



Rebalancing problem in electric bike sharing systems with heterogeneous fleet: Mathematical model and heuristic algorithm

İpek Damla Akpınar^{1*}, Barış Keçeci¹, Fulya Altıparmak², Yusuf Tansel İç¹

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Baskent University, 06790, Ankara, Türkiye

²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Gazi University, 06570, Ankara, Türkiye

Highlights:

- Heterogeneous rebalancing fleet and battery swap
- MILP formulation
- Clarke-Wright Savings

Keywords:

- Bicycle Sharing System
- Pedal-Assist e-Bicycles
- Rebalancing Problem
- Heterogeneous Fleet
- Battery Swapping

Article Info:

Research Article

Received: 08.10.2025

Accepted: 12.12.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1798976

Correspondence:

Author: İpek Damla Akpınar

e-mail:

idakpinar@baskent.edu.tr

phone: +90 312 246 66 66 - 4109

Graphical/Tabular Abstract

This study addresses the static complete rebalancing problem (e-HSTYDP) with heterogeneous fleet in a bicycle sharing system using battery-swappable e-bikes. e-HSTYDP is defined as selecting the vehicle type to be used in the redistribution of e-bikes among stations and performing the balancing process in a way that optimizes the specified objective function (total balancing time, total cost etc.). First, a mixed integer linear programming (MILP) formulation is developed to solve the e-HSTYDP, in which the objectives of minimizing the total balancing time and the total cost are considered separately. The e-HSTYDP is an NP-hard problem. Therefore, a constructive heuristic based on the Clarke and Wright Saving (CWT) algorithm is developed to solve medium- and large-sized problems in reasonable time. As an example, an e-HSTYDP with 7 stations and 2 different vehicle types is given in Figure A.

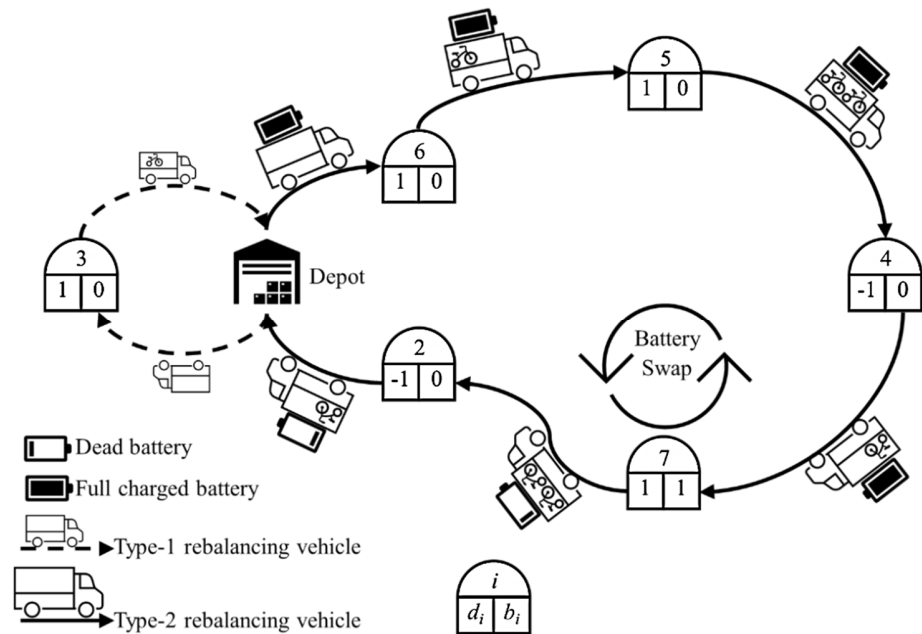


Figure A. An example of the e-HSTYDP

Purpose: This study focuses on the rebalancing problem in bike-sharing systems, a key operational issue that affects user satisfaction, system efficiency, and overall service sustainability.

Theory and Methods: The e-HSTYDP is introduced for the first time in this study. Two MILP models, MMs minimizing total rebalancing time and MMm minimizing total cost, are developed. Since the problem is NP-hard, a constructive algorithm based on the Clarke–Wright Savings (CWS) heuristic is proposed to efficiently solve medium- and large-sized instances.

Results: Comparative analyses on 78 benchmark instances show that both MMs and MMm outperform the existing model in solution quality, while the s-CWT algorithm generates feasible and near-optimal solutions for medium and large instances within much shorter computation times.

Conclusion: Further research can extend this work by combining metaheuristic and mathematical approaches to enhance large-scale e-HSTYDP performance and address dynamic demand conditions.



Elektrikli bisiklet paylaşım sistemlerinde heterojen filo ile yeniden dengeleme problemi: Matematiksel model ve sezgisel algoritma

İpek Damla Akpınar^{1*}, Barış Keçeci¹, Fulya Altıparmak², Yusuf Tansel İç¹

¹Başkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06790, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Heterojen filolu e-bisiklet yeniden dengeleme problemi
- Clarke-Wright Tasarruf algoritmasına dayalı çözüm yaklaşımı
- 78 test problemiyle kapsamlı performans analizi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 08.10.2025

Kabul: 12.12.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1798976

Anahtar Kelimeler:

Bisiklet paylaşım sistemi,
pedal destekli elektrikli
bisikletler, yeniden
dengeleme problemi,
heterojen filo,
batarya değişimi

ÖZ

Bisiklet paylaşım sistemleri (BPS), kullanıcıların bisikletleri satın alma ve bakım sorumluluğu olmaksızın kiralayabildikleri yaygın bir araç paylaşım platformudur. BPS’de yeniden dengeleme, yüksek talep noktalarında bisikletlerin erişilebilirliğini ve bakım–dağıtım süreçlerinin sürdürülebilirliğini sağladığı için kritik öneme sahiptir. Son yıllarda kullanım kolaylığı nedeniyle elektrikli bisikletler (e-bisiklet) tercih edilmektedir. Ayrıca dengeleme işlemi için kullanılan araçlar boyut, hız ve kapasite açısından farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle çalışmada, batarya değişimli e-bisikletlerin kullanıldığı BPS’de (e-BPS) heterojen filo ile statik tam yeniden dengeleme problemi (e-HSTYDP) ele alınmıştır. e-HSTYDP, istasyonlar arasında e-bisikletlerin yeniden dağıtımında kullanılacak araç tipinin seçilmesi ve dengelemenin yapılması problemidir. Toplam dengeleme süresi ve toplam maliyet amaçlarının ayrı ayrı ele alındığı problem için karma tamsayı model geliştirilmiştir. e-HSTYDP, NP-zor sınıfında yer aldığından, orta ve büyük boyutlu problemlere makul zamanlarda çözüm üretebilmek amacıyla Clarke-Wright Tasarruf (CWT) algoritmasına dayalı çözüm kurucu algoritma geliştirilmiştir. Model ve algoritmanın performansı, 6–40 düğüm arasında değişen 78 test problemi üzerinde incelenmiştir. Sonuçlar, küçük boyutlu problemler için modelin en iyi ya da en iyiye yakın çözümleri kısa sürede (en fazla 700 sn) üretebildiğini, ancak problem boyutu arttıkça çözüm süresinin hızla yükseldiğini göstermektedir. s-CWT algoritması ise orta ve büyük boyutlu problemlere 125 sn’den daha kısa sürede uygun çözümler üretmiş ve modelin bulduğu 3 çözümü iyileştirmiştir.

Rebalancing problem in electric bike sharing systems with heterogeneous fleet: Mathematical model and heuristic algorithm

H I G H L I G H T S

- Heterogeneous fleet-based e-bike rebalancing problem
- Clarke-Wright Savings based solution approach
- Comprehensive performance analysis on 78 test instances

Article Info

Research Article

Received: 08.10.2025

Accepted: 12.12.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1798976

Keywords:

Bicycle sharing system,
pedal-assist electric bicycles,
rebalancing problem,
heterogeneous fleet,
battery swapping

ABSTRACT

Bicycle-sharing systems (BPS) are widespread vehicle-sharing platforms where users can rent bicycles without the burden of purchasing and maintaining them. Rebalancing in BPS is critical because it ensures bicycle availability at high-demand points and ensures the sustainability of maintenance and distribution processes. In recent years, electric bicycles (e-bikes) have become popular in these systems due to their ease of use. Furthermore, the vehicles used for balancing in BPS can vary in terms of size, speed, and capacity. Therefore, this study addresses the static complete rebalancing problem (e-HSTYDP) with a heterogeneous fleet in BPS (e-BPS) using battery-swappable e-bikes. The e-HSTYDP is defined as selecting the vehicle type to be used in the redistribution of e-bikes among stations and performing the balancing process. A mixed-integer mathematical model is developed to consider separately the objectives of minimizing the total balancing time and the total cost. Since the e-HSTYDP is an NP-hard problem, a constructive heuristic based on the Clarke and Wright Savings (CWT) algorithm is developed to generate solutions for medium- and large-sized problems in reasonable time. The performance of the mathematical model and the s-CWT algorithm is investigated on 78 test problems ranging from 6 to 40 nodes. Experimental study shows that optimal or near-optimal solutions can be obtained in a short time (average 700 seconds) with the mathematical model for small-sized e-HSTYDP problems, while the solution time increases rapidly for medium- and large-sized problems. The s-CWT algorithm, on the other hand, is able to obtain feasible solutions for medium- and large-sized problems in less than 125 seconds and improves three solutions obtained with the model.

1. Giriş (Introduction)

Dünyanın birçok bölgesinde motorlu araç kullanımı giderek artmaktadır. Buna bağlı olarak kent içi trafik sıkışıklığı ve karbondioksit salımları da hızla yükselmektedir. Bu olumsuz durumların ortadan kaldırılabilmesi için çevre dostu ulaşım yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bisiklet Paylaşım Sistemleri (BPS), bu yöntemlerden biridir. BPS, kullanıcıların bisikletleri satın alma ve bakım sorumluluğu olmaksızın kiralayabildikleri yaygın bir araç paylaşım platformudur [1]. Bir BPS’de kullanıcılar bisikletleri belirli istasyonlardan alıp bırakabilmekte (istasyon bazlı BPS-İBBPS) ya da şehir genelinde istedikleri herhangi bir noktada bırakabilmektedir (serbest dolaşimli BPS - SDBPS).

İlk BPS, 1965 yılında Hollanda’nın Amsterdam şehrinde, yalnızca 50 bisikletten oluşan “Beyaz Bisiklet Planı” adı altında başlatılmıştır [2]. Bu sistem literatürde birinci nesil BPS olarak adlandırılmaktadır. İkinci nesil BPS’lerde ise kullanıcılar, bir jeton karşılığında depozit ödemesi yaparak ücretsiz biçimde hizmetten yararlanabilmektedir. Bu nesle örnek olarak 1991 yılında Kopenhag’da uygulamaya konulan Bycyklen gösterilebilir [3]. Üçüncü nesil BPS’lerde müşteriler kayıt altına alınmaya başlanmıştır. Bisiklet istasyonlarında bisikletlerin kilitlenebildiği özel park üniteleri bulunmaktadır. Bu kilitler yalnızca bilgisayar kontrolüyle açılabilir. Ayrıca kullanıcıların manyetik kartlarla bisiklet kiralmasına da imkân tanınmıştır [4]. Bu neslin ilk uygulaması, 1996 yılında Birleşik Krallık’ta Portsmouth Üniversitesi’nde gerçekleştirilmiştir. Dördüncü nesil BPS, cep telefonları ve GPS cihazlarındaki teknolojik gelişmeler sayesinde istasyonsuz (“dock-free”) sistemler şeklinde tasarlanmıştır. Bu nesilde herhangi bir bisiklet park istasyonuna gerek duyulmamaktadır. İlk örnek olarak, 2005 yılında Fransa’da hayata geçirilen Velo’v programı gösterilebilir [4]. Beşinci nesil BPS’lerde ise batarya ve elektrik motoru ile donatılmış elektrikli bisikletler (e-bisikletler) sisteme dâhil edilmiştir. Bu nesle örnek olarak, Şanghay’da uygulanan Mobike ve Çin’deki Hangzhou Public Bicycle System verilebilir [5, 6].

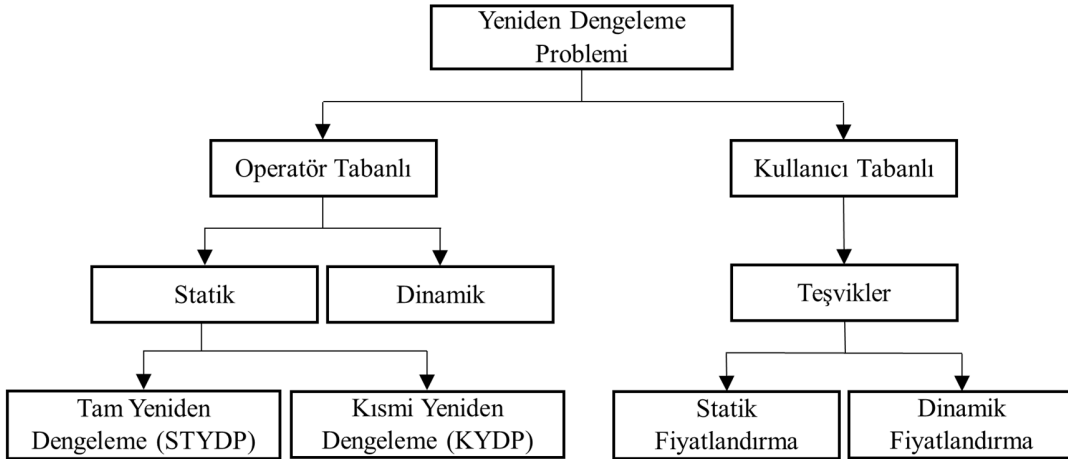
Üçüncü nesil BPS’nin ortaya çıkışı ile birlikte karşılaşılan en önemli sorun, istasyonlarda bisiklet talebi ile mevcut bisikletlerin dağılımı arasındaki dengesizlik olmuştur. Bir BPS’de kullanıcı, bisikleti bir istasyondan alıp bir süre kullandıktan sonra başka bir istasyona bırakmaktadır. Ancak, her istasyonun kapasitesi sınırlıdır ve bu kapasitenin üzerinde bisiklet depolanması mümkün değildir. Bu durum, bazı istasyonlarda bisiklet yetersizliğine, bazılarında ise bisiklet fazlalığına yol açmaktadır [7]. Dolayısıyla, kullanıcıya daha iyi hizmet sunulabilmesi için tüm istasyonlardaki bisiklet sayılarının

yeniden dengelenmesi gerekmektedir. Ancak bu süreç oldukça maliyetli ve zaman alıcıdır. Yeniden dengeleme problemi, her çalışma gününün sonunda sistemdeki tüm bisikletlerin dengelenmesini gerektirdiği için operasyonel düzeyde bir problem olarak değerlendirilmektedir. Şekil 1’de BPS’de yeniden dengeleme probleminin sınıflandırılması verilmektedir [8]. Şekil 1’de görüldüğü gibi bir BPS’nin yeniden dengelenmesi operatör tabanlı veya kullanıcı tabanlı olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Operatör tabanlı stratejide yeniden dengeleme, sistemin işletmecisi tarafından yapılmaktadır. Kullanıcı tabanlı yeniden dengelemede ise bu işlem, kullanıcılara sağlanan teşvikler sayesinde gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, sistem çalışmazken yapılan dengeleme statik, sistem çalışırken yapılan dengeleme ise dinamik yeniden dengeleme olarak adlandırılmaktadır. Tüm istasyonlardaki talebin karşılandığı durumda bu süreç “tam yeniden dengeleme”, aksi durumda ise “kısmi yeniden dengeleme” olarak ifade edilmektedir (Bkz. Şekil 1 [8]).

BPS’de kritik öneme sahip olan yeniden dengeleme, mevcut kaynakların etkin kullanımını amaçlayan ve hizmet performansını sürdürülebilir kılan operasyonel düzeyde bir karar problemidir. Uygun bir yeniden dengeleme yapılmadığında, kullanıcılar ihtiyaç duydukları anda e-bisiklet bulamama ya da bisikletlerin işlevsiz bölgelerde kümelenmesi gibi sorunlarla karşılaşabilmektedir. Bu durum kullanıcı memnuniyetsizliğine, sistem verimliliğinin düşmesine ve nihayetinde kullanım oranlarında azalmaya yol açabilmektedir.

Bu çalışmada, e-bisikletlerin kullanıldığı beşinci nesil BPS’de (e-BPS) operatör tabanlı statik tam yeniden dengeleme problemi (STYDP) ele alınmıştır. E-bisikletler, şarj edilebilir, batarya değiştirilebilir ve her iki durumu içeren karma tipte olabilir. Batarya değiştirilebilir e-bisikletlerin en büyük avantajı bataryaların depoda şarj edilmesidir. Dolayısıyla farklı yerlerde şarj istasyonunu kurma gerekliliğini ortadan kaldırdığı için çok daha maliyet etkin araçlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun yanı sıra batarya değişimi, e-bisiklet bataryalarının sahip olduğu sınırlamalara yönelik etkin bir çözüm sunmakta ve hem kullanıcılar hem de işletme sahipleri için operasyonel verimliliği, kullanım kolaylığı ve sürdürülebilirliği artırmaktadır. Ayrıca, paylaşımlı sistemlerde yüksek bisiklet kullanılabilirliğini korumaya, kullanıcıların hızlı bir şekilde tekrar yola çıkabilmesini sağlamaya ve filo yönetiminde bakım ile lojistik süreçlerini kolaylaştırmaya katkı sağlamaktadır.

Literatürdeki çalışmaların çoğunda yeniden dengeleme için ya tek aracın ya da aynı özellikteki araç filosunun (homojen filo) kullanıldığı



Şekil 1. Yeniden dengeleme problemlerinin sınıflandırılması (Classification of rebalancing problems)

görülmektedir [7, 8, 10, 11]. Ancak gerçek hayatta işletme, boyut, hız, kapasite, yakıt türü ve maliyet açısından farklılık gösteren bir araç filosuna (heterojen filo) sahip olabilir. Farklı türdeki araçlar, farklı istasyonların ihtiyaçlarını karşılamak ve farklı ölçeklerdeki yeniden dengeleme operasyonları için kullanılabilir. Örneğin kamyon gibi büyük boyutlu araçlar uzun mesafelerde daha büyük miktarda bisiklet taşıma için kullanılırken, yoğun kentsel alanlarda daha etkin hareket edebildikleri için minibüs gibi daha küçük boyutlu araçlar tercih edilebilir. Dolayısıyla, BPS’de yeniden dengeleme faaliyetlerinde heterojen filonun dikkate alınması, her aracın kendi özelliklerine uygun rotalara atanabilmesi sayesinde operasyonel verimliliği artırmada ve maliyetleri azaltmada etkili olabilir. Bu açıklamalar altında bu çalışmada batarya değişimli e-bisikletlerin kullanıldığı sistemde yeniden dengelemenin heterojen araç filosu ile yapıldığı durum ele alınmıştır. Problem, e-BPS’de heterojen filo ile statik tam yeniden dengeleme problemi (e-HSTYDP) olarak adlandırılmıştır. e-HSTYDP, belirlenen amacı eniyileyecek şekilde sistemdeki e-bisikletlerin yeniden dağıtılmasında kullanılacak araç tiplerinin seçilmesi ve dengelemenin yapılması olarak tanımlanır. e-HSTYDP, operasyonel bir problem olduğu için dengelemenin hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi önem taşımaktadır. Bu nedenle çalışmada ilk amaç olarak toplam dengeleme süresinin enazlanması dikkate alınmıştır. İşletme açısından bu operasyonel problemde dengelemenin en az maliyetle gerçekleştirilmesi de önemlidir. Dolayısıyla, çalışmada bir diğer amaç olarak toplam maliyet (taşıma ve filoda kullanılacak araçların satın alma / kiralama maliyeti) ele alınmıştır.

e-HSTYDP, literatürde ilk kez bu çalışmada ele alınmıştır. Problemin çözümü için karma tamsayılı doğrusal programlamaya dayalı matematiksel model (MM) geliştirilmiştir. Toplam dengeleme süresinin enazlanmasını dikkate alan model “MMs”, toplam maliyeti (taşıma ve araç satın alma / kiralama maliyetini) dikkate alan model ise “MMm” olarak adlandırılmıştır. BPS’de yeniden dengeleme problemi NP-zor problemler sınıfında yer alan bir problemdir. Bu nedenle, orta ve büyük boyutlu problemlere makul zamanlarda çözüm üretebilmek amacıyla Clarke-Wright Tasarruf (CWT) algoritmasına dayalı bir çözüm kurucu algoritma geliştirilmiştir. Matematiksel modelin ve çözüm kurucu algoritmanın performansı literatürden üretilen 78 test problemi üzerinde karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Ayrıca, dikkate alınan iki amaç arasındaki ilişkinin incelenmesi için ödünleşim (trade-off) analizi yapılmıştır.

Bu çalışmanın literatüre katkısı aşağıda özetlenmiştir:

- BPS’de klasik bisikletlere göre kullanımı çok daha rahat olan e-bisikletlerin yeniden dengeleme problemi ele alınmış ve modele e-bisikletlerin batarya değiştirme gereksinimleri dahil edilmiştir.
- BPS’de özdeş araç filosu varsayımı gevşetilmiş ve hız, boyut, birim taşıma maliyeti ile sabit maliyet açısından farklılık gösteren heterojen araçlar dikkate alınmıştır.
- e-HSTYDP için karma tamsayılı matematiksel model geliştirilmiştir.
- e-HSTYDP, NP-zor problemler sınıfında yer aldığı için orta ve büyük boyutlu problemlerin çözümü için Clarke-Wright Tasarruf (CWT) algoritmasına dayalı bir çözüm kurucu algoritma geliştirilmiştir.

Makalenin geri kalan kısmı şu şekilde organize edilmiştir: İkinci bölümde, ilgili literatür taraması verilmiştir. Üçüncü bölümde, e-HSTYDP tanımlanmış ve geliştirilen matematiksel model verilmiştir. Dördüncü bölümde, orta ve büyük boyutlu e-HSTYDP’nin çözümü için uyarlanan çözüm kurucu CWT algoritması sunulmuştur. Beşinci bölümde, matematiksel model ve CWT algoritmasının performansı test problemleri üzerinde karşılaştırmalı incelenmiştir. Son bölümde sonuç ve değerlendirmelere yer verilmiştir.

2. Literatür Taraması (Literature Review)

Son yıllarda artan motorlu araç kullanımı, karbondioksit salınımı ve çevresel sorunları ciddi biçimde gündeme getirmiştir. Bu bağlamda çevre dostu ulaşım biçimlerinin önemi artmış, özellikle elektrikli araçların ve BPS’nin kullanımı yaygınlaşmıştır. Elektrikli araçlar düşük yakıt tüketimi ve sessiz sürüş gibi avantajlar sunarken, bisiklet paylaşım sistemleri de kent içi ulaşımında trafik sıkışıklığını azaltma, çevreyi koruma ve kısa mesafeli yolculuklarda kullanıcılar için ekonomik bir alternatif olma özellikleriyle dikkat çekmektedir. Bununla birlikte istasyonlardaki bisikletlerin dengesiz dağılımı nedeniyle BPS’nin sürdürülebilirliği olumsuz etkilenmektedir. Bu durum literatürde, “dengesizlik (imbalance)”, “yeniden dengeleme (rebalance)”, “yeniden konumlandırma (repositioning)” veya “dengeleme (balancing)” kavramlarıyla anılmaktadır [5].

Yeniden dengeleme problemi (Rebalancing Problem), bisikletlerin istasyonlarda yeterli düzeyde bulunmasını sağlamayı ve kullanıcı talebini karşılayacak şekilde dağıtım yaparken operasyonel maliyetleri en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Problemin çözümüne yönelik literatürde farklı bakış açıları geliştirilmiştir. Bunlar arasında matematiksel programlama tabanlı kesin çözüm yöntemleri, sezgisel ve meta-sezgisel algoritmalar ile gerçek zamanlı veri analizine dayalı yaklaşımlar öne çıkmaktadır.

Küçük boyutlu problemler için matematiksel modeller sıklıkla tercih edilmektedir. Örneğin [8], SDBPS’de tekli ve çoklu araçlarla (homojen filo) yeniden dengeleme için bir KTDP modeli geliştirmiş ve büyük ölçekli problemlerde kullanılmak üzere melez algoritmalar önermiştir. [9] ise belirsizlik altında yeniden dengeleme problemini ele alarak bir stokastik programlama modeli geliştirmiş ve gerçek vaka çalışmasıyla bu yaklaşımın etkinliğini göstermiştir. Benzer şekilde [10] ve [11], problemi ARP çerçevesinde ele almış, dal-kesme, tabu arama ve sezgisel algoritmaların etkinliğini tartışmıştır.

Daha stratejik düzeyde, Lin vd. [12] istasyon konumlarını, bisiklet envanterini ve kullanıcı rotalarını birlikte ele alan hub-tabanlı bir stok modeli geliştirmiştir. Ayrıca literatürde yeniden dengeleme problemi, farklı varsayımlar ve kısıtlar altında pek çok çalışma tarafından incelenmiştir. Bu çalışmalardan Erdoğan vd. [13], talep aralıklarını dikkate alan statik bir yeniden dengeleme modeli önerirken Dell’Amico vd. [14] matematiksel formülasyonlar ve kapsamlı bir örnek kümesi sunmuştur. Aynı problem için Ho ve Szeto [15] iteratif tabu arama algoritması ve Kadri vd. [16] ise kesin çözüm yaklaşımı olan dal-sınır algoritması geliştirmiştir. Li vd. [17] çoklu tip bisikletleri içeren yeniden konumlandırma problemini ele alırken Liu vd. [18] ise çoklu veri kaynaklarını kullanarak akıllı bir optimizasyon yaklaşımı önermiştir. Buna karşılık Regue ve Recker [19] ile Zhang vd. [20], dinamik talep değişimlerini de dikkate alarak kullanıcı memnuniyetini artırmayı hedeflemiştir. Özellikle dinamik modellerde, zaman boyutunun dâhil edilmesiyle birlikte yeniden dengelemenin gerçekçi koşullar altında daha etkin biçimde planlandığı görülmektedir. Bu doğrultuda, son yıllarda dinamik yeniden dengeleme problemine yönelik daha gelişmiş modeller önerildiği görülmektedir. Liang vd. [21], envanter aralıkları ve hedef stok seviyelerini dikkate alan çok dönemli bir dinamik yeniden dengeleme modeli geliştirerek talep tahminindeki belirsizliklere karşı daha dayanıklı bir yaklaşım sunmuştur. Benzer şekilde Gleditsch vd. [22], gerçek zamanlı karar verme gerekliliklerine uygun olarak sütun üretimine dayalı bir dinamik yeniden dengeleme yapısı önermiş ve yöntemin gerçek veri üzerinde yüksek performans gösterdiğini raporlamıştır. Bu güncel çalışmalar, dinamik talep değişimlerinin dikkate alınmasının yeniden dengeleme performansına olan etkisini güçlü biçimde ortaya koymaktadır.

Çok araçlı yeniden dengeleme problemleri üzerine yapılan çalışmalar da literatürde önemli bir yer tutmaktadır. Bu kapsamda çok-araçlı statik yeniden dengeleme problemi için Ho ve Szeto [23] karma geniş komşuluk arama algoritması, Forma vd. [24] ise matematiksel modele dayalı üç aşamalı bir sezgisel algoritma önermiştir. Schuijbroek vd. [25] envanter dengeleme ve araç rotalama bileşenlerini entegre ederken Bulhões vd. [26] ise çok araçlı ve çok duraklı yapılar için gelişmiş bir rotalama yaklaşımı sunmuştur. Buna ek olarak Szeto ve Shui [27], yükleme ve boşaltma stratejilerini dikkate alan kesin çözüm yöntemleri geliştirmiştir.

Öte yandan literatürde çok dönemli yapılar, farklı bisiklet türleri, bakım gereksinimleri ve kullanıcı davranışlarını dikkate alan daha bütünlük modeller de önerilmiştir [28–31]. Bu çalışmalardan Arabzad vd. [28] iki dönemli ve iki ünlü bir durum için matematiksel model geliştirmiştir. Zhang vd. [29] çalışmasında tamir gerektiren bisikletlerin toplanmasını modele dahil ederken Kacem vd. [30] kümeleme tabanlı bir planlama yaklaşımı önermiştir. Wang ve Wu [31] kullanılmayan bisikletleri dikkate alan statik bir yeniden dengeleme problemi için matematiksel model geliştirmiş ve Du vd. [32] ise serbest dolaşımli sistemlerde arızalı bisikletleri de dikkate alan yeniden dengeleme problemi üzerinde bir çalışma yapmıştır. Son yıllarda bu kapsamı genişleten daha bütünlük modeller de önerilmiştir. Sun vd. [33], serbest dolaşımli sistemler için çok dönemli senkron yeniden dengeleme yaklaşımı geliştirerek envanter dengesinin zaman içindeki değişimini daha etkin biçimde ele almıştır. Bu güncel çalışmalar, bakım operasyonlarının, çok dönemli yapının ve farklı bisiklet türlerinin yeniden dengeleme performansını üzerindeki etkisini literatürde daha kapsamlı biçimde ortaya koymaktadır.

Ayrıca Ren vd. [34], depo stok düzeyi ve seyahat maliyetlerini minimize eden çok kriterli bir model geliştirmiştir. Shi vd. [35] çalışmalarında envanter seviyeleri ve araç rotalarını birlikte ele alırken Zhang vd. [36] uyarlamalı tabu arama algoritması önermiştir. Son yıllarda ise Kaveh vd. [37] mobil istasyonlar ve bakım kısıtlarını, Chastre ve Andrade [38] gerçek bir kentsel vaka çalışmasını, Pan vd. [39] raylı sistemlerden gelen transfer talebini ve Guo vd. [40] envanter yönlendirme problemini ele alan çalışmalar yapmışlardır. Bunlara ek olarak Liang vd. [41], statik yeniden dengeleme problemi için tavlama benzetimi ve genetik algoritmalarla dayalı bir karma sezgisel algoritma geliştirmiştir. Bu kapsamda özellikle genetik algoritma, tavlama benzetimi, geniş komşuluk arama ve karınca kolonisi gibi meta-sezgisel yöntemlerin literatürde sıklıkla tercih edildiği görülmektedir.

Öte yandan, mevcut literatürün büyük bölümü geleneksel bisiklet paylaşım sistemlerine odaklanmıştır. Oysa pedal destekli elektrikli bisikletler (e-bisiklet), geleneksel bisikletlere göre çok daha düşük fiziksel efor gerektirmesi, çevre dostu yapısı ve uzun mesafelerde sağladığı avantajlarla son yıllarda dikkat çekici bir alternatif haline gelmiştir [42, 43]. Ancak, bu araçların yüksek maliyetleri bireysel kullanımını sınırlamakta ve paylaşım sistemleri üzerinden kullanımını daha cazip hale getirmektedir. Bununla birlikte, e-bisikletlerin en kritik operasyonel zorluğu batarya yönetimidir. Çoğu sistemde istasyonlarda şarj altyapısı bulunmadığından, bataryaların araçlarla taşınarak değiştirilmesi gerekmektedir. Bu durum, yeniden dengeleme problemine ek olarak batarya lojistiği boyutunu da içeren çok daha karmaşık bir problem ortaya çıkarmaktadır.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, bu karmaşıklık sistem performansı üzerindeki etkilerini daha detaylı biçimde incelemeye başlamıştır. Zhou vd. [44], batarya değişimi ve yeniden dengeleme süreçlerini birlikte ele alan dinamik bir model önererek serbest dolaşımli e-bisiklet sistemlerinde batarya seviyesi odaklı karar verme mekanizmasının önemini göstermiştir. Benzer şekilde Guan vd. [45], batarya gücü seviyelerine dayalı kullanıcı yönlendirmesi yoluyla yeniden dengeleme verimliliğini artıran kullanıcı-bazlı bir yaklaşım

geliştirmiştir. Karma tipteki bisiklet filolarına odaklanan Cui vd. [46], hem geleneksel hem elektrikli bisikletlerin birlikte yer aldığı sistemlerde düşük batarya seviyesinin yeniden dengeleme maliyetlerini belirgin şekilde artırdığını ortaya koymuştur. Son olarak, operasyon planlamasında batarya seviyelerinin ve yenileme zamanlamasının belirleyici olduğu çok disiplinli yaklaşımlar, gelecekte e-bisiklet paylaşım sistemlerinde batarya lojistiğinin merkezi bir karar alanı haline geldiğini vurgulamaktadır [47].

Bugüne kadar yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu, batarya değişimi gereksinimini göz ardı etmiş ve bu konudaki matematiksel modellere sınırlı düzeyde yer vermiştir. Dolayısıyla literatürde e-bisikletler için yeniden dengeleme problemini dikkate alan bütünlük yaklaşımlar son derece sınırlıdır. Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurmayı hedeflemekte ve e-bisikletler için heterojen filo ile yeniden dengelemede batarya değişimi operasyonlarını ele alan matematiksel model önermektedir. Ek olarak, problemin karmaşıklığından dolayı orta ve büyük boyutlu problemlere makul zamanda çözüm üretebilmek amacıyla Clarke-Wright Tasarruf (CWT) algoritmasına dayalı bir çözüm kurucu algoritma geliştirilmiştir.

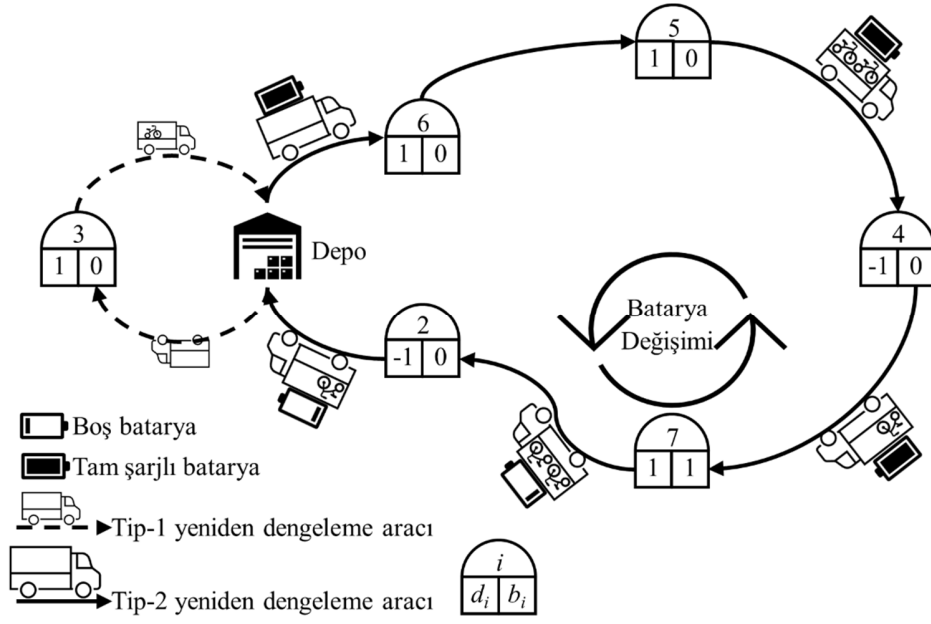
3. Problemin Tanımı ve Matematiksel Model (Problem Definition and Mathematical Model)

Bu bölümde e-HSTYDP tanımlanarak problemin çözümü için geliştirilen karma tamsayı doğrusal programlamaya dayalı matematiksel model (MM) iki farklı amaç için ayrı ayrı verilecektir. MM, toplam dengeleme süresinin enazlanması amacı için “MMs”, toplam maliyetin (taşıma ve araç satın alma / kiralama maliyeti) enazlanması amacı için “MMm” olarak kodlanmıştır.

3.1. Problemin Tanımı (Problem Definition)

Bu çalışmada batarya değişimli e-bisikletlerin kullanıldığı sistemde yeniden dengelemenin heterojen araç filosu ile yapıldığı durum ele alınmıştır. Problem, gün sonunda ve tüm istasyonlar üzerinde dengeleme ve batarya değişimleri yapıldığı için e-BPS’de heterojen filo ile statik tam yeniden dengeleme problemi (e-HSTYDP) olarak adlandırılmıştır. e-HSTYDP, belirlenen amacı eniyileyecek şekilde istasyonlar arasında e-bisikletlerin yeniden dağıtımının seçilen araç tipi ile yapacak rotaların belirlenmesidir. e-HSTYDP, operasyonel bir problem olduğu için dengelemenin hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi önem taşımaktadır. Bu nedenle çalışmada ilk amaç olarak toplam dengeleme süresinin enazlanması dikkate alınmıştır. İşletme açısından bu operasyonel problemde dengelemenin en az maliyetle gerçekleştirilmesi de önemlidir. Dolayısıyla, çalışmada bir diğer amaç olarak toplam maliyet (taşıma ve filoda kullanılacak araçların satın alma / kiralama maliyeti) ele alınmıştır.

e-HSTYDP, yönlü bir graf $G=(N,A)$ üzerinde tanımlanır. $\{1\}$ başlangıç düğümü (depo) olmak üzere; $N=\{1,2,\dots,n\}$ düğüm (istasyon) kümesi ve $A=\{(i,j): i,j \in N, i \neq j\}$ ayrıntı kümesidir. d_i , her $i \in N$ düğümü için dengesizlik miktarıdır. $d_i > 0$ ise i düğümü fazla e-bisiklet bulunan bir arz düğümü, $d_i < 0$ ise e-bisiklet ihtiyacı olan bir talep düğümüdür. Depo düğümü için $d_1=0$ kabul edilmiştir. b_i , her $i \in N$ düğümünde bataryası değişecek e-bisiklet sayısıdır. c_{ij} , $(i,j) \in A$ ayrıntı için seyahat mesafesidir. e-HSTYDP’de, K araç kümesi olmak üzere sistemde $|K|$ farklı türde yeniden dengeleme aracı bulunmaktadır. V_k araç filosunda her bir $k \in K$ türündeki araç sayısını göstermektedir. Her bir araç türü için tanımlı iki kapasite vardır: Q_k e-bisiklet taşıma kapasitesi, C_k ise batarya taşıma kapasitesidir. α_k araç türü k ’nin hızını (zaman/mesafe), β_k k aracının bir birim mesafeyi kat etme maliyetini ve f_k k aracının sabit maliyetini göstermektedir. τ , her istasyonda harcanacak bisiklet yüklemeye ve boşaltma süresidir.



Şekil 2. e-HSTYDP için bir örnek (An example of the e-HSTYDP)

Bu tanımlamalar doğrultusunda e-HSTYDP, $G(N,A)$ grafi üzerinde belirlenen amacı (toplam dengeleme süresi veya toplam maliyeti (taşıma ve araç satın alma / kiralama maliyeti toplamı)) eniyileyecek şekilde istasyonlar arasında e-bisikletlerin yeniden dağıtımını seçilen araç tipleri ile yapacak rotaların aşağıdaki kısıtları sağlayacak şekilde bulunması olarak tanımlanır:

- Her rota depodan başlayıp depoda bitecektir.
- Her rotada bir tür araç kullanılacaktır.
- Her rotada araçların e-bisiklet ve batarya taşıma kapasitesi aşılmayacaktır.
- Sistemdeki tüm istasyonlarda dengeleme yapılacaktır.
- Sistemde her tipte kullanılan araç sayısı, filodaki üst sınırı geçemez.

Şekil-2’de e-HSTYDP’yi somutlaştırmak amacıyla 7 istasyonlu ve 2 farklı araç tipine sahip bir örnek senaryo sunulmuştur. Sistemin aşağıdaki bileşenlerden oluştuğu varsayılmaktadır:

- Araç filosunda 2 adet Tip-1 ve 1 adet Tip-2 olmak üzere toplam 3 araç bulunmaktadır:
 - Tip-1 araçların e-bisiklet taşıma kapasitesi $Q_1 = 2$ ve batarya taşıma kapasitesi $C_1 = 1$ ’dir.
 - Tip-2 araçların e-bisiklet taşıma kapasitesi $Q_2 = 5$ ve batarya taşıma kapasitesi $C_2 = 1$ ’dir.
- Depo hariç her i düğümü (istasyonu) için iki kritik bilgi belirtilmiştir:
 - d_i , i istasyonundaki e-bisiklet fazlası/eksikliği (düğüm numarasının altında solda gösterilen sayı)
 - b_i , i istasyonunda değiştirilmesi gereken batarya sayısı (düğüm numarasının altında sağda gösterilen sayı)

Şekil 2’ye göre 2 ve 4 numaralı düğümlerde 1 adet e-bisiklet eksikliği; 3, 5, 6 ve 7 numaralı düğümlerde 1 adet e-bisiklet fazlası vardır. Ayrıca 7 numaralı düğüm 1 adet batarya değişim talebine sahiptir.

- Başlangıç durumu: Araçlara depoda yalnızca batarya yüklenmekte olup e-bisiklet bulunmamaktadır.

- Tip-1 araç turu: Yalnızca 3 numaralı düğümü ziyaret edip depoya dönmekte; 1 adet e-bisiklet fazlasını depoya taşımakta ve tur boyunca batarya değişimi yapılmamaktadır.
- Tip-2 araç turu: $6 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 7 \rightarrow 2$ sırasını izlemekte; e-bisiklet yükü sırasıyla 0, 1, 2, 1, 2 ve 1 olmaktadır. Ayrıca 7 numaralı düğümde batarya değişimi yapılmaktadır.

Sonuç: Her iki turda da e-bisiklet ve batarya kapasite kısıtları sağlanmış, turlar uygun şekilde tamamlanmıştır.

3.2. e-HSTYDP için Matematiksel Model (Mathematical Model for the e-HSTYDP)

Pal ve Zhang’ın [8] matematiksel modeli temel alınarak e-HSTYDP için matematiksel model geliştirilmiştir. Pal ve Zhang [8], çalışmalarında klasik bisikletlerin söz konusu olduğu BPS’de homojen filolu STYDP ele almışlardır. Problem için Miller-Tucker-Zemlin alt-tur eliminasyon kısıtlarının kullanıldığı bir matematiksel model önermişlerdir. BPS’de bir düğüme birden fazla uğranabilmekte ve her düğüme kaç kez uğranacağı önceden bilinmemektedir. Pal ve Zhang [8] bu durumda problemin modellemesini kolaylaştırmak amacıyla ayrıştırma yaklaşımını kullanmışlardır. Bu yaklaşımda depo dışındaki her düğüm coğrafi konumu korunarak birim dengesizlik ve birim batarya talebine sahip birden fazla düğüme dönüştürülmektedir. Dolayısıyla, klasik araç rotalama problemindeki “her düğüme bir kez uğranır kısıtı” kolayca sağlanmaktadır.

e-HSTYDP için geliştirilen matematiksel modelde de Pal ve Zhang’ın [8] ayrıştırma yöntemi kullanılmış ve modelde ayrıştırılmış ağa ilişkin yeni terimlerden yararlanılmıştır: $G_0=(N_0,A_0)$, ayrıştırılmış ağ olup $N_0=\{1,2,\dots,n_0\}$ düğüm kümesi ve $A_0=\{(i,j): i,j \in N_0, i \neq j\}$ ayrıt kümesidir. Her $(i,j) \in A_0$ ayrıt için seyahat mesafesi $c_{ij} > 0$ olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, her $(i,j) \in A_0$ ayrıt için dengesizlik \bar{d}_i ve batarya talebi \bar{b}_i ile gösterilmektedir.

e-HSTYDP için geliştirilen matematiksel modelde kullanılan karar değişkenleri aşağıda verilmektedir:

Karar Değişkenleri

x_{ijk} : Yeniden dengeleme aracı k , $(i,j) \in A_0$ ayrıtından geçer ise 1: diğer durumda 0

$m\tau_1$: Depoya en geç varan yeniden dengeleme aracının varış zamanı
 τ_{ij} : i 'den j 'ye hareket eden yeniden dengeleme aracının j düğümüne varış zamanı

q_{ij} : Yeniden dengeleme aracının (i,j) ayrıtı üzerinde taşıdığı e-bisiklet sayısı

B_{ij} : Yeniden dengeleme aracının (i,j) ayrıtı üzerinde taşıdığı boş batarya sayısı

e-HSTYDP için geliştirilen matematiksel modelde akış tabanlı alt-tur eliminasyon kısıtları kullanılmıştır.

Toplam Dengeleme Süresinin Enazlanması için Matematiksel Model (MMs):

$$\sum_{j \in N_0} x_{jik} = \sum_{j \in N_0} x_{ijk}, \forall i \in N_0, \forall k \in K \quad (1)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N_0} x_{jik} = 1, \forall i \in N_0 \setminus \{1\} \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N_0} x_{j1k} \leq V_k, \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N_0} x_{iik} = 0, \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N_0} q_{ij} - \sum_{j \in N_0} q_{ji} = \bar{d}_i, \forall i \in N_0 \setminus \{1\} \quad (5)$$

$$q_{1j} = 0, \forall j \in N_0 \setminus \{1\} \quad (6)$$

$$q_{ij} \leq \sum_{k \in K} Q_k x_{ijk}, \forall (i,j) \in A_0 \quad (7)$$

$$\sum_{j \in N_0} B_{ij} - \sum_{j \in N_0} B_{ji} = \bar{b}_i, \forall i \in N_0 \setminus \{1\} \quad (8)$$

$$B_{ij} \leq \sum_{k \in K} C_k x_{ijk}, \forall (i,j) \in A_0 \quad (9)$$

$$\sum_{j \in N_0} \tau_{ij} - \sum_{j \in N_0} \tau_{ji} = \sum_{k \in K} ((\bar{c}_{ij} \alpha_k) + \tau) x_{ijk}, \forall i \in N_0 \setminus \{1\} \quad (10)$$

$$\tau_{1j} = \sum_{k \in K} \bar{c}_{1j} \alpha_k x_{1jk}, \forall j \in N_0 \setminus \{1\} \quad (11)$$

$$\tau_{ij} \leq \sum_{k \in K} M x_{ijk}, \forall (i,j) \in A_0 \quad (12)$$

$$m\tau_1 \geq \tau_{1j}, \forall j \in N_0 \setminus \{1\} \quad (13)$$

$$m\tau_1 \geq 0 \quad (14)$$

$$\tau_{ij} \geq 0, \forall (i,j) \in A_0 \quad (15)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, \forall (i,j) \in A_0, \forall k \in K \quad (16)$$

$$q_{ij} \in Z^+, \forall (i,j) \in A_0 \quad (17)$$

$$B_{ij} \geq 0, \forall (i,j) \in A_0 \quad (18)$$

Kısıtları altında:

$$Enk m\tau_1 \quad (19)$$

Modelde Eş. 1 numaralı kısıt bir düğüme bir yeniden dengeleme aracının giriş ve çıkışının olmasını sağlar. Eş. 2 numaralı kısıt depo dışındaki her düğümün k . tip yeniden dengeleme aracı tarafından bir kez ziyaret edilmesini sağlamaktadır. Eş. 3 numaralı kısıt, kullanılan k . tip yeniden dengeleme araç sayısının, filodaki mevcut k . tip araç sayısını aşmasını engeller. Eş. 4 numaralı kısıt i düğümünde k . tip yeniden dengeleme aracının döngü oluşturmasını engellemektedir. Eş.

5 numaralı kısıt her i düğümü için tam yeniden dengeleme yapılmasını sağlar. Eş. 6 numaralı kısıt turun başlangıcında yeniden dengeleme aracının yükü sıfır olduğundan, herhangi bir aracın doğrudan bir talep düğümünü ziyaret etmesini engellemektedir. Başka bir deyişle, yeniden dengeleme aracı önce pozitif talebi olan bir arz düğümünü ziyaret etmeli, ardından talep düğümüne yönelmelidir. Eş. 7 numaralı kısıt yeniden dengeleme aracının e-bisiklet taşıma kapasitesinin aşılmasını engeller. Eş. 8 numaralı kısıt düğümlerdeki tüm batarya değişim taleplerinin karşılanmasını sağlamaktadır. Eş. 9 numaralı kısıt araçlarda taşınan batarya sayısının aracın batarya taşıma kapasitesini aşmasını engeller. Eş. 10 – 12 numaralı kısıtlar akış tabanlı alt tur engelleme kısıtlarıdır. Eş. 13 numaralı kısıt en geç depoya ulaşan yeniden dengeleme aracının varış zamanının diğer tüm araçların varış zamanlarından daha sonra olmasını sağlar. Eş. 14 – 18 numaralı kısıtlar işaret kısıtlarıdır. Eş. 19 numaralı amaç fonksiyonu ise toplam yeniden dengeleme süresini enküçülemektedir.

Toplam Maliyetin Enazlanması için Matematiksel Model (MMm):

e-HSTYDP için toplam maliyetin (taşıma ve araç satın alma / kiralama maliyeti) enazlanması amacı ele alındığında matematiksel model aşağıdaki gibi elde edilmektedir. Eş. 1 - 12 ve Eş. 15 – 18

Kısıtları altında:

$$Enk \sum_{i \in N_0} \sum_{j \in N_0} \sum_{k \in K} \bar{c}_{ij} * \beta_k * x_{ijk} + \sum_{k \in K} \sum_{j \in N_0} f_k * x_{1jk} \quad (20)$$

Eş. 20 numaralı amaç fonksiyonu toplam maliyeti enküçülemektedir. Amaç fonksiyonunda ilk terim toplam taşıma maliyeti, ikinci terim ise toplam araç satın alma / kiralama maliyetidir.

Her iki matematiksel modelde (MMs ve MMm), ayrıştırılmış ağdaki düğüm/istasyon sayısı ile araç türü sayısına bağlı olarak $O(n^3)$ sayıda karar değişkeni ve $O(n^2)$ sayıda kısıt içermektedir.

4. Sezgisel Algoritma (Heuristic Algorithm)

Chemla vd. [10], çalışmalarında BPS'de statik dengeleme probleminin NP-zor olduğunu belirtmektedir. Dolayısıyla, e-HSTYDP de NP-zor problemler sınıfında yer almaktadır. Bu nedenle bu çalışmada, orta ve büyük boyutlu e-HSTYDP'ye makul süreler içerisinde çözüm bulabilmek amacıyla klasik çözüm kurucu algoritmaya dayalı bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Gajpal ve Abad [48] tarafından vurgulandığı gibi basit ve esnek olan çözüm kurucu algoritmalar ile NP-zor bir problem için kısa sürede bir çözüme ulaşılabilir. Ayrıca, meta-sezgisel algoritmalar için kaliteli başlangıç çözümleri çözüm kurucu sezgisel algoritmalar ile hızlı bir şekilde elde edilebilir. Bu nedenle, bir çözüm kurucu algoritma olan Clarke-Wright Tasarruf (CWT) [49] algoritmasına dayalı bir sezgisel algoritma e-HSTYDP için geliştirilmiştir.

Basit, hızlı uygulanabilen ve kabul edilebilir kalitede çözüm üretebilen CWT'nin, literatürde ARP'nin farklı türleri-özellikle homojen veya heterojen filolu, kapasite kısıtlı, mesafe veya süre kısıtlı rotalama problemlerinde-için yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Bu kapsamda Clarke ve Wright'ın [50] öncü çalışması algoritmanın temel mantığını oluştururken; Gajpal ve Abad [48], Keçeci vd. [51] ve benzer çalışmalar bu yöntemi araç rotalama probleminin farklı türleri için uyarlamıştır. Ayrıca iki kademeli ve kısmi şarj gibi daha gelişmiş yapıların ele alındığı çalışmalarda da tasarruf tabanlı yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir [52, 53]. Algoritmanın temel mantığı, başlangıçta her müşteri için depodan gidiş-dönüş turlarının oluşturulması ve daha sonra tasarruf değerleri üzerinden en uygun birleştirmeleri yaparak toplam maliyetin azaltılmasına dayalıdır. Tasarruf değeri, iki müşterinin doğrudan birbirine bağlanmasıyla sağlanan mesafe veya maliyet avantajını ifade eder. CWT'nin paralel ve sıralı olmak üzere iki temel versiyonu vardır. Paralel (parallel) versiyonda aynı anda birden fazla tur

- Adım 1. Tasarruf değerlerini hesapla ve tasarruf listesi oluştur.
- Adım 2. Tasarruf listesini büyükten küçüğe sırala.
 $r:=0, Tur_r := \{\}$.
- Adım 3. Tasarruf listesindeki her (i,j) çifti için tekrarla.
 Eğer i ve j düğümlerinin ikisi de herhangi bir turda değilse ve i veya j e-bisiklet fazlasına sahipse ve aracın e-bisiklet taşıma kapasitesi ile batarya taşıma kapasitesi aşılmıyorsa,
 { Yeni bir tur oluştur ve i,j düğümlerini ata.
 $r:=r+1$.
 $Tur_r := Tur_r \cup \{i,j\}$ }
 Eğer i ve j düğümlerinden yalnız birisi, turun (bu tur r^* ile gösterilsin) birinci veya sonuncu sırasında ise,
 { Tura dahil olmayan düğüm (#), eklendiğinde r^* turuna atanan aracın e-bisiklet taşıma ve batarya taşıma kapasitesi aşılmıyorsa,
 $Tur_{r^*} := Tur_{r^*} \cup \{\#\}$ }
 Eğer i ve j düğümlerinin ikisi de ayrı turların birinci ve sonuncu sırasında ve aracın e-bisiklet taşıma ve batarya taşıma kapasitesi aşılmıyor ise,
 { Düşük maliyetli araca göre turları birleştir }
- Adım 4. Eğer atanamayan düğüm kalmışsa,
 { Tamir algoritması uygula }
- Adım 5. Tüm düğümler atandığında, dur ve çözümü raporla

Şekil 3. s-CWT algoritması adımları (Steps of the s-CWT algorithm)

üzerinde birleştirme yapılırken, sıralı (sequential) versiyonda ise turlar tek tek genişletilmektedir. Uygulama kolaylığından dolayı e-HSTYDP için sıralı CWT algoritmasına dayalı sezgisel bir algoritma geliştirilmiş ve s-CWT olarak adlandırılmıştır. s-CWT'nin adımları ve akış diyagramı Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmektedir.

s-CWT'de öncelikle her istasyon için depo çıkışı ve depo dönüşü ayrı bir rota oluşturulmakta ve bu rotalar araçlara düşük maliyetli araçlardan başlanarak atanmaktadır. Daha sonra, her bir (i,j) istasyon çifti için mesafe açısından tasarruf değeri Eş. 21 numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$S_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij} \quad (21)$$

Eş. 21'de c_{i0} i . istasyondan depoya kadar olan mesafeyi, c_{0j} depodan j . istasyona kadar olan mesafeyi ve c_{ij} (i,j) istasyonları arasındaki mesafeyi göstermektedir. Tasarruf değeri ne kadar büyükse, iki istasyonun aynı rota üzerinde birleştirilmesi o kadar avantajlıdır. Elde edilen tasarruf değerleri büyükten küçüğe sıralanmakta ve bu sıralama doğrultusunda rotalar üzerinde birleştirme işlemleri gerçekleştirilmektedir. Birleştirme sürecinde, seçilen (i,j) çifti mevcut rotalarda başlangıç veya son nokta konumundaysa, kapasite ve problem kısıtlarını ihlal etmeyecek şekilde bu iki rota uçtan uca bağlanarak tek bir rota haline getirilmektedir. Eğer birleştirme herhangi bir kısıtı ihlal ediyorsa, ilgili çift atlanarak bir sonraki en yüksek tasarruf değerine sahip (i,j) çifti değerlendirilmektedir. Bu süreç, tasarruf listesindeki tüm çiftler incelenene kadar devam etmektedir. s-CWT, BPS'nin dinamik ve özel gereksinimlerini karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. Yeniden dengeleme araçlarının başlangıçta boş olması (yani üzerinde e-bisiklet bulunmaması) nedeniyle rotaların birleştirilmesi aşamasında başlangıç düğümlerinin yalnızca e-bisiklet fazlası bulunan istasyonlardan seçilmesi sağlanmıştır. Matematiksel modelde (6) numaralı kısıt ile tanımlanmış olan bu koşul, başlangıçta uygun olmayan seçimlerin yapılmasını önlemektedir. Bu koşuldan dolayı algoritmanın sonunda bazı istasyonlar turlara atanamayabilmektedir. Bu durumda, uygun çözüm elde edebilmek için bir tamir mekanizması uygulanmaktadır. Uygulanan tamir algoritmasında öncelikle atanamayan istasyonlar tespit edilir. Her atanamayan istasyon için araçların e-bisiklet ve

batarya taşıma kapasiteleri aşılmayacak şekilde uygun pozisyonlar denir. İlk bulunan uygun pozisyona istasyon ataması yapılır. Tamir algoritmasının uygulanmasından sonra e-HSTYDP için tüm kısıtların sağlandığı uygun bir çözüm elde edilmektedir.

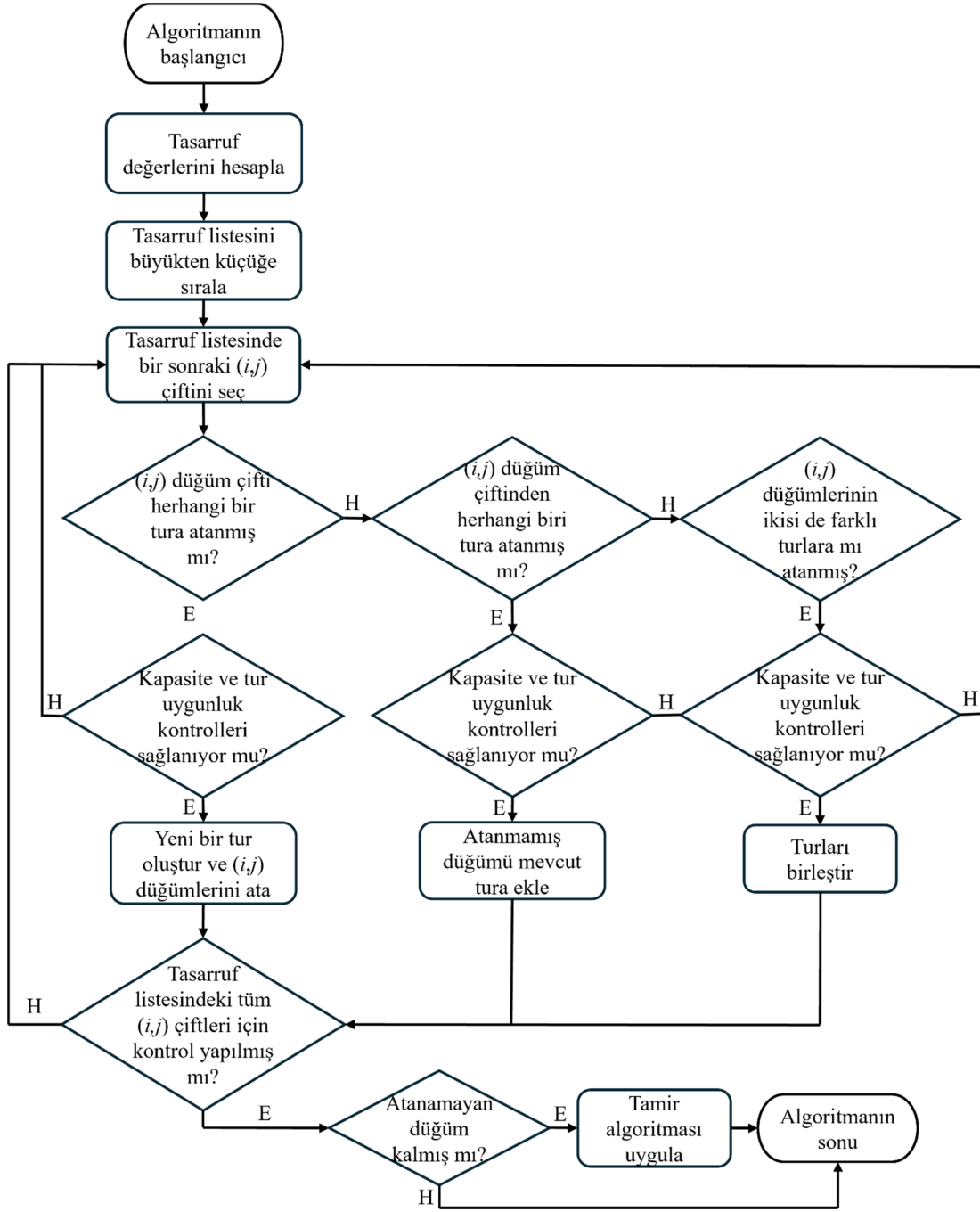
5. Deneysel Analizler (Experimental Analyses)

Bu bölümde, e-HSTYDP için yapılan üç aşamalı deneysel analiz sonuçları verilmektedir. İlk aşamada, e-HSTYDP için geliştirilen matematiksel modelin performansı incelenmiştir. Bu aşamada MMs modelinin performansı, Pal ve Zhang [8] tarafından homojen filolu STYDP'de toplam dengeleme süresini enazlamak için geliştirilen matematiksel model (PZ-MM) ile karşılaştırılmıştır. Dolayısıyla matematiksel modelin performansı öncelikle STYDP için incelenmiştir. İkinci aşamada, e-HSTYDP'de dikkate alınan iki farklı amaç (toplam dengeleme süresi ve toplam maliyet) için matematiksel modeller (MMs ve MMm) ile s-CWT'nin performansı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Son aşamada ise iki amaç arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla ödünleşim (trade-off) analizi yapılmıştır.

Test problemlerine en iyi çözümü elde edebilmek için kullanılan matematiksel model, IBM ILOG CPLEX Concert Technology'de C++ programlama dili ile kodlanmıştır. Sezgisel algoritmanın kodlamasında ise C programlama dili kullanılmıştır. Tüm koşullar, Ubuntu 22.04.5 LTS Linux işletim sistemi, Intel® Xeon Phi™ 7290 @ 1.50 GHz işlemci ve 384 GB RAM donanımına sahip bir bilgisayarda yürütülmüştür. IBM ILOG CPLEX 22.1.0 çözücüsü, 16 GB kullanılabilir bellek sınırı ve 16 çekirdekte 16 paralel iş parçacığı olacak şekilde yapılandırılmıştır. Matematiksel model için çözüm süresi 2 saat (7200 saniye) ile sınırlanmıştır.

5.1. Test Problemleri (Test problems)

e-HSTYDP için test problemleri, Pal ve Zhang [8]'in çalışmasında verilen gerçek hayat probleminde türetilmiştir. Pal ve Zhang [8], Güney Florida Üniversitesi'nin Tampa kampüsünde uygulanan BPS'den test problemlerini üretmiştir. 1700 dönümlük bir alana kurulan Tampa kampüsünde 320'den fazla bina vardır. Ders aralarındaki kısa molalarda bir binadan diğerine yürümek, hava



Şekil 4. s-CWT algoritmasının akış diyagramı (Flowchart of the s-CWT algorithm)

koşulları ve ders kitaplarının ağırlığı nedeniyle zordur. Kampüste yapılan bir araştırma kampüse arabayla gelenlerin günde ortalama bir kampüs içi yolculuk (binalar arası veya öğle yemeği için) yaptığını göstermektedir. Tampa kampüsünde 38.000'den fazla öğrenci ve 1700 öğretim görevlisi ve personel bulunduğu göz önüne alındığında, kampüs içi araba yolculukları önemli miktarda yakıt tüketimine ve sera gazı (GHG) emisyonuna yol açabilir. Bu nedenle üniversite yönetimi, Sosyal Bisikletler (SoBi) ile iş birliği yaparak BPS'yi geliştirmiştir. Program, Eylül 2015'te 100 bisikletle başlatılmıştır.

Pal ve Zhang [8] bu sistemde 5 farklı gerçek dengeleme operasyonunu dikkate alarak 5 test problem üretmiştir. Tablo 1'de gerçek hayat

dengeleme probleminin kodlanmasının yanı sıra her problemdeki istasyon ve bisiklet sayısı verilmektedir. Tabloda kullanılan GHP kodu “Gerçek Hayat Problemi” ifadesinin kısaltmasıdır. Bu çalışmada bu test problemlerinden e-HSTYDP için küçük, orta ve büyük boyutlu toplam 78 test problemi üretilmiştir. Tablo 2'de her problem boyutu için istasyon sayısı aralığı ve üretilen test problem sayısı verilmektedir. Tablo 2 incelendiğinde küçük boyutlu test problemlerinde istasyon sayısı 6 ile 10 arasında değişirken, orta boyutluda 11 ile 20 ve büyük boyutluda ise 22 ile 40 arasında değişmektedir. Küçük, orta ve büyük boyutlu olmak üzere sırasıyla 31, 25 ve 22 test problemi üretilmiştir.

Tablo 1. Gerçek hayat BPS test problem özellikleri (Characteristics of real-life BSS test problems)

Kod	İstasyon sayısı	Bisiklet Sayısı
GHP1	43	42
GHP2	79	44
GHP3	98	51
GHP4	96	57
GHP5	118	63

Tablo 2. Test problemlerinin özellikleri (Characteristics of the test problems)

Problem Boyutu	İstasyon Sayısı Aralığı	Test Problemi Sayısı
Küçük	6 - 10	31
Orta	11 - 20	25
Büyük	22 - 40	22

Tablo 3. PZ-MM ve k-MMS sonuçları (Results of PZ-MM and k-MMS)

Problem Boyutu	N	Ölçütler	V=2		V=3		V=4	
			PZ-MM	k-MMs	PZ-MM	k-MMs	PZ-MM	k-MMs
Küçük	6-10	#Çözumsuz	0	0	0	0	0	0
		#OptÇözüm	29	29	30	30	29	29
		#UygÇözüm	2	2	1	1	2	2
		OrtSap%	2,12	0,07	2,00	0,13	1,98	0,36
		OrtSüre	593,80	327,18	491,79	444,86	459,93	422,73
Orta	11-20	#Çözumsuz	1	0	0	0	0	0
		#OptÇözüm	1	8	3	2	5	3
		#UygÇözüm	23	17	22	23	20	22
		OrtSap%	77,75	12,20	69,68	27,40	60,58	39,28
		OrtSüre	7034,06	5621,26	6535,25	6726,61	6080,34	6437,6
Büyük	22-40	#Çözumsuz	3	0	1	0	0	0
		#OptÇözüm	0	2	0	0	0	0
		#UygÇözüm	19	20	21	22	22	22
		OrtSap%	87,92	21,54	84,15	45,42	81,32	58,86
		OrtSüre	7200,00	6875,02	7200,00	7200,00	7200,00	7200,00

Her test problemi, uygun çözüm elde edilebilmesi amacıyla sistemdeki toplam e-bisiklet dengesizlik değeri pozitif olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu nedenle problem boyutuna göre üretilen test problemi sayısında farklılık ortaya çıkmıştır. Her test probleminde küçük ve büyük olmak üzere 2 farklı tipte dengeleme aracı kullanılmıştır. Küçük boyutlu aracın kapasitesi $Q_1 = 5$, büyük aracın kapasitesi $Q_2 = 10$ olarak alınmıştır. Her test problemine araçların batarya taşıma kapasitesi ve istasyonlardaki e-bisikletlerin batarya değiştirme talebi eklenmiştir.

Elektrikli mikromobilité araçlarının batarya tüketim davranışına ilişkin literatür, değişim ihtiyacının çoğunlukla düşük şarj durumu (%10–30) seviyelerinde ortaya çıktığını göstermektedir [54]. Bu nedenle istasyonlardaki batarya değiştirme talebini belirlemek amacıyla, her istasyondaki toplam e-bisiklet fazlası hesaplanmış ve bu toplamın %20'sinin batarya değişimi gerektirdiği varsayılmıştır. Toplam batarya değiştirme talebinin tahsis edileceği düğümler rastgele seçilmiştir. Her bir düğümdaki batarya değiştirme süresi (τ) 45 sn olarak alınmıştır. Araçların batarya taşıma kapasitesi araç tipine bakmaksızın 2 olarak alınmıştır. 78 test problemi verisine ilgili çalışmanın GitHub deposundan erişilebilir [55].

5.2. STYDP için Matematiksel Modelin Performans Analizi (Performance Analysis of the Mathematical Model for the STYDP)

Bölüm 3.2'de bahsedildiği gibi e-HSTYDP için matematiksel modelin geliştirilmesinde PZ-MM temel alınmıştır. PZ-MM, klasik bisikletlerin kullanıldığı sistemde homojen filolu STYDP için geliştirilmiştir. Toplam dengeleme süresini enazlamak için geliştirilen

PZ-MM'de Miller-Tucker-Zemlin alt-tur eliminasyon kısıtları kullanılmıştır. MMs ise e-bisikletlerin kullanıldığı sistemde heterojen filolu STYDP için geliştirilmiştir. Sıkı alt sınırların elde edilmesi amacıyla MMs'de akış tabanlı alt tur eliminasyon kısıtları kullanılmıştır. Bu akış tabanlı alt tur eliminasyon kısıtlarının MMs'nin performansı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. e-HSTYDP, STYDP'nin geliştirilmiş halidir. Dolayısıyla, $|K| = 1$ alınıp (8), (9) ve (18) numaralı kısıtlar modelden kaldırıldığında MMs, STYDP'nin çözümü için kullanılabilir. MMs'in bu versiyonu k-MMs olarak adlandırılmıştır. Deneysel çalışmada, k-MMs ve PZ-MM'nin performansı küçük, orta ve büyük boyutlu 78 test problemi üzerinde incelenmiştir. Tablo 3'te, araç sayısı $V = 2, 3$ ve 4 için karşılaştırma sonuçları verilmektedir.

Tablo 3'te ilk iki sütun problem boyutunu ve ilgili boyuttaki istasyon sayısını göstermektedir. Üçüncü sütunda matematiksel modelleri karşılaştırmak için kullanılan performans ölçütleri yer almaktadır. Performans ölçütlerinin tanımı aşağıda verilmektedir:

- #Çözumsuz : Tamsayılı çözüm bulunamayan test problem sayısı
- #OptÇözüm : En iyi çözümün bulunduğu test problem sayısı
- #UygÇözüm : 7200 sn içerisinde tamsayılı çözüm bulunabilen test problem sayısı
- OrtSap% : Tüm test problemleri için amaç fonksiyonu ve en iyi alt sınır arasındaki yüzde sapmanın ortalaması
- OrtSüre : Tüm test problemlerini çözmek için harcanan sürenin ortalaması

Tablo 3 incelendiğinde, küçük boyutlu problemlerde araç sayısına bakmaksızın her iki matematiksel model ile en az 29 test problemi için en iyi çözüme ulaşıldığı görülmektedir. Problem boyutu

büyüdükçe bulunan en iyi çözümün azaldığı ve büyük boyutlu problemlerde ise sadece k-MMs ile 2 test problemi için en iyi çözüme ulaşıldığı görülmektedir. Bunun yanı sıra PZ-MM, orta ve büyük boyutlu toplam 5 test problemi için tamsayı bir çözüm bulamazken k-MMs, bu problemler için de bir uygun çözüme ulaşmıştır. Ayrıca, tüm problem boyutları ve araç sayıları için k-MMs'in OrtSap% değerinin PZ-MM'ye göre çok daha düşük olduğu görülmektedir. Örneğin, $V = 2$ için küçük boyutlu problemlerde OrtSap% değeri k-MMs ve PZ-MM için sırasıyla 0,07 ve 2,12 iken orta boyutlu problemler için 12,20 ve 77,75, büyük boyutlu problemler için 21,54 ve 87,92 olduğu görülmektedir. Benzer durum $V = 3$ ve $V = 4$ için de geçerli olup, problemin zorluğundan dolayı problem boyutuna dayalı olarak OrtSap% değeri artmaktadır. OrtSüre açısından k-MMs ve PZ-MM karşılaştırıldığında, küçük boyutlu problemler için k-MMs'in nispeten daha az sürede çözüme ulaştığı görülmektedir. Ancak, problem boyutu arttıkça her iki matematiksel modelin çözüm için harcadığı süre artmaktadır. Tüm bu sonuçlar akış tabanlı alt tur eliminasyon kısıtlarının matematiksel modelin performansını çözüm kalitesi ve çözüm zamanı açısından iyileştirdiğini göstermektedir.

5.3. e-HSTYDP için Çözüm Yaklaşımlarının Performans Analizi (Performance Analysis of Solution Approaches for the e-HSTYDP)

Bu bölümde, e-HSTYDP için geliştirilen matematiksel modelin (MM) ve s-CWT algoritmasının performans analizi iki farklı amaç fonksiyonu için ayrı ayrı incelenecektir. Bölüm 3.2'de belirtildiği gibi toplam dengeleme süresinin enazlanması amacı için kullanılan model

MMs olarak kodlanırken, toplam maliyetin enazlanması için kullanılan model MMm olarak kodlanmıştır. Makalenin kalan kısmında bu kodlamalar kullanılarak analizler gerçekleştirilecektir.

5.3.1. Toplam yeniden dengeleme süresinin enazlanması amacı için sayısal analizler (Numerical analyses for the minimization of total rebalancing time)

Tablo 4 - Tablo 6'da MMs ve s-CWT için sırasıyla küçük, orta ve büyük boyutlu problemlere ilişkin sonuçlar verilmektedir. Tablo 4 - Tablo 6'da ilk sütun test probleminin üretildiği gerçek hayat probleminin kodunu göstermektedir. Tablo 1'den görüldüğü gibi "GHP1", 43 istasyona ve 42 e-bisiklete sahip birinci gerçek hayat problemini tanımlamaktadır. Tablo 4 - Tablo 6'da ikinci sütun problemdeki istasyon sayısını vermektedir. Sonraki 3 sütun MMs için sonuçları göstermektedir. "TDS" sütunu 2 saatlik süre içerisinde MMs ile bulunan en iyi / uygun çözümün amaç fonksiyonu değerini yani toplam dengeleme süresini vermektedir. "Süre" sütununda MMs ile çözüme ulaşma zamanı (sn) verilmektedir. " Δ_{opt} " sütununda ise MMs ile 2 saatte bulunan çözümün amaç fonksiyonu değeri (Z^*) ve alt sınır (Z^{AS}) arasındaki sapma oranı verilmektedir. Bu oran $\Delta_{opt} = ((Z^* - Z^{AS})/Z^{AS})$ formülasyonu ile hesaplanmaktadır. Test problemleri için iki amaç fonksiyonu arasındaki etkileşimin incelenmesi önemlidir. Bu nedenle, "TMs" sütununda toplam dengeleme süresini enazlamak için bulunan en iyi / uygun çözümün toplam maliyeti verilmektedir. "Sıralama" sütununda ise her test problemi için amaç fonksiyonu açısından hangi yöntemin daha iyi performans gösterdiği

Tablo 4. Küçük boyutlu test problemleri için MMs ve s-CWT algoritması sonuçları
(Results of the MMs and s-CWT algorithms for small-sized test problems)

Test Problemi		MMs				s-CWT			Sıralama
Kod	M	TDS	Süre (sn)	Δ_{opt}	TM _s	TDS	Süre (sn)	Δ_{GF}	
GHP1-1	6	2390	6,49	0,00	8814	6813	4,07	1,85	1-2
GHP1-2	6	1776	2689,25	0,00	22163	4618	6,41	1,60	1-2
GHP3	6	1293	9,58	0,00	19687	4770	6,03	2,69	1-2
GHP4-1	6	1767	0,36	0,00	5970	2723	0,22	0,54	1-2
GHP4-2	6	2315	3,92	0,00	22728	4829	0,84	1,09	1-2
GHP1-1	7	2663	1,26	0,00	9905	4605	0,82	0,73	1-2
GHP1-2	7	2759	2,71	0,00	31320	5715	1,58	1,07	1-2
GHP2	7	1955	12,25	0,00	7558	3818	2,57	0,95	1-2
GHP1	8	2497	16,44	0,00	9000	3816	4,34	0,53	1-2
GHP2	8	2431	9,48	0,00	8930	10314	14,37	3,24	1-2
GHP3-1	8	2136	2,60	0,00	8042	3563	2,39	0,67	1-2
GHP3-2	8	1351	3,12	0,00	17011	3414	1,05	1,53	1-2
GHP3-3	8	476	1,65	0,00	12575	1010	1,74	1,12	1-2
GHP4	8	2463	5,18	0,00	8845	4130	0,80	0,68	1-2
GHP5	8	626	1,94	0,00	14083	1293	0,77	1,06	1-2
GHP1	9	2923	7200,00	0,53	32664	3098	18,23	0,06	1-2
GHP3-1	9	2410	3,88	0,00	9007	4467	2,30	0,85	1-2
GHP3-2	9	1684	22,43	0,00	23057	3578	8,36	1,13	1-2
GHP2-1	10	1221	118,79	0,00	17383	1954	2,94	0,60	1-2
GHP2-2	10	2207	129,97	0,00	25145	4539	11,61	1,06	1-2
GHP2-3	10	854	22,08	0,00	15207	2045	8,12	1,40	1-2
GHP2-4	10	745	219,77	0,00	14917	1903	5,55	1,55	1-2
GHP3	10	2059	118,44	0,00	7676	2914	6,04	0,41	1-2
GHP4-1	10	2120	22,57	0,00	27130	3906	1,33	0,84	1-2
GHP4-2	10	1159	5,67	0,00	16683	1616	0,97	0,39	1-2
GHP4-3	10	1573	13,28	0,00	21037	3717	1,25	1,36	1-2
GHP5-1	10	2398	14,08	0,00	22999	5240	1,75	1,19	1-2
GHP5-2	10	1514	633,93	0,00	16148	2648	1,10	0,75	1-2
GHP5-3	10	1527	289,44	0,00	18878	2122	1,00	0,39	1-2
GHP5-4	10	2231	2976,95	0,00	26134	6153	1,89	1,76	1-2
GHP5-5	10	1681	7200,00	0,16	21722	6062	6,53	2,61	1-2
Ortalama			701,86	0,02			4,10	1,15	

belirtilmektedir. Bu sütunda, ilgili problemde daha iyi performans gösteren yöntem "1", diğeri ise "2" ile ifade edilmiştir. Örneğin, MMs yöntemi ile elde edilen çözümün TDS değeri s-CWT ile elde edilenden daha küçük ise ilgili satırda 1-2 kodlaması kullanılmıştır.

Tablo 4 incelendiğinde, küçük boyutlu 29 test probleminde MMs ile en iyi çözüme ulaşıırken, 9 ve 10 istasyonlu 2 test probleminde sadece uygun çözümün elde edildiği görülmektedir. Uygun çözümler için Δ_{opt} değerleri sırasıyla 0,53 ve 0,16 olup tüm test problemleri için ortalama çözüm süresi 4,10 sn'dir. Tablo 5 incelendiğinde MMs, 11, 12 ve 16 istasyonlu orta boyutlu 3 test probleminde en iyi çözüme ulaşıldığı görülmektedir. Uygun çözümün elde edilebildiği 22 test probleminde Δ_{opt} değeri 0,08 ile 0,92 arasında değişmekte olup ortalaması 0,41'dir. MMs'in ortalama çözüm zamanı 6439,55 sn olup küçük boyutlu test problemlerine kıyasla büyük artış göstermiştir. Bu artışın en önemli sebebi e-HSTYDP'nin NP-zor problemler sınıfında yer almasıdır. Benzer şekilde MMs'in büyük boyutlu test problemleri (Tablo 6) için ortalama çözüm zamanı 7200 sn olup, bu süre içerisinde tüm test problemleri için sadece uygun çözümlere ulaşabilmiştir. Büyük boyutlu 22 test probleminde Δ_{opt} değeri 0,09 ile 0,99 arasında olup ortalaması 0,79'dur. Problem boyutuna bağlı olarak ortalama Δ_{opt} değerindeki artış da problem zorluğunun bir göstergesidir. NP-zor problemler sınıfında yer alan e-HSTYDP, bir operasyonel problem olduğu için kısa sürelerde çözümlerin üretilmesi önem taşımaktadır. Bu durumda, makul sürelerde çözümün elde edilebileceği sezgisel algoritmalara ihtiyaç vardır.

Tablo 4-Tablo 6'dan s-CWT algoritması ile çok daha kısa sürelerde çözümlere ulaşıldığı görülmektedir. Küçük boyutlu problemlerde ortalama süre 4,10 sn iken, orta ve büyük boyutlu problemler için 21,13 sn ve 118,31'dir. Özellikle orta ve büyük boyutlu problemlerde MMs'in çözüm süreleri (sırasıyla 6439,55 sn ve 7200 sn) dikkate

alındığında, s-CWT algoritması ile bu problemlere çok hızlı çözüm üretildiği görülmektedir. Ortalama Δ_{GF} değeri küçük ve orta boyutlu problemler için birbirine çok yakın olup sırasıyla 1,15 ve 1,25 iken büyük boyutlu problemler için 0,75'e düşmektedir. Bu değer, büyük boyutlu problemlerde s-CWT algoritmasının MMs'in bulunduğu üst sınırlara çok daha yakın çözümleri çok kısa sürelerde üretebildiğinin göstergesidir. Ayrıca, Tablo 6'dan görüldüğü gibi s-CWT algoritması 2 problem için MMs ile bulunan üst sınırı iyileştirmiştir. Bu problemler negatif Δ_{GF} değerine sahip olan 25 ve 37 istasyonlu test problemleridir.

Ayrıca, TDS ve çözüm zamanı açısından MMs ve s-CWT arasında istatistiksel anlamlı bir farklılığın olup olmadığı incelenmiştir. Küçük, orta ve büyük boyutlu test problemlerinde her iki performans ölçütü için ayrı ayrı yapılan analizlerde normallik varsayımı geçerli olmadığı için istatistiksel analiz yöntemi olarak Wilcoxon işaretlenmiş-sıra sayıları testi kullanılmıştır. Performans ölçütü TDS alındığında $H_1: M_{MMs}^{TDS} < M_{s-CWT}^{TDS}$ alternatif hipotezi kurulmuş ve $\alpha = 0,05$ anlamlılık seviyesinde hipotez test edilmiştir. İstatistiksel analizlerde küçük, orta ve büyük problem boyutu için $p < 0,001$ olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, her üç problem boyutunda MMs ile elde edilen çözümlerin TDS değerlerinin medyanının s-CWT ile elde edilenlerin medyanına göre çok daha küçük olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, çözüm kalitesi açısından MMs s-CWT'ye göre daha iyi bir performans sahiptir. Performans ölçütü çözüm süresi alındığında ise $H_1: M_{s-CWT}^{Süre} < M_{MMs}^{Süre}$ alternatif hipotezi kurulmuş ve $\alpha = 0,05$ anlamlılık seviyesinde hipotez test edilmiştir. İstatistiksel analizlerde her üç problem boyutu için $p < 0,001$ olarak elde edilmiş olup, bu sonuçlar küçük, orta ve büyük problem boyutu için de s-CWT'nin çözüm süresinin medyanının MMs'nin çözüm süresinin medyanından küçük olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, çözüm süresi açısından s-CWT'nin MMs göre çok daha hızlı bir çözüm yaklaşımı olduğu söylenebilir.

Tablo 5. Orta boyutlu test problemleri için MMs ve s-CWT algoritması sonuçları
(Results of the MMs and s-CWT algorithms for medium-sized test problems)

Test Problemi		MMs				s-CWT			Sıralama
Kod	N	TDS	Süre (sn)	Δ_{opt}	TM _s	TDS	Süre (sn)	Δ_{GF}	
GHP2	11	1594	1872,10	0,00	21473	4813	20,62	2,02	1-2
GHP5	11	2648	7200,00	0,73	23673	5222	3,84	0,97	1-2
GHP3	12	883	280,98	0,00	15830	1854	3,81	1,10	1-2
GHP5	12	3059	7200,00	0,08	27942	4718	3,28	0,54	1-2
GHP1	13	1904	7200,00	0,10	23121	3105	5,58	0,63	1-2
GHP3-1	14	1742	7200,00	0,14	22482	3336	18,88	0,92	1-2
GHP3-2	14	1883	7200,00	0,72	19100	7230	61,60	2,84	1-2
GHP4	14	3513	7200,00	0,03	37548	5045	3,48	0,44	1-2
GHP4-1	16	1907	7200,00	0,65	23767	3534	6,09	0,85	1-2
GHP4-2	16	2629	435,68	0,00	23018	4208	11,84	0,60	1-2
GHP1-1	17	4191	7200,00	0,86	36782	9582	47,49	1,29	1-2
GHP1-2	17	4396	7200,00	0,92	42255	12035	85,23	1,74	1-2
GHP2-1	17	2028	7200,00	0,75	21731	4490	31,63	1,21	1-2
GHP2-2	17	1387	7200,00	0,73	18995	3094	32,52	1,23	1-2
GHP3	17	2102	7200,00	0,20	24859	3230	30,37	0,54	1-2
GHP2-1	18	3098	7200,00	0,04	34538	6104	20,03	0,97	1-2
GHP2-2	18	2845	7200,00	0,04	32052	12086	49,84	3,25	1-2
GHP5	18	2162	7200,00	0,48	26770	4286	6,80	0,98	1-2
GHP4	19	2800	7200,00	0,82	29746	6082	11,18	1,17	1-2
GHP5	19	2375	7200,00	0,65	27488	5301	7,91	1,23	1-2
GHP4-1	20	2773	7200,00	0,28	28493	5550	13,09	1,00	1-2
GHP4-2	20	2179	7200,00	0,20	25448	6730	8,72	2,09	1-2
GHP4-3	20	2413	7200,00	0,78	26629	5293	11,82	1,19	1-2
GHP5-1	20	2607	7200,00	0,21	32148	4672	11,24	0,79	1-2
GHP5-2	20	2719	7200,00	0,83	23120	7453	21,31	1,74	1-2
Ortalama			6439,55	0,41			21,13	1,25	

Tablo 6. Büyük boyutlu test problemleri için MMs ve s-CWT algoritması sonuçları
(Results of the MMs and s-CWT algorithms for large-sized test problems)

Test Problemi		MMs				s-CWT			Sıralama
Kod	N	TDS	Süre (sn)	Δ_{opt}	TM _s	TDS	Süre (sn)	Δ_{GF}	
GHP2	22	2983	7200,00	0,09	29932	7229	110,96	1,42	1-2
GHP5	22	2837	7200,00	0,21	30609	4322	22,11	0,52	1-2
GHP3	23	3580	7200,00	0,68	11004	6032	152,34	0,68	1-2
GHP2	24	2728	7200,00	0,65	31090	7179	42,91	1,63	1-2
GHP3	24	2905	7200,00	0,84	39434	6333	90,76	1,18	1-2
GHP5	24	2622	7200,00	0,80	27699	5872	46,13	1,24	1-2
GHP1	25	39293	7200,00	0,99	163320	13534	532,77	-0,66	2-1
GHP5	25	2441	7200,00	0,91	27868	5912	54,06	1,42	1-2
GHP3-1	26	2718	7200,00	0,52	29761	4653	36,83	0,71	1-2
GHP3-2	26	3972	7200,00	0,91	33646	6130	169,34	0,54	1-2
GHP4	26	3538	7200,00	0,79	41282	6416	51,29	0,81	1-2
GHP5	26	3012	7200,00	0,73	23729	9022	118,80	2,00	1-2
GHP3-1	27	3399	7200,00	0,92	23045	8962	109,92	1,64	1-2
GHP3-2	27	4135	7200,00	0,93	62927	4498	204,28	0,09	1-2
GHP4	30	3105	7200,00	0,89	30793	6462	35,84	1,08	1-2
GHP5-1	30	3639	7200,00	0,85	38888	6494	55,57	0,78	1-2
GHP5-2	30	3384	7200,00	0,91	26561	4638	68,33	0,37	1-2
GHP5	34	4416	7200,00	0,94	20995	6832	86,86	0,55	1-2
GHP4	36	4745	7200,00	0,94	48051	5555	130,46	0,17	1-2
GHP3	37	12088	7200,00	0,98	94063	3946	259,99	-0,67	2-1
GHP5	39	4703	7200,00	0,94	46611	5456	87,77	0,16	1-2
GHP4	40	4682	7200,00	0,93	13218	8226	135,39	0,76	1-2
Ortalama			7200,00	0,79			118,31	0,75	

Tablo 7. Küçük boyutlu test problemleri için MMm ve s-CWT algoritması sonuçları
(Results of the MMm and s-CWT algorithms for small-sized test problems)

Test Problemi		MMm				s-CWT			Sıralama
Kod	N	TM	Süre (sn)	Δ_{opt}	TDS _m	TM	Süre (sn)	Δ_{GF}	
GHP1-1	6	8814	1,33	0,00	2435	49179	4,30	4,58	1-2
GHP1-2	6	17789	74,29	0,00	2235	35577	6,57	1,00	1-2
GHP3	6	5777	0,33	0,00	1432	33872	2,84	4,86	1-2
GHP4-1	6	4796	0,05	0,00	2646	5254	0,31	0,10	1-2
GHP4-2	6	5464	1,41	0,00	3268	8439	1,04	0,54	1-2
GHP1-1	7	5777	0,10	0,00	3339	8100	0,83	0,40	1-2
GHP1-2	7	5249	0,16	0,00	3036	9779	1,64	0,86	1-2
GHP2	7	4012	0,55	0,00	2308	6909	2,90	0,72	1-2
GHP1	8	6817	2,06	0,00	4297	6907	4,76	0,01	1-2
GHP2	8	4557	0,86	0,00	2713	16734	14,83	2,67	1-2
GHP3-1	8	4470	0,10	0,00	2520	6524	1,38	0,46	1-2
GHP3-2	8	4659	0,21	0,00	2645	6299	1,21	0,35	1-2
GHP3-3	8	1992	0,10	0,00	882	2662	4,26	0,34	1-2
GHP4	8	4893	0,11	0,00	2800	7381	1,00	0,51	1-2
GHP5	8	2456	0,15	0,00	1189	3090	1,56	0,26	1-2
GHP1	9	9409	38,81	0,00	3595	11197	18,99	0,19	1-2
GHP3-1	9	4574	0,11	0,00	2634	7892	1,78	0,73	1-2
GHP3-2	9	4656	0,32	0,00	2869	6546	4,18	0,41	1-2
GHP2-1	10	3463	0,46	0,00	1945	4090	2,14	0,18	1-2
GHP2-2	10	4859	0,23	0,00	2868	8001	2,68	0,65	1-2
GHP2-3	10	2882	0,81	0,00	1561	4228	3,78	0,47	1-2
GHP2-4	10	3586	0,88	0,00	1184	18319	3,50	4,11	1-2
GHP3	10	5097	0,37	0,00	3025	5542	1,94	0,09	1-2
GHP4-1	10	4450	0,23	0,00	2598	7042	1,81	0,58	1-2
GHP4-2	10	3282	0,24	0,00	1825	3579	1,20	0,09	1-2
GHP4-3	10	4746	0,12	0,00	2793	6757	1,62	0,42	1-2
GHP5-1	10	5450	0,29	0,00	3258	9061	5,31	0,66	1-2
GHP5-2	10	3475	0,33	0,00	1953	5140	1,86	0,48	1-2
GHP5-3	10	3908	0,29	0,00	2239	4344	1,96	0,11	1-2
GHP5-4	10	6079	0,80	0,00	2892	41371	2,70	5,81	1-2
GHP5-5	10	3947	1,11	0,00	2445	10304	19,00	1,61	1-2
Ortalama			4,10	0,00			4,00	1,10	

Tablo 8. Orta boyutlu test problemleri için MMm ve s-CWT algoritması sonuçları
(Results of the MMm and s-CWT algorithms for medium-sized test problems)

Test Problemi		MMm				s-CWT			Sıralama
Kod	M	TM	Süre (sn)	Δ_{opt}	TDS _m	TM	Süre (sn)	Δ_{GF}	
GHP2	11	4356	2,74	0,00	2715	8414	12,39	0,93	1-2
GHP5	11	5571	2,11	0,00	3518	9034	10,31	0,62	1-2
GHP3	12	3066	0,22	0,00	1772	3940	3,98	0,28	1-2
GHP5	12	5873	0,63	0,00	3628	8272	8,12	0,41	1-2
GHP1	13	7582	9,64	0,00	3735	28721	5,90	2,79	1-2
GHP3-1	14	4695	2,09	0,00	2984	6181	6,70	0,32	1-2
GHP3-2	14	6490	7200,00	0,04	3645	14365	64,74	1,21	1-2
GHP4	14	6735	0,60	0,00	4288	8765	4,18	0,30	1-2
GHP4-1	16	4467	1,01	0,00	2879	6481	6,96	0,45	1-2
GHP4-2	16	9852	5,89	0,00	3689	12603	13,81	0,28	1-2
GHP1-1	17	11062	7200,00	0,06	5215	20889	47,45	0,89	1-2
GHP1-2	17	10704	7200,00	0,05	3991	25229	87,59	1,36	1-2
GHP2-1	17	4639	2,26	0,00	3172	7926	22,96	0,71	1-2
GHP2-2	17	4920	8,62	0,00	2050	7596	31,14	0,54	1-2
GHP3	17	7732	39,48	0,00	2917	11156	17,03	0,44	1-2
GHP2-1	18	6636	1,77	0,00	4402	10367	27,92	0,56	1-2
GHP2-2	18	5145	3,56	0,00	3552	19416	54,52	2,77	1-2
GHP5	18	5675	3,12	0,00	3767	7618	9,67	0,34	1-2
GHP4	19	5832	14,52	0,00	3961	10333	11,80	0,77	1-2
GHP5	19	5682	7,96	0,00	3862	9152	10,84	0,61	1-2
GHP4-1	20	9092	25,02	0,00	3256	15011	14,67	0,65	1-2
GHP4-2	20	6592	9,95	0,00	4464	11314	9,83	0,72	1-2
GHP4-3	20	7091	1,95	0,00	4793	9140	11,58	0,29	1-2
GHP5-1	20	6960	1,59	0,00	3156	10411	17,92	0,50	1-2
GHP5-2	20	7427	12,77	0,00	3550	48422	22,84	5,52	1-2
Ortalama			870,30	0,01			21,39	0,97	

Tablo 9. Büyük boyutlu test problemleri için MMm ve s-CWT algoritması sonuçları
(Results of the MMm and s-CWT algorithms for large-sized test problems)

Test Problemi		MMm				s-CWT			Sıralama
Kod	M	TM	Süre (sn)	Δ_{opt}	TDS _m	TM	Süre (sn)	Δ_{GF}	
GHP2	22	8668	12,45	0,00	3903	21376	61,62	1,47	1-2
GHP5	22	9830	53,10	0,00	3907	12199	18,28	0,24	1-2
GHP3	23	8724	14,12	0,00	3845	16289	197,36	0,87	1-2
GHP2	24	9440	23,33	0,00	4890	17122	25,25	0,81	1-2
GHP3	24	9019	494,67	0,00	3331	20076	119,62	1,23	1-2
GHP5	24	6764	108,07	0,00	3928	10016	63,38	0,48	1-2
GHP1	25	236742	7200,00	0,87	38308	47809	528,19	-0,80	2-1
GHP5	25	6827	101,05	0,00	3413	11921	58,33	0,75	1-2
GHP3-1	26	8175	45,34	0,00	4118	12187	42,86	0,49	1-2
GHP3-2	26	8920	246,30	0,00	3896	16715	140,81	0,87	1-2
GHP4	26	9883	174,96	0,00	4108	14675	51,05	0,48	1-2
GHP5	26	9620	633,01	0,00	5524	16659	116,75	0,73	1-2
GHP3-1	27	10517	7200,00	0,03	5417	24336	108,42	1,31	1-2
GHP3-2	27	29356	7200,00	0,03	3712	44494	160,04	0,52	1-2
GHP4	30	9494	84,23	0,00	4671	14191	35,93	0,49	1-2
GHP5-1	30	10249	7,03	0,00	4525	16069	60,76	0,57	1-2
GHP5-2	30	9898	4451,45	0,00	3330	12993	71,80	0,31	1-2
GHP5	34	19033	161,85	0,00	4601	25591	117,83	0,34	1-2
GHP4	36	25523	7200,00	0,01	4740	26830	160,47	0,05	1-2
GHP3	37	19172	7200,00	0,05	5495	25819	227,47	0,35	1-2
GHP5	39	23326	165,88	0,00	4494	23340	119,31	0,00	1-2
GHP4	40	11720	161,94	0,00	4825	20885	183,54	0,78	1-2
Ortalama			1951,76	0,05			121,32	0,56	

5.3.2. Toplam maliyetin enazlanması amacı için sayısal analizler (Numerical analyses for the minimization of total cost)

e-HSTYDP’de toplam maliyetin (taşıma ve araç satın alma / kiralama maliyeti) enazlanması amacı dikkate alındığında MMm ve s-CWT ile elde edilen sonuçlar Tablo 7-Tablo 9’da verilmektedir. Bu tablolarda “TM” ve “TDS_m” sütunları haricindeki diğer sütunların tanımları da Tablo 4-Tablo 6 için verilen tanımlamalar ile aynıdır. “TM” sütunu, ilgili çözüm yaklaşımı ile elde edilen çözümün amaç fonksiyonu

değerini yani toplam maliyetini, “TDS_m” sütunu ise ilgili çözümün toplam dengeleme süresini göstermektedir. TDS_m değeri, maliyet enazlandığında elde edilen planın operasyonel süre açısından performansını göstermekte ve yöntemin çok amaçlı davranışının analiz edilmesini mümkün kılmaktadır.

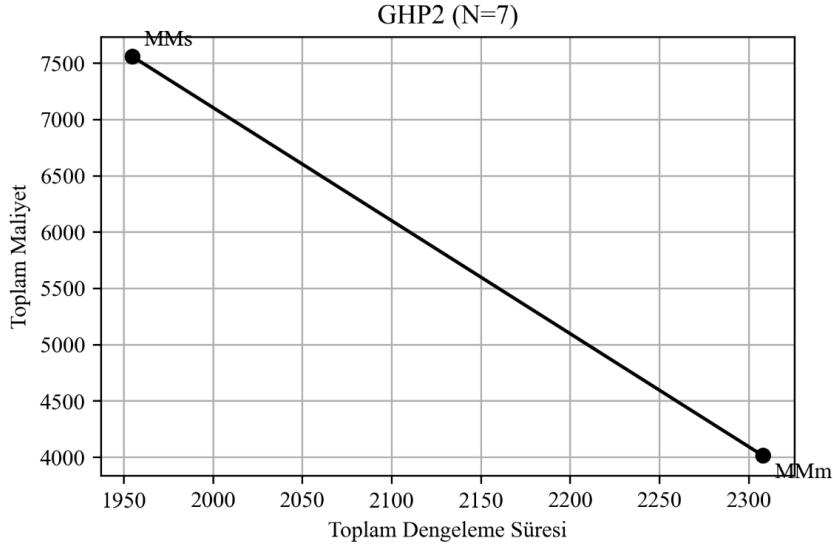
Tablo 7-Tablo 9 incelediğinde MMm’nin MMs’e göre hem elde edilen en iyi çözüm sayısı hem de çözüm süresi açısından çok daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Küçük boyutlu 31 test

probleminin tümünde en iyi çözüm elde edilirken, orta ve büyük boyutlu sırasıyla 22 ve 17 test probleminde en iyi çözüme ulaşıldığı görülmektedir. Orta ve büyük boyutlu problemler için ortalama Δ_{opt} değerleri sırasıyla 0,01 ve 0,05'tir. MMm'nin küçük, orta ve büyük problemler için ortalama çözüm süreleri ise sırasıyla 4,10 sn, 870,30 sn ve 1951,76 sn'dir. e-HSTYDP, NP-zor problemler sınıfında yer aldığı için orta ve büyük boyutlu problemlerde ortalama çözüm zamanı hızlı yükseliş göstermiştir. Tablo 8 incelendiğinde istasyon sayısının 11 ile 20 arasında değiştiği orta boyutlu problemlerde 14 ve

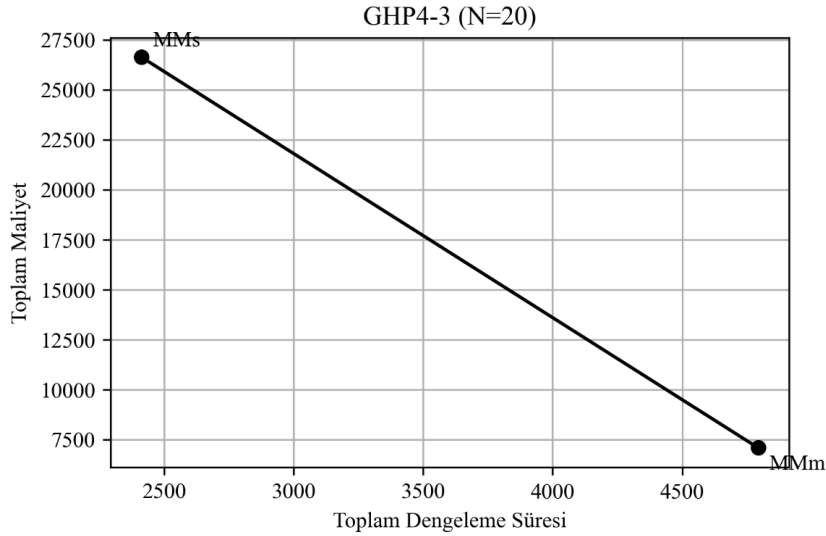
17 istasyonlu 3 test probleminde en iyi çözüme ulaşamadığı görülmektedir. Bu test problemleri için Δ_{opt} değeri 0,04, 0,05 ve 0,06'dır. Benzer durum istasyon sayısının 22 ile 40 arasında değiştiği büyük boyutlu problemler için de geçerlidir. Tablo 9'dan görüldüğü gibi 25, 27, 36 ve 37 istasyona sahip 5 test probleminde en iyi çözüme ulaşamamıştır. Bu problemler için Δ_{opt} değeri ise 0,01 ile 0,87 arasında değişmektedir. Bu durum problem boyutunun yanı sıra parametrelerinin de problemin zorluğunda etkili olduğunun bir göstergesidir.

Tablo 10. Farklı boyutta test problemleri için Pareto cephe uç değerleri
(Extreme values of Pareto front for different size test problems)

Problem Boyutu	Test Problemi		MMs		MMm	
	Kod	N	TDS	TM _s	TM	TDS _m
Küçük	GHP2	7	1955	7558	4012	2308
Orta	GHP4-3	20	2413	26629	7091	4793
Büyük	GHP4	26	3538	41282	9883	4108



Şekil 5. GHP2 ($|N| = 7$) test problemi için toplam dengeleme süresi-toplam maliyet ödünleşim grafiği
(Trade-off between total rebalancing time and total cost for the GHP2 ($|N| = 7$) test problem)



Şekil 6. GHP4-3 ($|N| = 20$) test problemi için toplam dengeleme süresi-toplam maliyet ödünleşim grafiği
(Trade-off between total rebalancing time and total cost for the GHP4-3 ($|N| = 20$) test problem)

Tablo 7-Tablo 9'da s-CWT algoritması ile elde edilen çözümler ve çözüm zamanları incelendiğinde, s-CWT algoritması ile çok daha kısa sürelerde çözümlere ulaşıldığı görülmektedir. Sezgisel algoritmanın küçük boyutlu problemler için harcadığı ortalama süre 4,00 sn iken, orta ve büyük boyutlu problemler için sırasıyla 21,39 sn ve 121,32 sn'dir. Bu süreler, toplam dengeleme süresinin enazlanmaya çalışıldığı e-HSTYDP için harcanan sürelerle çok benzerdir. Bu durum, problemde yapılan amaç fonksiyonu ya da kısıt değişikliğinin sezgisel algoritmanın çözüm zamanı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Ancak, aynı sonuç matematiksel model için geçerli değildir. Problemin amaç fonksiyonu ve / veya kısıtlarında yapılan değişiklik matematiksel modelin çözüm kalitesi ve çözüm zamanı üzerinde etkili olabilmektedir. S-CWT algoritması ile elde edilen çözümlerin kalitesinin değerlendirilmesi amacıyla Δ_{GF} değerleri incelenebilir. Küçük boyutlu problemlerde ortalama Δ_{GF} değeri 1,10 iken orta ve büyük boyutlu problemler için bu değerler sırasıyla 0,97 ve 0,56'dır. Dolayısıyla, problem boyutu arttıkça s-CWT algoritması ile MMm'nin bulunduğu üst sınıra daha yakın çözümler elde edilebilmektedir. Tablo 8'deki Δ_{GF} değerleri incelendiğinde, s-CWT'nin değerlerinin MMm'ye kıyasla 0,28 ile 5,52 arasında değiştiği görülmektedir. Bu durum, s-CWT'nin hız avantajının çözüm kalitesi açısından ciddi maliyet farklarıyla sonuçlanabileceğini göstermekte; MMm'nin özellikle maliyet odaklı problemlerde daha tutarlı ve güvenilir çözümler sunduğunu desteklemektedir. Tablo 9'dan görüldüğü gibi, s-CWT algoritması 25 istasyonlu bir problemde MMm ile bulunan üst sınırı iyileştirmiştir. Bu problem için $\Delta_{GF} = -0,08$ 'dir.

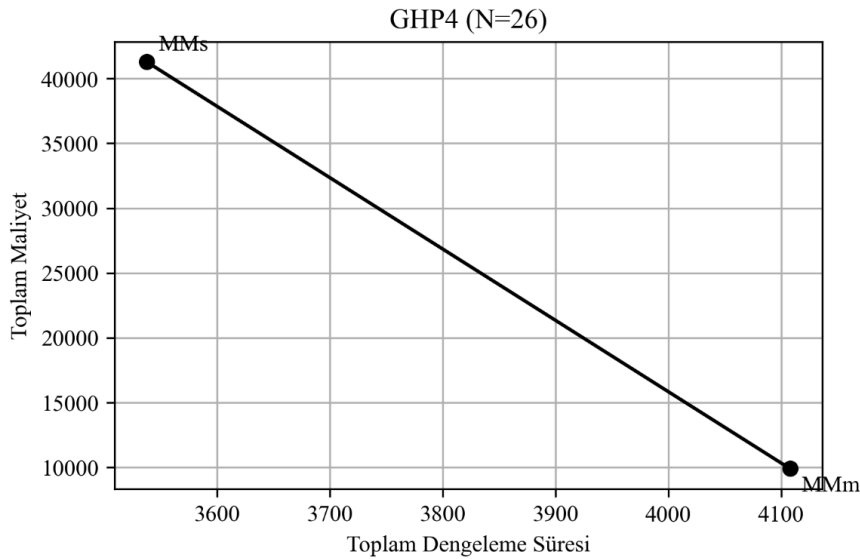
MMm ve s-CWT arasında TM ve çözüm süresi açısından istatistiksel anlamlı bir farklılığın olup olmadığı da incelenmiştir. Küçük, orta ve büyük boyutlu test problemleri için ayrı ayrı yapılan incelemelerde hem TM hem de çözüm süresi için normallik varsayımının geçerli olmadığı görülmüştür. Bu nedenle istatistiksel analiz yöntemi olarak Wilcoxon işaretlenmiş-sıra sayıları testi kullanılmıştır. Performans ölçütü olarak TM dikkate alındığında $H_1: M_{MMs}^{TM} < M_{s-CWT}^{TM}$ alternatif hipotezi kurulmuş ve $\alpha = 0,05$ anlamlılık seviyesinde hipotez test edilmiştir. İstatistiksel analizlerde küçük, orta ve büyük problem boyutu için $p < 0,001$ olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, küçük, orta ve büyük boyutlu problemler için MMm ile elde edilen çözümlerin TM değerinin s-CWT ile elde edilenlere göre daha küçük olduğunu

göstermektedir. Performans ölçütü çözüm süresi alındığında ise $H_1: M_{s-CWT}^{Süre} < M_{MMs}^{Süre}$ alternatif hipotezi kurulmuş ve $\alpha = 0,05$ anlamlılık seviyesinde hipotez test edilmiştir. İstatistiksel analizlerde her üç problem boyutu için $p < 0,001$ olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar ise s-CWT'nin çözüm süresinin medyanının MMm'nin çözüm süresinin medyanından daha küçük olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, istatistiksel analizler ile MMm ve s-CWT arasında çözüm kalitesi ve çözüm zamanı açısından bir ödünleşim olduğu görülmektedir. Yani, s-CWT'nin MMm'ye göre önemli bir hız avantajı bulunmasına rağmen bu hız, çözüm kalitesinin azalmasına sebep olabilmektedir. Benzer şekilde MMm, s-CWT'ye göre çok daha kaliteli çözümleri çok daha uzun sürelerde üretebilmektedir. Tablo 8, orta boyutlu problemlerde iki yöntem arasındaki temel ödünleşimi açık şekilde ortaya koymaktadır. MMm daha yavaş fakat yüksek kaliteli çözümler üretirken, s-CWT daha hızlı fakat belirgin şekilde daha maliyetli çözümler üretmektedir.

Sonuç olarak, bu bölümde yapılan analizler küçük boyutlu e-HSTYDP için matematiksel model ile en iyi ya da en iyiye yakın çözümlerin çok kısa sürede elde edilebildiğini göstermektedir. Orta ve büyük boyutlu e-HSTYDP için matematiksel model ile çözüm zamanının çok hızlı artış göstermesi ise e-HSTYDP'nin NP-zor problemler sınıfında yer almasından kaynaklanmaktadır. e-HSTYDP, operasyonel bir problem olduğu için orta ve büyük boyutlu problemlere makul zamanlarda çözüm üretebilmek amacıyla s-CWT algoritması kullanılabilir.

5.4. e-HSTYDP'de İki Amaç için Ödünleşim Analizi (Trade-off Analysis of Two Objectives in the e-HSTYDP)

Bölüm 3'te görüldüğü gibi e-HSTYDP'nin çözümünde iki farklı amaç için matematiksel modeller verilmiştir. Operasyonel bir problem olan e-HSTYDP için dengelemenin hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi önemlidir. Bu nedenle, ilk amaç olarak toplam dengeleme süresinin (TDS) enazlanması dikkate alınmıştır. Dengelemenin en az maliyetle gerçekleştirilmesi ise işletme yönetimi açısından önemlidir. Bu nedenle, ikinci amaç olarak da toplam maliyet (TM) ele alınmıştır. Bölüm 5.3, her iki amacın ayrı ayrı dikkate alındığı durumlar için matematiksel modellerin ve s-CWT'nin performans analizlerini vermektedir. Bunun yanı sıra, karar vericiler için TDS ve TM



Şekil 7. GHP4 (N= 26) test problemi için toplam dengeleme süresi–toplam maliyet ödünleşim grafiği
(Trade-off between total rebalancing time and total cost for the GHP4 (N= 26) test problem)

arasındaki ödünleşimin incelenmesi de önemlidir. Bu amaçla kullanılan en önemli yaklaşım Pareto cephenin yani baskın olmayan çözümlerin kümesinin elde edilmesidir. Dolayısıyla, tek amaçlı olarak tasarlanan MMs ve MMm modelleri ile her bir problem için Pareto cephenin en uç noktalarındaki çözümler elde edilmektedir. Küçük, orta ve büyük boyutlu problemler için Tablo 4 – 6’da verilen TDS ve TMs ve Tablo 7 – 9’da verilen TM ve TDSm değerleri her bir problem için Pareto cephenin uç noktalarını vermektedir. Seçilen küçük, orta ve büyük boyutlu üç problem için Pareto cephenin uç noktaları Tablo 10 ve Şekil 5 - Şekil 7’de verilmektedir.

Tablo 10 ve Şekil 5 - Şekil 7 incelendiğinde TDS ve TM arasında ödünleşim olduğu görülmektedir. MMs her problem boyutu için daha düşük dengeleme süresi üretirken maliyet açısından daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Buna karşılık MMm daha düşük maliyet sağlamakla birlikte dengeleme süresinde belirgin bir artışa yol açmaktadır. Problem boyutu büyüdükçe bu ödünleşim daha da belirginleşmekte, özellikle büyük boyutlu problemlerde süre–maliyet ilişkisi karar vericiler açısından daha kritik bir duruma gelmektedir.

6. Sonuçlar (Conclusion)

Bu çalışmada, batarya değişiminin söz konusu olduğu elektrikli bisiklet paylaşım sisteminde heterojen filolu statik tam yeniden dengeleme problemi (e-HSTYDP) ele alınmıştır. e-HSTYDP, belirlenen amacı eniyileyecek şekilde sistemdeki e-bisikletlerin yeniden dağıtılmasında kullanılacak araç tiplerinin seçilmesi ve dengelemenin yapılacağı rotaların oluşturulması olarak tanımlanabilir. Literatürde ilk kez bu çalışma kapsamında ele alınan e-HSTYDP, operasyonel bir problemdir. Bu nedenle, dengelemenin hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi için ilk amaç olarak toplam dengeleme süresinin enazlanması dikkate alınmıştır. İşletme yönetimi açısından bu problemde dengelemenin en az maliyetle gerçekleştirilmesi de önemli olduğu için ikinci amaç olarak toplam maliyet (taşıma ve filoda kullanılacak araçların satın alma / kiralama maliyeti) ele alınmıştır. Problemin çözümü için akış tabanlı bir matematiksel model (MM) geliştirilmiştir. Toplam dengeleme süresinin enazlanmasını dikkate alan model “MMs”, toplam maliyeti (taşıma ve araç satın alma / kiralama maliyetini) dikkate alan model ise “MMm” olarak adlandırılmıştır. e-BPS’de yeniden dengeleme problemi NP-zor problemler sınıfında yer alan bir problemdir. Bu nedenle, orta ve büyük boyutlu problemlere makul zamanlarda çözüm üretebilmek amacıyla Clarke-Wright Tasarruf (CWT) algoritmasına dayalı bir çözüm kurucu algoritma geliştirilmiştir.

Matematiksel modelin ve çözüm kurucu algoritmanın performansı literatürdeki gerçek hayat problemlerden türetilen 78 test problemi üzerinde iki aşamalı olarak incelenmiştir. İlk aşamada matematiksel modelin performansı incelenmiştir. Bu aşamada MMs modelinin performansı, Pal ve Zhang [8] tarafından homojen filolu STYDP’de toplam dengeleme süresini enazlamak için geliştirilen matematiksel model (PZ-MM) ile karşılaştırılmıştır. Deneysel analiz sonucunda MMs’in çözüm kalitesi açısından PZ-MM’ye göre daha iyi performansa sahip olduğu görülmüştür. İkinci aşamada ise e-HSTYDP’de dikkate alınan iki farklı amaç için matematiksel modeller (MMs ve MMm) ile s-CWT’nin performansı karşılaştırmalı incelenmiştir. Küçük boyutlu e-HSTYDP için MMs ve MMm ile en iyi ya da en iyiye yakın çözümler kısa sürede (en fazla ortalama 700 sn) elde edilebilirken orta ve büyük boyutlu problemler için çözüm zamanı çok hızlı artış göstermiştir. Örneğin, MMs ile büyük boyutlu problemlere 7200 sn içerisinde sadece uygun çözümler elde edilebilmiştir. s-CWT algoritması ise orta ve büyük boyutlu problemlere 125 sn’den çok daha az sürelerde uygun çözümler üretebilmiştir. Ayrıca, s-CWT algoritması MMs ve MMm ile bulunan 3 çözümü iyileştirmiştir. İstatistiksel analizler de çözüm kalitesi ve çözüm zamanı açısından matematiksel modeller (MMs ve MMm) ve

s-CWT arasında $\alpha = 0,05$ anlamlılık düzeyinde farklılıklar olduğunu göstermiştir. Bu analizlere göre, matematiksel modeller çözüm kalitesi, s-CWT ise çözüm zamanı açısından çok daha iyi bir performansa sahiptir. Son olarak, karar vericiler için önemli bir bilgi olan toplam dengeleme süresi ve toplam maliyet arasındaki ödünleşim incelenmiştir. Bu inceleme, toplam dengeleme süresini azaltmak için maliyet artışına katlanılması gerektiğini göstermiştir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, orta ve büyük boyutlu e-HSTYDP için en iyi çözüme çok daha yakın çözümlerin elde edilmesi için tavlama benzetimi, tabu arama, değişken komşu arama gibi meta-sezgisel algoritmalara dayalı yeni sezgisel algoritmalar geliştirilebilir. Bu meta-sezgisel algoritmalara başlangıç çözümü üretmek ya da bu algoritmaların performansını incelemek amacıyla s-CWT algoritması kullanılabilir. Son yıllarda, sezgisel algoritmalar ile matematiksel modellerin birlikte kullanıldığı mat-sezgisel algoritmalar lojistik problemlerin çözümünde başarıyla kullanıldığı literatürde görülmektedir. Dolayısıyla, orta ve büyük boyutlu e-HSTYDP’nin çözümü için bir mat-sezgisel algoritma geliştirilebilir. Ayrıca, bu çalışmada bisiklet talebi sabit varsayılmıştır. İleride yapılacak çalışmalarda dinamik talep dikkate alınabilir.

Kaynaklar (References)

1. Shi J.G., Si H., Wu G., Su Y., Lan J., Critical factors to achieve dockless bike-sharing sustainability in China: A stakeholder-oriented network perspective, *Sustainability*, 10 (6), 2090, 2018.
2. Midgley P., Bicycle-sharing schemes: enhancing sustainable mobility in urban areas, United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 8, 1-12, 2011.
3. Chen F., Turoń K., Kłos M., Czech P., Pamula W., Sierpiński G., Fifth-generation bike-sharing systems: examples from Poland and China, *Zeszyty Naukowe, Transport/Politechnika Śląska*, 2018.
4. Nath R.B., Rambha T., Modelling methods for planning and operation of bike-sharing systems, *Journal of the Indian Institute of Science* 99, 621-645, 2019.
5. Vallez C.M., Castro M., Contreras D., Challenges and opportunities in dock-based bike-sharing rebalancing: A systematic review, *Sustainability*, 13 (4), 1829, 2021.
6. Lebetkin M., Best bike-sharing cities in the world. <https://www.usatoday.com/story/travel/destinations/2013/10/01/best-cities-bike-sharing/2896227/>. Yayın tarihi Ekim 1, 2013. Erişim tarihi Ekim 6, 2025.
7. Fricker C., Gast N., Incentives and redistribution in homogeneous bike-sharing systems with stations of finite capacity, *Euro journal on transportation and logistics*, 5 (3), 261-291, 2016.
8. Pal A., Zhang Y., Free-floating bike sharing: Solving real-life large-scale static rebalancing problems, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 80, 92-116, 2017.
9. Nair R., Miller-Hooks E., Fleet management for vehicle sharing operations, *Transportation Science*, 45 (4), 524-540, 2011.
10. Chemla D., Meunier F., Calvo R.W., Bike sharing systems: Solving the static rebalancing problem, *Discrete Optimization*, 10 (2), 120-146, 2013.
11. Raviv T., Tzur M., Forma I.A., Static repositioning in a bike-sharing system: models and solution approaches, *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 2 (3), 187-229, 2013.
12. Lin J.R., Yang T.H., Chang Y.C., A hub location inventory model for bicycle sharing system design: Formulation and solution, *Computers & Industrial Engineering*, 65 (1), 77-86, 2013.
13. Erdoğan G., Laporte G., Calvo R.W., The static bicycle relocation problem with demand intervals, *European Journal of Operational Research*, 238 (2), 451-457, 2014.
14. Dell’Amico M., Hadjicostantinou E., Iori M., Novellani S., The bike sharing rebalancing problem: Mathematical formulations and benchmark instances, *Omega*, 45, 7-19, 2014.
15. Ho S.C., Szeto W.Y., Solving a static repositioning problem in bike-sharing systems using iterated tabu search, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 69, 180-198, 2014.
16. Kadri A.A., Kacem I., Labadi K., A branch-and-bound algorithm for solving the static rebalancing problem in bicycle-sharing systems, *Computers & Industrial Engineering*, 95, 41-52, 2016.

17. Li Y., Szeto W.Y., Long J., Shui C.S., A multiple type bike repositioning problem, *Transportation Research Part B: Methodological*, 90, 263-278, 2016.
18. Liu J., Sun L., Chen W., Xiong H., Rebalancing bike sharing systems: A multi-source data smart optimization, In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery and data mining*, 1005-1014, 2016.
19. Regue R., Recker W., Proactive vehicle routing with inferred demand to solve the bikesharing rebalancing problem, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 72, 192-209, 2014.
20. Zhang D., Yu C., Desai J., Lau H.Y.K., Srivathsan S., A time-space network flow approach to dynamic repositioning in bicycle sharing systems, *Transportation research part B: methodological*, 103, 188-207, 2017.
21. Liang J., Silva M.C.M., Aloise D., Jena S.D., Dynamic rebalancing for bike-sharing systems under inventory interval and target predictions, *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 13, 100147, 2024.
22. Gleditsch M.D., Hagen K., Andersson H., Bakker S.J., Fagerholt K., A column generation heuristic for the dynamic bicycle rebalancing problem, *European Journal of Operational Research*, 317 (3), 762-775, 2024.
23. Ho S.C., Szeto W.Y., A hybrid large neighborhood search for the static multi-vehicle bike-repositioning problem, *Transportation Research Part B: Methodological*, 95, 340-363, 2017.
24. Forma I.A., Raviv T., Tzur M., A 3-step math heuristic for the static repositioning problem in bike-sharing systems, *Transportation research part B: methodological*, 71, 230-247, 2015.
25. Schuijbroek J., Hampshire R.C., Van Hoes W.J., Inventory rebalancing and vehicle routing in bike sharing systems, *European Journal of Operational Research*, 257 (3), 992-1004, 2017.
26. Bulhões T., Subramanian A., Erdoğan G., Laporte G., The static bike relocation problem with multiple vehicles and visits, *European Journal of Operational Research*, 264 (2), 508-523, 2018.
27. Szeto W.Y., Shui C.S., Exact loading and unloading strategies for the static multi-vehicle bike repositioning problem, *Transportation Research Part B: Methodological*, 109, 176-211, 2018.
28. Arabzad S.M., Shirouyehzad H., Bashiri M., Tavakkoli-Moghaddam R., Najafi E., Rebalancing static bike-sharing systems: a two-period two-commodity multi-depot mathematical model, *Transport*, 33 (3), 718-726, 2018.
29. Zhang S., Xiang G., Huang Z., Bike-sharing static rebalancing by considering the collection of bicycles in need of repair, *Journal of Advanced Transportation*, 2018.
30. Kacem I., Kadri A., Laroche P., A clustering-based approach for balancing and scheduling bicycle-sharing systems, *Intelligent Automation & Soft Computing*, 24 (2), 2018.
31. Wang S., Wu R., The Static Rebalancing Problem in Bicycle-Sharing Systems with Unusable Bicycles, In *2019 16th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM)*, 1-6, IEEE, 2019.
32. Du M., Cheng L., Li X., Tang F., Static rebalancing optimization with considering the collection of malfunctioning bikes in free-floating bike sharing system, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 141, 102012, 2020.
33. Sun J., He Y., Zhang J., A cluster-then-route framework for bike rebalancing in free-floating bike-sharing systems, *Sustainability*, 15(22), 15994, 2023.
34. Ren Y., Zhao F., Jin H., Jiao Z., Meng L., Zhang C., Sutherland J.W., Rebalancing bike sharing systems for minimizing depot inventory and traveling costs, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21 (9), 3871-3882, 2019.
35. Shi L., Zhang Y., Rui W., Yang X., Study on the bike-sharing inventory rebalancing and vehicle routing for bike-sharing system, *Transportation research Procedia*, 39, 624-633, 2019.
36. Zhang D., Xu W., Ji B., Li S., Liu Y., An adaptive tabu search algorithm embedded with iterated local search and route elimination for the bike repositioning and recycling problem, *Computers & Operations Research*, 123, 105035, 2020.
37. Kaveh F., Shirouyehzad H., Zolfani S.H., Arabzad S.M., Proposing a mathematical model of balancing the inventory of multi-zone bicycle sharing systems with mobile stations and applying maintenance constraints, *Transport*, 37 (3), 145-160, 2022.
38. Chastre M.R., Andrade A.R., Rebalancing in bike sharing systems: Application to the Lisbon case study, *Case studies on transport policy*, 13, 101071, 2023.
39. Pan X., Tang J., Yu T., Cai J., Xiong Y., Gao F., Reposition optimization in the free-floating bike-sharing system considering transferring travels from urban rail transit, *Computers & Industrial Engineering*, 178, 109127, 2023.
40. Guo Y., Li J., Xiao L., Allaoui H., Choudhary A., Zhang L., Efficient inventory routing for Bike-Sharing Systems: A combinatorial reinforcement learning framework, *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 182, 103415, 2024.
41. Liang S., Ye Y., Wu J., An effective hybrid optimization algorithm for static rebalancing problem of bicycle-sharing system, *IET Intelligent Transport Systems*, 19 (1), e70050, 2025.
42. Jenkins M., Lustosa L., Chia V., Wildish S., Tan M., Hoornweg D., ..., Dogra S., What do we know about pedal assist E-bikes? A scoping inventory to inform future directions, *Transport policy*, 2022.
43. Baptista P., Pina A., Duarte G., Rolim C., Pereira G., Silva C., From onroad trial evaluation of electric and conventional bicycles to comparison with other urban transport modes: case study in the city of Lisbon, Portugal, *Energy Convers. Manag.*, 92, 10-18, 2015.
44. Zhou Y., Lin Z., Guan R., Sheu J.B., Dynamic battery swapping and rebalancing strategies for e-bike sharing systems, *Transportation Research Part B: Methodological*, 177, 102820, 2023.
45. Guan R., Lin Z., Zhou Y., Zhu Z., User-based relocation for e-bike sharing systems through power-level recommendation, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 26 (9), 13954-13966, 2025.
46. Cui, J., Szeto, W.Y., Wang, Y., A static mixed bike repositioning problem with both man-powered bikes and e-bikes, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 203, 104275, 2025.
47. Xu M., Di Y., Zhu Z., Yang H., Chen X., Designing van-based mobile battery swapping and rebalancing services for dockless ebike-sharing systems based on the dueling double deep Q-network, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 138, 103620, 2022.
48. Gajpal Y., Abad P., Saving-based algorithms for vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery, *The Journal of the Operational Research Society*, 61 (10), 1498-1509, 2010.
49. [49] Cordeau J.F., Gendreau M., Laporte G., Potvin J.Y., Semet F., A Guide to vehicle routing heuristics, *The Journal of the Operational Research Society*, 53, 512-522, 2002.
50. Clarke G., Wright J.W., Scheduling vehicles from a central delivery depot to a number of delivery points, *Operations Research*, 12 (4), 568-581, 1964.
51. Keçeci B., Altıparmak F., Kara I., Heterogeneous Vehicle Routing Problem With Simultaneous Pickup And Delivery: Mathematical Formulations And A Heuristic Algorithm, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30 (2), 185-195, 2015.
52. Yildiz E.A., Karaoglan I., Altıparmak F., A mixed integer mathematical model and a heuristic approach for two echelon location routing problem with simultaneous pickup and delivery, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (2), 807-822, 2021.
53. Dönmez S., Koç Ç., Altıparmak F., The mixed fleet vehicle routing problem with partial recharging by multiple chargers: A formulation and an insertion based constructive heuristic, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39 (1), 1-16, 2024.
54. Zhang F., Lyu H., Ji Y., Wong M., Kuai C., Fan J., Battery swapping demand simulation for electric micromobility vehicles considering multi-source information interaction and behavior decision, *Journal of Cleaner Production*, 414, 2023.
55. Akpinar İ.D., e-HSTYDP test problemi veri seti. GitHub. <https://github.com/idakpinar/e-HSTYDP/issues>. Yayın tarihi 2025. Erişim tarihi 19 Kasım 2025.