστημα κατά το οποίο μπορούν να κάνουν κράτηση ενός ποδηλάτου οι χρήστες. Δηλαδή πόσο χρόνο εκ των προτέρων μπορούν να αποστείλουν ένα αίτημα για ενοικίαση. Να σημειωθεί ότι η κράτηση ενός ποδηλάτου σημαίνει ότι το ποδήλατο αυτό κλειδώνεται μέχρι να έρθει να το παραλάβει ο χρήστης και ότι δεν μπορεί για το χρονικό αυτό διάστημα να ανατεθεί σε κάποιον άλλο χρήστη. Στο Σχήμα 3.17 παρουσιάζεται η απόδοση του συστήματος, μετρημένη ως προς το ποσοστό απόρριψης αιτημάτων σε σχέση με το προαναφερθέν χρονικό διάστημα. Παρατηρείται ότι για μικρό χρονικό διάστημα, λιγότερο των 15 λεπτών, λαμβάνεται το μικρότερο ποσοστό απορριφθέντων αιτημάτων και όσο αυξάνεται το χρονικό αυτό διάστημα, αυξάνεται και το ποσοστό. Αποτέλεσμα το οποίο ταιριάζει με τη φύση του συγκεκριμένου συστήματος, όπου ο ρυθμός αφήξεων στους περισσότερους σταθμούς είναι πολύ μεγάλος και πιθανή κράτηση ενός ποδηλάτου για μεγάλο χρονικό διάστημα μπορεί να οδηγήσει σε απόρριψη αιτημάτων που γίνονται κατά το διάστημα αυτό. Βέβαια η παρεχόμενη δυνατότητα κράτησης εκ των προτέρων ενός ποδηλάτου για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, έχει το πλεονέκτημα της

εξασφάλιση οχήματος και άρα της βελτίωσης των παρεχόμενων υπηρεσιών για τους χρήστες αυτούς που χρησιμοποιούν σε καθημερινή βάση το σύστημα. Για παράδειγμα δίνει τη δυνατότητα στο σύστημα να εξασφαλίσει ποδήλατο σε χρήστη που το θέλει σε καθημερινή βάση ώστε να μετακινείται από και προς το χώρο εργασίας του.



Σχήμα 3.16: Απόδοση του μηχανισμού συναρτήσει του αριθμού των αιτημάτων που επεξεργάζεται ταυτόχρονα



Σχήμα 3.17: Απόδοση του μηχανισμού συναρτήσει του επιτρεπόμενου χρόνου κράτησης του οχήματος

Τα πειράματα για το δεύτερο σχήμα είχαν ως επιπλέον στόχο να μελετηθεί η συμπεριφορά του συστήματος όταν δίνεται η δυνατότητα στους χρήστες να δηλώσουν

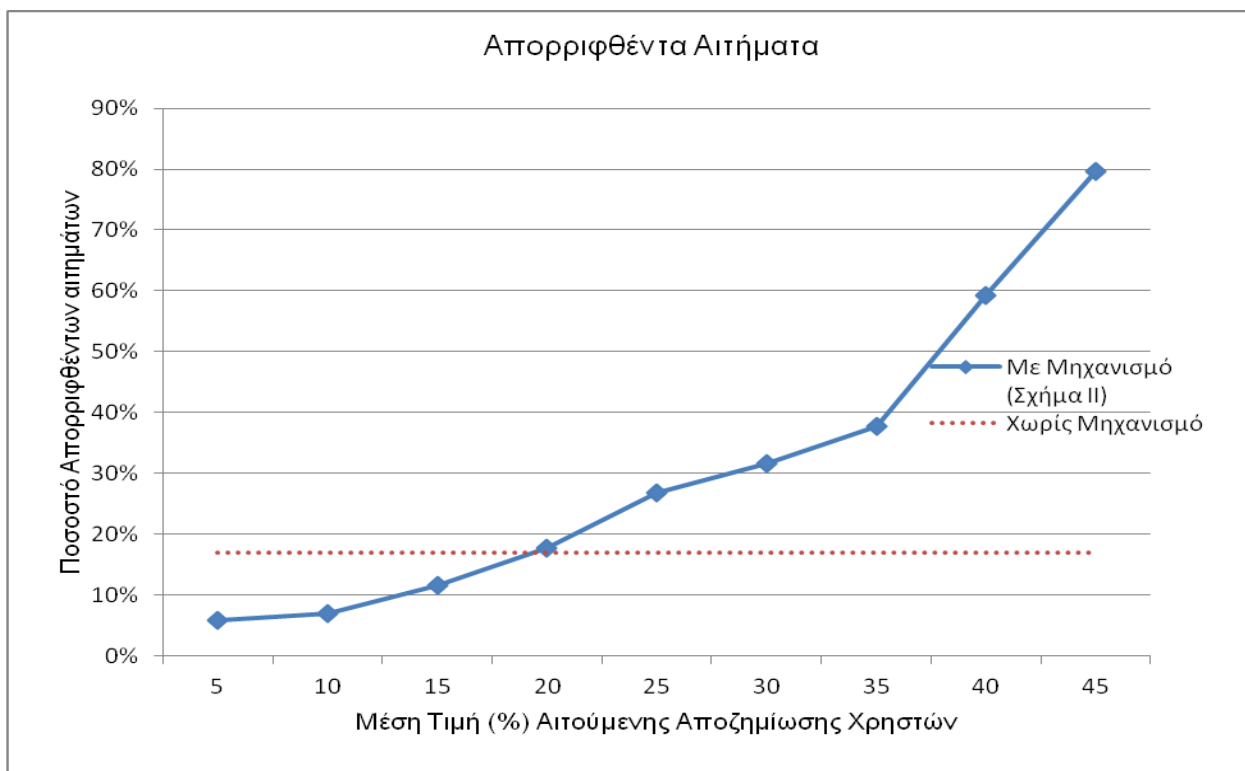
το χρηματικό ποσό που θέλουν να λάβουν ως αποζημίωση για να αλλάξουν κάποιες από τις επιλογές του ταξιδιού τους. Έτσι μελετήθηκε η απόδοση του συστήματος για διαφορετικές μέσες τιμές αιτούμενης αποζημίωσης. Πιο συγκεκριμένα, το ποσοστό της αποζημίωσης που αιτείται κάθε χρήστης μοντελοποιήθηκε ως Gaussian κατανομή. Οι εκτελέσεις της προσομοίωσης διέφεραν ως προς τη μέση τιμή της κατανομής αυτής. Διενεργήθηκαν εκτελέσεις για μέση τιμή 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40% και 45%. Το συνολικό ποσό που διαθέτει κάθε φορά το σύστημα για αποζημίωση τέθηκε ίσο με το 20% του συνολικού κέρδους των ταξιδιών που μπορούν να πραγματοποιηθούν ταυτόχρονα σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου. Επειδή στόχος ήταν να μελετηθεί η συμπεριφορά του συστήματος συναρτήσει της συμπεριφοράς των χρηστών, οι διάφορες εκτελέσεις έγιναν μόνο με χρήστες που ήταν διατεθειμένοι να συμμετάσχουν στο μηχανισμό παροχής κινήτρων.

Από τα αποτελέσματα των εκτελέσεων και όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.18 της προσομοίωσης παρατηρείται αύξηση του ποσοστού των αιτημάτων που απορρίπτονται από το σύστημα όσο αυξάνεται το ποσοστό της αποζημίωσης που αιτούνται οι χρήστες από το σύστημα. Όταν οι χρήστες αιτούνται αποζημίωση μικρότερη του 20% η απόδοση του συστήματος είναι καλύτερη σε σχέση με τη λειτουργία του συστήματος χωρίς το μηχανισμό. Για αιτούμενη αποζημίωση μεγαλύτερη του 20% η απόδοση του μηχανισμού χειροτερεύει και συγκεκριμένα για μέση τιμή της αιτούμενης αποζημίωσης ίση με 45% απορρίπτει σχεδόν το 80% των αιτημάτων.

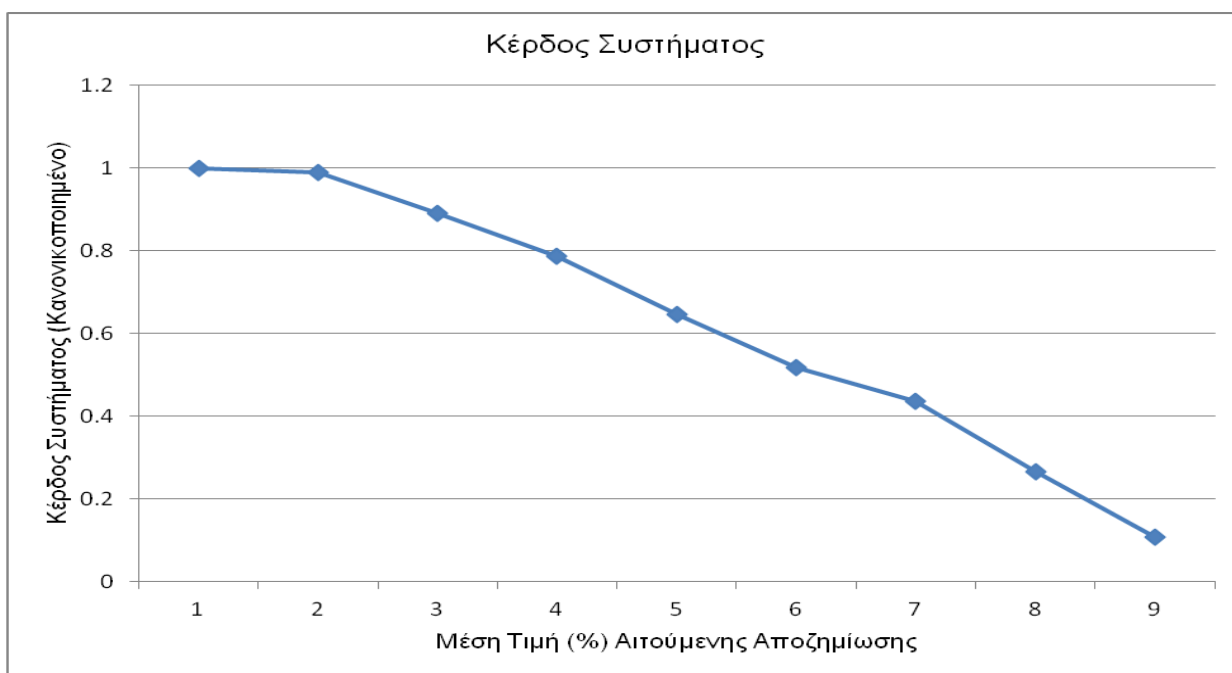
Σε σύγκριση με το πρώτο σχήμα, η απόδοση του δεύτερου σχήματος είναι συγκρίσιμη για μικρές τιμές αποζημίωσης (5%, 10%). Για μεγαλύτερες τιμές το πρώτο σχήμα είναι ξεκάθαρα αποδοτικότερο. Ένας βασικός λόγος που το δεύτερο σχήμα απορρίπτει ένα μεγάλο αριθμό αιτημάτων ακόμα και όταν το αιτούμενο ποσοστό αποζημίωσης είναι χαμηλό (~20%) είναι η άγνοια των χρηστών για τις προτεραιότητες των μετακινήσεων. Έτσι ακόμα και όταν οι χρήστες αιτούνται μικρή αποζημίωση, η προτεραιότητα που αποδίδει το σύστημα στις αντίστοιχες μετακινήσεις οχημάτων μπορεί να είναι χαμηλή με αποτέλεσμα την τελική απόρριψη των αιτημάτων.

Όπως είναι αναμενόμενο η αύξηση του αριθμού των αιτημάτων που απορρίπτονται όσο αυξάνεται το ποσοστό της αποζημίωσης που αιτούνται οι χρήστες έχει άμεση αρνητική επίπτωση και στο συνολικό κέρδος του συστήματος. Το Σχήμα 3.19 απεικονίζει το κέρδος του συστήματος, κανονικοποιημένο ως προς τη μέγιστη τιμή κέρδους που ελήφθησαν από το σύνολο των προσομοιώσεων, συναρτήσει της αιτούμενης αποζημίωσης. Στο σχήμα αυτό φαίνεται η μείωση του κέρδους όσο αυξάνεται το ποσοστό της αποζημίωσης που αιτούνται οι χρήστες. Το κέρδος όμως για μικρές τιμές αποζημίωσης (μικρότερες του 20%) είναι βελτιωμένο σε σύγκριση με το σύστημα χωρίς την εφαρμογή του μηχανισμού.

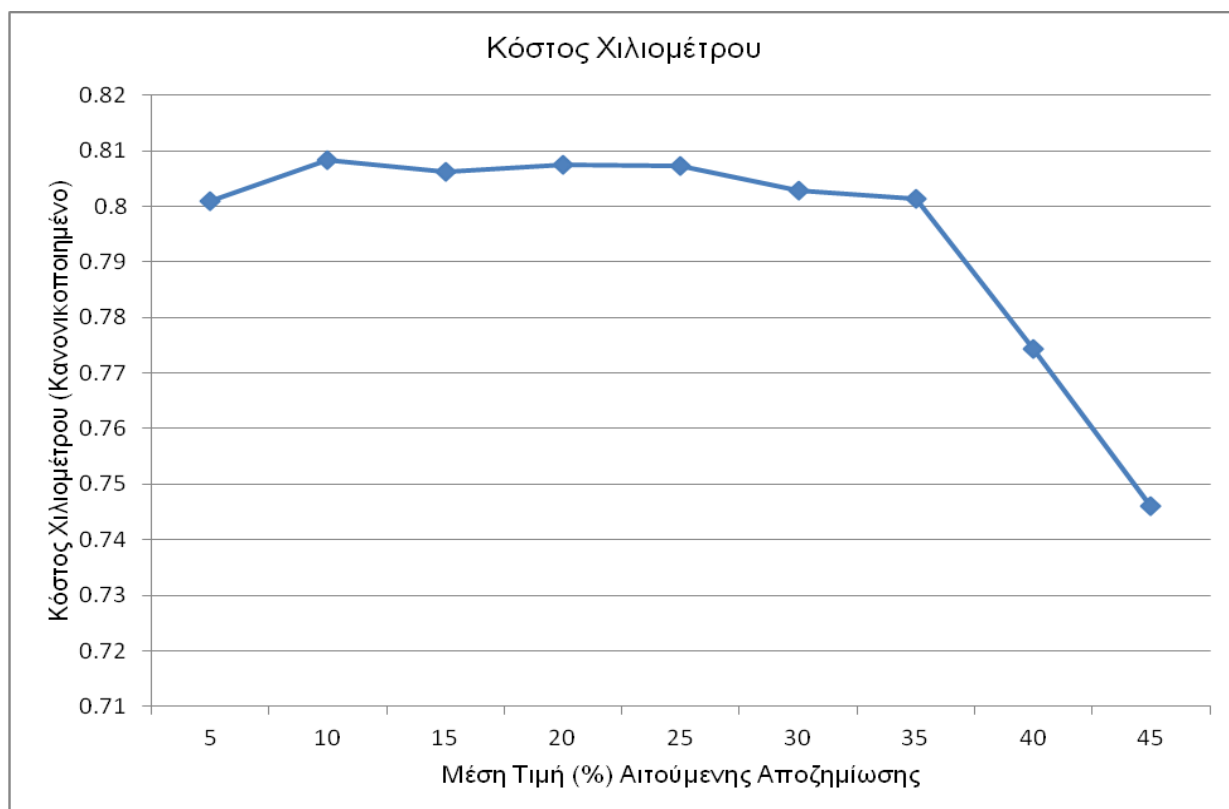
Στο Σχήμα 3.20 απεικονίζει το κόστος που καλούνται να καταβάλουν οι χρήστες ανά χιλιόμετρο συναρτήσει του ποσοστού αποζημίωσης. Για τις περισσότερες τιμές αιτούμενης αποζημίωσης το κόστος που καλούνται να πληρώσουν οι χρήστες παραμένει σχεδόν σταθερό, δεδομένου ότι ο μηχανισμός απορρίπτει τα αιτήματα με μεγάλες τιμές αποζημίωσης και τείνει να αποδέχεται αυτά με μικρότερες τιμές. Δραστική βελτίωση του κόστους παρατηρείται όταν μεγάλο ποσοστό των χρηστών αιτείται μεγάλη αποζημίωση (μέση τιμή μεγαλύτερη του 35%). Στις περιπτώσεις αυτές παρόλο που το ποσοστό των απορριφθέντων αιτημάτων είναι μεγάλο, ένα ποσοστό αυτών γίνεται τελικά αποδεχτό. Και γίνεται αποδεχτό λαμβάνοντας μεγάλη αποζημίωση με άμεση συνέπεια την ελάττωση του κόστους ταξιδιού.



Σχήμα 3.18: Απόδοση του μηχανισμού με χρήση του δεύτερου σχήματος συναρτῆσει της αιτούμενης από τους χρήστες αποζημίωση



Σχήμα 3.19: Κέρδος συστήματος με χρήση του δεύτερου σχήματος συναρτῆσει της αιτούμενης από τους χρήστες αποζημίωση



Σχήμα 3.20: Κόστος χιλιόμετρου συναρτήσει της αιτούμενης από τους χρήστες αποζημίωση

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εργασία αυτή πραγματεύεται το πρόβλημα της ανισομερούς κατανομής των οχημάτων σε ένα σύστημα διαμοιρασμού οχημάτων. Στα συστήματα αυτά και κυρίως σε αυτά που επιτρέπουν ταξίδια απλής διαδρομής, ταξίδια που ο προορισμός διαφέρει από τον τερματισμό, παρατηρείται κατά τη διάρκεια της ημέρας συσσώρευση οχημάτων σε σημεία χαμηλής ζήτησης και αντίστοιχα έλλειψη οχημάτων σε σημεία υψηλής ζήτησης. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού προτείνεται ένας μηχανισμός παροχής κινήτρων στους χρήστες του συστήματος έτσι ώστε να λειτουργήσουν προς όφελος του ίδιου του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, οι χρήστες που είναι διατεθειμένοι να συμμετέχουν στο μηχανισμό, δηλώνουν τον επιπλέον χρόνο που είναι διατεθειμένοι να ξοδέψουν και την επιπλέον απόσταση που είναι διατεθειμένοι να περπατήσουν ώστε να μεταβούν σε ένα σταθμό που είναι πιο μακριά από τον κοντινότερό τους. Το σύστημα, βάσει αυτών, εξάγει τους προσβάσιμους γειτονικούς σταθμούς και αν υπάρχει κάποια μετακίνηση που είναι πιο επωφελής, την προτείνει στους χρήστες. Προκειμένου οι χρήστες να δεχθούν την αλλαγή του ταξιδιού τους, το σύστημα τους αποζημιώνει προσφέροντάς τους το ταξίδι με έκπτωση.

Υλοποιήθηκαν δύο σχήματα παροχής κινήτρων. Σε κάθε ένα από αυτά ο χρήστης δηλώνει την πρόθεσή του να συμμετέχει και τον επιπλέον χρόνο και απόσταση που διατίθεται να ξοδέψει. Στο δεύτερο σχήμα ο χρήστης δηλώνει επιπροσθέτως και την αποζημίωση που θέλει να λάβει ώστε να αποδεχθεί το εναλλακτικό ταξίδι εν αντιθέσει με το πρώτο σχήμα όπου η αποζημίωση καθορίζεται από το ίδιο το σύστημα. Μέσω της ανάπτυξης ενός προσομοιωτή διακριτών γεγονότων, εφαρμόστηκαν τα σχήματα σε ένα πραγματικό σύστημα, το Capital Bikeshare. Η εφαρμογή του μηχανισμού στο σύστημα έδειξε βελτίωση της απόδοσης του σε σύγκριση με την λειτουργία του χωρίς το μηχανισμό. Ο αριθμός των αιτημάτων για ενοικίαση ποδηλάτων που μπορούν να ικανοποιηθούν αυξήθηκε. Συγκεκριμένα το σύστημα χωρίς το μηχανισμό απέρριπτε έναν αριθμό αιτημάτων της τάξης του 14%. Με την εφαρμογή του μηχανισμού και συγκεκριμένα το πρώτου σχήματος το ποσοστό αυτό μειώθηκε στο 4%. Ταυτόχρονα τόσο το κέρδος του συστήματος όσο και το κέρδος των χρηστών βελτιώθηκε. Λόγω της αύξησης των ταξιδιών που πραγματοποιούνται το κέρδος του συστήματος είναι αυξημένο παρά το γεγονός ότι ένα ποσοστό αυτών προσφέρεται με έκπτωση. Παράλληλα οι χρήστες καλούνται να καταβάλλουν μικρότερο αντίτιμο για τα ταξίδια που πραγματοποιούν, δεδομένης της έκπτωσης που λαμβάνουν. Πραγματοποιήθηκαν επίσης πειράματα για την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς του παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του μηχανισμού, όπως ο αριθμός των αιτημάτων που επεξεργάζεται ταυτόχρονα το σύστημα και ο επιτρεπόμενος χρόνος κράτησης ενός οχήματος, έτσι ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα ως προς τη βέλτιστη παραμετροποίηση του μηχανισμού.

Η μελέτη του δεύτερου μηχανισμού αποτέλεσε περισσότερο μια ένδειξη του κατά πόσο η δυνατότητα εμπλοκής των χρηστών στη διαδικασία παροχής κινήτρων επηρεάζει και βελτιώνει την απόδοση του συστήματος. Και πάλι υπήρξε βελτίωση της απόδοσης ως προς τον αριθμό των αιτημάτων που μπορούν να ικανοποιηθούν, όχι όμως τόσο στο πρώτο σχήμα (8%). Βέβαια η δυνατότητα που παρέχεται στο χρήστη να καθορίσει εκείνος το ποσό της αποζημίωσης που θα λάβει έτσι ώστε να αλλάξει τις προτιμήσεις του ταξιδιού του αποτελεί από μόνο του ένα κίνητρο για τη συμμετοχή του στο μηχανισμό.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος όρος	Ελληνικός Όρος
Branch and cut algorithm	Αλγόριθμος διακλάδωσης και αποκοπής
Claw graph	$K_{1,4}$ διμερής γράφος
Closed queuing network	Κλειστό δίκτυο ουρών
Concave function	Κοίλη συνάρτηση
Crowdsourcing	Πληθοπορισμός
Data mining	Εξόρυξη δεδομένων
Deterministic	Αιτιοκρατικός, ντετερμινιστικός
Feasible trips	Εφικτά ταξίδια
Flow	Ροή
Free floating system	Συστήματα χωρίς σταθμούς
Heuristic	Ευρετικός
Hub location inventory problem	Πρόβλημα εύρεσης τοποθεσιών κεντρικών σταθμών
Interface	Διεπαφή
Intersection graph	Γράφος Τομής
Intractable	Δυσεπίλυτος
Linear regression model	Μοντέλο γραμμικής οπισθοδρόμησης
Maximum weighted independent set	Μέγιστο βεβαρυμμένο ανεξάρτητο σύνολο
Mean field theory	Θεωρία μέσου πεδίου
Mean value analysis	Ανάλυση μέσης τιμής
One way trip	Ταξίδι απλής διαδρομής
Quadratic problem	Τετραγωνικό πρόβλημα
Rational thinking	Ορθολογικά σκεπτόμενος
Relaxation	Χαλάρωση
Relocation priority	Προτεραιότητα μετακίνησης
Round trip	Ταξίδια μετ' επιστροφής
Service area	Περιοχή λειτουργίας
Simulated annealing	Προσομοιωμένη ανόπτηση
Tabu search	Αναζήτηση απαγορευμένων καταστάσεων
Thinning process	Διαδικασία εκλέπτυνσης
Timed Petri Net	Χρονικά δίκτυα Petri
Utility function	Συνάρτηση χρησιμότητας
Utility gain	Κέρδος χρησιμότητας
Website	Ιστότοπο

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

DBMS	Data Base Management System
DES	Discrete Event Simulator
FIFO	First In First Out
FSM	Finite State Machine
GIS	Geographic Information System
IDS	Incentives Deployment Scheme
JSON	Javascript Object Notation
MILP	Mixed Integer Linear Program
MIP	Mixed Integer Program
MIQP	Mixed Integer Quadratic Program
MWIS	Maximum Weighted Independent Set
REST	Representational State Transfer
RFID	Radio-Frequency IDentification
TCP	Transfer Control Protocol
TPN	Timed Petri Net

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] P. DeMaio, "Bike-sharing: History, impacts, models of provision, and future.," *J. Public Transp.*, vol. 12, no. DeMaio 2004, pp. 41–56, 2009.
- [2] <http://www.citylab.com/city-makers-connections/bike-share/> [Προσπελάσθηκε 26/8/16]
- [3] <https://tiffanydstone.com/2013/08/23/lessons-learned-from-the-history-of-car-sharing/> [Προσπελάσθηκε 26/8/16]
- [4] S. Shaheen, D. Sperling, and C. Wagner, "Carsharing in Europe and North America: Past, Present, and Future," *Transp. Q.*, vol. 52, no. 3, pp. 35–52, 1998.
- [5] Vogel, Patrick, Torsten Greiser, and Dirk Christian Mattfeld. "Understanding bike-sharing systems using data mining: Exploring activity patterns." *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 20 (2011): 514-523.
- [6] Lin, Jenn-Rong, and Ta-Hui Yang. "Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints." *Transportation research part E: logistics and transportation review* 47.2 (2011): 284-294.
- [7] L. M. Martinez, L. Caetano, T. Eiró, and F. Cruz, "An optimisation algorithm to establish the location of stations of a mixed fleet biking system: an application to the city of Lisbon," *Procedia-Social Behav. Sci.*, vol. 54, pp. 513–524, 2012.
- [8] de Almeida Correia, Gonçalo Homem, and António Pais Antunes. "Optimization approach to depot location and trip selection in one-way carsharing systems." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 48.1 (2012): 233-247.
- [9] Fan, Wei, Randy Machemehl, and Nicholas Lowmes. "Carsharing: Dynamic decision-making problem for vehicle allocation." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2063 (2008): 97-104.
- [10] Kek, Alvina GH, et al. "A decision support system for vehicle relocation operations in carsharing systems." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 45.1 (2009): 149-158.
- [11] Boyacı, Burak, Konstantinos G. Zografos, and Nikolas Geroliminis. "An optimization framework for the development of efficient one-way car-sharing systems." *European Journal of Operational Research* 240.3 (2015): 718-733.
- [12] Lin, Jenn-Rong, Ta-Hui Yang, and Yu-Chung Chang. "A hub location inventory model for bicycle sharing system design: Formulation and solution." *Computers & Industrial Engineering* 65.1 (2013): 77-86.
- [13] Alumur, Sibel, and Bahar Y. Kara. "Network hub location problems: The state of the art." *European journal of operational research* 190.1 (2008): 1-21.
- [14] Kumar, V. Prem, and Michel Bierlaire. "Optimizing locations for a vehicle sharing system." *Swiss Transport Research Conference. (Cited on pages 2, 8, and 24.)*. 2012.
- [15] Cepolina, Elvezia M., and Alessandro Farina. "A new shared vehicle system for urban areas." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 21.1 (2012): 230-243.
- [16] Larsen, Jacob, Zachary Patterson, and Ahmed El-Genedy. "Build it. But where? The use of geographic information systems in identifying locations for new cycling infrastructure." *International Journal of Sustainable Transportation* 7.4 (2013): 299-317.
- [17] García-Palomares, Juan Carlos, Javier Gutiérrez, and Marta Latorre. "Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: a GIS approach." *Applied Geography* 35.1 (2012): 235-246.
- [18] C. Fricker and N. Gast, "Incentives and regulations in bike-sharing systems with stations of finite capacity," *arXiv Prepr. arXiv1201.1178*, p. 2, 2012.
- [19] J. Pfrommer, J. Warrington, G. Schilbach, and M. Morari, "Dynamic vehicle redistribution and online price incentives in shared mobility systems," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 15, no. 4, pp. 1567–1578, 2014.
- [20] M. Clemente, M. P. Fanti, A. M. Mangini, and W. Ukovich, "The vehicle relocation problem in car sharing systems: modeling and simulation in a petri net framework," in *International Conference on Applications and Theory of Petri Nets and Concurrency*, 2013, pp. 250–269.
- [21] A. Singla, M. Santoni, G. Bartók, P. Mukerji, M. Meenen, and A. Krause, "Incentivizing Users for Balancing Bike Sharing Systems," in *Proceedings of the Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2015, pp. 723–729.
- [22] D. K. George and C. H. Xia, "Fleet-sizing and service availability for a vehicle rental system via closed queuing networks," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 211, no. 1, pp. 198–207, 2011.
- [23] A. Waserhole and V. Jost, "Vehicle sharing system pricing regulation: A fluid approximation," 2012.
- [24] P. Aeschbach, X. Zhang, and A. Georghiou, "Balancing bike sharing systems through customer cooperation-a case study on London's Barclays Cycle Hire," *2015 54th IEEE*, 2015.
- [25] T. Raviv, M. Tzur, and I. Forma, "Static repositioning in a bike-sharing system: models and solution approaches," *EURO J. Transp. Logist.*, vol. 2, pp. 187–229, 2013.

- [26] C. Contardo, C. Morency, and L.-M. Rousseau, *Balancing a dynamic public bike-sharing system*. 2012.
- [27] D. Chemla, F. Meunier, and R. Wolfler Calvo, "Bike sharing systems: Solving the static rebalancing problem," *Discret. Optim.*, vol. 10, no. 2, pp. 120–146, 2013.
- [28] H. Hernández-Pérez and J.-J. Salazar-González, "A branch-and-cut algorithm for a traveling salesman problem with pickup and delivery," *Discret. Appl. Math.*, vol. 145, no. 1, pp. 126–139, 2004.
- [29] S. Weikl and K. Bogenberger, "Relocation strategies and algorithms for free-floating car sharing systems," *IEEE Intell. Transp. Syst. Mag.*, vol. 5, no. 4, pp. 100–111, 2013.
- [30] A. Febraro, N. Sacco, and M. Saeednia, "One-Way Carsharing," *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 2319, no. 1, pp. 113–120, 2012.
- [31] A. G. H. Kek, R. L. Cheu, Q. Meng, and C. H. Fung, "A decision support system for vehicle relocation operations in carsharing systems," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 45, no. 1, pp. 149–158, 2009.
- [32] M. Gendreau, G. Laporte, and F. Semet, "The maximal expected coverage relocation problem for emergency vehicles," *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 57, no. 1, pp. 22–28, 2006.
- [33] G. B. Dantzig and P. Wolfe, "Decomposition Principle for Linear Programs," *Oper. Res.*, vol. 8, no. 1, pp. 101–111, 1960.
- [34] J. F. Benders, "Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems," *Numer. Math.*, vol. 4, no. 1, pp. 238–252, 1962.
- [35] J. Lee *et al.*, "Design of an efficient matching-based relocation scheme for electric vehicle sharing systems," in *Communications in Computer and Information Science*, 2012, vol. 341 CCIS, pp. 109–115.
- [36] J. Lee and G. L. Park, "Design of a team-based relocation scheme in electric vehicle sharing systems," in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2013, vol. 7973 LNCS, no. PART 3, pp. 368–377.
- [37] J. Froehlich, J. Neumann, and N. Oliver, "Sensing and predicting the pulse of the city through shared bicycling," in *IJCAI International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 2009, pp. 1420–1426.
- [38] A. Kaltenbrunner, R. Meza, J. Grivolla, J. Codina, and R. Banchs, "Urban cycles and mobility patterns: Exploring and predicting trends in a bicycle-based public transport system," *Pervasive Mob. Comput.*, vol. 6, no. 4, pp. 455–466, 2010.
- [39] G. Goel, A. Nikzad, and A. Singla, "Matching Workers Expertise with Tasks: Incentives in Heterogeneous Crowdsourcing Markets," *Proc. NIPS '13 Work. Crowdsourcing*, pp. 1–15, 2014.
- [40] <http://www.movesmartfp7.eu/>
- [41] P. A. W. Lewis and G. S. Shedler, "Simulation of nonhomogeneous poisson processes by thinning," *Nav. Res. Logist. Q.*, vol. 26, no. 3, pp. 403–413, 1979.
- [42] <http://www.capitalbikeshare.com/> [Προσπελάσθηκε 9/9/16]