

**KENT ULAŖIMINDA ELEKTRİKLİ OTOBÜSLERİN
ÇİZELGELENMESİ**

İlknur ŖEN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KENT ULAŞIMINDA ELEKTRİKLİ OTOBÜSLERİN ÇİZELGELENMESİ

İlknur ŞEN
000-151-866-363

Prof. Dr. Nursel ÖZTÜRK
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

İlknur ŞEN tarafından hazırlanan “KENT ULAŞIMINDA ELEKTRİKLİ OTOBÜSLERİN ÇİZELGELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Nursel ÖZTÜRK

Başkan : Prof. Dr. Nursel ÖZTÜRK İmza
0000-0002-9835-0783
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Doç. Dr. İlker KÜÇÜKOĞLU İmza
0000-0002-5075-0876
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Yunus DEMİR İmza
0000-0003-3868-1860
Bursa Teknik Üniversitesi,
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

.././.....

B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

14/08/2021

İlknur ŞEN

TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Prof. Dr. Nursel ÖZTÜRK
06/09/2021

İlknur ŞEN
06/09/2021

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KENT ULAŞIMINDA ELEKTRİKLİ OTOBÜSLERİN ÇİZELGELENMESİ

İlknur ŞEN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Nursel ÖZTÜRK

Günümüz dünyasının en büyük problemlerinden olan küresel ısınma ile mücadele etmek amacıyla, karbon salınımının azaltılması zorunlu hale gelmiştir. Ekonomik kalkınma ve insan refahının sağlanmasında önemli bir bileşen olan ulaşım, karbon salınımında büyük bir paya sahiptir. Ulaşım, karbon salınımını azaltarak sürdürülebilir bir sistem olma yolunda potansiyel bir adaydır. Sıfır karbon salınımına sahip olan elektrikli motorlar, karakteristik özellikleri nedeniyle toplu taşımaya kolayca dâhil edilebilmektedir. Bu nedenle, elektrikli otobüsler ulaşımı sürdürülebilir hale getirmekte çok etkili bir araçtır.

Bu tez çalışmasında, kent ulaşımında elektrikli otobüslerin kullanılması durumunda mevcut otobüs tarifesinde belirli olan seferlerin gerçekleştirilmesi için gerekli olan elektrikli otobüs sayısının belirlenmesi, elektrikli otobüslerin çizelgelemesi ve elektrikli otobüslerin şarj zamanlarının planlanması problemlerinin çözülmesi amaçlanmıştır. Ele alınan problemlerin çözümü için iki aşamalı karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Matematiksel model, karar vericilerin kent ulaşımında elektrikli otobüslerin kullanımıyla ilgili endişelerini giderecek şekilde oluşturulmuştur. Böylece, kent ulaşımında elektrikli otobüs kullanımına geçişin kolaylaştırılması ve hızlandırılması amaçlanmaktadır. Vaka çalışmasında; Bursa kent ulaşımının yedi rotasında dizel otobüslerin elektrikli otobüsler ile değiştirilmesi durumunda, toplu taşımının operasyon planlama sürecinde karşılaşılan gerçek hayat problemlerinin çözümü sunulmuştur. Bursa kent ulaşımının iki rotası için yapılan duyarlılık analizi, rotaların şarj stratejilerini belirlemede bu tez çalışmasının kapsamlı rehberlik sağlayacağını ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Kent ulaşımı, toplu taşıma, elektrikli otobüs, otobüs çizelgeleme, şarj zaman planlaması

2021, xi + 69 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

ELECTRIC BUS SCHEDULING IN URBAN TRANSPORTATION

İlknur ŞEN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Industrial Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Nursel ÖZTÜRK

To contend with global warming, one of the biggest problems in today's world, reducing carbon emissions has become mandatory. Transportation, which is an important compound economic growth and human welfare, has a large share in carbon emissions. Transportation is a potential candidate for becoming a sustainable system by reducing carbon emissions. Electric motors with zero carbon emissions can be efficiently included in public transport due to their characteristics. Therefore, electric buses are extremely influential tools to make transportation sustainable.

In this thesis, it is aimed to determine the number of electric buses required to carry out the specific round in the available bus schedule if electric buses are used in urban transportation, to schedule the electric buses and to solve problems with planning charging times for electric buses. A two-stage mixed integer linear programming model has been developed to solve the problems covered. The mathematical model is designed to address decision makers' concerns about the usage of electric buses in urban transportation. Thus, it is aimed to facilitate and accelerate the transition to electric bus use in urban transportation. In the case study, if diesel bus buses are replaced by electric buses on seven routes of Bursa urban transportation, the solution to real life problems encountered during the operation planning process of public transport is presented. The sensitivity analysis of the two routes of Bursa urban transportation has shown that this study will provide comprehensive guidance in determining the charging strategies of the routes.

Key words: Urban transportation, public transport, electric bus, bus scheduling, charging scheduling

2021, xi + 69 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenim sürecim boyunca tecrübesiyle bana her zaman yol gösterici olan, desteklerini ve emeklerini esirgemeyen, ufkumu genişletip yeni bakış açıları kazanmamı sağlayan, öğrencisi olmaktan her zaman gurur duyacağım çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Nursel ÖZTÜRK'e teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Tez çalışmam süresince yardımlarını esirgemeyen, bilgi birikimiyle çalışmama farklı açılardan bakmamı sağlayan saygıdeğer hocam Doç. Dr. İlker KÜÇÜKOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmaya hem tecrübeleriyle hem de veri paylaşımı ile büyük katkı sağlayan BURULAŞ yetkililerine teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak her zaman yanımda olan, aldığım kararları her zaman destekleyen, tüm hayatım boyunca beni cesaretlendiren ve moral veren sevgili aileme teşekkür eder, şükranlarımı sunarım.

İlknur ŞEN
14/08/2021

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	12
3.1. Problem Tanımı.....	12
3.2. Matematiksel Model.....	16
4. BULGULAR.....	24
4.1. Vaka Çalışması.....	24
4.2. Duyarlılık Analizi.....	31
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	42
KAYNAKLAR.....	46
EKLER.....	50
EK 1. Rotaların Seferlerinin Başlangıç ve Bitiş Zamanları.....	51
EK 2. A Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar.....	52
EK 3. B Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar.....	55
EK 4. C Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar.....	58
EK 5. D Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar.....	60
EK 6. E Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar.....	62
EK 7. F Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar.....	64
EK 8. G Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar.....	66
ÖZGEÇMİŞ.....	69

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Tek depolu ulaşım ağı.....	13
Şekil 3.2. X rotasının gidiş seferinin durakları	14
Şekil 3.3. X rotasında görev alan elektrikli otobüsün günlük hareketlerine dair örnek..	15
Şekil 4.1. A rotasında batarya kullanım oranı %80 olan senaryolar için Ei 'lerin minimum 10 değeri	34
Şekil 4.2. A rotasında batarya kullanım oranı %75 olan senaryolar için Ei 'lerin minimum 10 değeri	35
Şekil 4.3. A rotasında batarya kullanım oranı %70 olan senaryolar için Ei 'lerin minimum 10 değeri	36
Şekil 4.4. B rotasında batarya kullanım oranı %80 olan senaryolar için Ei 'lerin minimum 10 değeri	38
Şekil 4.5. B rotasında batarya kullanım oranı %75 olan senaryolar için Ei 'lerin minimum 10 değeri	39
Şekil 4.6. B rotasında batarya kullanım oranı %70 olan senaryolar için Ei 'lerin minimum 10 değeri	40

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Kent ulaşımında elektrikli otobüslerin kullanılması ile ilgili yapılan çalışmalar	9
Çizelge 4.1. Rotaların sefer türleri ve sefer türlerine göre sefer sayısı	25
Çizelge 4.2. Rotaların sefer türlerinin verileri	25
Çizelge 4.3. Rotaların duraklar arası boş sefer mesafesi ve boş sefer süresi	26
Çizelge 4.4. Rota için kurulacak şarj cihazı sayısı ve konumu	27
Çizelge 4.5. Rotaların hareket merkezlerine boş sefer mesafesi ve boş sefer süresi	28
Çizelge 4.6. Kullanılacak elektrikli otobüslerin teknik özellikleri	29
Çizelge 4.7. Kullanılacak elektrikli otobüsler için üretici firmalar tarafından belirtilen şarj işlemi ile ilgili parametreleri	30
Çizelge 4.8. Kullanılacak elektrikli otobüslerin minimum şarj süresinin belirlenmesi ..	30
Çizelge 4.9. Rotaların birinci ve ikinci aşama sonuçları.....	31
Çizelge 4.10. A ve B rotası için belirlenen minimum şarj süreleri	32
Çizelge 4.11. A rotası için ele alınan senaryoların minimum şarj süreleri ve batarya kullanım oranları	33
Çizelge 4.12. A rotasında batarya kullanım oranı %80 olan senaryolar için performans göstergeleri	34
Çizelge 4.13. A rotasında batarya kullanım oranı %75 olan senaryolar için performans göstergeleri	35
Çizelge 4.14. A rotasında batarya kullanım oranı %70 olan senaryolar için performans göstergeleri	36
Çizelge 4.15. B rotası için ele alınan senaryoların minimum şarj süreleri ve batarya kullanım oranları	37
Çizelge 4.16. B rotasında batarya kullanım oranı %80 olan senaryolar için performans göstergeleri	38
Çizelge 4.17. B rotasında batarya kullanım oranı %75 olan senaryolar için performans göstergeleri	39
Çizelge 4.18. B rotasında batarya kullanım oranı %70 olan senaryolar için performans göstergeleri	40
Çizelge 4.19. A ve B rotasında farklı batarya kullanım oranları için en iyi sonucun elde edildiği senaryonun sonuçları.....	41
Çizelge 4.20. A ve B rotasında farklı minimum şarj süreleri için en iyi sonucun elde edildiği senaryonun sonuçları.....	41

1. GİRİŞ

Ekonomik kalkınma ve insan refahının sağlanmasında önemli bir bileşen olan ulaşım, ülkelerin ekonomileri büyüdükçe dünya çapında artmaktadır. Ulaşım ile ilgili en acil sorunlar, trafik yoğunluğu ve kazaları, hava kirliliği ve fosil yakıtlı enerji kaynaklarına olan bağımlılıktır (Intergovernmental Panel on Climate Change 2012). Diğer yandan, hava koşullarında iklim değişikliğinden kaynaklanan büyük değişimler meydana gelmiştir (Fang ve ark. 2017). Küresel ölçekte karşılaşılan en büyük sorunlardan biri olarak kabul edilen iklim değişikliğiyle mücadele etmek amacıyla, 1980'li yılların sonlarından başlayarak Birleşmiş Milletlerin ve uluslararası kuruluşların öncülüğünde çalışmalar yapılmıştır. İnsanların iklim üzerindeki olumsuz etkisini ve baskısını azaltmak için 1992 yılında Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, 1997 yılında Kyoto Protokolü oluşturulmuştur (Anonim 2021a). Ek olarak beşeri faaliyetlerin artışı, fosil yakıtlı enerji kaynaklarının tüketilmesini hızlandırarak ciddi ekolojik, çevresel ve ekonomik tehditler ortaya çıkartmıştır. Bu nedenlerle, karbon salınımının azaltılması 21. yüzyılda zorunlu hale gelmiştir (Fang ve ark. 2017). 2015 yılında oluşturulan Paris Anlaşması, karbon salınımının azaltılması için belirlenen politikaların bu on yılda ve sonrasında da devam etmesini sağlamıştır (Morgan ve Patomäki 2021). Avrupa Birliği, 2030 yılına kadar karbon salınımını 1990 yılına göre % 40 oranında azaltmayı hedeflemektedir (Anonim 2021b).

Birçok ülke iklim değişikliğiyle mücadele amacıyla, karbon salınımının azaltılmasını temel amaçlarından biri olarak belirlemiştir (El-Taweel ve ark. 2017). Ulaşım, 2017 yılında fosil yakıtlı enerji kaynaklarının tüketiminden kaynaklanan karbon salınımının %24'ünü oluşturmuştur ve artış eğilimi gösteren tek sektördür. Bu nedenle ulaşım sektörünün amaçlarından biri, ulaşımdan kaynaklanan karbon salınımının azaltılmasıdır (Olmos ve ark. 2019). Bu amaç doğrultusunda, ulaşım sektörü sürdürülebilir bir sistem olma yolunda yeni yaklaşımlar benimsemeye başlamıştır. En dikkat çeken yaklaşımlardan biri, özellikle yeşil enerji kaynakları tarafından desteklendiğinde ulaşımda sıfır karbon salınımına sahip olan elektrikli motorların benimsenmesidir (Deng ve ark. 2021).

Elektrikli motorların büyük ölçüde benimsenmesi için potansiyel bir aday; belirli rotalar, belirli başlangıç ve bitiş durakları gibi karakteristik özellikleri nedeniyle toplu taşımadır. Elektrikli otobüsler, ulaşım için karbon salınımının azaltılması amacıyla ulaşmada umut verici bir araç olarak ortaya çıkmıştır (Olmos ve ark. 2019). Elektrikli otobüsler birçok avantaja sahip olmasına rağmen, karar vericiler için en büyük endişelerden biri fosil yakıt kullanan dizel otobüslere göre düşük menzile sahip olmalarıdır (Wang ve ark. 2017). Elektrikli otobüslerin yüksek elektrik enerjisi tüketimi, aracın menziline etkileyen ana parametrelerden biridir (Bartłomiejczyk 2019). Enerji tüketimi; ortam sıcaklığı, yol topolojisi ve yolcu sayısına bağlıdır (Jahic ve ark. 2019). Aynı zamanda trafik koşulları da enerji tüketimi üzerinde etkilidir (Bartłomiejczyk 2019). Dizel otobüslerin elektrikli otobüsler ile değiştirilmesi durumunda toplu taşımanın operasyon planlama sürecinde gerekli olan elektrikli otobüs sayısının belirlenmesi, elektrikli otobüslerin çizelgelenmesi ve elektrikli otobüslerin şarj zamanlarının planlanması şeklinde genellikle birlikte ele alınan üç faaliyet gerçekleştirilmektedir. Dizel otobüslerle karşılaştırıldığında, toplu taşımada elektrikli otobüslerin kullanılması daha karmaşıktır. Mevcut otobüs tarifesinin kısıtlarının karşılanarak elektrikli otobüslerin çizelgelenmesi yeterli değildir, aynı zamanda elektrikli otobüslerin şarj zamanlarının da planlanması gerekmektedir (Tang ve ark. 2019). Dizel otobüslerin elektrikli otobüsler ile değiştirilmesi durumunda toplu taşımanın operasyon planlama sürecinin iyileştirilmesi sonucu, gerçek hayata daha uygun sonuçlar elde edilmiştir. Özetle, toplu taşımanın elektrifikasyonu büyük gelişme potansiyeline sahiptir ve araştırılması önemli olan konular arasında yer almaktadır (Zhang 2017).

Bu tez çalışmasında, Bursa kent ulaşımında elektrikli otobüslerin kullanılması ile ilgili fizibilite çalışması yapılmıştır. Dizel otobüslerin elektrikli otobüsler ile değiştirilmesi durumunda mevcut otobüs tarifesinde belirli olan seferlerin gerçekleştirilmesi için gerekli olan elektrikli otobüs sayısının belirlenmesi, elektrikli otobüslerin çizelgelenmesi ve elektrikli otobüslerin şarj zamanlarının planlanması problemlerinin çözülmesi amaçlanmıştır. Ele alınan problemlerin çözümü için MPL ortamında iki aşamalı karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli oluşturulmuştur. Vaka çalışmasında Bursa şehrinin şehir içi tüm toplu taşıma hizmetini yöneten ulaştırma şirketi BURULAŞ tarafından önerilen 7 rota ele alınmıştır. Bu rotalarda dizel otobüslerin elektrikli otobüsler

ile değiştirilmesi durumunda, karşılaşılan gerçek hayat problemlerine çözüm sunulmuştur. Mevcut alışmalar incelendiğinde, neredeyse tamamında, kent ulaşımında elektrikli otobüslerin kullanılması durumunda toplu taşımının operasyon planlama sürecinde karşılaşılan problemler, aynı anda kullanıldığında şebekeye büyük yük getirmesine rağmen kullanılan şarj cihazı sayısında herhangi kısıtlama olmadan ele alınmuştur. Bu tez çalışmasında ise şarj cihazı sayısına kısıtlama getirilmiştir ve karar vericiler tarafından belirlenmesi istenmiştir. Ayrıca mevcut çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, karar vericilerin kent ulaşımında elektrikli otobüs kullanılmasına karar vermesinin önündeki en büyük engelden biri olan menzile odaklanılmıştır. Elektrikli otobüslerin herhangi bir anda kalan menzilleri en büyüklenerek, yolda kalma gibi istenmeyen durumlar ile karşılaşma riski azaltılmaktadır. Geliştirilen matematiksel modelin etkinliğini test etmek ve minimum şarj süresi ve batarya kullanım oranının sonuçlara etkisini görmek amacıyla, iki rota için duyarlılık analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, sonuçların gerçek hayata uygulanabilirliğini değerlendirmek amacıyla belirlenen performans göstergeleri açısından karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde kent ulaşımında elektrikli otobüslerin kullanılmasını ele alan çalışmalara yer verilmiştir. Üçüncü bölümün ilk kısmında ele alınan problemler detaylı olarak tanımlanırken, üçüncü bölümün ikinci kısmında ise problemlerin çözümü için geliştirilen matematiksel model verilmiştir. Çalışmanın dördüncü bölümünde Bursa kent ulaşımının ele alındığı vaka çalışması ve sonuçları değerlendirmek amacıyla yapılan duyarlılık analizi yer almaktadır. Tez alışması sonucu elde edilen genel sonuçlar ise beşinci bölümde verilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Şehirlerde nüfus artışı özel araç sayısında artışa yol açmakta, trafik yoğunluğu ve park yeri problemleri ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, toplu taşımayı tercih edilen bir ulaşım şekli haline getirmek için kent ulaşımını iyileştirme politikaları yürütülmektedir. Yolcu yoğunluğuna göre boyutlandırılmış olan otobüsler, özel araçlara göre yolcu başına daha az yol kullanımına sahiptir. Ayrıca toplu taşımanın daha yüksek enerji verimliliği ve yolcu ya da kilometre başına daha az karbon salınımı gibi avantajları da vardır (Gallet ve ark. 2018). Bu avantajlar düşünüldüğünde, trafik yoğunluğu ve park yeri problemleri ile başa çıkmak için toplu taşımayı teşvik etmek ortak bir görüş haline gelmiştir. Diğer yandan, birçok ülke için önemli bir çevre sorunu olarak görülen küresel ısınmanın ortaya çıkmasında karayolu ulaşımında fosil yakıtlı araçların yoğun kullanımının büyük etkisi bulunmaktadır. Ulaşımında karbon salınımının azaltılması için sektör yeni yaklaşımlar benimsemelidir ve elektrikli araçlar bu amaca ulaşmada etkili bir araçtır. Bu nedenle, ulaşımında karbon salınımının azaltılması için toplu taşımada sıfır karbon salınımına sahip elektrikli otobüslerin kullanılması oldukça dikkat çekmektedir (Yao ve ark. 2020).

Kamyonların benzin istasyonlarının önceden bilinen taleplerini minimum mesafeyi kat ederek karşılamasını sağlayacak rotaların bulunması olarak tanımlanan “Kamyon Sevkiyat Problemi”, ilk defa Dantzig ve Ramser (1959) tarafından ele alınmıştır. Ele alınan problem için doğrusal programlama modeli ve çözüm algoritması önermişlerdir (Dantzig ve Ramser 1959). Clarke ve Wright; bu problemi farklı kapasitelere sahip kamyonlar için ele alarak, lojistik ve taşımacılıkta yaygın olarak karşılaşılan bir problem olarak genelleştirip en iyiye yakın çözüm bulmakta etkili bir algoritma geliştirmişlerdir (Clarke ve Wright 1964). Yöneylem Araştırması alanında çok çalışılan konulardan biri olan “Araç Rotalama Problemi”nin literatürde ilk defa bu çalışmalarda ele alındığı söylenebilir (Eksioglu ve ark. 2009). Bu tez çalışmasında da ele alınan “Araç Çizelgeleme Problemi”, araçların teslimat noktalarının taleplerini karşılamasına dair zaman kısıtları içeren “Araç Rotalama Problemi”nin özel bir durumu olarak ortaya çıkmıştır (Bodin ve Golden 1981).

Elbar (2016), mevcut otobüs tarifesinde belirli olan seferlerin gerçekleştirilmesi için gerekli olan dizel otobüs sayısının belirlenmesi, dizel otobüslerin ve karar vericiler tarafından sayısı belirlenmiş olan sadece geceleri şarj olan elektrikli otobüslerin çizelgelenmesi problemleri için karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli oluşturmuştur. Modelin amacı, dizel otobüslerin neden olduğu halk sağlığı ve çevre üzerindeki olumsuz etkiden dolayı ortaya çıkan maliyeti en küçükmektir. Gerçek hayattaki büyük ölçekli problemleri çözmek için sezgisel algoritma sunmuştur. İsrail'in Be'er Şeva ve Tel Aviv şehirlerinin toplu taşıma sistemlerini ele aldığı vaka çalışmaları için hem geliştirdiği sezgisel algoritmayı, hem de açgözlü algoritmayı kullanarak çözüm elde etmiştir. Geliştirdiği algoritmanın açgözlü algoritmaya göre daha iyi sonuç verdiğini ortaya koymuştur (Elbar 2016).

Ke ve ark. (2016), çevre dostu toplu taşımanın gelişmesini kolaylaştırmak için yaptıkları çalışmada mevcut otobüs tarifesinde belirli olan seferlerin gerçekleştirilmesi için gerekli olan elektrikli otobüs sayısının belirlenmesi, elektrikli otobüslerin çizelgelenmesi ve kullanılan elektrikli otobüs sayısı kadar kurulduğu varsayılan şarj cihazlarında elektrikli otobüslerin şarj zamanlarının planlanması problemlerinin modellenmesi için simülasyon yaklaşımı benimsemişlerdir. Model, satın alma ve kullanım maliyetlerini içeren toplam maliyeti tahminlemektedir. Tayvan'ın 15 rota içeren Penghu takımadasının tüm toplu taşıma sistemini üç farklı vaka çalışmasında ele almışlardır. Birinci vaka çalışmasında, elektrikli otobüsler sadece gece şarj edilmektedir. İkinci vaka çalışmasında elektrikli otobüslerin kalan batarya kapasitesi, sabit eşik değerinin altına düştüğünde sabit süre kadar gündüz de şarj edilebilmektedir. Üçüncü vaka çalışmasında uygulanan genetik algoritma, zamana bağlı olarak elektrikli otobüslerin kalan batarya kapasitesinin hangi eşik değerinin altına düştüğünde ne kadar süre ile şarj edileceğini belirlemiştir. Sonuçlar; elektrik fiyatlarının daha yüksek olduğu gündüz şarj etme nedeniyle ortaya çıkan ek kullanım maliyetlerine rağmen, toplam maliyetin düştüğünü göstermiştir. Ke ve ark. (2016), önerdikleri genetik algoritma ile Penghu takımadasında tamamen elektrikli otobüslerden oluşan bir toplu taşıma sisteminin toplam maliyetini başarılı bir şekilde azaltmışlardır.

Wang ve ark. (2017), elektrikli otobüs sayısının ve her elektrikli otobüsün gerçekleştireceği seferlerin belirli olduğunu varsaymışlardır. Gerekli olan şarj cihazı sayısının belirlenmesi ve elektrikli otobüslerin şarj zamanlarının planlanması problemleri için yıllık toplam maliyeti en küçükleyen karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli oluşturmuşlardır. Amerika'nın 17 rota içeren Davis şehrinin tüm toplu taşıma sistemi için çözüm elde etmişlerdir. Sonuçlar, menzil endişesinin bazı şarj stratejilerinin benimsenmesi ile ortadan kaldırılabilceğini göstermiştir. Duyarlılık analizi, modelin elektrikli otobüslerin kullanılması ve şarj stratejilerinin değerlendirilmesi konusunda kapsamlı rehberlik sağladığını ortaya koymuştur. Karşılaştırmalı analizler ile elektrikli otobüslerin dizel otobüslerden daha ekonomik ve çevre dostu olduğunu göstermişlerdir (Wang ve ark. 2017).

Rogge ve ark. (2018), mevcut otobüs tarifesinde belirli olan seferlerin gerçekleştirilmesi için farklı tip elektrikli otobüsler arasından her tipten gerekli olan otobüs sayısının belirlenmesi, elektrikli otobüslerin çizelgelenmesi, gerekli olan şarj cihazı sayısının belirlenmesi ve elektrikli otobüslerin şarj zamanlarının planlanması problemlerini ele almıştır. Ele alınan problemler için oluşturdukları karışık tam sayılı doğrusal olmayan programlama modelinin amacı, kurulum ve kullanım maliyetlerini içeren toplam maliyeti en küçükmektir. Önerdikleri gruplama genetik algoritma ile Almanya'nın Aachen şehrinin toplu taşıma sisteminin üç rotasını ve Danimarka'nın Roskilde şehrinin ise bir rotasını analiz etmişlerdir. Toplam maliyetin dağılımında otobüs tiplerinin ve onların teknik özelliklerinin önemli ölçüde etkili olduğunu belirtmişlerdir. Sadece düşük menzile sahip hafif elektrikli otobüsten oluşan filo, sadece yüksek menzile sahip ağır elektrikli otobüsten oluşan filonun gerçekleştirdiğinden fazla boş sefer mesafesi kat etmesine rağmen daha az enerji tüketmiştir. Enerji tüketimi; otobüs tipi, sefer mesafesi, hız, yolcu sayısı ve eğim gibi rota özelliklerini dikkate alan bir simülasyon yaklaşımı ile hesaplanmıştır. Böylece, otobüslerin ağırlık farklılıklarından kaynaklanan değişken enerji tüketimleri dikkate alınmış ve bunların toplam maliyet üzerindeki etkisi görülmüştür (Rogge ve ark. 2018).

Rinaldi ve ark. (2018), mevcut otobüs tarifesinde belirli olan seferlerin gerçekleştirilmesi için gerekli olan elektrikli ve hibrit otobüs sayılarının belirlenmesi, elektrikli ve hibrit

otobüslerin çizelgelenmesi ve elektrikli otobüslerin şarj zamanlarının planlanması problemlerini ele almıştır. Ele aldıkları problemler için amacı kullanım maliyetini en küçüklemek olan karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli oluşturmuşlardır. Lüksemburg'un toplu taşıma sisteminin iki rotası için iki şarj cihazı kurulduğunu varsayarak bir vaka çalışması gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar; tüm seferleri elektrikli otobüsler ile gerçekleştirmenin mümkün olduğunu ortaya koyarken, gerekli olan elektrikli otobüs sayısında rotaların otobüs tarifesinin büyük etkiye sahip olduğunu göstermektedir (Rinaldi ve ark. 2018).

Jiang ve ark. (2018), elektrikli otobüs satın alma maliyetini ve zamana bağlı değişen elektrik fiyatına göre hesaplanan şarj maliyetini içeren yıllık toplam maliyeti en küçükleyerek mevcut otobüs tarifesi için gerekli olan elektrikli otobüs sayısını belirleyen, elektrikli otobüsleri çizelgeleyen ve elektrikli otobüslerin şarj zamanlarını planlayan sezgisel tabanlı komşu arama algoritması geliştirmişlerdir. Şarj cihazı sayısında herhangi bir kısıtlama olmadan elektrikli otobüslerin seferler arasında şarj olabileceği varsayılmıştır. Çin'in Shenzhen şehrinin toplu taşıma sisteminin bir rotası için vaka çalışması gerçekleştirmişlerdir. Yapılan duyarlılık analizi; elektrikli otobüslerin hem başlangıç hem de bitiş durağında şarj olabilmesi durumunda, sadece tek durakta şarj olabilmesi durumuna göre, elektrikli otobüs satın alma maliyetinin düştüğünü ve yıllık toplam maliyet dağılımının değiştiğini ortaya koymuştur (Jiang ve ark. 2018).

Janovec ve ark. (2019), mevcut otobüs tarifesinde belirli olan seferlerin gerçekleştirilmesi için gerekli olan elektrikli otobüs sayısının belirlenmesi, elektrikli otobüslerin çizelgelenmesi ve elektrikli otobüslerin şarj zamanlarının planlanması problemleri için tam sayılı programlama modeli oluşturmuşlardır. Geliştirdikleri modelde şarj cihazlarının sayısının ve konumunun bilindiği varsayılmıştır. Modelin performansını değerlendirmek için Slovakya'nın Žilina şehrinin toplu taşıma sisteminin üç rotasını ele almışlardır (Janovec ve Koháni 2019).

Zhou ve ark. (2020), mevcut otobüs tarifesinde belirli olan seferlerin gerçekleştirilmesi için gerekli olan dizel ve elektrikli otobüs sayılarının belirlenmesi, dizel ve elektrikli otobüslerin çizelgelenmesi ve elektrikli otobüslerin şarj zamanlarının planlanması

problemleri için hedef programlama modeli oluşturmuşlardır. Şarj cihazı sayısında herhangi bir kısıtlama olmadan elektrikli otobüslerin seferler arasında şarj olabileceği varsayılmıştır. Ele aldıkları problemlerin çözümü için bütünlük bir sezgisel algoritma önermişlerdir. Amacın kullanım maliyetini ve karbon salınımını en küçüklemek olduğu elektrikli otobüslerin çizelgelenmesi problemi için tavlama benzetimi tabanlı yinelemeli komşu arama algoritması ile çözüm elde etmişlerdir. Amacın kullanım maliyetinin bir parçası olan şarj maliyetini en küçüklemek olduğu elektrikli otobüslerin şarj zamanlarının planlanması problemini, çok kriterli karar verme yaklaşımı tabanlı açgözlü dinamik seçim stratejisi ile çözmüşlerdir. Oluşturdukları modelin ve çözüm algoritmasının kullanılabilir olduğunu Çin'in Pekin şehrinin toplu taşıma sisteminin üç rotasını birlikte ele aldıkları vaka çalışması ile ortaya koymuşlardır (Zhou ve ark. 2020).

Teng ve ark. (2020), toplu taşıma sisteminin bir rotası için otobüs tarifesinin oluşturulması, gerekli olan elektrikli otobüs sayılarının belirlenmesi, elektrikli otobüslerin çizelgelenmesi ve elektrikli otobüslerin şarj zamanlarının planlanması problemleri için hedef programlama modeli oluşturmuşlardır. Şarj cihazı sayısında herhangi bir kısıtlama olmadan elektrikli otobüslerin seferler arasında şarj olabileceği varsayılmıştır. Oluşturdukları modelin amaçları yolcu bekleme süresini, kullanılan otobüs sayısını ve zamana bağlı değişen elektrik fiyatına göre hesaplanan şarj maliyetini en küçüklemektir. Önerdikleri çok amaçlı parçacık sürü optimizasyon algoritması ile Çin'in Shanghai şehrinin toplu taşıma sisteminin bir rotası için elde ettikleri çözümde, karşılaştırdıkları diğer iki metoda göre daha iyi sonuç elde edildiğini ortaya koymuşlardır (Teng ve ark. 2020).

Perumal ve ark. (2021), mevcut otobüs tarifesi için gerekli olan elektrikli otobüs sayısının belirlenmesi, elektrikli otobüslerin çizelgelenmesi ve elektrikli otobüslerin şarj zamanlarının planlanması problemlerini ve genellikle devamında ayrı olarak ele alınan iş gücünün çizelgelenmesi problemini birlikte ele almışlardır. Kullanım maliyetini en küçükleyen doğrusal programlama modelinde şarj cihazı sayısında herhangi bir kısıtlama olmadan elektrikli otobüslerin seferler arasında şarj olabileceği varsayılmıştır. Önerdikleri adaptif büyük komşuluk arama algoritması ile Danimarka'nın bir şehrinin toplu taşıma sisteminin 13 rotası ve İsveç'in bir şehrinin toplu taşıma sisteminin 16 rotası

için çözüm elde edilmiştir. Menzilin kullanım maliyeti üzerindeki etkisini değerlendirmek için yaptıkları duyarlılık analizinde, menzil artışı ile kullanım maliyetinin düştüğünü belirtmişlerdir (Perumal ve ark. 2021).

Bie ve ark. (2021), toplu taşıma sisteminde durakların yolcu sayılarının dengesiz olmasından yola çıkarak rotanın tüm duraklarını veya bazı duraklarını ziyaret eden elektrikli otobüslerin kullanılması stratejilerine göre otobüs tarifesinin oluşturulması, stratejilere göre gerekli olan elektrikli otobüs sayısının belirlenmesi, elektrikli otobüslerin çizelgelenmesi ve elektrikli otobüslerin şarj zamanlarının planlanması problemlerini ele almışlardır. Şarj cihazı sayısında herhangi bir kısıtlama olmadan elektrikli otobüslerin seferler arasında şarj olabileceği varsayılmıştır. Yolcu bekletme ve taşıma süresi nedeniyle ortaya çıkan maliyeti ve zamana bağlı değişen elektrik fiyatına göre hesaplanan şarj maliyetini en küçükleyen tam sayılı doğrusal olmayan programlama modeli oluşturmuşlardır. Ele aldıkları problemler için önerdikleri dal ve fiyat algoritması ile bir toplu taşıma sisteminin bir rotası için çözüm elde etmişlerdir. Ayrıca rotanın bazı duraklarını ziyaret eden elektrikli otobüslerin kullanılması stratejisi sayesinde, rotanın tüm duraklarını ziyaret eden elektrikli otobüslerin kullanılması stratejisine göre toplam maliyette %13,5 oranında düşüş sağlandığını ortaya koymuşlardır (Bie ve ark. 2021).

Kent ulaşımında elektrikli otobüslerin kullanılması ile ilgili yapılan çalışmaların özet bilgileri Çizelge 2.1’de yer almaktadır.

Çizelge 2.1. Kent ulaşımında elektrikli otobüslerin kullanılması ile ilgili yapılan çalışmalar

Yazar	Model	Amaç Fonksiyonu	Çözüm Algoritması	Vaka Çalışması
Elbar (2016)	Karışık tam sayılı doğrusal programlama	Dizel otobüslerin neden olduğu halk sağlığı ve çevre üzerindeki olumsuz etkiden dolayı ortaya çıkan maliyeti en küçüklemek	Sezgisel algoritma	İsrail’in Be’er Şeva ve Tel Aviv şehirlerinin toplu taşıma sistemleri

Çizelge 2.1. Kent ulaşımında elektrikli otobüslerin kullanılması ile ilgili yapılan çalışmalar (devam)

Yazar	Model	Amaç Fonksiyonu	Çözüm Algoritması	Vaka Çalışması
Ke ve ark. (2016)	Simülasyon	Satın alma ve kullanım maliyetini içeren toplam maliyeti en küçüklemek	Genetik algoritma	Tayvan'ın Penghu takımadasının toplu taşıma sisteminin 15 rotası
Wang ve ark. (2017)	Karışık tam sayılı doğrusal programlama	Yıllık toplam maliyeti en küçüklemek	CPLEX 12.4	Amerika'nın California şehrinin toplu taşıma sisteminin 17 rotası
Rogge ve ark. (2018)	Karışık tam sayılı doğrusal olmayan programlama	Satın alma ve kullanım maliyetini içeren toplam maliyeti en küçüklemek	Gruplama genetik algoritma	Almanya'nın Aachen şehrinin toplu taşıma sisteminin üç rotası ve Danimarka'nın Roskilde şehrinin ise bir rotası
Rinaldi ve ark. (2018)	Karışık tam sayılı doğrusal programlama	Kullanım maliyetini en küçüklemek	CPLEX 12.7	Lüksemburg'un toplu taşıma sisteminin iki rotası
Jiang ve ark. (2018)		Satın alma ve şarj maliyetini içeren yıllık toplam maliyeti en küçüklemek	Sezgisel tabanlı komşu arama algoritması	Çin'in Shenzhen şehrinin toplu taşıma sisteminin bir rotası
Janovec ve ark. (2019)	Tam sayılı doğrusal programlama	Kullanılan elektrikli otobüs sayısını en küçüklemek	Xpress IVE	Slovakya'nın Žilina şehrinin toplu taşıma sisteminin üç rotası
Zhou ve ark. (2020)	Hedef programlama	Kullanım maliyetini ve karbon salınımını en küçüklemek	Bütünleşik sezgisel algoritma	Çin'in Pekin şehrinin toplu taşıma sisteminin üç rotası
Teng ve ark. (2020)	Hedef programlama	Yolcu bekleme süresini, kullanılan elektrikli otobüs sayısını ve şarj maliyetini en küçüklemek	Çok amaçlı parçacık sürü optimizasyon algoritması	Çin'in Shanghai şehrinin toplu taşıma sisteminin bir rotası
Perumal ve ark. (2021)	Doğrusal programlama	Kullanım maliyetini en küçüklemek	Adaptif büyük komşuluk arama algoritması	Danimarka'nın bir şehrinin toplu taşıma sisteminin 13 rotası ve İsveç'in bir şehrinin toplu taşıma sisteminin 16 rotası
Bie ve ark. (2021)	Tam sayılı doğrusal olmayan programlama	Yolcu bekletme ve taşıma süresi nedeniyle ortaya çıkan maliyeti ve şarj maliyetini en küçüklemek	Dal ve fiyat algoritması	Bir toplu taşıma sisteminin bir rotası

Çizelge 2.1’de verilen çalışmalar incelendiğinde; mevcut otobüs tarifesinde belirli olan seferlerin gerçekleştirilmesi için gerekli olan elektrikli otobüs sayılarının belirlenmesi, elektrikli otobüslerin çizelgelenmesi ve elektrikli otobüslerin şarj zamanlarının planlanması problemleri genellikle birlikte ele alınmıştır. Birçok çalışmada şarj cihazı sayısında herhangi bir kısıtlama olmadan elektrikli otobüslerin seferler arasında şarj olabileceği varsayılmıştır. Gerçek hayat uygulamaları düşünüldüğünde elektrikli otobüslerin şarjı, şebekeye yük getirmektedir. Elektrikli otobüslerin kontrollü şarj edilmesi şebekenin daha düzgün çalışmasını sağlamaktadır (Szczeniak ve ark. 2019). Bu nedenle; bu tez çalışmasında mevcut şebekenin ve altyapının izin verdiği ölçüde, karar vericiler tarafından belirlenen sınırlı sayıda şarj cihazının kullanılacağı varsayılmıştır. Elektrikli otobüslerin şarj zamanları, konumu ve sayıları bilinen şarj cihazlarına göre planlanmaktadır. Yapılan diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, karar vericilerin toplu taşıma sisteminde elektrikli otobüs kullanımıyla ilgili endişelerinin giderilmesi amaçlanmaktadır. Eğim, klima ve trafik gibi faktörler öngörülenden fazla enerji harcanmasına neden olabilmektedir. Elektrikli otobüslerin her fırsatta şarj olması ile yolda kalma gibi istenmeyen durumlara karşı önlem amacıyla, amaç fonksiyonu günlük toplam şarj süresinin en büyüklenmesi olarak belirlenmiştir. Böylece gerçek hayatta uygulanabilirliği daha fazla olan sonuçlar elde edilmektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

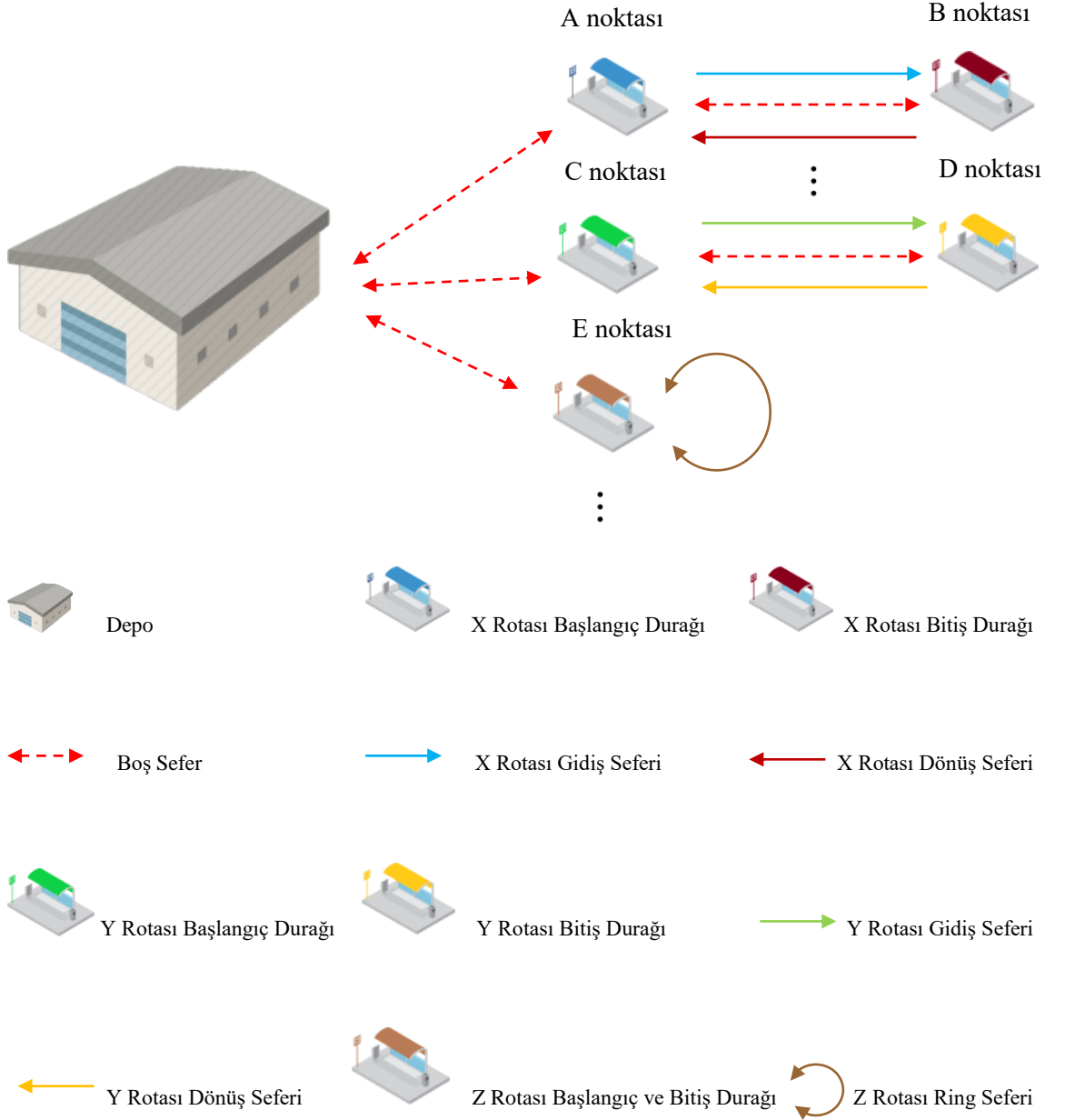
Tez çalışmasında toplu taşımada elektrikli otobüslerin kullanılması durumunda karşılaşılan üç problem birlikte ele alınmıştır. Bu bölümün birinci kısmında, ele alınan problemler detaylı bir şekilde tanımlanmıştır. İkinci kısımda ise ele alınan problemlerin çözümü için geliştirilen matematiksel model detaylı bir şekilde tanıtılmıştır.

3.1. Problem Tanımı

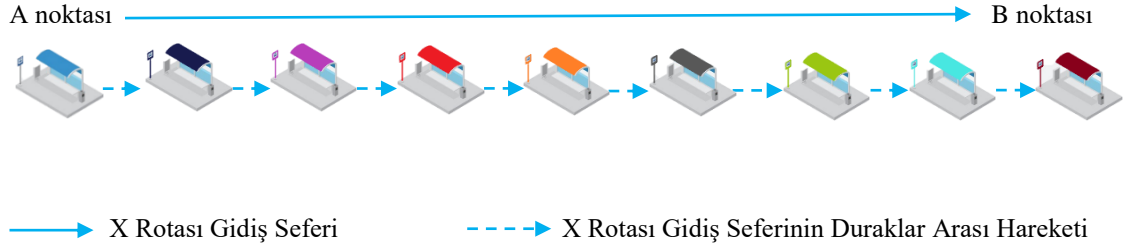
Toplu taşımanın operasyon planlama sürecinde genellikle sırayla dört temel faaliyet gerçekleştirilir: rotaların belirlenmesi, otobüs tarifesinin oluşturulması, otobüslerin çizelgelenmesi, iş gücünün çizelgelenmesi (Shen ve ark. 2016). Otobüslerin çizelgelenmesi problemi, filo büyüklüğünü veya işletme maliyetini en aza indirmek amacıyla hareket saatleri belirli olan seferlerin otobüslere atanmasını içermektedir (Li 2014). Sefer, bir otobüsün başlangıç ve bitişi belirli olan bir zaman aralığında yolcu taşımak amacıyla belirli durakları ziyaret edip belirli bir rota üzerinde yaptığı kısa seyahat olarak tanımlanır. Bu rota üzerinde bazı noktalar, durak olarak belirlenmiştir. Yolcular, otobüsün bu durakları ziyareti sırasında otobüsten iner ya da biner. Otobüsler, kendilerine atanan son seferi gerçekleştirdikten sonra gece konakladıkları depoya döner ve kendilerine atanan ilk seferi gerçekleştirmek için sabah bu depodan ayrılırlar. Hizmet vermek için yapılan seferlerin dışında, otobüsler kendilerine atanan seferlerin başlangıç durağına ya da kendilerine atanan son seferin bitiş durağından gece konakladıkları depoya ulaşmak için yolcu olmadan boş sefer de gerçekleştirir (Hassold ve Ceder 2014). Toplu taşımada dört farklı sefer tanımlanabilir: gidiş seferi, dönüş seferi, ring seferi ve boş sefer.

Bu çalışmada problemler, Şekil 3.1’de verilen tek depolu ulaşım ağı için ele alınmaktadır. Örneğin A ve B noktaları arasında 9 durak belirlenmiş belirli bir hattı, X rotası olarak tanımlayalım (Şekil 3.2). X rotasında planlanan ilk seferin gidiş seferi olduğunu ve başlangıç durağı olan A noktasında 07.00’de başlayıp, bitiş durağı olan B noktasında 07.30’da sona erdiğini varsayalım. Başlangıç durağı olan B noktasında 07.30’da başlayıp 08.00’de bitiş durağı olan A noktasında biten dönüş seferi, ikinci sefer olarak tanımlanmalıdır. Özetle, A ve B noktaları arasındaki her seyahat birer sefer olarak tanımlanmaktadır. Y rotasının gidiş seferi C noktasından D noktasına ve Y rotasının

dönüş seferi D noktasından C noktasına yapılmaktadır. Z rotası ise başlangıç ve bitiş durağı E noktası olan bir hat olarak tanımlanmaktadır. Bu durumda otobüsün Z rotası üzerinde yaptığı E noktasında başlayıp biten kısa seyahat, ring seferi olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 3.1. Tek depolu ulaşım ağı

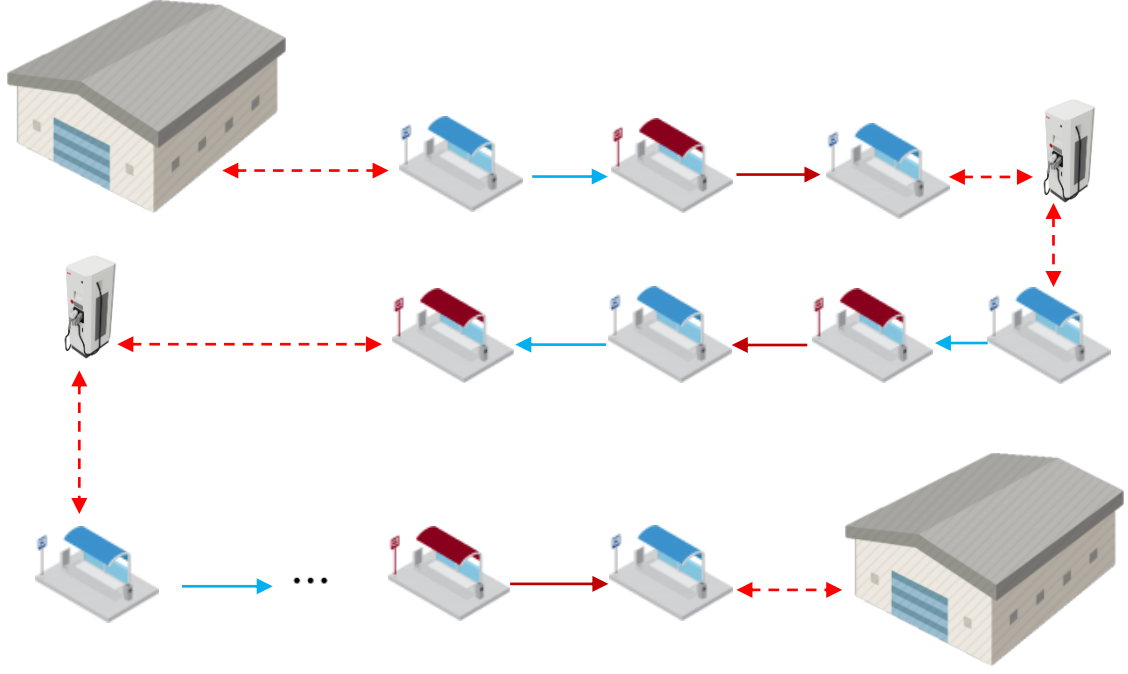


Şekil 3.2. X rotasının gidiş seferinin durakları

Elektrikli otobüslerin, büyüyen çevresel kaygılar nedeniyle yakın gelecekte toplu taşıma sisteminde önemli bir rol üstleneceği öngörülmektedir (Liu ve Liang 2018). Bu sebeple tek depolu ulaşım ağında elektrikli otobüslerin kullanıldığı varsayılmıştır. Dizel otobüslerin yakıt ikmali süresi, araç çizelgeleme probleminde dikkate almayı gerektirecek öneme sahip değildir ancak elektrikli otobüslerin toplu taşıma sistemine dâhil edilmesi ile menzil sınırlaması ve şarj süresi gibi konular da dikkate alınmalıdır. Tek depolu ulaşım ağında elektrikli otobüslerin kullanılması ve elektrikli otobüsler ile ilgili kısıtların eklenmesi ile birlikte bu çalışmada ele alınan problem, elektrikli otobüs çizelgeleme problemi olarak adlandırılmaktadır. Elektrikli otobüsler, kendilerine atanan seferler arasında şarj cihazlarında şarj olup tekrar menzil kazanabilmektedir.

X rotasında görev alan elektrikli otobüsün günlük hareketlerine dair örnek Şekil 3.3'te verilmiştir. Elektrikli otobüs, gece konakladığı depodan ayrılıp atandığı ilk seferin başlangıç durağı olan A noktasına boş sefer gerçekleştirir. Mevcut konumu olan A noktasından 07.00'de harekete geçip belirli durakları ziyaret ettikten sonra, 07.30'da B noktasına ulaşmaktadır. Kendisine atanan ikinci sefer olan dönüş seferini gerçekleştirmek için 07.30'da B noktasından harekete geçip 9 durağı ziyaret ettikten sonra, 08.00'de A noktasına ulaşır. Elektrikli otobüse ikinci seferinden sonra, şarj işlemi planlanmıştır. Bu sebeple, otobüs ikinci seferinin bitiş durağı olan A noktasından şarj cihazına boş sefer gerçekleştirmekte ve planlanan şarj cihazında planlanan süre kadar şarj olmaktadır. İkinci ve üçüncü seferi arasında şarj olup menzil kazanan elektrikli otobüs, şarj cihazından üçüncü seferinin başlangıç durağı olan A noktasına boş sefer gerçekleştirmektedir. Otobüs üçüncü seferini gerçekleştirmek için, 09.10'da mevcut konumu olan A noktasından harekete geçip 9 durağı ziyaret ettikten sonra, 09.40'da B noktasına ulaşır. Elektrikli otobüs kendisine atanan seferleri ve planlanan şarj işlemlerini

gerçekleştirdikten sonra, kendisine atanan son seferin bitiş durağı olan A noktasından depoya dönmektedir.



Şekil 3.3. X rotasında görev alan elektrikli otobüsün günlük hareketlerine dair örnek

Bu çalışmada şarj cihazlarının konum ve sayılarının belirlenmesi gibi konular çalışmanın dışında tutulmuştur. Şarj cihazlarının konum ve sayılarının bilindiği varsayılmaktadır. Amaç, elektrikli otobüslerin çizelgelenmesinin yanı sıra aynı zamanda şarj zamanlarının da planlanmasıdır. En az sayıda elektrikli otobüs kullanmalı ancak elektrikli otobüslerin batarya kapasitesinin sınırlamalarına da uyulmalıdır. Toplu taşımada elektrikli otobüs kullanılmasında karar vericiler için menzil, büyük bir endişedir. Model ile elektrikli otobüslerin günlük toplam şarj süresi en büyükenerek, karar vericilerin toplu taşımada elektrikli otobüs kullanımıyla ilgili endişelerinin giderilmesi amaçlanmaktadır. Eğitim, klima ve trafik gibi faktörler öngörülenden fazla enerji harcanmasına neden olabileceğinden, elektrikli otobüslerin her fırsatta şarj olması ile yolda kalma gibi öngörülemez ve istenmeyen durumlara karşı önlem alınmaktadır. Gerçek hayata daha uygun sonuçlar elde etmek amacıyla; mevcut otobüs tarifesinde belirli olan seferlerin gerçekleştirilmesi için gerekli olan elektrikli otobüs sayılarının belirlenmesi, elektrikli

otobüslerin çizelgelenmesi ve elektrikli otobüslerin şarj zamanlarının planlanması problemleri için iki aşamalı karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Birinci aşamada toplu taşıma sisteminde dizel otobüs kullanıldığında en az kaç otobüs gerektiği bulunmaktadır. İkinci aşamada, birinci aşamada sayısı belirlenen otobüslerin elektrikli otobüs olduğu kabul edilmiş ve elektrikli otobüsler her fırsatta şarj olmaya zorlanmıştır. Böylece hem en az sayıda elektrikli otobüs kullanılmış hem de elektrikli otobüslerin çizelgelenmesi ve aynı zamanda şarj zamanlarının planlanması sağlanmıştır.

3.2. Matematiksel Model

Bu bölümde mevcut otobüs tarifesinde belirli olan seferlerin gerçekleştirilmesi için gerekli olan elektrikli otobüs sayılarının belirlenmesi, elektrikli otobüslerin çizelgelenmesi ve elektrikli otobüslerin şarj zamanlarının planlanması problemleri için geliştirilen iki aşamalı karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli verilmiştir. Matematiksel modelde başlangıç ve bitiş zamanı belirli olan sefer, i ya da j olarak tanımlanmıştır. Tüm seferler, R kümesi ile gösterilmiştir. K , tüm elektrikli otobüslerin kümesidir. Son olarak, P şarj cihazlarının kümesi ve Q depoların kümesi olarak adlandırılmıştır. Modelin indisleri, parametreleri ve değişkenleri aşağıda verilmiştir:

Kümeler:

- R : Seferlerin kümesi
 K : Elektrikli otobüslerin kümesi
 P : Şarj cihazlarının kümesi
 Q : Depoların kümesi

İndisler:

- i, j : Planlanan seferler; $i, j \in R$

k : Elektrikli otobüsler; $k \in K$

p : Şarj cihazları; $p \in P$

q : Depolar; $q \in Q$

Parametreler:

C_{ap} : Elektrikli otobüsün maksimum menzili (km)

α : Elektrikli otobüsün batarya deşarj derinliği

β : Elektrikli otobüsün batarya şarj oranı, şarj işleminde elektrikli otobüse dakika başına aktarılan enerji sayesinde kazanılan menzil (km/dk)

c_{min} : Elektrikli otobüsün minimum şarj süresi (dk)

c_{pre} : Elektrikli otobüsün şarj işlemi için hazırlık süresi (dk)

a_i : i seferinin bitiş zamanı; $i \in R$

b_j : j seferinin başlangıç zamanı; $j \in R$

t_{ij} : i seferinin bitiş noktasından j seferinin başlangıç noktasına boş sefer süresi (dk); $i, j \in R, i \neq j$

h_{ip} : i seferinin bitiş noktasından p şarj cihazına boş sefer süresi (dk); $i \in R, p \in P$

f_{pj} : p şarj cihazından j seferinin başlangıç noktasına boş sefer süresi (dk); $p \in P, j \in R$

l_{ij} : i seferinin bitiş noktasından j seferinin başlangıç noktasına boş sefer mesafesi (km); $i, j \in R, i \neq j$

d_j : j seferinin başlangıç noktasından j seferinin bitiş noktasına sefer mesafesi (km); $j \in R$

- w_{iq} : i seferinin bitiş noktasından q deposuna boş sefer mesafesi (km);
 $i \in R, q \in Q$
- v_{qj} : q deposundan j seferinin başlangıç noktasına boş sefer mesafesi (km);
 $q \in Q, j \in R$
- g_{ip} : i seferinin bitiş noktasından p şarj cihazına boş sefer mesafesi (km);
 $i \in R, p \in P$
- n_{pj} : p şarj cihazından j seferinin başlangıç noktasına boş sefer mesafesi (km);
 $p \in P, j \in R$
- M : Çok büyük bir sayı

Karar Değişkenleri:

- Z_p^i : i seferini gerçekleştirdikten sonra, elektrikli otobüsün p şarj cihazında şarj olup olmadığını gösteren ikili değişken; $i \in R, p \in P$
- X_k^{ij} : k elektrikli otobüsünün i seferini gerçekleştirdikten sonra, j seferini gerçekleştirip gerçekleştirmediğini gösteren ikili değişken;
 $i \in R, j: j \in R$ ve $a_i + t_{ij} \leq b_j, k \in K, i \neq j$
- Y_k^{qj} : k elektrikli otobüsünün q deposundan çıktıktan sonra, j seferini gerçekleştirip gerçekleştirmediğini gösteren ikili değişken;
 $q \in Q, j \in R, k \in K$
- U_k^{iq} : k elektrikli otobüsünün i seferini gerçekleştirdikten sonra, q deposuna dönüp dönmediğini gösteren ikili değişken; $i \in R, q \in Q, k \in K$
- E_i : Elektrikli otobüsün i seferini gerçekleştirdikten sonra kalan menzili (km);
 $i \in R$

S_p^i : Elektrikli otobüs i seferini gerçekleştirdikten sonra, p şarj cihazında şarj oluyor ise şarj işlemine başlama zamanı; $i \in R, p \in P$

F_p^i : Elektrikli otobüs i seferini gerçekleştirdikten sonra, p şarj cihazında şarj oluyor ise şarj işleminin sona erme zamanı; $i \in R, p \in P$

Birinci aşamada çok depolu ulaşım ağı için mevcut otobüs tarifesinde belirli olan seferlerin gerçekleştirilmesi için gerekli olan dizel otobüs sayılarının belirlenmesi problemi ele alınmaktadır. Dizel otobüslerin yakıt ikmal süresi, çizelgeleme probleminde dikkate almayı gerektirecek öneme sahip değildir. Dizel otobüs çizelgeleme probleminde yakıt ikmaline dair herhangi bir kısıt olmadığından, sadece temel araç çizelgeleme kısıtlarını içermektedir. Bu aşamada planlanan seferleri gerçekleştirmek için en az kaç dizel otobüs gerektiği bulunmaktadır. Elde edilen sonuç, ikinci aşamada kullanılan elektrikli otobüs sayısı olarak kabul edilmektedir. Birinci aşamada kullanılan amaç fonksiyonu ve kısıtlar aşağıda verilmiştir:

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Min } z_1 = \sum_{k \in K} \sum_{q \in Q} \sum_{j \in R} Y_k^{qj} \quad (3.1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{k \in K} \left(\sum_{q \in Q} Y_k^{qj} + \sum_{i \in R, i \neq j} X_k^{ij} \right) = 1 \quad \forall j \in R \quad (3.2)$$

$$\sum_{k \in K} \left(\sum_{j \in R, i \neq j} X_k^{ij} + \sum_{q \in Q} U_k^{iq} \right) = 1 \quad \forall i \in R \quad (3.3)$$

$$\sum_{i \in R, i \neq j} X_k^{ij} + \sum_{q \in Q} Y_k^{qj} = \sum_{i \in R, i \neq j} X_k^{ji} + \sum_{q \in Q} U_k^{jq} \quad \forall j \in R, k \in K \quad (3.4)$$

$$\sum_{q \in Q} \sum_{j \in R} Y_k^{qj} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (3.5)$$

$$\sum_{i \in R} \sum_{q \in Q} U_k^{iq} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (3.6)$$

$$Y_k^{qj} \in \{0,1\} \quad q \in Q, j \in R, k \in K \quad (3.7)$$

$$X_k^{ij} \in \{0,1\} \quad i, j \in R, k \in K, i \neq j \quad (3.8)$$

$$U_k^{iq} \in \{0,1\} \quad i \in R, q \in Q, k \in K \quad (3.9)$$

Denklem 3.1’de yer alan amaç fonksiyonu, en az sayıda dizel otobüsün kullanılması gerektiğini ifade etmektedir. Her seferin bir kez gerçekleştirilmesi, Denklem 3.2 ve Denklem 3.3 ile sağlanmaktadır. Dizel otobüs, bir sefere ya başka bir seferi bitirip ya da depodan gelerek başlar. Seferini bitiren dizel otobüs ya başka bir sefere başlar ya da depoya döner. Bu zorunluluk, Denklem 3.4’te yer almaktadır. Denklem 3.5 ve Denklem 3.6, kullanılan her dizel otobüsün depodan ayrılıp kendisine atanan son seferi gerçekleştirdikten sonra depoya geri dönmesini sağlamaktadır. Karar değişkenlerini tanımlayan kısıtlar ise, Denklem 3.7, Denklem 3.8 ve Denklem 3.9’da verilmiştir.

İkinci aşamada, çok depolu ulaşım ağı için elektrikli otobüslerin çizelgelenmesi ve şarj zamanlarının planlanması problemleri birlikte ele alınmaktadır. Matematiksel modelin birinci aşamasında yer alan Denklem 3.2, Denklem 3.3 ve Denklem 3.4, ikinci aşamada da kullanılmaktadır. Çok depolu ulaşım ağında elektrikli otobüslerin kullanılması nedeniyle, ikinci aşamada menzil sınırlaması ve şarj süresi gibi konular da dikkate alınmaktadır. Bu aşamada, planlanan seferler elektrikli otobüslere atanmakta ve aynı zamanda karar vericilerin toplu taşımada elektrikli otobüs kullanımıyla ilgili endişelerini giderecek şekilde elektrikli otobüslerin şarj zamanları planlanmaktadır. Geliştirilen iki aşamalı karışık tam sayılı doğrusal programlama modelinin ikinci aşamasında kullanılan amaç fonksiyonu ve kısıtlar aşağıda verilmiştir:

Amaç Fonksiyonu:

$$\max z_2 = \sum_{i \in R} \sum_{p \in P} (F_i^p - S_i^p) \quad (3.10)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{q \in Q} \sum_{j \in R} Y_k^{qj} = 1 \quad \forall k \in K \quad (3.11)$$

$$\sum_{i \in R} \sum_{q \in Q} U_k^{iq} = 1 \quad \forall k \in K \quad (3.12)$$

$$\sum_{p \in P} Z_p^i \leq 1 \quad \forall i \in R \quad (3.13)$$

$$a_i + t_{ij} \left(1 - \sum_{p \in P} Z_p^i \right) + \sum_{p \in P} (h_{ip} Z_p^i + c_{min} Z_p^i + c_{pre} Z_p^i + f_{pj} Z_p^i) \leq b_j \\ + M \left(1 - \sum_{k \in K} X_k^{ij} \right) \quad \forall i, j \in R, i \neq j \quad (3.14)$$

$$Z_p^i + \sum_{k \in K} \sum_{j \in R'_i} X_k^{ij} + \sum_{k \in K} \sum_{q \in Q} U_k^{iq} \leq 1 \quad \forall p \in P, i \in R \quad (3.15)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in R, i \neq j} (b_j X_k^{ij} - f_{pj} X_k^{ij}) - M(1 - Z_p^i) \leq F_p^i \quad \forall p \in P, i \in R \quad (3.16)$$

$$S_p^i \leq M Z_p^i \quad \forall p \in P, i \in R \quad (3.17)$$

$$S_p^i \geq a_i Z_p^i + h_{ip} Z_p^i \quad \forall p \in P, i \in R \quad (3.18)$$

$$S_p^i + c_{min} + c_{pre} \leq \sum_{k \in K} \sum_{j \in R, i \neq j} (S_j X_k^{ij} - f_{pj} X_k^{ij}) \quad \forall p \in P, i \in R \quad (3.19)$$

$$F_p^i \leq S_p^j + M(1 - Z_p^j) \quad \forall p \in P, i \in R, j: j \in R \text{ ve } a_j + f_{jp} \geq a_i + f_{ip}, i \neq j \quad (3.20)$$

$$Cap - v_{qj} - d_j + M \left(1 - \sum_{k \in K} Y_k^{qj} \right) \geq E_j \quad \forall q \in Q, j \in R \quad (3.21)$$

$$Cap - v_{qj} - d_j - M \left(1 - \sum_{k \in K} Y_k^{qj} \right) \leq E_j \quad \forall q \in Q, j \in R \quad (3.22)$$

$$E_i - \sum_{p \in P} g_{ip} Z_p^i + \beta \sum_{p \in P} (b_j Z_p^i - f_{pj} Z_p^i - S_p^i) - \sum_{p \in P} n_{pj} Z_p^i - l_{ij} \left(1 - \sum_{p \in P} Z_p^i \right) - d_j + M \left(1 - \sum_{k \in K} X_k^{ij} \right) \geq E_j \quad \forall i, j \in R, i \neq j \quad (3.23)$$

$$Cap - \sum_{p \in P} n_{pj} Z_p^i - d_j + M \left(1 - \sum_{k \in K} X_k^{ij} \right) \geq E_j \quad \forall i, j \in R, i \neq j \quad (3.24)$$

$$E_i - \sum_{p \in P} g_{ip} Z_p^i - \sum_{q \in Q} w_{iq} U_k^{iq} \geq (1 - \alpha) Cap \quad \forall i \in R \quad (3.25)$$

$$Z_p^i \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad i \in R, p \in P \quad (3.26)$$

$$E_i \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad i \in R \quad (3.27)$$

$$S_p^i \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad i \in R, p \in P \quad (3.28)$$

$$F_p^i \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad i \in R, p \in P \quad (3.29)$$

Denklem 3.10’da yer alan amaç fonksiyonu, elektrikli otobüslerin günlük toplam şarj süresinin en büyüklenmesi gerektiğini ifade etmektedir. Kullanılan elektrikli otobüs sayısı, birinci aşamada elde edilen sonuca eşittir. Denklem 3.11 ve Denklem 3.12, her elektrikli otobüsün depodan ayrılıp kendisine atanan son seferi gerçekleştirdikten sonra depoya geri dönmesini sağlamaktadır. Elektrikli otobüslerin aynı anda tek şarj cihazında şarj olması, Denklem 3.13 ile sağlanmıştır. Denklem 3.14, tüm seferlerin belirli olan başlangıç ve bitiş zamanları içerisinde gerçekleştirilmesi gerektiğini ifade etmektedir. R'_i kümesi, R kümesinin bir alt kümesi olup $R'_i = \{j: j \in R \text{ ve } a_i + h_{ip} + c_{min} + c_{pre} + f_{pj} > b_j\}$ şekilde tanımlanmıştır. Elektrikli otobüslerin belirlenen minimum şarj süresinin altında ve kendilerine atanan son seferi bittikten sonra şarj olması, Denklem 3.15 ile önlenmektedir. Elektrikli otobüse şarj işlemi planlanmış ise bu şarj işleminin bitiş zamanı Denklem 3.16 ile belirlenirken, başlangıç zamanı Denklem 3.17 ve Denklem 3.18 ile belirlenmektedir. Eğer elektrikli otobüse şarj işlemi planlanmamış ise başlangıç ve bitiş zamanı 0 değerini almaktadır. Denklem 3.19, elektrikli otobüse şarj işlemi planlanmış ise en az minimum şarj süresi kadar şarj olmasını sağlamaktadır. Şarj cihazlarında aynı anda bir elektrikli otobüsün şarj olabileceği Denklem 3.20 ile ifade edilmiştir. Denklem 3.21 ve 3.22, depodan ayrılan elektrikli otobüslerin ilk seferinden sonra kalan menzilini belirlemektedir. Elektrikli otobüsün ilk seferi hariç kendisine atanan bir seferi gerçekleştirdikten sonra kalan menzili, Denklem 3.23 ile hesaplanmaktadır. Elektrikli otobüsün kendisine atanan bir seferi gerçekleştirdikten sonra kalan menzili, Denklem 3.24 ile belirlenen üst sınırı aşamaz. Denklem 3.25, herhangi bir anda elektrikli otobüsün kalan menzilinin minimum menzil olarak tanımlanan alt sınırın altına inmesini önlemektedir. Matematiksel modelin birinci aşamasında verilen Denklem 3.7, Denklem 3.8 ve Denklem 3.9, bu aşamada da yer almaktadır. Diğer karar değişkenlerini tanımlayan kısıtlar ise, Denklem 3.26, Denklem 3.27, Denklem 3.28 ve Denklem 3.29’da verilmiştir.

4. BULGULAR

Bu bölümde, farklı vakalarda dizel otobüslerin elektrikli otobüsler ile değiştirilmesi durumunda toplu taşımanın operasyon planlama süreci ele alınmıştır. Menzil sınırlaması ve şarj süresi gibi konular ile ilgili kısıtların geliştirilen matematiksel modelin etkinliğine ve sonuçlara etkisini görmek amacıyla duyarlılık analizi yapılmıştır.

4.1. Vaka Çalışması

Mevcut otobüs tarifesinde belirli olan seferlerin gerçekleştirilmesi için gerekli olan elektrikli otobüs sayılarının belirlenmesi, elektrikli otobüslerin çizelgelenmesi ve elektrikli otobüslerin şarj zamanlarının planlanması problemleri, geliştirilen matematiksel modelin uygulanabilirliğini test etmek ve gerçek hayat uygulamasına dair sonuçları değerlendirmek amacıyla Bursa ulaşım ağında ele alınmıştır. BURULAŞ, Bursa Büyükşehir Belediyesi iştiraki olarak 1998 yılında kurulmuş şehir içi toplu taşıma ve şehirlerarası ulaşım sistemleri ile Türkiye’de bir marka değer olmaya yönelik amacı doğrultusunda ilerleyen bir ulaşım şirkettir. BURULAŞ, Bursa şehrinin şehir içi tüm toplu taşıma hizmetini yönetmektedir (Anonim 2021c). BURULAŞ, elektrikli otobüslerin kullanılabilmesi için 7 rota önerisinde bulunmuştur. Bu tez çalışması kapsamında önerilen 7 rota ele alınmıştır. MPL ortamında geliştirilen matematiksel model her bir rota için Gurobi çözücü kullanılarak çözülmüştür. Her bir rotada kullanılacak elektrikli otobüslerin o rotada kullanılan dizel otobüslerin gece konakladıkları depoda gece boyunca konaklayacakları varsayılmıştır. Rotalar ile ilgili matematiksel modele girdi olan parametreler, BURULAŞ tarafından paylaşılmıştır.

Kullanılacak elektrikli otobüs sayısını belirlemek amacıyla her bir rotanın tüm otobüs tarifeleri için matematiksel modelin birinci aşaması çözdürülmüştür. Her bir rotanın otobüs tarifeleri için elde edilen otobüs sayıları arasından en büyük olanı o rotada kullanılacak elektrikli otobüs sayısı olarak belirlenmiştir. Elektrikli otobüslerin çizelgelenmesi ve aynı zamanda şarj zamanlarının planlanması amacıyla her bir rotanın en fazla sefer sayısına sahip olan otobüs tarifesi için matematiksel modelin ikinci aşaması çözdürülmüştür. Bu ve sonraki bölümde her bir rotanın en fazla sefer sayısına sahip olan

otobüs tarifesi için elde edilen sonuçlar verilmiştir. Rotaların sefer türleri ve sefer türlerine göre sefer sayısı Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Rotaların sefer türleri ve sefer türlerine göre sefer sayısı

Rota	Sefer Türü	Pazartesi-Cumartesi Tarifesi	Pazar-Resmi Tatil Tarifesi	Pazartesi-Cuma Tarifesi	Cumartesi Tarifesi	Cumartesi-Pazar-Resmi Tatil Tarifesi
A	Gidiş	121	49			
A	Dönüş	118	52			
B	Gidiş	117	52			
B	Dönüş	116	52			
C	Ring	119	93			
D	Ring			62		50
E	Ring			65		50
F	Gidiş	36	34			
F	Dönüş	37	34			
G	Ring			88	87	50

Rotaların sefer türlerinin başlangıç noktası, rotaların sefer türlerinin bitiş noktası, rotaların sefer türlerinin durak sayısı, rotaların sefer türlerinin sefer mesafesi, rotaların sefer türlerinin sefer süresi, deponun rotaların sefer türlerinin başlangıç durağına uzaklığı ve rotaların sefer türlerinin bitiş durağının depoya uzaklığı ise Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Rotaların sefer türlerinin verileri

Rota	Sefer Türü	Başlangıç Durağı	Bitiş Durağı	Durak Sayısı	Sefer Mesafesi (km)	Sefer Süresi (dk)	Deponun Başlangıç Durağına Uzaklığı (km)	Bitiş Durağının Depoya Uzaklığı (km)
A	Gidiş	D0380	D0962	29	10	25	12	12
A	Dönüş	D0962	D0380	29	10	25	12	12
B	Gidiş	D0380	D4248	42	14	30	13	7
B	Dönüş	D4248	D0380	42	13	30	7	12
C	Ring	D0625	D0625	13	5	20	10	10
D	Ring	D3352	D3352	56	17	35	17	17
E	Ring	D3352	D3352	56	17	42	17	17
F	Gidiş	D3352	D4283	55	23	50	13	13
F	Dönüş	D4283	D3352	47	19	50	13	13
G	Ring	D1372	D1372	35	13	30	3	3

Otobüs tarifelerinden elde edilen rotaların seferlerinin başlangıç ve bitiş zamanları Ek 1’de verilmiştir. Elektrikli otobüsler seferlerini gerçekleştirip bitiş durağına ulaştıktan sonra, kendilerine atanan bir sonraki seferin başlangıç durağı ile mevcut konumları olan bitiş durağı farklı olabilmektedir. Bu durumda elektrikli otobüsler, Çizelge 4.3’te verilen görev aldıkları rotanın duraklar arası boş sefer süresi boyunca duraklar arası boş sefer mesafesini kat ederek kendilerine atanan bir sonraki seferin başlangıç noktasına ulaşmaktadır. Örneğin A rotasında görev alan elektrikli otobüs ele alınırsa, Ek 1’de verileri yer alan A rotasının 110 nolu gidiş seferini gerçekleştirmek için başlangıç durağı olan D0380 durağından 14.05’te harekete geçip 29 durağı ziyaret ettikten sonra 14.30’da bitiş durağı olan D0962 durağına ulaşmaktadır. Eğer elektrikli otobüse A rotasının 110 nolu gidiş seferinden sonra A rotasının başlangıç zamanı 14.32 olan 115 nolu dönüş seferi atanırsa, mevcut konumu ile atandığı seferin başlangıç durağı olan D0962 durağı aynı olduğundan boş sefer gerçekleştirmesine gerek kalmadan doğrudan seferine başlamaktadır. Eğer elektrikli otobüse A rotasının 110 nolu gidiş seferinden sonra A rotasının başlangıç zamanı 14.45 olan 118 nolu gidiş seferi atanırsa, mevcut konumu ile atandığı seferin başlangıç durağı olan D0380 durağı farklı olduğundan D0962 durağından D0380 durağına 8 dakika boyunca 4 kilometre kat ederek boş sefer gerçekleştirmektedir. Ring seferlerinin başlangıç ve bitiş durakları aynı olduğu için bu rotada görev alan elektrikli otobüsler duraklar arası boş sefer gerçekleştirmemektedir.

Çizelge 4.3. Rotaların duraklar arası boş sefer mesafesi ve boş sefer süresi

Rota	Sefer Türü	Başlangıç Durağı	Bitiş Durağı	Elektrikli Otobüse İlgili Seferden Sonra Gidiş Seferi Atanırsa Boş Sefer Mesafesi (km)	Elektrikli Otobüse İlgili Seferden Sonra Gidiş Seferi Atanırsa Boş Sefer Süresi (dk)	Elektrikli Otobüse İlgili Seferden Sonra Dönüş Seferi Atanırsa Boş Sefer Mesafesi (km)	Elektrikli Otobüse İlgili Seferden Sonra Dönüş Seferi Atanırsa Boş Sefer Süresi (dk)
A	Gidiş	D0380	D0962	4	8	0	0
A	Dönüş	D0962	D0380	0	0	4	8
B	Gidiş	D0380	D4248	6	9	0	0
B	Dönüş	D4248	D0380	0	0	8	11
F	Gidiş	D3352	D4283	7	10	0	0
F	Dönüş	D4283	D3352	0	0	3	4

Elektrikli otobüsler, konakladıkları depoda gece boyunca şarj olmaktadır. Bu nedenle, kendilerine atanan ilk seferi gerçekleştirmek için depodan ayrılırken bataryalarının %100'ü doludur. Ancak elektrikli otobüsler düşük menzile sahip olduğu için seferler arasında görev aldıkları rota için kurulacak şarj cihazlarında şarj olup tekrar menzil kazanabilmektedir (Çizelge 4.4). Dizel otobüsler, seferler arasında hareket merkezlerinde bekleme yapmaktadır. BURULAŞ, şarj cihazı kurulumu için fiziki yapısı ve alt yapısı uygun olduğundan hareket merkezlerini önermiştir. Her rotanın başlangıç ve bitiş duraklarına en yakın hareket merkezi, rota için kurulacak şarj cihazının konumu olarak seçilmiştir.

Çizelge 4.4. Rota için kurulacak şarj cihazı sayısı ve konumu

Rota	Rota İçin Kurulacak Şarj Cihazı Sayısı	Rota İçin Kurulacak Şarj Cihazı Konumu
A	2	Üniversite İstasyonu Hareket Merkezi
B	2	Küçük Sanayi İstasyonu Hareket Merkezi
C	1	Çekirge Hareket Merkezi
D	1	Üniversite İstasyonu Hareket Merkezi
E	1	Üniversite İstasyonu Hareket Merkezi
F	2	Üniversite İstasyonu Hareket Merkezi
G	1	Terminal

Şarj işlemi planlanan elektrikli otobüsler, mevcut konumları olan bitiş duraklarından hareket merkezlerine boş sefer süresi boyunca boş sefer mesafesini kat ederek görev aldıkları rota için kurulan şarj cihazlarına ulaşmaktadır. Elektrikli otobüsler, şarj cihazlarına ulaştıklarında ya planlanan şarj işlemine hemen başlar ya da planlanan şarj işlemine başlama zamanına kadar başka bir elektrikli otobüsün şarj işleminin tamamlanmasını bekler. Planlanan şarj süresi boyunca şarj olup menzil kazanan elektrikli otobüsler, hareket merkezlerinden kendilerine atanan sonraki seferin başlangıç duraklarına boş sefer süresi boyunca boş sefer mesafesini kat ederek boş sefer gerçekleştirmektedir (Çizelge 4.5).

Elektrikli otobüsler, kendilerine atanan son seferi gerçekleştirdikten sonra gece konaklamak için dönüş yaptıkları depoda bulunan şarj cihazlarında bataryaları tamamen doluncaya kadar şarj olmaktadır. Kendilerine atanan ilk seferi gerçekleştirmek için sabah

bu depodan bataryaları tamamen dolu olarak çıkış yapmaktadır. Ele alınan 7 rotanın her birinde kullanılacak elektrikli otobüs modeli olarak, Türkiye’de üretilen ve rotada kullanılan dizel otobüs modeli ile aynı uzunlukta olan elektrikli otobüsler arasından en kısa şarj süresinde şarj olanı belirlenmiştir. Kullanılacak elektrikli otobüslerin teknik özellikleri Çizelge 4.6’da verilmiştir. KARSAN, JEST ELECTRIC model elektrikli otobüs için verilen şarj süresinde elektrikli otobüsün menzilin %80’ini kazanacağını belirtmiştir. TEMSA ise verilen şarj sürelerinde menzilin %80’ini mi yoksa %100’ünü mü kazanacağını belirtmemiştir.

Çizelge 4.5. Rotaların hareket merkezlerine boş sefer mesafesi ve boş sefer süresi

Rota	Sefer Türü	Başlangıç Durağı	Bitiş Durağı	Bitiş Durağından Hareket Merkezine Boş Sefer Mesafesi (km)	Bitiş Durağından Hareket Merkezine Boş Sefer Süresi (dk)	Hareket Merkezinden Başlangıç Durağına Boş Sefer Mesafesi (km)	Hareket Merkezinden Başlangıç Durağına Boş Sefer Süresi (dk)
A	Gidiş	D0380	D0962	8	10	11	15
A	Dönüş	D0962	D0380	7	11	9	13
B	Gidiş	D0380	D4248	3	5	7	13
B	Dönüş	D4248	D0380	7	11	3	5
C	Ring	D0625	D0625	5	12	6	15
D	Ring	D3352	D3352	3	4	7	10
E	Ring	D3352	D3352	3	5	7	10
F	Gidiş	D3352	D4283	0	1	7	10
F	Dönüş	D4283	D3352	3	4	0	1
G	Ring	D1372	D1372	2	5	3	8

Çoğu elektrikli araç için kullanılan tür olan Lityum-İyon batarya için karmaşık bir şarj şeması geçerlidir. Bu şarj şeması, bataryanın %80’e kadar hızlı bir şekilde şarj edileceğini ve devamında bataryanın aşırı ısınmaması için bataryanın şarj oranının düşeceğini ifade etmektedir. Uygulamada bir bataryayı % 0’dan % 80’e şarj etmek doğrusal bir işlemdir ve batarya şarj oranı kademeli olarak düştüğü için % 80’den % 100’e şarj etmekle yaklaşık aynı zamanı almaktadır (van Kooten Niekerk ve ark. 2017). Geliştirilen matematiksel modelde elektrikli otobüslerin bataryalarının doğrusal bir şekilde şarj olduğu varsayılmıştır. Ele alınan rotalarda kullanılacak elektrikli otobüslerde Lityum-İyon batarya bulunmaktadır. Bu nedenle elektrikli otobüslerin bataryalarının en fazla

%80'inin şarj olacağı kabul edilmektedir. Rotalarda kullanılacak elektrikli otobüslerin bataryalarının deşarj derinliği, bataryalarının şarj olma oranlarına eşittir. Kullanılabilir menzil, elektrikli otobüsün menzilin %80'i olarak tanımlanmıştır. Bataryalarının sadece %80'inin doldurulacağı varsayılan elektrikli otobüsler, Çizelge 4.6'da verilen menzillerini de aynı oranda kullanabilmektedir. Geliştirilen matematiksel model, elektrikli otobüslerin bataryalarının doğrusal olarak en fazla %80'inin şarj olduğunu varsaydığı için bataryanın kalan %20'sinin şarj edilemediği kabul edilmiştir. Bu nedenle herhangi bir anda elektrikli otobüslerin kalan menzili, elektrikli otobüslerin menzilin %20'sinin altına inemez. Minimum menzil, elektrikli otobüsün menzilin %20'si olarak tanımlanmıştır. Örneğin 210 kilometre menzile sahip olan elektrikli otobüsün kullanılabilir menzili 210 kilometrenin %80'i olan 168 kilometre iken, minimum menzili kalan %20'si olan 42 kilometredir (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.6. Kullanılacak elektrikli otobüslerin teknik özellikleri (Anonim 2021d, Anonim 2021e, Anonim 2021f)

Rota	Model	Firma	Uzunluk (<i>m</i>)	Batarya Kapasitesi (<i>kWh</i>)	Menzil (<i>km</i>)	Şarj Gücü (<i>kW</i>)	Şarj Süresi (<i>sa</i>)
A	JEST ELECTRIC	KARSAN	5.8	88	210	80	1,1
B	JEST ELECTRIC	KARSAN	5.8	88	210	80	1,1
C	MD9 ELECTRICITY	TEMSA	9.4	200	230	150	2
D	AVENUE ELECTRON	TEMSA	12	400	350	150	3
E	AVENUE ELECTRON	TEMSA	12	400	350	150	3
F	MD9 ELECTRICITY	TEMSA	9.4	200	230	150	2
G	MD9 ELECTRICITY	TEMSA	9.4	200	230	150	2

Üretici firmalar tarafından belirtilen şarj süresi boyunca şarj olan elektrikli otobüslerin kullanılabilir menzilleri kadar menzil kazandıkları varsayılmıştır. Elektrikli otobüs batarya şarj oranı, elektrikli otobüslerin dakika başına kazanacağı kullanılabilir menzil olarak tanımlanmaktadır. Elektrikli otobüslerin üretici firmanın belirttiği batarya şarj oranında menzil kazanmak için şarj olacağı minimum süre olarak tanımlanan minimum şarj süresinin belirlenmesi için bir strateji benimsenmiştir. Rotalarda kullanılacak elektrikli otobüsleri şarj etmede kullanılacak en hızlı şarj cihazının şarj gücü 150 kW'tır.

Elektrikli otobüslerin minimum şarj süresi, elektrikli otobüslerin bataryalarını 150 kW şarj gücüne sahip olan şarj cihazı ile şarj etmek için gerekli olan süreye eşit kabul edilmiştir (Çizelge 4.8). Planlanan şarj işlemine başlamak ve planlanan şarj süresi boyunca şarj olduktan sonra şarj işlemini bitirmek için hazırlık süresi gerekmektedir (Çizelge 4.7). Şarj işlemi için hazırlık süresi ise 2 dakikadır.

Çizelge 4.7. Kullanılacak elektrikli otobüsler için şarj işlemi ile ilgili parametreler

Model	Menzil (<i>km</i>)	Batarya Kullanım Oranı	Kullanılabilir Menzil (<i>km</i>)	Minimum Menzil (<i>km</i>)	Üretici Firmanın Belirttiği Şarj Gücüne Sahip Olan Şarj Cihazı İle Şarj Edilirse Batarya Şarj Oranı (<i>km/dk</i>)	Şarj İşlemi İçin Hazırlık Süresi (<i>dk</i>)
JEST ELECTRIC	210	%80	210 (%80)=168	210 (%20)=42	168/66=2,545	2
MD9 ELECTRICITY	230	%80	230 (%80)=184	230 (%20)=46	184/120=1,533	2
AVENUE ELECTRON	350	%80	350 (%80)=280	350 (%20)=70	280/180=1,555	2

Çizelge 4.8. Kullanılacak elektrikli otobüslerin minimum şarj süresinin belirlenmesi

Model	Batarya Kapasitesi (<i>kWh</i>)	150 kW Şarj Gücüne Sahip Olan Şarj Cihazı İle Şarj Edilirse Şarj Süresi (<i>sa</i>)	150 kW Şarj Gücüne Sahip Olan Şarj Cihazı İle Şarj Edilirse Şarj Süresi = Minimum Şarj Süresi (<i>dk</i>)	Üretici Firmanın Belirttiği Şarj Gücüne Sahip Olan Şarj Cihazı İle Şarj Edilirse Batarya Şarj Oranı (<i>km/dk</i>)	Minimum Şarj Süresi Boyunca Üretici Firmanın Belirttiği Şarj Gücüne Sahip Olan Şarj Cihazı İle Şarj Edilirse Minimum Kazanılan Menzil (<i>km</i>)
JEST ELECTRIC	88	88/150=0,587	36	2,545	36 (2,545)=92
MD9 ELECTRICITY	200	200/150=1,333	80	1,533	80 (1,533)=123
AVENUE ELECTRON	400	400/150=2,667	160	1,555	160 (1,555)=249

Örneğin; 210 kilometre menzile sahip olan elektrikli otobüs, 168 km olan kullanılabilir menzilini 80 kW şarj gücüne sahip olan şarj cihazı ile 66 dakikada kazanmaktadır. Bu elektrikli otobüsün batarya şarj oranı, dakika başı kazandığı kullanılabilir menzil olan

2,545'tir. Eğer bu elektrikli otobüsün 150 kW şarj gücüne sahip olan şarj cihazı ile şarj edildiğini varsayılırsa, 88 kWh kapasiteye sahip bataryasının %80'ini doldurmak için yaklaşık 36 dakika şarj olmalıdır. Bu nedenle, 210 kilometre menzile sahip olan elektrikli otobüsün minimum şarj süresi, 36 dakika olarak belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında gerçek hayata uygun sonuçlar elde edilmek istendiği için minimum kazanılan menzil hesaplanırken, üretici firmaların belirttiği batarya şarj oranı dikkate alınmıştır. Elektrikli otobüslerin minimum şarj süresini rastgele belirlemek yerine, günümüzde hali hazırda kullanılan 150 kW şarj gücüne sahip olan şarj cihazı ile elektrikli otobüslerin %80'inin doldurulabileceği süre üzerinden belirlenmiştir.

Matematiksel modelin birinci ve ikinci aşamaları, ele alınan A, B, C, D, E, F ve G rotalarının her biri için Gurobi çözücüsü kullanılarak çözdürülmüştür (Çizelge 4.9). Elde edilen sonuçlar A rotası için Ek 2'de, B rotası için Ek 3'de, C rotası için Ek 4'te, D rotası için Ek 5'te, E rotası için Ek 6'da, F rotası için Ek 7'de ve G rotası için Ek 8'de verilmiştir.

Çizelge 4.9. Rotaların birinci ve ikinci aşama sonuçları

Rota	Matematiksel Modelin Birinci Aşama Sonucu-Elektrikli Otobüs Sayısı	Matematiksel Modelin İkinci Aşama Sonucu- Günlük Toplam Şarj Süresi (dk)
A	10	1555
B	10	1352
C	4	720
D	7	900
E	5	900
F	6	1560
G	6	960

4.2. Duyarlılık Analizi

Geliştirilen matematiksel modelin etkinliğini test etmek ve minimum şarj süresi ve batarya kullanım oranının sonuçlara etkisini görmek amacıyla, A ve B rotası farklı parametreler ile çalıştırılmıştır. Sonuçları değerlendirmek için iki performans göstergesi belirlenmiştir. Belirlenen iki performans göstergesi, toplu taşıma sisteminde elektrikli otobüs kullanılmasında karar vericiler için büyük bir endişe olan menzil ile ilgilidir.

Elektrikli otobüsün i seferini gerçekleştirdikten sonra kalan menzili olan E_i 'lerin minimum değeri, performans göstergesi olarak belirlenmiştir. Elektrikli otobüslerin şarj öncesi kalan menzillerinin minimum değeri, diğer performans göstergesi olarak kabul edilmiştir. Belirlenen iki performans göstergesi, elektrikli otobüslerin öngörülenden fazla menzil yapması sonucu meydana gelebilecek yolda kalma gibi istenmeyen durumlara karşı matematiksel modelin hangi parametreler için daha iyi sonuçlar verdiğini yorumlamaya yardımcı olmaktadır. Farklı minimum şarj süreleri ve batarya kullanım oranları için elde edilen sonuçlar arasından iki performans göstergesinin en büyük olduğu sonucun istenmeyen durumların ortaya çıkma riskinin en az olduğu sonuç olduğu öngörülmektedir. Minimum şarj süreleri; A ve B rotasında kullanılacak elektrikli otobüslerin bataryalarının %80'ini 80 kW, 120 kW, 150 kW, 180 kW şarj gücüne sahip olan şarj cihazlarıyla doldurmak için gereken süreler olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.10).

Çizelge 4.10. A ve B rotası için belirlenen minimum şarj süreleri

Rota	Otobüsün Batarya Kapasitesi (kWh)	Şarj Cihazının Gücü (kW)	İlgili Şarj Cihazı İle Şarj Gücüne Sahip Olan Şarj Süresi (sa)	Minimum Şarj Süresi (dk)
A/ B	88	80	88/80=1.1	66
A/ B	88	120	88/120=0.733	44
A/ B	88	150	88/150=0.587	36
A/ B	88	180	88/180=0.488	30

A rotası için ele alınan senaryoların minimum şarj süreleri ve batarya kullanım oranları, Çizelge 4.11'de verilmiştir. Elektrikli otobüsler, belirlenen minimum şarj süreleri boyunca elektrikli otobüsleri üreten firma tarafından verilen batarya şarj oranında menzil kazanabilmektedir. Örneğin, A rotasında görev alan elektrikli otobüsün bataryasının %80'inin 180 kW şarj gücüne sahip olan şarj cihazı ile şarj edilme süresi 30 dakikadır. 210 kilometre menzile sahip olan elektrikli otobüsün şarj olduğu 30 dakika boyunca bataryanın %80'i olan 168 kilometre menzil kazanacağı düşünülmemelidir. Minimum kazanılan menzil, üretici firma tarafından verilen batarya şarj oranı olan 2,545 kilometre/dakika üzerinden hesaplanmaktadır. Elektrikli otobüs, gerçek hayatta dakikada 2,545 kilometre kazanabildiğinden dolayı 30 dakika boyunca şarj olduğunda 77 kilometre menzil kazanacağı kabul edilmektedir. Özet olarak; minimum şarj süresi 30 dakika olarak

belirlendiğinde, elektrikli otobüsler her şarj işleminde en az 77 kilometre kazanabilir iken, en fazla da 168 kilometre kazanabilmektedir.

Çizelge 4.11. A rotası için ele alınan senaryoların minimum şarj süreleri ve batarya kullanım oranları

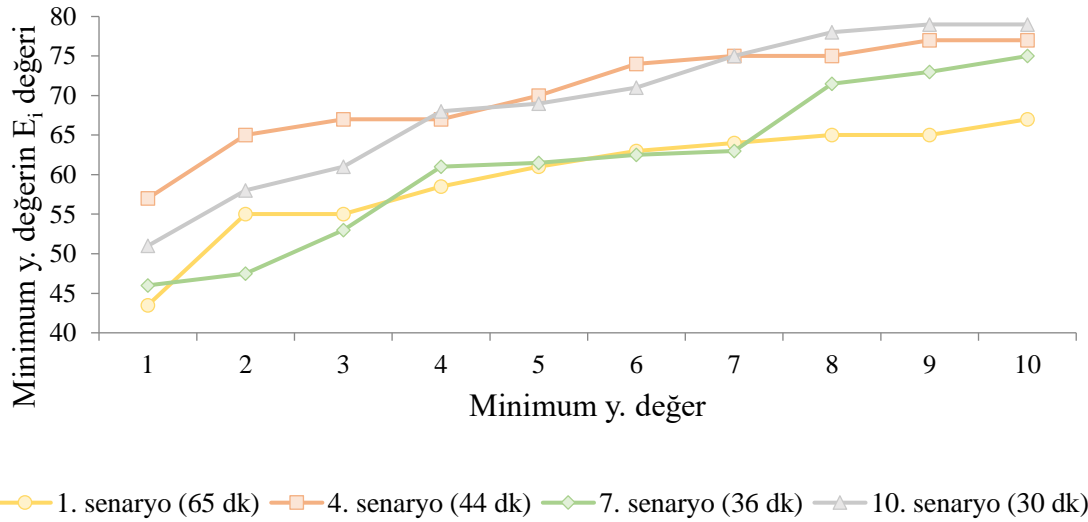
Senaryo Adı	Minimum Şarj Süresi (dk)	80 kW Şarj Gücüne Sahip Olan Şarj Cihazı İle Şarj Edilirse Batarya Şarj Oranı (km/dk)	Minimum Kazanılan Menzil (km)	Batarya Kullanım Oranı	Kullanılabilir Menzil (km)
1. senaryo	66	2,545	66 (2,545)=168	%80	210 (%80)=168
2. senaryo	66	2,545	66 (2,545)=168	%75	210 (%75)=157,5
3. senaryo	66	2,545	66 (2,545)=168	%70	210 (%70)=147
4. senaryo	44	2,545	44 (2,545)=112	%80	210 (%80)=168
5. senaryo	44	2,545	44 (2,545)=112	%75	210 (%75)=157,5
6. senaryo	44	2,545	44 (2,545)=112	%70	210 (%70)=147
7. senaryo	36	2,545	36 (2,545)=92	%80	210 (%80)=168
8. senaryo	36	2,545	36 (2,545)=92	%75	210 (%75)=157,5
9. senaryo	36	2,545	36 (2,545)=92	%70	210 (%70)=147
10. senaryo	30	2,545	30 (2,545)=77	%80	210 (%80)=168
11. senaryo	30	2,545	30 (2,545)=77	%75	210 (%75)=157,5
12. senaryo	30	2,545	30 (2,545)=77	%70	210 (%70)=147

A rotasında batarya kullanım oranı %80 olan senaryoların sonuçlarından elde edilen performans göstergeleri Çizelge 4.12’de verilmiştir. A rotasında batarya kullanım oranı %80 olan senaryolar için performans göstergeleri incelendiğinde, E_i ’lerin minimum değeri ve elektrikli otobüslerin şarj öncesi kalan menzillerinin minimum değeri için en büyük değerlerin 4. senaryoda elde edildiği görülmektedir. 1. senaryo, 4. senaryo, 7. senaryo ve 10. senaryo için E_i ’lerin minimum 10 değeri Şekil 4.1’de verilmiştir. Şekil 4.1 incelendiğinde E_i ’lerin minimum 1. değeri, minimum 2. değeri, minimum 3. değeri, minimum 5. değeri, minimum 6. değeri ve minimum 7. değeri için en büyük değerler 4.Senaryo’da elde edildiği görülmektedir. E_i ’lerin minimum 4. değeri, minimum 8. değeri, minimum 9. değeri ve minimum 10. değeri için en büyük değerler 10.Senaryo’da elde edildiği görülmektedir. Ancak E_i ’lerin minimum 10 değeri karşılaştırıldığında 4. senaryonun 6 değeri diğer senaryoların hepsinden daha büyük ve 4 değeri de 10. senaryoda ortaya çıkan en büyük değerlere çok yakındır. Bu nedenle A rotasında batarya

kullanım oranı %80 iken minimum şarj süresi 44 dakika olan 4. senaryonun en iyi sonucu verdiği söylenebilir.

Çizelge 4.12. A rotasında batarya kullanım oranı %80 olan senaryolar için performans göstergeleri

Senaryo Adı	Minimum Şarj Süresi (dk)	Minimum Menzil (km)	Şarj İşlemi Sayısı	E_i 'lerin Minimum Değeri (km)	Elektrikli Otobüslerin Şarj Öncesi Kalan Menzillerinin Minimum Değeri (km)	Şarj İşlemi Başına Ortalama Şarj Süresi (dk)	Günlük Toplam Şarj Süresi (dk)
1. senaryo	66	42	24	44	47	66	1560
4. senaryo	44	42	30	57	50	50	1492
7. senaryo	36	42	32	46	46	40	1269
10. senaryo	30	42	42	51	44	34	1433



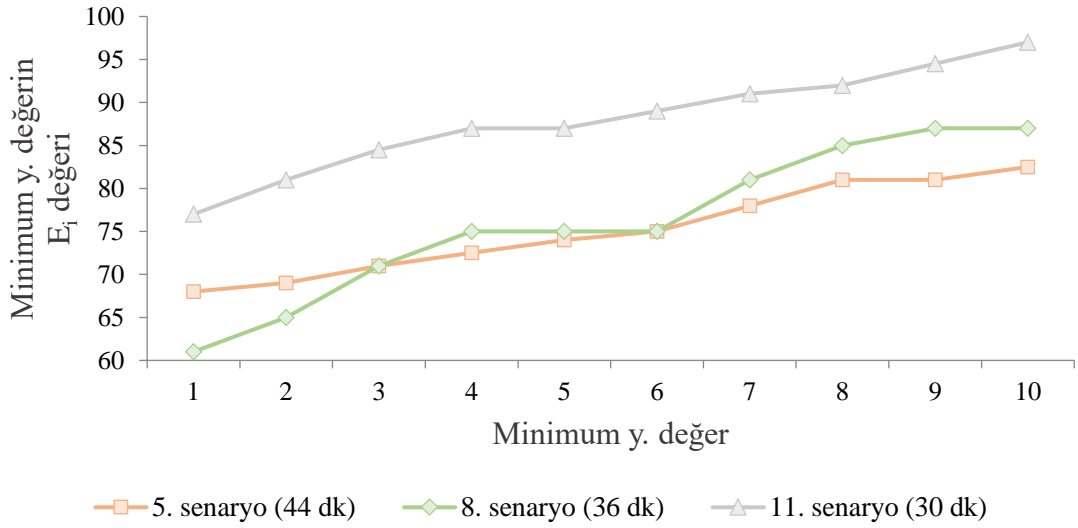
Şekil 4.1. A rotasında batarya kullanım oranı %80 olan senaryolar için E_i 'lerin minimum 10 değeri

A rotasında batarya kullanım oranı %75 olan senaryoların sonuçlarından elde edilen performans göstergeleri Çizelge 4.13'te verilmiştir. 2. Senaryo için Gurobi çözücüsü 24 saat çalışmasına rağmen herhangi sonuç elde edememiştir. A rotasında batarya kullanım oranı %75 olan senaryolar için performans göstergeleri incelendiğinde, E_i 'lerin minimum değeri ve elektrikli otobüslerin şarj öncesi kalan menzillerinin minimum değeri için en büyük değerlerin 11. senaryoda elde edildiği görülmektedir. 5. senaryo, 8. senaryo

ve 11. senaryo için E_i 'lerin minimum 10 değeri Şekil 4.2'de verilmiştir. Şekil 4.2 incelendiğinde E_i 'lerin minimum 10 değeri için en büyük değerlerin tamamının 11. senaryoda elde edildiği görülmektedir. A rotasında batarya kullanım oranı %75 iken minimum şarj süresi 30 dakika olan 11. senaryonun en iyi sonucu verdiği söylenebilir.

Çizelge 4.13. A rotasında batarya kullanım oranı %75 olan senaryolar için performans göstergeleri

Senaryo Adı	Minimum Şarj Süresi (dk)	Minimum Menzil (km)	Şarj İşlemi Sayısı	E_i 'lerin minimum değeri (km)	Elektrikli Otobüslerin Şarj Öncesi Kalan Menzillerinin Minimum Değeri (km)	Şarj İşlemi Başına Ortalama Şarj Süresi (dk)	Günlük Toplam Şarj Süresi (dk)
5. senaryo	44	52.5	29	68	60	49	1435
8. senaryo	36	52.5	39	61	53	39	1534
11. senaryo	30	52.5	42	77	70	34	1426



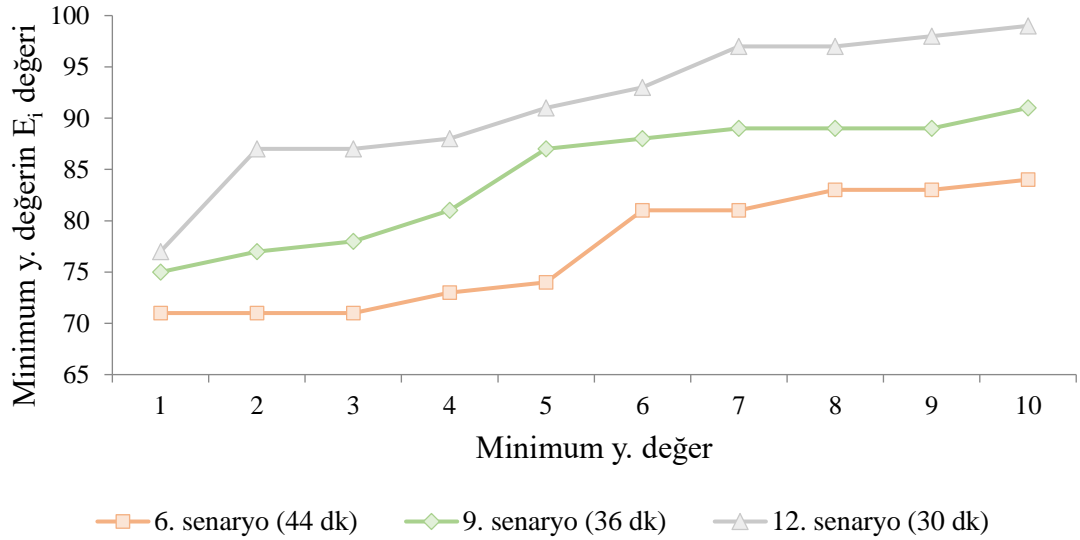
Şekil 4.2. A rotasında batarya kullanım oranı %75 olan senaryolar için E_i 'lerin minimum 10 değeri

A rotasında batarya kullanım oranı %70 olan senaryoların sonuçlarından elde edilen performans göstergeleri Çizelge 4.14'te verilmiştir. 3. Senaryo için Gurobi çözücüsü 24 saat çalışmasına rağmen herhangi sonuç elde edememiştir. A rotasında batarya kullanım

oranı %70 olan senaryolar için performans göstergeleri incelendiğinde, E_i 'lerin minimum değeri ve elektrikli otobüslerin şarj öncesi kalan menzillerinin minimum değeri için en büyük değerlerin 12. senaryoda elde edildiği görülmektedir. 6. senaryo, 9. senaryo ve 12. senaryo için E_i 'lerin minimum 10 değeri Şekil 4.3'te verilmiştir. Şekil 4.3 incelendiğinde E_i 'lerin minimum 10 değeri için en büyük değerlerin 12. senaryoda elde edildiği görülmektedir. A rotasında batarya kullanım oranı %70 iken minimum şarj süresi 30 dakika olan 12. senaryonun en iyi sonucu verdiği söylenebilir.

Çizelge 4.14. A rotasında batarya kullanım oranı %70 olan senaryolar için performans göstergeleri

Senaryo Adı	Minimum Şarj Süresi (dk)	Minimum Menzil (km)	Şarj İşlemi Sayısı	E_i 'lerin minimum değeri (km)	Elektrikli Otobüslerin Şarj Öncesi Kalan Menzillerinin Minimum Değeri (km)	Şarj İşlemi Başına Ortalama Şarj Süresi (dk)	Günlük Toplam Şarj Süresi (dk)
6. senaryo	44	63	31	71	64	48	1484
9. senaryo	36	63	35	75	67	41	1446
12. senaryo	30	63	44	77	70	32	1419



Şekil 4.3. A rotasında batarya kullanım oranı %70 olan senaryolar için E_i 'lerin minimum 10 değeri

B rotası için ele alınan senaryoların minimum şarj süreleri ve batarya kullanım oranları, Çizelge 4.15'te verilmiştir.

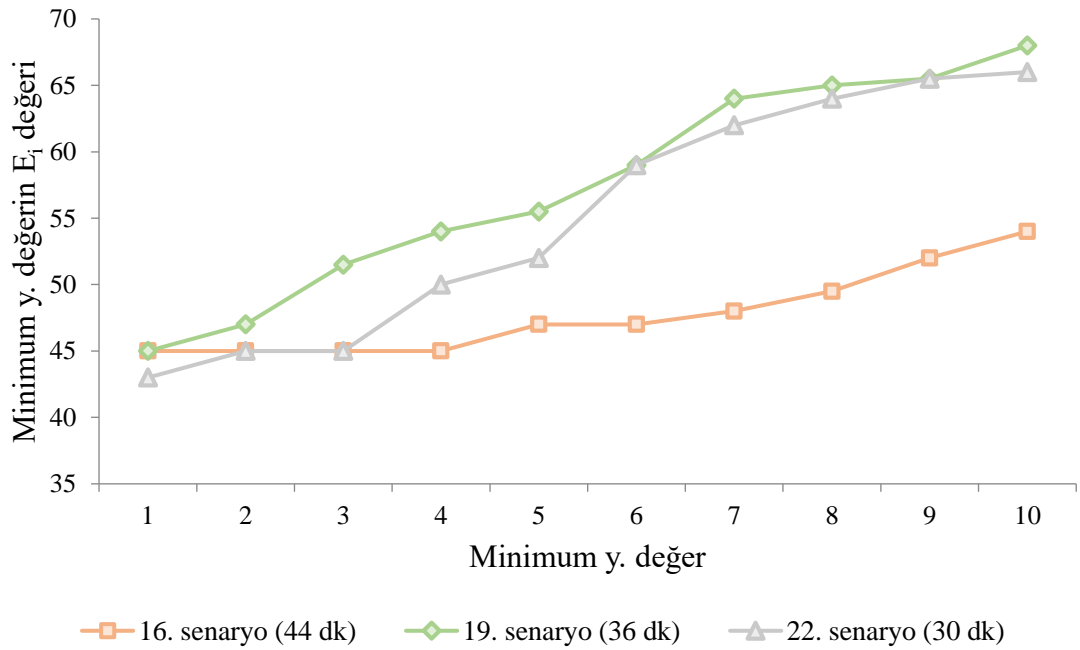
Çizelge 4.15. B rotası için ele alınan senaryoların minimum şarj süreleri ve batarya kullanım oranları

Senaryo Adı	Minimum Şarj Süresi (dk)	80 kW Şarj Gücüne Sahip Olan Şarj Cihazı İle Şarj Edilirse Batarya Şarj Oranı (km/dk)	Minimum Kazanılan Menzil (km)	Batarya Kullanım Oranı	Kullanılabilir Menzil (km)
13. senaryo	66	2,545	66 (2,545)=168	%80	210 (%80)=168
14. senaryo	66	2,545	66 (2,545)=168	%75	210 (%75)=157,5
15. senaryo	66	2,545	66 (2,545)=168	%70	210 (%70)=147
16. senaryo	44	2,545	44 (2,545)=112	%80	210 (%80)=168
17. senaryo	44	2,545	44 (2,545)=112	%75	210 (%75)=157,5
18. senaryo	44	2,545	44 (2,545)=112	%70	210 (%70)=147
19. senaryo	36	2,545	36 (2,545)=92	%80	210 (%80)=168
20. senaryo	36	2,545	36 (2,545)=92	%75	210 (%75)=157,5
21. senaryo	36	2,545	36 (2,545)=92	%70	210 (%70)=147
22. senaryo	30	2,545	30 (2,545)=77	%80	210 (%80)=168
23. senaryo	30	2,545	30 (2,545)=77	%75	210 (%75)=157,5
24. senaryo	30	2,545	30 (2,545)=77	%70	210 (%70)=147

B rotasında batarya kullanım oranı %80 olan senaryoların sonuçlarından elde edilen performans göstergeleri Çizelge 4.16'da verilmiştir. 13. Senaryo için Gurobi çözücüsü 24 saat çalışmasına rağmen herhangi sonuç elde edememiştir. B rotasında batarya kullanım oranı %80 olan senaryolar için performans göstergeleri incelendiğinde, E_i 'lerin minimum değeri ve elektrikli otobüslerin şarj öncesi kalan menzillerinin minimum değeri için en büyük değerlerin 16. senaryo ve 19. senaryoda elde edildiği görülmektedir. 16. senaryo, 19. senaryo ve 22. senaryo için E_i 'lerin minimum 10 değeri Şekil 4.4'te verilmiştir. Şekil 4.4 incelendiğinde E_i 'lerin minimum 10 değeri için en büyük değerlerin 19. senaryoda elde edildiği görülmektedir. B rotasında batarya kullanım oranı %80 iken minimum şarj süresi 36 dakika olan 19. senaryonun en iyi sonucu verdiği söylenebilir.

Çizelge 4.16. B rotasında batarya kullanım oranı %80 olan senaryolar için performans göstergeleri

Senaryo Adı	Minimum Şarj Süresi (dk)	Minimum Menzil (km)	Şarj İşlemi Sayısı	E_i 'lerin minimum değeri (km)	Elektrikli Otobüslerin Şarj Öncesi Kalan Menzillerinin Minimum Değeri (km)	Şarj İşlemi Başına Ortalama Şarj Süresi (dk)	Günlük Toplam Şarj Süresi (dk)
16. senaryo	44	42	27	45	42	51	1365
19. senaryo	36	42	32	45	42	43	1371
22. senaryo	30	42	37	43	42	34	1261



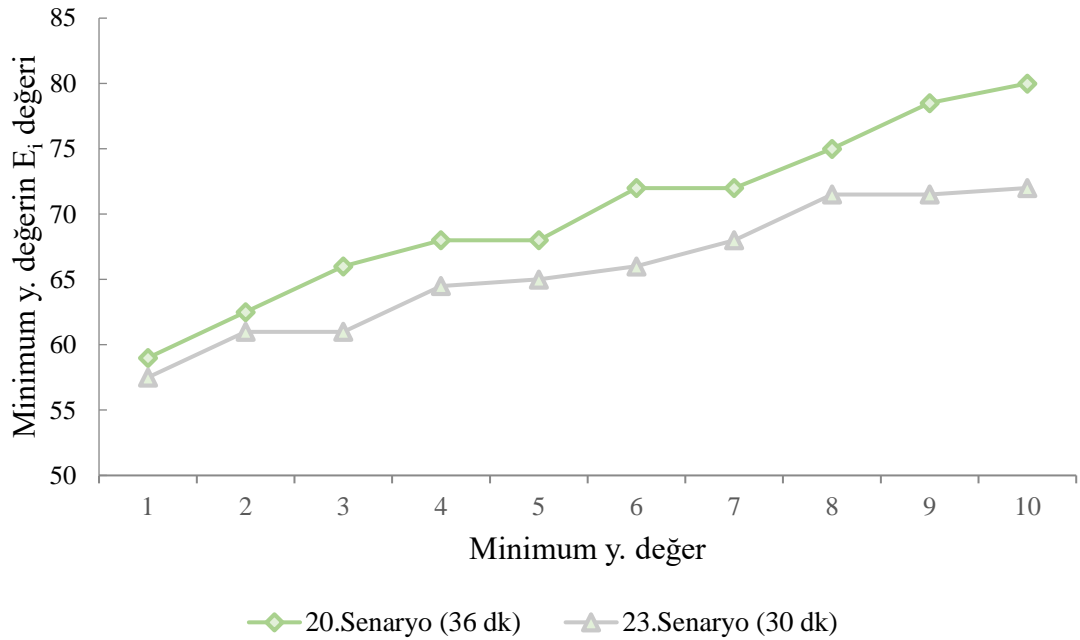
Şekil 4.4. B rotasında batarya kullanım oranı %80 olan senaryolar için E_i 'lerin minimum 10 değeri

B rotasında batarya kullanım oranı %75 olan senaryoların sonuçlarından elde edilen performans göstergeleri Çizelge 4.17'de verilmiştir. 14. senaryo ve 17. senaryo için Gurobi çözücüsü 24 saat çalışmasına rağmen herhangi sonuç elde edememiştir. B rotasında batarya kullanım oranı %75 olan senaryolar için performans göstergeleri incelendiğinde, E_i 'lerin minimum değeri ve elektrikli otobüslerin şarj öncesi kalan menzillerinin minimum değeri için en büyük değerlerin 20.Senaryo'da elde edildiği

görülmektedir. 20. senaryo ve 23. senaryo için E_i 'lerin minimum 10 değeri Şekil 4.5'te verilmiştir. Şekil 4.5 incelendiğinde E_i 'lerin minimum 10 değeri için en büyük değerlerin 20. senaryoda elde edildiği görülmektedir. B rotasında batarya kullanım oranı %75 iken minimum şarj süresi 36 dakika olan 20. senaryonun en iyi sonucu verdiği söylenebilir.

Çizelge 4.17. B rotasında batarya kullanım oranı %75 olan senaryolar için performans göstergeleri

Senaryo Adı	Minimum Şarj Süresi (dk)	Minimum Menzil (km)	Şarj İşlemi Sayısı	E_i 'lerin minimum değeri (km)	Elektrikli Otobüslerin Şarj Öncesi Kalan Menzillerinin Minimum Değeri (km)	Şarj İşlemi Başına Ortalama Şarj Süresi (dk)	Günlük Toplam Şarj Süresi (dk)
20. senaryo	36	52.5	33	59	60	40	1320
23. senaryo	30	52.5	38	58	55	34	1285



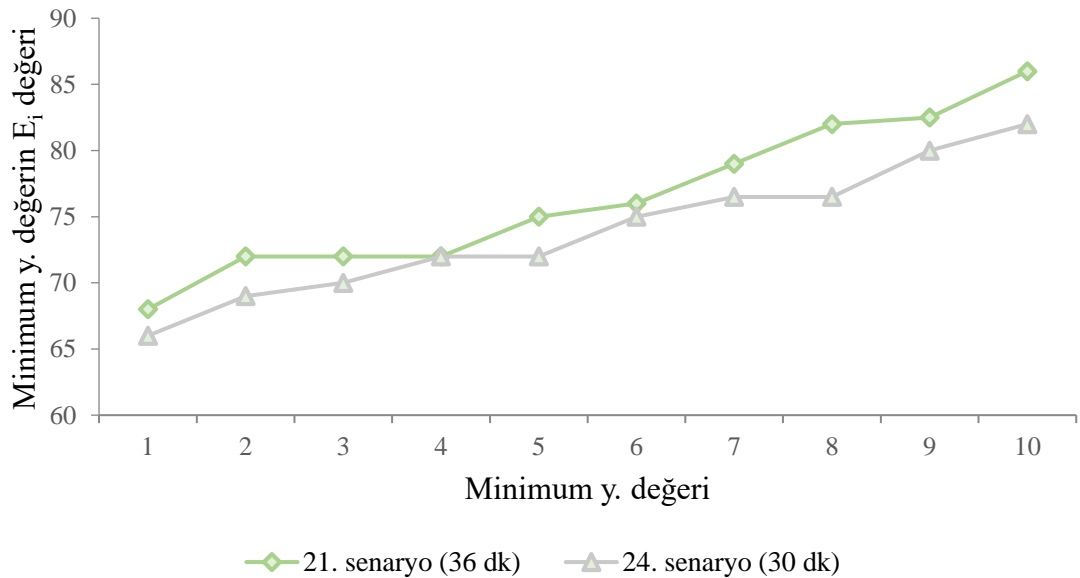
Şekil 4.5. B rotasında batarya kullanım oranı %75 olan senaryolar için E_i 'lerin minimum 10 değeri

B rotasında batarya kullanım oranı %70 olan senaryoların sonuçlarından elde edilen performans göstergeleri Çizelge 4.18'de verilmiştir. 15. senaryo ve 18. senaryo için

Gurobi çözücüsü 24 saat çalışmasına rağmen herhangi sonuç elde edememiştir. B rotasında batarya kullanım oranı %70 olan senaryolar için performans göstergeleri incelendiğinde, E_i 'lerin minimum değeri ve elektrikli otobüslerin şarj öncesi kalan menzillerinin minimum değeri için en büyük değerlerin 21. senaryoda elde edildiği görülmektedir. 21. senaryo ve 24. senaryo için E_i 'lerin minimum 10 değeri Şekil 4.6'da verilmiştir. Şekil 4.6 incelendiğinde E_i 'lerin minimum 10 değeri için en büyük değerlerin 21. senaryoda elde edildiği görülmektedir. B rotasında batarya kullanım oranı %70 iken minimum şarj süresi 36 dakika olan 21. senaryonun en iyi sonucu verdiği söylenebilir.

Çizelge 4.18. B rotasında batarya kullanım oranı %70 olan senaryolar için performans göstergeleri

Senaryo Adı	Minimum Şarj Süresi (dk)	Minimum Menzil (km)	Şarj İşlemi Sayısı	E_i 'lerin minimum değeri (km)	Elektrikli Otobüslerin Şarj Öncesi Kalan Menzillerinin Minimum Değeri (km)	Şarj İşlemi Başına Ortalama Şarj Süresi (dk)	Günlük Toplam Şarj Süresi (dk)
21. senaryo	36	63	33	68	65	41	1337
24. senaryo	30	63	37	66	63	34	1252



Şekil 4.6. B rotasında batarya kullanım oranı %70 olan senaryolar için E_i 'lerin minimum 10 değeri

A ve B rotasında farklı batarya kullanım oranları için performans göstergeleri açısından en iyi sonucun elde edildiği senaryolar değerlendirildiğinde, elektrikli otobüsün kullanılabilir menzilinün tamamını kazanması için gerekli olan şarj süresi olan 66 dakika boyunca şarj edilmesinin daha iyi sonuç elde etmeye faydalı olmadığı görülmektedir (bkz. Çizelge 4.19).

Çizelge 4.19. A ve B rotasında farklı batarya kullanım oranları için en iyi sonucun elde edildiği senaryonun sonuçları

Rota	Batarya Kullanım Oranı	En İyi Sonucun Elde Edildiği Senaryonun Minimum Şarj Süresi (<i>dk</i>)	En İyi Sonucun Elde Edildiği Senaryo İçin E_i 'lerin Minimum Değeri (<i>km</i>)	En İyi Sonucun Elde Edildiği Senaryo İçin Elektrikli Otobüslerin Şarj Öncesi Kalan Menzillerinin Minimum Değeri (<i>km</i>)
A	%80	44	57	50
A	%75	30	77	70
A	%70	30	77	70
B	%80	36	45	42
B	%75	36	59	60
B	%70	36	68	65

A ve B rotasında farklı şarj süreleri için performans göstergeleri açısından en iyi sonucun elde edildiği senaryolarda batarya kullanım oranı %70'tir (bkz. Çizelge 4.20). Bunun sebebi, denenen senaryolar arasında en büyük minimum menzil değeri olan 63 kilometrenin bu batarya kullanım oranında geçerli olmasıdır.

Çizelge 4.20. A ve B rotasında farklı minimum şarj süreleri için en iyi sonucun elde edildiği senaryonun sonuçları

Rota	Minimum Şarj Süresi (<i>dk</i>)	En İyi Sonucun Elde Edildiği Batarya Kullanım Oranı	En İyi Sonucun Elde Edildiği Senaryo İçin E_i 'lerin Minimum Değeri (<i>km</i>)	En İyi Sonucun Elde Edildiği Senaryo İçin Elektrikli Otobüslerin Şarj Öncesi Kalan Menzillerinin Minimum Değeri (<i>km</i>)
A	44	%70	71	64
A	36	%70	75	67
A	30	%75- %70	77	70
B	36	%70	68	65
B	30	%70	66	63

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Tüm gezegeni etkileyen büyük bir problem olarak görülen küresel ısınmanın ortaya çıkmasında, kirletici emisyonlar büyük paya sahiptir (García Hernanz ve ark. 2019). Üretim, enerji ve ulaşım için fosil yakıtlı enerji kaynaklarının tüketilmesi sonucu ortaya çıkan karbon salınımı çevre üzerinde ciddi etkiler oluşturmaktadır. Uzun vadeli ve kalıcı çözümler ile üretim, enerji ve ulaşım sektörü sürdürülebilir hale getirilerek karbon salınımının azaltılması gerekmektedir (Wu ve Madni 2021). Bu amaç doğrultusunda, ulaşım sektörü daha sürdürülebilir hale gelmeye yönelik kapsamlı bir dönüşümün ortasındadır. Yaklaşan iklim krizi, üretici firmalara sıfır karbon salınımına sahip olan araçlara odaklanmaları ve kamu yetkililerine sürdürülebilir ulaşım geçmeleri için baskı yapmaktadır (Reul ve ark. 2021). Elektrikli otobüs, çevre dostu ve enerji tasarrufu sağlayan bir ulaşım aracı olarak sınıflandırılmaktadır (Kühne 2010). Elektrikli otobüsler, karakteristik özellikler nedeniyle toplu taşımaya kolayca dâhil edilebilmektedir (Mahmoud ve ark. 2016). Toplu taşımının elektrifikasyonu gibi yeni yaklaşımların ortaya çıkışı, ulaşımı çok büyük bir değişime sokma potansiyeli taşımaktadır (Reul ve ark. 2021).

Bu tez çalışması, küresel ısınmaya karşı en dikkat çeken yaklaşımlardan biri olan kent ulaşımında çevre dostu elektrikli otobüslerin kullanımına karar verilmesi durumunda toplu taşımının operasyon planlama sürecinde karşılaşılan problemleri ele almıştır. Geliştirilen iki aşamalı karışık tam sayısı doğrusal programlama modeli ile dizel otobüslerin elektrikli otobüsler ile değiştirilmesi durumunda mevcut otobüs tarifesinde belirli olan seferlerin gerçekleştirilmesi için gerekli olan elektrikli otobüs sayısının belirlenmesi, elektrikli otobüslerin çizelgelenmesi ve elektrikli otobüslerin şarj zamanlarının planlanması problemlerine çözüm sunulmuştur. Bursa kent ulaşımının yedi rotasında dizel otobüslerin elektrikli otobüsler ile değiştirilmesi durumunda toplu taşımının operasyon planlama sürecinde karşılaşılan gerçek hayat problemleri için vaka çalışması gerçekleştirilmiştir.

Bursa şehrinin şehir içi tüm toplu taşıma hizmetini yöneten ulaştırma şirketi BURULAŞ yetkilileri ile yapılan görüşmelerde, karar vericilerin toplu taşıma sisteminde elektrikli

otobüs kullanımıyla ilgili endişeleri tespit edilmiştir. Bu endişelerden biri, önceki bölümlerde nedenleri ile birlikte bahsedilen menzil ile ilgilidir. Diğer endişe ise, her bir rota için kurulacak şarj cihazı sayısının fazla olması nedeniyle şebekeye yük getirmeleridir. Bu tez çalışmasında karar vericilerin endişeleri dikkate alınarak, gerçek hayata daha uygun sonuçlar elde eden bir matematiksel model geliştirilmiştir. Bu nedenle, dizel otobüslerin elektrikli otobüsler ile değiştirilmesi durumunda toplu taşımanın operasyon planlama süreci için bu tez çalışmasının kapsamlı rehberlik sağlayacağı düşünülmektedir.

Elektrikli otobüslerin menzilini etkileyen ana parametreleri öngörmek oldukça zordur. Bu tez çalışmasında menzili etkileyen ana parametreleri öngörmek yerine, elektrikli otobüslerin matematiksel modelde hesaplanan menzilden trafik sıklığı, yolun eğimi, klima kullanımı, yolcu sayısı ve ağırlığı gibi nedenlerle daha fazla harcaması durumunda, kalan menzillerinin yeterli olmasını sağlamak için elektrikli otobüslerin her fırsatta şarj olmasına odaklanılmıştır. Böylece, geliştirilen matematiksel model ile elektrikli otobüslerin kalan menzilleri diğer kısıtların izin verdiği ölçüde en büyüklükte, gerçek hayata daha uygun sonuçlar elde edilmektedir. Bursa kent ulaşımında 239 seferin gerçekleştirildiği A rotasında görev alan elektrikli otobüslerin batarya kullanım oranı %80 iken; herhangi bir anda elektrikli otobüslerin kalan menzili, minimum 50 kilometre olmuştur. Daha açık bir ifade ile elektrikli otobüs matematiksel modelde hesaplanan menzilin 50 kilometreye kadar fazlasını harcarsa bile, yolda kalma gibi bir durum meydana gelmeyecektir. Yapılan duyarlılık analizinde batarya kullanım oranı azaltıldıkça, diğer bir ifadeyle elektrikli otobüslerin kullanılabilir menzili azaltıldıkça, yolda kalma gibi istenmeyen durumlar ile karşılaşma riskinin daha az olduğu sonuçlar elde edilmiştir. A rotasında görev alan elektrikli otobüslerin batarya kullanım oranı %70 iken; öngörülemez durum ile karşılaşıldığında harcanabilecek minimum menzil değeri, 70 kilometreye çıkmıştır.

Gelişen şarj teknolojisi ile elektrikli otobüslerin bataryasının çok daha kısa sürelerde doldurulacağı öngörülmektedir (W. Zhang ve ark. 2021). Ancak günümüzde bu şarj süreleri dikkate almayı gerektirecek kadar uzundur. Bu nedenle, şarj süreleri dizel otobüslerin elektrikli otobüsler ile değiştirilmesi durumunda elektrikli otobüslerin

çizelgelenmesi ve elektrikli otobüslerin şarj zamanlarının planlanması problemlerinde karşılanması gereken en zor kısıtlardan biridir. Matematiksel model, elektrikli otobüslerin karar vericiler tarafından belirlenen minimum şarj süresi ile üretici firmalar tarafından belirtilen bataryanın %80'ini doldurmak için gereken şarj süresi arasında herhangi bir süre şarj olmasına olanak sağlayacak şekilde oluşturulmuştur. Elektrikli otobüslere planlanan şarj işlemlerinde şarj sürelerinin değişken olması sayesinde, rota için kurulması gereken şarj cihazı sayısı oldukça azaltılmıştır. Çalışmada, Bursa kent ulaşımında 239 seferin gerçekleştirildiği A rotası ve 233 seferin gerçekleştirildiği B rotası için en az 10'ar elektrikli otobüsün kullanılması gerektiği belirlenmiştir. A ve B rotası için ikişer şarj cihazı kurulacağı varsayılmıştır. Değişken şarj süresi sayesinde; her şarj cihazında aynı anda bir elektrikli otobüs şarj olmasına rağmen, 10 otobüs sadece iki şarj cihazıyla şarj edilip aynı zamanda elektrikli otobüslerin batarya kapasitesinin sınırlamaları da karşılanmıştır.

Elektrikli otobüsler, kendilerine planlanan şarj işlemi için boş sefer gerçekleştirmektedirler. Elektrikli otobüslerin gerçekleştirdiği her boş sefer için bir boş sefer maliyeti ortaya çıkmaktadır. Geliştirilen matematiksel modelde amaç fonksiyonu, elektrikli otobüslerin günlük toplam şarj süresinin en büyüklenmesi olarak belirlenmiştir. Bu amaca, elektrikli otobüslere planlanan şarj işlemi sayısı en büyüklenerek ulaşılmaktadır. Bu durumda, elektrikli otobüslere 10 dakika boyunca şarj olup menzil kazanabileceği şarj işleminin planlanması mümkündür. Ancak elektrikli otobüslerin herhangi bir anda kalan menzilleri en büyüklenirken aynı zamanda boş sefer maliyetinin gereksiz yere artmasının önüne geçilmelidir. Bu sebeple, modele minimum şarj süresi dâhil edilmiştir. Belirlenen minimum şarj süresinin sonuçlara etkisi, performans göstergeleri ile karar vericiler tarafından değerlendirilmelidir. Her bir rota için bu değerlendirme yapıldıktan sonra, ilgili rota için bir şarj stratejisi belirlenmelidir. Bursa kent ulaşımında 239 seferin gerçekleştirildiği A rotasında en iyi sonucun elde edildiği senaryoda minimum şarj süresi 30 dakika ve batarya kullanım oranı %70'tir. A rotasında en iyi sonucun elde edildiği senaryoda performans göstergeleri incelendiğinde, elektrikli otobüsün i seferini gerçekleştirdikten sonra kalan menzili olan E_i 'lerin minimum değeri olarak 77 kilometre ve elektrikli otobüslerin şarj öncesi kalan menzillerinin minimum değeri olarak 70 kilometre elde edilmiştir. Bu senaryoda en iyi sonucu elde etmek için

elektrikli otobüslere 44 şarj işlemi planlanmıştır. A rotasında en iyi ikinci sonucun elde edildiği senaryoda minimum şarj süresi 36 dakika ve batarya kullanım oranı %70'tir. A rotasında en iyi ikinci sonucun elde edildiği senaryoda performans göstergeleri incelendiğinde, E_i 'lerin minimum değeri olarak 75 kilometre ve elektrikli otobüslerin şarj öncesi kalan menzillerinin minimum değeri olarak 67 kilometre elde edilmiştir. Bu senaryoda en iyi ikinci sonucu elde etmek için elektrikli otobüslere 35 şarj işlemi planlanmıştır. Bu durumda karar vericiler, elektrikli otobüslere planlanan şarj işlem sayısının ve boş sefer maliyetinin azaltılması için en iyi ikinci sonucun elde edildiği senaryonun minimum şarj süresini şarj stratejisi olarak kabul edip edemeyeceğini değerlendirmelidir. Yapılan değerlendirme sonrası, E_i 'lerin minimum değerinin 2 kilometre ve elektrikli otobüslerin şarj öncesi kalan menzillerinin minimum değerinin 3 kilometre daha az olmasının riski göze alınırsa minimum şarj süresi 36 dakika olan şarj stratejisinin benimsenmesi mümkündür.

Bu tez çalışmasında karar vericilerin endişeleri ve gerçek hayat verileri dikkate alınarak bir matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel modelde, diğer çalışmalardan farklı olarak şarj cihazı sayısına kısıt getirildiği ve amaç fonksiyonu günlük toplam şarj süresinin en büyüklenmesi olarak belirlendiği için yolda kalma gibi istenmeyen durumlar ile karşılaşma riski azaltılmıştır. Böylece; hem karar vericilerin endişeleri giderilip hem de gerçek hayata daha uygun sonuçlar elde edildiğinden, kent ulaşımında elektrikli otobüs kullanımına geçişin kolaylaştırılması ve hızlandırılması amaçlanmaktadır. Bu geçişin artması sayesinde karbon salınımının azaltılması sonucu, küresel ısınma ile mücadeleye katkı sağlanacağı düşünülmektedir. Başka kentlerde de dizel otobüslerin elektrikli otobüsler ile değiştirilmesi durumunda toplu taşımanın operasyon planlama sürecinde karşılaşılan problemlerin çözümünde uygulanabilir bir model olacağı değerlendirilmektedir. Bursa kent ulaşımının iki rotası için yapılan duyarlılık analizi, iki rota için farklı şarj stratejilerin benimsenmesi gerektiğini açıkça ortaya koymuştur. Bu nedenle; toplu taşımada elektrikli otobüs kullanımına karar verilmesi durumunda, geliştirilen matematiksel model ile farklı şarj stratejileri için sonuç elde edilmesinin ve performans göstergeleri açısından değerlendirilmesinin faydalı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Anonim, 2021a.** İklim Değişikliği ve Uluslararası Müzakereler. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-iklim-degisikligi-ve-uluslararasi-muzakereler>-(Erişim Tarihi: 19.07.2021).
- Anonim, 2021b.** 2030 targets Climate and energy framework. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en-(Erişim Tarihi: 19.07.2021).
- Anonim, 2021c.** Hakkımızda. <https://www.burulas.com.tr/hakkimizda>-(Erişim Tarihi: 19.07.2021).
- Anonim, 2021d.** Jest Electric Şehrin Pozitif Enerjisi. https://www.karsan.com/Download/files/Jest_EV_Katalog_TR.pdf-(Erişim Tarihi: 19.07.2021).
- Anonim, 2021e.** MD9 electricity. https://api.temsa.com/_d/dev/8e6afaad-3ec5-4854-b77d-3d6cba96180c---md9-electricity-tr_dijital.pdf-(Erişim Tarihi: 19.07.2021).
- Anonim, 2021f.** Avenue Electron. https://api.temsa.com/_d/dev/cce147c4-efb1-451b-8fd5-424a62046d66---avenue-electron-tr_dijital.pdf-(Erişim Tarihi: 19.07.2021).
- Bartłomiejczyk, M. 2019.** Driving Performance Indicators of Electric Bus Driving Technique: Naturalistic Driving Data Multicriterial Analysis. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(4).
- Bie, Y., Hao, M., Guo, M. 2021.** Optimal Electric Bus Scheduling Based on the Combination Of All-Stop and Short-Turning Strategies. *Sustainability*, 13(4): 1827.
- Bodin, L., Golden, B. 1981.** Classification in vehicle routing and scheduling. *Networks*, 11(2): 97–108.
- Clarke, G., Wright, J. W. 1964.** Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research*, 12(4): 568–581.
- Dantzig, G. B., Ramser, J. H. 1959.** The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, 6(1): 1-140.
- Deng, R., Liu, Y., Chen, W., Liang, H. 2021.** A Survey on Electric Buses—Energy Storage, Power Management, and Charging Scheduling. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(1): 9-22.
- Eksioglu, B., Vural, A. V., Reisman, A. 2009.** The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Computers and Industrial Engineering*, 57(4): 1472–1483.

El-Taweel, N. A., Mohamed, M., Farag, H. E. 2017. Optimal design of charging stations for electrified transit networks. 2017 IEEE Transportation and Electrification Conference and Expo, 22-24 June, 2017, Chicago, IL, USA.

Elbar, Y. 2016. The Mixed Transit Fleet Bus Scheduling Problem, MSc Thesis, Tel Aviv University, Industrial Engineering, Israel.

Fang, S. C., Ke, B. R., Chung, C. Y. 2017. Minimization of Construction Costs For an All Battery-Swapping Electric-Bus Transportation System: Comparison with an All Plug-In System. *Energies*, 10(7): 890.

Gallet, M., Massier, T., Hamacher, T. 2018. Estimation of the energy demand of electric buses based on real-world data for large-scale public transport networks. *Applied Energy*, 230: 344-356.

García Hernanz, J., Morales-Alonso, G., Fernández Sánchez, G., Pilkington González, E., Sánchez Chaparro, T. 2019. Electrification of Madrid Fleet Public Transport Company (EMT-Madrid): Strategic Analysis and Implementation. *International Journal of Production Management and Engineering*, 7: 107-116.

Hassold, S., Ceder, A. A. 2014. Public transport vehicle scheduling featuring multiple vehicle types. *Transportation Research Part B: Methodological*, 67: 129-143.

Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. Transport and its infrastructure. Climate Change 2007 - Mitigation of Climate Change: Working Group III contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC (pp. 323-386). Cambridge: Cambridge University Press.

Jahic, A., Eskander, M., Schulz, D. 2019. Charging Schedule for Load Peak Minimization on Large-Scale Electric Bus Depots. *Applied Sciences*, 9(9): 1748.

Janovec, M., Koháni, M. 2019. Exact approach to the electric bus fleet scheduling. 13th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport, 29-31 May, 2019, Novy Smokovec, Slovak Republic.

Jiang, M., Zhang, Y., Zhang, C., Zhang, K., Zhang, G., Zhao, Z. 2018. Operation and Scheduling of Pure Electric Buses under Regular Charging Mode. 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems, 4-7 November, 2018, Maui, HI, USA.

Ke, B. R., Chung, C. Y., Chen, Y. C. 2016. Minimizing the costs of constructing an all plug-in electric bus transportation system: A case study in Penghu. *Applied Energy*, 177: 649-660.

Kühne, R. 2010. Electric buses - An energy efficient urban transportation means. *Energy*, 35(12): 4510-4513.

- Li, J. Q. 2014.** Transit Bus Scheduling with Limited Energy. *Transportation Science*, 48(4): 465-694.
- Liu, Y., Liang, H. 2018.** An MHO Approach for Electric Bus Charging Scheme Optimization Based on Energy Consumption Estimation. 2018 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 5-10 August, 2018, Portland, OR, USA.
- Mahmoud, M., Garnett, R., Ferguson, M., Kanaroglou, P. 2016.** Electric buses: A review of alternative powertrains. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62:673-684.
- Morgan, J., Patomäki, H. 2021.** Planetary good governance after the Paris Agreement: The case for a global greenhouse gas tax. *Journal of Environmental Management*, 292: 112753.
- Olmos, J., Lopez, J. A., Gaztanaga, H., Herrera, V. I. 2019.** Analysis of Optimal Charging Points Location and Storage Capacity for Hybrid and Full Electric Buses. 2019 14th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies, 8-10 May, 2019, Monte-Carlo, Monaco.
- Perumal, S. S. G., Dollevoet, T., Huisman, D., Lusby, R. M., Larsen, J., Riis, M. 2021.** Solution approaches for integrated vehicle and crew scheduling with electric buses. *Computers and Operations Research*, 132: 105268.
- Reul, J., Grube, T., Stolten, D. 2021.** Urban transportation at an inflection point: An analysis of potential influencing factors. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 92: 102733.
- Rinaldi, M., Parisi, F., Laskaris, G., D'Ariano, A., Viti, F. 2018.** Optimal dispatching of electric and hybrid buses subject to scheduling and charging constraints. 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems, 4-7 November, 2018, Maui, HI, USA.
- Rogge, M., van der Hurk, E., Larsen, A., Sauer, D. U. 2018.** Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure. *Applied Energy*, 211: 282–295.
- Shen, Y., Xu, J., Li, J. 2016.** A probabilistic model for vehicle scheduling based on stochastic trip times. *Transportation Research Part B: Methodological*, 85: 19-31.
- Szczesniak, J., Massier, T., Gallet, M., Sharma, A. 2019.** Optimal Electric Bus Charging Scheduling for Local Balancing of Fluctuations in PV Generation. 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Asia, 21-24 May, 2019, Chengdu, China.
- Tang, X., Lin, X., He, F. 2019.** Robust scheduling strategies of electric buses under stochastic traffic conditions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 105: 163-182.

Teng, J., Chen, T., Fan, W. “David” 2020. Integrated Approach to Vehicle Scheduling and Bus Timetabling for an Electric Bus Line. *Journal of Transportation Engineering Part A: Systems*, 146(2): 04019073.

van Kooten Niekerk, M. E., van den Akker, J. M., Hoogeveen, J. A. 2017. Scheduling electric vehicles. *Public Transport*, 9: 155–176.

Wang, Y., Huang, Y., Xu, J., Barclay, N. 2017. Optimal recharging scheduling for urban electric buses: A case study in Davis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 100: 115-132.

Wu, Q., Madni, G. R. 2021. Environmental protection in selected one belt one road economies through institutional quality: Prospering transportation and industrialization. *PLoS ONE*, 16(1): e0240851.

Yao, E., Liu, T., Lu, T., Yang, Y. 2020. Optimization of electric vehicle scheduling with multiple vehicle types in public transport. *Sustainable Cities and Society*, 52: 101862.

Zhang, C. 2017. Research on optimal configuration model of city’s bus route electrification. 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration, 26-28 November, 2017, Beijing, China.

Zhang, W., Zhao, H., Song, Z. 2021. Integrating Transit Route Network Design and Fast Charging Station Planning for Battery Electric Buses. *IEEE Access*, 9: 51604 - 51617.

Zhou, G. J., Xie, D. F., Zhao, X. M., Lu, C. 2020. Collaborative Optimization of Vehicle and Charging Scheduling for a Bus Fleet Mixed With Electric and Traditional Buses. *IEEE Access*, 8: 8056–8072.

EKLER

EK 1	Rotaların Seferlerinin Başlangıç ve Bitiş Zamanları
EK 2	A Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar
EK 3	B Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar
EK 4	C Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar
EK 5	D Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar
EK 6	E Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar
EK 7	F Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar
EK 8	G Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar

EK 1. Rotaların Seferlerinin Başlangıç ve Bitiş Zamanları

Rota	Sefer No	Sefer Türü	Başlangıç Zamanı	Bitiş Zamanı	Rota	Sefer No	Sefer Türü	Başlangıç Zamanı	Bitiş Zamanı
A	1	Dönüş	06.26	06.51	D	1	Ring	06.35	07.10
A	2	Gidiş	06.35	07.00	D	2	Ring	06.45	07.20
A	...	...	...	...	D	...	...	...	...
A	110	Gidiş	14.05	14.30	D	61	Ring	21.04	21.39
A	...	...	...	...	D	62	Ring	21.26	22.01
A	115	Dönüş	14.32	14.57	E	1	Ring	06.40	07.22
A	...	...	...	...	E	2	Ring	07.20	09.02
A	118	Gidiş	14.45	15.10	E	...	...	...	...
A	...	...	...	...	E	64	Ring	23.12	23.54
A	239	Gidiş	23.50	00.15	E	65	Ring	00.07	00.49
B	1	Gidiş	06.26	06.56	F	1	Gidiş	06.41	07.31
B	2	Dönüş	06.29	06.59	F	2	Dönüş	06.48	07.38
B	3	Dönüş	06.36	07.06	F	3	Dönüş	06.56	07.46
B	4	Gidiş	06.40	07.10	F	4	Gidiş	07.11	08.01
B	5	Dönüş	06.44	07.14	F	5	Gidiş	07.33	08.23
B	...	...	...	...	F	...	...	...	...
B	230	Dönüş	23.18	23.48	F	70	Dönüş	22.39	23.29
B	231	Gidiş	23.23	23.53	F	71	Dönüş	23.12	00.02
B	232	Dönüş	23.24	23.54	F	72	Dönüş	23.34	00.24
B	233	Gidiş	23.34	00.04	F	73	Gidiş	23.45	00.35
C	1	Ring	06.35	06.55	G	1	Ring	05.40	06.10
C	2	Ring	06.45	07.05	G	2	Ring	06.20	06.50
C	...	...	...	...	G	...	...	...	...
C	118	Ring	23.45	00.05	G	87	Ring	01.00	01.30
C	119	Ring	00.00	00.20	G	88	Ring	01.30	02.00

EK 2. A Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar

i

Elektrikli otobüs, i. seferi gerçekleştiriyor.

p

Elektrikli otobüs, p. şarj cihazında şarj oluyor.

Elektrikli otobüs i. seferin başlangıç durağına ulaştığında, p. şarj cihazında şarj işlemine başlamadan önce ya da depodan ayrılırken kalan menzili (*km*)

Elektrikli otobüsün i. seferin bitiş durağına ulaştığında, p. şarj cihazında şarj işlemini bitirdikten sonra ya da depoya ulaştığında kalan menzili (*km*)

k

k. elektrikli otobüs, şarj oluyor.

k. elektrikli otobüsün şarj işlemine başlama zamanı (*dk*)

k. elektrikli otobüsün şarj işleminin bitiş zamanı (*dk*)

1. şarj cihazı

449	6	492
536	7	575
626	2	668
668	5	710
718	4	760
760	5	800
810	8	850
850	2	890
890	3	930
930	8	970
970	2	1011
1019	4	1057
1074	9	1112
1137	10	1177
1202	1	1247
1258	10	1302
1302	2	1345
1345	9	1412

2. şarj cihazı

422	3	460
460	4	499
549	4	600
608	1	658
658	10	698
698	7	740
749	10	790
790	7	829
829	9	870
870	6	911
911	5	951
951	1	989
989	10	1035
1053	8	1091
1091	7	1131
1156	6	1219
1219	9	1267
1267	3	1305
1307	4	1348
1348	8	1401

EK 2. A Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar (devam)

1. elektrikli otobüs			2. elektrikli otobüs			3. elektrikli otobüs			4. elektrikli otobüs			5. elektrikli otobüs		
210	Depo		210	Depo		210	Depo		210	Depo		210	Depo	
198	3	188	198	4	188	198	2	188	198	5	188	198	6	188
188	9	178	188	11	178	181	2	210	181	2	210	198	13	178
178	16	168	178	19	168	199	28	189	199	35	189	178	20	168
168	23	158	168	26	158	189	37	179	181	2	210	168	27	158
158	31	148	158	34	148	175	47	165	199	63	189	154	39	144
144	44	134	148	42	138	165	55	155	189	69	179	144	46	134
134	52	124	138	49	128	155	62	145	179	78	169	134	54	124
117	2	210	128	57	118	145	68	135	161	1	210	124	61	114
199	76	189	110	1	210	135	73	125	201	95	191	114	67	104
189	81	179	201	79	191	125	80	115	191	102	181	97	1	198
179	88	169	191	86	181	115	97	105	181	107	171	189	85	179
169	93	159	181	91	171	105	106	95	171	114	161	172	1	210
159	100	149	171	98	161	95	111	85	157	132	147	199	104	189
149	105	139	161	103	151	78	1	174	147	137	137	189	109	179
139	112	129	144	1	210	165	129	155	130	1	210	169	116	169
129	117	119	201	121	191	155	136	145	201	158	191	161	2	210
119	124	109	191	128	181	145	141	135	191	165	181	201	133	191
101	2	192	173	1	210	135	148	125	177	174	167	191	140	181
181	142	171	201	146	191	125	156	115	167	183	157	177	161	167
171	149	161	191	153	181	115	163	105	157	190	147	167	168	157
161	155	151	181	160	171	101	172	91	147	197	137	157	177	147
151	162	141	167	170	157	91	181	81	137	206	127	147	185	137
141	169	131	157	179	147	81	188	71	127	211	117	137	194	127
131	176	121	147	187	137	71	195	61	110	2	209	127	201	117
121	184	111	137	196	127	61	202	51	198	228	188	117	208	107
103	1	210	127	203	117	43	2	135	188	233	178	103	216	93
201	209	191	117	210	107	124	220	114	Depo	166		93	221	83
191	214	181	99	1	203	114	225	104				83	226	73
181	235	171	194	227	184	104	230	94				73	231	63
Depo	159		184	232	174	90	236	80				Depo	51	
			Depo	162		Depo	68							

EK 2. A Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar (devam)

6. elektrikli otobüs			7. elektrikli otobüs			8. elektrikli otobüs			9. elektrikli otobüs			10. elektrikli otobüs		
210	Depo		210	Depo		210	Depo		210	Depo		210	Depo	
198	7	188	198	14	188	198	12	188	198	8	188	198	10	188
181	1	210	188	21	178	188	18	178	188	15	178	188	17	178
201	32	191	178	30	168	178	25	168	178	22	168	178	24	168
191	40	181	160	1	210	168	33	158	168	29	158	164	36	154
177	50	167	201	56	191	158	41	148	158	38	148	154	43	144
167	71	157	191	66	181	148	48	138	148	45	138	144	51	134
157	90	147	177	74	167	134	59	124	138	53	128	134	58	124
143	108	133	159	2	210	124	65	114	128	60	118	124	64	114
125	2	210	199	92	189	114	72	104	118	70	108	106	2	202
201	125	191	181	2	210	104	77	94	108	75	98	193	83	183
191	144	181	199	110	189	94	84	84	98	82	88	176	2	210
181	151	171	189	115	179	84	89	74	88	87	78	201	101	191
171	157	161	179	122	169	74	96	64	78	94	68	187	119	177
161	164	151	169	127	159	56	1	152	68	99	58	177	126	167
151	171	141	159	134	149	143	113	133	51	2	150	167	131	157
133	2	210	149	139	139	133	120	123	139	118	129	150	2	210
199	204	189	139	147	129	115	1	210	129	123	119	201	152	191
189	223	179	129	154	119	199	138	189	119	130	109	191	159	181
175	229	165	112	2	208	189	145	179	109	135	99	181	166	171
165	234	155	199	178	189	172	2	210	95	143	85	164	1	210
	Depo	143	189	186	179	199	167	189	85	150	75	199	192	189
			179	193	169	189	175	179	67	1	158	189	199	179
			169	200	159	179	182	169	149	173	139	172	1	210
			159	207	149	169	191	159	139	180	129	201	219	191
			145	215	135	159	198	149	129	189	119	191	224	181
			135	222	125	149	205	139	112	2	210	177	240	167
			121	238	111	139	212	129	201	213	191		Depo	155
				Depo	99	129	217	119	191	218	181			
						112	2	210	173	1	210			
						201	237	191	201	239	191			
							Depo	179		Depo	179			

EK 3. B Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar

i Elektrikli otobüs, i. seferi gerçekleştiriyor.

p Elektrikli otobüs, p. şarj cihazında şarj oluyor.

Elektrikli otobüs i. seferin başlangıç durağına ulaştığında, p. şarj cihazında şarj işlemine başlamadan önce ya da depodan ayrılırken kalan menzili (*km*)

Elektrikli otobüsün i. seferin bitiş durağına ulaştığında, p. şarj cihazında şarj işlemini bitirdikten sonra ya da depoya ulaştığında kalan menzili (*km*)

k k. elektrikli otobüs, şarj oluyor.

k. elektrikli otobüsün şarj işlemine başlama zamanı (*dk*)

k. elektrikli otobüsün şarj işleminin bitiş zamanı (*dk*)

1. şarj Cihazı

421	1	468
545	6	596
600	3	639
645	4	689
698	10	739
748	5	789
798	1	838
838	4	880
888	10	929
938	5	979
988	1	1026
1068	10	1109
1173	5	1215
1225	1	1278
1278	3	1317
1317	7	1355
1355	2	1401

2. şarj cihazı

472	5	512
627	2	679
688	7	728
728	8	769
778	9	819
828	2	869
877	7	921
928	6	970
978	3	1019
1027	4	1072
1083	9	1123
1129	8	1176
1203	7	1245
1249	8	1289
1295	6	1333
1333	5	1393

EK 3. B Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar (devam)

1. elektrikli otobüs			2. elektrikli otobüs			3. elektrikli otobüs			4. elektrikli otobüs			5. elektrikli otobüs		
210	Depo		210	Depo		210	Depo		210	Depo		210	Depo	
197	2	183	203	3	190	203	4	190	197	5	183	203	6	190
180	1	210	190	10	176	190	13	176	183	16	170	190	15	176
207	24	194	176	18	163	176	22	163	170	25	156	173	2	210
194	33	180	163	27	149	163	31	149	156	34	143	203	39	189
180	42	167	149	36	136	149	40	136	143	43	129	189	48	176
167	51	153	136	45	122	136	49	122	129	52	116	176	57	162
153	60	140	122	54	109	119	1	210	116	61	102	162	74	149
140	67	126	102	2	210	207	68	194	99	1	205	149	81	135
126	84	113	207	76	194	194	75	180	202	78	189	132	1	210
113	91	99	194	83	180	180	82	167	189	85	175	207	98	194
96	1	192	180	90	167	167	89	153	175	92	162	194	105	180
189	108	176	167	97	153	153	106	140	162	99	148	180	112	167
176	115	162	150	2	210	140	113	126	145	1	210	167	119	153
162	122	149	207	114	194	126	120	113	207	116	194	150	1	210
149	129	135	194	121	180	113	127	99	194	123	180	207	136	194
132	1	210	180	138	167	96	2	195	180	130	167	194	144	180
207	147	194	167	145	153	192	146	179	167	137	153	180	152	167
194	156	180	153	153	140	179	154	165	150	2	210	167	160	153
180	163	167	140	161	126	165	162	152	207	159	194	153	167	140
167	172	153	126	171	113	152	170	138	194	168	180	140	176	126
153	181	140	113	180	99	138	179	125	180	178	167	123	1	210
140	189	126	99	191	86	125	188	111	167	186	153	207	197	194
123	1	210	86	200	72	111	195	98	153	193	140	194	204	180
207	211	194	72	209	59	98	203	84	140	201	126	174	212	160
194	216	180	59	214	45	81	1	175	126	217	113	157	2	210
174	232	160	42	1	153	172	219	159	113	222	99	207	231	194
	Depo	153	146	234	132	159	224	145	99	229	86		Depo	182
			Depo		125	Depo		138	Depo		74			

EK 3. B Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar (devam)

6. elektrikli otobüs			7. elektrikli otobüs			8. elektrikli otobüs			9. elektrikli otobüs			10. elektrikli otobüs		
210	Depo		210	Depo		210	Depo		210	Depo		210	Depo	
197	7	183	203	8	190	197	9	183	203	12	190	203	11	190
183	14	170	190	17	176	183	20	170	190	21	176	190	19	176
170	23	156	176	26	163	170	29	156	176	30	163	176	28	163
156	32	143	163	35	149	156	38	143	163	41	149	163	37	149
136	1	210	149	44	136	143	47	129	149	50	136	149	46	136
207	58	194	136	53	122	129	56	116	136	59	122	136	55	122
194	65	180	122	62	109	116	63	102	122	66	109	122	64	109
180	72	167	109	69	95	102	70	89	109	73	95	109	71	95
167	79	153	92	2	188	89	77	75	95	80	82	92	1	191
153	96	140	185	86	172	72	2	171	82	87	68	188	88	175
140	103	126	172	93	158	168	94	155	65	2	164	175	95	161
126	110	113	158	100	145	155	101	141	161	104	148	161	102	148
113	117	99	145	107	131	141	118	128	148	111	134	148	109	134
96	1	197	128	2	210	128	125	114	134	128	121	131	1	210
194	134	181	207	124	194	114	132	101	121	135	107	207	126	194
181	142	167	194	133	180	101	140	87	107	143	94	194	131	180
167	150	154	180	141	167	87	155	74	94	151	80	180	139	167
154	157	140	167	149	153	74	164	60	77	2	173	167	148	153
140	166	127	153	158	140	57	2	171	170	173	157	150	1	210
127	174	113	140	165	126	168	187	155	157	182	143	207	169	194
113	183	100	126	175	113	155	196	141	143	190	130	194	177	180
100	192	86	113	184	99	138	2	210	130	198	116	180	185	167
86	199	73	96	2	197	207	213	194	116	207	103	167	194	153
73	206	59	194	205	181	194	218	180	95	223	82	153	202	140
56	1	148	181	210	167	180	233	167	82	228	68	140	208	126
145	221	132	164	1	210	Depo	155	Depo	61	126	215	113		
132	226	118	207	225	194					113	220	99		
Depo	111		194	230	180					99	227	86		
			Depo	173							Depo	74		

EK 4. C Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar

i

Elektrikli otobüs, i. seferi gerçekleştiriyor.

p

Elektrikli otobüs, p. şarj cihazında şarj oluyor.

Elektrikli otobüs i. seferin başlangıç durağına ulaştığında, p. şarj cihazında şarj işlemine başlamadan önce ya da depodan ayrılırken kalan menzili (*km*)

Elektrikli otobüsün i. seferin bitiş durağına ulaştığında, p. şarj cihazında şarj işlemini bitirdikten sonra ya da depoya ulaştığında kalan menzili (*km*)

k

k. elektrikli otobüs, şarj oluyor.

k. elektrikli otobüsün şarj işlemine başlama zamanı (*dk*)

k. elektrikli otobüsün şarj işleminin bitiş zamanı (*dk*)

1. şarj cihazı

519	1	641
645	4	767
793	2	915
948	1	1070
1092	4	1214
1261	2	1383

EK 4. C Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar (devam)

1. elektrikli otobüs			2. elektrikli otobüs			3. elektrikli otobüs			4. elektrikli otobüs		
230	Depo		230	Depo		230	Depo		230	Depo	
220	6	215	220	4	215	220	3	215	220	2	215
215	11	210	215	7	210	215	8	210	215	5	210
210	15	205	210	10	205	210	12	205	210	9	205
200	1	230	205	14	200	205	16	200	205	13	200
224	36	219	200	18	195	200	19	195	200	17	195
219	38	214	195	21	190	195	22	190	195	20	190
214	40	209	190	24	185	190	25	185	190	23	185
209	43	204	185	27	180	185	28	180	185	26	180
204	46	199	180	29	175	180	32	175	180	30	175
199	49	194	175	31	170	175	34	170	170	1	230
194	52	189	170	33	165	170	41	165	224	51	219
189	55	184	165	35	160	165	44	160	219	54	214
184	58	179	160	37	155	160	47	155	214	57	209
179	61	174	155	39	150	155	50	150	209	60	204
174	64	169	150	42	145	150	53	145	204	63	199
169	67	164	145	45	140	145	56	140	199	66	194
159	1	230	140	48	135	140	59	135	194	69	189
224	87	219	130	1	230	135	62	130	189	72	184
219	90	214	224	70	219	130	65	125	184	75	179
214	93	209	219	73	214	125	68	120	179	78	174
209	96	204	214	76	209	120	71	115	174	81	169
204	99	199	209	79	204	115	74	110	169	84	164
199	101	194	204	82	199	110	77	105	159	1	230
194	103	189	204	85	194	105	80	100	224	104	219
189	105	184	199	88	189	100	83	95	219	106	214
184	107	179	194	91	184	95	86	90	214	108	209
179	109	174	189	94	179	90	89	85	209	110	204
174	111	169	184	97	174	85	92	80	204	112	199
169	113	164	179	100	174	80	95	75	199	114	194
164	116	159	174	103	169	75	98	70	194	117	189
159	119	154	169	106	164	70	115	65	189	120	184
	Depo	144	159	1	230		Depo	55		Depo	174
			224	118	219						
				Depo	209						

EK 5. D Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar

i

Elektrikli otobüs, i. seferi gerçekleştiriyor.

p

Elektrikli otobüs, p. şarj cihazında şarj oluyor.

Elektrikli otobüs i. seferin başlangıç durağına ulaştığında, p. şarj cihazında şarj işlemine başlamadan önce ya da depodan ayrılırken kalan menzili (*km*)

Elektrikli otobüsün i. seferin bitiş durağına ulaştığında, p. şarj cihazında şarj işlemini bitirdikten sonra ya da depoya ulaştığında kalan menzili (*km*)

k

k. elektrikli otobüs, şarj oluyor.

k. elektrikli otobüsün şarj işlemine başlama zamanı (*dk*)

k. elektrikli otobüsün şarj işleminin bitiş zamanı (*dk*)

1. şarj cihazı

454	5	636
650	2	832
843	7	1025
1044	6	1226
1239	7	1421

EK 5. D Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar (devam)

1. elektrikli otobüs			2. elektrikli otobüs			3. elektrikli otobüs			4. elektrikli otobüs		
350	Depo		350	Depo		350	Depo		350	Depo	
333	2	316	333	6	316	333	7	316	333	8	316
316	58	299	316	10	299	316	23	299	316	14	299
299	61	282	299	13	282	299	25	282	299	17	282
	Depo	265	282	16	265	282	27	265	282	20	265
			265	19	248	265	29	248	265	30	248
			245	1	350	248	42	231	248	32	231
			343	31	326	231	45	214	231	34	214
			326	44	309	214	48	197	214	36	197
			309	47	292	197	51	180	197	38	180
			292	50	275	180	54	163	180	43	163
			275	53	258	163	57	146	163	59	146
			258	56	241	Depo	129		146	62	129
			241	60	224				Depo		112
			Depo	207							

5. elektrikli otobüs			6. elektrikli otobüs			7. elektrikli otobüs		
350	Depo		350	Depo		350	Depo	
333	4	316	333	3	316	333	5	316
313	1	350	316	11	299	316	9	299
343	22	326	299	24	282	299	12	282
326	26	309	282	33	265	282	15	265
309	28	292	265	35	248	265	18	248
292	40	275	248	37	231	248	21	231
	Depo	258	231	39	214	228	1	350
			211	1	350	343	41	326
			343	55	326	326	46	309
			Depo	309	309	49	292	
					292	52	275	
					272	1	350	
					343	63	326	
					Depo	309		

EK 6. E Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar

i

Elektrikli otobüs, i. seferi gerçekleştiriyor.

p

Elektrikli otobüs, p. şarj cihazında şarj oluyor.

Elektrikli otobüs i. seferin başlangıç durağına ulaştığında, p. şarj cihazında şarj işlemine başlamadan önce ya da depodan ayrılırken kalan menzili (*km*)

Elektrikli otobüsün i. seferin bitiş durağına ulaştığında, p. şarj cihazında şarj işlemini bitirdikten sonra ya da depoya ulaştığında kalan menzili (*km*)

k

k. elektrikli otobüs, şarj oluyor.

k. elektrikli otobüsün şarj işlemine başlama zamanı (*dk*)

k. elektrikli otobüsün şarj işleminin bitiş zamanı (*dk*)

1. şarj cihazı

487	1	669
683	3	865
865	1	1047
1061	3	1243
1255	5	1437

EK 6. E Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar (devam)

1. elektrikli otobüs			2. elektrikli otobüs			3. elektrikli otobüs			4. elektrikli otobüs			5. elektrikli otobüs		
350	Depo		350	Depo		350	Depo		350	Depo		350	Depo	
333	3	316	333	5	316	333	2	316	333	6	316	333	7	316
313	1	350	316	8	299	316	4	299	316	9	299	316	10	299
343	23	326	299	12	282	299	11	282	299	24	282	299	13	282
326	26	309	282	15	265	282	14	265	282	27	265	282	16	265
309	29	292	265	18	248	265	17	248	265	32	248	265	19	248
289	1	350	248	21	231	248	20	231	248	33	231	248	22	231
343	43	326	231	38	214	228	1	350	231	36	214	231	25	214
326	46	309	214	41	197	343	31	326	214	40	197	214	28	197
309	50	292	197	45	180	326	35	309	197	44	180	197	30	180
292	54	275	180	49	163	309	39	292	180	48	163	180	34	163
	Depo	258	163	53	146	289	1	350	163	52	146	163	37	146
			146	56	129	343	58	326	146	57	129	146	42	129
			129	59	112	326	61	309	129	60	112	129	47	112
			112	63	95		Depo	292	112	62	95	112	51	95
			95	64	78				95	65	78	95	55	78
				Depo	61					Depo	61	75	1	350
												343	66	326
													Depo	309

EK 7. F Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar

i Elektrikli otobüs, i. seferi gerçekleştiriyor.

p Elektrikli otobüs, p. şarj cihazında şarj oluyor.

Elektrikli otobüs i. seferin başlangıç durağına ulaştığında, p. şarj cihazında şarj işlemine başlamadan önce ya da depodan ayrılırken kalan menzili (*km*)

Elektrikli otobüsün i. seferin bitiş durağına ulaştığında, p. şarj cihazında şarj işlemini bitirdikten sonra ya da depoya ulaştığında kalan menzili (*km*)

k k. elektrikli otobüs, şarj oluyor.

k. elektrikli otobüsün şarj işlemine başlama zamanı (*dk*)

k. elektrikli otobüsün şarj işleminin bitiş zamanı (*dk*)

1. şarj cihazı

462	2	584
620	4	742
742	3	864
873	6	995
1007	2	1129
1138	5	1260
1273	6	1395

2. şarj cihazı

452	1	574
590	5	712
712	2	834
843	1	965
1059	4	1181
1213	3	1335

EK 7. F Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar (devam)

1. elektrikli otobüs

230	Depo	
217	2	194
194	2	230
223	16	200
200	21	181
181	24	158
151	28	128
128	2	230
223	42	200
193	46	170
170	51	151
151	54	128
128	60	109
109	64	86
86	68	67
	Depo	54

2. elektrikli otobüs

230	Depo	
217	3	198
195	1	230
230	17	211
211	20	188
188	2	230
230	33	211
211	36	188
181	40	158
158	1	230
230	55	211
211	58	188
188	63	169
169	66	146
146	71	127
	Depo	114

3. elektrikli otobüs

230	Depo	
217	5	194
194	9	175
175	13	152
145	18	122
115	22	92
92	1	230
230	35	211
208	39	189
186	43	167
167	48	144
144	52	125
125	56	102
102	2	230
223	70	200
	Depo	187

4. elektrikli otobüs

230	Depo	
217	6	194
187	10	164
164	14	145
142	1	230
230	27	211
211	30	188
181	34	158
151	38	128
128	45	109
106	2	230
230	59	211
211	62	188
188	67	169
169	74	146
	Depo	133

5. elektrikli otobüs

230	Depo	
217	4	198
198	8	175
175	12	156
153	2	230
230	25	211
208	29	189
189	32	166
166	37	147
144	41	125
122	47	103
103	50	80
80	1	230
230	65	211
211	69	188
188	72	169
	Depo	156

6. elektrikli otobüs

230	Depo	
217	7	198
195	11	176
176	15	153
153	19	134
131	23	112
112	26	89
89	31	70
67	1	230
223	44	200
200	49	181
181	53	158
158	57	139
139	61	116
116	1	230
230	73	211
	Depo	198

EK 8. G Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar

i

Elektrikli otobüs, i. seferi gerçekleştiriyor.

p

Elektrikli otobüs, p. şarj cihazında şarj oluyor.

Elektrikli otobüs i. seferin başlangıç durağına ulaştığında, p. şarj cihazında şarj işlemine başlamadan önce ya da depodan ayrılırken kalan menzili (*km*)

Elektrikli otobüsün i. seferin bitiş durağına ulaştığında, p. şarj cihazında şarj işlemini bitirdikten sonra ya da depoya ulaştığında kalan menzili (*km*)

k

k. elektrikli otobüs, şarj oluyor.

k. elektrikli otobüsün şarj işlemine başlama zamanı (*dk*)

k. elektrikli otobüsün şarj işleminin bitiş zamanı (*dk*)

1. şarj cihazı

503	4	625
630	5	752
752	3	874
890	6	1012
1028	5	1150
1150	3	1272
1272	6	1394
1394	3	1516

EK 8. G Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar (devam)

1. elektrikli otobüs

230	Depo	
227	2	214
214	7	201
201	13	188
188	28	175
175	30	162
162	39	149
149	41	136
136	56	123
123	60	110
110	64	97
97	67	84
84	72	71
71	77	58
	Depo	55

2. elektrikli otobüs

230	Depo	
227	6	214
214	12	201
201	18	188
188	22	175
175	32	162
162	34	149
149	43	136
136	45	123
123	48	110
110	52	97
97	76	84
84	80	71
71	86	58
	Depo	55

3. elektrikli otobüs

230	Depo	
227	3	214
214	9	201
201	15	188
188	20	175
175	31	162
162	33	149
147	1	230
227	42	214
214	44	201
201	47	188
188	51	175
175	55	162
162	59	149
149	63	136
134	1	230
227	81	214
212	1	230
227	89	214
	Depo	211

EK 8. G Rotası İçin Elde Edilen Sonuçlar (devam)

4. elektrikli otobüs

230	Depo	
227	5	214
214	11	201
201	17	188
186	1	230
227	29	214
214	38	201
201	49	188
188	53	175
175	57	162
162	61	149
149	65	136
136	68	123
123	71	110
110	74	97
97	78	84
84	82	71
71	84	58
	Depo	55

5. elektrikli otobüs

230	Depo	
227	8	214
214	14	201
201	19	188
188	23	175
175	25	162
162	27	149
147	1	230
227	36	214
214	46	201
201	50	188
186	1	230
227	70	214
214	75	201
201	79	188
188	83	175
175	85	162
	Depo	159

6. elektrikli otobüs

230	Depo	
227	4	214
214	10	201
201	16	188
188	21	175
175	24	162
162	26	149
149	35	136
136	37	123
123	40	110
108	1	230
227	54	214
214	58	201
201	62	188
188	66	175
175	69	162
162	73	149
147	1	230
227	87	214
214	88	201
	Depo	198

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : İlknur ŞEN
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa, 02.01.1995
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Nuri Nihat Aslanoba Anadolu Lisesi, 2012
Lisans : Eskişehir Osmangazi Üniversitesi-Endüstri Mühendisliği, 2016
Yüksek Lisans :

Çalıştığı Kurum/Kurumlar :

İletişim (e-posta) : ilknurr.sen@gmail.com

Yayınları :