

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

---

**Kablosuz Şarj Sistemi Sistemlerinin Şehir İçi Otobüslere  
Entegrasyonu**

---

**Osman BAYSAL**

*Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı*

Ağustos, 2025

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZ ONAYI**

---

**Kablosuz Şarj Sistemi Sistemlerinin Şehir İçi Otobüslere  
Entegrasyonu**

---

**Osman Baysal**

***Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı***

Bu Yüksek Lisans Tezi ././.... Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Değerlendirilmiş ve Oy Birliği / Oy Çokluğu ile Kabul Edilmiştir.

Jüri : Prof. Dr. Kadir AYDIN (Danışman) .....  
: Dr. Öğr. Üyesi Sinan KEYİNCİ .....  
: Prof. Dr. Gökhan TÜCCAR .....

**Bu Tez Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalında Hazırlanmıştır.**

**Tez No:**

**Prof. Dr. Sadık DİNÇER**  
**Enstitü Müdürü**

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## İÇİNDEKİLER

ÖZ .....	I
ABSTRACT.....	II
TEŞEKKÜR.....	III
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	V
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IV
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	VI
1. GİRİŞ .....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
3. MATERYAL VE METOT .....	5
4. KABLOSUZ ŞARJ SİSTEMLERİNİN ŞEHİR İÇİ OTOBÜSLERE ENTEGRASYONU.....	7
4.1. Kablosuz Şarj Sisteminin Tarihçesi .....	7
4.2. Kablosuz Güç Aktarım Yöntemleri .....	8
4.2.1. İndüktif Güç Aktarımı (IPT).....	8
4.2.2. Manyetik Rezonanslı İndüktif Güç Aktarımı (MR-WPT) .....	8
4.2.3. Kapasitif Güç Aktarımı (CPT).....	9
4.2.4. Mikrodalga ve Hibrit Yöntemler.....	9
4.2.5. Karşılaştırmalı Değerlendirme .....	9
4.3. Otobüslerde Statik ve Dinamik Kablosuz Şarj .....	10
4.3.1. Statik Kablosuz Şarj Sistemleri.....	10
4.3.2. Dinamik Kablosuz Şarj Sistemleri .....	11
4.3.3. Karşılaştırmalı Değerlendirme .....	11
4.4. Temel Fiziksel Parametreler .....	11
4.4.1. Hava Boşluğu.....	11
4.4.2. Çalışma Frekansı ve Manyetik Alan Parametreleri.....	12
4.4.3. Güç Aktarım Kapasitesi ve Verimlilik.....	12
4.4.4. Isıl Yönetim.....	12
4.4.5. Parametrelerin Karşılaştırılması.....	12
4.5. Uluslararası Standart ve Regülasyonlar .....	13
4.5.1. Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) Standartları .....	13
4.5.2. Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) Standartları.....	13
4.5.3. Amerika Otomotiv Mühendisleri Derneği (SAE) Standartları .....	13

4.5.4. Kablosuz Güç Konsorsiyumu Standartları.....	13
4.5.5. Elektromanyetik Alan ve Sağlık Düzenlemeleri.....	13
4.5.6. UNECE Regülasyonları: Avrupa Birliği Yasal Çerçevesi.....	14
4.6. Kablosuz Şarj Sistemlerinin Uygulama Örnekleri.....	14
4.6.1. Kuzey Amerika .....	14
4.6.2. Avrupa.....	15
4.6.3. Asya .....	16
4.6.4. Yorum ve Gelecek Perspektifi .....	16
4.7. Kablosuz Şarj Sistemlerinin Şehir İçi Otobüslere Uygulanması .....	16
4.7.1. Alıcı Sistemlerin Konumlandırılması ve Şasi Yapısına Etkileri.....	16
4.7.2. Elektromanyetik Güvenlik ve Kalkanlama .....	17
4.7.3. Batarya Yerleşimi ve Menzil Optimizasyonu .....	17
4.7.4. Termal Yönetim .....	18
4.7.5. İç Mekân Tasarımı ve Yolcu Konforu .....	18
4.7.6. Kentsel Entegrasyon .....	18
4.7.7. Sürdürülebilirlik.....	19
5. ADANA BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİ UYGULAMA ÖNERİSİ.....	21
5.1. Şarj Sisteminin Belirlenmesi.....	25
5.1.1. Yol Tarafı Bileşenleri.....	26
5.1.2. Araç Tarafı Bileşenleri.....	27
5.2. Güzergâh Belirlenmesi.....	28
5.3. Şarj Senaryosunun Belirlenmesi .....	30
5.4. Yatırım Maliyetleri .....	33
5.5. İşletme Bedelleri .....	35
5.6. Yolcu Sayısının Değişimi ve Gelirler .....	37
5.7. Yatırım Geri Dönüşü (ROI) .....	38
5.8. Dönüşümün Dezavantajları.....	40
5.9. Sürdürülebilir Enerji Çözümleri.....	40
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	43
6.1. Teknik Bulgular .....	43
6.2. Ekonomik ve Operasyonel Bulgular .....	43
6.3. Kentsel ve Çevresel Bulgular.....	44
6.4. Öneriler .....	44

6.5. Genel Değerlendirme .....	45
7. KAYNAKLAR .....	47
ÖZGEÇMİŞ .....	51



---

## Kablosuz Şarj Sistemi Sistemlerinin Şehir İçi Otobüslere Entegrasyonu

---

Osman BAYSAL

*Danışman: Prof. Dr. Kadir AYDIN*

*Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı*

### ÖZ

Bu yüksek lisans tezinde, kablosuz şarj sistemlerinin şehir içi elektrikli otobüslere entegrasyonu teknik, tasarımsal ve ekonomik açıdan incelenmiştir. Çalışma kapsamında, özellikle alıcı sistemlerin konumlandırılması, batarya yerleşimi, termal yönetim, iç mekân tasarımı, elektromanyetik güvenlik, kentsel entegrasyon ve sürdürülebilirlik gibi teknik ve operasyonel parametreler detaylı olarak ele alınmıştır. Kablosuz şarj teknolojisinin sunduğu statik ve dinamik uygulama seçenekleri, otobüslerin batarya gereksinimlerini optimize etme, menzil sürekliliğini artırma ve toplam sahip olma maliyetini azaltma potansiyeli açısından değerlendirilmiştir. Literatür incelemelerine ek olarak, Adana kenti özelinde geliştirilen bir örnek senaryo üzerinden dönüşüm planlaması ve yatırım geri dönüş süresi analizleri yapılmıştır. Elde edilen bulgular, kablosuz şarj sistemlerinin yalnızca enerji aktarımını değil, aynı zamanda sürdürülebilir, güvenli ve yüksek verimli bir şehir içi ulaşım modeli oluşturulmasına katkı sağlayacak bir dönüşüm aracı olduğunu ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Kablosuz şarj, elektrikli otobüs, otobüs tasarımı, dinamik şarj, enerji verimliliği

---

**Integration of Wireless Charging Systems into City  
Buses**

---

**Osman BAYSAL**

*Advisor: Prof. Dr. Kadir AYDIN*

*Department of Automotive Engineering*

**ABSTRACT**

This master's thesis examines the integration of wireless charging systems into urban electric buses from technical, design, and economic perspectives. The study addresses in detail technical and operational parameters, particularly receiver system positioning, battery layout, thermal management, interior design, electromagnetic security, urban integration, and sustainability. The static and dynamic application options offered by wireless charging technology are evaluated for their potential to optimize bus battery requirements, increase range, and reduce total cost of ownership. In addition to literature reviews, transformation planning and return-on-investment analyses are conducted using a sample scenario developed specifically for the city of Adana. The findings demonstrate that wireless charging systems are a transformation tool that will not only transfer energy but also contribute to the creation of a sustainable, safe, and highly efficient urban transportation model.

**Keywords:** Wireless charging, electric bus, bus design, dynamic charging, energy efficiency

## TEŞEKKÜR

Beni bugünlere getiren ailem **Ayşe Gülgün BAYSAL** ve **Nuri BAYSAL**'a edilebilecek tüm teşekkürleri etmek isterim.

Evlilik dönemimize denk gelen bu yüksek lisans tezimi hazırlarken beni hep destekleyen, bana her zaman moral ve motivasyon veren sevgili eşim **İpek İdaye BAYSAL**'a çok teşekkür ederim.

Yüksek Lisans eğitimim süresince bana desteğini esirgemeyen, yol göstericiliği ile her konuda önümü açan ve motivasyon sağlayan kıymetli hocam **Prof. Dr. Kadir AYDIN**'a çok teşekkür ederim.

Özellikle tez yazma döneminde bana sağladığı katkılardan dolayı kıymetli meslektaşım ve hocam **Arş. Gör. İteriş BIÇAK**'a çok teşekkür ederim.

Lisans eğitimimde mesleğe bakış açımın temelini oluşturan çok değerli hocam **Prof. Dr. Sadettin KAPUCU**'ya çok teşekkür ederim.

Otomotiv Sektöründe lider otobüs üreticisi ve yaklaşık 4 senedir başarılı güzel işlerin bir parçası olmaktan gurur duyduğum Temsa'daki tüm çalışma arkadaşlarıma, mesleki olarak gelişimime çok büyük katkıları olan kıymetli yöneticim **Dr. Hakan AKGÜN**'e ve iş arkadaşım sayın **Evren AKPINAR**'a çok teşekkür ederim.

Verdiği geri bildirimler ve mesleki gelişimime katkısından dolayı **Kerem İPEK**'e çok teşekkür ederim.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Temsa Avenue EV Hızlı Şarj İstasyonunda (Samsun) (Anonim1, 2025).....	1
Şekil 4.1 İndüktif Güç Transferi (Hajjine, 2016).....	8
Şekil 4.2 Manyetik Rezonanslı İndüktif Güç Aktarımı (Anonim5, 2025).....	8
Şekil 4.3 Kapasitif Güç Aktarımı (Anonim5, 2025).....	9
Şekil 4.4 Mikrodalga Güç Transferi (Wang, 2022).....	9
Şekil 4.5 Wenatchee, Washington, Link Transit- BYD Uygulaması (Anonim4, 2020).....	14
Şekil 4.6 The Antelope Valley Transit Authority (AVTA), Metro, Los Angeles (Anonim5, 2025)	15
Şekil 4.7 Bombardier PRIMOVE (Anonim3, 2025).....	15
Şekil 4.8 Kablosuz Şarj Alıcılarının Araç Altına Konumlandırılması (Avenue Electron).....	17
Şekil 5.1 Adana Şehri Google Earth Görünümü (Anonim6, 2025).....	21
Şekil 5.2 Adana Şehri Ana Yolları (Anonim6, 2025).....	22
Şekil 5.3 Adana Kent içi Elektronik Kart ile Biniş Ücret Tarifesi (Anonim3, 2025).....	22
Şekil 5.4 Adana Toros Mahallesi ile Büyük Saat Arası Yol Tarifi (Anonim7, 2025).....	23
Şekil 5.5 Adana Yakıt Fiyatları (Anonim2, 2025).....	24
Şekil 5.6 ENRX Birincil Sarım (Verici) Ünitesi.....	26
Şekil 5.7 ENRX Yol Tarafı Birincil Sarım Montaj Ölçüleri.....	26
Şekil 5.8 ENRX Yol Tarafı Bileşenleri Yerleşim Önerileri.....	27
Şekil 5.9 ENRX Dönüştürücü ve Sigorta Kabini.....	27
Şekil 5.10 ENRX PICREC200 İkincil Sarım (Alıcı) Ünitesi.....	27
Şekil 5.11 ENRX Batarya- Şarj Arayüzü.....	28
Şekil 5.12 ENRX Kullanıcı Arayüzü.....	28
Şekil 5.13. 114 Numaralı Otobüs Güzergahı (Anonim6, 2025).....	29
Şekil 5.14. 114 Numaralı Hat Otobüsleri Hareket Planı.....	29
Şekil 5.15. M1 Real Durağı (Anonim6, 2025).....	30
Şekil 5.16. Yatırım Geri Dönüş Hesaplaması.....	38
Şekil 5.17 Priz Şarjlı Senaryo Yatırım Geri Dönüşü.....	39
Şekil 5.18. M1 Real AVM Otopark Bölgesi (Anonim6, 2025).....	41

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 4.1 Kablosuz Güç Aktarım Yöntemleri (Bilgiç, 2024) (Fisher, 2014)	10
Tablo 4.2. Otobüslerde Statik ve Dinamik Kablosuz Şarj Karşılaştırması	11
Tablo 4.3. Temel Fiziksel Parametreler	12
Tablo 5.1 Toros Mahallesi ile Büyük Saat Arası Yakıt Tüketim Hesaplaması	23
Tablo 5.2 Electreon ve ENRX şarj sistemlerinin kıyaslanması	25
Tablo 5.3 114 Numaralı Hat Otobüs Saat Çizelgesi	30
Tablo 5.4 Priz Şarjlı ve Kablosuz Şarjlı Araç Kıyaslaması	31
Tablo 5.5 Priz Şarjlı ve Kablosuz Şarjlı Araçların Aylık Tüketim Miktarları	32
Tablo 5.6 Kablosuz Şarj ile Çalışan Otobüsün Her Turda Tüketeceği Enerji	32
Tablo 5.7 Statik Şarj Miktarı	33
Tablo 5.8 Avenue Electron 12m Araç Fiyatı	33
Tablo 5.9 ENRX Statik Şarj Sistemi Maliyetleri (Ağustos 2025)	34
Tablo 5.10 Şarj İstasyonu Elektrik Altyapısı, Montaj ve Devreye Alma Bütçesi (Ağustos 2025)	34
Tablo 5.11 Toplam Yatırım Bütçesi	34
Tablo 5.12 Yıllık Enerji Maliyetleri	35
Tablo 5.13 Yıllık Servis Bakım Bütçesi	35
Tablo 5.14 Yıllık Personel Maliyeti	36
Tablo 5.15 Yıllık Sigorta ve Vergi Maliyeti	36
Tablo 5.16 1. yıl için hesaplanan işletme giderleri	36
Tablo 5.17 Toplam İşletme Giderleri	37
Tablo 5.18.10 Yıllık İşletme Gelirleri	38
Tablo 5.19 Priz Şarjlı Senaryo Yatırım Bedelleri	39

## SİMGELER VE KISALTMALAR

AC	:	Alternatif Akım
BMS	:	Batarya Yönetim Sistemi
CPT	:	Kapasitif Güç Transferi
DC	:	Doğru Akım
DSP	:	Dijital Sinyal İşleyici
DWPT	:	Dinamik Kablosuz Güç Transferi
EMC	:	Elektromanyetik Uyumluluk
EMI	:	Elektromanyetik Uyumluluk
EMF	:	Elektromanyetik Alan
FEM	:	Sonlu Elemanlar Yöntemi
IEC	:	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
ICNIRP	:	İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu
IEEE	:	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IP	:	Koruma Sınıfı (Ingress Protection)
ISO	:	Uluslararası Standardizasyon Örgütü
NFC	:	Yakın Alan İletişimi
PFC	:	Güç Faktörü Düzeltimi
Qi	:	Kablosuz Güç Konsorsiyumu Standardı
RF	:	Radyo Frekansı
ROI	:	Yatırım Geri Dönüşü
SAE	:	Otomotiv Mühendisleri Derneği
TCO	:	Toplam Sahip Olma Bedeli
UNECE	:	Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu
WPT	:	Kablosuz Güç Transferi
$\eta$	:	Sistem Verimliliği
f	:	Frekans
P	:	Güç
V	:	Gerilim / Voltaj
I	:	Akım
R	:	Direnç
L	:	Endüktans
C	:	Kapasitans
Q	:	Rezonans Kalite Faktörü
T	:	Sıcaklık
T	:	Zaman

S	:	Güç Transfer Alanı
$\Phi$	:	Manyetik Akı
B	:	Manyetik Alan Şiddeti
E	:	Elektrik Alan Şiddeti
$\mu$	:	Manyetik Geçirgenlik
$\sigma$	:	Elektriksel İletkenlik
l	:	Litre
kg	:	Kilogram
kWh	:	Kilowatt Saat
W	:	Watt
EUR/W	:	Euro / Watt
EUR/Wh	:	Euro / Watt Saat
kW	:	Kilowatt
km	:	Kilometre
TL	:	Türk Lirası
EUR	:	Euro

## 1. GİRİŞ

Artan kentleşme, çevresel kaygılar ve enerji verimliliği ihtiyacı, şehir içi ulaşımda daha sürdürülebilir çözümler geliştirilmesini zorunlu hâle getirmiştir.

Elektrikli araçlar bu dönüşümde önemli bir rol oynarken, bu araçların şarj altyapıları da teknolojik gelişmelere paralel olarak yeniden şekillenmektedir.



Şekil 1.1 Temsa Avenue EV Hızlı Şarj İstasyonunda (Samsun) (Anonim1, 2025)

Geleneksel kablolu şarj yöntemlerinin bazı sınırlamaları, kablosuz şarj teknolojilerinin ön plana çıkmasına neden olmuştur.

Kablosuz şarj sistemleri, özellikle şehir içi elektrikli otobüslerde hem operasyonel kolaylık hem de enerji verimliliği sunması açısından önemli bir alternatif hâline gelmektedir. Araçların durağan ya da hareket hâlindeyken şarj edilebilmesi, batarya boyutlarının küçültülmesine, menzil sürekliliğine ve toplam maliyetlerin azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

Bu tez çalışması, kablosuz şarj teknolojisinin şehir içi otobüslere entegrasyonunu teknik, tasarımsal ve ekonomik açılardan ele almaktadır. Çalışmada öncelikle teknolojinin tarihsel gelişimi, güç aktarım yöntemleri ve uygulama biçimleri incelenmiş; ardından alıcı sistemlerin konumlandırılması, batarya yerleşimi, iç mekân düzeni, termal yönetim gibi tasarımsal etkiler değerlendirilmiştir.

Ayrıca sistemin uluslararası standartlara ve regülasyonlara uygunluğu, çeşitli ülkelerdeki uygulama örnekleriyle birlikte analiz edilmiştir. Son olarak Adana kenti için geliştirilen senaryo kapsamında, kablosuz şarj sisteminin uygulanabilirliği, yatırım geri dönüş süresi (ROI) gibi faktörler üzerinden teknik ve ekonomik bir değerlendirme yapılmıştır.

Bu çalışma, kablosuz şarj teknolojisinin sadece bir enerji iletim yöntemi değil, aynı zamanda geleceğin sürdürülebilir şehir içi ulaşım sistemlerinin temel bileşenlerinden biri olduğunu ortaya koymayı amaçlamaktadır.



## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Elektrikli araçlara yönelik kablosuz şarj sistemleri, son on yıl içinde özellikle şehir içi ulaşım uygulamalarında önemli bir araştırma ve geliştirme alanı hâline gelmiştir. Bu alanda yapılan önceki çalışmalar, teknolojinin tarihsel gelişiminden sistem verimliliğine, elektromanyetik güvenlikten batarya yönetimine kadar birçok teknik ve operasyonel boyutta yoğunlaşmıştır.

Literatür incelendiğinde, kablosuz güç aktarımı (WPT) teknolojisinin elektromanyetik indüksiyon ve rezonans prensipleri temelinde evrimleştiği ve farklı uygulama alanlarına yayıldığı görülmektedir.

A. Ahmad ve arkadaşları (2018) kablosuz şarj sistemlerinin genel teknik sınıflandırmasını yaparak; indüktif, rezonanslı, kapasitif ve mikrodalga temelli sistemlerin avantajlarını ve sınırlılıklarını kapsamlı biçimde analiz etmişlerdir. Bu çalışma, teknolojinin mühendislik temelini anlamak açısından literatürde önemli bir referans olarak değerlendirilmektedir. Parametrelerine Fisher ve arkadaşları (2014), elektromanyetik bağlaşım temelli sistemlerin yapısal özelliklerine ve verimlilik parametrelerine odaklanmıştır; özellikle şehir içi toplu taşıma uygulamaları için manyetik hizalamanın önemi üzerinde durmuştur (A. Ahmad, 2018) (Fisher, 2014).

Luo ve arkadaşları (2015) tarafından yapılan çalışma ise, kablosuz şarj sistemlerinin yüksek frekanslı devre teknolojileri ile entegrasyonunu ve bu teknolojilerin mobil sistemlerdeki performansını ortaya koymuştur. Yazarlar, sistem verimliliğini etkileyen faktörleri incelemiş ve özellikle hibrit enerji kaynaklarıyla bütünleştirme konusunda öneriler sunmuşlardır. (Luo, 2023)

Son yıllarda, kablosuz şarjın araç şasi yapısına ve tasarım kriterlerine olan etkisi üzerine de önemli araştırmalar yapılmıştır. He ve arkadaşları (2023), alıcı bobinlerin araç alt yapısında konumlandırılmasının hem verimlilik hem de yapısal bütünlük açısından kritik olduğunu vurgulamış; hava aralığı ve hizalama toleranslarının sistem başarımında belirleyici olduğuna dikkat çekmişlerdir. Ayrıca Attaianesse ve arkadaşları (2024), modüler şarj sistemlerinin araç şasisi üzerindeki mekanik etkilerini inceleyerek, yapısal takviye stratejilerinin geliştirilmesini önermiştir (He, 2023) (Attaianesse, 2024).

Dinamik kablosuz şarj sistemleri (DWPT) üzerine yapılan araştırmalarda ise Bi ve arkadaşları (2020) ve Mahesh ve arkadaşları (2021), hareket halindeki araçlarda enerji aktarımına dair temel verimlilik sorunlarını ele almış; sistemin uygulama potansiyelini ve altyapı gerekliliklerini detaylandırmışlardır. Bu çalışmalar, dinamik sistemlerin batarya kapasitesini küçültme ve operasyonel sürekliliği artırma potansiyelini ortaya koymuştur (Bi, 2020) (Mahesh, 2021).

Son dönemde literatürde, dinamik kablosuz şarj sistemlerinin toplu taşıma araçlarına entegrasyonu, uluslararası standartların gelişimi, yüksek güçlü ve misalignment toleranslı tasarımlar, IPT–CPT hibrit çözümlerinin yaygınlaşması ve elektromanyetik güvenlik düzenlemeleri üzerine yapılan çalışmalar giderek artmaktadır (Palani, 2023) (Colombo, 2022) (Vishnuram P. P.).

Güncel araştırmalarda ayrıca elektromanyetik alan güvenliği, regüasyon uyumu ve standartlar da önemli bir araştırma konusu hâline gelmiştir. UNECE, IEC ve SAE gibi kuruluşlar tarafından yayımlanan regüasyonlar (ör. UNECE R10, R100, IEC 61980, SAE J2954) sistemlerin yasal ve teknik çerçevesini belirlemektedir.

Yine bibliyometrik bir yaklaşımla yapılan Gbey ve arkadaşları'nın (2022) çalışması, kablosuz şarj sistemleri üzerine yapılan akademik yayınların son on yıl içinde istikrarlı biçimde arttığını ve atıf etkisinin ciddi biçimde yükseldiğini göstermiştir. Bu da teknolojinin sadece mühendislik değil, enerji politikaları ve sürdürülebilir ulaşım stratejileri açasından da dikkat çekici hâle geldiğini ortaya koymaktadır (Gbey, 2022).

İstanbul Metrobüs hattına kablosuz şarj uygulaması örneğini inceleyen Özbaş ve arkadaşları ise operasyonel verimliliğin artırılması üzerine yaptıkları çalışmayı 2024 yılında yayınlamıştır (Özbaş, 2024).

Tüm bu çalışmalar, kablosuz şarj sistemlerinin yalnızca bir enerji transfer teknolojisi olmanın ötesinde, elektrikli otobüslerin tasarımı, altyapı planlaması ve şehir içi ulaşım sistemlerinin sürdürülebilirliği açasından bütüncül bir dönüşüm sunduğunu göstermektedir. Bu tez çalışması da önceki literatürü temel alarak kablosuz şarj sistemlerinin şehir içi otobüs tasarımına olan etkilerini çok boyutlu olarak inceleyerek literatüre katkı sunmayı amaçlamaktadır.

### 3. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasında kablosuz şarj sistemlerinin şehir içi otobüslere entegrasyonu konu edilmiştir. IEEE Xplore, ScienceDirect, Google Scholar gibi veri tabanlarından erişilen 60'tan fazla makale sistematik olarak incelenmiştir. Bu inceleme şehir içi otobüslere uygulamaları, sistemin çalışma prensiplerini, uluslararası standartları ve araç tasarımı üzerindeki etkilerini kapsamaktadır.

Çalışma kapsamında ilk olarak bu teknolojinin tarihçesi ve gelişimiyle alakalı detaylı bir inceleme yapılmıştır. Bu inceleme kablosuz güç aktarım yöntemlerinin detaylarını gelişim sürecini baz alarak anlatmaktadır.

Bir sonraki bölümde kablosuz güç aktarımı yöntemlerine yer verilmiştir. Bu inceleme geleneksel yöntemlere kıyasla kablosuz şarj sistemlerinin avantaj ve dezavantajları ile kullanım senaryolarını gösterilmiş ve akademik literatürdeki güncel bilgiler ile detaylandırılmıştır.

Daha sonrasında kablosuz şarj sisteminin araçlara ve şehir içi ulaşım senaryolarına entegrasyonu sürecinde karşılaşılabilecek olan fiziksel parametreler incelenmiştir. Bu fiziksel parametreler araç tasarımlarındaki güncel çalışma konularına ışık tutmaktadır.

Kablosuz şarj sistemlerinin otobüste kullanımında yer alan bileşenler ve aracın teknik mimarisi ile ilgili konular bir sonraki bölümde incelenmiştir. Sistemin her adımı ve içerdiği teknolojik altyapı ile ilgili bilgiler detaylı olarak incelenmiştir. Bu bilgiler hem ticari firmaların ürün kataloglarından hem de literatürdeki güncel araştırmalardan kaynak almıştır.

Devam eden kısımda araçların bu entegrasyon ile uyması gereken uluslararası standart ve regülasyonlar derlenmiş ve incelenmiştir. Ardından kablosuz şarj sistemlerinin Dünya üzerinde çeşitli pilot uygulama örnekleri toparlanmıştır.

Bütün bu bilgiler ile kablosuz şarj sisteminin şehir içi otobüslere entegrasyonu uygulanabilirlik ve sürdürülebilirlik açısından incelenmiştir. Burada temel alınan noktalar, araç tasarım süreçleri, yolcu ve sürücü ergonomisi, kentsel altyapı entegrasyonu ve çevresel sürdürülebilirlik ile maliyet optimizasyonudur.

Bu entegrasyonun yapılması ile şehir içi ulaşımında nasıl bir maliyet avantajı sağlanacağı ile ilgili örnek bir güzergâh dönüştürme projesi tasarlanmış ve şarj etme senaryoları detaylı olarak incelenmiş ve belirlenen güzergâh üzerinde en optimize çözüm elde edilerek nasıl bir proje ile hayata geçirilebileceği gösterilmiştir.

Çalışmadaki teknik ve ekonomik veriler, literatürdeki güncel ortalama değerler ve varsayımsal senaryolara dayanmaktadır.

Erişilebilir saha verileri çok kısıtlı olduğundan ve Türkiye'de henüz bir uygulama örneği olmadığından tüm tüketim ve verim değerleri teorik olarak yer almaktadır.

Elektrik tarifeleri, batarya fiyatları ve altyapı kurulum maliyetleri gibi kalemler sabit kabul edilmiştir.



## 4. KABLOSUZ ŞARJ SİSTEMLERİNİN ŞEHİR İÇİ OTOBÜSLERE ENTEGRASYONU

### 4.1. Kablosuz Şarj Sisteminin Tarihçesi

Kablosuz güç aktarımı (Wireless Power Transfer – WPT) teknolojisi, elektrikli araçların gelişimiyle birlikte son yıllarda stratejik bir önem kazanmış, özellikle enerji sürdürülebilirliğini artırma ve kullanıcı deneyimini iyileştirme potansiyeliyle gelecekte yaygınlaşması beklenmektedir.

Kablosuz güç transferi ilk olarak 19. yy. sonunda Nikola Tesla'nın araştırmalarına dayanmaktadır. Tesla çalışmalarındaki potansiyeli ne kadar iyi açıklamış olursa olsun o günün imkanları ile bu teknolojiyi geliştirmek mümkün olmamıştır. Aynı zamanda Marconi'nin kablosuz iletişim alanındaki çalışmaları da bu alanda nasıl bir potansiyel olduğunu göstermiş ancak teknolojinin gelişmesi yaklaşık bir yüzyıl gecikmiştir (T. S. Chandrasekar Rao, 2016) (A. Ahmad, 2018).

Elektromanyetik indüksiyon, rezonans prensipleri, yüksek frekanslı yarı iletken devreler ve sistem mimarileri gibi çok sayıda alanda yürütülen çalışmalar, WPT sistemlerinin bugün elektrikli araçlarda uygulanabilir hâle gelmesini mümkün kılmıştır.

Özellikle taşınabilir ve tekrar şarj edilebilir bataryaların ve yüksek frekanslı yarı iletken devrelerin geliştirilmesiyle bu sistemler mobil cihazlardan tıbbi ekipmanlara kadar geniş bir uygulama alanına yayılmıştır (I. Okasili, 2022).

2000'li yılların ortalarından itibaren WPT sistemlerindeki gelişim hızlanmış ve SAE J2954 gibi standartlar ile sistem güvenliği ve elektromanyetik uyumluluk nominatif temellere oturtulmuştur. Bu dönemde mühendislik yaklaşımı daha baskın hale gelmiş ve uygulama alanları genişletilmiştir (Ahmed A.S. Mohamed, 2020).

Elektrikli araçlarda WPT uygulaması önce statik sistemlerde görülmektedir. Bu sistemler konumlama hassasiyeti gibi parametrelerin daha kolay sağlanmasından dolayı geliştirme süreçlerinde öne çıkmıştır. Rezonans temelli sistemlerin konum hassasiyetine rağmen yüksek verimle çalışabildiğinin deneysel olarak kanıtlandığı dönemde dinamik sistemlerin uygulanabilirliği gündem edilmiştir.

Araçların hareket halinde şarj edilebilir olması araçların verimliliğini ve enerji sürdürülebilirliğini yüksek oranda artırma kapasitesine sahiptir. Günümüzde elektrikli araçların kablosuz şarj edilebilmesi araç tabanına yerleştirilen bobin sistemleri ile yola döşenen verici bobin sistemleri arasında yüksek verimlilikte ve hareket halinde yapılabilir.

Yatırım maliyetleri bu teknolojinin yaygınlaşmasının önündeki en büyük engeldir ve gelecek dönemde yapılacak çalışmalar bu konuya öncelik vermektedir. Buna paralel olarak sistem güvenliği, manyetik alan güvenliği, altyapı gereksinimlerinin sağlanması da diğer gelişim alanlarıdır.

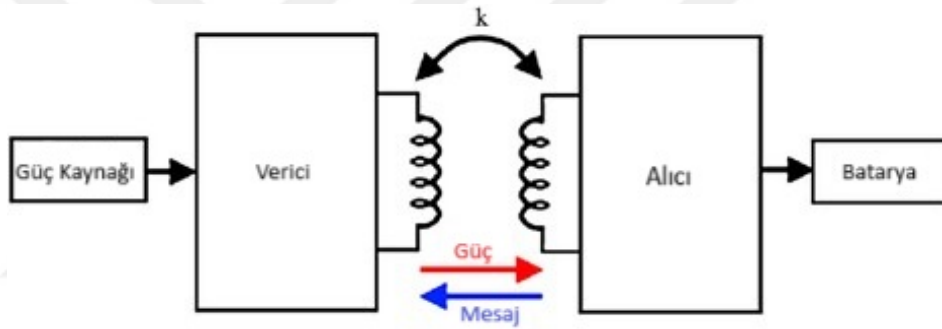
## 4.2. Kablosuz Güç Aktarım Yöntemleri

WPT sistemlerinin elektrikli araçlarda kullanımı özellikle şehir içi otobüslerde dikkat çekmektedir. Altyapı ve üstyapı yatırımları göz önüne alındığında, şehir içi otobüslerin güzergahlarını tekrar etmeleri ile şarj istasyonlarını tekrar tekrar kullanmaları ve şarj bölgesindeki hız düşümü ile şarj süresinin uzatılması istasyon sayısında bir azalma imkânı sağlamaktadır.

Şehir içindeki kasisler ve eğimli güzergahlar aracın tabanındaki bobinlerin yerleşiminde bir limit oluşturmaktadır. Bu yüzden tercih edilen ve yaygınlaşmakta olan yöntem indüktif güç aktarımıdır.

### 4.2.1. İndüktif Güç Aktarımı (IPT)

Klasik transformatör mantığı ile alıcı ile verici arasındaki hava boşluğundan güç transferi yapılır. Primer (birincil, verici) bobin tarafından üretilen alternatif manyetik alan, sekonder (ikincil, alıcı) bobin tarafından alternatif akıma çevrilir.

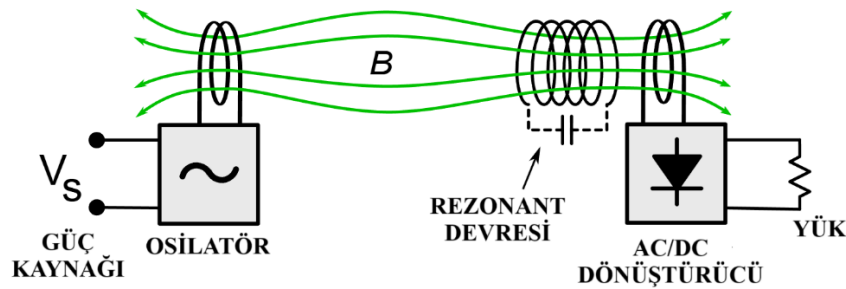


Şekil 4.1 İndüktif Güç Transferi (Hajjine, 2016)

### 4.2.2. Manyetik Rezonanslı İndüktif Güç Aktarımı (MR-WPT)

Manyetik rezonanslı güç aktarımında ise hem verici hem alıcı bobinler belirli bir rezonans frekansında çalışır. Bu yöntem, klasik indüktif sistemlere kıyasla hava aralığı ve hizalama toleransı açısından daha esneklerdir.

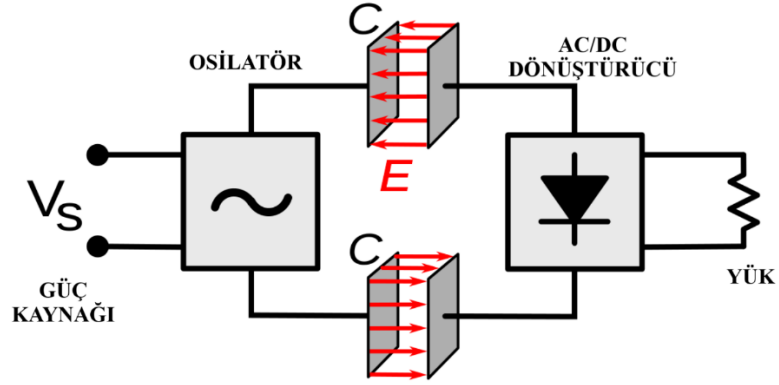
Özellikle dinamik (yolda hareket halindeyken şarj) uygulamalarında tercih edilmektedir. Ancak rezonans ayarının karmaşıklığı ve elektromanyetik uyumluluk (EMC) gereksinimleri gibi mühendislik zorlukları mevcuttur.



Şekil 4.2 Manyetik Rezonanslı İndüktif Güç Aktarımı (Anonim5, 2025)

### 4.2.3. Kapasitif Güç Aktarımı (CPT)

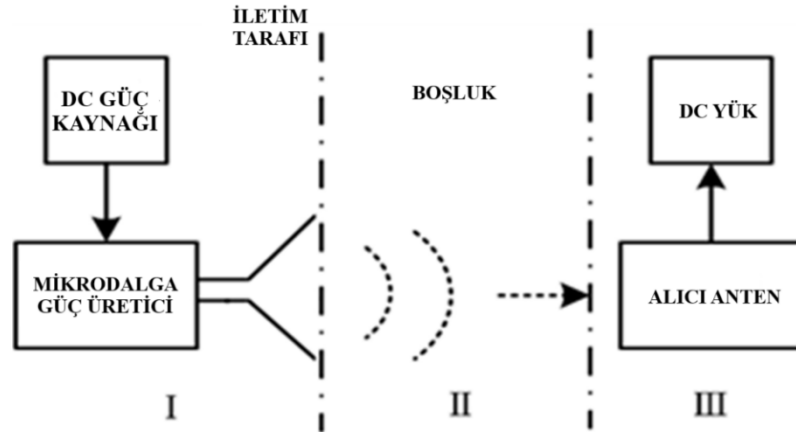
Kapasitif güç aktarımında, iki iletken plaka arasında yüksek frekanslı elektrik alan oluşturularak enerji transfer edilir. Bu yöntem hafiflik ve düşük maliyet avantajı sunmasına rağmen, verimlilik ve insan güvenliği açısından belirli kısıtlar taşır. Toplu taşımada yaygın kullanımı bulunmamaktadır.



Şekil 4.3 Kapasitif Güç Aktarımı (Anonim5, 2025)

### 4.2.4. Mikrodalga ve Hibrit Yöntemler

Mikrodalga tabanlı WPT yöntemlerinde, yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar aracılığıyla enerji transferi sağlanır. Bu yöntem uzun mesafe avantajı sunsa da düşük verimlilik ve elektromanyetik radyasyonun insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkileri nedeniyle pratikte yaygın değildir (Bilgiç, 2024). Son yıllarda hibrit sistemler (ör. indüktif + kapasitif) ve dinamik şarj uygulamalarıyla sistem esnekliği ve verim artırılmaktadır.



Şekil 4.4 Mikrodalga Güç Transferi (Wang, 2022)

### 4.2.5. Karşılaştırmalı Değerlendirme

Kablosuz güç aktarım yöntemleri ile ilgili hazırlanan karşılaştırmalı değerlendirme Tablo 4.1.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1 Kablosuz Güç Aktarım Yöntemleri (Bilgiç, 2024) (Fisher, 2014)

Yöntem	Frekans	Mesafe	Verimlilik	Avantajlar	Dezavantajlar
İndüktif	20–90 kHz	5–20 cm	%85–95	Güvenli, yüksek verim	Kısa mesafe, hizalama
Rezonanslı	6–13 MHz	30–200 cm	%70–90	Mesafe toleransı, esnek	Karmaşıklık, EMC
Kapasitif	MHz bandı	<10 cm	%60–80	Hafiflik, maliyet	Güvenlik, verim
Mikrodalga	GHz bandı	>200 cm	<%50	Çok uzun mesafe	Düşük verim, güvenlik
Hibrit	-	-	Yüksek	Esneklik	Karmaşıklık, maliyet

### 4.3. Otobüslerde Statik ve Dinamik Kablosuz Şarj

Otobüslerde WPT sistemleri statik (park halinde) ve dinamik (hareket halinde) uygulanabilmektedir. Bu sistemlerin verimleri genel olarak birbirine yakındır ve uygulama ihtiyacına göre tercih edilirler.

WPT sistemleri özellikle fiziki bir bağlantı elemanı içermemesinden dolayı kullanım kolaylığı sağladığından pratik bir şekilde uygulanabilmektedir.

Statik şarj istasyonları genelde araçların operasyon dışı olduğu zaman aralıklarında, güzergâh başı ve sonundaki bekleme sürelerinde tercih edilirken, dinamik şarj sistemleri güzergâh içerisinde yolda ve özellikle durak bölgelerinde tercih edilmektedir.

Şarj miktarı aracın istasyon üzerinde geçirdiği süreyle orantılı olduğundan dolayı dinamik şarj sistemi olan bölgelerde hız düşümü ya da bekleme olması sistemin etkisini arttıracaktır. Duraklarda yolcu indirme-bindirme süreleri şarj istasyonu üzerinde geçen süreyi arttıracığı için duraklar dinamik şarj istasyonları için en uygun bölgelerdir.

#### 4.3.1. Statik Kablosuz Şarj Sistemleri

Statik kablosuz şarj sistemleri aracın park halinde olduğu ve operasyon dışı olduğu zamanlarda kullanılan sistemlerdir. Sistem frekansı 20 ile 80 kHz aralığında olmakla beraber genel olarak konumlama hassasiyeti yüksek olduğu için sistem verimi 85-95% gibi değerleri görmektedir.

Fırsat şarj (Opor-charge) olarak adlandırılan kullanım senaryosunda, araçların güzergâh uçlarında bekleme süresinde ya da duraklarda kısa süreli şarj olması durumunda avantajlı olmaktadır. (Bi, 2020)

Bununla birlikte, sistemin performansı araç ve bobin hizasına, hava boşluğuna ve elektromanyetik alan güvenliğine oldukça duyarlıdır (Fisher, 2014) (Vishnuram P. &., 2023).

### 4.3.2. Dinamik Kablosuz Şarj Sistemleri

Dinamik kablosuz şarj sistemlerinde (Dynamic Wireless Power Transfer- DWPT), araç yol boyunca hareket halindeyken, yol altına yerleştirilmiş bobinlerden manyetik rezonans ya da indüktif güç aktarımı ile enerji alır.

Dinamik sistemler, elektrikli araçların sürekli olarak enerji ile beslenmesine imkân tanıyarak, batarya boyutunun küçültülmesi ve menzil kaybının azaltılması gibi stratejik avantajlar sunar (Bi, 2020).

Dinamik sistemlerde, enerji transfer verimliliği; araç hızı, hava boşluğu, yolun fiziksel yapısı ve bobinlerin hizalamasına bağlı olarak değişir. Pratik uygulamalarda verimlilikte düşüşler gözlenebilmekte ve altyapı maliyeti statik sistemlere kıyasla daha yüksek olabilmektedir.

### 4.3.3. Karşılaştırmalı Değerlendirme

Tablo 4.2. Otobüslerde Statik ve Dinamik Kablosuz Şarj Karşılaştırması

Özellik	Statik Kablosuz Şarj	Dinamik Kablosuz Şarj
Şarj Durumu	Araç park halinde	Araç hareket halinde
Altyapı Maliyeti	Düşük-Orta	Yüksek
Verimlilik	Yüksek (%85-95)	Orta-Yüksek
Batarya Boyutu	Büyük	Daha küçük olabilir
Standartlar	Olgun (SAE J2954, IEC 61980)	Gelişmekte (SAE J2954/2 vb.)
Uygulama Alanı	Durak, otopark, filo, bireysel	Otoyol, toplu taşıma

Statik kablosuz şarj sistemleri günümüzde daha yaygın ve ekonomik olarak uygulanabilir bir çözüm sunarken, dinamik kablosuz şarj sistemleri menzil ve batarya optimizasyonu ile gelecekte önemli avantajlar vadetmektedir. Özellikle şehir içi toplu taşımada, sistem seçiminde maliyet, verimlilik, altyapı gereklilikleri ve uluslararası standartlara uyum dikkate alınmalıdır (A. Ahmad, 2018) (Bi, 2020) (Mahesh, 2021).

### 4.4. Temel Fiziksel Parametreler

WPT sistemlerinin uygulamasında bazı fiziksel parametreler öne çıkmaktadır. Bu parametrelerin optimize edilmesi ve araç tasarım ve entegrasyon süreçlerinde değerlendirilmesi şarttır.

#### 4.4.1. Hava Boşluğu

Bobinler arası hava aralığı (air gap) ve hizalama toleransı, kuplaj katsayısını ve enerji aktarım verimliliğini doğrudan etkiler. Özellikle dinamik uygulamalarda, nominal hava aralığı genellikle 200–250 mm civarında tutulmakta ve  $\pm 25$  mm'ye kadar tolerans önerilmektedir (He, 2023).

#### 4.4.2. Çalışma Frekansı ve Manyetik Alan Parametreleri

Sistemin çalışma frekansı kablosuz enerji transferinin verimliliği ile doğrudan ilişkilidir. Yüksek güçlü uygulamalarda genellikle 20–85 kHz aralığında çalışma frekansları kullanılmaktadır (A. Ahmad, 2018). Daha yüksek frekanslar hava aralığı üzerinden daha fazla güç aktarımına olanak tanırken, elektromanyetik girişim (EMI) açısından uygunluk gerektirir (Reyhan, 2023).

#### 4.4.3. Güç Aktarım Kapasitesi ve Verimlilik

Kablosuz şarj sistemlerinde güç aktarım kapasitesi, sistem mimarisi, bobin geometrisi, kullanılan çekirdek materyalleri ve inverter teknolojisi gibi birçok faktöre bağlıdır. Literatürde statik ve dinamik şarj uygulamaları için 50–300 kW aralığında güç aktarımı mümkündür (Csonka, 2021). Sistemlerin toplam verimliliği ise bobin hizalaması, hava aralığı, frekans ve ısı yönetim gibi parametrelerle %75–85 arasında değişmektedir (Bi, 2020) (Vishnuram P. &., 2023).

Ayrıca, kablosuz ve kablolu şarj karşılaştırmalarında kablosuz sistemlerin teknolojik gelişmelere rağmen kablolu sistemlere göre verimlilikte nispeten daha düşük olduğu, ancak operasyonel kolaylık ve sürdürülebilirlik açısından avantaj sunduğu gösterilmiştir (Luo, 2023).

#### 4.4.4. Isıl Yönetim

Yüksek güçlü kablosuz şarj sistemlerinde bobinler ve güç elektroniği bileşenlerinde önemli miktarda ısı oluşur. Etkin bir ısı yönetim stratejisi hem güvenlik hem de sistem ömrü açısından zorunludur.

#### 4.4.5. Parametrelerin Karşılaştırılması

Tablo 4.3'te yüksek güçlü kablosuz şarj sistemlerinde temel fiziksel parametreler ve karşılaştırması verilmiştir.

Tablo 4.3. Temel Fiziksel Parametreler

Parametre	Tanım / Açıklama	Tipik Değerler / Aralıklar
Hava Boşluğu (Air Gap)	Bobinler arası dikey mesafe olup, kuplaj katsayısını ve verimliliği doğrudan etkiler. Dinamik uygulamalarda hizalama toleransı kritik önem taşır.	Nominal: 200–250 mm Tolerans: $\pm 25$ mm
Çalışma Frekansı ve Manyetik Alan	Frekans, enerji aktarım verimliliğini belirler. Yüksek frekanslar yüksek güç iletimine izin verirken elektromanyetik girişim riskini artırır.	20–85 kHz
Güç Aktarım Kapasitesi ve Verim	Aktarım kapasitesi; bobin tasarımı, çekirdek malzemesi, inverter tipi gibi faktörlere bağlıdır. Verimlilik ise hizalama, ısı yönetim ve frekansa göre değişir.	Güç: 50–300 kW Verimlilik: %75–85
Isıl Yönetim	Bobinler ve güç elektroniği elemanlarında oluşan ısının etkili şekilde dağıtılması sistem güvenliği ve uzun ömür için gereklidir.	Uygulamaya özgü çözümler (örneğin sıvı/aktif soğutma)

#### **4.5. Uluslararası Standart ve Regülasyonlar**

WPT sistemlerinin gelişimi ve elektrikli araçlara uygulanması beraberinde ilgili konulardaki standartların ve regülasyonların yeniden düzenlenmesine ve bu konu özelinde de standartların oluşmasına zemin hazırlamıştır.

##### **4.5.1. Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) Standartları**

IEC 61980-1:2015 standardı, elektrikli araçlar için kablosuz güç transferi (WPT) sistemlerinin genel gereksinimlerini ortaya koyar. Sistem bileşenleri, test yöntemleri, çevresel koşullar ve güvenlik kriterleri bu standart kapsamında değerlendirilir.

IEC 61980-2, -3, -4, -5, -6 ise sırasıyla araç-altyapı iletişimi, manyetik alan bazlı sistemler, yüksek güçlü ve dinamik uygulamalar gibi alt başlıklara odaklanır. Özellikle dinamik kablosuz güç transferi gibi şehir içi otobüsler için kritik uygulamalarda bu standartlar temel yol gösterici olarak kabul edilmektedir.

##### **4.5.2. Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) Standartları**

ISO 19363:2017 ve ISO 19363:2020, elektrikli kara taşıtlarında manyetik alan temelli kablosuz güç transferi sistemlerinin güvenliğini, elektromanyetik alan limitlerini ve birlikte çalışabilirliğini düzenler. Şehir içi otobüslerde, özellikle sistemin yolcular, sürücüler ve çevre açısından güvenli olmasını sağlamak için bu standartlara uyum gereklidir.

##### **4.5.3. Amerika Otomotiv Mühendisleri Derneği (SAE) Standartları**

SAE J2954 standardı, elektrikli hafif ve ağır vasıtalarda kablosuz güç transferi sistemlerinin performans, hizalama toleransı, elektromanyetik alan sınırları ve birlikte çalışabilirlik kriterlerini tanımlar (SAE International, 2022).

SAE J2954/1, J2954/2, J2954/3, J2847/6 ise farklı güç seviyeleri, araç sınıfları ve dinamik uygulamalar için özel gereksinimler sunar. Özellikle ağır hizmet tipi şehir içi otobüslerde yüksek güç transferi ve güvenlik için bu standartlar temel alınır.

##### **4.5.4. Kablosuz Güç Konsorsiyumu Standartları**

Qi ve Qi2 standartları, düşük güçlü mobil cihazlar için geliştirilmiş olsa da enerji transferinin güvenliği ve verimliliği, manyetik hizalama teknolojileri ve elektromanyetik alan sınırları gibi konularda temel prensipler sunar.

##### **4.5.5. Elektromanyetik Alan ve Sağlık Düzenlemeleri**

ICNIRP tarafından belirlenen elektromanyetik alanlara maruziyet sınırları, kablosuz şarj sistemlerinin güvenli kullanımı açısından, şehir içi otobüslerde yolcular ve bakım personeli için kritik önemdedir.

FCC ise ABD’de elektromanyetik radyasyonla ilgili teknik sınırları ve uygunluk testlerini zorunlu kılar.

#### 4.5.6. UNECE Regülasyonları: Avrupa Birliği Yasal Çerçevesi

UNECE Regülasyon No. 10: Araçlarda elektromanyetik uyumluluk gerekliliklerini belirler. Kablosuz şarj sistemlerinin yüksek frekanslı alanları nedeniyle, araçların ve altyapıların EMC testlerinden geçmesi zorunludur.

UNECE Regülasyon No. 100: Elektrikli araçlarda tahrik sistemleri ve bataryaların güvenlik gereksinimlerini tanımlar. Batarya yerleşimi, izolasyon, aşırı şarj ve yangın güvenliği gibi konular şehir içi otobüslerde doğrudan uygulanır.

UNECE Regülasyon No. 107: Şehir içi otobüslerin genel yapısal standartlarını, yolcu alanı, acil çıkışlar ve yangın güvenliği gibi alanları düzenler. Kablosuz şarj entegrasyonunda, sistemin otobüsün temel güvenlik standartlarını bozmayacak şekilde tasarlanması gerekir.

#### 4.6. Kablosuz Şarj Sistemlerinin Uygulama Örnekleri

Kablosuz şarj teknolojisi, elektrikli otobüslerin şehir içi toplu taşımada etkinliğini ve sürdürülebilirliğini artırmak amacıyla dünya genelinde farklı ölçeklerde yaygın olarak test edilmekte ve uygulanmaktadır. Aşağıda, coğrafi bölgelere ve öne çıkan uygulamalara göre bu projeler detaylı biçimde sunulmuştur.

##### 4.6.1. Kuzey Amerika

*Wenatchee, Washington (ABD)*

Wenatchee’de toplu taşıma idaresi, BYD marka elektrikli otobüsleri kablosuz şarj sistemiyle çalıştırmaktadır. Otobüsler, belirli duraklarda veya şarj alanlarında statik kablosuz olarak şarj edilmekte ve bu sayede menzil ve operasyonel verimlilik artırılmaktadır. Başarılı saha performansı, diğer şehirler için de model oluşturmaktadır.



Şekil 4.5 Wenatchee, Washington, Link Transit- BYD Uygulaması (Anonim4, 2020)

#### *AnteloTransit- Transit (ABD)*

WAVE firmasının kablosuz şarj sistemiyle gerçekleştirilen bu projede, filonun gerçek dünya koşullarında kablosuz şarj teknolojisiyle verimliliği ve batarya ömrü iyileştirilmiştir. Pilot uygulama, sistemin ticari ölçekli potansiyelini değerlendirmek açısından kritik bir rol üstlenmiştir.



Şekil 4.6 The Antelope Valley Transit Authority (AVTA), Metro, Los Angeles (Anonim5, 2025)

#### *Indianapolis (ABD)*

Bu şehirde duyurulan büyük ölçekli kablosuz şarj otobüs projesi, toplu taşıma altyapısında kablosuz şarjın entegrasyon potansiyelini göstermektedir. Projenin sonuçları henüz detaylı olarak yayınlanmasa da sektör için önemli bir referans olarak görülmektedir.

#### **4.6.2. Avrupa**

##### *Braunschweig, Almanya*

Bombardier'in PRIMOVE sistemi, Braunschweig toplu taşıma sisteminde otobüsler için kullanılmıştır. Sistem hem statik hem de dinamik şarj altyapısı sunmakta; dinamik mod ise raylı sistemlerde daha yoğun olarak uygulanmaktadır. Proje, indüktif kablosuz şarj teknolojisinin şehir ölçeğinde kullanılabilirliğini göstermektedir.



Şekil 4.7 Bombardier PRIMOVE (Anonim3, 2025)

*Berlin, Almanya*

Siemens ve BMW iş birliğinde başlatılan pilot çalışmalarda, şehir içi otomobil ve otobüslerde endüktif kablosuz şarj testleri yapılmıştır. Testler, çoklu araç tiplerinde teknolojinin uygunluğunu değerlendirmeyi amaçlamıştır.

*Hollanda (Utrecht ve Den Bosch)*

Utrecht'te küçük bir otobüsle yapılan kablosuz şarj testi başarıyla tamamlanmış, fakat devamı getirilmemiştir. Den Bosch şehrinde ise kablosuz şarj projesi halen aktiftir; burada hem belediye hem de eyalet düzeyinde destek alınarak sistemin sürekliliği sağlanmaktadır. 2012 sonbaharında iletken şarjlı bir otobüsün yanına endüktif şarjlı bir otobüs de eklenmiştir.

#### **4.6.3. Asya**

*Changsha, Hunan Eyaleti, Çin*

Changsha'da, ZTE Corporation tarafından geliştirilen ve BYD elektrikli otobüslerle entegre edilen kablosuz şarj sistemi şehir içi ticari hatlarda kullanılmaktadır. Bu uygulama, ticari ölçekli otobüs hatlarında kablosuz şarj teknolojisinin uygulanabilirliğini ve verimliliğini göstermektedir.

#### **4.6.4. Yorum ve Gelecek Perspektifi**

Güncel projeler ve saha testleri, kablosuz şarj teknolojisinin elektrikli otobüslerde operasyonel verimlilik, menzil yönetimi ve filo esnekliği bakımından önemli avantajlar sağladığını göstermektedir. Ancak, maliyet, enerji verimliliği, altyapı standardizasyonu ve güvenlik başlıklarında geliştirme gereksinimi devam etmektedir. Avrupa ve Kuzey Amerika'daki projeler, gelecekte daha yaygın ve optimize kablosuz şarj uygulamalarının öncüsü olarak değerlendirilmektedir.

### **4.7. Kablosuz Şarj Sistemlerinin Şehir İçi Otobüslere Uygulanması**

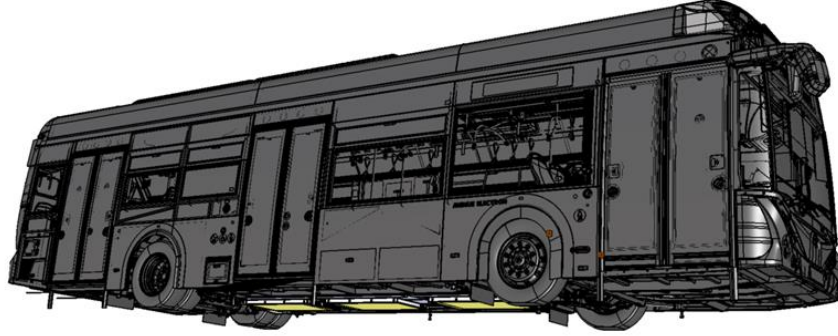
#### **4.7.1. Alıcı Sistemlerin Konumlandırılması ve Şasi Yapısına Etkileri**

Alıcı sistemler hava boşluğunun optimizasyonu ve ağırlık dağılımı açısından şehir içi otobüslerin orta şasi bölgesinin zeminine yerleştirilmektedir. Bunun etkilediği en önemli araç özelliği yaklaşma ve uzaklaşma açılarıdır.

Yaklaşma ve uzaklaşma açıları ile aracın dingil açıklığında bulunan tepe açısı, şehir içindeki eğimli bölgelerden ve kasislerden aracın geçişi sırasında altının temas etmemesi için belirlenen sınırlardır. Genel olarak araçlar 7 ile 8 derece açısında yaklaşma ve uzaklaşma açısı değerine sahip olmalıdırlar.

Şehir içi yollarda özellikle kasisler aracın zemininde böyle bir ünitenin yerleşimini kısıtlayıcı rol oynayacaktır. Bunun için kablosuz şarj ile donatılmış araçların, üzerinde gitmesi için özel yollar bu sistemler için tercih edilmelidir.

Bunların dışında aracın merkez bölgesine yerleştirilecek bir ünite için şasi üzerinde bir boşaltma yapılması gerekecektir. Bu alan dayanım açısından dezavantajlı olabilir. Bu bölgelerin CAE analizleri ile hassas bir şekilde tasarlanması gerekmektedir.



Şekil 4.8 Kablosuz Şarj Alıcılarının Araç Altına Konumlandırılması (Avenue Electron)

#### 4.7.2. Elektromanyetik Güvenlik ve Kalkanlama

Kablosuz şarj sistemi entegrasyonu ile otobüs üzerine bir EMF (Elektromanyetik Alan) kaynağı yerleştirilmekte olduğundan bunun etkilerini araçtan ve yolculardan uzak tutmak için bir kalkanlama gereksinimi doğurmaktadır.

Bakır ya da alüminyum bir malzemeden tasarlanan kalkan ile EMF'in aracın haberleşme hatlarında bir gürültüye neden olmaması ve araç içerisindeki insanların sağlığını etkilememesi hedeflenir (Reyhan, 2023).

Bu EMF'in yayılım analizi FEM (Sonlu Elemanlar Yöntemi) gibi simülasyon araçları ile analiz edilmeli ve tasarım, bu analizlerin çıktıları ile şekillendirilmelidir. Kalkanlama malzemesi frekans aralığı, maliyet, ağırlık ve dayanıklılık gibi faktörler kullanılarak seçilmelidir.

#### 4.7.3. Batarya Yerleşimi ve Menzil Optimizasyonu

Kablosuz şarj sistemleri herhangi bir fiziksel bağlantı içermeden araçların şarj edilebilmesine imkân sağladığı için, özellikle dinamik sistemlerin kullanıldığı durumlarda batarya kapasitesini düşürerek aracın menzil potansiyelini korumayı sağlayabilmektedir (Luo, 2023) (Vishnuram P. &, 2023).

Batarya kapasitesinin düşmesi otobüslerin boş ağırlığının düşmesine, yolcu kapasitesinin artmasına ve enerji verimliliğinin artmasını sağlar.

Tavan batarya yerleşimine sahip araçlarda ise bataryaların azalması aracın ağırlık merkezinin zemine yaklaşmasına ve bu şekilde süspansiyon ve fren sistemlerindeki yüklerin azalmasına yol açar. Bu yüklerin azalması maliyetleri ve parça ömürlerini iyileştirmektedir.

Otobüslerin belirli duraklarda (örneğin, son duraklarda veya yoğun yolcu iniş-biniş noktalarında) kablosuz şarj üniteleriyle donatılması, otobüslerin bekleme sürelerini şarj için kullanmasına olanak tanır. Bu, özellikle kısa ve orta menzilli hatlarda etkilidir.

#### **4.7.4. Termal Yönetim**

Yüksek güçlü WPT sistemlerinde oluşan termal yükler hem sistem bileşenlerinin ömrü ve verimliliği hem de aracın güvenliği açısından kontrol altında tutulması gereken unsurlardır.

Sistemin temel kayıpları bobinler ve elektronik bileşenlerdir. Özellikle bobinler oldukça yüksek ısı yükler meydana getirir ve aynı zamanda dış ortama açık olmalarından dolayı termal yönetimi de zorlaşmaktadır.

Şehir içi elektrikli otobüslerde sistemin kendi kayıplarını yönetmesi için genellikle aktif soğutma yöntemleri tercih edildiğinden araca bu sistemin eklenmesi de termal yönetim sistemini zorlaştırır.

#### **4.7.5. İç Mekân Tasarımı ve Yolcu Konforu**

WPT sistemlerinin entegrasyonu yolcu tarafından algılanabilir bir değişiklik olacaktır. İnsanlar gözle görmedikleri ve yüksek sesli yapılardan doğal olarak rahatsızlık hissetmektedir. WPT ile donatılmış otobüslerde yolcular seyahat ederken bu durumdan ilk aşamada rahatsızlık hissedebilir.

Bunu azaltmak ve görsel olarak ilgi çekici bir deneyim yaşatmak açısından kablosuz şarj bölgelerinde şarj olma durumunu belirtecek şekilde bir iç ışıklandırma ile olumlu bir algı yaratılabilir. Böyle bir algı ilk aşama için insanların daha güvende hissetmelerini sağlar.

Bunun ötesinde özellikle alıcı sistemlerin konumlandırıldığı alçak zeminli araçların iç mekân tasarımına dikkat edilmelidir. Yolcu giriş / çıkış adım yükseklikleri, koridor eğimleri ve genişlikleri gibi konuları etkileyecek bileşen yerleşiminden kaçınılmalıdır.

Şarj prizlerinin ve bataryaların azalması ise araç içerisinde daha derli toplu bir görünüm yaratacağından, iç mekânı rahatlatacak ve genişlik algısı kazandıracaktır.

#### **4.7.6. Kentsel Entegrasyon**

Kablosuz şarj sistemlerinin şehir içi otobüslere entegrasyonu, sadece teknolojik bir dönüşüm değil, aynı zamanda kapsamlı bir altyapı planlaması ve kentsel entegrasyon sürecini de beraberinde getirir. Bu süreç, şarj istasyonlarının yer seçimi, enerji tedariki, trafik yönetimi, çevresel etkiler ve estetik görünüm gibi çeşitli faktörleri dikkate almayı gerektirir.

Şarj istasyonlarının yer seçimi; otobüs güzergahları, duraklama süreleri, yolcu yoğunluğu, enerji maliyetleri ve şebeke kapasitesi gibi faktörlere göre belirlenmelidir. Şarj istasyonları, otobüslerin düzenli olarak durduğu ve şarj için yeterli süreye sahip olduğu noktalara

yerleştirilmelidir. Bu noktalar genellikle otobüs terminalleri, ana duraklar veya yoğun trafik bölgeleri olabilir.

Kablosuz şarj istasyonları, yeterli ve güvenilir bir enerji kaynağına ihtiyaç duyar. Bu enerji, mevcut elektrik şebekesinden sağlanabileceği gibi, yenilenebilir enerji kaynaklarından (güneş, rüzgâr vb.) da elde edilebilir.

Özellikle şehir içi güzergahlarda şarj istasyonlarının çalışma kapasitesini karşılayacak güçte enerji hatları kurulumu yeni alt yapı yatırımlarına ihtiyaç doğurabilir.

Bunların haricinde şarj istasyonlarının görsel olarak yolculara hitap etmesi önemlidir. Yolcuların olumlu yönde ilgisini çekecek; şehirde kalabalık bir görüntü yerine sürdürülebilir, çevre dostu olduğuna dikkat çekecek şekilde tasarlanmalıdır.

Trafik açısından değerlendirmek gerekirse, özellikle dinamik şarj bölgelerinde araçların daha uzun şarj olabilmesi için uygulanacak olan hız düşümü trafiğe neden olmayacak şekilde düzenlenmelidir. Duraklar trafiğin içerisinde bir bölge olarak değil, bağımsız yollarla girilen yapılar şeklinde yeniden tasarlanmalıdır.

Şehir içi uygulamaları arasında bunlara en iyi şekilde hitap edebilecek uygulama senaryosu metrobüs hatlarıdır. Şehir içi trafiğinden izole durakları, bağımsız ve özel gereksinimlere uygun yollar ile bu dönüşüme en uygun kullanım senaryosudur.

Doğrudan bir dönüşme süreci yerine süreçlerin gözden geçirilmesi için önce pilot uygulamalar ile geri bildirimler ve potansiyel problemler toparlanmalı, daha sonra genel kullanıma geçilmelidir.

#### **4.7.7. Sürdürülebilirlik**

Günümüzde şehir içi ulaşımında sürdürülebilirlik önemli bir konu haline gelmiştir ve elektrikli otobüslerin bu alanda yaygınlaşması ise büyük bir adım olarak değerlendirilmektedir. Bununla beraber kablosuz şarj sistemlerinin de geliştirilmesi artık bu dönüşümün kritik bir parçası halindedir.

WPT sistemleri, özellikle dinamik şarj sistemleri, araçlardaki batarya kapasitesinde düşüşe neden olduğu için otomotiv bataryalarının üretimindeki karbon ayak izinin azaltılmasını sağlar. Buna ek olarak nadir toprak elementleri ve lityum gibi sınırlı kaynaklara olan talep düşeceği için ekolojik sürdürülebilirliğe katkı sunar.

Dinamik şarj sistemlerinde araçlar hareket halinde şarj olacağı için yüksek güçlü şarj istasyonlarına olan talep de azalır. Bu da alt yapı enerji tüketiminde bir optimizasyonu sağlar.

Sadece çevresel sürdürülebilirlik açısından değil aynı zamanda ekonomik ve operasyonel açıdan da sürdürülebilir etkiler gözlemlenir. Kablosuz şarj sistemlerinin uzun vadeli bakım maliyetlerinin düşük olması, hareketli parçaların azlığından dolayı değişim sıklığının düşüklüğü ve otomatik şarj senaryolarından dolayı işletme verimliliği artırılır.

Otonom sistemlerle kullanılabilir olması dolayısıyla akıllı ulaşım sistemlerinde tercih edilme potansiyeli vardır. Akıllı ulaşım sistemlerinin yaygınlaşması ise operasyonel verimliliği artırır.



## 5. ADANA BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİ UYGULAMA ÖNERİSİ

Adana şehri TÜİK 2024 verilerine göre 2,280,484 kişi nüfusu ile oldukça kalabalık ve büyük bir şehirdir. Özellikle sanayileşmedeki son yıllardaki düşüş ve nüfus artış hızına oranla şehirleşmenin yetersiz kalması gibi etkenler ile şehir içi ulaşımda toplu taşıma oldukça önemli bir noktadadır.

Adana'da bulunan metro, güzergahların talepleri karşılayamamasından dolayı otobüs kullanımından sonra gelmektedir.



Şekil 5.1 Adana Şehri Google Earth Görünümü (Anonim6, 2025)

Adana'da nüfus şehir merkezinin kuzeyinde yoğunlaşmıştır ve genel olarak kuzey ile şehir merkezi bölgesi ile doğudaki sanayi bölgesi ve batıdaki sanayi bölgesi arasında günlük yoğun bir nüfus hareketi oluşmaktadır. Bu yoğunluk mesai saatlerinin başında ve sonunda artmakla birlikte gün içerisinde de bireysel kullanımlardan dolayı şehir içi trafik oldukça yoğun gözlenmektedir.

Alışveriş merkezleri, parklar ve genel olarak sosyal hayatı oluşturan diğer etmenler genel olarak şehir merkezinde bulunmaktadır. Gün içerisindeki hareket her iki yöne de yoğunlukla gerçekleşmektedir.

Şehirdeki ana yollar doğu-batı yönünde 3 ana arter ve bunları birbirine bağlayan kuzey-güney yönünde 5 ana arter şeklindedir. Şekil 5.2.'de Adana şehri üzerindeki ana yollar gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Adana Şehri Ana Yolları (Anonim6, 2025)

Şehir merkezinden geçen otoyol (siyah renkli), aynı zamanda çevre yolu olarak kullanılmasından dolayı mesai başlangıç ve bitiş saatlerinde yoğun olarak hem servis araçları hem otomobiller tarafından tercih edilmektedir. Otoyol çıkış ve girişlerinde yoğunluk olmasından dolayı tehlikeli durumlar gelişmektedir.

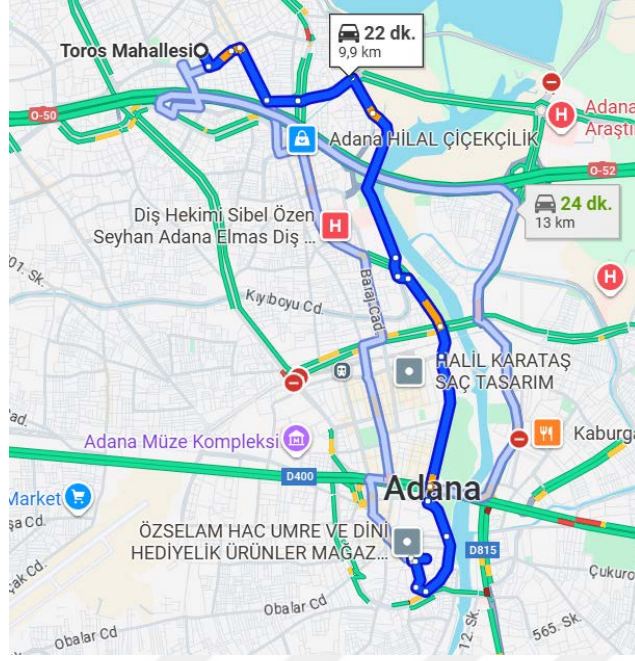
Özellikle otoyolun ve ana yolların, herhangi iki nokta arasındaki ulaşım süresini oldukça kısaltması nedeniyle özel araçlarla şehir içi seyahat etmek çok avantajlı olmaktadır. Buna örnek olarak, Adana'nın en kalabalık mahallelerinden birisi olan Toros mahallesinde oturan bir kişinin, şehir merkezinde bulunan tarihi Büyük Saat'e gidip gelmesini inceleyebiliriz.

Kent içi Elektronik Kart ile Biniş Ücret Tarifesi		
Belediye Otobüsleri ve Hafif Raylı Sistem	Öğrenci	13,00 TL
	Öğretmen	23,00 TL
	Tam	27,00 TL
Özel Halk Otobüsleri	Öğrenci	16,50 TL
	Öğretmen	26,00 TL
	Tam	29,00 TL
Özel Dolmuş Minibüsleri	Öğrenci	17,00 TL
	Tam	30,00 TL

Şekil 5.3 Adana Kent içi Elektronik Kart ile Biniş Ücret Tarifesi (Anonim3, 2025)

Otobüs seyahati ile kıyaslayacağımız özel araç tüketimi ortalama bir dizel otomobilin şehir içi tüketimi olarak kabul edebileceğimiz 5,5 lt/100 km olacaktır.

Toros mahallesi muhtarlığı ile Büyük Saat arasındaki mesafe Şekil 5.4.'de gösterilen harita görselinde 9,9 km olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.4 Adana Toros Mahallesi ile Büyük Saat Arası Yol Tarifi (Anonim7, 2025)

Trafiğin yoğun olduğu 4 bölgedeki tüketim artışı ve dur-kalk yapımlarla araçta oluşacak ani tüketimler için %20 tolerans hesaba kattığımızda 1,3 lt yakıt tüketeceğini hesaplayabiliriz.

Tablo 5.1 Toros Mahallesi ile Büyük Saat Arası Yakıt Tüketim Hesaplaması

<b>Toros Mah.-&gt; Büyük Saat Gidiş (km)</b>	9,9
<b>Büyük Saat-&gt; Toros Mah. Geliş (km)</b>	9,9
<b>Toplam Yol (km)</b>	19,8
<b>Ortalama Araç Tüketimi (lt/100km)</b>	5,5
<b>Tüketim (lt)</b>	1,1
<b>%20 Toleranslı tüketim (lt)</b>	1,3
<b>Mazot Litre Fiyatı (TL)</b>	53,9
<b>Toplam Maliyet (TL)</b>	70,4

Adana'daki motorin fiyatları için fiyatlar aşağıdaki tabloda belirlenmiştir. Dizel için belirlenen fiyat 53,9 TL/lt olmasından dolayı, 1,3 lt yakıt için fiyat 70,4 TL olacaktır.

Şehir	V/Max Kurşunsuz 95	V/Max Diesel
ADANA	53.13 TL/LT	53.87 TL/LT
ALADAG	53.13 TL/LT	53.87 TL/LT
CEYHAN	53.13 TL/LT	53.87 TL/LT
CUKUROVA	53.13 TL/LT	53.87 TL/LT
FEKE	53.13 TL/LT	53.87 TL/LT

Şekil 5.5 Adana Yakıt Fiyatları (Anonim2, 2025)

Buna ek olarak araç sahibinin:

1. Aracın her 8.000 km'de servis bakımına gideceğini ve her bakım için 6.500 TL faturalandırılacağını
2. Her 75.000 km'de lastik değiştireceğini ve lastik için 12.000 TL ödeyeceğini
3. Her 100.000 km kullanım için değerinin 50.000 TL düşeceğini

Bu bedellerin toplamda araca km başına 1,5 TL maliyet eklediğini hesaplayabiliriz.

Bütün bedeller eklendiğinde 19,8 km'lik bu yolculuk araç için 100,4 TL'ye mal olmaktadır.

2 kişilik bir yolculukta toplamda tam bilet için 108 TL ödeneceği için maliyet açısından özel araç daha avantajlı konumda kalacaktır.

Sonuç olarak otobüs fiyatları ile özel araçların masraflarının birbirine bu kadar yakın olması, otobüslerin ve diğer toplu taşıma araçlarının tercih edilebilirliğini düşürmektedir.

Otobüs bilet fiyatlarının yüksek olmasının en önemli nedenleri:

1. Araçların yakıt tüketim performanslarının düşük olması
2. Yakıt bedellerinin artması
3. Yedek parça ve bakım bedellerinin yüksek olması
4. Yüksek vergiler ve sigorta bedelleri

Olarak detaylandırılabilir. Bütün bu parametreler operasyonel karlılık oranlarını düşürmekte ve bu da doğrudan bilet fiyatlarına yansımaktadır. Bilet fiyatlarının otobüs tercih edilebilirliğini düşürmesi de gelirleri düşüreceğinden, bu fiyatların gelecekte daha da artması doğal akışa uygun olacaktır.

Kablosuz şarj sistemleri ve aynı zamanda pantograf gibi çeşitli hızlı şarj yöntemleri de araçların hem yakıt tüketim performanslarının artmasına ve doğrudan işletme bedellerinin azalmasına hizmet edebilecek potansiyel taşımaktadır.

Bu noktada kablosuz şarj sistemlerinin tercih edilebilirliğini en çok arttıran etken bir üst yapı gerektirmemesi, kullanım sırasında herhangi bir fiziksel bağlantı içermemesi ve bunlardan kaynaklanacak ek giderlerin oluşmayacak olmasıdır.

Ayrıca kullanım senaryolarında operatörlerin aracı doğrudan şarj istasyonu üzerinde park ederek şarj sağlaması normal davranış düzenlerini değiştirmeden hareket etmeye yol açacak ve geçiş sürecini hızlandırabilecektir.

Bahsedilen etkenler nedeniyle kablosuz şarj senaryosu otobüs tercih edilebilirliğini arttıracak, yenilikçi ve sürdürülebilir bir uygulama olarak bu tezde detaylı olarak incelenecektir.

### 5.1. Şarj Sisteminin Belirlenmesi

Kablosuz güç transferi yöntemi kullanarak araç şarj istasyonu üreten firmalar arasından yapılacak seçim sürecinde firmaların kullandıkları iletim yöntemleri, statik ve dinamik şarj sistemi sunmaları, şarj güçleri, maliyetleri gibi çeşitli kriterler göz önünde bulundurulmalıdır.

Otobüs sistemine entegre edilecek kablosuz şarj sistemi üreten iki firma ile (Electreon, ENRX) yapılan teknik görüşmeler ile üzerinde durulması gereken bazı noktalar ve kıyaslaması Tablo 5.2.'de verilmiştir.

Tablo 5.2 Electreon ve ENRX şarj sistemlerinin kıyaslanması

Kriterler	Electreon	ENRX
Ürünler otobüse entegre edilebiliyor mu?	Evet	Evet
Otobüslerin voltaj mimarisine uygun şarj sağlanabiliyor mu?	Evet	Evet
Ürünler otobüs haberleşme protokolleri ile kullanılabilir mi?	Evet	Evet
Şarj gücü kaç kW'tır?	30 kW/alıcı	200 kW
Dinamik şarj sistemi yol tarafına kaç metrelik modüller olarak tedarik ediliyor?	200	40
Statik Şarj İstasyonu Maliyet/Şarj Gücü	1,75 EUR/W	1,25 EUR/W
Dinamik Şarj İstasyonu Maliyet/Enerji Transferi (20 km/s hız ile 100m Electreon, 40m ENRX)	2 EUR/Wh	1.95 EUR/Wh
Sistemin toplam verimi nedir?	%85 - %92	90%
Statik ve dinamik şarj sunuluyor mu?	Evet	Evet
Otobüs tarafı bileşenleri hem dinamik hem statik şarja uygun mu?	Evet	Evet
12m Araca entegre edilecek bileşenlerin toplam ağırlığı nedir?	300 kg	200 kg
Araç tarafı bileşenlerinin zemin ile arasında kalacak olan hava boşluğu en fazla kaç mm'dir?	150	250
Alıcılar (ikincil sarım) modüller mi?	Evet	Hayır

Karşılaştırılan özelliklere göre iki sistemin de kullanım senaryoları birbirinden farklı olacaktır. Özellikle yol entegrasyonu açısından Electreon'un uzun şarj istasyonları her noktaya konumlandırılmayacağı gibi aynı zamanda montaj maliyetlerini de arttıracaktır.

Fiyatlar değerlendirirken statik şarj istasyonları için 1 W güç için firmanın verdiği teklif değeri ile parametre elde edilmiştir. Dinamik şarj sistemi için ise Electreon firmasının her modülü 100m, ENRX firmasının her modülü 40m olduğundan üzerinde 20 km/s hızla giden bir araca aktarılabilecek toplam enerji üzerinden bir parametre elde edilmiştir.

Kıyas neticesinde maliyet ve montaj edilebilirlik avantajından dolayı ENRX ürünleri hesaplarda kullanılmak üzere tercih edilmiştir.

### 5.1.1. Yol Tarafı Bileşenleri

Yol tarafı bileşenleri şehir şebekesinden aldığı elektrik enerjisini AC/DC/AC sırasıyla dönüştürmekte ve yüksek frekanslı bir AC akım ile oluşturulan manyetik alan ile enerji transferi yapılmaktadır.

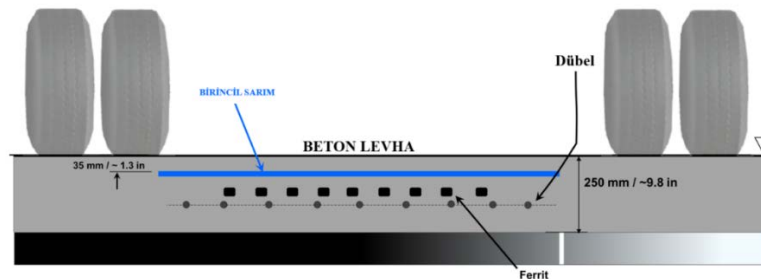
Kablosuz güç transferinde hizalama toleransı ve hava boşluğu önemli parametreler olmalarından dolayı firmanın montaj kriterlerine uymak şarj verimini sağlamak için önemlidir.

Firma verici ünitelerini beton içerisine montajlı olarak iletmektedir. Bu özellikle üstyapı kurulumunda önemli bir kolaylık ve maliyet avantajı sağlamaktadır.



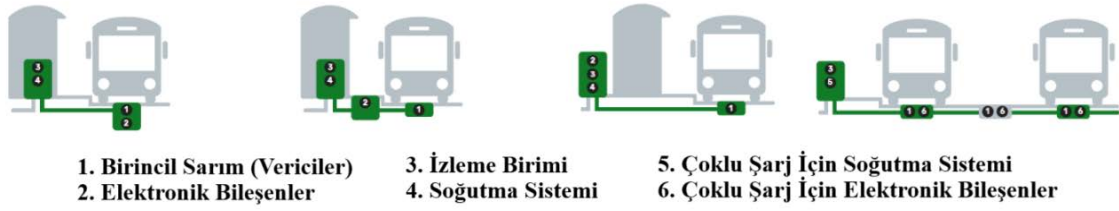
Şekil 5.6 ENRX Birincil Sarım (Verici) Ünitesi

ENRX kablosuz şarj sistemi yol tarafı birincil sarım bileşenlerinin montajlanması için gereken ölçüler Şekil 5.7.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.7 ENRX Yol Tarafı Birincil Sarım Montaj Ölçüleri

Yol tarafı bileşenlerinin yerleşimi için firma tarafından önerilen bazı yerleşim senaryoları Şekil 5.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.8 ENRX Yol Tarafı Bileşenleri Yerleşim Önerileri

Yol tarafı bileşenleri dönüştürücüler, sigortalar ve panoların olduğu kabin ile montajlanmaktadır. Kabin ile 2 statik şarj istasyonu ve 40m'lik dinamik şarj istasyonu kullanılabilir.



Şekil 5.9 ENRX Dönüştürücü ve Sigorta Kabini

### 5.1.2. Araç Tarafı Bileşenleri

ENRX kablosuz şarj sisteminin araç tarafı ikincil sarım (alıcı), batarya şarj arayüzü ve kullanıcı arayüzünden oluşmaktadır.

ENRX PICREC200 model alıcı otobüsün dingil açıklığı içerisinde yerleştirilmektedir ve tek bileşen toplamda 200 kW şarj sağlayabilmektedir.



Şekil 5.10 ENRX PICREC200 İkincil Sarım (Alıcı) Ünitesi

Alıcı ünite ile elde edilen AC akım aracın DC şarj altyapısına batarya şarj arayüzü ile dönüştürülür.



Şekil 5.11 ENRX Batarya- Şarj Arayüzü

Aracın batarya yönetim sistemleri ile çalışan şarj arayüzü ile sürücü tarafından şarj sisteminin kontrolü gerçekleştirilir. Şekil 5.12.'de örnek bir kullanıcı arayüzü ekranı görünmektedir.



Şekil 5.12 ENRX Kullanıcı Arayüzü

## 5.2. Güzergâh Belirlenmesi

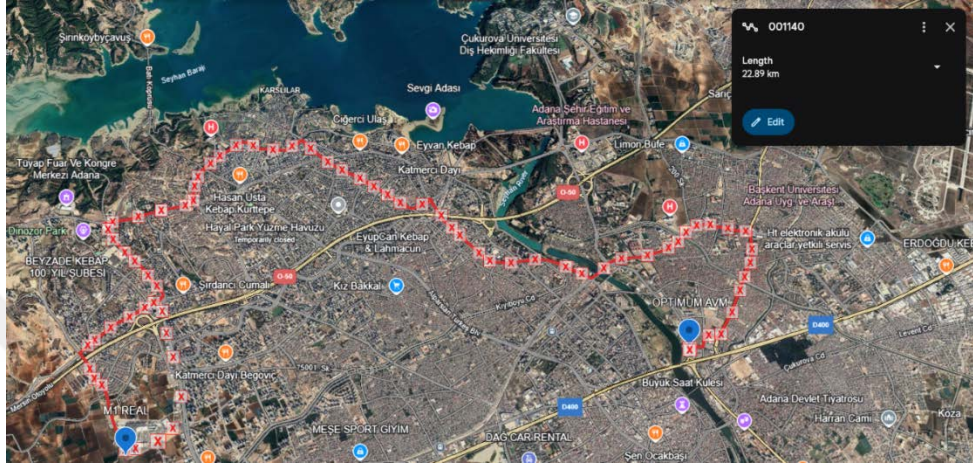
Dönüşüm senaryolarının belirlenmesi için, örnek bir rotanın dönüştürülmesi ve bundan elde edilecek verilerle şehrin geri kalanına bu dönüşümün yaygınlaştırılması ticari olarak en uygun çözüm olarak belirlenmiştir.

Bu senaryonun geliştirilmesi için belirlenen bazı kriterler şöyledir:

1. Hat üzerinde çalışan otobüslerin gün boyunca yoğun yolcu indirme ve bindirme yapıyor olması gerekmektedir. Bu aracın tüketimini arttıracak ve en kötü tüketim senaryolarında bile şarj süresi için yapılan hesapların doğruluğunu teyit edecektir.
2. Otobüsün mümkün olan en uzun rotada olması gerekmektedir. Bu da aynı şekilde tüketim için en kötü senaryoları doğuracaktır.
3. Şehrin ana arterlerinden geçiyor olmalıdır çünkü daha fazla yolcunun tercih edeceği bir güzergâh olacaktır. Aynı zamanda dinamik şarj istasyonlarının kurulması durumunda daha fazla otobüse hizmet verebilecek potansiyele sahip olacaktır.
4. Başlangıç ya da bitiş durağında geniş bir park alanı olmalıdır. Bu park alanına kurulacak statik şarj istasyonlarında araç şarj edilecektir.

Bu kriterler göz önüne alındığında M1 Real – Optimum AVM güzergahındaki 114 numaralı otobüs hattı, şarj senaryolarının değerlendirilmesi için seçilmiştir.

Yaklaşık 23 km uzunluğunda olan ve üzerinde 64 tane durak bulunan bir hat olan 114, Adana'daki tüm ana yollardan geçmektedir. Dr. Sadık Ahmet Bulvarı, Turgut Özal Bulvarı, Şehitler Bulvarı, Süleyman Demirel Bulvarı, Baraj Yolu, Mustafa Kemal Paşa Bulvarı ve Kozan Caddesi Adana'daki otobüs güzergahlarının çoğu ile kesişmektedir.



Şekil 5.13. 114 Numaralı Otobüs Güzergahı (Anonim6, 2025)

Bu güzergahta araç 75 dk'da başlangıç noktasından bitiş noktasına kadar gitmekte ve her 25 dk'da bir otobüs sefere başlamaktadır. Aynı anda 8 tane otobüsün hatta çalıştığı bilindiğine göre:

Otobüs / Saat	06:00 - 06:25	06:25 - 06:50	06:50 - 07:15	07:15 - 07:40	07:40 - 08:05	08:05 - 08:30	08:30 - 08:55	08:55 - 09:20
Otobüs 1	M1 -> Optimum		Optimum	Optimum -> M1		M1		
Otobüs 2	M1	M1 -> Optimum		Optimum	Optimum -> M1			
Otobüs 3	M1		M1 -> Optimum		Optimum	Optimum -> M1		
Otobüs 4	M1		M1 -> Optimum		Optimum	Optimum -> M1		
Otobüs 5	Optimum -> M1		M1	M1 -> Optimum		Optimum		
Otobüs 6	Optimum	Optimum -> M1		M1	M1 -> Optimum			
Otobüs 7	Optimum		Optimum -> M1		M1	M1 -> Optimum		
Otobüs 8	Optimum		Optimum -> M1		M1	M1 -> Optimum		

Şekil 5.14. 114 Numaralı Hat Otobüsleri Hareket Planı

Tablo 5.3 114 Numaralı Hat Otobüs Saat Çizelgesi

Otobüs 1	M1 Çıkış	Optimum Varış	Optimum Çıkış	M1 Varış
1. Sefer	06:00	07:15	07:40	08:55
2. Sefer	09:20	10:35	11:00	12:15
3. Sefer	12:40	13:55	14:20	15:35
4. Sefer	16:00	17:15	17:40	18:55
5. Sefer	19:20	20:35	21:00	22:15

Bu saat çizelgesine göre her otobüs 2 saat 55 dk sonra başlangıç konumuna ulaşmaktadır. Başlangıç 4 otobüs M1 tarafından ve 4 otobüs de Optimum tarafından hareket ettiğinde, her otobüs 25 dk M1 durağının park alanında bekleme süresine sahiptir.



Şekil 5.15. M1 Real Durağı (Anonim6, 2025)

Bu bekleme süresi şoförün dinlendiği ve ihtiyaçlarını karşıladığı bir süre olması nedeniyle otobüs park edilir. Şarj istasyonuna hizalı bir şekilde park edilmesi ile kablosuz şarj edilmeye uygun bir süredir.

### 5.3. Şarj Senaryosunun Belirlenmesi

Şehir içi otobüsler belirli rotalarda hareket ettiği için tüketim senaryolarını ve enerji aktarım gereksinimlerini belirlemek mümkündür. Hesaplamalarda kullanılmak üzere seçilen 5 paket batarya (510 kWh) kurulu Temsa Avenue Electron 12m aracının SORT2 testlerine göre tüketim miktarı 0.8 kWh/km olarak belirlenmiştir.

Şehir içi otobüsler aynı anda onlarca yolcu taşıdığı için iklimlendirmeyi tüketim değeri belirlerken hesaba dahil etmemek uygun değildir. SORT2 test prosedürlerinde araçların tüm

iklimlendirme cihazları devre dışı bırakıldığından dolayı, operasyon sürecinde oluşacak tüketim değerleri daha yüksek çıkacaktır.

Avenue Electron 12m aracının üzerinde bulunan klima modeli Spheros (Valeo) Revo E modeli bulunmaktadır.

Katalog verilerine göre nominal koşullarda 12 A ve 600V ile çalıştırıldığında 7.2 kW güç değerine ulaşmaktadır. Bu da araç tüketimine eklenerek hesaplarda kullanılacaktır.

Temsa Avenue Electron modeline kullanılan bataryalar 102 kWh'lik paketler olarak yerleştirilmektedir ve bu bataryaların her biri 585 kg gelmektedir. Aracın menzilinı arttırmak üzere yerleştirilen bataryaların adetleri ile araç tüketimi arasındaki ilişki, aracın ağırlığı ile doğrusal bir değişim göstermektedir.

Yükleme farkı aracın boş ağırlığı ve toplam yolcu kapasitesinden dolayıdır. Aracın yolcu kapasitesi araç boş ağırlığı azaldığında artacaktır. Araç yüklenirken her yolcu için 34 kg yük eklenir ve aracın kapasitesi hesaplanırken her yolcu için 68 kg alınır.

Bunu hesaba entegre etmek gerekirse, kablosuz şarj sistemi entegrasyonu ile aracın kullanılabileceği minimum batarya sayısı olan 3'e düşülmesi durumunda, araçtan sökülecek 2 batarya ile 1170 kg hafifleyeceği, buna karşılık 200 kg kablosuz şarj alıcı sistemi entegrasyonu ile ağırlaşarak toplamda 970 kg hafiflemiş olacağı belirlenebilir.

Avenue Electron aracının boş ağırlığı 12815 kg'dır. Türkiye'de limit olan 18 ton için 5185 kg'lık bir yolcu kapasitesi mevcuttur ve bu da 76 yolcuya denk gelmektedir.

76 yolcu için araca eklenecek olan ağırlık ile araç test ağırlığı 15400 kg olmuştur.

Hafifleden sonraki araç ağırlığı 11645 kg olacaktır. Bunun limitlere ulaşması için 6355 kg yolcu ağırlığı payı bulunmaktadır. Bu da 93 yolcuya denk gelmektedir.

93 yolcu için araca eklenecek ağırlık ile aracın test ağırlığı 14807 kg olacaktır.

Araç toplamda 593 kg hafiflemiştir ve bu da test verilerine doğrusal olarak yansıtıldığında kablosuz şarj sistemi ile aracın tüketim değeri 0,75 kWh/km olarak hesaplanacaktır.

Tablo 5.4 Priz Şarjlı ve Kablosuz Şarjlı Araç Kıyaslaması

İçerik	Priz Şarjlı	Kablosuz Şarjlı
Batarya Sayısı	5	3
Batarya Kapasitesi	510 kWh	306 kWh
Boş Araç Ağırlığı (kg)	12.815	11.645
Tüketim Test Ağırlığı (kg)	15.400	14.807
Tüketim Değeri	0,80 kWh/km	0,75 kWh/km

Bu veriler ile araç başına belirlenen rota üzerinde aylık tüketim miktarları Tablo 5.5.'de gösterilmiştir.

Tablo 5.5 Priz Şarjlı ve Kablosuz Şarjlı Araçların Aylık Tüketim Miktarları

	<b>Priz Şarjlı</b>	<b>Kablosuz Şarjlı</b>
<b>Tur Mesafesi (km)</b>	46	46
<b>Tüketim (kWh)</b>	36,8	34,5
<b>Klima Tüketimi (kW)</b>	7,2	7,2
<b>Tur Süresi (dk)</b>	75	75
<b>Klima Tüketim Değeri (kWh)</b>	9	9
<b>Bir Turdaki Toplam Tüketim (kWh)</b>	45,8	43,5
<b>Günlük Tur Sayısı</b>	5	5
<b>Günlük Tüketim (kWh)</b>	229	217,5
<b>Aylık Tüketim (kWh)</b>	6870	6525
<b>Toplam Aylık Tüketim (kWh)</b>	6870	6525

Tabloda hesaplanan bir turdaki toplam tüketim verileri dikkate alındığında aracın şarj gerekliliğini karşılamak için gerekli statik ve dinamik şarj istasyonu miktarları belirlemek için şöyle bir değerlendirme yapılabilir:

1. Aracın park süresi boyunca statik şarj istasyonuna park etmesi durumunda şarj gereksinimi karşılanabiliyor mu?
2. Eğer karşılanamıyorsa gerekli enerji transferi için kaç durakta şarj istasyonu konumlandırması yapılmalı?

Bu değerlendirme kriterleri, özellikle sistemin maliyet optimizasyonunu sağlamak için statik şarj ile yeterli enerji transferini yapması durumunda dinamik şarj istasyonlarının kurulmasının önceliklendirilmemesi için sorgulanmalıdır.

Araç 25 dk şarj olabileceğine göre ve bu sırada klimalarının açık olacağını varsaydığımızda oluşan tüketim değerleri Tablo 5.6.'da gösterilmiştir.

Tablo 5.6 Kablosuz Şarj ile Çalışan Otobüsün Her Turda Tüketeceği Enerji

<b>Tur boyunca gerekli enerji (kWh)</b>	43,5
<b>Park süresi (dk)</b>	25
<b>Klima tüketimi (kW)</b>	7,2
<b>Klima tüketim miktarı (kWh)</b>	3
<b>Diğer tura başlamadan gerekli enerji (kWh)</b>	46,5

Aracın 25 dk şarj olması ile yapılacak enerji transferi hesaplandığında ortaya çıkacak sonuçlar Tablo 5.7.'deki gibi olacaktır:

Tablo 5.7 Statik Şarj Miktarı

<b>Şarj Gücü (kW)</b>	200
<b>Şarj Süresi (dk)</b>	25
<b>Şarj Miktarı (kWh)</b>	83,5

Hesaplanan statik enerji transferi aracın gerektirdiği enerji miktarını karşıladığından dinamik şarj sistemi kurulmasına ihtiyaç olmayacaktır. Bu etki projenin uygulanabilirliğini arttıracak ve yatırım geri dönüş süresini kısaltacaktır.

Özellikle şarj miktarı incelendiğinde, tüketim değerinin şarj miktarının yaklaşık %55'i olması araç tüketimindeki arttıracak etkenleri tolere edebilecek ve farklı güzergahlara uyarlama açısından büyük esneklik sağlayacaktır.

#### 5.4. Yatırım Maliyetleri

114 numaralı hat dönüşümünde yer alacak maliyet kalemleri şöyle toparlanabilir:

1. Hat üzerinde çalışacak 8 elektrikli kablosuz şarj sistemi entegre edilmiş şehir içi otobüs (Referans olarak bu çalışmada Temsa Avenue Electron 12m + ENRX Kablosuz şarj sistemi verileri kullanılmıştır)
2. M1 Durağı park bölgesinde 1+1 (yedekli) statik kablosuz şarj istasyonu (ENRX Kablosuz şarj sistemi verileri kullanılmıştır)
3. Statik şarj istasyonları için elektrik altyapı çalışması (AS Power firması verileri kullanılmıştır)
4. Statik şarj istasyonları için asfalt altı kurulum maliyetleri (Yapı Firması verileri kullanılmıştır)

Araç için Temsa Avenue Electron aracı fiyatı ve üzerine kablosuz şarj alıcı sistemi entegre edilmiş halde 500.000 €olarak fiyat bu hesapta yaklaşım için temsili olarak kullanılmıştır.

Tablo 5.8 Avenue Electron 12m Araç Fiyatı

<b>Maliyet Kalemi</b>	<b>Miktar</b>	<b>Birim</b>
Birim Araç Fiyatı	500.000	EUR
Araç Adeti	8	Ad
Toplam Araç Fiyatı	4.000.000	EUR

Şarj istasyonu maliyeti ENRX firmasının fiyat teklifi baz alınarak hazırlanmıştır. Bu fiyatlar öngörülse olarak verilmiştir ve proje uygulama sürecinde değişiklik olabilir. Alınan fiyatlar Tablo 5.9.'da gösterilmektedir.

Tablo 5.9 ENRX Statik Şarj Sistemi Maliyetleri (Ağustos 2025)

<b>Maliyet Kalemi</b>	<b>Miktar</b>	<b>Birim</b>
İstasyon Maliyeti	200.000	EUR
Toplam Maliyet	400.000	EUR

Şarj sistemi için gerekli elektrik altyapısı, inşaat ve devreye alma maliyetleri için ayrılan bütçe Tablo 5.10.'da gösterilmiştir.

Tablo 5.10 Şarj İstasyonu Elektrik Altyapısı, Montaj ve Devreye Alma Bütçesi (Ağustos 2025)

<b>Maliyet Kalemi</b>	<b>Miktar</b>	<b>Birim</b>
Kablolama Bedeli	25.000	EUR
Montaj, Kurulum ve Devreye Alma	50.000	EUR
Toplam Maliyet	75.000	EUR

Kablolama bedelleri bölgenin enerji dağıtım sistemine göre değişiklik gösterebilir. Enerji hattının şehir şebekesine olan mesafesi, bu hattı sağlamak için gerekli gücü sağlayabilecek trafoya olan mesafeye bağlıdır.

Proje için belirlenen bölge tarım arazileriyle çevrili ve etrafında kalabalık yerleşimlerin bulunmadığı bir yer olmasından dolayı sistemin gerektireceği gücü sağlayabilecek enerji altyapısı için büyük yatırımlar gerektirmeyeceği ilgili firmalarla yapılan sözlü görüşmeler neticesinde öngörülmüştür.

Bütün maliyet kalemlerini topladığımızda elde edeceğimiz bütçe Tablo 5.11.'de gösterilmiştir:

Tablo 5.11 Toplam Yatırım Bütçesi

<b>Araç Yatırımı</b>	4.000.000
<b>Şarj İstasyonu</b>	400.000
<b>Altyapı, Montaj ve Devreye Alma</b>	75.000
<b>Toplam</b>	4.475.000

Yatırım bütçesi için belirlenen miktar öngörülse olup, özellikle firmaların bu fiyatları sağlamaları için yapmaları gereken mühendislik çalışmalarını bu aşamada yapmadığı için değişiklik gösterebilir.

## 5.5. İşletme Bedelleri

Araçların işletme giderlerini oluşturan maliyet kalemleri şu şekilde incelenmiştir:

1. Enerji giderleri
2. Servis Bakım giderleri
3. Sürücü
4. Araç Sigorta ve Vergileri

Bütün giderler hesaplanırken yıllık artış %10 olarak alınmıştır.

Araçların günlük ve yıllık tüketim bilgisi ile, bunların TL ve EUR birimi cinsinde belirlenen tüketim bedelleri Tablo 5.12.'de gösterilmiştir:

Tablo 5.12 Yıllık Enerji Maliyetleri

<b>Araç Günlük Tur</b>	5
<b>Araç Tur Başı Tüketim (kWh)</b>	46,5
<b>Araç Günlük Tüketim (kWh)</b>	232,5
<b>İstasyon Verimi</b>	80%
<b>Harcanan Enerji (kWh)</b>	290,6
<b>Araç Sayısı</b>	8
<b>Günlük Toplam Tüketim (kWh)</b>	2.325,0
<b>Yıllık Tüketim (kWh)</b>	848.625,0
<b>Elektrik Birim Fiyatı (TL/KWh)</b>	3,9
<b>Yıllık Elektrik Maliyeti (TL)</b>	3.301.151,3
<b>Yıllık Elektrik Maliyeti (EUR)</b>	69.177,5

8 araçlık bu filoda araçların her biri için yıllık 200.000 TL bütçe ayrıldığı durumda ortaya çıkan servis bakım bedelleri Tablo 5.13.'de gösterilmiştir.

Tablo 5.13 Yıllık Servis Bakım Bütçesi

<b>Yıllık Servis Bakım Maliyeti (TL/Araç)</b>	200.000
<b>Yıllık Toplam Servis Bakım Maliyeti (TL)</b>	1.600.000
<b>Yıllık Toplam Servis Bakım Maliyeti (EUR)</b>	33.529

Günlük 16 saat ve haftanın 7 günü çalışacak bu otobüs güzergahında 8 araç için toplamda 20 adet personel bulundurulması gerekmektedir.

Bu planlama ile personellerin yıllık maliyeti Tablo 5.14.'de gösterilmiştir.

Tablo 5.14 Yıllık Personel Maliyeti

<b>Çalışan Personel Sayısı</b>	20
<b>Aylık Personel Maliyeti (TL)</b>	100.000,0
<b>Aylık Toplam Maliyet (TL)</b>	2.000.000,0
<b>Yıllık Toplam Maliyet (TL)</b>	24.000.000,0
<b>Yıllık Toplam Maliyet (EUR)</b>	502.933,8

Araçların yıllık sigorta ve vergi maliyetleri Tablo 5.15.'de gösterilmiştir.

Tablo 5.15 Yıllık Sigorta ve Vergi Maliyeti

<b>Yıllık araç sigortası bedeli (TL)</b>	55.000
<b>Muayene ücreti (TL)</b>	3.500
<b>MTV Ödemesi (TL)</b>	23.500
<b>Toplam Sigorta ve Vergi Ödemesi (TL)</b>	82.000
<b>Araç Adeti</b>	8
<b>Toplam Maliyet (TL)</b>	656.000
<b>Toplam Sigorta ve Vergi Ödemesi (EUR)</b>	13.746,86

Araç için öngörülen işletme bedelleri Tablo 5.16.'da gösterilmiştir.

Tablo 5.16 1. yıl için hesaplanan işletme giderleri

<b>Enerji (EUR)</b>	69.177,5
<b>Servis Bakım (EUR)</b>	33.528,9
<b>Personel (EUR)</b>	502.933,8
<b>Sigorta/Vergi (EUR)</b>	13.746,9
<b>Toplam (EUR)</b>	619.387,1

Bu belirlenen değerler minimum bedeller üzerinden hesaplanmıştır. Araçların getireceği ek gider kalemleri hesaba dahil edilmemiştir.

Giderleri yıllık %10 artış ile 10 yıl için hesapladığımızda oluşan değerler Tablo 5.17.'de gösterilmiştir.

Tablo 5.17 Toplam İşletme Giderleri

<b>1. Yıl (EUR)</b>	619.387,1
<b>2. Yıl (EUR)</b>	681.325,8
<b>3. Yıl (EUR)</b>	749.458,4
<b>4. Yıl (EUR)</b>	824.404,2
<b>5. Yıl (EUR)</b>	906.844,6
<b>6. Yıl (EUR)</b>	997.529,1
<b>7. Yıl (EUR)</b>	1.097.281,0
<b>8. Yıl (EUR)</b>	1.207.010,2
<b>9. Yıl (EUR)</b>	1.327.711,2
<b>10. Yıl (EUR)</b>	1.460.482,3
<b>10 Yıllık Toplam (EUR)</b>	9.871.434,8

### 5.6. Yolcu Sayısının Değişimi ve Gelirler

Tezin önceki kısımlarında otobüs bilet fiyatlarının yolcular için dezavantajlı seviyelerde belirlendiğini anlatmıştık. Bu sistem entegrasyonu ile bilet fiyatlarındaki potansiyel iyileşmenin incelenmesi yapılabilir.

Özellikle araç boş ağırlığı ile aracın tüketiminin arasındaki doğrusal değişim, aracın taşıyabileceği yolcu sayısının artmasına neden olacaktır. Araç önceden hatta çalışan otobüsün taşıdığı yolcu sayısını taşıdığı durumda daha hafif olacak ve daha az yakıt tüketecektir.

Bu tüketim düşüşü aracın işletme bedellerini düşürecek ve bilet fiyatlarındaki potansiyel indirimi ortaya çıkaracaktır.

Araç boş ağırlığı kıyaslamasında belirlenen 1755 kg'lık fark neticesinde aracın tüketim değerinin değişmeden aynı ağırlıkta yolcu taşıyabilecek olması, araca 25 yolcu daha eklenebilmesini sağlayacaktır.

Anlık ortalama 75 yolcu taşınması durumunda kapasitenin 100'e çıkabileceği ve bilet fiyatlarında %25'lik bir indirim potansiyelini doğurmaktadır.

Mevcut belirlenen bilet fiyatlarının işletmenin karlılık politikasına uygun olduğu varsayıldığında araçta oluşacak bu potansiyel ile bilet fiyatlarının 21 TL'ye düşürülmesi, bilet ucuzlamasından dolayı beklenen tercih edilebilirlik artışına hizmet edecek ve işletme gelirlerini azaltmayacaktır.

İndirim miktarı ile tercih edilebilirliğin arasındaki oranın eşit olmayacağı ve işletmenin güvende kalması açısından hesabın geri kalanında bilet fiyatları 22 TL olarak kullanılacaktır.

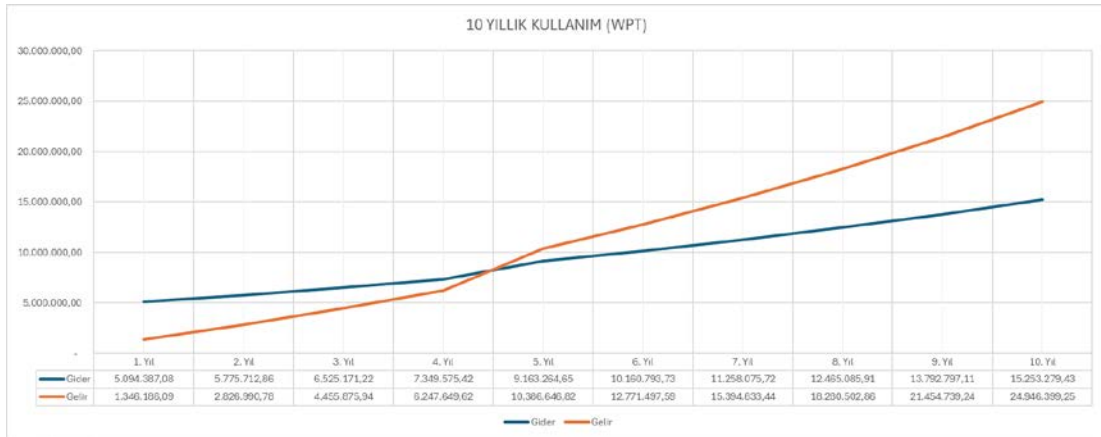
Bu değişim ile her aracın ortalama bir turda 200 yolcu taşınması ve bilet fiyatlarının 22 TL olması durumunda oluşması beklenen işletme gelirleri Tablo 5.18.'de hesaplanmıştır.

Tablo 5.18.10 Yıllık İşletme Gelirleri

<b>Tur başına yolcu ortalama</b>	200
<b>Günlük araç başı toplam yolcu</b>	1000
<b>Günlük toplam yolcu</b>	8000
<b>Bilet Fiyatı (Ortalama) (TL)</b>	22
<b>Günlük Toplam Gelir (TL)</b>	176.000,0
<b>1. Yıl Yıllık Gelir (TL)</b>	64.240.000,0
<b>1. Yıl Yıllık Gelir (EUR)</b>	1.346.186,1
<b>2. Yıl Yıllık Gelir (EUR)</b>	1.480.804,7
<b>3. Yıl Yıllık Gelir (EUR)</b>	1.628.885,2
<b>4. Yıl Yıllık Gelir (EUR)</b>	1.791.773,7
<b>5. Yıl Yıllık Gelir (EUR)</b>	1.970.951,1
<b>6. Yıl Yıllık Gelir (EUR)</b>	2.168.046,2
<b>7. Yıl Yıllık Gelir (EUR)</b>	2.384.850,8
<b>8. Yıl Yıllık Gelir (EUR)</b>	2.623.335,8
<b>9. Yıl Yıllık Gelir (EUR)</b>	2.885.669,4
<b>10. Yıl Yıllık Gelir (EUR)</b>	3.174.236,4

### 5.7. Yatırım Geri Dönüşü (ROI)

Yapılan hesaplamalarla bu dönüşümün gerektirdiği maliyet kalemleri belirlenmiş ve 10 yıllık süre içerisinde yüzde 10 artışla getireceği işletme maliyetleri belirlenmiştir.



Şekil 5.16. Yatırım Geri Dönüş Hesaplaması

Yapılan hesaplamalar ile yatırımın 4 yıl sonunda geri dönüşü beklenmektedir ve toplamda 10 yıl sonunda 9,7M Euro kar edilmesi potansiyeli bulunmaktadır.

Ek olarak maliyet eklenmeden elde edilebilecek bazı kazanımlar şöyle listelenebilir:

1. Şarj istasyonu yedekli olarak hesaplanmıştır. Aslında 2 adet şarj istasyonu kurulu olacaktır ve hat üzerindeki araçların artması durumunda 16 araca kadar operasyon aynı şekilde mümkündür.
2. Şarj istasyonları başka hat otobüslerine de hizmet edebilir. Başka hatlara da kablosuz şarj alıcısı entegre edilmiş otobüsler kazandırıldığı durumda bu istasyonlar kullanılabilir.
3. Araçlar gündüz şarj edildiği için gece park ettiklerinde şarj ihtiyacı olmayacaktır ve bu sürede başka hat otobüslerine de şarj için uygun olacaktır.
4. Şarj istasyonları 10 yılın sonunda kullanılmaya devam edilebilir. Tekrar yatırım gerektirmeden, yeni otobüslerle de kullanılabilir.

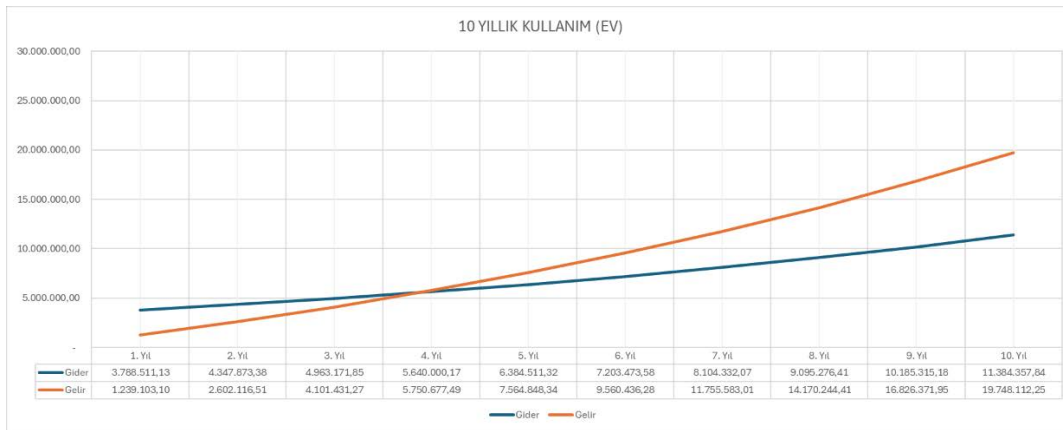
Elde edilen verilerin priz şarjlı bir sistem ile aynı araç adeti ve rota ile uygulanması senaryosunu kıyaslamak için oluşturulan yatırım maliyetleri Tablo 5.19.'da gösterilmiştir:

Tablo 5.19 Priz Şarjlı Senaryo Yatırım Bedelleri

<b>İstasyon Yatırım</b>	80.000 EUR
<b>Montaj ve kurulum yatırım</b>	-
<b>Araç Yatırım</b>	3.200.000 EUR
<b>Toplam</b>	3.280.000 EUR

Birim araç fiyatı, araç üzerinde kurulu olacak olan kablosuz şarj sistemi alıcılarının olmamasından dolayı 400.000 EUR olarak alınmıştır. Şarj istasyonları ise 10.000 EUR olarak alınmıştır.

Kablosuz şarj sisteminin araç hafiflemesi avantajını tam olarak kullanamadığı için bilet fiyatları korunmuştur ve elde edilen yatırım geri dönüşü grafiği Şekil 5.17.' gösterilmiştir.



Şekil 5.17 Priz Şarjlı Senaryo Yatırım Geri Dönüşü

Priz şarjlı olan senaryoda yatırım geri dönüşü 4. Yılın ortalarında olmasına karşılık elde edilen kâr 8,7M EUR olarak hesaplanmıştır.

Priz şarjlı senaryonun kablosuz şarj sistemli senaryoya göre bazı dezavantajları şöyle listelenebilir:

1. Üst yapı kurulumu ile park yerlerinde belirli alanların istasyonlardan dolayı kullanılmaması.
2. Otobüslerin gece şarj edilmek için park edilmesi ve bunun için personel çalıştırılması
3. Otobüslerin anlık taşıma kapasitesinin batarya yükünden dolayı azalması
4. Şarj istasyonlarının sadece gündüz uygun olması ancak gündüz diğer hat otobüslerinin de çalışmasından dolayı paylaşımlı bir kullanımın uygun olmaması

### **5.8. Dönüşümün Dezavantajları**

Şarj sistemi dönüşümünün avantajları kadar dezavantajları da dikkate alınmalıdır. Temel dezavantajları şu şekilde listelenebilir:

1. Kablosuz şarj sistemi gelişmekte olan bir teknolojidir. Şu anki gelişimi ve potansiyeli her gün ilerlemektedir. Bu yüzden yapılacak entegrasyon çalışmalarında sektöre yön veren, yaygın olarak tercih edilen ve gelecekteki teknolojilere ayak uydurabilecek sistemler tercih edilmelidir.
2. Kablosuz şarj sistemlerinde araçların yerle arasındaki hava boşluğu şarj verimini etkilediğinden dolayı araçlar şehir içindeki olağandışı koşullarda alttan çarpma riskine maruz kalabilir.
3. Sistemler ve ürünler gelişim aşamasında olduğundan dolayı parça temini, uzman teknik personel gibi aracın arıza durumlarında operasyon dışı kalma süresini uzatabilecek etkenler iyi araştırılmalıdır.
4. Yatırım maliyetleri oldukça yüksektir. Bunların gelecekte düşürülecek şekilde çalışmaların devam etmesi beklenmektedir.
5. Manyetik kalkanlama çok hassas yapılmalıdır. Yapılmaması durumunda otobüs donanımları ve yolcuların zarar görme riski vardır.

### **5.9. Sürdürülebilir Enerji Çözümleri**

Elektrik enerjisinin sürdürülebilir üretim yöntemleri şehir içi kullanımda tezde işlenen konuları bir adım öteye taşıyacak alternatifler yaratabilir. Özellikle Adana güneş enerjisi kullanımı için coğrafi olarak avantajlı bir bölge olması nedeniyle tercih edilebilir.

Tezde işlenen otobüs güzergahının park alanı M1 Real AVM'nin bulunduğu bölgede tarım alanları, büyük düzlükler ve çok büyük bir AVM otoparkı bulunmaktadır. Büyük AVM otoparkına yapılacak bir çatı projesi ve üzerine konumlandırılacak güneş panelleri ile büyük miktarda enerji üretme potansiyeli vardır.



Şekil 5.18. M1 Real AVM Otopark Bölgesi (Anonim, 2025)

Yaklaşık 43.200 m<sup>2</sup>'lik alan böyle bir potansiyel taşımaktadır. Bunun haricinde çevrede görünen büyük tarlalar da enerji üretimi açısından değerlendirilmesi durumunda nasıl bir maliyet avantajı oluşacağı araştırılmalıdır.



## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, kablosuz şarj sistemlerinin şehir içi elektrikli otobüslere entegrasyonunun taşıt tasarımı, işletme verimliliği, maliyet optimizasyonu ve kentsel sürdürülebilirlik üzerindeki etkileri çok boyutlu bir yaklaşımla incelenmiştir.

Literatür taramaları, uluslararası standart ve regülasyon analizleri, teknik bileşenlerin değerlendirilmesi ve Adana kenti özelinde geliştirilen senaryo, kablosuz şarj teknolojisinin yalnızca enerji aktarımı sağlayan bir sistem olmadığını, aynı zamanda geleceğin ulaşım altyapısında dönüşüm yaratan stratejik bir bileşen olduğunu ortaya koymuştur.

### 6.1. Teknik Bulgular

Araştırma sonuçları göstermektedir ki kablosuz şarj sistemlerinin otobüslere entegrasyonu, tasarımsal ve mühendislik anlamda yeni parametreler ortaya çıkarmaktadır:

1. Alıcı sistemlerin konumlandırılması, araç şasisi dayanımı ve yaklaşma–uzaklaşma açıları üzerinde doğrudan etkilidir. Bu nedenle, CAE ve FEM gibi sayısal yöntemler kullanılarak şasi optimizasyonunun yapılması zorunlu hale gelmektedir.
2. Batarya kapasitesinin kablosuz şarj senaryolarıyla optimize edilmesi, araç ağırlığının azalmasına, yolcu kapasitesinin artmasına ve enerji verimliliğinin yükselmesine imkân tanımaktadır. Dinamik şarj sistemleri ile desteklenen küçük batarya paketleri hem maliyetleri hem de çevresel etkiyi azaltıcı potansiyel taşımaktadır.
3. Termal yönetim, özellikle yüksek güçlü WPT sistemlerinde kritik bir tasarım parametresi olarak öne çıkmaktadır. Aktif soğutma çözümleri ve malzeme optimizasyonu, sistem güvenliği ve uzun ömürlülük için gerekli görülmektedir.
4. Elektromanyetik alan güvenliği, yolcular, sürücüler ve bakım personeli açısından göz ardı edilemeyecek bir parametredir. Bu noktada uygun kalkanlama çözümleri, elektromanyetik uyumluluk (EMC) analizleri ve uluslararası standartlara uyum, sistemin güvenliğini belirleyici faktörlerdir.

### 6.2. Ekonomik ve Operasyonel Bulgular

Çalışma kapsamında yapılan TCO ve ROI analizleri, kablosuz şarj sistemlerinin uzun vadede ekonomik açıdan avantaj sunduğunu göstermektedir:

1. Toplam Sahip Olma Maliyeti (TCO) açısından, batarya boyutunun küçülmesi, bakım ihtiyacının azalması ve otomatik şarj senaryolarının sağladığı operasyonel kolaylıklar, maliyetleri geleneksel priz şarj sistemlerine göre düşürmektedir.
2. Yatırım Geri Dönüş Süresi (ROI) incelendiğinde, özellikle yoğun kullanılan hatlarda ve yüksek yolcu kapasitesine sahip güzergâhlarda kablosuz şarj sistemlerinin ilk yatırım maliyetini orta vadede amorti edebildiği görülmektedir.

3. Adana için geliştirilen örnek senaryo, durak bazlı statik şarj altyapısının en verimli çözüm olduğunu göstermektedir. Bu yaklaşım, başlangıçtaki yüksek altyapı maliyetlerine rağmen uzun vadeli ekonomik sürdürülebilirlik sağlamaktadır.

### 6.3. Kentsel ve Çevresel Bulgular

Kablosuz şarj sistemleri, yalnızca mühendislik ve maliyet parametreleriyle değil, aynı zamanda kentsel planlama ve çevresel sürdürülebilirlik boyutlarıyla da önem taşımaktadır:

1. Şarj istasyonlarının yer seçimi, şehir içi ulaşım akışını ve yolcu yoğunluğunu doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, kablosuz şarj entegrasyonunun trafik yönetimi ve yolcu deneyimiyle uyumlu bir şekilde planlanması gerekmektedir.
2. Dinamik kablosuz şarj sistemleri, büyük bataryalara olan ihtiyacı azaltarak kritik hammaddelere bağımlılığı düşürmekte, böylece ekolojik sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır.
3. Daha küçük batarya paketleri ve optimize edilmiş enerji tüketimi, karbon ayak izini azaltmakta ve elektrikli toplu taşımının iklim dostu bir çözüm haline gelmesini hızlandırmaktadır.
4. Sistemin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre edilmesi, şehirlerin sürdürülebilir ulaşım hedeflerine ulaşmalarında stratejik bir rol üstlenmektedir.

### 6.4. Öneriler

2030'ların ortasına kadarki sürede çevre düzenlemeleri kapsamında trafikteki araçların büyük bir kısmının elektrikle yürüyeceği göz önüne alındığında bu teknoloji ile ilgili çalışma yapma ihtiyacı da artmaktadır.

1. Türkiye'de kablosuz şarjlı otobüslerin uygulanabilirliğini test etmek için belediyeler, üniversiteler ve sanayi kuruluşları iş birliğinde pilot uygulamalar başlatılmalıdır.
2. Uzun vadeli kentsel ulaşım planlarına, kablosuz şarj istasyonlarının stratejik konumlandırılması ve enerji tedarik altyapısının güçlendirilmesi dahil edilmelidir.
3. IEC 61980, SAE J2954, ISO 19363 gibi uluslararası standartlara uyum sağlanmalı, Türkiye'nin ulusal mevzuatı bu çerçevede güncellenmelidir.
4. Her şehir, yolcu yoğunluğu, güzergâh yapısı ve enerji şebekesi kapasitesine göre farklılaştırılmış şarj stratejileri geliştirmelidir.
5. Akıllı ulaşım sistemleri, otonom araçlar ve yenilenebilir enerji entegrasyonu üzerine yapılacak araştırmalar, kablosuz şarj sistemlerinin değerini artıracaktır.

## 6.5. Genel Değerlendirme

Sonuç olarak, kablosuz şarj sistemlerinin şehir içi elektrikli otobüslere entegrasyonu, yalnızca teknolojik bir yenilik değil, aynı zamanda araç tasarımı, ekonomik verimlilik, çevresel sürdürülebilirlik ve kentsel ulaşım planlaması açısından bütünsel bir dönüşümün kısmını aralamaktadır. Bu dönüşümün hayata geçirilebilmesi, mühendislik yenilikleri kadar, karar vericilerin vizyoner yaklaşımlarına, altyapı yatırımlarının sürekliliğine ve toplumsal kabul süreçlerine de bağlıdır.





## 7. KAYNAKLAR

- A. Ahmad, M. S. (2018). A Comprehensive Review of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 4(1), 38-63. doi:10.1109/TTE.2017.2771619
- Ahmed A.S. Mohamed, A. A. (2020). A comprehensive overview of inductive pad in electric vehicles stationary charging. *Applied Energy*. doi:10.1016/j.apenergy.2020.114584
- Anonim1. (2025, 08 22). <https://www.petroturk.com/> adresinden alındı
- Anonim2. (2025). 08 20, 2025 tarihinde petrolofisi.com: <https://www.petrolofisi.com.tr/akaryakit-fiyatlari/adana-akaryakit-fiyatlari> adresinden alındı
- Anonim3. (2025). 08 20, 2025 tarihinde [https://www.adana.bel.tr/panel/uploads/ukomeduyurular\\_v/files/1742193380yolcu-tasima-arac-lari-uc-ret-tarifeleri.pdf](https://www.adana.bel.tr/panel/uploads/ukomeduyurular_v/files/1742193380yolcu-tasima-arac-lari-uc-ret-tarifeleri.pdf) adresinden alındı
- Anonim3. (2025). 08 20, 2025 tarihinde <https://www.controller.com/blog/fun-stuff/2018/01/bombardiers-primove-wireless-charging-system-propels-e-buses-to-key-milestone> adresinden alındı
- Anonim4. (2020). 08 20, 2025 tarihinde <https://www.greencarcongress.com/2020/05/20200520-link.html> adresinden alındı
- Anonim5. (2025, 08 20). [https://en.wikipedia.org/wiki/Antelope\\_Valley\\_Transit\\_Authority](https://en.wikipedia.org/wiki/Antelope_Valley_Transit_Authority) adresinden alındı
- Anonim6. (2025). 08 20, 2025 tarihinde Google Earth: <https://earth.google.com/> adresinden alındı
- Anonim7. (2025, 08 20). Google Maps: <https://www.google.com/maps> adresinden alındı
- Arulvendhan, K. S. (2024). Hybrid Compensation Based Efficient Wireless Charging System Design With Solar Photovoltaic Interface Toward Sustainable Transportation. *IEEE Access*, 1-1. doi:10.1109/ACCESS.2024.3414169
- Attaianes, C. &. (2024). Performance Comparison of Inductive Charging Systems for Electric Buses. doi:10.1109/ESARS-ITEC60450.2024.10819780
- Bi, Z. R. (2020). Wireless charging and shared autonomous battery electric vehicles (W+SABEV): synergies that accelerate sustainable mobility and greenhouse gas emission reduction. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*(25). doi:10.1007/s11027-019-09870-9
- Bilgiç, E. &. (2024). Wireless power transfer systems and wireless charging design between electric vehicles. *Journal of Computer & Electrical and Electronics Engineering Sciences*(2), 56-61. doi:10.51271/JCEES-0019
- Boukhchana, A. F.-B. (2024). Optimal planning strategy for charging and discharging an electric vehicle connected to the grid through wireless recharger. *Frontiers in Energy Research*(12). doi:10.3389/fenrg.2024.1453711

- C. C. Mi, G. B. (2016). Modern Advances in Wireless Power Transfer Systems for Roadway Powered Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(10), 6533-6545. doi:10.1109/TIE.2016.2574993
- Colombo, C. G. (2022). Literature Review on Wireless Charging Technologies: Future Trend for Electric Vehicle? *2022 Second International Conference on Sustainable Mobility Applications, Renewables and Technology (SMART)*, 1-5. Cassino, Italy. doi:10.1109/SMART55236.2022.9990331
- Csonka, B. (2021). Optimization of Static and Dynamic Charging Infrastructure for Electric Buses. *Energies*, 14(12), 3516. doi:10.3390/en14123516
- Fisher, T. &. (2014). Electric vehicle wireless charging technology: A state-of-the-art review of magnetic coupling systems. *Wireless Power Transfer(1)*, 87-96. doi:10.1017/wpt.2014.8
- Gbey, E. T. (2022). A Bibliometric Survey of Research Output on Wireless Charging for Electric Vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, 13(2), 37. doi:https://doi.org/10.3390/wevj13020037
- Hajjine, B. &.-Y. (2016). Development of a Printed Coil for Wirelessly Charging a Tracking Elderly Patch. *Wireless Engineering and Technology(7)*, 83-95. doi:10.4236/wet.2016.72009
- He, X. &. (2023). State of the Art Wireless Charging Technology for Electric Vehicles. *Highlights in Science, Engineering and Technology(43)*, 122-136. doi:10.54097/hset.v43i.7412
- I. Okasili, A. E. (2022). A comparison of P5, Cuk and class E2 converters for WPT in EV battery charging. *11th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2022)*, 644-651. Newcastle, United Kingdom. doi:10.1049/icp.2022.1130
- Luo, X. F. (2023). Joint design of electric bus transit service and wireless charging facilities. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review(174)*. doi:10.1016/j.tre.2023.103114
- Mahesh, A. &.-P. (2021). Review on Inductive Wireless Power Transfer Charging for Electric vehicles – A Review. *IEEE Access*, 1-1. doi:10.1109/ACCESS.2021.3116678
- Özbaş, H. A. (2024). Feasibility Assessment of Wireless Charging Application on Istanbul Metrobus Line. *2024 15th National Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 1-5. Bursa, Türkiye. doi:10.1109/ELECO64362.2024.10847127
- Palani, G. S. (2023). Challenges and Barriers of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles. *Energies*, 16(5), 2138. doi:10.3390/en16052138
- Reyhan, A. H. (2023). Elektrikli araçların kablosuz şarj edilmesinde kullanılan güç aktarım yöntemlerinin incelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(4), 1305-1317. doi:10.28948/ngumuh.1307910

- T. S. Chandrasekar Rao, K. G. (2016). Categories, Standards and Recent Trends in Wireless Power Transfer: A Survey. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(20), 1-11. doi:10.17485/ijst/2016/v9i20/91041
- Vishnuram, P. &. (2023). Review of Wireless Charging System: Magnetic Materials, Coil Configurations, Challenges, and Future Perspectives. *Energies*(16). doi:10.3390/en16104020
- Vishnuram, P. P. (tarih yok). Wireless Chargers for Electric Vehicle: A Systematic Review on Converter Topologies, Environmental Assessment, and Review Policy. *Energies*, 16(4), 1731. doi:10.3390/en16041731
- Wang, C. X. (2022). Microwave wireless power transmission technology index system and test evaluation methods. *EURASIP J. Adv. Signal Process*, 16. doi:10.1186/s13634-022-00846-7





## ÖZGEÇMİŞ

Osman BAYSAL 2018 Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği mezunuyum. Makine imalatı sektöründe çeşitli firmalarda görev yaptıktan sonra 2021 yılında Temsa'da Arge Mühendisi olarak Paketleme ve Konfigürasyon ekibinde çalışmaya başladım ve hala görevime devam etmekteyim.

