



Πανεπιστήμιο Πειραιώς – Τμήμα Πληροφορικής

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Πληροφορική»

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Τίτλος Διατριβής	Σύστημα ανακύκλωσης σε υπηρεσία παροχής διαμοιρασμού ποδηλάτων με δυναμική τιμολόγηση πληθοπορισμού Bike sharing recycling system using a dynamic crowdsourcing pricing policy
Όνοματεπώνυμο Φοιτητή	Ηλίας Σταύρος
Πατρώνυμο	Χρήστος
Αριθμός Μητρώου	ΜΠΠΛ 19054
Επιβλέπων	Κωνσταντόπουλος Χαράλαμπος, Καθηγητής

Ημερομηνία Παράδοσης **Νοέμβριος 2024**

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Χαράλαμπος Κωνσταντόπουλος
Καθηγητής

Ιωάννης Βενέτης
Επικ. Καθηγητής

Ιωάννης Τασούλας
Επικ. Καθηγητής

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον καθηγητή μου, Κωνσταντόπουλο Χαράλαμπο, για την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας μου. Χωρίς τη συμβολή του, όχι μόνο η εργασία δε θα είχε ολοκληρωθεί, αλλά και η ικανότητά μου να κάνω τις σωστές ερωτήσεις θα ήταν πολύ φτωχότερη

Περίληψη

Τα συστήματα διαμοιρασμού ποδηλάτων αποτελούν μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες αγορές καθώς αποτελούν τον πλέον γρήγορο, οικονομικό και παράλληλα οικολογικό τρόπο επέκτασης της ακτίνας εξυπηρέτησης των μέσων μαζικής μεταφοράς. Στη σύγχρονη εκδοχή τους, το μοντέλο που υιοθετείται είναι η ελεύθερη κατανομή ποδηλάτων σε επιτρεπόμενους χώρους. Σε αυτή τη μορφή υλοποίησης, οι εταιρίες που παρέχουν υπηρεσίες διαμοιρασμού ποδηλάτων καλούνται να αντιμετωπίσουν την ασύμμετρη κατανομή ποδηλάτων, τη συμμόρφωση των οχημάτων με τις εκάστοτε διατάξεις, τη διαχείριση του επιπέδου εξυπηρέτησης σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής καθώς και την απόσυρση ενός οχήματος όταν αυτό δε θα είναι πλέον λειτουργικό. Στην εργασία αυτή επικεντρωνόμαστε στην απόσυρση των ποδηλάτων, με δεδομένη την ασύμμετρη κατανομή τους στο χώρο, που προκύπτει από το υιοθετούμενο μοντέλο λειτουργίας. Η μέχρι τώρα εμπειρία έχει δείξει την απροθυμία που εκφράζουν οι εταιρίες παροχής υπηρεσιών στην εκπλήρωση του παραπάνω, με αποτέλεσμα την αισθητή πτώση στην ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας που μπορεί να φτάσει και την αδυναμία εξυπηρέτησης. Αυτή η απροθυμία πηγάζει κυρίως από το γεγονός ότι οι μέχρι τώρα τεχνικές δεν αντιμετωπίζουν το επιπλέον εμπόδιο της ασύμμετρης κατανομής των αντικειμένων προς ανακύκλωση. Μία πρόταση που στοχεύει στην κατεύθυνση της ταχύτερης ανακύκλωσης οχημάτων, θα ήταν η παροχή κινήτρων σε ομάδες ατόμων που έχουν το χρόνο, τη θέληση και τα μέσα προκειμένου να λειτουργήσουν ως αρχική ομάδα συγκέντρωσης ποδηλάτων και στη συνέχεια η εταιρία να αναλάβει την εκτέλεση των δρομολογίων που θα ολοκληρώσουν τη διαδικασία της ανακύκλωσης. Επεκτείνοντας την παραπάνω σκέψη, ένα άμεσο ερώτημα που δημιουργείται, είναι η διαμόρφωση της πολιτικής πληρωμών, του κάθε μέλους της ομάδας, που συμμετέχει στον αρχικό κύκλο της συγκέντρωσης ποδηλάτων. Ως απάντηση στο παραπάνω ερώτημα προτείνουμε ένα ολοκληρωμένο σύστημα σχεδιασμού της διαδικασίας ανακύκλωσης που περιέχει την τιμολογιακή πολιτική, η οποία διαμορφώνεται ανάλογα με την απόκριση του χρήστη. Επίσης παρέχεται ένα σύστημα που θα αναθέτει εργασίες μεταφοράς στον εκάστοτε χρήστη και τέλος μία διαδικασία για το τελικό στάδιο της ανακύκλωσης.

Λέξεις-Κλειδιά: σύστημα διαμοιρασμού ποδηλάτων, πληθοπορισμός, παροχή κινήτρων, ανακύκλωση

Abstract

A growing number of cities are switching to bike sharing systems as a fast, economically efficient and greener extension to public transport, by providing last-mile transportation services. The modern version of bike sharing systems consist of freely distributed bicycles. Under this framework, companies that provide their services on this sector must deal with asymmetrical bike distribution, compliance with state rules, keeping a steady service level throughout a bike's lifecycle and finally the withdrawal of a bike when it cannot function up to certain standards. In this thesis, we focus on the recycling of bikes, given the asymmetrical spatial distribution that occurs from the underlining business framework. Up to now, service providers have a rather negative attitude towards dealing with bike recycling. This affects the quality of service in such a way that unavailability of bikes is not something uncommon. The root cause of the above-mentioned behavior is the fact that until now, recycling frameworks do not address spatial asymmetric distribution. A solid proposal to achieve a quicker recycling process would be the incentivization of people who have time, are willing to provide and have the proper vehicle to assist the first phase of the process. That is to gather bikes in small batches from various sites and after this phase, provider's trucks can gather bikes from predetermined spots and finalize the process. A direct issue to be faced in this extension, would be the pricing policy of those incentives. For this, we propose a unified framework for the recycling process that includes the following. A pricing policy for the provided incentives that will dynamically change according to user interaction. It also includes a task management system that fits the crowdsourcing model of actions that can be accomplished, plus a process to be followed by company trucks for the last phase of recycling process.

Keywords: bike-sharing, crowdsourcing, incentives, recycling

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	1
Abstract.....	2
Περιεχόμενα	3
1. Εισαγωγή	5
1.1 Επισκόπηση του θέματος της διατριβής.....	5
1.2 Οφέλη της χρήσης συστημάτων διαμοιρασμού ποδηλάτων	5
1.2 Εξέλιξη των συστημάτων.....	6
1.3 Προβλήματα που ανακύπτουν κατά την υλοποίηση	6
1.4 Γενική περιγραφή της εργασίας	7
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	9
2.1 Σύνοψη προβλημάτων προς επίλυση.....	9
2.2 Μπορούν τα συστήματα διαμοιρασμού να έχουν βιώσιμο μέλλον; ..	9
2.3 Μπορούν οι κρατικοί φορείς να λειτουργήσουν ρυθμιστικά; ..	10
2.4 Η χρήση της συλλογής ποδηλάτων κατά της στατική ανακατανομή ..	12
2.5 Η συλλογή ποδηλάτων κατά τη δυναμική ανακατανομή	13
2.6 Χρήση της μεθόδου τεχνητής αποικίας μελισσών.....	15
2.7 Εναλλακτικές τεχνικές.....	16
3. Παρουσίαση γραμμικού προβλήματος	18
3.1 Προσδιορισμός βασικών οντοτήτων	18
3.2 Προσδιορισμός κόστους οχημάτων.....	19
3.3 Προσδιορισμός κόστους ανεξάρτητων συνεργατών (freelancers) ..	19
3.4 Μοντελοποίηση του προβλήματος.....	20
3.5 Προσδιορισμός περιορισμών	22
3.6 Ανάλυση περιορισμών.....	23
4. Παρουσίαση επίλυσης με χρήση tabu search	25
4.1 Αναπαράσταση της λύσης	26

4.2 Καθορισμός των ανεξάρτητων συνεργατών (freelancers) που αποδέχονται την προτεινόμενη εργασία.....	26
4.3 Καθορισμός της αρχικής λύσης.....	27
4.4 Καθορισμός κινήσεων για βελτίωση της λύσης.....	29
4.5 Λίστα tabu λύσεων	31
4.6 Κριτήρια αποδοχής λύσεων tabu.....	31
4.7 Το σύνολο καλών λύσεων E.....	31
5. Παρουσίαση χρήσης του συστήματος δυναμικής τιμολόγησης ..	34
5.1 Ανασκόπηση υλοποιήσεων με στατική τιμολόγηση	34
5.2 Βελτιώσεις δυναμικής τιμολόγησης	38
5.3 Περιγραφή ενσωμάτωσης του συστήματος.....	37
5.4 Περιγραφή του αλγορίθμου δυναμικής τιμολόγησης	34
6. Αποτελέσματα σύγκρισης μεθόδων	40
6.1 Ποσοτικές μετρήσεις και σύγκριση.....	40
6.2 Αναλυτική Σύγκριση και Αποτίμηση των Μεθόδων Επίλυσης .	41
6.3 Γραμμικός Επιλυτής: Ακριβής αλλά Χρονοβόρα Μέθοδος ..	41
6.5 Δυναμική Τιμολόγηση: Προσαρμογή στο Κόστος για Εξοικονόμηση σε Μεγαλύτερα Προβλήματα	43
7 Σύνοψη και μελλοντική εργασία	44
Βιβλιογραφία	46

1. Εισαγωγή

1.1 Επισκόπηση του θέματος της διατριβής

Ίσως το πιο σημαντικό γνώρισμα μίας πόλης, που μπορεί να λειτουργήσει ως κριτήριο για τη συστημική της σχεδίαση, είναι η ποιότητα της εσωτερικής μετακίνησης των πολιτών. Είναι σχεδόν αναγκαίο, ένας πολίτης να μπορεί να μετακινηθεί γρήγορα, οικονομικά, οικολογικά και άνετα στο μεγαλύτερο μέρος της πόλης του. Φυσικά, καθώς το μέγεθος των σύγχρονων πόλεων αυξάνεται μέρα με τη μέρα, για κάθε τύπο μετακίνησης, θα πρέπει να υπάρχει και η κατάλληλη λύση. Επίσης, για τις σχετικά μεγάλες μετακινήσεις, οι περισσότερες πόλεις έχουν μεριμνήσει για την ύπαρξη υπέργειων ή υπόγειων σιδηροδρόμων. Στη συνέχεια για τις μεσαίες μετακινήσεις, υπάρχουν τόσο μέσα σταθερής τροχιάς, όπως το τραμ και κατά κάποιο τρόπο και τα τρόλεϊ, αλλά και λεωφορεία. Το κομμάτι της μετακίνησης στο οποίο επικεντρώνεται η συγκεκριμένη εργασία είναι αυτό της μικρό-κινητικότητας (micro mobility), το οποίο χρησιμοποιείται για την κάλυψη του τελευταίου και μικρότερου κομματιού μίας μετακίνησης.

1.2 Οφέλη της χρήσης συστημάτων διαμοιρασμού ποδηλάτων

Παρόλο που απασχολεί ένα μικρό ποσοστό της διαδρομής, έχει άμεσο αντίκτυπο στην οικονομία, στο περιβάλλον καθώς και στην υγεία των πολιτών [4]. Ένα από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η πόλη του Πεκίνο. Τα συστήματα διαμοιρασμού ποδηλάτων βοηθούν τους χρήστες να συνδεθούν με τα υπόλοιπα μέσα μαζικής μεταφοράς και να φτάσουν στον προορισμό τους μειώνοντας τους χρόνους μετακίνησης κατά μέσο όρο 8 λεπτά την ημέρα. Με τη χρήση οικονομικών μοντέλων, που χρησιμοποιούνται για να γίνουν συγκρίσεις με αντίστοιχα συστήματα σε χώρες όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Δανία και η Ιαπωνία, έχει υπολογιστεί ότι η μείωση του χρόνου μετακίνησης σε αυτή την κλίμακα μπορεί να αποφέρει ανταποδοτικά μία αύξηση του ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος του Πεκίνο από 337 εκατομμύρια RMB έως και 1.2 δισεκατομμύρια RMB σε ετήσια βάση. Ως φυσικό επακόλουθο της χρήσης ενός τέτοιου συστήματος, είναι και οι νέες θέσεις εργασίας που δημιουργούνται, κυρίως στις εργασίες που κρίνονται απαραίτητες για την επέκταση καθώς και τη συντήρηση του δικτύου.

Ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο ενός συστήματος μετακίνησης είναι το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα αλλά και πως επηρεάζει συνολικά την υγεία των πολιτών που το χρησιμοποιούν. Από τη στιγμή που κάποιος προτιμά να χρησιμοποιήσει το ποδήλατο για τη μετακίνησή του, είναι δεδομένη η μείωση των μετακινήσεων με ιδιωτικού τύπου αυτοκίνητα. Κάνοντας χρήση του προηγούμενου παραδείγματος, στην πόλη του Πεκίνο, θα μπορούσε η χρήση υγρών καυσίμων να μειωθεί κατά 225060 τόνους[4]. Αυτό μεταφράζεται σε μία μείωση των επιβλαβών ουσιών στην ατμόσφαιρα. Πιο συγκεκριμένα, η μείωση του CO₂ θα μπορούσε να φτάσει τους 616000 τόνους, ενώ ιδιαίτερη μείωση θα υπάρχει και σε άλλες ουσίες όπως το NO₂, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5}. Άμεση συνέπεια της μείωσης αυτής, είναι και η μείωση των ασθενειών που προέρχονται από τη μολυσμένη ατμόσφαιρα. Μία τέτοια μείωση θα μπορούσε να προσφέρει παθητικά στο σύστημα υγείας μία μείωση κόστους σχεδόν 2.42 δισεκατομμυρίων RMB [4]. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τη μετάβαση από τη χρήση των ιδιωτικών οχημάτων στη χρήση ποδηλάτων, αυξάνεται και το επίπεδο φυσικής άσκησης των πολιτών βελτιώνοντας ολιστικά το βιοτικό τους επίπεδο.

Απαραίτητο στοιχείο για την επιτυχία ενός συστήματος διαμοιρασμού ποδηλάτων είναι εκτός από τα δικά του εσωτερικά χαρακτηριστικά, η υποστήριξη που πρέπει να έχει από το περιβάλλον του. Αυτή η υποστήριξη θα πρέπει να είναι πολυεπίπεδη, αρχίζοντας από το επίπεδο του σημείου διαμοιρασμού, συνεχίζοντας στις επιμέρους συνδέσεις των σημείων και τέλος στη σύνδεση των δικτύων που σχηματίζουν τα μέσα μεταφοράς. Απαραίτητη κρίνεται η επαρκής παροχή σημείων στάθμευσης προκειμένου η λειτουργία ενός συστήματος διαμοιρασμού ποδηλάτων να είναι απρόσκοπτη. Χώροι στάθμευσης που δεν έχουν την προσοχή που τους αρμόζει

έχουν οδηγήσει σε μόλυνση των προσκείμενων πεζοδρομίων, στη Βιέννη και στη Ρώμη. Αντίθετα, καλοδιατηρημένοι χώροι σταθμεύσεις ενισχύουν την προσβασιμότητα και ενθαρρύνουν τη χρήση των επιμέρους υπηρεσιών ειδικά σε πυκνοκατοικημένες περιοχές [2]. Υψηλής σημασίας θεωρείται και η ύπαρξη αποκλειστικών χώρων διέλευσης και ξεχωριστών γραμμών για τα ποδήλατα καθώς αυξάνει τόσο την ασφάλεια, όσο και την ευκολία μετακίνησης. Η ταχεία υιοθέτηση των ηλεκτρικών ποδηλάτων, τα οποία κινούνται με αισθητά μεγαλύτερη ταχύτητα από τα συμβατικά, καθιστούν αναγκαίες τις αναπροσαρμογές στο οδικό δίκτυο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα πόλης που έχει υλοποιήσει μεγάλες αλλαγές για την υποστήριξη αυτού του τύπου μετακίνησης είναι η Σένζεν [1]

1.2 Εξέλιξη των συστημάτων

Παρόλο που για κάθε άτομο, η διαδρομή από και προς τα μέσα μαζικής μεταφοράς, αποτελεί μόνο ένα μικρό κομμάτι της διαδρομής του, είναι ίσως το πιο καθοριστικό για την τελική πραγματοποίησή της διαδρομής με το δίκτυο μαζικής μεταφοράς [3]. Φυσικά, κάθε επιλογή μέσου σε αυτή την ακτίνα, θα πρέπει να πληροί αρκετές προϋποθέσεις προκειμένου να είναι όσο το δυνατόν πιο αρεστό στο ευρύ κοινό. Τα τελευταία χρόνια, η υπηρεσία που φαίνεται να υιοθετείται από όλο και περισσότερες πόλεις, είναι τα συστήματα διαμοιρασμού ποδηλάτων. Καθώς οι πόλεις έρχονται αντιμέτωπες με φαινόμενα όπως η ατμοσφαιρική ρύπανση, η κυκλοφοριακή συμφόρησή, η ηχορύπανση, οι περιορισμένες θέσεις παρκαρίσματος και όχι μόνο, κάθε άλλο παρά λογική μπορεί να θεωρηθεί η χρήση τέτοιων συστημάτων προκειμένου να καλυφθούν οι υπάρχουσες ανάγκες. Με δεδομένο ότι το ποδήλατο είναι ένα μέσο, το οποίο είναι φανερά πιο οικολογική λύση, πιο ήσυχη και με μικρότερες ανάγκες σε χώρους, φαίνεται να καλύπτει τις βασικές ανάγκες μίας σύγχρονης πόλης.

Φυσικά τα συστήματα διαμοιρασμού ποδηλάτων δεν είχαν πάντα τη μορφή που έχουν πάρεσι σήμερα. Στην αρχική τους μορφή, είχαμε συστήματα που είτε αποτελούνταν από σταθερούς σταθμούς με συγκεκριμένο αριθμό ποδηλάτων ή σε πολλές περιπτώσεις θα έπρεπε η διαδρομή να έχει συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Παρόλο που ήταν μία φυσιολογική αρχή για αυτού του είδους τα συστήματα, πολύ γρήγορα άρχισαν να εμφανίζονται συστήματα, στα οποία μπορούσες να πάρεις το όχημα από όπου ήθελες και να το αφήσεις σε οποιοδήποτε σημείο. Επίσης στην πλειονότητα των περιπτώσεων είχε αρθεί ο περιορισμός της ώρας και ήρθε σαν πρόσθετη υπηρεσία η δυνατότητα της κράτησης ενός ποδηλάτου.

1.3 Προβλήματα που ανακύπτουν κατά την υλοποίηση

Ενώ η εξελικτική πορεία που ακολούθησαν τα συστήματα αυτά είναι σίγουρα εντυπωσιακή, θα ήταν κίνηση αδιαφορίας, το να μην εκτεθούν και οι αδυναμίες τους, στο επίπεδο της αναζήτησης λύσεων προκειμένου να διορθωθούν τα ήδη υπάρχοντα αλλά και αυτά που θα δημιουργηθούν να διατηρούν την παρεχόμενη υπηρεσία σε υψηλά επίπεδα.

Βασικό ζήτημα που δημιούργησε η μετάβαση από τα συστήματα με σταθερά σημεία στα συστήματα ελεύθερης κατανομής ήταν η ελεύθερη χωρική κατανομή των οχημάτων. Αυτό ήταν ένα φυσιολογικό επακόλουθο, καθώς στην αρχική μορφή των συστημάτων, η εκάστοτε εταιρία παροχής υπηρεσιών, είχε τα οχήματά της σε συγκεκριμένους σταθμούς και δεν υπήρχε η επιλογή της μεταφοράς ενός οχήματος από τον ένα σταθμό στον άλλο. Εφόσον πλέον ήταν ελεύθερη η μεταφορά ενός οχήματος από τον ένα σταθμό σε κάποιον άλλο προέκυψε η χωρική ανισοκατανομή.

Σημείο που επίσης επιδέχεται πολλές βελτιώσεις είναι η εναρμόνιση των εταιριών παροχής υπηρεσιών με τις εκάστοτε διατάξεις. Φυσικά, τα ποδήλατα και όλα τα υπόλοιπα μέσα μικρό-κι-

νητικότητας δεν έχουν την ταχύτητα και την επικινδυνότητα ενός αυτοκινήτου, ούτε καταλαμβάνουν τον ίδιο όγκο. Παρόλα αυτά, όταν δεν υπάρχει καλό δίκτυο και καλά σχεδιασμένοι κανόνες, τότε οι χρήστες των παραπάνω οχημάτων αποτελούν παθογένεια για την ομάδα πληθυσμού που επιλέγει το περπάτημα ως μέσο τελικής μετάβασης στον προορισμό τους. Επίσης, καθώς βρισκόμαστε ακόμα στην αρχή της υιοθέτησης αυτών των συστημάτων, το υπάρχον θεσμικό πλαίσιο είναι ακόμα σε εμβρυακό στάδιο με αποτέλεσμα να παρατηρείται μόλυνση των πεζοδρομίων από το μεγάλο αριθμό οχημάτων που συνωστίζονται.

Φυσικά θα μπορούσαμε να επεκταθούμε και σε πολλούς άλλους τομείς που αναζητούν λύση, όπως η παροχή σταθερά φορτισμένων ηλεκτρικών οχημάτων στα συστήματα ελεύθερης κατανομής οχημάτων και πολλά άλλα. Κρίνεται όμως σκόπιμο να περιοριστούμε στην επίδραση της άνισης χωρικής κατανομής των ποδηλάτων και πως επηρεάζει αυτή το επίπεδο της παρεχόμενης υπηρεσίας, τη δυνατότητα παροχής της αλλά και την ανακύκλωση των οχημάτων όταν αυτά θα έχουν φτάσει στο τέλος του κύκλου ζωής τους.

1.4 Γενική περιγραφή της εργασίας

Η συγκεκριμένη εργασία εξετάζει τη βελτιστοποίηση ενός συστήματος διαμοιρασμού ποδηλάτων έχοντας ως επίκεντρο το ιδιαίτερα δύσκολο κομμάτι της ανακύκλωσης των οχημάτων, κάνοντας παράλληλα χρήση πληθοπορισμού προσφέροντας την επιλογή της δυναμικής τιμολόγησης. Όσο τα συστήματα διαμοιρασμού ποδηλάτων κερδίζουν έδαφος ως επιλογή για την «κινητικότητα τελευταίου μιλίου» (“last mile mobility”), τόσο πιο σύνθετα, δύσκολα και κρίσιμα προβλήματα προκύπτουν. Η διασφάλιση της διαθεσιμότητας ποδηλάτων εκεί όπου χρειάζονται περισσότερο, είτε κοντά σε σταθμούς διέλευσης, βιομηχανικές περιοχές, περιοχές με έντονη συγκέντρωση εργαζομένων ή κατοικημένες γειτονιές, είναι ουσιαστική για τη διατήρηση του επιπέδου εξυπηρέτησης και της διασφάλισης ενός αποτελεσματικού συστήματος. Η έρευνα έχει χωριστεί σε τρεις φάσεις, όπου η κάθε μία επικεντρώνεται σε μία διαφορετική μέθοδο επίλυσης του προβλήματος της ανακύκλωσης.

1.4.1 Περιγραφή πρώτης προσέγγισης

Η πρώτη φάση περιλαμβάνει τον προσδιορισμό του προβλήματος, τη μοντελοποίησή του και την επίλυση του με χρήση τεχνικών του γραμμικού προγραμματισμού. Αυτή η φάση επικεντρώνεται σε συστήματα ιδιαίτερα μικρής κλίμακας. Σε αυτά τα συστήματα, είναι δυνατό να βρεθεί ακριβής βέλτιστη λύση. Το γραμμικό μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο, ώστε να ελαχιστοποιείται η αντικειμενική του συνάρτηση, που επηρεάζεται από το κόστος μετακίνησης των οχημάτων καθώς και το διαφυγόν κέρδος από τα οχήματα που θα μπορούσαν να μεταφερθούν αλλά δε μεταφέρθηκαν. Το κόστος ευκαιρίας έχει εισαχθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να αποτυπώνει τον οικονομικό αντίκτυπο των μεταφορών, τις οποίες οι ανεξάρτητοι συνεργάτες (freelancers) είτε απέρριψαν ή δεν έφεραν εις πέρας. Η προσέγγιση του προβλήματος με ακριβή βελτιστοποίηση θέτει μία βάση για τη σύγκριση με μεθόδους που θα υλοποιηθούν σε επόμενες φάσεις. Αυτές οι μέθοδοι προσφέρουν τη δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων σε μεγέθη που εμφανίζονται στην πραγματικότητα.

1.4.2 Περιγραφή δεύτερης προσέγγισης

Η δεύτερη φάση εισάγει τη μέθοδο αναζήτησης tabu, η οποία είναι σχεδιασμένη για να βελτιστοποιεί πιο σύνθετες και μεγαλύτερης έκτασης εκφάνσεις του προβλήματος, όπου η ακριβής επίλυση είναι υπολογιστικά μη υλοποιήσιμη. Η αναζήτηση tabu είναι μία μετρετική τεχνική που ερευνά το χώρο λύσεων χρησιμοποιώντας συγκεκριμένες δομές προκειμένου να αποφευχθεί η λανθασμένη καταγραφή μίας τοπικά βέλτιστης λύσης ως βέλτιστης. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη σε συστήματα διαμοιρασμού ποδηλάτων που έχουν μεγέθη τα οποία συναντούμε στην πραγματικότητα. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει ευελιξία στο πόσο μεγάλο μπορεί

να είναι το μέγεθος του προβλήματος και προσφέρει μία λύση η οποία είναι πολύ κοντά στη βέλτιστη σε πολύ πιο σύντομο χρόνο σε σχέση με τον γραμμικό επιλυτή. Σε αυτή τη φάση θα δοκιμάσουμε αν είναι πρακτικά δυνατή η εφαρμογή της αναζήτησης tabu σε καταστάσεις που προκύπτουν στην καθημερινή ζωή, να συγκρίνουμε τις λύσεις που προσφέρει αυτή η μέθοδος σε σύγκριση με την ακριβή λύση που προσφέρει ο γραμμικός επιλυτής και να επιβεβαιωθεί αν ο χρόνος υπολογισμού είναι αποδεκτός.

1.4.3 Περιγραφή τρίτης προσέγγισης

Στην Τρίτη φάση, ο σκοπός είναι να χτίσουμε πάνω στην εργασία που έχει γίνει με την αναζήτηση tabu και να εισάγουμε ένα δυναμικό μοντέλο τιμολόγησης το οποίο θα σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να παρέχει κίνητρα στους ανεξάρτητους συνεργάτες (freelancers) προκειμένου να εκτελέσουν τις μεταφορές. Αυτό το μοντέλο έχει υλοποιηθεί βάσει τεχνικών ελαχιστοποίησης μεταμέλειας (regret minimization). Ο στόχος του μοντέλου είναι να μπορέσει να προσαρμόσει την τιμολογιακή πολιτική και τον διαμοιρασμό των εργασιών με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθεί η απόρριψη εργασιών από τους ανεξάρτητους συνεργάτες (freelancers). Η συμμετοχή τους είναι καθοριστική για την επιτυχία ενός συστήματος διαμοιρασμού ποδηλάτων. Σε αυτή τη φάση υποθέτουμε ότι η δυναμική τιμολόγηση θα οδηγήσει σε αυξημένη απόδοση του συστήματος σε σχέση με τη στατική τιμολόγηση και θα προσφέρει ακόμα μεγαλύτερη ευελιξία καθώς και μικρότερο κόστος για τη διαχείριση του συστήματος.

1.4.4 Σύνοψη υλοποιήσεων

Συγκρίνοντας την απόδοση των τριών αυτών προσεγγίσεων, η εργασία στοχεύει στον προσδιορισμό της αποδοτικότητας, στην ελαχιστοποίηση του κόστους και τη μεγιστοποίηση της επεκτασιμότητας αυτού του τύπου συστημάτων. Η υπόθεση είναι ότι ενώ η ακριβής επίλυση θα θέσει μία βάση για προβλήματα μικρής κλίμακας, ο συνδυασμός της αναζήτησης tabu και της δυναμικής τιμολόγησης θα προσφέρουν τη βέλτιστη πρακτικότητα και μείωση κόστους. Επίσης η δυναμική τιμολόγηση εκτιμάται ότι θα βοηθήσει στην κατεύθυνση της ελαχιστοποίησης των απορριφθέντων εργασιών, της καλύτερης απόδοσης του συστήματος καθώς και στον ισορροπημένο διαμοιρασμό των ποδηλάτων στον δίκτυο.

Αυτή η εργασία στοχεύει στη γενικότερη κατανόηση και επίλυση προβλημάτων που προκύπτουν στα συστήματα αστικής μετακίνησης και έχει πρακτικές εφαρμογές σε πόλεις, οι οποίες δουλεύουν στην κατεύθυνση της βελτιστοποίησης των υπηρεσιών μετακίνησης τελευταίου μιλίου που παρέχουν, προσπαθούν να μειώσουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του συστήματος και προωθούν έναν βιώσιμο τρόπο μετακίνησης. Αντιμετωπίζοντας τις προκλήσεις της αναδιανομής ποδηλάτων και του προσδιορισμού των εργασιών με οικονομικό τρόπο, η εργασία παρέχει μια ολοκληρωμένη μέθοδο στην ανακύκλωση των ποδηλάτων, που αποτελεί έναν από τους πιο νευραλγικούς τομείς των συστημάτων αυτών.

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Σύνοψη προβλημάτων προς επίλυση

Το ζήτημα της ανακύκλωσης στα συστήματα κοινής χρήσης ποδηλάτων αποτελεί μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις που προκύπτουν από την αυξανόμενη υιοθέτηση αυτών των συστημάτων στις σύγχρονες πόλεις. Η διαχείριση των ποδηλάτων που φθείρονται, εγκαταλείπονται ή φτάνουν στο τέλος της ωφέλιμης ζωής τους, συνιστά πρόβλημα με περιβαλλοντικές, οικονομικές και λειτουργικές διαστάσεις. Ταυτόχρονα, οι στόχοι της βιωσιμότητας και της κυκλικής οικονομίας απαιτούν την υιοθέτηση καινοτόμων πρακτικών που μειώνουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και ενισχύουν τη μακροχρόνια αποδοτικότητα των συστημάτων αυτών.

Η πολυπλοκότητα του ζητήματος έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πληθώρας προσεγγίσεων, κάθε μία από τις οποίες εστιάζει σε διαφορετικές πτυχές του προβλήματος. Μία σημαντική κατηγορία μελετών επικεντρώνεται στη θεσμική ρύθμιση της ανακύκλωσης μέσω πολιτικών και κανονισμών που ενισχύουν την περιβαλλοντική υπευθυνότητα των παρόχων. Μέσα από πρωτοβουλίες όπως η επιβολή προγραμμάτων διευρυμένης ευθύνης του παρόχου ή την εφαρμογή οικονομικών κινήτρων, οι τοπικές αρχές επιχειρούν να εξισορροπήσουν την ανάγκη για βιωσιμότητα με την αποδοτική λειτουργία των συστημάτων διαμοιρασμού.

Πέρα από το θεσμικό πλαίσιο, έχουν προταθεί πολλές προσεγγίσεις, οι οποίες συνδυάζουν την ανακύκλωση των ποδηλάτων με τη μεταφορά και χωρική ανακατανομή τους. Η συνδυασμένη αυτή στρατηγική, έχει στόχο να βελτιώσει την αποδοτικότητα μέσω της παράλληλης συλλογής φθαρμένων ποδηλάτων και της εξισορρόπησης του φόρτου των σταθμών.

Μία ακόμα πιο εξειδικευμένη προσέγγιση αφορά τη διαχείριση συγκεκριμένων εξαρτημάτων, όπως οι μπαταρίες των ηλεκτρικών ποδηλάτων. Καθώς τα ηλεκτρικά ποδήλατα κερδίζουν έδαφος στα συστήματα κοινής χρήσης, οι μπαταρίες αποτελούν κρίσιμο σημείο λόγω του υψηλού κόστους και της περιβαλλοντικής επιβάρυνσής που συνδέεται με την απόρριψή τους. Οι στρατηγικές που επικεντρώνονται στη συλλογή και επαναχρησιμοποίηση των μπαταριών[31] ή σε βελτιωμένες πρακτικές ανακύκλωσης, όπως η χρήση δικτύων αντίστροφης εφοδιαστικής, έχουν προσελκύσει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον.

Μία μέθοδος που προτείνεται είναι αυτή της στατικής ανακύκλωσης. Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στην πραγματοποίηση της ανακύκλωσης σε προκαθορισμένες χρονικές περιόδους, συνήθως κατά τις νυχτερινές ώρες, όταν η ζήτηση για ποδήλατα είναι περιορισμένη. Παρόλο που η στατική ανακύκλωση παρέχει σταθερότητα και απλότητα στην εφαρμογή, υστερεί σε περιβάλλοντα με υψηλή δυναμική ζήτησης, καθώς δεν προσαρμόζεται εύκολα στις μεταβαλλόμενες ανάγκες του συστήματος.

Στην παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση, θα επιχειρήσουμε να δώσουμε μία εικόνα για τις προσεγγίσεις που έχουν προταθεί γύρω από το ζήτημα της ανακύκλωσης στα συστήματα κοινής χρήσης ποδηλάτων. Μέσα από την ανάλυση αυτών των προσεγγίσεων, στόχος είναι να αναδειχθούν οι ιδέες, τα προβλήματα που αντιμετωπίζονται καθώς και οι ευκαιρίες για βελτίωση.

2.2 Μπορούν τα συστήματα διαμοιρασμού να έχουν βιώσιμο μέλλον;

Στην επιστημονική εργασία [33] γίνεται μία λεπτομερής εξέταση των περιβαλλοντικών προκλήσεων και ευκαιριών που σχετίζονται με την ταχύτατα αυξανόμενη υιοθέτηση των συστημάτων διαμοιρασμού ποδηλάτων στην Κίνα. Αυτά τα συστήματα, έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν το ενεργειακό αποτύπωμα των πόλεων. Η συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιεί την ανάλυση κύκλου ζωής για να αξιολογήσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των κοινόχρηστων ποδηλάτων από την παραγωγή έως την ανακύκλωση.

Η μελέτη ξεκινά περιγράφοντας τη ραγδαία εξάπλωση αυτών των συστημάτων, τα οποία έγιναν δημοφιλή λόγω της ευκολίας χρήσης τους και της ταχύτητας στη μετακίνηση που προσφέ-

ρουν. Παρόλο που τα συστήματα αυτά βελτίωσαν την προσβασιμότητα, η περιορισμένη ανακύκλωση έχει δημιουργήσει τεράστιες ποσότητες αποβλήτων. Επιπλέον, εξαιτίας της πολύ μικρής διάρκειας ζωής των ποδηλάτων, που συνήθως είναι μόλις τρία χρόνια, η περιβαλλοντική μόλυνση είναι ακόμα μεγαλύτερη.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, το στάδιο της παραγωγής αποτελεί την κύρια πηγή περιβαλλοντικών επιπτώσεων, συμβάλλοντας κατά 81.18%. Το πρόβλημα αυτό εντοπίζεται κυρίως στα υλικά που χρησιμοποιούνται, όπως το αλουμίνιο και το καουτσούκ. Το αλουμίνιο, που χρησιμοποιείται σε πλαίσια και αλυσίδες, προκαλεί το 55.43% της συνολικής μόλυνσης λόγω της εξαιρετικά μεγάλης κατανάλωσης ενέργειας που απαιτεί η παραγωγή του. Στην Κίνα, η ενέργεια αυτή παράγεται κυρίως από μονάδες καύσης λιγνίτη, με αποτέλεσμα αυτό να οδηγεί σε ιδιαίτερα υψηλούς ρύπους. Αντίστοιχα, το καουτσούκ, που χρησιμοποιείται κυρίως στα ελαστικά, ευθύνεται για το 16.27% των επιπτώσεων και ευθύνεται κυρίως για την καταστροφή του όζοντος.

Η ανάλυση αποκαλύπτει επίσης σημαντικές αδυναμίες στη συντήρηση και ανακύκλωση. Η περιορισμένη συντήρηση και το υψηλό κόστος επισκευών καθιστούν ασύμφορη τη διατήρηση των ποδηλάτων σε λειτουργική κατάσταση. Συχνά τα ποδήλατα εγκαταλείπονται ή απορρίπτονται μετά από μικρές βλάβες. Παράλληλα, το σύστημα ανακύκλωσης είναι ανεπαρκές, με λιγότερο από 10% των υλικών να ανακτώνται. Η απουσία ενός οργανωμένου συστήματος ανακύκλωσης, σε συνδυασμό με την απουσία συνεργασιών μεταξύ κατασκευαστών και κέντρων ανακύκλωσης, επιδεινώνει περαιτέρω την κατάσταση.

Η μελέτη προτείνει σειρά μέτρων για την ενίσχυση της βιωσιμότητας αυτών των συστημάτων. Στο στάδιο της παραγωγής, προτείνεται η αντικατάσταση των υλικών με πιο φιλικές προς το περιβάλλον επιλογές, όπως η χρήση αλυσίδων από χάλυβα αντί για αλουμίνιο. Επίσης, προτείνεται η σχεδίαση των ποδηλάτων από την αρχή με απλούστερη κατασκευή και λιγότερα εξαρτήματα, ώστε να διευκολύνονται οι επισκευές και η ανακύκλωση. Μία καινοτόμος πρόταση είναι η ανάπτυξη αρθρωτών σχεδίων, όπου τα ποδήλατα θα αποτελούνται από εναλλάξιμα τμήματα που μπορούν εύκολα να αντικατασταθούν, μειώνοντας έτσι το κόστος συντήρησης και επιμηκύνοντας τη διάρκεια ζωής τους.

Για την ανακύκλωση, η μελέτη τονίζει την ανάγκη ανάπτυξης ενός ενιαίου, οργανωμένου συστήματος που θα περιλαμβάνει κατασκευαστές, φορείς ανακύκλωσης, τοπικές αρχές και καταναλωτές. Ένα τέτοιο σύστημα θα διασφαλίσει την ανάκτηση υλικών όπως το αλουμίνιο και ο χάλυβας, μειώνοντας την εξάρτηση από την εξόρυξη πρώτων υλών και τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις. Επιπλέον, η ενσωμάτωση τεχνολογιών, όπως η χρήση δεδομένων από IoT και GPS, μπορεί να βελτιώσει τη διαχείριση των ποδηλάτων, διευκολύνοντας τη συντήρηση και παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής τους.

Η μελέτη καταλήγει ότι τα κοινόχρηστα ποδήλατα μπορούν να γίνουν πραγματικά βιώσιμα, εάν βελτιωθούν τα συστήματα παραγωγής, συντήρησης και ανακύκλωσης. Με μία ολοκληρωμένη προσέγγιση που θα περιλαμβάνει την ανάπτυξη κυκλικών οικονομικών αλυσίδων παραγωγής-ανακύκλωσης, η βιομηχανία των κοινόχρηστων ποδηλάτων μπορεί να μειώσει δραστικά το περιβαλλοντικό της αποτύπωμα.

2.3 Μπορούν οι κρατικοί φορείς να λειτουργήσουν ρυθμιστικά;

Στη μελέτη [37] των Qingqing Sun et al. γίνεται μία εις βάθος ανάλυση των στρατηγικών που μπορούν να υιοθετήσουν οι τοπικές κυβερνήσεις και οι επιχειρήσεις κοινόχρηστων ποδηλάτων για τη διαχείριση και ανακύκλωση των εγκαταλελειμμένων ποδηλάτων. Η εργασία ενσωματώνει έννοιες από την εξελικτική θεωρία παιγνίων για να μελετήσει πως οι στρατηγικές επιλογές επηρεάζονται από παράγοντες όπως οι πράσινοι φόροι, η Εκτεταμένη Περιβαλλοντική Ευθύνη, τα κίνητρα και οι τιμωρίες.

Η Κίνα, ως η μεγαλύτερη αγορά κοινόχρηστων ποδηλάτων, έχει αντιμετωπίσει σοβαρά προβλήματα από την εγκατάλειψη χαλασμένων ποδηλάτων, οδηγώντας στο φαινόμενο των «νεκροταφείων ποδηλάτων». Το φαινόμενο αυτό προκαλεί τεράστιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως

ρύπανση και σπατάλη φυσικών πόρων, ενώ ταυτόχρονα δημιουργεί κοινωνικές και πολιτικές προκλήσεις. Οι τοπικές κυβερνήσεις και οι επιχειρήσεις πρέπει να συνεργαστούν για να βρουν βιώσιμες λύσεις που θα αμβλύνουν το πρόβλημα.

Η έρευνα προτείνει ένα μοντέλο εξελικτικού παιγνίου για τη διαχείριση της ανακύκλωσης. Στο μοντέλο αυτό, οι δύο κύριοι «παίκτες» είναι:

- ➔ Οι τοπικές κυβερνήσεις, που μπορούν να επιλέξουν στρατηγικές «ισχυρής εποπτείας» ή «χαλαρής εποπτείας».
- ➔ Οι επιχειρήσεις κοινόχρηστων ποδηλάτων, που μπορούν είτε να επιλέξουν τη στρατηγική της ανάληψης πλήρως της ευθύνης της ανακύκλωσης (EPR – Extended Producer Responsibility) ή τη στρατηγική της πληρωμής ενός φόρου ώστε να μεταβιβαστεί η ευθύνη στις τοπικές αρχές (GT – Green Tax)

Το μοντέλο που προτείνεται χρησιμοποιεί παραμέτρους όπως το ελάχιστο ποσοστό ανακύκλωσης, οι ανταμοιβές και οι τιμωρίες καθώς και η αποτελεσματικότητα ανακύκλωσης για να εξετάσει πως εξελίσσονται οι στρατηγικές επιλογές των παικτών με την πάροδο του χρόνου.

Η έρευνα προτείνει τη χρήση ενός δυναμικού συστήματος ανταμοιβών και τιμωριών αντί στατικών πολιτικών.

- ➔ **Ανταμοιβές:** Οι ανταμοιβές λειτουργούν ως το κύριο κίνητρο για τις επιχειρήσεις να επιλέξουν τη στρατηγική EPR, καθώς αυτές συνδέονται με περιβαλλοντικά οφέλη και αυξημένη κοινωνική αποδοχή.
- ➔ **Τιμωρίες:** Χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά για να αποτρέψουν τις επιχειρήσεις από το να επιλέγουν τη στρατηγική GT, ειδικά όταν τα περιβαλλοντικά κόστη είναι υψηλά.

Η μελέτη δείχνει ότι η καθιέρωση ενός ελάχιστου ποσοστού ανακύκλωσης στο 65% (ελάχιστο πρότυπο ανακύκλωσης) είναι κρίσιμη για την επιτυχία του συστήματος. Αυτή η στρατηγική όχι μόνο ενθαρρύνει τις επιχειρήσεις να επενδύσουν σε βιώσιμες πρακτικές, αλλά και μειώνει την πιθανότητα οι επιχειρήσεις να αφήσουν την ευθύνη στην κυβέρνηση.

Η εργασία αναλύει τις επιπτώσεις διαφορετικών παραμέτρων στη στρατηγική ισορροπία:

- ➔ **Κόστος Ρύθμισης (C3):** Όταν το κόστος ρύθμισης από την πλευρά της κυβέρνησης είναι υψηλό, υπάρχει αυξημένος κίνδυνος οι επιχειρήσεις να ακολουθήσουν στρατηγικές χαμηλής προσπάθειας (free-riding). Αυτό αποδυναμώνει τη δυνατότητα της κυβέρνησης να διατηρήσει μια πολιτική ισχυρής εποπτείας.
- ➔ **Περιβαλλοντικά Κόστη (C4):** Η αύξηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων αυξάνει την πίεση τόσο στις επιχειρήσεις όσο και στις κυβερνήσεις να υιοθετήσουν πιο φιλικές προς το περιβάλλον πρακτικές.
- ➔ **Αποτελεσματικότητα Ανακύκλωσης (I):** Όσο αυξάνεται η απόδοση της ανακύκλωσης, τόσο περισσότερες επιχειρήσεις υιοθετούν τη στρατηγική EPR, καθώς καθίσταται πιο κερδοφόρα.
- ➔ **Προσπάθεια Επιχειρήσεων (V):** Η αυξημένη επένδυση σε τεχνολογίες και προγράμματα ανακύκλωσης οδηγεί σε υψηλότερα ποσοστά επιτυχίας για τη στρατηγική EPR.

Η ανάλυση προσομοίωσης δείχνει ότι:

- Υπό στατικές ανταμοιβές και τιμωρίες, οι στρατηγικές επιλογές των παικτών παρουσιάζουν κυκλικές διακυμάνσεις, χωρίς να επιτυγχάνεται σταθερή ισορροπία.
- Υπό δυναμικές ανταμοιβές και τιμωρίες, οι στρατηγικές επιλογές συγκλίνουν σε μια σταθερή ισορροπία, με αυξημένη υιοθέτηση της στρατηγικής EPR από τις επιχειρήσεις.

Από την παραπάνω έρευνα τα συμπεράσματα που παίρνουμε είναι τα εξής:

1. Οι δυναμικές πολιτικές ανταμοιβών και τιμωριών είναι πιο αποτελεσματικές από τις στατικές, καθώς προσαρμόζονται στις αλλαγές της αγοράς και ενθαρρύνουν τις επιχειρήσεις να βελτιώσουν τις πρακτικές τους
2. Η σωστή ισορροπία μεταξύ ανταμοιβών και τιμωριών μπορεί να αυξήσει την αποδοτικότητα του συστήματος ανακύκλωσης, με τις ανταμοιβές να παίζουν τον κυρίαρχο ρόλο.
3. Η αύξηση της αποτελεσματικότητας της ανακύκλωσης μέσω καινοτομιών μπορεί να καταστήσει τη στρατηγική EPR πιο ελκυστική

2.4 Η χρήση της συλλογής ποδηλάτων κατά τη στατική ανακατανομή

Η μελέτη [32] ασχολείται με την επίλυση της στατικής ανακατανομής με ταυτόχρονη συλλογή χαλασμένων ποδηλάτων σε free floating συστήματα. Τα συστήματα ελεύθερης διασποράς των ποδηλάτων προσφέρουν ευελιξία στους χρήστες, επιτρέποντάς τους να παραλαμβάνουν και να αφήνουν ποδήλατα οπουδήποτε μέσα στην αστική περιοχή. Ωστόσο, αυτή η ευελιξία δημιουργεί μεγάλες προκλήσεις για τους διαχειριστές των συστημάτων, κυρίως λόγω της άνιση κατανομής των ποδηλάτων. Παράλληλα, η ύπαρξη χαλασμένων ποδηλάτων προσθέτει περαιτέρω δυσκολίες, καθώς αυτά συσσωρεύονται σε διάφορα σημεία, καταλαμβάνοντας χώρο και μειώνοντας την ποιότητα της υπηρεσίας.

Το άρθρο προτείνει μια ολοκληρωμένη στρατηγική ανακατανομής, η οποία συνδυάζει τη μετακίνηση ποδηλάτων για κάλυψη της ζήτησης με τη συλλογή των χαλασμένων ποδηλάτων. Σε αντίθεση με τις κλασικές προσεγγίσεις, οι οποίες διαχωρίζουν αυτές τις δύο διαδικασίες, η μεθοδολογία που προτείνεται ενσωματώνει τις δύο λειτουργίες σε ένα ενιαίο πλαίσιο, προσφέροντας αυξημένη αποδοτικότητα και καλύτερη διαχείριση πόρων.

Οι κύριοι στόχοι της μελέτης είναι:

1) Ανάπτυξη Μοντέλου Βελτιστοποίησης: Δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου γραμμικού προγραμματισμού, το οποίο περιγράφει τη διαδικασία ανακατανομής και συλλογής ποδηλάτων. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη:

1. Πολλαπλά αμαξοστάσια (depots) εκκίνησης και τερματισμού
2. Ετερογενείς στόλους φορτηγών με διαφορετικές χωρητικότητες
3. Πολλαπλές επισκέψεις στα ίδια σημεία, εφόσον απαιτείται

2) Προτεινόμενος Αλγόριθμος: Ένας συνδυαστικός αλγόριθμος αναπτύχθηκε για την επίλυση του μοντέλου σε μεγάλης κλίμακας προβλήματα. Ο αλγόριθμος βασίζεται στη δημιουργία μιας αρχικής λύσης μέσω μίας άπληστης στρατηγικής και στη βελτίωση της λύσης μέσω τεχνικών που χρησιμοποιούνται στους γενετικούς αλγορίθμους.

3) Πειραματική Εφαρμογή: Το προτεινόμενο μοντέλο και ο αλγόριθμος αξιολογήθηκαν σε δύο πραγματικά συστήματα διαμοιρασμού ποδηλάτων προκειμένου να αποδειχθεί η αποδοτικότητά τους.

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή του γραμμικού προβλήματος στοχεύει στη βελτιστοποίηση της συνολικής διάρκειας της διαδικασίας ανακατανομής. Ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος που απαιτείται για να ολοκληρωθεί η ανακατανομή και η συλλογή ποδηλάτων από ολόκληρο το στόλο των οχημάτων του παρόχου.

➔ Χαρακτηριστικά του Μοντέλου:

- Η εκκίνηση και ο τερματισμός των φορτηγών πραγματοποιούνται σε διαφορετικά αμαξοστάσια.
- Τα οχήματα του παρόχου έχουν διαφορετικές χωρητικότητες, γεγονός που αντανακλά τις επιχειρησιακές συνθήκες του πραγματικού κόσμου.
- Ορισμένα σημεία ενδέχεται να απαιτούν πολλαπλές επισκέψεις για να ικανοποιηθούν οι ανάγκες.

➔ Περιορισμοί:

Το μοντέλο περιλαμβάνει τους παρακάτω περιορισμούς:

- Η χωρητικότητα των οχημάτων του παρόχου
- Κατά τη διάρκεια της επανατοποθέτησης, η ζήτηση σε κάθε σταθμό είναι σταθερή.
- Δεν επιτρέπονται οι διαδρομές που περιλαμβάνουν κλειστές υποδιαδρομές

➔ Μέθοδος Επίλυσης

Λόγω της πολυπλοκότητας του μοντέλου, η επίλυσή του με ακριβείς μεθόδους για προβλήματα μεγάλης κλίμακας είναι ανέφικτη. Επομένως στη μελέτη αυτή, έχει αναπτυχθεί ένας αλγόριθμος που περιλαμβάνει δύο στάδια:

1) Δημιουργία αρχικής λύσης:

- Χρησιμοποιείται ένας άπληστος αλγόριθμος για τη δημιουργία μίας αρχικής λύσης
- Εισάγεται η έννοια του «Μέγιστου Επιχειρησιακού Αριθμού» για κάθε σταθμό, ο οποίος καθορίζει το μέγιστο αριθμό φορτοεκφορτώσεων που μπορεί να πραγματοποιήσει ένα φορτηγό

2) Βελτίωση Λύσης μέσω Γενετικού Αλγορίθμου:

- Χρησιμοποιούνται διαδικασίες crossover εναλλάσσοντας κομμάτια διαδρομών μεταξύ των οχημάτων προκειμένου να εξερευνηθούν νέες λύσεις
- Χρησιμοποιούνται διαδικασίες mutation, αλλάζοντας κομμάτια από τη διαδρομή ενός οχήματος προκειμένου να βελτιωθεί ο χρόνος που χρειάζεται να δαπανήσει

➔ Αποτελέσματα Πειραμάτων

Η μέθοδος εφαρμόστηκε στα συστήματα Share-A-Bull και Divvy. Τα αποτελέσματα έδειξαν:

- Η ολοκληρωμένη στρατηγική ανακατανομής είναι πιο αποδοτική από μεμονωμένες προσεγγίσεις.
- Ο προτεινόμενος αλγόριθμος επιλύει αποτελεσματικά μεγάλα προβλήματα μέσα σε λογικό χρονικό διάστημα.
- Η ανακατανομή του φορτίου μεταξύ των φορτηγών είναι πιο ισορροπημένη.

2.5 Η συλλογή ποδηλάτων κατά τη δυναμική ανακατανομή

Στο άρθρο των Caiet al.[29] αναλύεται ένα σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τα συστήματα κοινής χρήσης ποδηλάτων, το οποίο αφορά τη δυναμική ανακατανομή ποδηλάτων ανάμεσα στους σταθμούς, ενώ ταυτόχρονα εξετάζεται και η διαχείριση των χαλασμένων ποδηλάτων τα οποία, ειδικά κατά τις ώρες αιχμής, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ενοικίαση και απλά καταλαμβάνουν χώρο στους σταθμούς.

Η μελέτη επικεντρώνεται στο πρόβλημα της δυναμικής ανακατανομής ποδηλάτων με την εξέταση των χαλασμένων, το οποίο αποτελεί μια προσαρμοσμένη προσέγγιση για τη διαχείριση της ανακατανομής ποδηλάτων και της απομάκρυνσης χαλασμένων ποδηλάτων κατά τη διάρκεια της μέρας. Το κύριο πρόβλημα που αναδεικνύει η έρευνα είναι ότι η ζήτηση για ανακατανομή ποδηλάτων (δηλαδή η ανάγκη μετακίνησης ποδηλάτων από σταθμούς με περίσσεια σε αυτούς με έλλειψη) καθώς και ο αριθμός των χαλασμένων ποδηλάτων σε κάθε σταθμό δεν είναι γνωστά εκ των προτέρων. Αυτές οι ανάγκες αποκαλύπτονται μόνο όταν το όχημα που είναι υπεύθυνο για

την ανακατανομή φτάσει στον κάθε σταθμό. Σε αντίθεση με τις στρατηγικές στατικής ανακατανομής που στηρίζονται σε προγραμματισμένες διαδρομές και δεδομένα που είναι γνωστά από πριν (πχ όπως συμβαίνει κατά τη διάρκεια της νύχτας), η δυναμική φύση του προβλήματος απαιτεί μια ευέλικτη προσέγγιση που μπορεί να προσαρμοστεί στις πραγματικές συνθήκες.

Ο στόχος της προτεινόμενης λύσης είναι να μεγιστοποιήσει τη συνολική καλυπτόμενη ζήτηση, που περιλαμβάνει τόσο την ανακατανομή ποδηλάτων όσο και τη συλλογή χαλασμένων ποδηλάτων, ενώ ταυτόχρονα λαμβάνονται υπόψη τα κόστη που προκύπτουν από τη χρήση των οχημάτων ανακατανομής. Για να αντιμετωπίσουν αυτό το πρόβλημα, οι συγγραφείς προτείνουν μία μεθοδολογία βελτιστοποίησης, με τη χρήση της μεθόδου Branch and Price (B&P), η οποία είναι κατάλληλη για προβλήματα με υψηλή πολυπλοκότητα και μεγάλους χώρους λύσεων. Στην προσέγγιση B&P, το πρόβλημα διατυπώνεται μέσω ενός μοντέλου κατάτμησης συνόλων, το οποίο αναλύει το ζήτημα της επιλογής των καταλληλότερων συνόλων διαδρομών για τα οχήματα που θα πραγματοποιήσουν την ανακατανομή. Κάθε «σύνολο διαδρομών» αντιστοιχεί σε μια ακολουθία σταθμών που πρέπει να επισκεφτεί ένα όχημα. Ο στόχος είναι να μεγιστοποιηθεί η ικανοποίηση της ζήτησης ενώ ελαχιστοποιούνται τα λειτουργικά κόστη.

Το κύριο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι συγγραφείς είναι πώς να προσδιορίσουν ποια σύνολα διαδρομών θα πρέπει να επιλεγούν, καθώς ο αριθμός των πιθανών συνδυασμών των διαδρομών είναι τεράστιος, ειδικά για δίκτυα με πολλούς σταθμούς. Για να λύσουν αυτό το πρόβλημα, οι συγγραφείς ενσωματώνουν ένα "πρόβλημα τιμολόγησης" μέσα στο B&P, το οποίο διατυπώνεται ως *Μαρκοβιανό Μοντέλο Απόφασης (Markov Decision Model)*. Το MDM χρησιμοποιείται για να καθορίσει ποια είναι η βέλτιστη διαδρομή που πρέπει να ακολουθηθεί το όχημα ανακατανομής με βάση τις συνθήκες του συστήματος σε κάθε χρονική στιγμή. Αυτό επιτρέπει στα οχήματα να προσαρμόζουν τις διαδρομές τους δυναμικά, εξετάζοντας τη ζήτηση και τις συνθήκες που επικρατούν σε κάθε σταθμό.

Ένα καινοτόμο στοιχείο της έρευνας είναι η χρήση του MDM για την ανάπτυξη μιας προσαρμοστικής στρατηγικής δρομολόγησης, η οποία επιτρέπει στα οχήματα να προσαρμόζουν δυναμικά τις διαδρομές, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους που βασίζονται σε στατικές, προγραμματισμένες διαδρομές. Αυτή η στρατηγική προσαρμογής επιτρέπει στα οχήματα να μεγιστοποιούν την ικανοποίηση της ζήτησης με βάση τις πραγματικές συνθήκες που αντιμετωπίζουν κατά τη διάρκεια της διαδρομής.

Ωστόσο, η λύση του προβλήματος με τη μέθοδο B&P μπορεί να είναι υπολογιστικά απαιτητική, ιδιαίτερα για μεγάλα δίκτυα με πολλούς σταθμούς και αβέβαιες απαιτήσεις. Για να αντιμετωπίσουν αυτήν την πρόκληση, οι συγγραφείς προτείνουν μια υβριδική μεθοδολογία, συνδυάζοντας έναν αλγόριθμο μεταβλητής γειτονιάς αναζήτησης (VNS) και τη *διάσπαση του προβλήματος της βελτιστοποίησης, σε υποπροβλήματα*. Η VNS είναι μια γνωστή μεθοδολογία που βασίζεται στην αναζήτηση γειτονικών λύσεων και στη διαταραχή της τρέχουσας λύσης για να ξεφύγουμε από τοπικά βέλτιστες λύσεις. Η συνδυασμένη αυτή προσέγγιση προσφέρει μια πρακτική λύση για μεγάλα δίκτυα, όπου η ακριβής λύση μπορεί να είναι πολύ απαιτητική υπολογιστικά.

Οι συγγραφείς επιβεβαιώνουν τη μεθοδολογία τους μέσω αριθμητικών πειραμάτων, χρησιμοποιώντας τόσο συνθετικά δεδομένα όσο και πραγματικά δεδομένα από το σύστημα κοινής χρήσης ποδηλάτων της Nanjing. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η προσαρμοζόμενη στρατηγική ανακατανομής και η υβριδική μεθοδολογία προσφέρουν σημαντικά καλύτερη απόδοση σε σχέση με τις στατικές μεθόδους ανακατανομής. Συγκεκριμένα, η προσέγγιση αυτή αυξάνει το συνολικό επίπεδο εξυπηρέτησης, κάτι που σημαίνει ότι περισσότερα ποδήλατα ανακατανέμονται και περισσότερα χαλασμένα ποδήλατα συλλέγονται και απομακρύνονται. Αυτή η βελτίωση είναι ιδιαίτερα σημαντική για τα πραγματικά συστήματα, όπου η ζήτηση είναι συχνά αβέβαιη και η απομάκρυνση των χαλασμένων ποδηλάτων είναι κρίσιμη για τη διατήρηση υψηλής ποιότητας υπηρεσιών.

2.6 Χρήση της μεθόδου τεχνητής αποικίας μελισσών

Το άρθρο [34] παρουσιάζει μια διαφορετική προσέγγιση για την αντιμετώπιση του Προβλήματος Αναδιάταξης Ποδηλάτων (GBRP – Green Bicycle Repositioning Problem) σε Συστήματα Κοινής Χρήσης Ποδηλάτων (BSSs- Bike Sharing Systems). Το πρόβλημα επικεντρώνεται στην αναδιάταξη των ποδηλάτων ώστε να επιτευχθούν επιθυμητά επίπεδα αποθεμάτων στους σταθμούς, με ταυτόχρονη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μέσω ελαχιστοποίησης των εκπομπών CO₂ που παράγονται από τα οχήματα ανακατανομής. Το άρθρο συνδυάζει λειτουργικές και περιβαλλοντικές απαιτήσεις με στόχο τη βιωσιμότητα και την αποδοτικότητα.

Το GBRP εξετάζει πώς να βελτιστοποιηθεί η ανακατανομή ποδηλάτων σε σταθμούς, καθώς οι ανισόμετρες απαιτήσεις χρήσης δημιουργούν συχνά πλεονάσματα ή ελλείψεις ποδηλάτων. Οι σταθμοί στις κατοικημένες περιοχές μπορεί να αδειάζουν κατά τις ώρες αιχμής, ενώ αυτοί στις επιχειρηματικές περιοχές γεμίζουν. Αντίστοιχα, σε περιοχές με έντονη κλίση, οι σταθμοί στις χαμηλές ζώνες γεμίζουν γρήγορα λόγω της προτίμησης των χρηστών για κατηφορικές διαδρομές. Αυτές οι ανισορροπίες απαιτούν τη μεταφορά ποδηλάτων από σταθμούς με υπερβολικό απόθεμα σε σταθμούς με έλλειψη.

Παράλληλα, τα χαλασμένα ποδήλατα, τα οποία δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν και εμποδίζουν την πρόσβαση στους σταθμούς, πρέπει να συλλέγονται και να επιστρέφονται στο κέντρο επισκευής. Ταυτόχρονα, οι εκπομπές CO₂ των οχημάτων αναδιάταξης πρέπει να διατηρούνται στο ελάχιστο. Οι περιορισμοί αυτοί δημιουργούν ένα πολυδιάστατο πρόβλημα προς επίλυση.

Η μελέτη προτείνει τη χρήση ενός Ενισχυμένου Αλγόριθμου Τεχνητής Αποικίας Μελισσών (EABC), βασισμένου στον παραδοσιακό Αλγόριθμο Τεχνητής Αποικίας Μελισσών (ABC). Ο ABC, εμπνευσμένος από τη συμπεριφορά των μελισσών στην αναζήτηση τροφής, είναι ένας ευέλικτος αλγόριθμος βελτιστοποίησης που έχει εφαρμοστεί σε ποικίλα προβλήματα. Στην περίπτωση αυτή, ο EABC τροποποιείται για να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις του GBRP, με συγκεκριμένες βελτιώσεις, όπως:

1. **Προσαρμοσμένη Τοπική Αναζήτηση:** Επιτρέπει την καλύτερη εξερεύνηση του χώρου λύσεων και τη βελτίωση της ποιότητας των λύσεων με την πάροδο του χρόνου.
2. **Τροποποιημένη Φάση Παρατηρητών και Ανιχνευτών:** Ενισχύεται η ισορροπία μεταξύ της εξερεύνησης νέων λύσεων και της εκμετάλλευσης υπαρχουσών λύσεων, αποφεύγοντας τοπικά βέλτιστα σημεία.
3. **Ενσωμάτωση Μεθόδων Φόρτωσης και Εκφόρτωσης:** Αναπτύσσονται δύο μέθοδοι για τον προσδιορισμό ποσοτήτων φόρτωσης και εκφόρτωσης ποδηλάτων, μία ακριβής μέθοδος για μικρές περιπτώσεις και μία ευρετική για μεγαλύτερα προβλήματα.

Το μαθηματικό μοντέλο του προβλήματος διατυπώνεται ώστε να ελαχιστοποιήσει το σταθμισμένο άθροισμα των εξής τριών στόχων:

1. Την απόλυτη απόκλιση από τα επιθυμητά επίπεδα αποθεμάτων σε κάθε σταθμό.
2. Τις ποινές από σπασμένα ποδήλατα που παραμένουν στους σταθμούς.
3. Τις εκπομπές CO₂ που προκαλούνται από το όχημα αναδιάταξης.

Το όχημα αναδιάταξης πρέπει να πληροί περιορισμούς όπως:

- Χωρητικότητα.
- Μέγιστος διαθέσιμος χρόνος για την ολοκλήρωση της διαδρομής.
- Επιλογή πολλαπλών επισκέψεων σε σταθμούς για βελτιστοποίηση της λύσης.

Οι συγγραφείς χρησιμοποιούν δύο μεθόδους για την επίλυση του προβλήματος:

1. **Ακριβής Μέθοδος:** Βασισμένη σε γραμμικό προγραμματισμό, παρέχει βέλτιστες λύσεις αλλά είναι υπολογιστικά ακριβή και πρακτική μόνο για μικρότερα προβλήματα.

2. **Ευρετική Μέθοδος - EABC:** Προσφέρει ταχύτερες λύσεις που είναι κατάλληλες για μεγάλης κλίμακας προβλήματα, διατηρώντας την ποιότητα των αποτελεσμάτων.

Οι προτεινόμενες μέθοδοι δοκιμάστηκαν σε δεδομένα από 10 έως 300 σταθμούς. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ακριβής μέθοδος είναι κατάλληλη για μικρά προβλήματα, αλλά ο EABC υπερτερεί σε μεγαλύτερα μεγέθη προβλημάτων, παρέχοντας καλύτερες εφικτές λύσεις από άλλες μεθόδους αναφοράς. Ο EABC αρίστευσε σε προβλήματα με μεγαλύτερη πολυπλοκότητα, μειώνοντας δραστικά τις εκπομπές CO₂ και τις ποινές για τα σπασμένα ποδήλατα, ενώ ταυτόχρονα διατηρήθηκε ο χρόνος επεξεργασίας σε λογικά επίπεδα.

2.7 Εναλλακτικές τεχνικές

Η εργασία [35] προτείνει ένα πλαίσιο για τη βελτιστοποίηση της ανακατανομής ποδηλάτων στα Συστήματα Κοινής Χρήσης Ποδηλάτων (FFBS – Free-Floating Bike Sharing), λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία χαλασμένων ποδηλάτων. Στα FFBS, τα ποδήλατα μπορούν να τοποθετούνται ελεύθερα από τους χρήστες, δημιουργώντας πρόβλημα στη συλλογή και επισκευή των χαλασμένων ποδηλάτων, που επηρεάζουν αρνητικά τη λειτουργία και την εμπειρία των χρηστών.

Προτεινόμενη Μεθοδολογία

Οι συγγραφείς προτείνουν μια προσέγγιση που συνδυάζει τη μεταφορά των χαλασμένων ποδηλάτων από διάφορες τοποθεσίες με την ανακατανομή λειτουργικών ποδηλάτων για την κάλυψη της ζήτησης. Το πλαίσιο περιλαμβάνει δύο στάδια:

1. **Ομαδοποίηση χαλασμένων ποδηλάτων:** Τα χαλασμένα ποδήλατα ανατίθενται στους πλησιέστερους κόμβους (με βάση την Ευκλείδεια απόσταση), όπου συγκεντρώνονται για ευκολότερη διαχείριση.
2. **Λειτουργική ανακατανομή:**
 - **Οχήματα εξυπηρέτησης** μεταφέρουν τα χαλασμένα ποδήλατα από τις τυχαίες τοποθεσίες στους κόμβους.
 - **Οχήματα ανακατανομής** εκτελούν τρεις ταυτόχρονες λειτουργίες: διανομή λειτουργικών ποδηλάτων, συλλογή χαλασμένων για μεταφορά στις αποθήκες επισκευής και επιστροφή επισκευασμένων ποδηλάτων στο δίκτυο.
 -

Μοντέλο Γραμμικού Προβλήματος

Η μεθοδολογία διατυπώνεται ως Μικτό Γραμμικό Πρόβλημα Ακέραιων (MILP), με κύριο στόχο τη μείωση:

- Του κόστους από μη ικανοποιημένη ζήτηση.
- Του λειτουργικού κόστους των οχημάτων (διαδρομές, χειρισμοί, φόρτωση/εκφόρτωση).
- Του χρόνου αναμονής των οχημάτων ανακατανομής.

Οι περιορισμοί του μοντέλου περιλαμβάνουν:

- Χωρητικότητα οχημάτων.
- Ισορροπία αποθεμάτων σε κόμβους.
- Εξασφάλιση έγκυρων διαδρομών χωρίς υπο-διαδρομές.

Αποτελέσματα Αριθμητικής Μελέτης

Η μελέτη αξιολογήθηκε σε μικρή κλίμακα στη Nanjing, Κίνα, με ένα κέντρο και εννέα κόμβους. Χρησιμοποιήθηκαν 135 ποδήλατα, από τα οποία τα 15 ήταν χαλασμένα. Τα δεδομένα ταξιδιωτικών χρόνων συλλέχθηκαν από το Google Maps, ενώ οι παράμετροι κόστους ορίστηκαν ως εξής: \$0,3/λεπτό για οχήματα εξυπηρέτησης, \$0,8/λεπτό για οχήματα ανακατανομής, και \$0,1/λεπτό για τη διαχείριση χαλασμένων ποδηλάτων.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι:

- Χωρίς ποινή για μη ικανοποιημένη ζήτηση, παρατηρήθηκαν σημαντικές ελλείψεις ποδηλάτων (50 σε κάποια σημεία).
- Εισάγοντας ποινή, η ζήτηση καλύφθηκε πλήρως σε όλους τους κόμβους, με ελάχιστη αύξηση στο συνολικό κόστος. Η χρήση αυτού του παράγοντα εξασφαλίζει τη βελτίωση της εξυπηρέτησης των χρηστών χωρίς σημαντική οικονομική επιβάρυνση.
- Ο χρόνος αναμονής των οχημάτων ανακατανομής μειώθηκε σημαντικά, από 103 λεπτά σε μηδενικό χρόνο, όταν προστέθηκε μικρή ποινή χρόνου αναμονής. Παρά τη μικρή αύξηση (3,3%) στο κόστος λειτουργίας, αυτή η προσέγγιση βελτιστοποίησε την αποδοτικότητα.

Παρατηρήθηκε επίσης ότι η βελτιστοποίηση της αναμονής είναι ιδιαίτερα σημαντική σε περιπτώσεις όπου οχήματα ανακατανομής φτάνουν πριν ολοκληρωθούν οι εργασίες εξυπηρέτησης στους κόμβους.

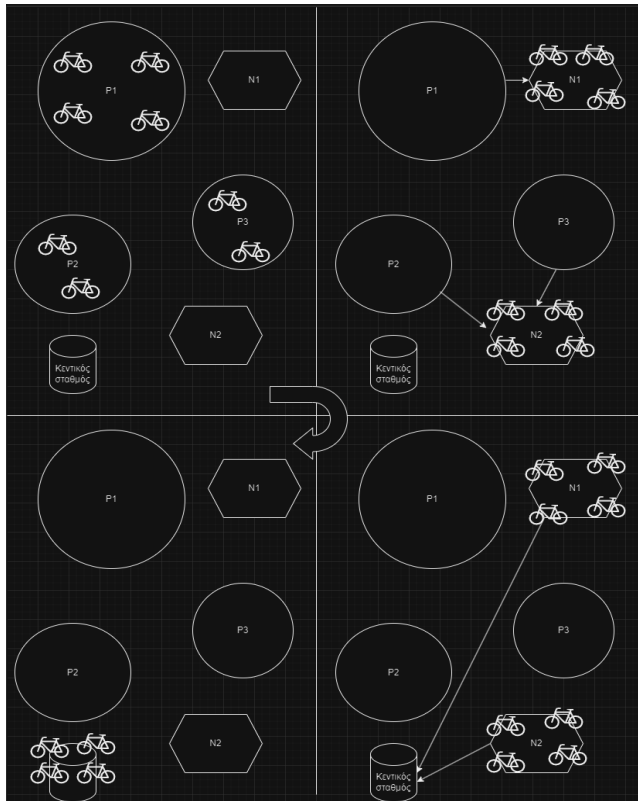
Συμπεράσματα

Η εργασία καταδεικνύει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης της διαχείρισης χαλασμένων ποδηλάτων στην καθημερινή ανακατανομή. Ο συνδυασμός αυτών των διαδικασιών μειώνει τα λειτουργικά κόστη και βελτιώνει την εμπειρία των χρηστών, εξασφαλίζοντας την κάλυψη της ζήτησης με περιορισμένη περιβαλλοντική επιβάρυνση. Παρόλο που το μοντέλο αποδεικνύεται αποτελεσματικό σε μικρές κλίμακες, η υπολογιστική πολυπλοκότητα του περιορίζει την εφαρμογή του σε μεγαλύτερα δίκτυα.

3. Παρουσίαση γραμμικού προβλήματος

3.1 Προσδιορισμός βασικών οντοτήτων

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιάσουμε το πρόβλημα περιγράφοντας με λεπτομέρειες τη μοντελοποίησή του. Στη συνέχεια θα περιγράψουμε τις εξισώσεις που θα χρησιμοποιήσουμε για την επίλυση του προβλήματος με τον γραμμικό επιλυτή καθώς και τις μεταβλητές χρησιμοποιούνται για την εξέταση του χώρου λύσεων του προβλήματος. Η βάση του προτεινόμενου προβλήματος έχει στηριχθεί πάνω στην εργασία των G. Xu και A. Zou [13].



Για τον προσδιορισμό του προβλήματος αρχικά χρειαζόμαστε ένα σύστημα διαμοιρασμού ποδηλάτων. Σε αυτό το σύστημα ορίζουμε κάποιους σταθμούς που ο ρόλος τους θα είναι η συγκέντρωση μίας μικρής ποσότητας ποδηλάτων. Η χρήση του σταθμού δε χρειάζεται να είναι πραγματική και μπορεί στην πράξη να εκφράζεται ακόμα και με μία μικρή έκταση, στην οποία βρίσκονται διάσπαρτα τα ποδήλατα. Για τη μεταφορά των ποδηλάτων από οποιοδήποτε σημείο αυτής της έκτασης σε κάποιο άλλο προδιαγεγραμμένο σημείο απαιτείται ίση προσπάθεια, οπότε είναι εργασίες που έχουν το ίδιο κόστος. Εισάγουμε αυτή την προϋπόθεση προκειμένου να απλοποιήσουμε το πρόβλημα διότι αλλιώς θα χρειαζόταν να έχουμε την απόσταση του κάθε ποδηλάτου από τον ενδιάμεσο σταθμό. Άρα θα είχαμε ένα πολύ μεγάλο υπολογιστικό κόστος ενώ τα ποδήλατα στην πραγματικότητα απέχουν ελάχιστα

μεταξύ τους. Εκτός από αυτούς τους σταθμούς θα υπάρχει άλλο ένα σύνολο σταθμών τα οποία θα λειτουργούν σαν αποθηκευτικός χώρος (ενδιάμεσοι σταθμοί). Σε αυτούς τους σταθμούς θα μεταφέρονται τα ποδήλατα από τους σταθμούς που περιγράψαμε στην αρχή. Τέλος θα υπάρχει ένας σταθμός, ο οποίος χαρακτηρίζεται σαν κεντρικός και θα είναι αυτός, στον οποίο θα μαζευτούν όλα τα ποδήλατα στο τέλος της κάθε διαδικασίας. Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι η διαδικασία της ανακύκλωσης, εφόσον διεξάγεται σε ένα σύστημα διαμοιρασμού ποδηλάτων, ανατροφοδοτείται συνεχώς. Η διαδικασία της ανακύκλωσης που θα περιγράψουμε αποτελείται από δύο φάσεις. Αρχικά, με τη συμμετοχή των ανεξάρτητων συνεργατών (freelancers) γίνεται η αρχική μετακίνηση των ποδηλάτων από τους μικρούς σταθμούς στους ενδιάμεσους. Στη συνέχεια αναλαμβάνει ένας τρίτος φορέας, ο οποίος με τη βοήθεια μεγαλύτερων οχημάτων, αναλαμβάνει τη μεταφορά των συγκεντρωμένων ποδηλάτων από τους ενδιάμεσους σταθμούς στον τελικό σταθμό.

Βασική εργασία του συστήματος είναι η εξής. Χρησιμοποιώντας τους περιορισμούς που θα περιγράψουμε στη συνέχεια, θα πρέπει να παραγάγει ένα σύνολο εργασιών για τους ανεξάρτητους συνεργάτες (freelancers) καθώς και ένα σύνολο εργασιών για τα οχήματα του τρίτου παρόχου. Μία πολύ βασική διαφορά που έχουμε ανάμεσα στους συμμετέχοντες ανεξάρτητους συνεργάτες (freelancers) και στα οχήματα του τρίτου παρόχου είναι ότι οι ανεξάρτητοι συνεργάτες

(freelancers) έχουν τη δυνατότητα να απορρίψουν μία εργασία η οποία προτείνεται από το σύστημα ενώ τα οχήματα του τρίτου παρόχου δεν έχουν αυτή τη δυνατότητα. Αυτή η διαφοροποίηση είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς είναι μία πρακτική την οποία ακολουθούν πολλά συστήματα αυτής της κατηγορίας. Επίσης για χάρη ευκολίας θα θεωρήσουμε ότι ο αριθμός των ποδηλάτων που προορίζονται για ανακύκλωση δε μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια ενός κύκλου εργασιών. Φυσικά, η συγκεκριμένη παραδοχή δεν απέχει πολύ από την πραγματικότητα καθώς εκτός από την επιδιόρθωση και την ανακύκλωση των οχημάτων, μία άλλη παθογένεια των συστημάτων διαμοιρασμού ποδηλάτων είναι ταχύτητα με την οποία αναγνωρίζονται από τον εκάστοτε πάροχο τα οχήματα που έχουν ανάγκη για επιδιόρθωση. Σε κάποιες περιπτώσεις, αν το σύστημα δεν υποστηρίζει την ενημέρωση σχετικά με την υγεία του στόλου από τον χρήστη αυτή η διαδικασία μπορεί να πάρει και μία μέρα μέχρι να εντοπισθεί ένα όχημα ως προβληματικό.

3.2 Προσδιορισμός κόστους οχημάτων

Τα οχήματα που χρησιμοποιεί ο τρίτος πάροχος φυσικά θα πρέπει και αυτά να ικανοποιούν κάποιες παραδοχές. Αρχικά θα πρέπει να ξεκινούν από τον κεντρικό σταθμό προς τους ενδιαμέσους χωρίς να έχουν φορτωμένο κάποιο ποδήλατο. Στη συνέχεια, τα οχήματα του παρόχου, θα πρέπει να εκτελούν τη διαδρομή που τους έχει ανατεθεί από το σύστημα. Τέλος θα πρέπει να επιστρέψουν στο σημείο από όπου ξεκίνησαν, δηλαδή στο σταθμό όπου θα μεταφερθούν τελικά τα ποδήλατα προς ανακύκλωση.

Όσον αφορά το κόστος για την κάθε εργασία εξαρτάται αρχικά αν θα εξυπηρετηθεί από όχημα του τρίτου παρόχου ή από κάποιον freelancer. Για τα οχήματα του παρόχου θεωρούμε ένα στοιχειώδες κόστος το οποίο χρησιμεύει ως μονάδα μέτρησης. Στη συνέχεια υπολογίζουμε την απόσταση που έχουν οι σταθμοί που βρίσκονται στη διαδρομή που έχει αναθέσει το σύστημα στο όχημα του παρόχου και πολλαπλασιάζουμε το στοιχειώδες κόστος με την απόσταση που θα διανύσει.

3.3 Προσδιορισμός κόστους ανεξάρτητων συνεργατών (freelancers)

Φυσικά δε θα μπορούσαμε να ακολουθήσουμε τον ίδιο τρόπο τιμολόγησης για τους ανεξάρτητους συνεργάτες (freelancers). Προκειμένου να εξασφαλίσουμε ότι η πληρωμή των ανεξάρτητων συνεργατών (freelancers) θα γίνεται με κριτήρια τα οποία θα επιτρέπουν την επέκταση του προβλήματος θεωρήσαμε ότι η τιμή που θα πρέπει να δίνεται για κάθε εργασία θα πρέπει να εξαρτάται από τα εξής. Από την απόσταση μεταξύ του αρχικού μικρού σταθμού και του ενδιαμέσου σταθμού στον οποίο θα τα μεταφέρει ο freelancer. Από τη στιγμή που το κόστος που θα έχει ο ίδιος ο freelancer για τη μεταφορά των ποδηλάτων είναι ανάλογο της απόστασης, έτσι θα πρέπει και η τιμή που πληρώνει το σύστημα να προσδιορίζεται ανάλογα με την απόσταση.

Επίσης, θεωρούμε ότι ο κάθε freelancer έχει έναν συντελεστή. Αυτός ο συντελεστής θα επηρεάζει αναλογικά το συνολικό κόστος του freelancer και ανάλογα με την τιμή που θα δίνεται από το σύστημα θα λειτουργεί σαν σύγκριση προκειμένου ο freelancer να δεχτεί ή να απορρίψει μία προσφορά από το σύστημα. Για παράδειγμα, έστω ότι μία μεταφορά, μετά από υπολογισμό της απόστασης ενός μικρού και ενός ενδιαμέσου σταθμού, του αριθμού των χαλασμένων ποδηλάτων, της χωρητικότητας του μεγάλου σταθμού, κοστίζει μία μονάδα πληρωμής. Αν ο freelancer έχει συντελεστή 0.85 αυτό σημαίνει ότι για τη μεταφορά ενός ποδηλάτου το κόστος του είναι 0.85 μονάδες πληρωμής. Οπότε αν το σύστημα του δώσει μία μονάδα πληρωμής, ο freelancer θα δεχτεί να εκπληρώσει την εργασία και το σύστημα θα έχει πληρώσει 0.15 μονάδες πληρωμής παραπάνω. Από την άλλη, αν κάποιος για την ίδια μεταφορά έχει συντελεστή 1.1, θα έχει κόστος 1.1 μονάδες πληρωμής. Άρα, αν το σύστημα του δώσει μία μονάδα πληρωμής για να μεταφέρει ένα ποδήλατο, ο freelancer θα αναγκαστεί να απορρίψει την προσφορά του συστήματος.

Βασιζόμενοι στους παράγοντες που περιγράψαμε στις παραπάνω υποενότητες συμβολίζουμε με ω τον συντελεστή που μας δείχνει το κόστος του εκάστοτε ανεξάρτητου επαγγελματία,

ενώ με c_{si} συμβολίζουμε την απόσταση που έχει ο σταθμός s από τον ενδιαμέσο σταθμό i . Συμπερασματικά, η εξίσωση που μας δίνει το κόστος ενός freelancer περιγράφεται από την παρακάτω σχέση.

$$r_{si} = \omega \cdot c_{si} \quad (1)$$

3.4 Μοντελοποίηση του προβλήματος

Σε αυτή την ενότητα της εργασίας θα περιγράψουμε με σχέσεις τους περιορισμούς που θα θέσουμε στο γραμμικό πρόβλημα προκειμένου να προσδιοριστούν με κατάλληλο τρόπο οι ενέργειες των ανεξάρτητων συνεργατών (freelancers) και οι κινήσεις που θα εκτελέσουν τα οχήματα του τρίτου παρόχου.

Σύνολα	Περιγραφή
K	Το σύνολο που περιγράφει τα οχήματα του τρίτου παρόχου
P	Το σύνολο των σταθμών που εξυπηρετούνται από τους ανεξάρτητους συνεργάτες (freelancers)
N	Οι ενδιαμέσοι σταθμοί
N_0	Οι ενδιαμέσοι σταθμοί μαζί με το σημείο επαναφοράς των ποδηλάτων
F	Το σύνολο των ανεξάρτητων συνεργατών (freelancers)

Παράμετροι	Περιγραφή
l_s	Ο αριθμός ποδηλάτων προς ανακύκλωση σε κάθε σταθμό που θα εξυπηρετηθεί από ανεξάρτητους συνεργάτες (freelancers)
L_i	Η χωρητικότητα του κάθε ενδιαμέσου σταθμού
c_{ij}	Η απόσταση μεταξύ των ενδιαμέσων σταθμών
utc	Το κόστος ενός οχήματος του τρίτου παρόχου για να διανύσει μία μονάδα απόστασης
C	Η χωρητικότητα του κάθε οχήματος του τρίτου παρόχου
r_{si}	Το ποσό που αποδίδει το σύστημα στους ανεξάρτητους συνεργάτες (freelancers) που μετακινούν ποδήλατα από το σταθμό s στον ενδιαμέσο σταθμό i
T	Ο προϋπολογισμός για την ανακύκλωση

M	Ένας μεγάλος θετικός αριθμός προκειμένου να αποφευχθούν οι υποδιαδρομές
m_s	Ο πολλαπλασιαστής του κάθε freelancer
k_penalty	Ο πολλαπλασιαστής υπολογισμού της ποινής για τις εργασίες που δεν εκτελούνται λόγω άρνησης των ανεξάρτητων συνεργατών.

Παράμετροι απόφασης	Περιγραφή
x_{ij}^k	Η παράμετρος αυτή είναι 1 αν το όχημα k πήγε από τον κόμβο i στον κόμβο j και 0 σε κάθε άλλη περίπτωση
Y_i^k	Ο αριθμός των ποδηλάτων που φορτώθηκαν στο όχημα k του τρίτου παρόχου στον κόμβο i
Z_{si}	Ο αριθμός των ποδηλάτων που μετακινήθηκαν από τον κόμβο s στον ενδιάμεσο σταθμό i
$z_{accepted_{si}}$	Τα οχήματα που έχουν αποδεχτεί οι ανεξάρτητοι συνεργάτες (freelancers) για μετακίνηση από τον κόμβο s στον κόμβο i
Q_i^k	Ο αριθμός των ποδηλάτων στο όχημα k κατά την αναχώρηση του από τον κόμβο i
B_i^k	Βοηθητική συνάρτηση για την αποφυγή υποδιαδρομών του οχήματος k που αρχίζει και καταλήγει στον σταθμό i
accept _{s,i}	Βοηθητική μεταβλητή για τον προσδιορισμό των αποδεχόμενων εργασιών. Παίρνει τιμή 0 ή 1

3.5 Προσδιορισμός περιορισμών

Αρχικά θα χρειαστεί να ορίσουμε την αντικειμενική συνάρτηση που ως στόχο θα έχουμε την εύρεση της ελάχιστης τιμής ενώ την ίδια στιγμή θα καλύπτουμε και τους υπόλοιπους περιορισμούς.

Αντικειμενική Συνάρτηση

$$\min \sum_{k \in K, i \in N_0, j \in N_0} utc \cdot c_{i,j} \cdot x_{i,j}^k + \sum_{s \in P, i \in N} r_{s,i} \cdot z_{accepted_{s,i}} + \sum_{s \in P, i \in N} k_{penalty} \cdot (Z_{s,i} - s_{accepted_{s,i}})$$

Στη συνέχεια, αφού έχουμε προσδιορίσει την αντικειμενική συνάρτηση που θα χρησιμοποιήσουμε για τη βελτιστοποίηση, θα προσδιορίσουμε και τους περιορισμούς, οι οποίοι μοντελοποιούν το πρόβλημα που θα λυθεί με τον γραμμικό επιλυτή.

Περιορισμοί Γραμμικού Προβλήματος

- 1) $\sum_{i \in N} Z_{s,i} \leq l_s, \forall s \in P$
- 2) $\sum_{s \in P} Z_{s,i} \leq L_i, \forall i \in N$
- 3) $z_{accepted_{s,i}} \leq M \cdot accept_{s,i}, \forall s \in P, i \in N$
- 4) $z_{accepted_{s,i}} \leq Z_{s,i}, \forall s \in P, i \in N$
- 5) $z_{accepted_{s,i}} \geq Z_{s,i} - M \cdot (1 - accept_{s,i}), \forall s \in P, i \in N$
- 6) $\sum_{k \in K} Y_i^k = \sum_{s \in P} z_{accepted_{s,i}}, \forall i \in N$
- 7) $\sum_{i \in N_0, j \in N_0} utc \cdot c_{i,j} \cdot x_{i,j}^k \leq T, \forall k \in K$
- 8) $Y_0^k = 0, \forall k \in K$
- 9) $Y_{k,i} \leq M \cdot \sum_{j \in N_0} x_{i,j}^k, \forall k \in K, i \in N$
- 10) $Q_0^k = 0, \forall k \in K$
- 11) $Q_{k,j} = Q_{k,i} + Y_j^k, \forall k \in K, i \in N_0, j \in N_0$
- 12) $Q_{k,i} \leq C, \forall k \in K, i \in N_0$
- 13) $\sum_{i \in N_0} x_{i,j}^k = \sum_{j \in N_0} x_{j,i}^k, \forall k \in K, i \in N$
- 14) $\sum_{i \in N_0} x_{i,0}^k = 1, \forall k \in K$
- 15) $\sum_{k \in K, j \in N_0} x_{i,j}^k \leq 1, \forall i \in N$
- 16) $B_{k,j} \geq B_{k,i} + 1 - M \cdot (1 - x_{i,j}^k), \forall k \in K, i \in N_0, j \in N$

3.6 Ανάλυση περιορισμών

Η αντικειμενική συνάρτηση έχει προσδιοριστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε η ελαχιστοποίησή της να αναπαριστά τόσο τη μείωση των λειτουργικών εξόδων της διαδικασίας όσο και το διαφυγόν κέρδος που υπάρχει σε κάθε εργασία, η οποία δεν εκπληρώθηκε. Οι δύο πρώτοι όροι της αντικειμενικής συνάρτησης δείχνουν το κόστος που αναλογεί στη μετακίνηση οχημάτων με τα οχήματα του τρίτου παρόχου και των ανεξάρτητων συνεργατών (freelancers) αντίστοιχα.

Όσον αφορά τους περιορισμούς που έχουν τεθεί για το συγκεκριμένο γραμμικό πρόβλημα, ξεκινάμε με τον αρχικό περιορισμό (1) που αναφέρεται στη σχέση που θα πρέπει να έχει ο αριθμός των ποδηλάτων που βρίσκονται στους αρχικούς σταθμούς και ο μέγιστος αριθμός των ποδηλάτων που θα μεταφερθούν από αυτούς τους σταθμούς. Φυσικά, τα ποδήλατα που υπάρχουν σε αυτούς τους σταθμούς θα πρέπει να είναι τουλάχιστον όσα θα μετακινηθούν. Ο λόγος για τον οποίο δε θα ισχύει πάντα η ισότητα είναι προκειμένου να προχωρήσουμε στη γενίκευση του προβλήματος στα επόμενα βήματα, να εισάγουμε ακόμα μία λεπτομέρεια, η οποία είναι ιδιαίτερα ουσιαστική, τη δυνατότητα που έχουν οι ανεξάρτητοι συνεργάτες (freelancers) να μην αποδεχθούν μία εργασία.

Στη συνέχεια, ο δεύτερος περιορισμός (2), περιγράφει ότι το άθροισμα των ποδηλάτων που συλλέγονται στον ενδιάμεσο σταθμό i , από όλες τις διαδρομές δε μπορεί να υπερβαίνει την ανώτατη χωρητικότητα L_i του σταθμού. Αυτό εξασφαλίζει ότι η κάθε θέση, δε θα δεχτεί περισσότερα ποδήλατα από όσα μπορεί να διαχειριστεί και να χωρέσει. Οπότε αποφεύγεται ο κίνδυνος υπερβολικής συγκέντρωσης οχημάτων. Αυτό είναι σημαντικό, διότι θα πρέπει οι θέσεις να παραμείνουν διαχειρίσιμες και να μην παρουσιάζουν λειτουργικά προβλήματα, τα οποία θα χαμηλώσουν το επίπεδο υπηρεσίας του συστήματος.

Οι επόμενοι τρεις περιορισμοί (3),(4),(5), έχουν δημιουργηθεί, με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορέσουμε να μοντελοποιήσουμε στον γραμμικό επιλυτή τη σχέση που θα πρέπει να υπάρχει ανάμεσα στα ποδήλατα που αποδέχεται ο κάθε freelancer να μεταφέρει και στα ποδήλατα που τελικά μεταφέρονται από έναν σταθμό στους ενδιάμεσους.

Στη συνέχεια, στον (6) προσδιορίζουμε ότι το άθροισμα της ποσότητας Y_i^k που παραδίδεται στα οχήματα του τρίτου παρόχου στον ενδιάμεσο σταθμό i πρέπει να ισούται με τη συνολική ποσότητα $z_{accepted_{s,i}}$ που έχει μεταφερθεί από τους ανεξάρτητους συνεργάτες στον ενδιάμεσο σταθμό i . Αυτός ο περιορισμός διασφαλίζει ότι η ποσότητα που παραδίδεται σε ένα ενδιάμεσο σταθμό αντιστοιχεί στην ποσότητα που μεταφέρεται από τα οχήματα του τρίτου παρόχου.

Στα οχήματα του τρίτου παρόχου έχουμε θέσει έναν προϋπολογισμό T . Το συνολικό κόστος για κάθε όχημα k του παρόχου, που υπολογίζεται βάσει του κόστους μετακίνησης $c_{i,j}$ και της διαδρομής $x_{i,j}^k$ δεν πρέπει να υπερβαίνει τον προϋπολογισμό T . Αυτός ο περιορισμός (7) θέτει έναν οικονομικό ή χρονικό περιορισμό για κάθε όχημα του τρίτου παρόχου, εξασφαλίζοντας ότι οι διαδρομές που επιλέγονται είναι οικονομικά βιώσιμες ή ολοκληρώνονται εντός του διαθέσιμου χρόνου.

Οι περιορισμοί (8) και (10) περιγράφουν τη συμπεριφορά των οχημάτων στην αφετηρία. Στην αφετηρία, κάθε όχημα ξεκινά με μηδενική ποσότητα φορτίου. Αυτός ο περιορισμός είναι σημαντικός για να εξασφαλίσει ότι το μοντέλο ξεκινά με μία σταθερή και ελεγχόμενη συνθήκη, χωρίς ήδη φορτωμένα οχήματα στην αρχική θέση. Επίσης τα οχήματα του παρόχου θα πρέπει να έχουν μηδενικό φορτίο στην αρχική θέση. Αυτό διατηρεί τη συνοχή στο μοντέλο, διασφαλίζοντας ότι κάθε διανομέας ξεκινά με κενό φορτίο, ώστε να μην υπάρχουν προκαθορισμένα φορτία που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την κατανομή των ποδηλάτων.

Ο περιορισμός (9) έχει σαν στόχο να εξασφαλίσει ότι τα ποδήλατα παραλαμβάνονται μόνο από θέσεις που επισκέπτονται τα οχήματα, αποτρέποντας τη συλλογή ποδηλάτων σε θέσεις που δεν ανήκουν στη διαδρομή τους.

Στη συνέχεια, ο περιορισμός (11) έχει τεθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να περιγράφει το φορτίο του κάθε οχήματος σε κάθε διαδρομή και να προσαρμόζεται λαμβάνοντας υπόψη την ποσότητα που συλλέγεται ή παραδίδεται στις θέσεις. Αυτός ο περιορισμός βοηθά στην καταγραφή της αλλαγής του φορτίου καθώς το όχημα προχωρά, εξασφαλίζοντας ότι το μοντέλο διατηρεί ακριβή παρακολούθηση του φορτίου σε κάθε σημείο της διαδρομής.

Τέλος, οι περιορισμοί (12)-(16) έχουν ως στόχο να αποτρέψουν την υπερφόρτωση του κάθε οχήματος, διασφαλίζοντας ότι η διανομή είναι εντός των δυνατοτήτων του, βοηθά στη διατήρηση κλειστών διαδρομών, ώστε να μην υπάρχουν αδιέξοδα, κλείνει τις διαδρομές, διασφαλίζοντας ότι τα οχήματα ολοκληρώνουν τη διαδρομή τους, Αποτρέπει πολλαπλές επισκέψεις στην ίδια θέση, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα και διασφαλίζει ότι οι διαδρομές ακολουθούν συγκεκριμένη σειρά, βοηθώντας στον καθορισμό της αλληλουχίας των επισκέψεων.

4. Παρουσίαση επίλυσης με χρήση tabu search

Από τη στιγμή που το προτεινόμενο πρόβλημα έχει μοντελοποιηθεί ως ένα γραμμικό πρόβλημα, για μικρά μεγέθη του προβλήματος, θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε κάποιον γραμμικό επιλυτή προκειμένου να πάρουμε τη βέλτιστη τιμή για την αντικειμενική συνάρτηση. Στην πράξη όμως, τα μεγέθη των προβλημάτων που αντιμετωπίζουμε είναι τόσο μεγάλα, που οι γραμμικοί επιλυτές δεν έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν λύση σε ικανοποιητικό χρονικό διάστημα. Για αυτό το λόγο, έχουμε χρησιμοποιήσει για τη δεύτερη υλοποίηση του προβλήματος την αναζήτηση tabu. Χρησιμοποιούμε τον μηχανισμό προσδιορισμού της αρχικής λύσης, καθώς και τις προτεινόμενες γειτονιές από την εργασία των G. XU και A. ZOU[13]. Η αναζήτηση tabu αποτελείται από την αρχική λύση, τον τρόπο με τον οποίο επιλέγουμε τις δομές δεδομένων που θα εξυπηρετούν στον μη εγκλωβισμό σε τοπικά βέλτιστες λύσεις καθώς και τη λίστα των πιο καλών λύσεων.

Στη συνέχεια ακολουθεί σε ψευδοκώδικα ο τρόπος με τον οποίο γίνεται ο υπολογισμός :

Αλγόριθμος 1 : Η αναζήτηση Tabu

- 1: Καθορισμός των freelancers που αποδέχονται την προτεινόμενη εργασία
 - 2: Καθορισμός της αρχικής λύσης s
 - 3: $s_{best} \leftarrow s$
 - 4: Σύνολο καλών λύσεων $E \leftarrow \emptyset$
 - 5: Όσο (χρόνος λειτουργίας της αναζήτησης < μέγιστος ορισμένος χρόνος) τότε
 - 6: Δημιουργία μίας νέας λύσης s χρησιμοποιώντας τυχαία μία από τις επόμενες μεθόδους
 - a. Εναλλαγή κόμβων στην ίδια διαδρομή
 - b. Τυχαία επανατοποθέτηση κόμβου στην ίδια διαδρομή
 - c. Εναλλαγή κόμβων σε άλλη διαδρομή
 - d. Τυχαία επανατοποθέτηση κόμβου σε άλλη διαδρομή
 - 7: Αν (η λύση s είναι καλύτερη από την s_{best}) τότε
 - 8: $s_{best} \leftarrow s$
 - 9: Εισαγωγή της λύσης s_{best} στο σύνολο E
 - 10: Εισαγωγή της λύσης s_{best} στη λίστα Tabu
 - 11: Τέλος αν
 - 12: Αν (s_{best} δεν έχει βελτιωθεί τις τελευταίες IT επαναλήψεις) τότε
 - 13: Επιλογή τυχαίας λύσης s_r από το σύνολο E και αφαίρεσή της από το σύνολο
 - 14: $s \leftarrow s_r$
 - 15: Επαναφορά της λίστας tabu
 - 16: Τέλος αν
 - 17: Τέλος όσο
-

4.1 Αναπαράσταση της λύσης

Για το σύστημά μας, μία λύση s αποτελείται από δύο μέρη. Το ένα είναι το σύνολο των διαδρομών που θα κάνει το κάθε όχημα του παρόχου και το δεύτερο είναι οι εργασίες που παρέχονται στους ανεξάρτητους συνεργάτες (freelancers). Για να έχουμε την ίδια αναπαράσταση, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε σαν στοιχείο και την τιμή που θα δώσουμε στον πολλαπλασιαστή. Τόσο στο γραμμικό πρόβλημα, όσο και στην αναζήτηση tabu αυτό το κομμάτι δεν είναι καθοριστικό, καθώς ο πολλαπλασιαστής είναι ίσος με 1. Όμως στη δυναμική τιμολόγηση η κατάσταση είναι διαφορετικής διότι σε κάθε χρονική στιγμή θα πρέπει να έχουμε τόσο τις διαδρομές των οχημάτων του τρίτου παρόχου με τις εργασίες των ανεξάρτητων συνεργατών (freelancers) αλλά και την τιμή του πολλαπλασιαστή όπως αυτή διαμορφώνεται κάθε φορά.

Κάθε διαδρομή του οχήματος k του παρόχου μπορεί να αναπαρασταθεί ως $i_0^k \rightarrow i_1^k \rightarrow \dots \rightarrow i_n^k$, όπου τόσο η πρώτη τιμή όσο και η τελευταία είναι ο τελικός σταθμός. Ένας ενδιαμέσος σταθμός αναπαρίσταται με i_h^k όπου ο δείκτης $h \in \{1, 2, \dots, n-1\}$ χρησιμοποιείται για να ορίσει τη σειρά με την οποία το όχημα k του παρόχου επισκέπτεται τους ενδιαμέσους σταθμούς. Για κάθε ενδιαμέσο σταθμό i_h^k στη διαδρομή του οχήματος k , υπάρχει ένα σύνολο $(z_{1,i_h^k}, \dots, z_{s,i_h^k}, \dots, z_{|P|,i_h^k})$ που είναι συνδεδεμένο με τη διαδρομή, όπου ο κάθε όρος καθορίζει τον αριθμό των χαλασμένων ποδηλάτων που μεταφέρθηκαν από τον σταθμό $s \in P$. Σε αυτό το σημείο, να σημειώσουμε ότι ο αριθμός των ποδηλάτων που θα μεταφέρει από κάθε ενδιαμέσο σταθμό το όχημα του παρόχου δεν αναπαρίσταται στη λύση καθώς μπορεί εύκολα αυτή η πληροφορία να παραχθεί εξετάζοντας τον αριθμό των ποδηλάτων που μεταφέρθηκαν σε κάθε σταθμό καθώς έχουμε σαν περιορισμό ότι ένας ενδιαμέσος σταθμός εξυπηρετείται από ένα μόνο όχημα του παρόχου.

4.2 Καθορισμός των ανεξάρτητων συνεργατών (freelancers) που αποδέχονται την προτεινόμενη εργασία

Πριν ακόμα ξεκινήσουμε να υπολογίζουμε τις εργασίες που θα δώσουμε στους ανεξάρτητους συνεργάτες (freelancers) καθώς και τις διαδρομές που θα ακολουθήσουν τα οχήματα του παρόχου, θα πρέπει να έχουμε γνώση των εργασιών που θα μπορούσαν να αποδεχτούν οι ανεξάρτητοι συνεργάτες (freelancers). Έχουμε επιλέξει να μοντελοποιήσουμε το κόστος των ανεξάρτητων συνεργατών (freelancers) μελετώντας αρχικά τα κριτήρια που μπορούμε να γνωρίζουμε, εξετάζοντας την απόσταση που έχουν οι σταθμοί μεταξύ τους, εξετάζοντας τον αριθμό των ποδηλάτων που δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν καθώς και τον αριθμό των ποδηλάτων που μπορεί να χωρέσουν οι ενδιαμέσοι σταθμοί. Στη συνέχεια έχουμε τοποθετήσει σαν πολλαπλασιαστή ω τα κριτήρια που δε γνωρίζουμε, αλλά σε κάποιες περιπτώσεις, μπορεί ούτε ο ίδιος ο freelancer να μπορεί να διατυπώσει. Αυτή η μοντελοποίηση, είναι από τη μία πολύ κοντά στην πραγματικότητα, από την άλλη βοηθά στο να έχουμε μία σταθερή απάντηση από τους ανεξάρτητους συνεργάτες (freelancers) προκειμένου να μπορέσουμε να τις χρησιμοποιήσουμε σαν σταθερή βάση για τη σύγκριση που θα κάνουμε.

Συνεπώς το πρώτο βήμα είναι να προσφέρουμε εργασίες στους ανεξάρτητους συνεργάτες (freelancers) και να δούμε αν θα δεχτούμε θετική ή αρνητική απάντηση. Σε αυτό το σημείο, θα πρέπει να υπενθυμίσουμε, ότι έχουμε εισάγει στην αντικειμενική μας συνάρτηση ένα κομμάτι το οποίο κρατάει τις εργασίες που δεν έχουν πραγματοποιηθεί. Αυτό έχει γίνει για δύο λόγους. Αφενός, θέλαμε να υπάρχει σαν όρος στην αντικειμενική συνάρτηση προκειμένου να αποδοθεί το κόστος που θα έχει για το σύστημα η παραμονή των χαλασμένων οχημάτων και η μη-επιδίρθωση τους. Αφετέρου, ήταν απαραίτητη προϋπόθεση προκειμένου να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τις μεθόδους που αναπτύσσουμε. Στην περίπτωση που δεν υπήρχε αυτός ο όρος, θα έπρεπε να μεταφερθούν όλα τα οχήματα που είναι σε κατάσταση που δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Σε αντίθετη περίπτωση, το σύστημα θα μπορούσε απλώς να επιλέξει να μη μεταφέρει κανένα όχημα, αφού προφανώς θα ήταν η λύση που θα είχε το μικρότερο οικονομικό κόστος, άρα και τη μικρότερη αντικειμενική συνάρτηση. Σε αυτή την περίπτωση όμως, θα έπρεπε όλες οι

εργασίες να λάβουν θετική απάντηση. Για να γίνει αυτό, θα έπρεπε το μέγεθος των ανεξάρτητων συνεργατών (freelancers) να είναι πολύ μεγάλο. Σαν συνέπεια, θα μπορούσαμε αντί για την τιμή που παρέχουμε, να είχαμε μία πολύ μικρότερη τιμή, στοχεύοντας στους ανεξάρτητους συνεργάτες (freelancers) που έχουν το μικρότερο κόστος. Φυσικά αυτό δε θα μπορούσε να συμβεί στην πράξη διότι θα καθιστούσε τη μεταφορά των ποδηλάτων μη επικερδή απασχόληση και στη συνέχεια απλά ο αριθμός των ανεξάρτητων συνεργατών (freelancers) θα ερχόταν σε ισορροπία.

4.3 Καθορισμός της αρχικής λύσης

Σε αυτή την ενότητα, θα προχωρήσουμε στην περιγραφή της δημιουργίας της αρχικής λύσης. Η αρχική λύση είναι σχεδιασμένη με τέτοιο τρόπο, ώστε να πληρούνται οι περιορισμοί του προβλήματος χωρίς όμως να υπάρχει η υποχρέωση για συγκεκριμένη απόδοση. Αυτή η λύση θα θέσει τη βάση για την παραπέρα ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης και χωρίζεται σε δύο τμήματα. Το διαμοιρασμό εργασιών στους ανεξάρτητους συνεργάτες (freelancers) και το σχεδιασμό διαδρομών για τα οχήματα του παρόχου.

Αλγόριθμος 2.1 : Η αρχική κατανομή στους freelancers

- 1: Αρχικοποίηση $l_{left}[s] = l_s, \forall s \in P$.
 - 2: Αρχικοποίηση $L_{left}[i] = L_i, \forall i \in N$.
 - 3: Ταξινόμηση του συνόλου $R \ni r_{s,i}$.
 - 4: Όσο $R \neq \emptyset$
 - a. Επιλέγω το πρώτο στοιχείο του $R, r_{p,d}, p \in P, d \in N$.
 - b. Υπολογίζω $z_{accepted_{p,d}} = \min(l_{left}[p], L_{left}[d])$.
 - c. Ενημερώνω:
 - i. $l_{left}[p] \leftarrow l_{left}[p] - z_{accepted_{p,d}}$.
 - ii. $L_{left}[d] \leftarrow L_{left}[d] - z_{accepted_{p,d}}$.
 - d. Αν $(l_{left}[p] = \emptyset, \betaγάλε όλα τα $r_{p,*}$ από το R)$
 - e. Αν $(L_{left}[d] = \emptyset, \betaγάλε όλα τα $r_{*,d}$ από το R)$
-

Στο πρώτο τμήμα της λύσης ο μηχανισμός έχει σαν στόχο τον διαμοιρασμό εργασιών κάνοντας χρήση της μεταβλητής απόφασης $z_{accepted_{s,i}}$ η οποία αναπαριστά τον αριθμό των χαλασμένων ποδηλάτων που μεταφέρονται από τον υποσταθμό p στον ενδιάμεσο σταθμό d . Για κάθε υποσταθμό $s \in P$ και κάθε ενδιάμεσο σταθμό $i \in N$ αρχικά ορίζουμε ένα σύνολο R το οποίο περιέχει τα κόστη για όλες τις εργασίες μετακίνησης $r_{s,i}$. Οι εργασίες μετακίνησης ταξινομούνται σε αύξουσα σειρά με βάση το κόστος του έτσι ώστε αρχικά να χρησιμοποιηθούν οι εργασίες που είναι πιο οικονομικές.

Στο επόμενο βήμα επιλέγουμε την εργασία με κόστος $r_{p,d}$ μέσα από το, πλέον, ταξινομημένο σύνολο R και θέτουμε $z_{accepted_{pd}} = \min(l_p, L_d)$. Αυτό γίνεται προκειμένου να διασφαλιστεί ότι θα υπάρχουν διαθέσιμα ποδήλατα για να μετακινηθούν και στη συνέχεια δε θα υπερφορτωθεί ο ενδιάμεσος σταθμός με αριθμό ποδηλάτων μεγαλύτερο από τη χωρητικότητά του.

Ύστερα από αυτόν τον καταμερισμό θα χρειαστεί να ενημερώσουμε τις μεταβλητές. Οπότε ο αριθμός χαλασμένων ποδηλάτων θα μειωθεί κατά $z_{accepted_{pd}}$. Επίσης, η χωρητικότητα του

ενδιάμεσου σταθμού θα μειωθεί κατά τον ίδιο αριθμό. Σε κάθε περίπτωση, αν παρατηρηθεί ότι οι ενημερωμένες τιμές είναι κάτω από το μηδέν θα πρέπει να αφαιρέσουμε τα εναπομείναντα σχήματα διαμοιρασμού από το σύνολο R .

Τέλος, επαναλαμβάνουμε τα παραπάνω βήματα μέχρι όλες οι εργασίες στο R να έχουν δοθεί ή να έχουν αφαιρεθεί.

Στο δεύτερο μέρος της λύσης, το σημαντικό σημείο είναι η δημιουργία διαδρομών για τα οχήματα του παρόχου. Σε αυτή τη φάση θα χρειαστεί να εξετάσουμε τη μεταβλητή απόφασης $x_{i,j}^k$ που αναπαριστά τις μετακινήσεις που κάνουν τα οχήματα του παρόχου.

Αλγόριθμος 2.2 : Η αρχική κατανομή στα οχήματα του παρόχου

- 1: Αρχικοποίηση $Q_{left}[k] = C \forall k \in K$.
 - 2: Δημιουργία λίστας S με τους ενδιάμεσους σταθμούς στους οποίους θα μεταβι-
 βαστούν ποδήλατα από τους freelancers
 - 3: Για κάθε φορτηγό $k \in K$:
 - a. $R_k \leftarrow [\text{αρχικό σημείο}]$.
 - b. Όσο $Q_{left}[k] > 0$ και $S \neq \emptyset$:
 - c. Επιλέγω σταθμό $g \in S$ με τη μικρότερη απόσταση από τον τελευταίο
 σταθμό της διαδρομής.
 - d. Προσθέτω τον σταθμό g στη διαδρομή R_k .
 - e. Αφαιρώ τον σταθμό g από το S .
 - f. Ενημερώνω $Q_{left}[k] \leftarrow Q_{left}[k] - \sum_{s \in PZ_accepted_{s,g}}$.
 - 4: Συμπληρώνω τη διαδρομή με επιστροφή στην αρχική: $R_k \leftarrow R_k +$
 $[\text{αρχικόσημείο}]$.
-

Αμέσως μετά την ολοκλήρωση του πρώτου σταδίου της αρχικής λύσης, για κάθε ενδιάμεσο σταθμό, έχουμε τον αριθμό των ποδηλάτων που βρίσκονται εκεί. Με αυτόν τον τρόπο θέτουμε τη βάση για το σχεδιασμό των διαδρομών αφού πλέον γνωρίζουμε ακριβώς πόσα ποδήλατα υπάρχουν προς μετακίνηση.

Με βάση και τους περιορισμούς που έχουμε θέσει από το γραμμικό πρόβλημα, ξέρουμε ότι τουλάχιστον δύο από τα σημεία στα οποία θα βρεθεί το όχημα είναι δεδομένα. Αυτά είναι το αρχικό και το τελικό σημείο. Οπότε στη γραμμή 3a του αλγορίθμου 2.2. αρχικοποιούμε τη διαδρομή με τον κεντρικό σταθμό. Στη συνέχεια, στη γραμμή 3c, παίρνουμε τον ενδιάμεσο σταθμό που βρίσκεται πιο κοντά, τον εισάγουμε στη διαδρομή του οχήματος k και τον αφαιρούμε από τη λίστα με τους διαθέσιμους ενδιάμεσους σταθμούς στις γραμμές 3e και 3f αντίστοιχα. Με τον τρόπο αυτό, προχωρούμε σταδιακά, εξετάζοντας παράλληλα, στη γραμμή 3b, αν ικανοποιούνται οι περιορισμοί στον προϋπολογισμό καθώς και η χωρητικότητα των οχημάτων.

Όπως λειτουργήσαμε και στην προηγούμενη φάση, συνεχίζουμε επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία μέχρι να μην υπάρχουν άλλα ποδήλατα προς μετακίνηση ή να παραβιαστεί ο προϋπολογισμός.

4.4 Καθορισμός κινήσεων για βελτίωση της λύσης

Προκειμένου να βελτιώσουμε την αρχική λύση και να προχωρήσουμε στην ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, είναι απαραίτητο να κάνουμε κάποιες μεταβολές προκειμένου να επιτύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, έχουμε επιλέξει στρατηγικά κάποιες «αλλαγές» που μπορούν να γίνουν στο δεύτερο κομμάτι της λύσης, δηλαδή στις διαδρομές που σχεδιάσαμε για τα οχήματα του παρόχου, προκειμένου να διερευνηθεί αν βελτιώνουν ή όχι την ποιότητα της λύσης που έχουμε. Οπότε, στη συνέχεια, καθώς επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία για το χρονικό διάστημα που έχουμε βάλει ως όριο, μπορούμε να βελτιώσουμε κάθε φορά τη λύση που έχουμε. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα έχουμε επιλέξει να χρησιμοποιήσουμε τα παρακάτω:

Αλγόριθμος 2.3 : Η αλλαγή σταθμών εκτός δρομολογίου

- 1: Αδειάζουμε τον σταθμό που χάλασε τον περιορισμό χωρητικότητας, έστω g .
- 2: $L_g^{left} = L_g$ όπου L_g^{left} είναι η διαθέσιμη χωρητικότητα του σταθμού g .
- 3: Αρχικοποιούμε τις παρακάτω μεταβλητές.
 - a. $l_s^{left} = z_{accepted_{sg}} \forall s \in P$
 - b. $C_k^{left} = C - Q_{n-1}^k \forall k \in K$
 - c. $L_i^{left} = L_i - \sum_{s \in P} z_{accepted_{si}} \forall s \in P, i \in N \setminus \{g\}$
- 4: Για $\forall s \in P$:
- 5: Αν $l_s^{left} > 0$:
- 6: Βάλε σε ένα σύνολο Ω και ταξινόμησε τα r_{si} σε φθίνουσα σειρά.
- 7: Τέλος για.
- 8: Όσο το Ω περιέχει στοιχεία :
- 9: Έστω r_{pd} το πρώτο στοιχείο του Ω , d_serve το όχημα που εξυπηρέτησε τον σταθμό d . Θέτουμε $u_{pd} = \min\{l_p^{left}, L_d^{left}, C_{d_serve}^{left}\}$.
- 10: Αφαιρούμε το r_{pd} από το Ω .
- 11: Αν $u_{pd} > 0$:
 - a. $z_{accepted_{pd}} \leftarrow z_{accepted_{pd}} + u_{pd}$
 - b. $l_p^{left} \leftarrow l_p^{left} - u_{pd}$
 - c. $L_d^{left} \leftarrow L_d^{left} - u_{pd}$
 - d. $C_{d_serve}^{left} \leftarrow C_{d_serve}^{left} - u_{pd}$
- 12: Αν $l_p^{left} = 0$ αφαιρούμε κάθε εργασία που περιέχει τον σταθμό p .
- 13: Αλλιώς αν $L_d^{left} = 0$ αφαιρούμε κάθε εργασία που μεταφέρει ποδήλατα στον ενδιάμεσο σταθμό d .
- 14: Αλλιώς (δλδ αν $C_{d_serve}^{left} = 0$) αφαιρούμε από το Ω κάθε εργασία που πάει σε σταθμό που εξυπηρετείται από το όχημα d_serve .
- 15: Τέλος όσο

- 1) Εναλλαγή κόμβων από την ίδια διαδρομή
- 2) Τυχαία επανατοποθέτηση του κόμβου στην ίδια διαδρομή
- 3) Εναλλαγή κόμβων από διαφορετικές διαδρομές
- 4) Τυχαία επανατοποθέτηση του κόμβου σε διαφορετική διαδρομή

Κάθε μία από αυτές τις κινήσεις εξυπηρετεί συγκεκριμένο σκοπό, επιτρέποντας τη διεύρυνση του χώρου των λύσεων.

Η εσωτερική εναλλαγή κόμβων στοχεύει στην αλλαγή της σειράς των ενδιάμεσων σταθμών σε μία συγκεκριμένη διαδρομή. Αυτή η κίνηση δεν αλλάζει το φόρτο που έχουν τα οχήματα του παρόχου, ούτε και τον αριθμό των ποδηλάτων που μεταφέρονται. Επηρεάζει μόνο τη σειρά με την οποία επισκέπτεται τους κόμβους το όχημα. Η συγκεκριμένη κίνηση έχει εισαχθεί για να εξυπηρετήσει σενάρια όπου η σχετική θέση των σταθμών ίσως να επηρεάσει τη συνολική διαδρομή που χρειάζεται να εκτελέσει το όχημα, οπότε και να μειώσει το κόστος που θα έχει το όχημα προκειμένου να ολοκληρώσει τη διαδρομή του.

Η εσωτερική τυχαία επανατοποθέτηση δουλεύει επίσης σε μία συγκεκριμένη διαδρομή αλλά αντίθετα από την προηγούμενη κίνηση, εδώ γίνεται η μεταφορά μόνο ενός κόμβου. Η συγκεκριμένη κίνηση επίσης δεν επηρεάζει τον αριθμό των ποδηλάτων που θα μεταφερθούν.

Η εναλλαγή κόμβων από διαφορετικές διαδρομές επηρεάζει τη λύση αλλάζοντας σταθμούς που μεταξύ τους βρίσκονται σε διαφορετικές διαδρομές. Επιλέγονται δύο διαφορετικοί ενδιάμεσοι σταθμοί από δύο διαφορετικές πορείες με τυχαίο τρόπο. Οι θέσεις αυτών των δύο σταθμών εναλλάσσονται. Όπως είναι φανερό από την περιγραφή, είναι απαραίτητο μετά από αυτή την κίνηση να εξεταστεί εκ νέου αν ισχύει ακόμα ο περιορισμός χωρητικότητας που έχει τεθεί.

Στην περίπτωση που κατά την προηγούμενη διαδικασία έχει χαλάσει ο περιορισμός χωρητικότητας των οχημάτων τότε προχωράμε στην ακόλουθη διαδικασία.

Στη γραμμή 1 του αλγορίθμου 2.3 αρχικά αδειάζουμε τον ενδιάμεσο σταθμό που έχει δημιουργήσει το πρόβλημα στον περιορισμό χωρητικότητας, έστω g . Στη συνέχεια, στις γραμμές 2 και 3c προσδιορίζουμε τη χωρητικότητα που έχουν οι ενδιάμεσοι σταθμοί μετά την ενέργεια στη γραμμή 1. Ο ενδιάμεσος σταθμός g είναι άδειος ενώ όλοι οι υπόλοιποι σταθμοί έχουν τη χωρητικότητα που είχαν στην αρχή μειωμένη κατά τον αριθμό των ποδηλάτων που μετέφεραν οι ανεξάρτητοι επαγγελματίες. Στις γραμμές 3a και 3b προσδιορίζουμε τα υπόλοιπα οχήματα στους μικρούς σταθμούς καθώς και τον ελεύθερο χώρο σε κάθε όχημα του παρόχου. Στη συνέχεια, για κάθε μικρό σταθμό o οποίος έχει ακόμα οχήματα παίρνουμε την τιμή r_{si} τον κάθε ένα και φτιάχνουμε το σύνολο Ω . Ταξινομούμε το σύνολο Ω σε φθίνουσα σειρά. Έστω το πρώτο στοιχείο του Ω και d_serve το όχημα του παρόχου που εξυπηρετεί τον σταθμό d . Στη γραμμή 9 θέτουμε την ποσότητα u_{pd} και αφαιρούμε το r_{pd} από το Ω . Αν η ποσότητα u_{pd} είναι θετική ενημερώνουμε τις ποσότητες στις γραμμές 11a, 11b, 11c, 11d. Αν $L_p^{left} = 0$ αυτό σημαίνει ότι δεν έχει μείνει άλλο όχημα στον μικρό σταθμό p οπότε αφαιρούμε όλες τις άλλες τιμές του Ω που αναπαριστούν εργασίες από αυτόν τον μικρό σταθμό. Αν $L_d^{left} = 0$ αυτό σημαίνει ότι ο ενδιάμεσος σταθμός d δε μπορεί να δεχτεί άλλα ποδήλατα. Οπότε αφαιρούμε από το σύνολο Ω όλες τις εργασίες που καταλήγουν στον σταθμό d . Η τελευταία περίπτωση το u_{pd} να είναι μηδενικό, είναι να μην έχει άλλο χώρο το όχημα του παρόχου που εξυπηρετεί τον σταθμό d . Άρα στη γραμμή 14 αφαιρούμε όλες τις εργασίες που καταλήγουν σε ενδιάμεσους σταθμούς που βρίσκονται στη διαδρομή του οχήματος d_serve . Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι το σύνολο Ω να είναι κενό.

Τέλος, η τυχαία επανατοποθέτηση σε άλλη διαδρομή, μεταφέρει έναν ενδιάμεσο σταθμό τυχαία από μία διαδρομή σε μία άλλη. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, αμέσως μετά τη μετακίνηση θα πρέπει να εξεταστεί ο περιορισμός χωρητικότητας του οχήματος που θα εκτελέσει τη διαδρομή που επηρεάστηκε. Σε περίπτωση που υπάρχει παραβίαση του περιορισμού θα

πρέπει να εκτελεστεί η ίδια διαδικασία που εκτελέσαμε και στην εναλλαγή κόμβων από διαφορετικές διαδρομές.

Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι όλες οι κινήσεις είναι απαραίτητες προκειμένου να εξασφαλιστεί η επιθυμητή ποικιλομορφία. Οι δύο κινήσεις που δεν επηρεάζουν τις διαδρομές έχουν μικρό αντίκτυπο και είναι χρήσιμες σε μικρές αλλαγές που μπορεί να επιφέρουν μία μικρή αλλά επιθυμητή βελτίωση. Οι δύο τελευταίες κινήσεις είναι αυτές που επηρεάζουν παραπάνω τις διαδρομές και συντελούν στην ουσιαστική βελτίωση της απόδοσης της μεθόδου.

4.5 Λίστα tabu λύσεων

Η λίστα tabu είναι βασικός μηχανισμός που χρησιμοποιείται στον συγκεκριμένο αλγόριθμο και βασικός της στόχος είναι να εμποδίσει την αναζήτηση από το να επιστρέφει και να εξετάζει λύσεις τις οποίες έχει επισκεφτεί στο παρελθόν. Αυτός ο μηχανισμός βοηθάει επίσης στον αποκλεισμό λύσεων που είναι παρόμοιες με αυτές που ήδη έχουν εξεταστεί, οπότε ο αλγόριθμος εξετάζει συνεχώς νέες περιοχές στο χώρο λύσεων.

Σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση, στη συγκεκριμένη υλοποίηση ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί 4 τύπους κινήσεων που μπορούν να επηρεάσουν και να αναδιαμορφώσουν την τρέχουσα λύση. Όταν μία λύση έχει επιλεγεί προκειμένου να ανανεώσει τη λύση s_{best} , τότε αυτή, καθώς και η αντίστροφή της εισέρχονται στη λίστα tabu. Αυτή η κίνηση δε θα μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί για τις επόμενες επαναλήψεις. Ο αριθμός των επαναλήψεων επιλέγεται κάνοντας χρήση της ομοιόμορφης κατανομής στο διάστημα $[0.75|N|, |N|]$, όπου $|N|$ είναι ο πληθικός αριθμός των ενδιάμεσων σταθμών.

4.6 Κριτήρια αποδοχής λύσεων tabu

Το κριτήριο αποδοχής λύσεων tabu είναι μία στρατηγική που χρησιμοποιείται για να αποφεύγεται η επιβολή υπερβολικών περιορισμών από τη χρήση λίστας tabu, η οποία θα μπορούσε να οδηγήσει σε στασιμότητα της αναζήτησης. Βασικά, αυτό το κριτήριο επιτρέπει στον αλγόριθμο να αποδεχτεί κάποιες κινήσεις tabu, εάν αυτές οδηγήσουν σε μία λύση που βελτιώνει την καλύτερη τρέχουσα γνωστή λύση.

Αν και η λίστα tabu είναι αποτελεσματική στο να αποτρέπει τον αλγόριθμο από το να επιστρέφει σε λύσεις που έχουν εξερευνηθεί πρόσφατα, μπορεί επίσης να περιορίσει τον αλγόριθμο από την εξερεύνηση πιθανώς καλύτερων λύσεων. Αυτό είναι ιδιαίτερα σύνθηες όταν η λίστα tabu είναι ιδιαίτερα αυστηρή, περιορίζοντας κινήσεις που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε βελτίωση της αντικειμενικής συνάρτησης.

4.7 Το σύνολο καλών λύσεων E

Στην τρέχουσα υλοποίηση της αναζήτησης tabu, προκειμένου να επιτευχθεί η ποικιλομορφία των λύσεων, έχει γίνει εισαγωγή ενός συνόλου E, το οποίο περιέχει το σύνολο των καλών λύσεων. Αυτό βοηθάει τον αλγόριθμο να εξερευνά νέες περιοχές λύσεων υψηλής απόδοσης όταν βρίσκεται σε κάποιο τέλμα. Το σύνολο των καλών λύσεων E είναι ένα σύνολο περιορισμένου αριθμού από υψηλού επιπέδου λύσεις, που συνήθως δεν ξεπερνά τις $|N|$ λύσεις. Αν η βέλτιστη μέχρι μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή λύση έχει παραμείνει ίδια για έναν συγκεκριμένο αριθμό από επαναλήψεις, μία λύση από το σύνολο E επιλέγεται στην τύχη και χρησιμοποιείται στη θέση της τρέχουσας λύσης. Μετά από αυτή την εναλλαγή, η λίστα tabu επανέρχεται στην αρχική της κατάσταση και συνεχίζει η διαδικασία της αναζήτησης. Η ποικιλομορφία και η ποιότητα του συνόλου των καλών λύσεων E διατηρείται με την εισαγωγή καλών λύσεων και την αφαίρεση των λύσεων που πλέον δεν είναι τόσο αποδοτικές. Η ενημέρωση του συνόλου καλών λύσεων E γίνεται σύμφωνα με τον παρακάτω αλγόριθμο.

Αλγόριθμος 2.4 : Η ενημέρωση του συνόλου E

- 1: Αν $s_{best} \notin E$:
 - 2: Αν $|E| < |N|$ τότε :
 - 3: Αφαίρεση όμοιων λύσεων
 - 4: Αλλιώς:
 - 5: Αφαίρεση κοντινών λύσεων
 - 6: Τέλος αν
 - 7: Προσθήκη του s_{best} στο σύνολο E .
-

Στον αλγόριθμο 2.4 εξετάζουμε αρχικά στη γραμμή 1 αν η s_{best} ανήκει στο σύνολο των καλών λύσεων E . Αν δεν ανήκει, τότε έχουμε δύο περιπτώσεις. Αν το σύνολο E δεν είναι γεμάτο, εκτελούμε τον αλγόριθμο 2.4.1 που αφαιρεί τις όμοιες λύσεις. Αλλιώς, στη γραμμή 5, αν το σύνολο E είναι γεμάτο, εκτελούμε τον αλγόριθμο 2.4.2, ο οποίος είναι ακριβώς ίδιος, με τη διαφορά ότι αφαιρεί πάντα μία λύση.

Σε αυτό το σημείο, παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος 2.4.1 δεν αφαιρεί πάντα κάποια λύση από

Αλγόριθμος 2.4.1 : Η αφαίρεση όμοιων λύσεων

- 1: Για κάθε λύση $s \in E$:
 - 2: Αν κοινά τόξα(s, s_{best})/|τόξα s | > 0.9
 - 3: Αφαίρεση s από το σύνολο E
 - 4: Τέλος αν
 - 5: Τέλος για
-

το σύνολο E . Για να συμβεί αυτό, θα πρέπει το πηλίκο των κοινών τόξων προς το σύνολο των τόξων της s να είναι μεγαλύτερο από 0.9

Οπότε με αυτή την προσέγγιση πετυχαίνουμε την εξερεύνηση νέων περιοχών στο σύνολο λύσεων και πετυχαίνουμε ο αλγόριθμός να μην θεωρεί ότι το τοπικό ελάχιστο που έχει βρει για την αντικειμενική συνάρτηση είναι ολικό.

Αλγόριθμος 2.4.2 : Η αφαίρεση κοντινών λύσεων

- 1: |μέγιστα όμοια τόξα| = 0.
 - 2: Όμοια λύση = \emptyset
 - 3: Για κάθε λύση $s \in E$:
 - 4: |όμοια τόξα| = κοινά τόξα(s, s_{best})/ |τόξα s |
 - 5: Αν | μέγιστα όμοια τόξα | < |όμοια τόξα|
 - a. | μέγιστα όμοια τόξα | = | όμοια τόξα |.
 - b. Όμοια λύση = s .
 - 6: Τέλος αν
 - 7: Τέλος για
 - 8: Αφαίρεση Όμοια λύση από το E .
-

5. Παρουσίαση χρήσης του συστήματος δυναμικής τιμολόγησης

Σκοπός αυτής της ενότητας είναι σύντομη ανασκόπηση των μέχρι τώρα υλοποιήσεων, η παρατήρηση των σημείων στα οποία σκόπιμα έχουμε αφήσει περιθώριο για βελτίωση, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η περιγραφή της ενσωμάτωσης του συστήματος δυναμικής τιμολόγησης και τέλος η περιγραφή του αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε.

5.1 Ανασκόπηση υλοποιήσεων με στατική τιμολόγηση

Μέχρι στιγμής, οι υλοποιήσεις που έχουμε παρουσιάσει έχουν τη δική τους δυναμική καθώς και περιθώριο βελτίωσης. Γνωρίζουμε ότι η επίλυση με τον γραμμικό επιλυτή μπορεί να μας δώσει τη βέλτιστη λύση για την αντικειμενική συνάρτηση αλλά σε προβλήματα με εκτεταμένο μέγεθος, ο χρόνος που χρειάζεται για την επίλυση, καθιστά τη λύση μη πρακτική. Στη συνέχεια κάναμε την επέκταση στην αναζήτηση *tabu*, στην οποία, η λύση που έχουμε, γνωρίζουμε εξ αρχής ότι δε θα είναι η βέλτιστη. Θα είναι όμως μία λύση πολύ κοντά σε αυτή του γραμμικού επιλυτή με πολύ μικρότερο χρόνο εκτέλεσης. Το κύριο γνώρισμα που έχουν και οι δύο υλοποιήσεις όμως σχετίζεται με την τιμολόγηση της κάθε εργασίας που δίνεται στους ανεξάρτητους συνεργάτες (*freelancers*).

Ίσως το μεγαλύτερο πρόβλημα που δε μπορεί να λύσει ένα σχήμα στατικής τιμολόγησης, είναι αυτό της προσαρμογής στις συνεχείς αναπροσαρμογές στη δυναμική προσφοράς-ζήτησης. Για παράδειγμα, σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, όταν η ζήτηση αναμένεται να είναι αυξημένη, η ανανέωση του στόλου μέσω της ανακύκλωσης θα μπορούσε να βοηθήσει το σύστημα να αυξήσει το επίπεδο εξυπηρέτησης του. Οπότε σε εκείνες τις ώρες, η ανάγκη για τη συμμετοχή των ανεξάρτητων συνεργατών (*freelancers*) είναι ιδιαίτερα αυξημένη. Οπότε αυτό σημαίνει πως ένα σύστημα στατικής τιμολόγησης, στις ώρες αιχμής, θα συνεχίσει να πληρώνει με τον ίδιο ρυθμό με άμεσο αποτέλεσμα οι ανεξάρτητοι συνεργάτες (*freelancers*) να μην επιλέγουν να εκτελέσουν καμία εργασία καθώς δεν έχουν κάποιο ιδιαίτερο κίνητρο. Η άλλη πλευρά του ίδιου νομίσματος είναι στην περίπτωση που η ανάγκη για ανακύκλωση είναι ιδιαίτερα μικρή, έστω σε χρονικές στιγμές που η κυκλοφορία μέσω του συστήματος διαμοιρασμού είναι μικρή, οπότε η παρουσία κάποιων μη λειτουργικών ποδηλάτων δεν επηρεάζει έντονα το επίπεδο εξυπηρέτησης του συστήματος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το σύστημα, εφόσον δε μπορεί να αναγνωρίσει αυτή την κατάσταση, θα συνεχίσει να πληρώνει τα ίδια χρήματα, ενώ είναι εξαιρετικά πιθανό να πληρώνει πολλά παραπάνω από αυτά που κανονικά θα ζητούσαν οι ανεξάρτητοι συνεργάτες (*freelancers*) προκαλώντας πολλαπλά προβλήματα στη διαχείριση του προϋπολογιζόμενου ποσού που προορίζεται για τους ανεξάρτητους συνεργάτες (*freelancers*).

Εφόσον το σύστημα επιλέγει να χρησιμοποιήσει ανεξάρτητους συνεργάτες (*freelancers*) για κάποιες εργασίες του, θα πρέπει να διατηρεί το ενδιαφέρον τους σε υψηλά επίπεδα και να τους δίνει κίνητρα προκειμένου να αποδέχονται και να φέρνουν σε πέρας τις εργασίες που τους αναθέτει το σύστημα. Προκειμένου το ενδιαφέρον τους να κρατηθεί σε υψηλά επίπεδα, θα πρέπει να νιώθουν ότι αμείβονται δίκαια και επαρκώς για τη δουλειά που προσφέρουν. Όπως είναι φυσιολογικό, σε ένα σύστημα στατικής τιμολόγησης, κάθε εργασία αποτιμάται με τον ίδιο τρόπο, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη παράμετροι όπως ο καιρός, το πόσο γρήγορα πρέπει να εκτελεστεί μια εργασία ή πόσο δύσκολο από άποψη κίνησης είναι το σημείο στο οποίο θα πρέπει να πάει ο *freelancer* για να την υλοποιήσει. Επιπλέον, τα συστήματα στατικής τιμολόγησης έχουν χαρακτηριστική δυσκολία στον διαχωρισμό εργασιών που είναι κανονικής προτεραιότητας και εργασίες υψηλής προτεραιότητας.

5.2 Περιγραφή του αλγορίθμου δυναμικής τιμολόγησης

Στις προηγούμενες παραγράφους έγινε ανασκόπηση των προηγούμενων υλοποιήσεων, παρουσιάστηκαν οι βελτιώσεις της δυναμικής τιμολόγησης, ο τρόπος με τον οποίο θα ενσωματωθεί,

οπότε τώρα είμαστε έτοιμοι να παρουσιάσουμε τον τρόπο με τον οποίο θα λειτουργεί ο αλγόριθμος. Θα κάνουμε χρήση της επέκτασης του αλγορίθμου DBP-UCB[11], ο οποίος είναι σχεδιασμένος για να λύνει προβλήματα δυναμικής τιμολόγησης με περιορισμούς προϋπολογισμού, στα οποία πρέπει να τιμολογηθούν προσφερόμενες υπηρεσίες σε ένα δυναμικό περιβάλλον. Η μέθοδος αυτή προτάθηκε από τον Singla το 2015 [12]. Το πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε έχει αυτά τα χαρακτηριστικά, καθώς κάθε φορά το διαθέσιμο ποσό από τον προϋπολογισμό αλλά και ο αριθμός των χρηστών αλλάζει, κάνοντας το πρόβλημα εξαιρετικά πιο πολύπλοκο από το αρχικό πρόβλημα που εξυπηρετούσαμε με τη στατική τιμολόγηση.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του προβλήματος συνοπτικά είναι τα εξής:

- a. Περιορισμένο και συνεχώς μεταβαλλόμενο ποσό προϋπολογισμού.
- b. Ο αριθμός των χρηστών που είναι διαθέσιμοι προκειμένου να γίνει διαμοιρασμός εργασιών δεν είναι σταθερός, με αποτέλεσμα να επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο χρειάζεται να τιμολογήσουμε.
- c. Η καμπύλη κόστους των ανεξάρτητων συνεργατών (freelancers) είναι άγνωστη
- d. Θα πρέπει ο υπολογισμός των εργασιών που θα διαμοιραστούν να γίνει σε εύλογο χρονικό διάστημα

Πριν προχωρήσουμε στην αναλυτική περιγραφή του αλγορίθμου θα ήταν χρήσιμο να διευκρινίσουμε πως πρόκειται για επέκταση αλγορίθμου. Αυτός είναι ο BP-UCB ο οποίος αρχικά είχε σχεδιαστεί για σενάρια όπου ο προϋπολογισμός είναι σταθερός καθώς σταθερός είναι και ο αριθμός των χρηστών. Φυσικά και οι δύο αλγόριθμοι λειτουργούν με βήματα, όπου στο κάθε βήμα κάνουν προσφορές και ανάλογα με την ανατροφοδότηση που έχουν από τον χρήστη αναπροσαρμόζουν την τιμολόγηση. Οπότε ο μηχανισμός θα λειτουργεί σύμφωνα με τα παρακάτω:

- a. Γνωστοποίηση προσφοράς στον χρήστη.
- b. Αποδοχή ή απόρριψη της εργασίας από τον χρήστη.
- c. Ενημέρωση της καμπύλης κόστους για την κάθε τιμή με βάση την ανατροφοδότηση από τον χρήστη.
- d. Ενημέρωση του ποσού προϋπολογισμού και του αριθμού των χρηστών δυναμικά.

Βασικό χαρακτηριστικό που κάνει τον αλγόριθμο να διαφέρει σε σχέση με τις υπόλοιπες υλοποιήσεις είναι ότι σαν στόχο έχει την ελαχιστοποίηση των μη-εξυπηρετούμενων προσφορών. Οπότε στην ουσία παρόλο που ανταγωνίζεται την υλοποίηση με αναζήτηση Tabu στη βελτίωση της αντικειμενικής συνάρτησης, είναι συμπληρωματικός σε αυτή την υλοποίηση και βοηθάει στην περαιτέρω επέκτασή της.

Καθώς η διαδικασία ξεκινάει, ο «αλγόριθμος» δεν έχει πρότερη γνώση της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής $F(p)$, δηλαδή της συνάρτησης κόστους. Οπότε αρχικά στη γραμμή 1c του αλγορίθμου 3 θα χρειαστεί να τεθεί στο 0 ή σε κάποια άλλη ουδέτερη τιμή και στη συνέχεια καθώς θα έρχονται οι προσφορές εργασίας θα ανανεώνεται ανάλογα με την ανατροφοδότηση. Όπως εφαρμόστηκε και στο κομμάτι των οχημάτων του τρίτου παρόχου, έχουμε προϋπολογίσει ένα αρχικό ποσό B_0 . Υστερα από κάθε προσφορά που έχει θετική έκβαση, όπως είναι φυσικό, αυτό το ποσό μειώνεται κατά την τιμή προσφοράς p_n . Θεωρούμε επίσης N_0 τον αριθμό των ανεξάρτητων συνεργατών (freelancers).

Σε κάθε επανάληψη της διαδικασίας, ο αλγόριθμος εκτελεί τα παρακάτω βήματα:

- a. Επιλέγει μία τιμή p_n , στη γραμμή 5 την οποία και προσφέρει με βάση την τρέχουσα εκτίμηση από την καμπύλη κόστους $F(p)$ και το διαθέσιμο προϋπολογισμένο ποσό.
- b. Αμέσως μετά την προσφορά, στη γραμμή 7 το σύστημα δέχεται την απόφαση του freelancer και καθορίζει τη δυαδική μεταβλητή y_n δίνοντας 1 αν ο freelancer αποδεχτεί την προσφορά ή 0 αν δεν προχωρήσει με αυτή.

Αφού το σύστημα δεχτεί την ανατροφοδότηση του χρήστη, στη γραμμή 8 ο αλγόριθμος ανα-ευνώνει την εκτίμηση για την καμπύλη κόστους, οπότε και την προσφερόμενη τιμή p_n . Απαραίτητη προσθήκη για την απόδοση του αλγορίθμου είναι το άνω φράγμα που θέτουμε για την κα-

Αλγόριθμος 3 : Η πολιτική τιμολόγησης

Δεδομένα Εισόδου : αρχικός χρόνος t_0 ; Διαθέσιμες τιμές $\{p_0, \dots, p_i, \dots, p_k\}$

Αποτέλεσμα : Τιμή p^n στην επανάληψη n ;

- 1: Αρχικοποίηση:
 - a. $n = 0; h^0 = h(t_0);$
 - b. $B = B(h^n); B^n = B; N = \sum_{s \in P} 1_s;$
 - c. $N_i^n = 0; F_i^n = 0; \forall i \in [0, \dots, K]$
- 2: Για κάθε (προτεινόμενη εργασία προς κάποιον χρήστη τη στιγμή t) εκτέλεσε
- 3: Αν $(h^n \neq h(t))$ τότε
 - a. $h^n = h(t)$
 - b. $B^n = B^n + B(h^n); B = B^n;$
- 4: $\widetilde{F}_i^n = F_i^n + \sqrt{\frac{2 \cdot \ln(n)}{N_i^n}}$
- 5: $i^n = \operatorname{argmax}_i \min\{\widetilde{F}_i^n, \frac{B}{N \cdot p_i}\}, p_i \leq B^n$
- 6: Αποτέλεσμα : Προσφορά τιμής $p^n = p_{i^n}$ στην επανάληψη n ;
- 7: Ανατροφοδότηση : Ύστερα από εξέταση της μεταβλητής απόφασης y^n
- 8: Ενημέρωση μεταβλητών:
 - a. $B^{n+1} = B^n - p^n \cdot y^n; F_{i^{n+1}}^n = F_{i^n}^n + \frac{(y^n - F_{i^n}^n)}{(N_{i^n} + 1)}$
 - b. $N_{i^n}^{n+1} = N_{i^n}^n + 1; h^{n+1} = h^n; n = n + 1;$
- 9: Ετοιμασία επόμενης προσφοράς εργασίας σε χρήστη

μπύλη κόστους \widetilde{F}_i^n (UCB) [12]. Για κάθε τιμή p , στη γραμμή 4, ο αλγόριθμος κρατάει ένα άνω φράγμα \widetilde{F}_i^n το οποίο συνεχώς αναπροσαρμόζεται ανάλογα με τον αριθμό των φορών που κάθε τιμή έχει προταθεί καθώς και από την αποδοχή που κάθε τιμή έχει δεχτεί από τους χρήστες. Η βασική ιδέα πίσω από αυτή την κατασκευή είναι να υπάρχει αυξημένη προτεραιότητα στις τιμές οι οποίες έχουν δοκιμαστεί τις πιο πολλές φορές και έχουν δείξει τα καλύτερα αποτελέσματα. Επίσης είναι απαραίτητο στοιχείο προκειμένου να υπάρχει μία ισορροπία ανάμεσα στη δοκιμή

νών τιμών και στην πρόταση τιμών που έχουν πολύ καλά αποτελέσματα με βάση τις προηγούμενες δοκιμές και εκτιμήσεις.

Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου, το προϋπολογιζόμενο ποσό για τις υπηρεσίες των ανεξάρτητων συνεργατών (freelancers), ανανεώνεται αμέσως μετά την απόφαση του κάθε freelancer σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία προκειμένου η όλη διαδικασία να παραμένει εντός των ορίων του προϋπολογιζόμενου ποσού. Επίσης σε κάθε επανάληψη, στο σύστημα ανανεώνουμε το προϋπολογιζόμενο ποσό, στη γραμμή 3b. Επιπλέον, οι εκτιμήσεις $F(p)$ μεταβιβάζεται στις επόμενες εκτελέσεις προκειμένου να συνεχιστεί η διαδικασία της εκμάθησης.

Βασικός στόχος του αλγορίθμου είναι αρχικά να μπορέσει να ισορροπήσει ανάμεσα στην πρόταση νέων τιμών και στην πρόταση των επιτυχημένων τιμών προκειμένου να ελαχιστοποιήσει τον αριθμό των φορών που ο μηχανισμός τιμολόγησης πρότεινε τιμή αλλά ο freelancer την απέρριψε.

5.3 Περιγραφή ενσωμάτωσης του συστήματος

Επιλέξαμε να αφιερώσουμε μία παράγραφο στη διαδικασία με την οποία ενσωματώσαμε τον αλγόριθμο δυναμικής τιμολόγησης στο σύστημα τόσο στην υλοποίηση όσο και στον τρόπο με τον οποίο επιλέξαμε να συγκρίνουμε την απόδοση του σε σχέση με τις προηγούμενες υλοποιήσεις.

Όπως θα δούμε παρακάτω, ο στόχος του αλγορίθμου δυναμικής τιμολόγησης είναι να μπορέσει να επιτύχει όσο το δυνατόν μικρότερο αριθμό αρνητικών απαντήσεων από τους ανεξάρτητους συνεργάτες (freelancers). Με μία πιο προσεκτική ματιά, θα παρατηρήσουμε ότι ο στόχος των προηγούμενων υλοποιήσεων είναι να ελαχιστοποιήσουν την αντικειμενική συνάρτηση, η οποία στην ουσία ελαχιστοποιεί το κόστος διαχείρισης της ανακύκλωσης στο σύστημα. Οπότε θα πρέπει να υπάρχουν τέτοιες παραδοχές που διατηρούν ρεαλιστικό το πρόβλημα γεφυρώνοντας στην ουσία το διαφορετικό τρόπο που αξιολογούμε την κάθε διαδικασία. Βασικό ρόλο σε αυτή την κατεύθυνση παίζει το τελευταίο τμήμα της αντικειμενικής συνάρτησης που αναπαριστά την ποινή που βάζουμε στο σύστημα σε περίπτωση που κάποια εργασία δεν εκπληρωθεί. Με βάση τις αναφορές που αναλύσαμε στην εισαγωγή, το πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τα συστήματα διαμοιρασμού ποδηλάτων από τα χαλασμένα οχήματα είναι ιδιαίτερα έντονο.

Οπότε η ποινή αυτή θα μπορούσε να μοντελοποιήσει πάρα πολλές καταστάσεις στην πράξη. Θα μπορούσε να αναπαραστήσει το διαφυγόν κέρδος από τις διαδρομές που δε μπορούν να πραγματοποιηθούν. Επίσης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να δείξει τη δυνατότητα επισκευής κάποιων ποδηλάτων που όμως λόγω της απόρριψης της εργασίας δεν επέστρεψαν στο αρχικό σημείο, οπότε η κατάσταση του στόλου επιβαρύνεται. Δε θα πρέπει επίσης να αγνοούμε ότι πολλές φορές οι πόλεις επιλέγουν να βάλουν πρόστιμο στις εταιρίες που συντηρούν τα συστήματα διαμοιρασμού ποδηλάτων στην περίπτωση που θεωρούν ότι μολύνουν τους κοινόχρηστους χώρους με οχήματα που δεν προσφέρουν στο κοινωνικό σύνολο.

Για αυτό το λόγο έχουμε επιλέξει η ποινή να αναπαρίσταται από μία σταθερή τιμή, αφού η ανάλυση των παραμέτρων που επηρεάζουν την επιβάρυνση ενός συστήματος διαμοιρασμού δεν είναι στο εύρος της έρευνας αυτής της εργασίας. Εξαιρετικά σημαντικά, είναι φυσικά τα όρια τα οποία παίρνει αυτή η σταθερή τιμή. Σε αυτό το σημείο να υπενθυμίσουμε ότι αν αφήναμε αυτή την τιμή να είναι μικρότερη από το μικρότερο κόστος που έχει κάποιος freelancer τότε θα οδηγούσαμε το σύστημα σε αδιέξοδο διότι η βέλτιστη επιλογή για τον πάροχο θα ήταν να μην κάνει καμία ενέργεια.

Από άποψη υλοποίησης επίσης κρίθηκε ότι ήταν ιδιαίτερα σημαντικό να μην παρεμβαίνει το σύστημα τιμολόγησης σε όλη τη διάρκεια που τρέχει ο αλγόριθμος προκειμένου να είναι πιο άμεση η σύγκριση μεταξύ των μεθόδων. Για τον λόγο αυτό έχουμε επιλέξει πριν ακόμα τρέξει το κομμάτι της αναζήτησης tabu, να τρέχει το σύστημα δυναμικής τιμολόγησης, να δίνει τις εργασίες στους ανεξάρτητους συνεργάτες (freelancers), αυτοί με τη σειρά τους να δέχονται ή όχι την

εκάστοτε εργασία και τέλος, αφού θα έχουμε το σύνολο των αποδεκτών εργασιών να προχωρήσουμε στον αλγόριθμο που έχουμε στη δεύτερη υλοποίηση. Φυσικά εδώ υπάρχει ο εξής διαχωρισμός ανάμεσα στις τρεις υλοποιήσεις. Η υλοποίηση του γραμμικού επιλυτή και της αναζήτησης tabu με στατική τιμολόγηση θα πρέπει να έχουν μία τιμή που να δίνουν στους ανεξάρτητους συνεργάτες (freelancers). Χωρίς βλάβη της γενικότητας έχουμε επιλέξει να δίνουμε την τιμή 1 στον πολλαπλασιαστή, αφού σε κάθε περίπτωση, αν θέλουμε να μετακινήσουμε τις τιμές από τις οποίες θα πρέπει να επιλέξει ο αλγόριθμος δυναμικής τιμολόγησης, θα μπορούσαμε απλά να απεικονίσουμε τις καμπύλες κόστους των ανεξάρτητων συνεργατών (freelancers) σε αυτά τα διαφορετικά διαστήματα. Στη δική μας περίπτωση έχουμε επιλέξει το ω να είναι στο διάστημα $[0.85, 1.15]$. Αν για παράδειγμα το διάστημα το πολλαπλασιαστή ήταν $[15, 20]$ τότε θα επιλέγαμε το ω στη στατική τιμολόγηση να είναι ίσο με 17.5.

Αλγόριθμος 4 : Η λειτουργία του προτεινόμενου συστήματος

- 1) Εφαρμογή του συστήματος δυναμικής τιμολόγησης στο πλήθος των διαθέσιμων ανεξάρτητων επαγγελματιών.
 - 2) Προσδιορισμός της ποσότητας ω που θα λειτουργήσει ως πολλαπλασιαστής για την ποσότητα $r_{si}, s \in P, i \in N$.
 - 3) Εφαρμογή του αλγορίθμου 2.
 - 4) Επανάληψη της διαδικασίας.
-

5.4 Βελτιώσεις δυναμικής τιμολόγησης

Σε αντίθεση με αυτά που αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο, ένα σύστημα δυναμικής τιμολόγησης, μπορεί να προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, παρέχοντας μια ευέλικτη προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη αφενός τη δυσκολία της εκάστοτε εργασίας, αφετέρου τους περιορισμούς στο κομμάτι του προϋπολογισμού. Αντίθετα με τη σταθερή τιμολόγηση, στην οποία προσφέρεται μία σταθερή τιμή για την εκπλήρωση του κάθε έργου, στην τελευταία υλοποίηση,

το σύστημα μπορεί να προσαρμόσει την αμοιβή ανάλογα με την εκάστοτε ιδιαιτερότητα της εργασίας. Αυτή η ευελιξία είναι ιδιαίτερα πρακτική σε τομείς όπως αυτός που εξετάζουμε, που χαρακτηρίζονται από εργασίες με εξαιρετική ποικιλομορφία στην πολυπλοκότητα και στην αναγκαιότητα εκπλήρωσης τους. Για παράδειγμα, το σύστημα τιμολόγησης θα μπορούσε να προσαρμοστεί και να προσφέρει μεγαλύτερες αμοιβές, στην περίπτωση που οι ανεξάρτητοι συνεργάτες (freelancers) θεωρούσαν ότι οι εργασίες που τους δίνονται είναι ιδιαίτερα απαιτητικές από άποψη χρόνου ή κόπου.

Φυσικά θα μπορούσε κάποιος να αντιπροτείνει τη χρήση μίας στατικής ανατροφοδότησης από τους ανεξάρτητους συνεργάτες (freelancers), είτε μέσω κάποιας έρευνας είτε μέσω κάποιων συνεντεύξεων. Φυσικά σε αυτή την περίπτωση θα μπορούσαμε να κάνουμε στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων που θα είχαμε αλλά παρουσιάζονται κάποια πολύ μεγάλα κενά στη συγκεκριμένη περίπτωση. Αρχικά, η έρευνα που θα είχαμε θα έπρεπε να διεξαχθεί σε πολύ μεγάλο κομμάτι των ανεξάρτητων συνεργατών (freelancers). Επίσης η έρευνα θα έπρεπε με κάποιον τρόπο να εκμαιεύσει η ίδια ποιοι είναι οι λόγοι που οδηγούν κάποιον freelancer να αποδέχεται ή να απορρίπτει μία εργασία. Φυσικά για να είναι μία τέτοια έρευνα χρήσιμη θα έπρεπε εκτός από τη χρήση μεγάλου δείγματος, να είναι όσο το δυνατόν πιο ποικιλόμορφο το δείγμα αυτό. Τέλος θα έπρεπε αυτή η έρευνα να επαναλαμβάνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

Οπότε με βάση την προηγούμενη ανάλυση, βρισκόμαστε αντιμέτωποι με ένα υπέρογκο διαχειριστικό κόστος το οποίο θα πρέπει να επωμιστεί το σύστημα. Αυτό είναι το κόστος της έρευνας αλλά και της ανάλυσης των δεδομένων που θα προκύψουν από το δείγμα. Φυσικά προκειμένου να προχωρήσει μία τέτοια έρευνα θα πρέπει να υπάρχει μία εκτίμηση σχετικά με τη διαμόρφωση της ποικιλομορφίας του συνόλου των ανεξάρτητων συνεργατών (freelancers) καθώς και από τι επηρεάζεται προκειμένου να εξασφαλιστεί ένα δείγμα. Τέλος βλέπουμε ότι είναι ιδιαίτερα σημαντικό να επαναλαμβάνεται η έρευνα καθώς ανά πάσα στιγμή που κάτι από τα παραπάνω αλλάξει, σαν φυσιολογική συνέπεια θα είχαμε και τη μεταβολή της συμπεριφοράς των ανεξάρτητων συνεργατών (freelancers), κάτι που με βάση τα προηγούμενα θα επηρέαζε άμεσα το σύστημά μας.

6 Αποτελέσματα σύγκρισης μεθόδων

6.1 Ποσοτικές μετρήσεις και σύγκριση

Σε αυτή την ενότητα, θα παρουσιάσουμε τις δοκιμές, στις οποίες προχωρήσαμε προκειμένου να επαληθεύσουμε την ορθότητα των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν. Η αναζήτηση Tabu καθώς και η αντίστοιχη έκδοσή της, στην οποία έχει προσαρμοστεί επίσης το σύστημα δυναμικής τιμολόγησης έχουν αναπτυχθεί σε Python. Επίσης όλες οι δοκιμές έχουν γίνει κάνοντας χρήση συστήματος με AMD Ryzen 7 pro 7730U κεντρικό επεξεργαστή καθώς και 64GB μνήμης RAM.

Καθώς το προτεινόμενο πρόβλημα είναι σχετικά πρόσφατο, δεν υπάρχουν δεδομένα στην πράξη που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Για το σκοπό αυτό, θα ακολουθήσουμε την ίδια προσέγγιση που χρησιμοποιούν οι Xu και Zou [13]: θα χρησιμοποιήσουμε σαν βάση το σύνολο σημείων στο οποίο έχουν βασιστεί [16]. Επίσης για τον αριθμό ποδηλάτων που θα βρίσκονται στους ενδιάμεσους σταθμούς καθώς και για τη χωρητικότητα των σταθμών που θα εξυπηρετηθούν από τα οχήματα του παρόχου έχουν παρθεί τιμές που ακολουθούν κανονικές κατανομές. Έχουμε θεωρήσει ότι η χωρητικότητα των οχημάτων του παρόχου είναι ίση με 20. Ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[0.85, 1.15]$ έχουμε επιλέξει να χρησιμοποιήσουμε και για τον πολλαπλασιαστή που δείχνει το κόστος του κάθε freelancer. Στην περίπτωση του γραμμικού προβλήματος και της αναζήτησης tabu έχουμε επιλέξει αυτός ο πολλαπλασιαστής να είναι ίσος με 1. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τα παραπάνω δεδομένα και αυξάνοντας τον αριθμό των σταθμών που θα χρησιμοποιηθούν, αυξήσαμε τη μέγεθος του προβλήματος προκειμένου να διαπιστώσουμε τα όρια της κάθε μεθόδου. Για γραμμικό επιλυτή, έχουμε χρησιμοποιήσει το GLPK[38]. Έχουμε βάλει ως όριο τα 5400 δευτερόλεπτα, καθώς στις περιπτώσεις που το πρόβλημα είχε πολλούς σταθμούς, ο γραμμικός επιλυτής δε μπορούσε να προσφέρει αποτελέσματα σε εύλογο χρονικό διάστημα. Για τον ίδιο λόγο, και στην αναζήτηση Tabu καθώς και στο συνδυασμό της με δυναμική τιμολόγηση, έχουμε περιορίσει το χρόνο στα 60 δευτερόλεπτα για τον ίδιο λόγο.

Προκειμένου να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τις τρεις μεθόδους, έχουμε επιλέξει τα δεδομένα να είναι ακριβώς ίδια και στις τρεις περιπτώσεις. Για αυτό το λόγο έχουμε χρησιμοποιήσει την ομοιόμορφη κατανομή στο κόστος των ανεξάρτητων συνεργατών (freelancers). Σε κάθε έκδοση του προβλήματος, έχουμε λάβει αρχικά το κόστος που έχει ο κάθε freelancer, από την ομοιόμορφη κατανομή και στη συνέχεια αν το ποσό που του προσφέρεται είναι μεγαλύτερο από το κόστος του, δέχεται, αλλιώς απορρίπτει την εργασία.

Στην συνέχεια ακολουθεί ο πίνακας στον οποίο παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα.

Μέγεθος	Γραμμικός Επιλυτής		Αναζήτηση Tabu		Δυναμική Τιμολόγηση	
	Χρόνος	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	Χρόνος	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	Χρόνος	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης
2*10*5	26 sec	92	6 sec	92	7 sec	109
2*20*10	815 sec	292	11 sec	292	12 sec	316
3*15*10	3400 sec	627	17 sec	652	19 sec	681
3* 20 *15	5400 sec	1114	19 sec	1088	20 sec	1184
4*25*20	5400 sec	1855	23 sec	1675	25 sec	1692
5*25*20	5400 sec	2604	45 sec	2388	48 sec	2332
6*30*20	5400 sec	3521	60 sec	3303	60 sec	3227

7*45*30	5400 sec	4567	60 sec	4192	60 sec	4150
---------	----------	------	--------	------	--------	------

6.2 Αναλυτική Σύγκριση και Αποτίμηση των Μεθόδων Επίλυσης

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζεται μια λεπτομερής ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη χρήση των τριών μεθόδων επίλυσης του προβλήματος: Γραμμικός Επιλυτής, Tabu Search και Δυναμική Τιμολόγηση. Κάθε μέθοδος έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία την κάνουν περισσότερο ή λιγότερο κατάλληλη ανάλογα με τις απαιτήσεις του προβλήματος σε χρόνο και ακρίβεια. Η αναλυτική σύγκριση της επίδοσης κάθε μεθόδου δίνει τη δυνατότητα για μια εις βάθος κατανόηση των δυνατοτήτων της κάθε προσέγγισης, καθώς και των περιορισμών της.

6.3 Γραμμικός Επιλυτής: Ακριβής αλλά Χρονοβόρα Μέθοδος

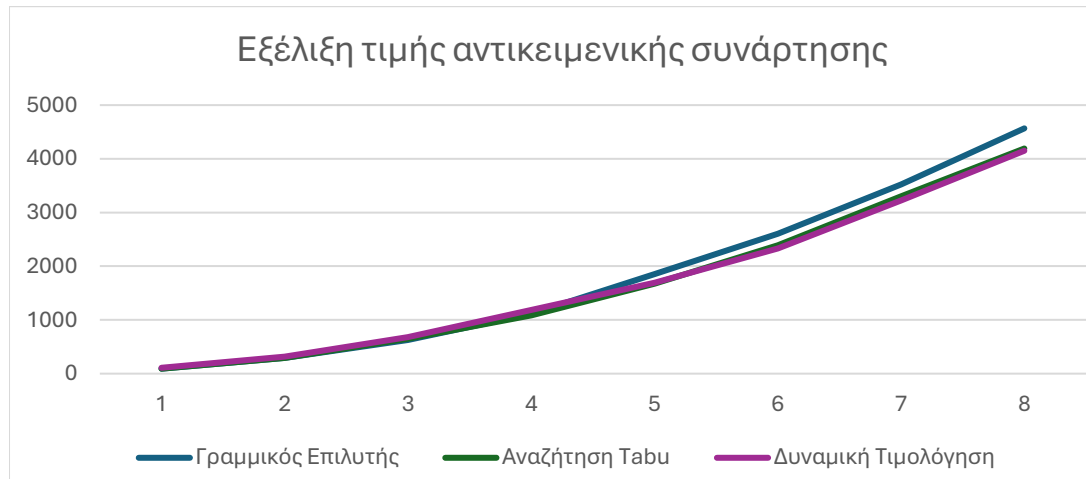
Ο γραμμικός επιλυτής, ως μέθοδος επίλυσης βελτιστοποίησης, βασίζεται σε μια σειρά αλγοριθμικών βημάτων που εγγυώνται την εύρεση της βέλτιστης λύσης, αρκεί να υπάρχει επαρκής χρόνος για να ολοκληρωθεί ο υπολογισμός. Πρόκειται για μία ακριβή μέθοδο, σχεδιασμένη να λαμβάνει υπόψη όλους τους περιορισμούς που έχουν τεθεί, ώστε να εξασφαλίζεται το βέλτιστο αποτέλεσμα. Ωστόσο, αυτή η διαδικασία έχει ως συνέπεια τον αυξημένο χρόνο εκτέλεσης, ειδικά σε προβλήματα μεγάλης κλίμακας. Ο χρόνος εκτέλεσης είναι σε τόσο αυξημένο επίπεδο, που καθώς αυξάνεται το μέγεθος του δείγματος, ο ακριβής υπολογισμός της βέλτιστης λύσης, δεν είναι πλέον εφικτός.

Ο γραμμικός επιλυτής παρουσίασε αξιόλογη απόδοση σε μικρά προβλήματα, όπου ο χρόνος που απαιτήθηκε για την επίτευξη της βέλτιστης λύσης ήταν περιορισμένος και εύλογος. Για παράδειγμα, στην περίπτωση με 2 φορτηγά, 10 μικρούς σταθμούς και 5 ενδιάμεσους σταθμούς, ο γραμμικός επιλυτής ολοκλήρωσε τον υπολογισμό του μέσα σε 26 δευτερόλεπτα, επιτυγχάνοντας την καλύτερη δυνατή τιμή αντικειμενικής συνάρτησης.

Ωστόσο, καθώς το μέγεθος του προβλήματος αυξάνεται, παρατηρείται σημαντική αύξηση στον χρόνο που απαιτείται για την εύρεση της λύσης. Στα μεσαίου και μεγάλου μεγέθους προβλήματα, ο γραμμικός επιλυτής έφτασε στο ανώτατο όριο των 5400 δευτερολέπτων, κάτι που τον καθιστά αναποτελεσματικό για πολύ μεγάλα προβλήματα. Για παράδειγμα, στην περίπτωση με 3 φορτηγά, 20 μικρούς σταθμούς και 15 ενδιάμεσους σταθμούς, η εκτέλεση του γραμμικού επιλυτή διακόπηκε μόλις συμπληρώθηκαν τα 5400 δευτερόλεπτα, γεγονός που σημαίνει ότι η λύση που προέκυψε δεν ήταν απαραίτητα η βέλτιστη. Αυτός ο μεγάλος χρόνος εκτέλεσης, σε μεγαλύτερα προβλήματα αποτελεί βασικό περιορισμό της μεθόδου, καθώς ενδέχεται να μην υπάρχει πάντα η δυνατότητα για τέτοιο περιθώριο χρόνου και υπολογιστικών πόρων.

Παρά το μειονέκτημα του αυξημένου χρόνου υπολογισμού, ο γραμμικός επιλυτής εξακολουθεί να παρέχει την υψηλότερη ποιότητα λύσης στις περιπτώσεις που ολοκληρώνει τον ακριβή υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης. Οι λύσεις που προσφέρει είναι πολύ κοντά στο βέλτιστο, ακόμη και όταν ο χρόνος δεν επαρκεί για την πλήρη ολοκλήρωση του υπολογισμού. Στην περίπτωση προβλημάτων μικρού μεγέθους, όπως το πρόβλημα με 2 φορτηγά, 20 μικρούς σταθμούς και 10 ενδιάμεσους σταθμούς, ο γραμμικός επιλυτής κατέληξε στη βέλτιστη λύση με τιμή αντικειμενικής συνάρτησης 292, προσφέροντας έναν άριστο διαμοιρασμό των πόρων του προβλήματος.

Η ικανότητα του γραμμικού επιλυτή να διατηρεί σταθερά υψηλή ποιότητα λύσης, τον καθιστά ιδανικό για προβλήματα όπου η ακρίβεια είναι απόλυτη προτεραιότητα. Αξίζει να σημειωθεί ότι ακόμη και σε μεγαλύτερα προβλήματα, όπου το ανώτατο όριο χρόνου δεν επιτρέπει την πλήρη επεξεργασία των δεδομένων, η λύση που επιστρέφεται παραμένει αρκετά κοντά στο βέλτιστο σύμφωνα και με τις καμπύλες που περιγράφουν την εξέλιξη της τιμής της αντικειμενικής συνάρ-



τησης όσο μεγαλώνει το μέγεθος του δείγματος.

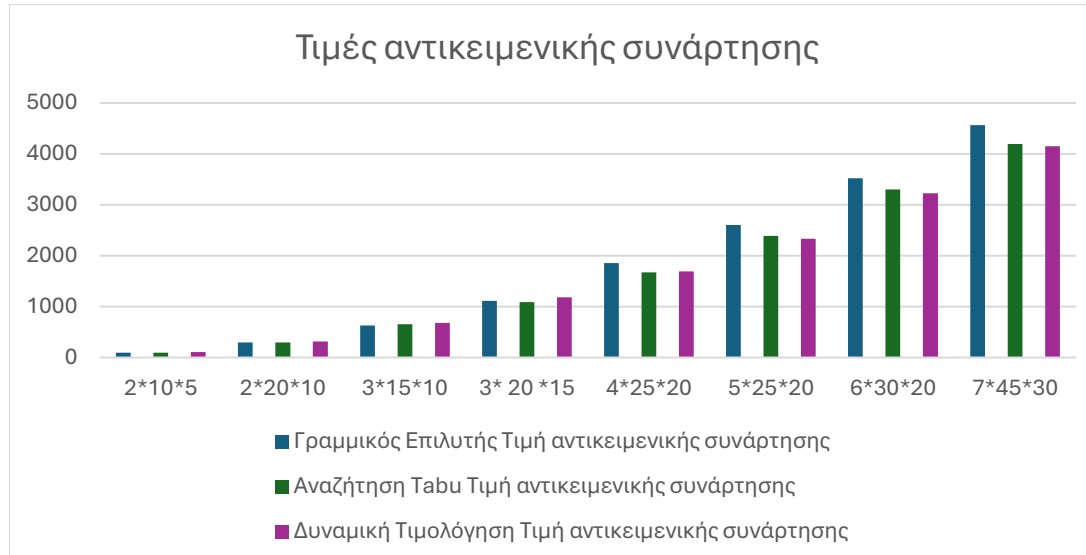
6.4 Tabu Search: Αποτελεσματικότητα σε Χρόνο και Ικανοποιητική Ποιότητα

Η μέθοδος *Tabu Search* είναι ευρετική και βασίζεται στην ιδέα της επαναληπτικής αναζήτησης, προσπαθώντας να προσεγγίσει μια καλή λύση γρήγορα και αποφεύγοντας την παγίδευση σε τοπικά βέλτιστα μέσω της απαγόρευσης της επαναχρησιμοποίησης παλαιότερων λύσεων. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα γνωστή για την ταχύτητα και την αποδοτικότητά της, ιδιότητες που την καθιστούν κατάλληλη για προβλήματα όπου η ταχύτητα απόκρισης είναι πρωταρχικής σημασίας.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του *Tabu Search* είναι η ταχύτητα επίλυσης. Για τα περισσότερα προβλήματα μεσαίου μεγέθους, το *Tabu Search* αποδεικνύεται εξαιρετικά αποτελεσματικό, επιστρέφοντας αποδεκτές λύσεις σε πολύ σύντομο χρόνο. Για παράδειγμα, στην περίπτωση με 2 φορτηγά, 20 μικρούς σταθμούς και 10 ενδιάμεσους σταθμούς, το *Tabu Search* επέστρεψε μια λύση με χρόνο υπολογισμού μόλις 11 δευτερόλεπτα, συγκριτικά με τα 815 δευτερόλεπτα που απαιτήθηκαν για την αντίστοιχη λύση του γραμμικού επιλυτή. Αυτή η ταχύτητα καθιστά το *Tabu Search* εξαιρετικά χρήσιμο για εφαρμογές όπου ο χρόνος απόκρισης είναι κρίσιμος και όπου οι λύσεις πρέπει να επιστρέφονται άμεσα για να επιτρέπουν τη συνέχιση της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Η ποιότητα της λύσης που παρέχει το *Tabu Search* είναι αρκετά ικανοποιητική, παρόλο που η μέθοδος δεν εξασφαλίζει τη βέλτιστη λύση. Ειδικά σε προβλήματα μεσαίου μεγέθους, οι λύσεις του *Tabu Search* είναι συνήθως πολύ κοντά στη βέλτιστη λύση που προκύπτει από τον γραμμικό επιλυτή. Για παράδειγμα, στο πρόβλημα με 3 φορτηγά, 15 μικρούς σταθμούς και 10 ενδιάμεσους σταθμούς, η λύση που παράγαγε το *Tabu Search* είχε τιμή αντικειμενικής συνάρτησης 652, πολύ κοντά στην τιμή 627 του γραμμικού επιλυτή. Παρότι η λύση του *Tabu Search* ήταν ελαφρώς μεγαλύτερη, ο χρόνος υπολογισμού ήταν μόλις 17 δευτερόλεπτα, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές όπου η ταχύτητα είναι πιο σημαντική σε σχέση με τη λήψη της βέλτιστης λύσης.

Παρατηρούμε βέβαια και στο επόμενο σχήμα, ότι καθώς το μέγεθος του προβλήματος μεγαλώνει, από τη στιγμή που έχουμε συγκεκριμένο χρονικό περιορισμό στη λειτουργία του γραμμικού επιλυτή, οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης της αναζήτησης tabu έχουν μικρότερη τιμή.



6.5 Δυναμική Τιμολόγηση: Προσαρμογή στο Κόστος για Εξοικονόμηση σε Μεγαλύτερα Προβλήματα

Η μέθοδος της δυναμικής τιμολόγησης βασίζεται σε μια διαφορετική προσέγγιση, η οποία προσαρμόζει τις πληρωμές των ανεξάρτητων συνεργατών (freelancers) ανάλογα με τις ανάγκες του προβλήματος και την εξέλιξη των συνθηκών κόστους. Αυτή η προσαρμογή επιτρέπει στην μέθοδο να αντισταθμίζει το κόστος σε μεγαλύτερα προβλήματα, προσφέροντας μια ευέλικτη λύση που είναι ιδιαίτερα αποδοτική όταν αυξάνεται η κλίμακα του προβλήματος.

Η δυναμική τιμολόγηση απαιτεί ελαφρώς περισσότερο χρόνο από το *Tabu Search*, καθώς ο υπολογισμός των αμοιβών των ανεξάρτητων συνεργατών (freelancers) προσθέτει επιπλέον πολυπλοκότητα στη διαδικασία. Ωστόσο, ο χρόνος αυτός είναι σε λογικά επίπεδα και επιτρέπει στην μέθοδο να προσαρμόζεται στις μεταβαλλόμενες ανάγκες κόστους. Για μεγαλύτερα προβλήματα, όπως αυτό με 7 φορηγά, 45 μικρούς σταθμούς και 30 ενδιάμεσους σταθμούς, η δυναμική τιμολόγηση επέστρεψε αποτελέσματα σε 60 δευτερόλεπτα.

Η δυναμική τιμολόγηση ενδέχεται να επιστρέφει ελαφρώς υψηλότερες τιμές αντικειμενικής συνάρτησης σε σύγκριση με το *Tabu Search* και τον γραμμικό επιλυτή. Ωστόσο, όσο αυξάνεται το μέγεθος του προβλήματος, η μέθοδος αυτή προσαρμόζεται καλύτερα, μειώνοντας την τιμή αντικειμενικής συνάρτησης. Για παράδειγμα, σε μεγάλα προβλήματα, η προσαρμογή αυτή επιτρέπει στη μέθοδο να καταλήγει σε μια καλύτερη λύση, καθώς οι πληρωμές ευθυγραμμίζονται με τα πραγματικά κόστη, κάτι που μειώνει τις δαπάνες.

Η δυναμική τιμολόγηση αποτελεί μια ισχυρή μέθοδο για προβλήματα μεγάλης κλίμακας, όπου η ευελιξία στον υπολογισμό των αμοιβών αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα.

7 Σύνοψη και μελλοντική εργασία

Στην παρούσα εργασία ερευνήθηκαν διεξοδικά τρεις προσεγγίσεις για την επίλυση του προβλήματος της ανακύκλωσης οχημάτων σε ένα σύστημα διαμοιρασμού ποδηλάτων. Οι μέθοδοι που υλοποιήθηκαν ήταν οι εξής. Αρχικά έγινε η περιγραφή ενός γραμμικού προβλήματος, το οποίο μοντελοποιεί το σύστημα και μπορεί με τη βοήθεια ενός γραμμικού επιλυτή να έχουμε ακριβείς λύσεις για εισόδους μικρού μεγέθους. Στη συνέχεια υλοποιήθηκε ένας αλγόριθμος, ο οποίος βασίστηκε στην τεχνική αναζήτησης tabu. Αυτός ο αλγόριθμος μας προσφέρει τη δυνατότητα να επιλύσουμε προβλήματα, τα οποία έχουν μέγεθος εισόδου αντίστοιχο με αυτό που παρουσιάζεται στην πράξη. Τέλος υλοποιήθηκε μία προσέγγιση, η οποία συνδυάζει τον αλγόριθμο αναζήτησης της προηγούμενης υλοποίησης με ένα μηχανισμό δυναμικής τιμολόγησης. Κάθε μία από αυτές τις υλοποιήσεις στοχεύει διαφορετικό κομμάτι του προβλήματος και η κάθε μία από αυτές χτίζει στα αποτελέσματα της προηγούμενης και επεκτείνει τις δυνατότητες της. Η αρχική υπόθεση με την οποία ξεκινήσαμε, ότι ο μηχανισμός αναζήτησης tabu μαζί με δυναμική τιμολόγηση πετυχαίνει το μικρότερο επιχειρησιακό κόστος, υποστηρίζεται από τα αποτελέσματα που πήραμε από τα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν.

Ο γραμμικός επιλυτής χρησιμοποιήθηκε αρχικά ως ένας τρόπος προσδιορισμού του προβλήματος αλλά και προσδιορισμού της βέλτιστης λύσης. Βρέθηκε ότι είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός αλλά καθώς το μέγεθος του προβλήματος μεγάλωνε η απόδοσή του είχε αισθητή πτώση τόσο στα αποτελέσματα που έβγαζε όσο και στο χρόνο που χρειαζόταν προκειμένου να προσδιοριστεί το αποτέλεσμα. Ήταν ένας περιορισμός, ο οποίος ήταν γνωστός από την αρχή και δεν επέτρεπε τη χρήση της μεθόδου αυτής όταν έχουμε μεγάλο αριθμό εργασιών για εκτέλεση, μεγάλο αριθμό ποδηλάτων καθώς και μεγάλο αριθμό από ανεξάρτητους συνεργάτες (freelancers). Οπότε, παρόλο που η συμβολή αυτής της υλοποίησης ήταν καθοριστική για τον προσδιορισμό της βέλτιστης λύσης προκειμένου να γίνει χρήση της σε σύγκριση με τις επόμενες προσεγγίσεις, ο περιορισμός που διέπει την προσέγγιση περιορίζει τη χρήση αυτής της μεθόδου σε θεωρητικές εξομοιώσεις ή πολύ μικρά, ελεγχόμενα περιβάλλοντα.

Προκειμένου να ξεπεραστούν οι περιορισμοί της υλοποίησης που έκανε χρήση του γραμμικού επιλυτή, προχωρήσαμε στη δεύτερη προσέγγιση, που κάνει χρήση του αλγόριθμου αναζήτησης tabu. Πρόκειται για μια μετευρετική τεχνική (metaheuristic) η οποία είναι σχεδιασμένη με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξετάζει μεγάλους χώρους λύσεων αποδοτικά. Αυτό το κάνει δημιουργώντας «γειτονίες» τις οποίες διατρέπει και με τις κατάλληλες δομές αποφεύγει την επανάληψη επιτυγχάνοντας την εύρεση μίας ικανοποιητικής λύσης σε προβλήματα αρκετά μεγάλου μεγέθους. Ενώ η συγκεκριμένη μέθοδος δε μπορεί να εγγυηθεί την εύρεση της βέλτιστης λύσης, μπορεί να βρει λύσεις οι οποίες είναι πολύ κοντά στη βέλτιστη σε πολύ λιγότερο χρόνο σε σχέση με αυτόν που απαιτεί ο γραμμικός επιλυτής. Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου αυτού επιβεβαιώνουν την πρακτική του αξία σε σενάρια που εμφανίζονται στην πράξη, όπου πολλά δεδομένα και πολλές μεταβλητές απόφασης πρέπει να ληφθούν υπόψιν προκειμένου να μπορέσουμε να διαχειριστούμε ένα δυναμικό περιβάλλον το οποίο έχει ανάγκη από γρήγορους υπολογισμούς. Φυσικά η υλοποίηση αυτή, ενώ είναι εξαιρετικά αποδοτική για μεγάλα συστήματα διαμοιρασμού ποδηλάτων, εντούτοις άφηνε αρκετά περιθώρια μείωσης του συνολικού κόστους στο σύστημα.

Η τρίτη προσέγγιση, η οποία συνδυάζει την τεχνική αναζήτησης tabu με το μηχανισμό δυναμικής τιμολόγησης, προσφέρει ακόμα μεγαλύτερο ποσοστό αποδοχής εργασιών από τους ανεξάρτητους συνεργάτες (freelancers) καθώς και καλύτερη διαχείριση κόστους στο σύστημα. Η δυναμική τιμολόγηση εισήγαγε την απαραίτητη προσαρμοστικότητα που έλειπε από την αρχική προσέγγιση, η οποία στηρίζεται σε ένα στατικό μοντέλο τιμολόγησης. Προσαρμόζοντας τις πληρωμές ανάλογα με την αντίδραση του χρήστη, το σύστημα μπόρεσε να ισορροπήσει καλύτερα τα κίνητρα που δίνονται στους χρήστες με τις επιχειρησιακές ανάγκες του. Κάνοντας χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου, ήταν πιο εύκολο για το σύστημα να διαχειριστεί πιο αποδοτικά τους πόρους του, να μειώσει το κόστος και ταυτόχρονα να βελτιώσει το επίπεδο υπηρεσιών που προσφέρει.

Χρησιμοποιώντας ως βάση τα ευρήματα αυτής της εργασίας, είναι φυσικό να προκύψουν ερωτήματα τα οποία θα μπορούσαν να εμπλουτίσουν και να επεκτείνουν τα αποτελέσματα της έρευνας. Αρχικά, υπάρχει σημαντικό περιθώριο για τη διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο η διαφορετική διαχείριση του προϋπολογισμού μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, θα μπορούσε να διερευνηθούν τα αποτελέσματα της διατήρησης του υπολειπόμενου προϋπολογισμού ύστερα από έναν κύκλο διαμοιρασμού εργασιών και αντί να τον μεταφέρει στην επόμενη επανάληψη της εφαρμογής του αλγορίθμου, να δημιουργήσει εργασίες οι οποίες έχουν πολύ χαμηλή τιμή στην προσπάθεια ανεύρεσης freelancer ο οποίος μπορεί συμπληρωματικά να εκτελέσει κάποια επιπλέον εργασία. Αυτή η προσαρμογή θα μπορούσε να επιτρέψει στο σύστημα να κατανέμει καλύτερα τους πόρους σε εργασίες κάθε φορά, μειώνοντας πιθανώς το κόστος εξερευνώντας φθηνότερες εναλλακτικές λύσεις βελτιστοποιώντας την αλληλουχία εργασιών. Αυτή η στρατηγική θα μπορούσε να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε περιβάλλοντα όπου η δυσκολία της κάθε εργασίας ποικίλλει σημαντικά, προσφέροντας μία πιο εκλεπτυσμένη προσέγγιση για την κατανομή πόρων και μειώνοντας περαιτέρω το συνολικό λειτουργικό κόστος.

Ένας άλλος βασικός τομέας για μελλοντική έρευνα είναι η ενσωμάτωση της μοντελοποίησης βασισμένης σε πράκτορες «agent-based modeling»[39]. Σε αυτή τη διατριβή, επικεντρωθήκαμε κυρίως στη βελτιστοποίηση σε επίπεδο συστήματος, με τους ανεξάρτητους συνεργάτες (freelancers) να έχουν σταθερή συμπεριφορά. Ωστόσο, η «agent-based modeling» θα επέτρεπε μία πιο λεπτομερή εξέταση της συμπεριφοράς των μεμονωμένων freelancer και των διαδικασιών λήψης αποφάσεων. Αντιμετωπίζοντας τους ανεξάρτητους συνεργάτες (freelancers) ως αυτόνομους πράκτορες με τα δικά τους κίνητρα, προτιμήσεις και στρατηγικές, ένα τέτοιο μοντέλο θα μπορούσε να προσομοιώσει πιο σύνθετες και ρεαλιστικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ανεξάρτητων συνεργατών (freelancers) και του συστήματος διαμοιρασμού ποδηλάτων. Αυτή η προσέγγιση θα παρείχε πολύτιμες γνώσεις σχετικά με το πως οι διαφορετικοί μηχανισμοί τιμολόγησης επηρεάζουν τη συμμετοχή των ανεξάρτητων συνεργατών (freelancers) με την πάροδο του χρόνου και θα μπορούσε να βοηθήσει στη βελτίωση του δυναμικού μοντέλου τιμολόγησης για την καλύτερη προσαρμογή των μοτίβων συμπεριφοράς του πραγματικού κόσμου.

Επιπλέον, η «agent-based» μοντελοποίηση θα μπορούσε επίσης να διευκολύνει την εξερεύνηση αποκεντρωμένων συστημάτων, όπου οι ανεξάρτητοι συνεργάτες (freelancers) λαμβάνουν ανεξάρτητες αποφάσεις με βάση τις εξελισσόμενες συνθήκες και τις προσφορές πληρωμών. Αυτό θα επέτρεπε μια πιο εξελιγμένη ανάλυση του τρόπου με τον οποίο οι ανεξάρτητοι συνεργάτες (freelancers) ανταποκρίνονται στη δυναμική τιμολόγηση σε διάφορα περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένων ανταγωνιστικών περιβαλλόντων όπου συνυπάρχουν πολλαπλοί φορείς συστημάτων κοινής χρήσης ποδηλάτων. Με την προσομοίωση αυτών των αλληλεπιδράσεων, οι ερευνητές θα μπορούσαν να αναπτύξουν πιο ισχυρές δυναμικές στρατηγικές τιμολόγησης που βελτιστοποιούν τόσο την απόδοση του συστήματος όσο και τη ευρεία συμμετοχή σε ένα ευρύ φάσμα σεναρίων.

Συμπερασματικά, αυτή η διατριβή έχει καταδείξει την αποτελεσματικότητα της δυναμικής τιμολόγησης ως ισχυρού εργαλείου για τη βελτιστοποίηση της συμμετοχής των ανεξάρτητων συνεργατών (freelancers) και τη μείωση του λειτουργικού κόστους στα συστήματα κοινής χρήσης ποδηλάτων. Τα αποτελέσματα δείχνουν τη δυνατότητα της δυναμικής τιμολόγησης, να μεταμορφώσει τον τρόπο διαχείρισης των συστημάτων κοινής χρήσης ποδηλάτων, παρέχοντας ένα ευέλικτο και προσαρμοστικό πλαίσιο που ανταποκρίνεται σε προκλήσεις σε πραγματικό χρόνο. Ενώ ο γραμμικός επιλυτής και η αναζήτηση tabu πρόσφεραν πολύτιμες πληροφορίες για τη φύση του προβλήματος, ήταν η δυναμική προσέγγιση τιμολόγησης που τελικά έδωσε τα πιο αποδοτικά αποτελέσματα. Συνεχίζοντας την ανάπτυξη και τη βελτίωση αυτών των μεθόδων, τα συστήματα κοινής χρήσης ποδηλάτων μπορούν να εξελιχθούν σε πιο αποτελεσματικές, επεκτάσιμες και βιώσιμες λύσεις που ανταποκρίνονται καλύτερα στις απαιτήσεις των σύγχρονων πόλεων.

Βιβλιογραφία

- [1] B. LAA and EMBERGER, "Günter. Bike sharing: Regulatory options for conflicting interests–Case study Vienna.," *Transport Policy*, pp. 148-157., 2020.
- [2] Y. GUO and S. Y. HE, "Built environment effects on the integration of dockless bike-sharing and the metro.," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, p. 83: 102335., 2020.
- [3] Y. SUN, "Sharing and riding: How the dockless bike sharing scheme in China shapes the city," *Urban Science*, p. 2.3: 68., 2018.
- [4] L.-Y. QIU and L.-Y. HE, "Bike sharing and the economy, the environment, and health-related externalities," *Sustainability*, p. 1145., 2018.
- [5] A. e. a. ANGELOPOULOS, "Incentivized vehicle relocation in vehicle sharing systems.," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, pp. 97: 175-193, 2018.
- [6] H. e. a. LU, "Broken bike recycling planning for sharing bikes system.," *IEEE Access*, pp. 7: 177354-177361., 2019.
- [7] Y. ZHANG, D. KASRAIAN and P. VAN WESEMAEL, "Built environment and micro-mobility.," *Journal of Transport and Land Use*, pp. 16.1: 293-317., 2023.
- [8] H. e. a. SI, "Understanding bike-sharing users' willingness to participate in repairing damaged bicycles: Evidence from China.," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, pp. 141: 203-220., 2020.
- [9] D. e. a. SILVER, "Deterministic policy gradient algorithms.," *In: International conference on machine learning.*, pp. p. 387-395., 2014.
- [10] Y. SINGER, "Budget feasible mechanisms.," *In: 2010 IEEE 51st Annual Symposium on foundations of computer science. IEEE*, pp. p. 765-774., 2010.
- [11] A. SINGLA and A. KRAUSE, "Truthful incentives in crowdsourcing tasks using regret minimization mechanisms.," *In: Proceedings of the 22nd international conference on World Wide Web.*, pp. p. 1167-1178., 2013.
- [12] A. e. a. SINGLA, "Incentivizing users for balancing bike sharing systems.," *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2015.
- [13] G. XU and A. ZOU, "A Recycling Routing Problem of Broken Bikes With Incentives in Bike Sharing Systems.," *IEEE Access*, pp. 10: 106191-106201., 2022.

- [14] Y. e. a. ZHANG, "Bike-sharing systems rebalancing considering redistribution proportions: A user-based repositioning approach.," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, p. 610: 128409., 2023.
- [15] D. S. LAI, O. C. DEMIRAG and J. M. LEUNG, "A tabu search heuristic for the heterogeneous vehicle routing problem on a multigraph.," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, pp. 86: 32-52., 2016.
- [16] L. TALARICO, K. SÖRENSEN and J. SPRINGAEL, " Metaheuristics for the risk-constrained cash-in-transit vehicle routing problem.," *European Journal of operational research*, pp. 244.2: 457-470., 2015.
- [17] G. e. a. XU, "A mixed rebalancing strategy in bike sharing systems.," *Engineering Optimization*, pp. 54.7: 1160-1177., 2022.
- [18] D. e. a. ZHANG, " An adaptive tabu search algorithm embedded with iterated local search and route elimination for the bike repositioning and recycling problem," *Computers & Operations Research*,, p. 123: 105035., 2020.
- [19] A. e. a. LIU, "Research on the recycling of sharing bikes based on time dynamics series, individual regrets and group efficiency.," *Journal of cleaner production*, pp. 208: 666-687., 2019.
- [20] Y. ZHANG, D. LIN and Z. MI, "Electric fence planning for dockless bike-sharing services.," *Journal of cleaner production*, pp. 206: 383-393, 2019.
- [21] H. e. a. SI, "Mapping the bike sharing research published from 2010 to 2018: A scientometric review.," *Journal of cleaner production*, pp. 213: 415-427., 2019.
- [22] M. e. a. DU, "Static rebalancing optimization with considering the collection of malfunctioning bikes in free-floating bike sharing system.," *Transportation Research Part E:Logistics and Transportation Review*, p. 141: 102012, 2020.
- [23] W. e. a. LI, "Multi-trip vehicle routing problem with order release time.," *Engineering Optimization*, pp. 1279-1294, 2020.
- [24] F. Glover, "Tabu Search: A Tutorial.," *ORSA Journal on Computing*, pp. 190-206, 1989.
- [25] F. & L. M. Glover, "Tabu Search.," *In Handbooks in Operations Research and Management Science*, pp. Vol. 1, pp. 215-250, 1997.
- [26] C. & R. A. Blum, "Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison," *ACM Computing Surveys*,, pp. 268-308., 2003.
- [27] N. & R. A. Nisan, "Algorithmic Game Theory," *In Proceedings of the 32nd ACM Symposium on Theory of Computing*, pp. pp. 30-39, 2001.

- [28] S. e. a. CHANG, "Innovative Bike-Sharing in China: Solving Faulty Bike-Sharing Recycling Problem," *Journal of Advanced Transportation*, 2018.
- [29] Y. CAI, G. P. ONG and Q. MENG, "Dynamic bicycle relocation problem with broken bicycles," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, p. 165: 102877, 2022.
- [30] L. e. a. LIU, "Evolutionary Game Analysis of Abandoned-Bike-Sharing Recycling: Impact of Recycling Subsidy Policy.," *Sustainability*, 2023.
- [31] F. e. a. CHEN, "Enhanced recycling network for spent e-bicycle batteries: A case study in Xuzhou, China.," *Waste Management*, vol. 60, pp. 660-665., 2017.
- [32] M. e. a. DU, "Static rebalancing optimization with considering the collection of malfunctioning bikes in free-floating bike sharing system.," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 141: 102012., 2020.
- [33] G. e. a. MAO, "How can bicycle-sharing have a sustainable future? A research based on life cycle assessment.," *Journal of Cleaner Production*, vol. 282: 125081., 2021.
- [34] Y. WANG and W. Y. SZETO, "An enhanced artificial bee colony algorithm for the green bike repositioning problem with broken bikes," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 125: 102895., 2021.
- [35] M. USAMA, Y. SHEN and O. ZAHOOR, "A free-floating bike repositioning problem with faulty bikes.," *Procedia Computer Science*, pp. 151: 155-162., 2019.
- [36] Y. e. a. TENG, "Optimization model and algorithm for dockless bike-sharing systems considering unusable bikes in China.," *IEEE Access*, pp. 8: 42948-42959., 2020.
- [37] Q. e. a. SUN, "Who will pay for the "bicycle cemetery"? Evolutionary game analysis of recycling abandoned shared bicycles under dynamic reward and punishment.," *European Journal of Operational Research*, pp. 305.2: 917-929., 2023.
- [38] "GLPK (GNU Linear Programming Kit)," [Online]. Available: <https://www.gnu.org/software/glpk/>.
- [39] U. W. W. Rand, *An Introduction to Agent-Based Modeling*, MIT Press, 2015.