



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA ÇİFT YÖNLÜ TALEP TAHMİN
ANALİZİ**

Ferhat MİRKAN

**Haziran-2025
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA ÇİFT YÖNLÜ TALEP TAHMİN
ANALİZİ**

Ferhat MİRKAN

**Danışman
Doç. Dr. Musa YILMAZ**

Diğer Jüri Yeleri

Doç. Dr. Mehmet Rıda TÜR

Doç. Dr. Heybet KILIÇ

**Haziran-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Ferhat Mirkan tarafından hazırlanan “Elektrikli Araçlarda Çift Yönlü Talep Tahmin Analizi” adlı tez çalışması 30/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Mehmet Rıda TÜR

.....

Danışman

Doç Dr. Musa YILMAZ

.....

Üye

Doç. Dr. Heybet KILIÇ

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Ferhat MİRKAN
Tarih: 30/06/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA ÇİFT YÖNLÜ TALEP TAHMİN ANALİZİ

Ferhat MİRKAN

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Musa YILMAZ

2025, 56 Sayfa

Günümüzde enerji sistemleri, sürdürülebilirlik, arz güvenliği ve karbon emisyonlarının azaltılması gibi hedefler doğrultusunda hızlı bir dönüşüm sürecinden geçmektedir. Bu dönüşümde, yenilenebilir enerji kaynaklarının artan entegrasyonu sistem esnekliğini ön plana çıkarmış; bu bağlamda elektrikli araçlar (EA), yalnızca ulaşım sektöründe değil, enerji altyapısında da stratejik bir unsur hâline gelmiştir. Elektrikli araçların enerji sistemleriyle çift yönlü etkileşim kurmasını mümkün kılan G2V (Grid-to-Vehicle) ve V2G (Vehicle-to-Grid) teknolojileri, şebekenin yük yönetimi, arz-talep dengesi ve kısa vadeli enerji talebi tahmini gibi kritik süreçlere doğrudan katkı sağlayabilecek potansiyele sahiptir.

Bu tez çalışmasında, Batman ilinde yoğun enerji çekişi olan bir fidere bağlı olarak faaliyet gösteren elektrikli araçların, V2G ve G2V teknolojileri aracılığıyla enerji sistemine olan etkileri teknik ve ekonomik açılarından değerlendirilmiştir. V2G kapsamında, EA bataryalarında depolanan enerjinin Türkiye elektrik piyasasında, EPIAŞ Gün Öncesi Piyasası üzerinden saatlik bazda satış potansiyeli analiz edilmiş; farklı senaryolar altında maliyet etkinliği incelenmiştir. G2V tarafında ise şarj sürelerinin sistem yük profili üzerindeki etkisi değerlendirilmiş ve yük dengeleme kapasitesi ortaya konulmuştur. Ayrıca, elde edilen operasyonel veriler yapay zekâ tabanlı talep tahmin modellerine entegre edilerek sistemin öngörülebilirliği artırılmıştır. Çalışma sonucunda, elektrikli araçların bölgesel enerji sistemleri için hem teknik hem de ekonomik açıdan değer yaratabileceği görülmüş; V2G ve G2V teknolojilerinin doğru planlama ile enerji piyasalarına entegre edilmesinin, şebeke esnekliği ve sürdürülebilir enerji yönetimi açısından önemli katkılar sağlayabileceği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli Araçlar, V2G, G2V, EPIAŞ, Talep Tahmini, Yenilenebilir Enerji, Şebeke Esnekliği.

ABSTRACT
MASTER THESIS
BIDIRECTIONAL DEMAND ANALYSIS FOR ELECTRIC VEHICLES

Ferhat MİRKAN

Batman University Graduate Education Institute

Department of Electrical and Electronics Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Musa YILMAZ

2025, 56 Pages

Today's energy systems are undergoing a rapid transformation driven by objectives such as sustainability, energy security, and the reduction of carbon emissions. In this transformation, the increasing integration of renewable energy sources has brought system flexibility to the forefront. In this context, electric vehicles (EVs) have emerged as a strategic element not only in the transportation sector but also within the energy infrastructure. Technologies enabling bidirectional interaction between EVs and energy systems namely G2V (Grid-to-Vehicle) and V2G (Vehicle-to-Grid) have the potential to directly contribute to critical processes such as load management, supply-demand balancing, and short-term energy demand forecasting.

In this thesis, the technical and economic impacts of electric vehicles operating on a feeder with high energy demand in the city of Batman were evaluated through the implementation of G2V and V2G technologies. Within the scope of the V2G model, the potential for selling the energy stored in EV batteries on an hourly basis in Turkey's electricity market via the EPIAŞ Day-Ahead Market was analyzed, and cost-effectiveness was assessed under different scenarios. On the G2V side, the impact of EV charging schedules on the system's load profile was evaluated, revealing the vehicles' load-balancing capacity. Furthermore, the operational data obtained from simulations were integrated into artificial intelligence-based demand forecasting models to enhance system predictability. The results of the study indicate that electric vehicles can create value for regional energy systems from both technical and economic perspectives. It has been determined that, with proper planning, the integration of V2G and G2V technologies into energy markets can significantly contribute to grid flexibility and the sustainable management of energy systems.

Keywords: Electric Vehicles, V2G, G2V, EPIAŞ, Demand Forecasting, Renewable Energy, Grid Flexibility.

ÖN SÖZ

Elektrikli araçların enerji sistemleriyle olan çift yönlü etkileşimi, sürdürülebilir ve esnek enerji yönetimi açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, G2V ve V2G teknolojileri kapsamında yapılan analizlerle bu potansiyel değerlendirilmiştir.

Çalışmam boyunca bilgi ve desteğini esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Musa YILMAZ'a ve katkı sağlayan tüm jüri üyelerine teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışma süresince yanımda olan ve destek veren sevgili eşim Narin BEDİR MİRKAN'a teşekkür ederim.

Ferhat MİRKAN
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1.GİRİŞ	1
2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR.....	3
2.1. Elektrikli Araçların Tarihçesi	3
2.2. Türkiye’de Elektrikli Araçların Durumu ve Gelecek Projeksiyonu	6
2.3. Dünya’da Elektrikli Araçların Durumu ve Gelecek Projeksiyonu	8
3. ELEKTRİKLİ ARAÇ ÇEŞİTLERİ.....	11
3.1. Tümü Elektrikli Araçlar (TEA)	11
3.2. Hibrit Elektrikli Araçlar (HEA)	13
3.2.1. Seri hibrit elektrikli araçlar	13
3.2.2. Paralel hibrit elektrikli araçlar	14
3.2.3. Seri paralel hibrit elektrikli araçlar	15
3.3. Plug-in Hibrit Elektrikli Araçlar (PHEA)	15
3.4. Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (YHEA)	16
3.5. Elektrikli Araçların Karşılaştırması	17
4. ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ TEKNOLOJİLERİ VE ŞARJ METODLARI	19
4.1. Şarj Teknolojileri	19
4.1.1. AC şarj yöntemi (On board charger)	20
4.1.2. DC şarj yöntemi (Off board charger)	21
4.1.3. Kablosuz (Endüktif) Şarj Yöntemi	22
4.1.4. Batarya değiştirme yöntemi	23
4.2. Elektrikli Araç Şarj istasyonu Standartları	24
4.3. EA Şarj Bağlantı Soketleri	25
4.3.1. Tip 1 konektör (SAE J1772)	25
4.3.2. Tip 2 konektör (IEC 62196-2)	26
4.3.3. Kombine şarj sistemi (CCS) Combo 1	26
4.3.4. Kombine şarj sistemi (CCS) Combo 2 (IEC 62196-3)	26
4.3.5. CHAdeMO	26

4.4. Elektrikli Araç Şarj Modları	26
4.4.1. Şarj mod 1	28
4.4.2. Şarj mod 2	28
4.4.3. Şarj mod 3	29
4.4.4. Şarj mod 4	30
5.MATERYAL VE YÖNTEM.....	32
5.1.Simülasyon Sonuçları	32
5.2. Gerçek Zamanlı Şebeke Verilerinin Analizi.....	35
5.2.1. Aylık Enerji Tüketim Verilerinin Analizi.....	36
5.2.2. Günlük Enerji Tüketim Verilerinin Analizi.....	37
5.2.3. Saatlik Enerji Tüketim Verilerinin Analizi.....	38
6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE BULGULAR.....	42
6.1. EPIAŞ Verileriyle Günlük Enerji Alış Satış (V2G) Maliyet Analizi	42
6.1.1. Senaryo 1 (Zaman bazlı maliyet analizi)	44
6.1.2. Senaryo 2 (Enerji bazlı maliyet analizi)	45
6.1.3. Senaryo 3 (Geniş ölçekte enerji alış satışının değerlendirilmesi).....	46
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	52
KAYNAKLAR	54

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1. Elektrikli araçların özellikleri bakımından karşılaştırılması	18
Çizelge 4.1. SAE'nin tanımladığı AC standartları (SAE Intenational, 2017; Hakam et al., 2024)	21
Çizelge 4.2. SAE'nin tanımladığı DC standartları (SAE Intenational, 2017)	22
Çizelge 4.3. Uluslararası EA şarj standartlarının karşılaştırılması	24
Çizelge 4.4. EA şarj modları (Kircioğlu et al.,2023)	27
Çizelge 6.1. Senaryo 1'e göre enerji alış/satış maliyet analizi	44
Çizelge 6.2. Senaryo 2'ye göre enerji alış/satış maliyet analizi	45

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Dünyanın ilk troylebüsü Elektromete (Kerem, 2014)	4
Şekil 2.2. New York'ta kullanılan ilk elektrikli taksi (Kerem, 2014)	4
Şekil 2.3. Ferdinand Porsche tarafından geliştirilen ilk HEA (Kerem, 2014)	5
Şekil 2.4. Türkiye'de yıllara göre elektrikli araç satış rakamları (EPDK, 2024)	7
Şekil 2.5. Türkiye 'de satışı yapılan elektrikli araç marka-modelleri (TEHAD, 2024) ...	7
Şekil 2.6. EPDK şarj hizmet piyasasına göre aylık kurulumu yapılan şarj soket sayıları (EPDK, 2024)	8
Şekil 2.7. 2012-2024 yılları arasındaki EA satış rakamları (International Energy Agency, 2024).....	9
Şekil 2.8. 2015-2023 yılları arasında kamu ve özel sektör tarafından kurulan hafif hizmet tipi EA şarj noktaları (International Energy Agency, 2024).....	10
Şekil 3.1. Çalışma şekline göre klasik, hibrit ve tümü elektrikli araçlar	11
Şekil 3.2. TEA iç yapısı (Özbay et al., 2020)	12
Şekil 3.3. HEA iç yapısı (Özbay et al., 2020).....	13
Şekil 3.4. Seri hibrit elektrikli araç yapısı	14
Şekil 3.5. Paralel hibrit elektrikli araç yapısı.....	15
Şekil 3.6. Plug-in HEA iç yapısı (Özbay et al., 2020).....	16
Şekil 3.6. YHEA iç yapısı (Özbay et al., 2020).....	17
Şekil 4.1. EA şarj yöntemleri.....	20
Şekil 4.2. AC şarj yöntemi EA şarj istasyonu bileşenleri (Madaram et al., 2024)	20
Şekil 4.3. Kalosuz güç iletim sistemi.....	23
Şekil 4.4. Bağlantı soketleri (Kircioğlu et al.,2023)	25
Şekil 4.5. AC ve DC şarj etme yöntemi (Kircioğlu et al.,2023)	28
Şekil 4.6. Mod 1 şarj bağlantısı (Karapınar & Daldaban, 2022)	28
Şekil 4.7. Mod 2 şarj bağlantısı (Karapınar & Daldaban, 2022)	29
Şekil 4.8. Mod 3 şarj bağlantısı (Karapınar & Daldaban, 2022)	29
Şekil 4.9. Mennekens tipi konnektör (Durmuş et al., 2020).....	30
Şekil 4.10. Mod 3 şarj bağlantısı (Karapınar & Daldaban, 2022)	31
Şekil 5.1. MATLAB elektrikli araç şarj simülasyon modeli	33
Şekil 5.2. Nissan Leaf e+ SOC durumu.....	34
Şekil 5.3 Nissan Leaf e+ batarya akımı	34
Şekil 5.4 Nissan Leaf e+ batarya gerilimi.....	35
Şekil 5.5. Batman ili F1 fiderinin 2024 yılı aylık enerji tüketim değerleri.....	36
Şekil 5.6. Batman ili F1 fiderinin 2024 Aralık ayı enerji tüketim değerleri.....	38
Şekil 5.7. Batman ili F1 fiderinin 2024 Aralık ayı günlük enerji tüketim değerleri.....	39
Şekil 5.8. Fiderin saatlik ortalama ve maksimum enerji çekiş miktarları.....	39
Şekil 5.9. Fiderin enerji yoğunluğunu optimize etmek için gereken EA sayısı.....	40
Şekil 6.1. EPIAŞ tarafından 19.12.2024 tarihi için yayımlanan PTF ve SMF değerleri (EPIAŞ,2024).....	43
Şekil 6.2. EPIAŞ tarafından yayımlanan 2024 saatlik PTF değerleri (EPIAŞ,2024).....	46
Şekil 6.3. Saat 20.00-23.30 Şarj / 12.00-17.30 deşarj döngüsünde yıllık enerji alış satış grafiği.....	47
Şekil 6.4. Saat 20.00-23.30 Şarj / 12.00-17.30 deşarj döngüsünde aylık enerji gelir gider grafiği.....	48
Şekil 6.5. Saat 00.00-03.30 Şarj / 12.00-17.30 deşarj döngüsünde yıllık enerji alış satış grafiği.....	48
Şekil 6.6. Saat 00.00-03.30 Şarj / 12.00-17.30 deşarj döngüsünde aylık enerji gelir gider grafiği.....	49

Şekil 6.7. Saat 00.00-03.30 Şarj / 18.00-23.30 deşarj döngüsünde yıllık enerji alış satış grafiği.....	50
Şekil 6.8. Saat 00.00-03.30 Şarj / 18.00-23.30 deşarj döngüsünde aylık enerji gelir gider grafiği.....	50

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

P:	Anlık Güç (kW/MW)
V:	Gerilim (Voltaj)
I:	Akım (Amper)
Hz:	Hertz
SOC:	Batarya Doluluk Oranı % (State of Charge)

Kısaltmalar

AC:	Alternatif Akım
DC:	Doğru Akım
EA:	Elektrikli Araç
İYM:	İçten Yanmalı Motor
TEA:	Tümü Elektrikli Araç
HEA:	Hibrit Elektrikli Araç
PHEA:	Plug-in Hibrit Elektrikli Araç
YHEA:	Yakıt Hücreli Elektrikli Araç
G2V:	Şebekeden Araca Enerji Transferi (Grid to Vehicle)
V2G:	Araçtan Şebekeye Enerji Transferi (Vehicle to Grid)
TOGG:	Türkiye Otomobil Girişim Grubu
TEHAD:	Türkiye Elektrikli ve Hibrid Araçlar Derneği
EPDK:	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
EPİAŞ:	Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.
GÖP:	Gün Öncesi Piyasası
CO ₂ :	Karbondioksit
kW:	Kilowatt
kWh:	Kilowatt-saat
MW:	Megawatt
MWh:	Megawatt-saat
IEA:	Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency)
EVSE:	Elektrikli Araç Şarj Ekipmanı (Electric Vehicle Supply Equipment)
CCS:	Kombine Şarj Sistemi (Combined Charging System)
CHAdemo:	Charge de Move (Japonya menşeli hızlı şarj standardı)
SAE:	Otomotiv Mühendisleri Derneği (Society of Automotive Engineers)
IEC:	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
IGBT:	Çin Ulusal Standartları (Guobiao Standards)
PLC:	Hat Üzerinden İletişim (Power Line Communication)
CAN:	Kontrolör Alan Ağı (Controller Area Network)
PWM:	Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)

1.GİRİŞ

Günümüzde küresel ölçekte enerji üretim ve tüketim paradigmaları, iklim değişikliğiyle mücadele, enerji güvenliği ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda köklü bir dönüşüm süreci içerisinde. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının (güneş, rüzgâr, biyokütle vb.) enerji sistemlerine artan oranda entegre edilmesi; sistem esnekliği, yük yönetimi ve enerji arz-talep dengesinin sağlanması açısından yeni teknolojilere ve stratejilere olan gereksinimi artırmaktadır. Bu bağlamda, elektrikli araçlar (EA), yalnızca karbon emisyonlarının azaltılması yönünde bir ulaşım çözümü sunmakla kalmayıp, aynı zamanda mobil enerji depolama birimleri olarak enerji sistemleriyle çift yönlü etkileşime girme potansiyeline sahiptir.

EA'ların güç sistemleriyle olan entegrasyonu, iki temel teknoloji çerçevesinde değerlendirilmektedir. G2V (Grid-to-Vehicle) teknolojisi, EA'ların şebekeden enerji alarak bataryalarını şarj etmelerini ifade ederken; V2G (Vehicle-to-Grid) teknolojisi, EA bataryalarında depolanan enerjinin belirli zaman dilimlerinde geri beslenerek şebekeye aktarılmasına olanak sağlamaktadır. Özellikle V2G uygulamaları, talep yanıtı yönetimi, yük dengeleme, ani tüketim artışlarının karşılanması ve yenilenebilir enerji üretimindeki belirsizliklerin giderilmesi açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Bu teknolojilerin bir diğer stratejik önemi ise enerji piyasalarına entegrasyon potansiyelidir. Türkiye'de, saatlik elektrik ticareti Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (EPIAŞ) bünyesinde faaliyet gösteren Gün Öncesi Piyasası (GÖP) üzerinden yürütülmektedir. V2G teknolojisi sayesinde EA'lar, yalnızca enerji tüketicisi değil, aynı zamanda arz sağlayıcı konumuna gelerek elektrik piyasasında aktif bir katılımcı haline gelebilmektedir. Bu bağlamda, EA bataryalarından şebekeye saatlik bazda gerçekleştirilen enerji satışları; anlık piyasa fiyatları doğrultusunda optimize edilerek hem bireysel kullanıcılar hem de şebeke işletmecileri açısından ekonomik fayda sağlamaktadır. Çalışma kapsamında, bu piyasa katılımının teknik uygulanabilirliği ile birlikte maliyet etkinliği de analiz edilerek, V2G sistemlerinin ekonomik fizibilitesi değerlendirilecektir.

Enerji sistemlerinin etkin ve sürdürülebilir biçimde yönetilebilmesi için doğru talep tahmini büyük önem arz etmektedir. EA'ların şarj ve deşarj döngülerinden elde edilen veriler, kısa ve orta vadeli talep tahmin modellerinin doğruluğunu artırma potansiyeline sahiptir. Bu çerçevede, G2V ve V2G teknolojilerinden elde edilecek

operasyonel verilerin yapay zekâ ve makine öğrenmesi temelli talep tahmin yöntemlerine entegre edilmesi, enerji yönetiminde daha esnek ve öngörülebilir sistemlerin oluşturulmasına katkı sağlayacaktır.

Bu tez çalışması, Batman ili sınırları içerisinde yer alan ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip bir fidere bağlı elektrikli araçların, G2V ve V2G teknolojileri kapsamında güç sistemine olan etkilerini kapsamlı şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışmanın odak noktası, bu teknolojilerin enerji arz-talep dengesine, sistem esnekliğine ve kısa vadeli talep tahminine olan katkılarını ortaya koyarak, sürdürülebilir ve ekonomik açıdan verimli enerji yönetimi çözümleri geliştirmektir.

2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

Elektrikli araçlar, son yıllarda sürdürülebilir ulaşım çözümleri arayışında önemli bir rol oynamaktadır. Fosil yakıtlarının çevresel etkilerinin artması ve enerji kaynaklarının tükenme riski, elektrikli araçların benimsenmesini teşvik eden başlıca faktörler arasında yer almaktadır. Bu araçlar, sıfır emisyonlu sürüş sunarak hava kirliliğini azaltma potansiyeline sahiptir. Elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlu (İYM) araçlara kıyasla daha eski bir geçmişe sahiptir. Ancak elektrikli araçlar uzun şarj süreleri, sınırlı menzil performansları ve enerji depolama gibi zorluklardan dolayı çok az ilerleme göstermişlerdir. İYM, performans ve menzil konusunda başarılı bir sonuç göstermekte ve günümüzde en yaygın tercih edilen araç olma özelliğini sürdürmektedir. Literatürde, elektrikli araçların teknolojik gelişimi, altyapı gereksinimleri ve tüketici kabulü gibi konular geniş bir şekilde ele alınmaktadır. Bu bağlamda, elektrikli araçlara ilgi tekrar artmıştır ve gelecekteki rolü üzerine çeşitli perspektiflerden incelenmiştir.

2.1. Elektrikli Araçların Tarihçesi

1835 yılında ilk elektrikli araç (EA) modeli Profesör Stratingh tarafından Hollanda'da geliştirmiştir. Daha sonra Robert Davidson 1838 yılında 6.4 km/h hıza ulaşabilen elektrikli lokomotifini üretmiştir. 1859 yılından sonra Kurşun-asit bataryaları geliştirilmiş ve elektrikli araçlarda kullanılmaya başlanmıştır.

Elektromete adında dünyanın ilk elektrikli trolleybüsü 1882'de Siemens tarafından Berlin'de üretilmiştir. Elektromete iki adet 2.2 kW'lık motora sahip olmakla birlikte 550 V DC ile beslenmektedir ve ortalama 12 km/h hıza sahiptir. Şekil 2.1.'de Dünyanın ilk trolleybüsü Elektromete gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Dünyanın ilk troylebüsü Elektromete (Kerem, 2014)

İYM ile çalışabilen ilk otomobili 1886'da Karl Benz tarafından Motorwagen ismiyle satışa sunulmuştur. Bu aracın motoru arkada ve 3 tekerlek bulundurmaktadır. Motorwagen 0.55 kW'lık enerji ile maksimum 16 km/h hızına çıkabilmekteydi. 1895 yılında iki koltuklu Electrobats isimli elektrik aracını Morris ve Salomon geliştirmişlerdir. 1897 yılında İngiltere'de Londra Elektrikli Taksi Şirketi tarafından 15 tane elektrikli taksi kullanılmıştır. Ardından 1901'de ise New York Taxi firması da elektrikli araçları taksi olarak kullanmaya başlamıştır. Şekil 2.2.'de New York'ta kullanılan ilk elektrikli taksi gösterilmiştir (Kerem, 2014).



Şekil 2.2. New York'ta kullanılan ilk elektrikli taksi (Kerem, 2014)

Elektrikli-benzinli araçlar 1900 yılında French Electroautomobile ve 1903 yılında Krieger tarafından üretilerek ilk kez hibrid konfigürasyon modeli denenmiştir. Mixt Wagen adında ilk deneysel hibrid elektrikli aracın (HEA) tasarımı Ferdinand Porsche tarafından 1901 yılında geliştirilmiştir. HEA tasarımı; normal benzinli motorla sürülen aracın her bir tekerleğine elektrik motorları doğrudan tahrikli motor olarak yerleştirilmiştir. Kurşun-asit aküler tarafından elektrik enerjisi sağlayabilen bu araç saatte 60 km/h hızla dönemin hız rekorunu kırmıştır.



Şekil 2.3. Ferdinand Porsche tarafından geliştirilen ilk HEA (Kerem, 2014)

Woods Motor Araç Şirketi tarafından 1916 yılında İYM ve elektrik motorunu birlikte kullanarak ABD’de ilk HEA geliştirmişlerdir. EA hibrit modeli ise, dört silindirli benzinli motorun doğrudan elektrik motoru grubuna ve ardından konvansiyonel itici şaftı aracılığıyla ön tahrik aksanına bağlanarak geliştirilmiştir. EA üretici firmaları 1920’lerin başından 1960’lara kadar İYM kullanarak üretim yapmışlardır. EA’lara olan ilgi 1920-1960 yılları arasında azalırken İYM’li araçlar dünya çapında popülerdi. EA’lara olan ilginin azalmasının sebepleri aşağıdaki gelişmelerin etkisi olarak belirtilmektedir. (Tuncay & Üstün, 2012).

- Şehirlerarası yolların fiziki durumunu iyileşmesi sonucunda uzun menzilli olan araçlara duyulan ihtiyacın başlaması
- Ham petrolün bulunması sonucunda benzin fiyatlarının düşmesi
- 1912 yılında Charles Kettring’in marş motorunu icat etmesi
- İYM’lerin Henry Ford tarafından seri üretilmeye başlanması
- EA’ların satış fiyatının benzinli araçlara oranla çok yüksek olması

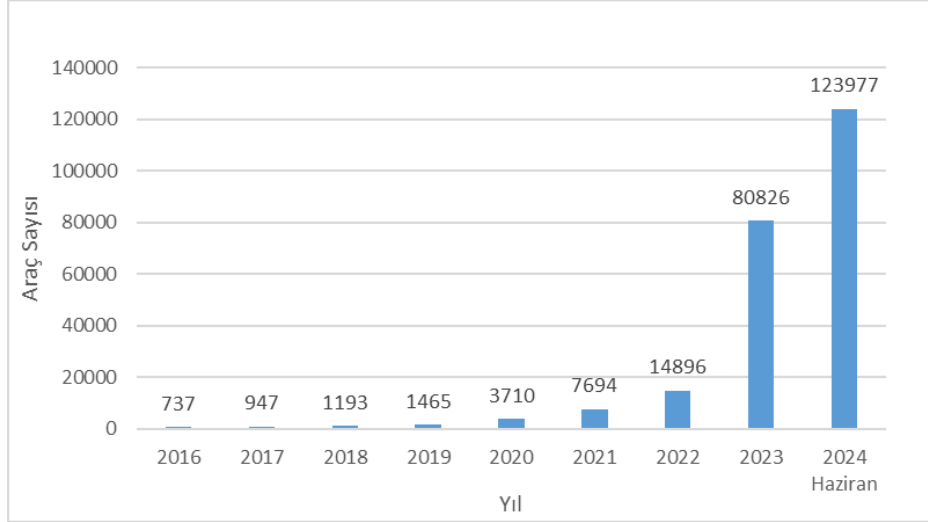
1960'lı yıllarda İYM'lerin salınımının neden olduğu hava kirliliği sonucunda küçük çaplı EA çalışmaları başlamıştır. Bu sayede EA'lara olan ilgi tekrardan artmaya başlamıştır. Amerika, İngiltere, Almanya, Fransa, İtalya ve Japonya gibi birçok ülke EA araştırmalarına 1970'lere yaşanan petrol krizi sonrasında tekrardan başlamışlardır. Ford-Think City, Nissan-Altra EV ve Peugeot 106-Electric gibi birçok araç firması EA modelleri 1990 yılı sonrasında yeni gelişen batarya teknolojileri ile birlikte geliştirmeye başlamıştır (Tuncay & Üstün, 2012; Sayın & Yüksel, 2011).

2.2. Türkiye’de Elektrikli Araçların Durumu ve Gelecek Projeksiyonu

Günümüzde İYM'ler fosil yakıtlarının en çok kullanıldığı yerlerden biri olarak kara taşıtlarının çoğunda kullanılmaktadır. 2018 yılında Türkiye’de ulaşımdan kaynaklı CO2 salınımı yapan bu taşıtlar toplam salınan CO2 miktarının %23,1’ini oluşturmaktadır. Bu nedenle karbon salınımlarının azaltılması için fosil yakıt ile çalışan İYM'lerin yerine zararlı gaz salınımı yapmayan araçların kullanılması gerekmektedir. Fosil yakıtlarla çalışan içten yanmalı motorlara sahip araçlar yerine doğayı kirletmeyen ve verimli elektrik motorlarla tahrik edilen elektrikli araç teknolojisi son yıllarda hızlı bir trend yakalamıştır (Çakmak & Turan, 2022; İpek, 2022).

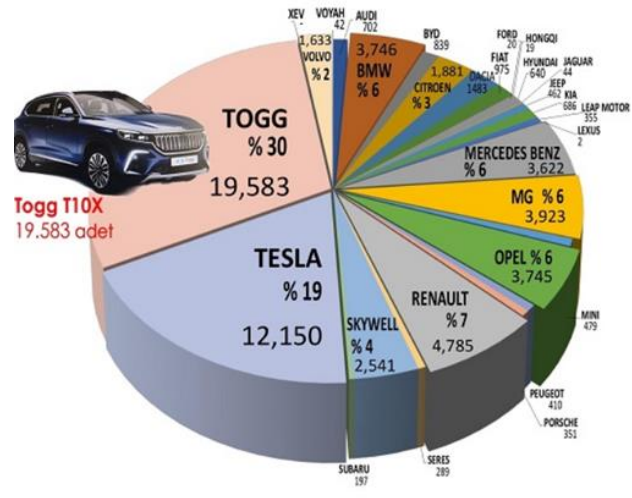
Elektrikli araçlar son yıllarda Türkiye’de önemli gelişmeler göstermiştir. 2018 yılında Türkiye Otomobil Girişim Grubu (TOGG) kurulmasıyla birlikte yerli elektrikli araç üretimi hız kazanmaya başlamıştır. Ar-GE çalışmaları ve devletin sağladığı teşvikler elektrikli araçların benimsenmesini arttırmıştır. Çevresel sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği odaklı olması gelecek projeksiyonunu göstermektedir. Elektrikli araçlarda pazar payının 2030 yılına kadar artması beklenmektedir (Çakmak & Turan, 2022).

Yerli üretimlerin desteklenmesi ve şarj istasyonlarının yaygınlaşması bu süreci hızlandırmaktadır. Enerji Piyasası Denetleme Kurumu (EPDK) tarafından yayınlanan verilere göre 2019-2024 yıllarında elektrikli araç satış rakamları son beş yılda artış göstermiştir. Elektrikli araç satış rakamları Şekil 2.4.’de gösterilmektedir (EPDK, 2024).



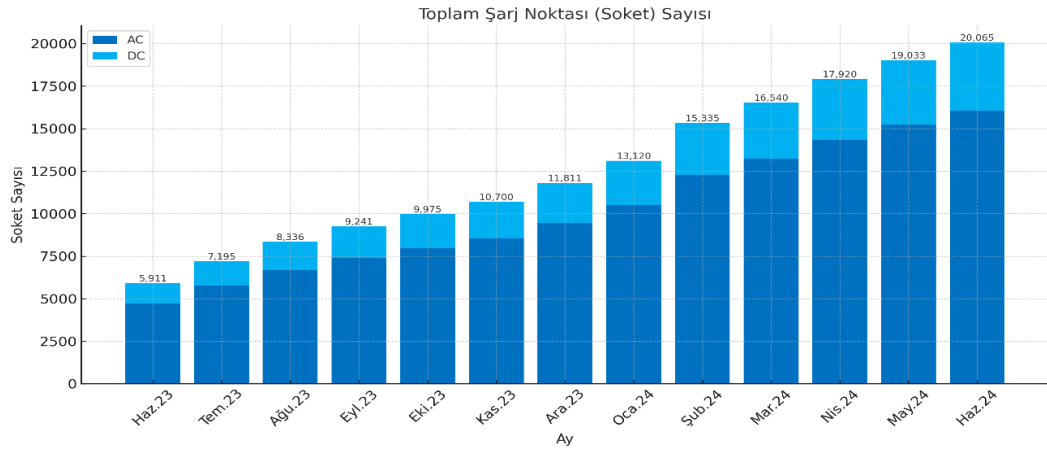
Şekil 2.4. Türkiye’de yıllara göre elektrikli araç satış rakamları (EPDK, 2024)

Türkiye’de satışı yapılan EA marka modelleri arasında 2024 Haziran ayı itibarıyla 19.583 adetle %30 oranında TOGG marka yerli araç en yüksek satışı yapmıştır. Bu araçların marka model dağılımları Şekil 2.5.’de gösterilmiştir (TEHAD, 2024).



Şekil 2.5. Türkiye ‘de satışı yapılan elektrikli araç marka-modelleri (TEHAD, 2024)

Türkiye’de elektrikli araçların kısa süre içinde hızla yaygınlaşacağı ve 2030 yılı sonuna kadar sayılarının 2,5 milyona ulaşacağı tahmin edilmektedir. Gelecekteki elektrikli araç satış sayısı öngörülleri ve elektrikli araçların kullanılabilmesi için gerekli olan şarj istasyonu altyapı kurulumlarının da artışı beraberinde getirmektedir. Ülkemizde elektrikli araçlar için çeşitli firmalar tarafından pek çok araç şarj istasyonu kurulumu yapılmıştır. Şekil 2.6.’da kurulan AC ve DC şarj soket sayılarının aylık bazda rakamları yer almaktadır (Tor et al., 2021, s. 1030).

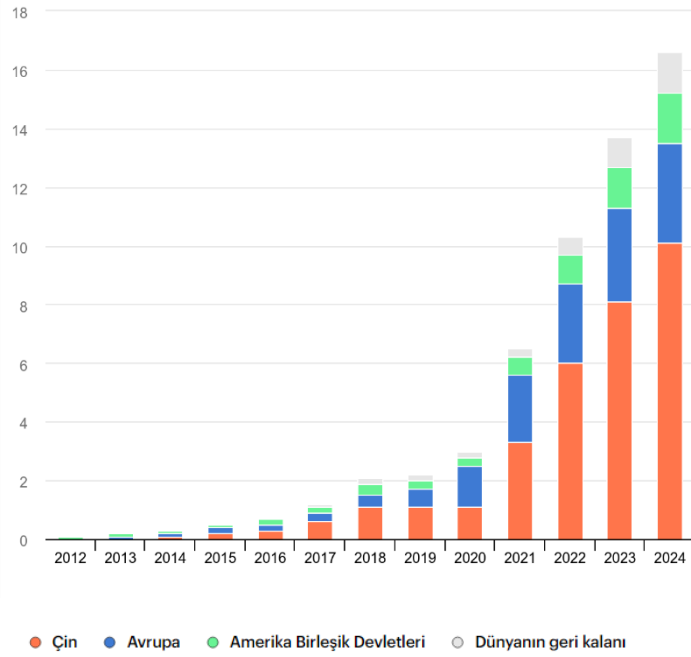


Şekil 2.6. EPDK şarj hizmet piyasasına göre aylık kurulumu yapılan şarj soket sayıları (EPDK, 2024)

2.3. Dünya’da Elektrikli Araçların Durumu ve Gelecek Projeksiyonu

Fosil yakıtlarının en çok kullanıldığı yer İYM’lerdir. Ulaşım kaynaklı CO² salınımı Dünyadaki toplam salınımın yaklaşık %24’ünü oluşturmaktadır. Birçok ülke, fosil yakıtlı araçların kullanımını azaltmak ve elektrikli araçları teşvik etmek amacıyla çeşitli teşvikler ve yasalar çıkartmaktadırlar. Batarya teknolojisindeki gelişmeler, menzil artırma, şarj sürelerini kısaltma ve maliyetleri düşürme konularında önemli ilerlemeler sağlanmasıyla EA satışları 2023 yılı itibariyle dünya genelinde toplam araç satışlarının önemli bir kısmını oluşturmaya başladı.

EA’ların satışları artmaya devam etmekte ve 2024 yılı itibariyle 17 milyona ulaşması beklenmektedir. 2023 yılında EA satışları 14milyona yaklaştı, bu rakamın %95 Çin, Avrupa ve ABD’de gerçekleşmiştir. Bu nedenle Çin, Avrupa ve ABD gibi pazarlar EA satışlarında lider konumunda yer almaktadırlar. EA satışları küresel olarak artmakta ancak sadece birkaç büyük pazarda yoğunlaşmaya devam etmektedir. 2023 yılında EA kayıtlarının yaklaşık %60’ı Çin Halk Cumhuriyeti, %25’i Avrupa ve %10’u Amerika’da gerçekleşmiştir. Çin’de 2023’te otomobil kayıtlarının üçte birinden fazlası elektrikli araçlardı. Avrupa’da beşte biri ve ABD’de onda biri elektrikliydi. Şekil 2.7. ‘de 2012-2024 yılları arasında milyon bazında EA satış rakamları yer almaktadır.



Şekil 2.7. 2012-2024 yılları arasındaki EA satış rakamları (International Energy Agency, 2024)

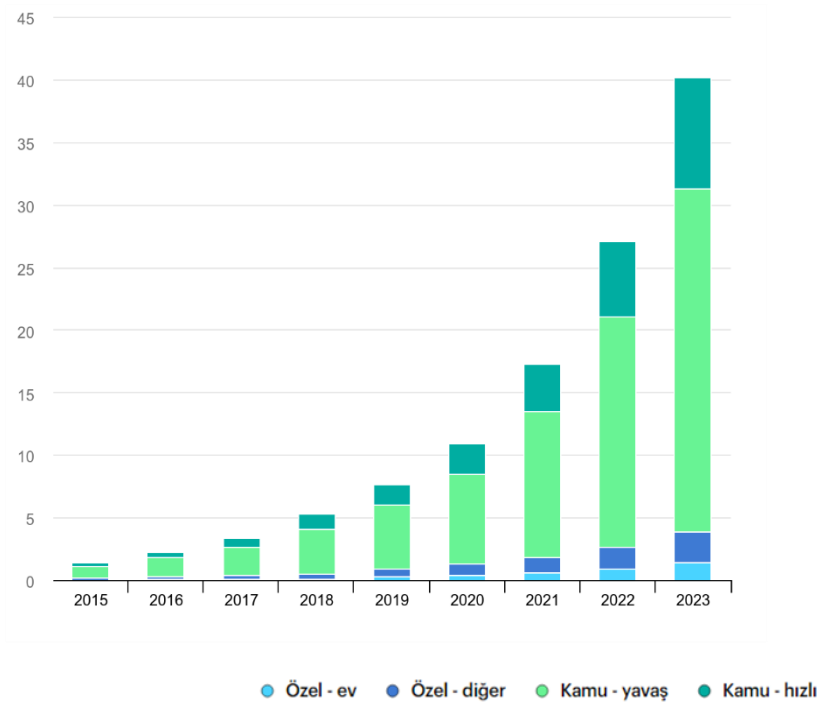
Geçtiğimiz 10 yılda EA satış rakamları ivme göstermiş olup geleceğe dönük projeksiyon ve öngörülerde bu artışın daha da yükseleceği belirtilmiştir. EA'ların 2030 yılına kadar dünya genelinde toplam araçların %30-50'sini oluşturması bekleniyor. EA geleceği oldukça parlak gözükmemektedir. Dönüşümün başarılı olması için gerekli altyapı ve destekleyici politikaların sürdürülmesi büyük önem taşımaktadır.

EA'ların evde şarj edilmeleri, şarj etme durumlarının en yaygın yoludur. Şarj için özel bir alana erişimi olan EA sahipleri gece boyunca araçlarını şarj edebilirler. Bu durum nispeten enerji talebinin düşük olduğu zamanlarda genellikle daha düşük elektrik fiyatlarından faydalanmalarını sağlamaktadır. Evde şarj olanağının kullanılabilirliği bölgeler arasında önemli ölçüde değişmektedir. Bu durum kentsel, kırsal nüfus ve gelir dilimindeki farklılıklarla bağlantılıdır. Bina tarzı şehir yerleşmelerinin olduğu yoğun yerlerde evde şarj olanağı sınırlıdır. EA sahipleri için kamusal alanlarda şarj olanağı daha fazla güven vermektedir.

Elektrik şebeke voltajının 220V veya üzeri olduğu bölgelerde EA sahipleri araçlarının normal ev prizinden gece boyunca şarj edebilirler. Araç şarj edilmesi durumu için en yaygın durumdur. Avrupa, Avustralya, Latin Amerika'nın büyük bir kısmı ve Asya'nın çoğunda bu yöntem geçerlidir. Elektrik şebeke voltajının 100-120 V gibi daha düşük olduğu bölgelerde şarj hızı normal ev prizlerinden çok daha yavaştır. Bu seviyedeki elektrik şebekesine sahip ülkelerde on saatten daha kısa bir sürede şarj edebilme olanağı

için özel bir şarj cihazının kurulumunu gerektirmektedir. Burada hem maliyet hem de özel park yerlerinin daha az bulunması, özel şarj cihazı kurulumuna önemli engeller oluşturabilir. Bu nedenle, daha pahalı halka açık şarj cihazlarına bağımlılık daha yüksek olabilir. Ev şarjının ötesinde, özel şarj ayrıca belirli kuruluşların çalışanları, filoları veya müşterileri için ayrılmış şarj cihazları gibi halka açık olmayan diğer şarj cihazlarını da içerir.

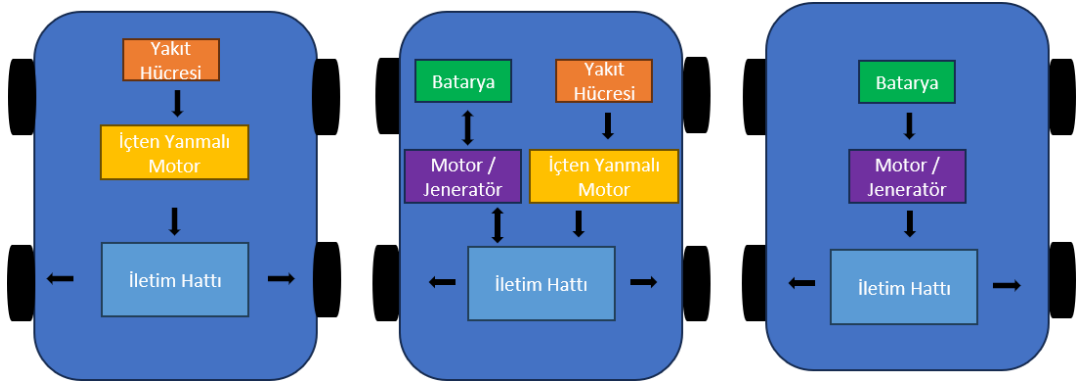
2023 yılı itibarıyla 53.600'den fazla tesis kurulmuş ve 2030 yılına kadar kamusal alanlarda 300.000 şarj istasyonu kurulması bekleniyor. Şekil 2.8.'de 2015-2023 yılları arasında kamu ve özel sektör tarafından kurulan hafif hizmet tipi EA şarj noktaları gösterilmiştir (Çakmak & Turan, 2022; International Energy Agency, 2024).



Şekil 2.8. 2015-2023 yılları arasında kamu ve özel sektör tarafından kurulan hafif hizmet tipi EA şarj noktaları (International Energy Agency, 2024)

3. ELEKTRİKLİ ARAÇ ÇEŞİTLERİ

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte farklı EA türleri üzerine yapılan çalışmalar hızlı bir artış ivmesindedir. EA genel olarak enerjisinin tamamını batarya ünitesinden sağlayan tümü elektrikli araçlar (TEA) olarak bilinmektedir. Batarya teknolojilerinin artmasıyla birlikte TEA'lara olan ilgi giderek artmaktadır. Elektrik motoru ve içten yanmalı motorun birlikte aracın tahrik sisteminde kullanıldığı hibrit elektrikli araçlar (HEA), günümüzde en yaygın kullanılan elektrikli araç sınıfını oluşturmaktadır. Elektrikli araç teknolojisinde yer alan bir diğer araç türü ise literatürde yakıt hücresi elektrikli araç (YHEA) olarak tanımlanmaktadır. Çalışma şekline göre EA'lar Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Çalışma şekline göre klasik, hibrit ve tümü elektrikli araçlar

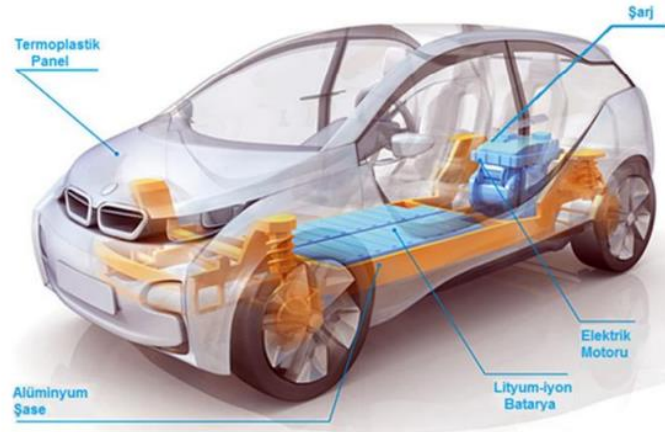
3.1. Tümü Elektrikli Araçlar (TEA)

Ulaşım sektöründe karbon salınımı sıfır olan TEA'lar batarya teknolojilerinin gelişimiyle birlikte ulaşım sektöründe son yıllarda artış göstermesi beklenmektedir. TEA'larda herhangi bir yakıt harcanmadığından bu tarz EA'lar sıfır emisyonlu araçlardır. Tam elektrikli araçların (TEA) bataryalarının şarjı için kullanılan elektrik enerjisinin üretimi sırasında oluşan zararlı emisyonlar, içten yanmalı motorlu (İYM) araçlara kıyasla oldukça düşük seviyededir.

Tam elektrikli araçların (TEA) bataryaları, araç üzerindeki priz girişi aracılığıyla doğrudan elektrik şebekesinden şarj edilebilmektedir. Bu araçlarda elektrik motorunun ihtiyaç duyduğu güç, batarya sisteminde depolanan enerjiden sağlanmaktadır. TEA'larda ana bataryayı destekleyen ek enerji kaynağı olarak ikinci bir batarya veya süper kapasitör kullanılabilir. Bu yardımcı güç kaynakları yokuş tırmanırken veya ivmelenirken

kısa periyotlar için yüksek güç sağlayabilmektedirler. İYM'ler yaklaşık %18-25'lik verimle çalışmaktadırlar. TEA'lar ise daha verimli olup, aracın verimi yaklaşık %46 ve fren ömrü rejeneratif frenleme sayesinde daha uzundur. Bataryaların beslenip şarj olabilmesi için araçtaki elektrik motoru jeneratör gibi kullanılmaktadır. TEA'lar elektrik enerjisi ile bataryaları besler. Yakıt ve bakım maliyetleri İYM'lere kıyasla çok daha azdır. Taşıtın tahrik edilebilmesi için transmisyon sistemi İYM'lere göre daha az olduğu için bunların bakımı az ve yağ değişikliğine de gerek bulunmamaktadır. Aynı zamanda TEA'lar İYM'li araçlara göre oldukça sessiz çalışmaktadırlar.

Tam elektrikli araçların (TEA) yapısında elektrik motoru, batarya paketi ve şarj kontrol sistemleri gibi temel bileşenler yer almaktadır. Bu sistemler içerisinde bulunan kontrol ünitesi, aracın ileri veya geri hareketini, hız düzenlemesini ve frenleme sırasında rejeneratif sistem aracılığıyla enerjinin geri kazanımını sağlayan işlevleri yerine getirmektedir. Şekil 3.2.'de TEA iç yapısı gösterilmiştir.



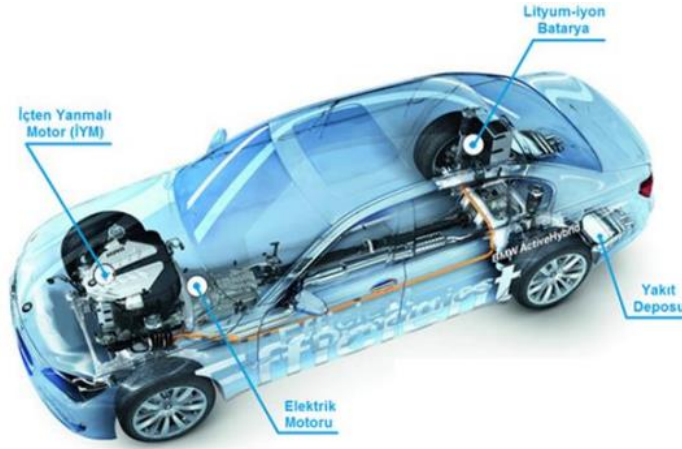
Şekil 3.2. TEA iç yapısı (Özbay et al., 2020)

TEA'ların birçok avantajının olmasının yanısıra kullanımını sınırlayan unsurlar bulunmaktadır. Bunların en önemlisi TEA'ların yeterli miktarda menzilin olmaması ve batarya maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Günümüz teknolojisinde batarya sistemlerindeki gelişmelerle birlikte daha uzun menziller gidebileceği öngörülmektedir. Bu durum TEA'ların tercih edilmelerini arttıracaktır (Kerem, 2014; Özbay et al., 2020).

3.2. Hibrit Elektrikli Araçlar (HEA)

Hibrit elektrikli araçlar (HEA), tahrik enerjisini iki veya daha fazla türde enerji deposu, kaynağı ya da dönüştürücüsünden elde eden ve bu kaynaklardan en az birinin araç üzerinde yer aldığı sistemler olarak tanımlanmaktadır. HEA'lar, birden çok güç kaynağını bir arada barındıran çeşitli yapılandırmalara sahip olabilir; ancak en yaygın kullanılan hibrit sistem, içten yanmalı motor, batarya paketi ve elektrik motoru bileşenlerinin birlikte çalıştığı bir yapıdan oluşmaktadır.

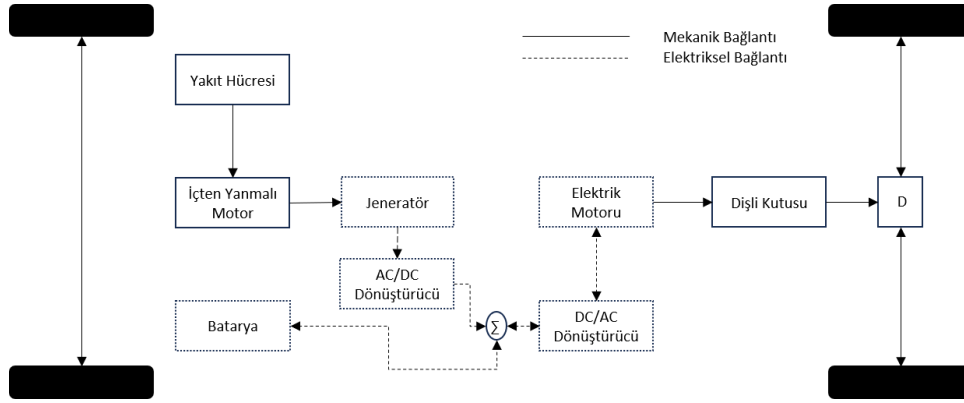
HEA teknolojilerinde İYM tasarlandığı en verimli noktalarda çalıştırılması amaçlanmıştır. İYM'de ortaya çıkan frenleme enerjisi geri kazanılarak bataryalarda depolanması verimliliği arttırmaktadır. Bu özelliklerin gerçekleştirilmesi için elektrik makinalarının çift yönlü olarak çalıştırılmasından faydalanılmaktadır. HEA'lar seri HEA ve paralel HEA olarak adlandırılan iki kategoriye ayrılmaktadırlar. HEA'ların iç yapısında İYM, elektrik motoru, batarya ünitesi, ve şarj kontrol üniteleri bulunmaktadır. Şekil 3.3.'de HEA iç yapısı gösterilmiştir (Çimen, 2010; Özbay et al., 2020).



Şekil 3.3. HEA iç yapısı (Özbay et al., 2020)

3.2.1. Seri hibrit elektrikli araçlar

Seri Hibrit elektrikli araçlar tam elektrikli araçlara en çok benzeyen HEA çeşididir. EA'lardan farklı olarak İYM ve bir jeneratör ile oluşturulan menzil arttırıcı bir jeneratör düzeneğine sahiptir. Seri hibrit elektrikli araçların güç aktarma sistemine ait yapı Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



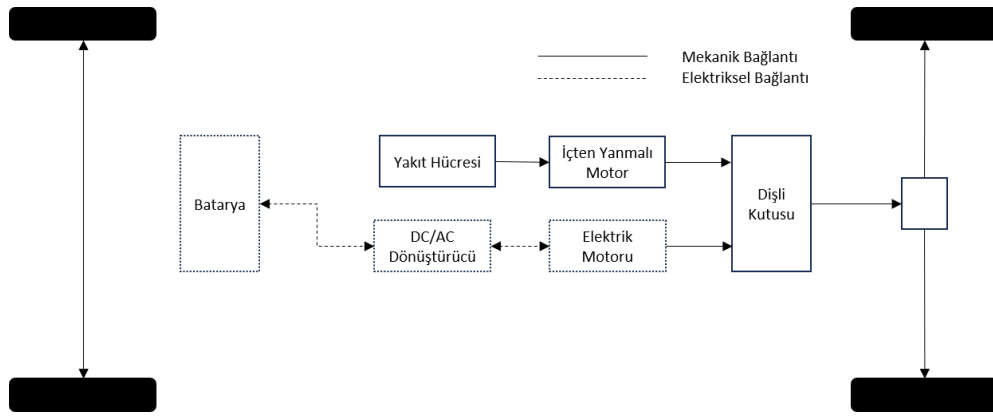
Şekil 3.4. Seri hibrit elektrikli araç yapısı

Şekil 3.4.'te İçten yanmalı motorun (İYM) tekerleklerle doğrudan mekanik bir bağlantısı bulunmamaktadır. İYM tarafından üretilen mekanik enerji önce elektrik enerjisine dönüştürülmekte, ardından bu enerji tekrar mekanik enerjiye çevrilerek tahrik sağlanmaktadır. Bu çift dönüşüm süreci sırasında enerji kayıpları meydana gelse de, motorun tork-hız karakteristiğinde istenilen çalışma aralığında çalışması mümkün olmaktadır. Böylece İYM, en verimli tork-hız bölgesinde işletilerek elektrik enerjisi üretiminde daha yüksek bir verimlilik elde edilebilmektedir. Bataryanın depolama kapasitesi dolduğunda İYM kullanımı durdurularak sadece elektrik motorunun enerjisi bataryadan sağlanarak hareket enerjisi oluşturulmaktadır. İYM'ler tek bir çalışma bölgesinde verimli çalıştırılmak üzere optimize edilerek verim kayıplarına rağmen kullanımı sağlanabilir. Aynı zamanda geri kazanımlı frenleme sistemi verimliliği arttırmaktadır (Çimen, 2010; Özbay et al., 2020).

3.2.2. Paralel hibrit elektrikli araçlar

İYM ve elektrik motorunun sistemlerinde aynı anda çalıştığı Paralel hibrit elektrikli araçlar mekanik enerjiyi hareket enerjisine aktarabilmektedirler. Bu araçlar; İYM'nin çalışma noktasında elektrik motoru yardımıyla tork-hız karakteristiğinde tork eksenini içerisinde gezdirilerek İYM'nin daha verimli olduğu noktada çalışması temeline dayanmaktadır. Bu EA yapısında çok fazla enerji dönüşümü gerçekleştirilerek kayıpların azaltılmasının sağlanması en büyük avantajlarından biridir. İçten yanmalı motorun (İYM) yalnızca tork-hız karakteristiğinin tek bir ekseninde yüklenebilmesi, düşük hızlarda

istenilen verimliliğin elde edilememesine yol açmaktadır. Bu durum, düşük hız aralıklarında hibrit kontrol algoritmalarının genellikle elektrikli sürüşü ön planda tutacak şekilde tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır. Paralel hibrit elektrikli aracın düşük hızlarda elektrikli yüksek hızlarda ise hibrit olarak çalışması gerekmektedir. Geri kazanımlı frenleme sistemi paralel hibrit elektrikli araçlarda da kullanılmaktadır. Paralel hibrit elektrikli araçların güç aktarma sistemine ait yapı Şekil 3.5'te gösterilmektedir (Çimen, 2010; Özbay et al., 2020).



Şekil 3.5. Paralel hibrit elektrikli araç yapısı

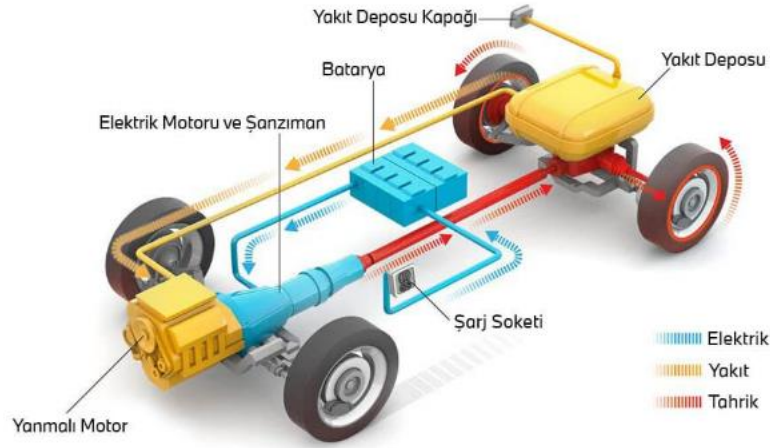
3.2.3. Seri paralel hibrit elektrikli araçlar

Seri paralel hibrit elektrikli araçlarda hem seri hem de paralel elektrikli araçların avantajlarını kullanabilmektedirler. Bu sayede güç paylaşım algoritmasını işleten hibrit araç kontrol ünitesine esneklik kazandırılmaktadır. İYM'ler düşük hızlarda ve çok yüksek hızlarda seri olarak çalıştırılırken verimli hız aralığında paralel olarak çalıştırılabilmektedir. Bu sayede aracın verimi oldukça artırılmaktadır. Özellikle gezegen dişliler ve elektromekanik debriyaj sistemleri ile özelleştirilen güç aktarma sistemleri ile karma sistemlerde sadece paralel ya da sadece seri çalışma gibi özellikler aktif olarak kullanılabilir (Çimen, 2010).

3.3. Plug-in Hibrit Elektrikli Araçlar (PHEA)

Plug-in hibrit elektrikli araç (PHEA) hibrit güç aktarma organına sahiptirler. Güç aktarma organı, bir İYM, diyafram yaylı bir kavramadan, bir elektrik motorundan, otomatik mekanik şanzımandan ve bir son tahrikten oluşur. Birincil güç kaynağı olarak

elektrik motorunu kullanmaktadır. Yüksek hızlarda veya şarj edilememe durumlarında İYM motoru kullanılmaktadır. HEA'dan tek farkı şarj edilebilir olmasıdır. Fosil yakıt veya elektrikle çalıştırılabilir. Elektrik şebekesinden elektrik enerjisinin elde edilmesini kolaylaştırmak için, güç aktarma organına fişe takma özelliğine sahip bir lityum demir fosfat pil yerleştirilmiştir (Liu et al., 2024).



Şekil 3.6. Plug-in HEA iç yapısı (Özbay et al., 2020)

3.4. Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (YHEA)

Yakıt hücreli hibrit elektrikli araçlar (YHEA), yakıt hücrelerinin avantajlarını elektrikli araç teknolojisiyle harmanlayarak sürdürülebilir ulaşım arayışında önemli bir yenilik olarak kabul görmektedir. Şekil 3.6.'da YHEA'ların iç yapısı gösterilmiştir. YHEA'lar; elektrik motoru, güç kontrol ünitesi, yakıt hücresi, batarya ve hidrojen depolama tankı bileşenlerinden oluşmaktadır.



Şekil 3.6. YHEA iç yapısı (Özbay et al., 2020)

Yakıt hücreli araçlar, hidrojen gibi yakıtları havadaki oksijenle elektrokimyasal olarak reaksiyona sokarak elektrik üretir; bu sayede yüksek depolama kapasitesi, kısa yakıt ikmal süresi ve uzun menzil gibi avantajlarla verimliliği artırma potansiyeli sunar. Ancak hidrojenin üretim maliyetinin yüksek olması, yakıt hücrelerinin dayanıklılığı ve altyapı eksiklikleri gibi sorunlar, bu teknolojinin yaygınlaşmasını sınırlamaktadır (Togun et al., 2024).

3.5. Elektrikli Araçların Karşılaştırması

EA'ların çevre dostu olması, sessiz çalışması, düşük emisyonlu olması İYM'li araçlara göre birçok avantaj sunan bir ulaşım seçeneğidir. EA türleri enerji kaynağı, menzil, şarj altyapısı ve performans gibi özellikler açısından kullanıcı ihtiyaçlarına göre avantaj ve dezavantajlara sahiptir. TEA, HEA, PHEA ve YHEA teknolojileri özellikleri bakımından Çizelge 3.1. 'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Elektrikli araçların özellikleri bakımından karşılaştırılması

Özellikleri Bakımından Elektrikli Araç Çeşitleri	TEA	HEA PHEA	YHEA
Tahrik	Elektrik motoru	Elektrik motorlu İYM tahrik	Elektrik motorlu tahrik
Enerji Sistemi	Batarya Süper kapasitör	Batarya Süper kapasitör İYM üretim birimi	Yakıt pilleri
Enerji Kaynağı ve Altyapısı	Elektrik şarjı	Benzin Elektrik şarjı	Benzin Elektrik şarjı
Karakteristikler	Sıfır emisyon 100-200 km kısa menzil	Çok düşük emisyon Normal menzil	Çok düşük emisyon Hidrojen depolama
Sorunlar	Batarya teknolojisi Şarj özellikleri	Batarya teknolojisi Enerji yönetimi	Yakıt pili teknolojisi Hidrojen teknolojisi

Çevreye verilen zararlı karbon gazı salınımının en aza indirilmesi için EA'lar üzerinde farklı teknolojiler geliştirilmiştir. Teknolojik gelişimin büyük ölçüde tamamlanmasına rağmen yeteri kadar talep henüz gerçekleşmemiştir. Bu duruma yüksek alt yapı maliyetleri, İYM'li araçlara göre kısıtlı menzillere sahip olmaları, pil maliyetleri, uzun şarj süreleri ve güç sistemine ek yük getirmesi gibi olumsuz etkenler sebep olmaktadır. Bunların başında araç kullanıcılarının EA'ları eş zamanlı olarak şarj etmek istemesi şebekede olumsuz durumlara neden olabilecektir (Özbay et al., 2020; Kerem, 2014).

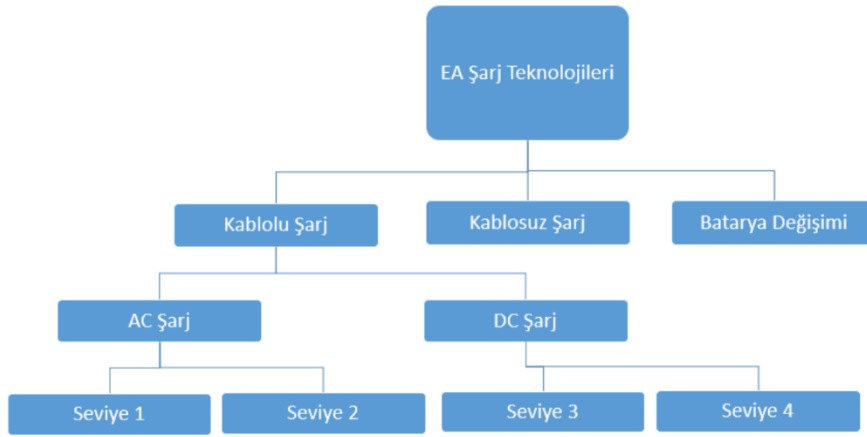
4. ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ TEKNOLOJİLERİ VE ŞARJ METODLARI

Elektrikli araç şarj teknolojilerinin gelişimiyle EA'ların enerji ihtiyaçlarını karşılamak için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu teknolojiler, elektrikli araçların enerji ihtiyacını karşılamak için gerekli altyapıyı sağlamakta ve kullanıcıların şarj süreçlerini kolaylaştırmaktadır. Bunların başında standart AC şarj noktaları ve hızlı DC şarj noktaları yer almaktadır. Aynı zamanda kablosuz şarj ve akıllı şarj sistemleri gibi yenilikçi çözümler, enerji verimliliğini artırma çözümleri olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu teknolojilerin her biri, kullanıcı deneyimini iyileştirme ve şarj süresini azaltma potansiyeline sahiptir. Örneğin, hızlı DC şarj istasyonları, elektrikli araçların kısa sürede enerji almasını sağlarken, kablosuz şarj sistemleri kullanıcıların kablo karmaşasından kurtulmalarına yardımcı olmaktadır. Ancak, bu sistemlerin geniş çapta benimsenmesi, altyapı yatırımları, maliyetler ve standartlaşma gibi bazı zorluklarla karşı karşıyadır. Gelecekte, akıllı şarj sistemleri ve yenilikçi enerji yönetimi çözümleri ile bu zorlukların aşılması beklenmektedir. Sonuç olarak EA'lar ve şarj istasyonları, sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin oluşturulmasında birbirini tamamlayan unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Bu iki bileşenin entegrasyonu, gelecekte daha çevre dostu ve verimli ulaşım çözümlerinin ortaya çıkmasına olanak sağlayacaktır.

4.1. Şarj Teknolojileri

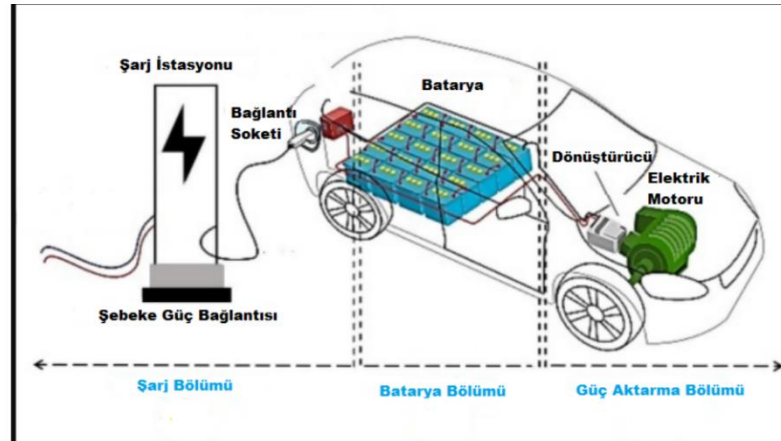
EA şarj yöntemleri araç teknolojilerine göre farklılıklar göstermektedir. EA'ları şarj etmek için farklı şarj yöntemleri kullanılmaktadır. EA'lara ait şarj yöntemleri Şekil 4.1.'de detaylı gösterilmektedir. Araç ile şarj portu arasında elektriksel temas içeren iletken şarj yoluyla farklı şarj olanakları sağlanır. Kablolu şarj yönteminde, genellikle iki ana şarj olan AC (alternatif akım) ve DC (doğru akım) şarj teknolojisi kategorisinde sınıflandırılır. Aynı zamanda kablosuz şarj yöntemi ve batarya değiştirme teknolojileri kullanılmaktadır (İpek, 2022).



Şekil 4.1. EA şarj yöntemleri

4.1.1. AC şarj yöntemi (On board charger)

EA şarj portu ile arasında elektriksel temas içeren iletken şarj yoluyla farklı şarj olanaklarından biri olan AC şarj sistemleridir. AC şarj sistemi güç sisteminden EA'ya enerji akışı sağlamaktadır. Daha sonra EA'da bulunan akü ile enerji çeviriciyle DC'ye dönüştürülmektedir. AC kablolu şarj yönteminde seviye 1 (ev tipi şarj), seviye 2 (standart şarj) şeklinde iki farklı seviye bulunmaktadır. Şekil 4.2.'de AC şarj yöntemi EA şarj istasyonu bileşenleri yer almaktadır. AC şarj yönteminde araca entegre AC/DC dönüştürücü (on board charger) olan batarya yönetim sistemleri bulunmaktadır ve bu sistemler akım değeri sınırlarını kontrol etmektedirler (Amer et al., 2024; Madaram et al., 2024; Çetin & Gençoğlu, 2023)



Şekil 4.2. AC şarj yöntemi EA şarj istasyonu bileşenleri (Madaram et al., 2024)

Güç sisteminden sağlanan alternatif akım (AC) ile çalışan şarj istasyonları, farklı şarj hızları sunabilmektedir. Elektrikli araçlarda (EA) bulunan yerleşik şarj cihazı (on-board charger), üretici tarafından belirlenen maksimum enerji sınırını aşmayacak şekilde AC enerjiyi doğru akıma (DC) dönüştürmektedir. Örneğin, 7,4 kW kapasitesine sahip bir dönüştürücüye sahip araç, 22 kW kapasiteli bir AC şarj istasyonuna bağlandığında, bataryalara maksimum 7,4 kW güç aktarımı gerçekleşecektir.

Günümüzde elektrikli araç şarj altyapısında, 380 V trifaze besleme ile çalışan ve 22 kW güç kapasitesine sahip AC şarj istasyonları, uygun maliyetleri nedeniyle yaygın şekilde tercih edilmektedir. Çizelge 4.1’de, elektrikli araç şarj cihazlarının güç seviyeleri yer almakta olup, bu değerler Otomotiv Mühendisleri Derneği (Society of Automotive Engineers-SAE) tarafından desteklenen standart güç seviyelerine uygun olarak belirtilmiştir. Şarj yöntemi kategorilerine göre kategorilere ayrılan AC EA şarj cihazlarının belirtildiği gibi AC Seviye 1 ve AC Seviye 2 olarak çizelgede yer almaktadır. EA’lar genellikle yavaş şarj olarak adlandırılan Seviye 1 için tasarlanmış yerleşik şarj cihazlarını kullanarak evlerindeki veya işyerlerindeki kolayca erişilebilen soketlere bağlama seçeneğine sahiptir. Seviye 2 şarj hem özel hem de kamusal tesisler için kullanılan yaygın yaklaşımdır ve Seviye 1 şarjdan önemli ölçüde daha hızlıdır. Seviye 2 şarjı karşılamak için 208 veya 240 V'luk bir çıkış gereklidir (Nurmuhammed & Karadağ, 2021; Hakam et al., 2024).

Çizelge 4.1. SAE’nin tanımladığı AC standartları (SAE International, 2017; Hakam et al., 2024)

Şarj yöntemi	Şarj süresi	Gerilim (V)	Maksimum akım (A)	Maksimum güç (kW)
AC Seviye 1	4 ile 46 saat	120	12-16	1.44-1.92
AC Seviye 2	1 ile 6 saat	208-240	≤80	<19.2

4.1.2. DC şarj yöntemi (Off board charger)

EA bataryaları alt yapı gereğiyle doğru akım (DC) ile şarj olmaktadır. AC şarj yönteminde AC-DC çevirici ile akım sınırlandırılarak elektrik motorlarına enerji akışı sağlanmaktadır. Çevrilen bu güç çok yüksek akımlardaki ısınmadan dolayı üretici firmalarca sınırlandırılmaktadır. DC şarj yönteminde araç dışında AC-DC dönüşümünü yapılarak araca DC güç akışı sağlanmaktadır. Bu yöntemle araç üzerinde kullanılan dönüştürücü cihaz kullanılmadığından, oluşturduğu güç sınırlaması yerine DC güç ile şarj

olurken getirilen sınırlamalar geçerli olmaktadır. DC şarj yöntemi şarj sınırlamaları AC şarj yöntemi şarj sınırlamalarına göre çok daha yüksek hızları desteklediğinden EA'lar DC güç ile daha kısa sürede şarj olmaktadır.

EA satışlarının her geçen yıl arttığı düşünüldüğünde, DC şarj istasyonları sayısının da artacağı öngörülmektedir. DC şarj istasyonları kullanıcılara daha hızlı şarj imkanı sunarken aynı zamanda yüksek güç talepleri sebebiyle güç sistemine ani yüklenmelere neden olacaktır. Bu durumların önüne geçmek için şarj istasyonlarının doğru konumlandırılması ve enerji kullanım tahminine göre alt yapı çalışmaları yapılması gerekmektedir (Gücin, 2013).

DC şarj yöntemi, şarj süresini bir saatten daha aza indirmesiyle yaygın olarak tanınan popüler bir teknolojidir. Şarj yöntemi seviyelerine göre kategorilere ayrılan DC EA şarj cihazlarının DC Seviye 1 ve DC Seviye 2 olarak Çizelge 4.2.'de yer almaktadır. DC hızlı şarjın güç seviyesi 40 ila 400 kW arasında değişebilir, şarj süresi 1 saatten az olabilir ve pil voltajı DC 200–500 V arasında değişebilir (Nurmuhammed & Karadağ, 2021; Amer et al., 2024).

Çizelge 4.2. SAE'nin tanımladığı DC standartları (SAE International, 2017)

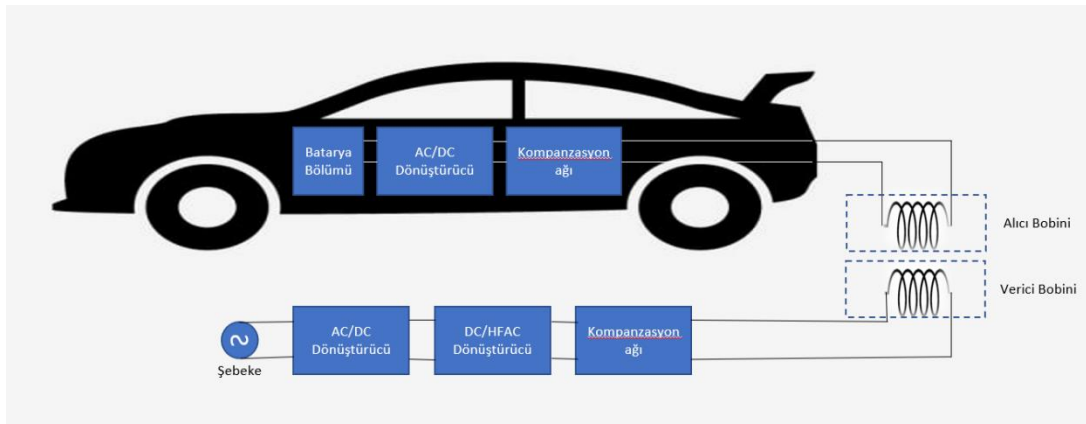
Şarj Yöntemi	Şarj Süresi	Gerilim (V)	Maximum Akım (A)	Maksimum Güç (kW)
DC Seviye 1	1 saat	200-500	80	40
DC Seviye 2	1 saatten az	200-500	400	400

4.1.3. Kablosuz (Endüktif) Şarj Yöntemi

Taşınabilir cihazlara elektrik enerjisi sağlamak için elektromanyetik indüksiyon (kablosuz) kullanılmaktadır. Elektrik motorları fırçaları endüktif yük çekmektedirler. Bu sebeple şarj istasyonunun içerisinde endüktif bobin AC akımları iletmektedir (Özbey, 2020).

EA bataryasına güç iletmek için elektromanyetik dalgalar kullanılmaktadır. Manyetik alan, elektrik yükünün akışından kaynaklanır ve elektrik akımının gücündeki değişimler, manyetik alanın gücünde değişikliklere neden olur. Dönen manyetik alan, indüksiyon bobinindeki elektrik akımının ileri geri gitmesini sağlar. Elektrik akımı, pili şarj etmek için bir DC akıma dönüştürülür. Şekil 4.3.'de kablosuz güç iletim sisteminin yapısını göstermektedir.

Yüksek frekanslı alternatif akım, 220 V, 50 Hz AC kaynağının alternatif akıma dönüştürülmesiyle oluşturulur ve bu daha sonra verici bobine verilir. Verici bobin daha sonra alıcı bobini kesen ve alıcı bobinde AC güç çıkışı üreten dönen bir manyetik alan üretir. Kablosuz şarjın etkili olması için verici ve alıcı arasındaki rezonans frekansının korunması çok önemlidir. Rezonans frekanslarını sabit tutmak için alıcının ve verici bobinlerinin iki ucuna telafi edici ağlar dahil edilmiştir. Alıcı tarafında, AC akım DC akıma dönüştürülür ve pil yönetim sistemi aracılığıyla pile iletilir (Saraswathi & Ramachandran, 2024).



Şekil 4.3. Kalosuz güç iletim sistemi

4.1.4. Batarya değiştirme yöntemi

EA'lar yaklaşık olarak 100-150 km menzile ulaşabilmektedir ve bu menzil bataryalardaki enerji depolama ünitelerinin doluluk oranıyla doğru orantılıdır. EA'ların batarya doluluk süreleri uzun olduğundan EA kullanıcıları için bu süre sorun olmaktadır. Bu nedenle EA kullanıcıları araçlarındaki bataryaları tamamen şarj edilmiş olan bataryalarla değiştirme imkanına sahip olmaktadır.

EA'lar batarya değişim istasyonuna geldiğinde öncelikle sistem tarafından verilecek tanımlama bilgisi kontrol edilmektedir. Daha sonra istasyona alınan aracın alt kısmı temizlenip kurulanmaktadır. Otomasyon kontrollü hidrolik sistem tam dolu olan bataryayı hazırlayarak aracın altında konumlandırır ve değiştirme işlemlerini gerçekleştirir. Tüm bu değiştirme işlemleri birkaç dakika içerisinde gerçekleşmektedir (Kerem et al., 2020; Yazıcı & Özdemir, 2013).

4.2. Elektrikli Araç Şarj istasyonu Standartları

Güç sistemlerinde şebeke gerilim ve frekans değerleri bölgesel olarak değişebilmektedir. Bu değişim sonucunda şarj istasyonu alt yapılarında ve teknolojilerinde değişikliğe neden olmaktadır. EA üretici firmaları farklı ülke ve pazarlara uygun olacak şekilde şarj istasyonu üretmektedirler. Bu standartlar neticesinde her bölgenin kendine özgü standart konektör tipi, voltaj aralığı ve güç dereceleri bulunmaktadır (Yılmaz, 2024).

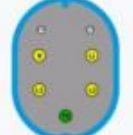
Çizelge 3.2.'de uluslararası EA şarj standartlarının karşılaştırmasına yer verilmiştir. Çizelge 3.2.'de görüldüğü gibi Çin kendine özel GBT 20234 standardını, Avrupa Tip 2 konektörünü, Kuzey Amerika AC şarj için J1772 Tip 1 bağlayıcı tipini kullanmaktadır. Tesla Motors kendine özel şarj standardını kullanmaktadır. Bölgesel farklılıkların olması küresel bazda EA şarj istasyonu kıyaslamalarını zorlaştırmaktadır. Avrupa'da olduğu gibi ülkemizde IEC 62196 standardı kullanılmaktadır (Madaram et al., 2024; Çetin & Gençoğlu, 2023).

Çizelge 4.3. Uluslararası EA şarj standartlarının karşılaştırılması

Standart	Bölge	Bağlayıcı Türleri	Maksimum Güç Çıkışı	Gerilim Seviyeleri	İletişim Protokolleri	Temel Özellikler
SAE J1772 (Tip 1)	Kuzey Amerika	Tip 1 (J1772)	AC: 19,2 kW (Seviye 2)	120-240 V (AC)	Pilot sinyali (PWM), PLC	ABD ve Kanada'da yaygın olarak AC şarj için kullanılır.
IEC 62196 (Tip 2)	Avrupa Avustralya	Tip 2 (Mennekes)	AC: 43 kW DC: 350 kW	230-400V (AC) 400-1000V (DC)	PLC, ISO 15118	Avrupa'da hem AC hem DC şarj için standarttır.
ÇADEMO	Japonya, Küresel	ÇADEMO	DC: 62,5 kW (400 kW'ya kadar)	1000V'a (DC) kadar	CAN veri yolu	Öncelikle DC hızlı şarj, çift yönlü hızlı destek.
İngiltere/T	Çin	İngiltere/T	DC: 237,5 kW (900 kW'ya kadar)	450-1000V (DC)	Özel (GBT 20234)	Çin'in AC/DC şarj için ulusal standardı.
CCS (Kombo 1 ve 2)	Küresel	Kombo 1 (SAE), Kombo 2 (IEC)	DC:350 kW	1000V'a (DC) kadar	PLC, ISO 15118	Hızlı şarj özelliği nedeniyle Avrupa ve Kuzey Amerika'da yaygın olarak kullanılmaktadır.

4.3. EA Şarj Bağlantı Soketleri

EA şarj kablosunu araç girişine bağlamak için farklı konektör tipleri bulunmaktadır. AC konektörler IEC 62196-2 ve DC konektörler ise IEC 62196-3 ile tanımlanmaktadır. Şekil 4.4.'de Tip 1 konektör (SAE J1772), Tip 2 konektör (IEC 62196-2), Kombine şarj sistemi (CCS) Combo 1, Kombine şarj sistemi (CCS) Combo 2 (IEC 62196-3) ve CHAdeMO bağlantı tipleri ve özellikleri gösterilmiştir (IMB Electric, nd).

Güç Kaynağı	Amerika Birleşik Devletleri	Avrupa Birliği	Japonya	Çin
1 Faz AC (IEC 621196-2)	 Type 1 (SAE J1772)	 Type 2 ^{[a][b]} (DE, UK)	 Type 1 (SAE J1772)	 Type 2 (GB/T 20234.2) ^[c]
3 Faz AC (IEC 621196-2)	 Type 2 (SAE J3068)	 Type 3 (IT, FR, now deprecated)	-	-
DC (IEC 621196-3)	 EE (CCS Combo 1)	 FF (CCS Combo 2) ^[b]	 AA (CHAdeMO) ^[b]	 BB (GB/T 20234.3) ^[a]
			 ChaoJi (planned)	

Şekil 4.4. Bağlantı soketleri (Kircioğlu et al.,2023)

4.3.1. Tip 1 konektör (SAE J1772)

AC şarj istasyonları için kullanılmaktadır. J1772 konektörü üç büyük pin ile tanımlanmaktadır. Evde bulunan priz konektörüne benzerdir ve bağlantı için iki büyük pin bulunmaktadır. Üç geniş pin Faz, Nötr ve Topraklama için kullanılırken, iki küçük pin şarj cihazı ile EA arasında iletişim için kullanılmaktadır. 3 ila 7.4 kW arasında güç sağlar ve maksimum 32 A akım ile sadece tek fazı desteklemektedir. Çoğunlukla ABD ve Japonya'da kullanılmaktadır (IMB Electric, nd).

4.3.2. Tip 2 konektör (IEC 62196-2)

AC şarj istasyonlarında kullanılmaktadır. Bu tip konektörler Avrupa standardı olarak onaylanmıştır. Yuvarlaktır, ancak üst kısmında düz bir kenar bulunmaktadır. Tip 1 konektörden farkı üç fazlı şarj için gereken ekstra iki pin daha içerir. Bu sistem 3 ila 43 kW arasında bir güç sağlamaktadır. 16 A kadar tek fazı ve 63 A kadar üç fazı desteklemektedir. Bu konektörün ek olarak kilit içeren T2-S konektör versiyonu yer almaktadır. Fransa’da T2-S konektör versiyonu zorunludur (IMB Electric, nd).

4.3.3. Kombine şarj sistemi (CCS) Combo 1

CCS Combo 1, J1772 Tip 1 konektörüne iki ek pin eklenmesiyle elde edilir. Kombine şarj Sistemi DC hızlı şarj için üretilmiştir. Konektör, 350 kW’a kadar AC ve DC şarj yapabilmektedir (IMB Electric, nd).

4.3.4. Kombine şarj sistemi (CCS) Combo 2 (IEC 62196-3)

CCS Combo 2, Tip 2 konektörüne iki ek pin eklenmesiyle elde edilir. Kombine şarj Sistemi DC hızlı şarj için üretilmiştir. Konektör, 350 kW’a kadar AC ve DC şarjı yapabilmektedir (IMB Electric, nd).

4.3.5. CHAdeMO

DC hızlı şarj yöntemi için kullanılmaktadır. Bu nedenle, araç üreticileri tarafından alternatif akım şarj soketinin yanında ikinci bir soket olarak monte edilebilmektedir. 62.5 kW güç sağlamaktadır. Aynı zamanda 125 A’ye kadar ulaşılabilir. CHAdeMO 2.0 spesifikasyonu ise 400 kW’ya kadar güç sağlayabilmektedir (IMB Electric, nd).

4.4. Elektrikli Araç Şarj Modları

EA bataryaları DC ile şarj edilebilmektedirler. Elektrikli araçlarda şarj yöntemleri AC şarj, DC şarj ve kablosuz şarj olarak sınıflandırılmaktadırlar. Kablosuz şarj sistemleri yüksek maliyet ve düşük verimli güç aktarımından dolayı ticari olarak yaygın kullanıma

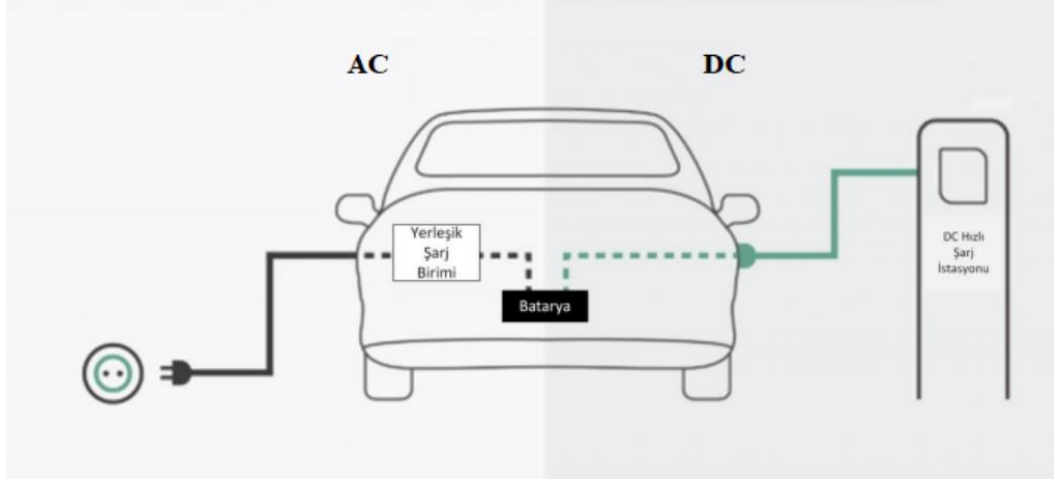
sahip değildir. AC şarj sistemlerinde araca şebeke gerilimi uygulanmaktadır. Araç içerisinde yer alan dahili güç dönüştürücüsü ile şebeke gerilimi doğrultularak batarya şarj kontrolü yapılmaktadır (Yılmaz, 2024).

Dönüştürücünün özelliğine göre araca bir faz veya üç fazlı şebeke uygulanmaktadır. Dahili şarj cihazları, ülkelere ve araçlara göre farklı güç seviyelerinde bulunmaktadır. DC şarj sistemlerinde araca doğrudan DC gerilim uygulanmaktadır. Güç dönüştürücüsünün aracın dışında bulunmasından dolayı boyut problemleri bulunmamaktadır. Bu nedenle çok yüksek güçlerde ve yüksek hızlı şarj altyapısı olarak kullanılabilmektedirler. EA 'ların şarj modları Çizelge 4.4.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. EA şarj modları (Kircioğlu et al.,2023)

Mod	Tip	Maksimum Değer		
		Akım (A)	Gerilim (V)	Güç (kW)
1	1 Faz AC	16	250	4
	3 Faz AC	16	480	11
2	1 Faz AC	32	250	7,4
	3 Faz AC	32	480	22
3	1 Faz AC	63	250	14,5
	3 Faz AC	63	480	43,5
4	DC	200	400	80

Mod 1, Mod 2, Mod 3 şarj yöntemlerinde AC enerjinin DC enerjiye dönüşmesi EA üzerinde bulunan yerleşik şarj sistemi mekanizmasıyla gerçekleştirilir. Mod 4 şarj yönteminde ise AC/DC dönüşümü şarj istasyonunda gerçekleşmektedir. Şekil 4.5.'te AC ve DC şarj etme yöntemi gösterilmiştir (Durmuş & Kaymaz, 2020; Karapınar & Daldaban, 2022; Kircioğlu et al.,2023).



Şekil 4.5. AC ve DC şarj etme yöntemi (Kircioğlu et al.,2023)

4.4.1. Şarj mod 1

Mod 1 şarj yönteminde EA doğrudan şebekeye bağlanarak şarj edilmesi olarak tanımlanmaktadır. Çizelge 4.4.’de görüldüğü gibi akım 16 A, gerilim ise tek fazda 250 V ve üç fazda ise 480 V olarak sınırlandırılmıştır. Bu şarj modunda ayrıca topraklama yapılması gerekmektedir. Mod 1 tip şarj kullanımı güvenlik nedeniyle birçok ülke tarafından yasaklanmıştır. Bu duruma çözüm olarak şarj Mod 2 geliştirilmiştir. Şekil 4.6.’da mod 1 şarj bağlantısı gösterilmiştir (Durmuş & Kaymaz, 2020; Karapınar & Daldaban, 2022).

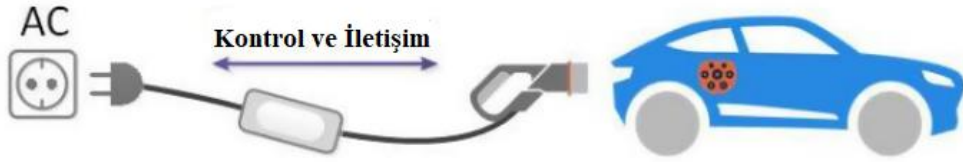


Şekil 4.6. Mod 1 şarj bağlantısı (Karapınar & Daldaban, 2022)

4.4.2. Şarj mod 2

Mod 2 şarj yöntemi, Mod 1 yönteminde olduğu gibi elektrikli aracın doğrudan şebekeye bağlanarak şarj edilmesini sağlamaktadır. Ancak Mod 2, AC ve DC akımlara karşı entegre koruma sağlayan özel bir adaptör kullanılarak geliştirilmiş olup, Mod 1’e kıyasla daha yüksek bir güvenlik seviyesine sahiptir. Çizelge 4.4’te görüldüğü üzere, Mod

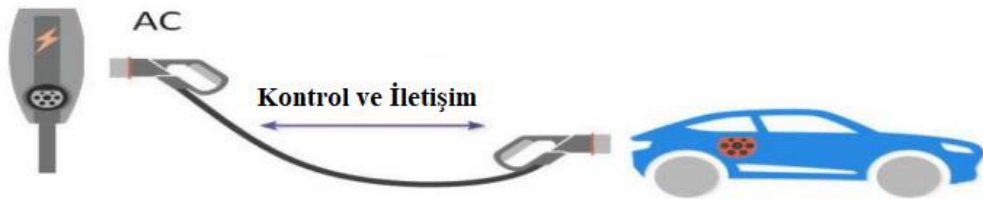
2 şarj sisteminde akım 32 A ile sınırlandırılırken, gerilim tek fazda 250 V ve üç fazda ise 480 V olarak belirlenmiştir. Şekil 4.7’de Mod 2 şarj bağlantı yapısı görsel olarak sunulmuştur. (Durmuş & Kaymaz, 2020; Karapınar & Daldaban, 2022).



Şekil 4.7. Mod 2 şarj bağlantısı (Karapınar & Daldaban, 2022)

4.4.3. Şarj mod 3

Şarj mod 3 yönteminde, EA şarjı için özel bir şarj istasyonu veya duvara entegre şarj ünitesi kullanılmaktadır. Duvar ünitesi veya şarj istasyonu ile birlikte bağlantı kablosu sağlanır. EA şarj için özel bir kablo ihtiyacına gerek duymaz. EA’lar için tercih edilen bir yöntemdir. Bu işlemde araç şarj merkezine bağlandığında aralarında bağlantı kurulmaktadır. EA alabileceği en yüksek akım miktarını istasyona bildirir ve istasyon araca gidecek en uygun akımı belirleyerek araca aktarmaktadır. Çizelge 4.4.’de görüldüğü gibi akım 63 A değerine kadar çıkabilmektedir. Şekil 4.8.’ de mod 3 şarj bağlantısı gösterilmiştir (Durmuş & Kaymaz, 2020; Karapınar & Daldaban, 2022).



Şekil 4.8. Mod 3 şarj bağlantısı (Karapınar & Daldaban, 2022)

Bu mod için 4 adet şarj sınıfı tanımlanmış olup bu sınıflar aşağıda belirtilmiştir;

- 3.7 kVA (16A, Tek Faz – 230V AC)
- 7.4 kVA (32A, Tek Faz – 230V AC)
- 11 kVA (16A, Üç Faz – 400V AC)

- 22 kVA (32 A, Üç Faz – 400V AC)



Şekil 4.9. Menneken tipi konnektör (Durmuş et al., 2020)

Şekil 4.9.'da görülmekte olan bu 7 pinin farklı fonksiyonları bulunmaktadır. Bunlar aşağıda belirtilmiştir;

- Üç ayrı fazı (L1, L2, L3),
- Nötr bağlantısını (N),
- Topraklama bağlantısını,
- Kontrol ve Haberleşme Pinleri.

4.4.4. Şarj mod 4

Şarj Mod 4 yöntemi, genellikle DC hızlı şarj olarak adlandırılmaktadır ve elektrikli araçların çeşitli güç seviyelerinde şarj edilmesine olanak tanır. Bu yöntemle, 5 kW'dan başlayıp 50 kW, 150 kW ve hatta 350 ile 400 kW seviyelerine kadar farklı güç kapasitesine sahip şarj üniteleri bulunmaktadır. Elektrikli araçlar, kontrol ve koruma mekanizmalarıyla donatılmış DC şarj noktalarında şarj edilmektedir. Çizelge 4.4'te belirtildiği üzere, 80 ampere kadar olan akımlar için Tip 2 şarj fişi kullanılırken, 200 ampere kadar olan yüksek akımlar için ise Combo Tip şarj istasyonları tercih edilmektedir. Akım değerinin yüksek olması, gerilim değerinin diğer modlara göre

yüksekliği ve DC dönüştürücüye ihtiyaç duyması sebebiyle diğer ekipmanlara göre çok daha pahalıdır. Şekil 4.10.' de mod 4 şarj bağlantısı gösterilmiştir (Durmuş, 2020; Kaymaz, 2020).



Şekil 4.10. Mod 3 şarj bağlantısı (Karapınar & Daldaban, 2022)

5.MATERYAL VE YÖNTEM

Batman ili tüketimi yüksek olan ve enerjiyi toplayıp dağıtan bir fider olan F1'e EA'ların bağlandığı varsayılarak inceleme yapılmıştır. EA'ların yüklenmesi durumunda F1'e 11 kW AC ve 50 kW DC şarj istasyonu kurulumları yapıldığı varsayılmıştır. Bu tez çalışmasında, Nissan Leaf e+ (ZE1) modeli olan bir EA'nın AC tip şarj istasyonunda şarj edilme ve DC tip şarj istasyonu üzerinden elektrik dağıtım şebekesini geri besleme süreci MATLAB/Simulink ortamında modellenmesi ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen simülasyon ile batarya dolum süresi incelenmiştir. Aynı zamanda saatlik, günlük, aylık ve yıllık gerçek zamanlı elektrik dağıtım şebeke verileri kullanılarak şarj istasyonlarına bağlanacak EA'ların elektrik dağıtım şebekesine enerji geri beslemesi yapılması durumundaki maliyet analizi incelenmiştir. V2G teknolojisinin devreye alındığı bir senaryo kapsamında, saatlik elektrik alış ve satış fiyatları baz alınarak ekonomik açıdan bir analiz gerçekleştirilmiştir.

Nissan Leaf e+ (ZE1) aracın bataryası 62 kW Lityum-iyon modeldir. Nissan Leaf e+ (ZE1) modeli, 62 kWh kapasiteli lityum-iyon bataryasıyla yaklaşık 350–355 V nominal gerilime sahiptir. Batarya tam şarj durumunda yaklaşık 398–400 V seviyelerine kadar ulaşırken, deşarj durumunda minimum gerilim 300–320 V aralığında seyretmektedir. AC şarj istasyonu, 11 kW gücünde, tek yönlü enerji aktarımı sağlayan bir düzende oluşturulmuş olup inverter ve güç elektroniği yapısı ile batarya bağlantısı gerçekleştirilmiştir. DC şarj istasyonu ise 50 kW'a kadar güç aktarabilecek şekilde çift yönlü enerji aktarımına sahip olacak şekilde yapılandırıldığı varsayılmıştır.

5.1. Simülasyon Sonuçları

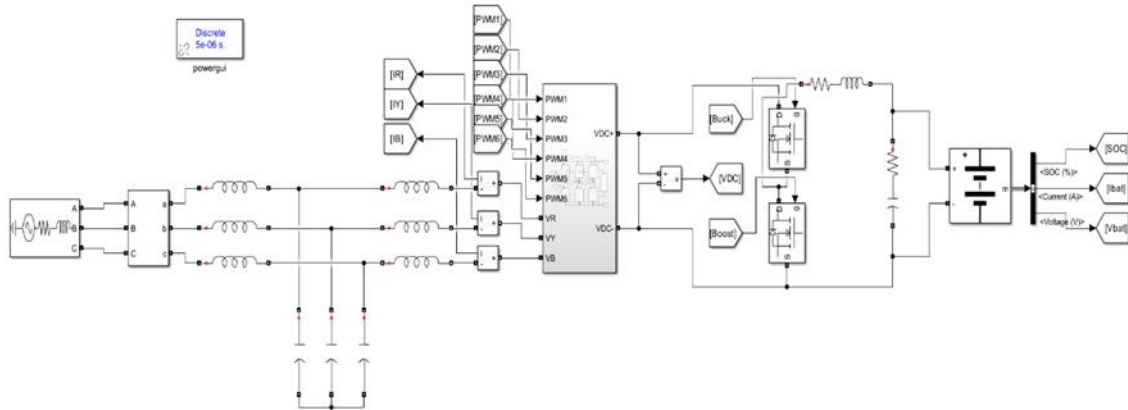
62 kW Lityum-iyon bataryaya sahip Nissan Leaf e+ (ZE1) aracın 11 kW AC şarj istasyonunda şarj olma süresinin (Batarya gücü / Şarj gücü = Şarj dolum süresi) yaklaşık olarak 6 saat kadar sürmesi beklenmektedir. Yapılan incelemede dönüştürücüler ve güç elektroniği devre elemanları kullanılarak 62 kW bataryanın şarj ve deşarj süreleri MATLAB/Simulink ortamında simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

SOC (State of Charge), bir bataryanın şu anda mevcut olan enerji miktarının, bataryanın toplam kapasitesine oranı olarak ifade edilmektedir. Bu oran genellikle yüzde

(%) cinsinden ifade edilir. SOC hesaplama formülü aşağıda denklem 1’de ifade edilmiştir.

$$SOC(\%) = \frac{\text{Mevcut Enerji (kWh)}}{\text{Kapasite (kWh)}} \times 100 \quad (5.1)$$

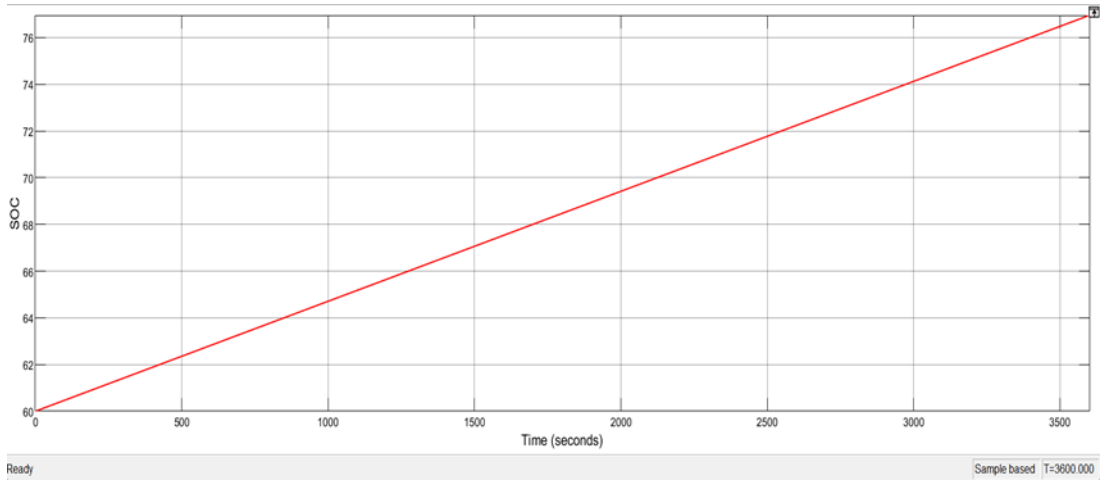
62 kW Lityum-iyon bataryaya sahip Nissan Leaf e+ (ZE1) araç AC şebekeye bağlanmış olup batarya doluluk oranı %60 olarak belirlenmiştir. 3600 sn simülasyon süresi sonunda bataryanın %76.95 doluluk oranına ulaştığı simülasyon sonuçlarından elde edilmiştir. Bu durumda bataryanın AC şarj için saatlik 10.5 kWh enerji depoladığı tespit edilmiştir. 62 kW bataryaya sahip EA’nın AC şarj istasyonu aracılığıyla elektrik dağıtım şebekesinden enerji çekerek yaklaşık olarak 6 saatte şarj olacağı sonucuna varılmaktadır. Nissan Leaf e+ (ZE1) aracın katalog değerlerine bakıldığında bataryanın deşarj süresince 1 saatte DC şarj istasyonuna bağlanarak elektrik dağıtım şebekesine 7 kWh enerji aktarımı yapabileceği literatürde görülmektedir.



Şekil 5.1. MATLAB elektrikli araç şarj simülasyon modeli

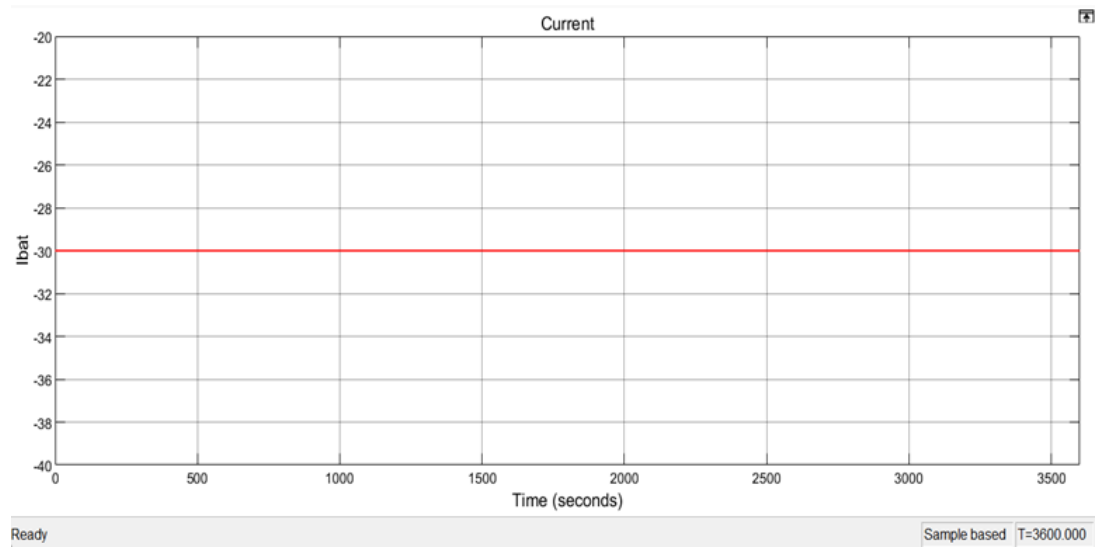
MATLAB/Simulink ortamında batarya sistemlerinin şarj dinamiklerini incelemek için oluşturulan batarya modeli Şekil 5.1’de görülmektedir. Bu çalışmada, elektrikli araçlar için tipik bir 11 kW kapasiteli Seviye 2 şarj sistemi, MATLAB/Simulink ortamında modellenmiştir. Model, üç fazlı 380 V AC kaynaktan alınan enerjinin filtrelenerek doğrultulması ve PWM kontrollü bir yapı aracılığıyla DC’ye dönüştürülmesini içermektedir. Elde edilen DC güç, araç içerisinde yer alan bir buck-boost DC-DC dönüştürücü ile bataryanın gerilim seviyesine uygun hale getirilmiş ve şarj işlemi gerçekleştirilmiştir. Şarj senaryosunda Nissan Leaf e+ modeline ait 62 kWh kapasiteli lityum-iyon batarya referans alınmış; batarya gerilimi, şarj akımı ve doluluk

oranı (SOC) izlenmiştir. 3600 saniyelik simülasyon süresince batarya şarj durumu, batarya akımı ve batarya gerilimi zamana bağlı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, başlangıçta %60 olan SOC değerinin doğrusal bir artış göstererek simülasyon sonunda %76,95 seviyesine ulaştığı Şekil 5.2’de görülmektedir. Bu durum, sabit akım altında gerçekleştirilen sağlıklı bir şarj sürecine işaret etmektedir.



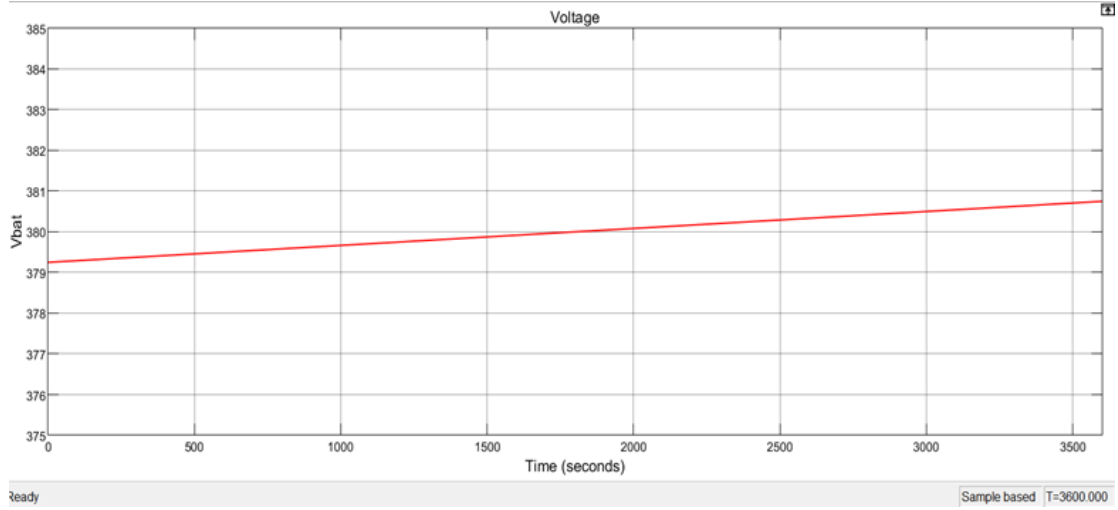
Şekil 5.2. Nissan Leaf e+ SOC durumu

Batarya akımı boyunca yaklaşık -30 A seviyesinde sabit kaldığı Şekil 5.3’te görülmektedir ve bu negatif akım değeri, sistemin şarj modunda olduğunu açıkça göstermiştir.



Şekil 5.3 Nissan Leaf e+ batarya akımı

Sabit akım stratejisinin etkili bir şekilde uygulandığı bu süreçte, batarya gerilimi de zamanla artış göstermiş; başlangıçta yaklaşık 379 V olan gerilim değeri simülasyon sonunda 380.5 V civarına ulaşmıştır. Gerilim eğrisinin düzgün ve sürekli artan yapısı, batarya modelinin fiziksel gerçekliği başarıyla yansıttığını ve sistemin kararlı bir şekilde çalıştığını ortaya koymuştur. Şekil 5.4'te Nissan Leaf e+ araç bataryasındaki gerilim değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.4 Nissan Leaf e+ batarya gerilimi

Nissan Leaf e+ (ZE1) marka 62 kW Lityum-iyon bataryaya sahip araç AC şarj istasyonu aracılığıyla elektrik dağıtım şebekesine bağlanarak şarj edilmiş ve DC şarj istasyonuna bağlanarak elektrik dağıtım şebekesine elektrik deşarjının yapıldığı varsayılmıştır. Aynı zamanda V2G teknolojisinin devreye alındığı bir senaryo kapsamında, saatlik elektrik alış ve satış fiyatları baz alınarak ekonomik bir analiz gerçekleştirilmesi sağlanmıştır.

5.2. Gerçek Zamanlı Şebeke Verilerinin Analizi

Bu tezde kullanılan gerçek zamanlı şebeke verileri, Batman ilinde bulunan F1 fideri üzerinden elde edilen, saatlik, günlük, aylık ve yıllık bazda elektrik dağıtım şebekesinin yük profilleri verilerinden oluşmaktadır. Bu veriler, elektrikli araçların (EA) şebekeye bağlanması durumunda oluşacak yük değişikliklerinin daha doğru bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Gerçek zamanlı verilerin sağlanması, şebekedeki

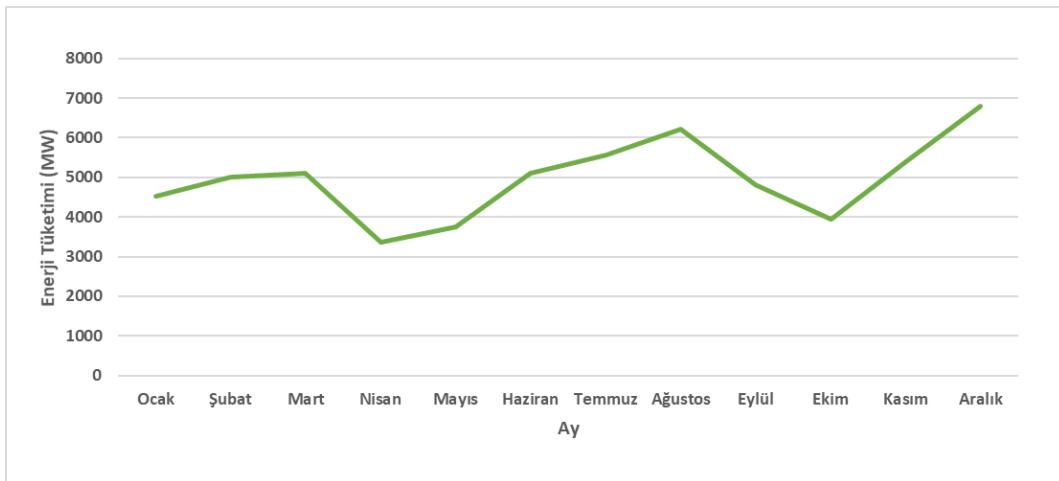
anlık değişimlerin EA şarj ve deşarj dđngülerine olan etkisinin değerlendirilmesinde kritik bir öneme sahiptir.

Batman ilinde, F1 fideri üzerindeki yük verileri, şebeke işletmesinden temin edilmiştir ve saatlik olarak toplanan veriler, EA'ların farklı şarj senaryolarındaki etkilerini incelemek için kullanılmıştır. F1 fideri üzerindeki elektrik tüketimi, özellikle EA'ların şebekeye bağlanmasıyla birlikte değişkenlik gösterecek şekilde analiz edilmiştir. Bu analizde, EA'ların şarj ve deşarj süreçlerinin doğru analiz edilmesiyle şebekedeki aktif güç tüketimi dengesindeki olası bozulmaları optimize edilebilecektir. Aynı zamanda, şebeke voltajındaki olası dalgalanmalar ve bu dalgalanmaların şarj sürelerine etkileri minimize edilebilecektir.

5.2.1. Aylık Enerji Tüketim Verilerinin Analizi

Batman ili F1 fiderine ait aylık enerji tüketim değerleri şekil 5.2'de sunulmuştur. F1 fideri için incelenen saatlik enerji tüketimleri; bir gün için 24, bir ay için ise yaklaşık 720 adet veri setinden oluşmaktadır.

şekil 5.5 incelendiğinde, en yüksek enerji tüketiminin Aralık ayında 6808 MWh, en düşük enerji tüketiminin ise Nisan ayında 3372 MWh olarak gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum, F1  zerindeki enerji talebinin mevsimsel koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır.



şekil 5.5. Batman ili F1 fiderinin 2024 yılı aylık enerji tüketim değerleri

2024 yılı aylık tüketim yük profilleri incelendiğinde, özellikle kış aylarında enerji tüketiminde artış gözlemlenmiştir. Bu artışın, ısıtma sistemlerinin daha yoğun

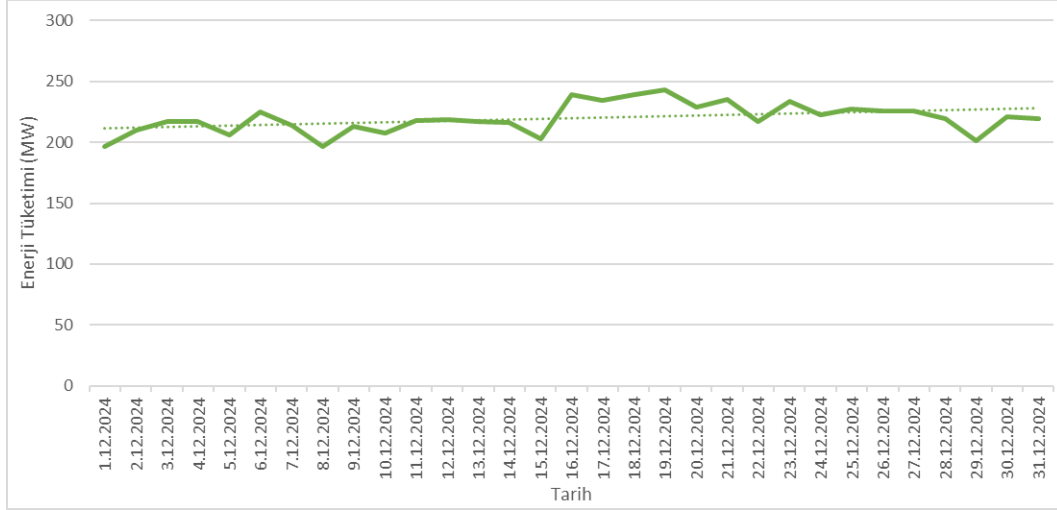
kullanılmasıyla ilişkili olduğu değerlendirilmektedir. Nisan ayında ise tüketim değerlerinin en düşük seviyeye gerilemesi, mevsim geçiş dönemlerinde enerji talebinin azaldığını göstermektedir. Yaz aylarında ise tüketim, genel olarak dengeli bir seyir izlemekte olup, soğutma sistemlerinin kullanımına bağlı olarak sınırlı düzeyde artış göstermektedir.

Elde edilen veriler, şebeke üzerindeki yük dağılımının mevsimsel olarak değiştiğini ve bu durumun EA'ların şarj ve deşarj işlemleri üzerinde doğrudan etkili olacağını göstermektedir. Yüksek tüketim dönemlerinde EA'ların şebekeye bağlanarak enerji çekmesi, mevcut yükü artırarak şebeke dengesini olumsuz etkileyebilir. Buna karşın, düşük tüketim dönemlerinde EA'ların şarj edilmesi ve yüksek tüketim dönemlerinde V2G teknolojisiyle şebekeye enerji geri beslemesi yapılması, enerji yönetimi açısından daha verimli olacaktır. Mevsimsel değişikliklerle birlikte, özellikle yoğun yük dönemlerinde, şarj ve deşarj döngülerinin şebekedeki aktif güç tüketimini nasıl etkileyebileceği önemli bir faktör olacaktır.

5.2.2. Günlük Enerji Tüketim Verilerinin Analizi

Şekil 5.6'de gösterilen 2024 yılı Aralık ayına ait Batman ili F1 fideri enerji tüketim verilerine göre, günlük ortalama enerji tüketimi 219 MW olarak gerçekleşmiştir. Bu değer, dağıtım şebekesinin kurulumunda kullanılacak ekipmanların kapasite planlaması açısından önemli bir referans oluşturmaktadır.

Şekil 5.6 incelendiğinde, 19 Aralık 2024 tarihinde tüketimin 243 MW ile en yüksek seviyeye ulaştığı görülmektedir. Bu tür zirve tüketim değerleri, özellikle soğuk hava koşulları nedeniyle artan ısıtma ihtiyacına bağlı olarak ortaya çıkmakta olup, trafo ve iletim hatları üzerinde ek yük oluşturarak aşırı gerilim düşümleri ve enerji kalitesinde bozulmalar gibi riskleri beraberinde getirmektedir. Ayrıca bu tür yoğun talepli günlerde, elektrikli araçların şebekeye bağlanmasıyla oluşan ek yük, şebeke dengesini daha da hassas hale getirebilir. Bu nedenle, yük yönetimi stratejilerinin doğru planlanması, akıllı şebeke sistemlerinin kullanımı ve V2G teknolojisinin entegrasyonu, yüksek talep günlerinde şebekenin güvenli ve kararlı çalışması açısından büyük önem taşımaktadır.

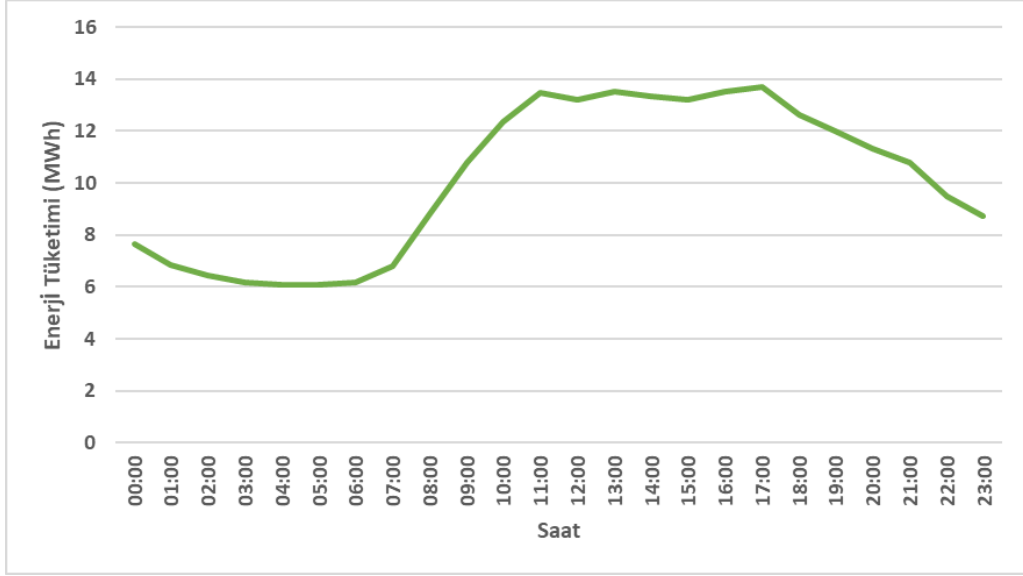


Şekil 5.6. Batman ili F1 fiderinin 2024 Aralık ayı enerji tüketim değerleri

5.2.3. Saatlik Enerji Tüketim Verilerinin Analizi

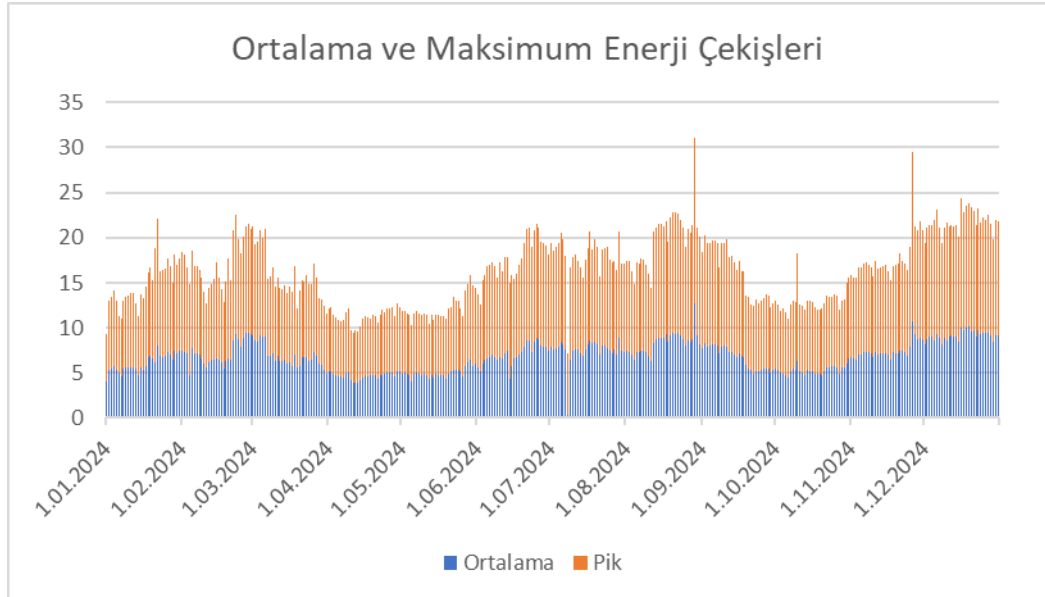
19 Aralık 2024 tarihinde F1 fideri üzerinden gerçekleşen toplam 243 MW'lık enerji tüketimi, yılın en yüksek günlük tüketimlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu tarih özelinde yapılan saatlik analiz Şekil 5.7.'de görülmektedir. Günlük toplam tüketim değeri saatlik bazda incelendiğinde, enerji talebinin sabah saat 06:00 ile 09:00 arasında yükselmeye başladığı, öğle saatlerinde nispeten dengelendiği ve akşam saat 17:00 ile 21:00 arasında düşmeye başladığı gözlemlenmektedir. Bu durum, kullanıcıların günlük yaşam alışkanlıkları ve endüstriyel faaliyetlerin dağılımı ile doğrudan ilişkilidir.

Saatlik tüketim verileri doğrultusunda, özellikle akşam pik saatlerinde şebekenin maksimum kapasiteye yakın çalıştığı ve iletim hatları ile trafo merkezlerinin ciddi şekilde yüklendiği anlaşılmaktadır. F1 fideri üzerinde 19 Aralık tarihi saatlik ortalama enerji tüketim değerinin 10.13 MWh olduğu ve en yüksek enerji tüketim değerinin ise 13.7 MWh ile 17:00'da gerçekleştiği Şekil 5.7'de görülmektedir.

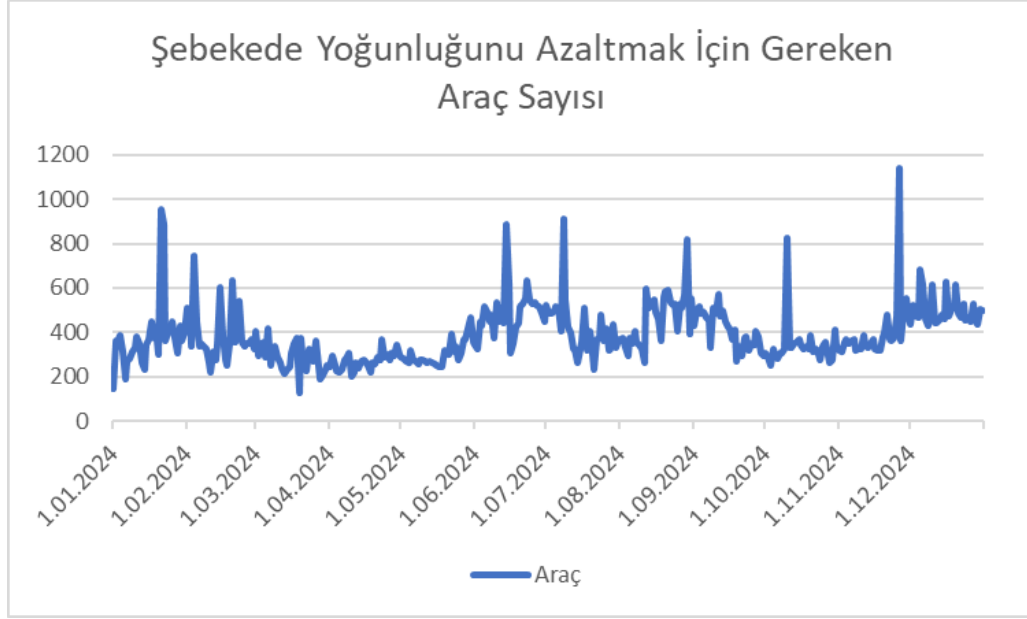


Şekil 5.7. Batman ili F1 fiderinin 2024 Aralık ayı günlük enerji tüketim değerleri

F1 fiderinin 19 Aralık tarihindeki enerji tüketimine bakıldığında; saat 17:00'da gerçekleşen 13.7 MWh'lik maksimum enerji tüketiminin, günlük ortalama tüketim değeri olan 10.13 MWh seviyesine düşürülebilmesi için yaklaşık olarak 510 adet Nissan Leaf e+ (ZE1) aracın V2G modunda şebekeye entegre edilmesiyle şebekedeki yükün azaltılabileceği öngörülmektedir.



Şekil 5.8. Fiderin saatlik ortalama ve maksimum enerji çekiş miktarları



Şekil 5.9. Fiderin enerji yoğunluğunu optimize etmek için gereken EA sayısı

Ortalama enerji tüketimi ile saatlik çekilen maksimum enerji değerlerinin yıllık bazda yapılan karşılaştırması Şekil 5.8’de görülmektedir. Elde edilen veriler doğrultusunda, şebekedeki anlık enerji talep dalgalanmalarının belirli saatlerde ciddi boyutlara ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, elektrikli araçların (EA) araçtan şebekeye enerji transferine olanak sağlayan V2G (Vehicle-to-Grid) teknolojisi aracılığıyla, şebeke üzerindeki yükün dengelenmesine katkı sağlayabileceği değerlendirildiğinden analizin ikinci aşamasında, her gün için fiderin tükettiği maksimum enerji miktarını saatlik ortalama tüketime yaklaştırmak amacıyla şebekeye V2G sistemi üzerinden enerji vermesi gereken Nissan Leaf e+ araç sayısı Şekil 5.9’da gösterilmiştir. Yıllık veri seti üzerinden yapılan bu değerlendirme sonucunda, fiderin en yüksek enerji tüketim farkının gözlemlendiği saat diliminde yaklaşık 1142 adet elektrikli aracın şebekeye bağlı olması gerektiği ortaya konmuştur. Buna karşılık, tüketim farkının en düşük olduğu saat diliminde ise yalnızca 127 aracın V2G sistemine entegre olması yeterli olmaktadır.

Bu analiz, enerji talebindeki ani yükselişlerin dengelenmesi ve şebeke stabilitesinin korunmasında, V2G teknolojisinin önemli bir araç olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca, fider bazında yapılan bu tip analizler, bölgesel planlamalar ve dinamik tarife sistemleri açısından da yol gösterici niteliktedir.

EA’ların yoğun şekilde şarj edilmesi durumunda, şebekede gerilim düşümü, frekans dengesizliği ve hatta yerel kesintiler yaşanma riski artmaktadır. Bu nedenle, yük yönetimi kapsamında esnek tarife yöntemleri ile EA şarjlarının düşük talep saatlerine

kaydırılması gerekmektedir. V2G teknolojisi ile elektrikli araçların bu saatlerde şebekeye enerji geri besleme yapması, şebeke dengesini sağlamada stratejik bir avantaj sunmaktadır. Bu analiz, dağıtım sisteminin sadece toplam tüketim değil, tüketimin zamansal dağılımı açısından da dikkatle planlanması gerektiğini ortaya koymaktadır.

V2G teknolojisi ile düşük güç tüketim dönemlerinde özellikle gece saatlerinde EA'ların beslenmesi ve yüksek güç tüketim dönemlerinde ise şebekeye enerji geri beslemesi sağlanarak şebekedeki yük dengelenebilir. Bu sayede elektrik fiyatlarının düşük olduğu zaman EA bataryası şarj edilir ve yüksek olduğu zaman ise deşarj edilerek EA kullanıcılarının ekonomik açıdan avantaj sağlamasına imkân sunulabilir.

6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE BULGULAR

Bu tez çalışmasında, EA'ların şebekeye entegrasyonu ve V2G teknolojisinin uygulanabilirliği değerlendirilirken, ekonomik boyutun analiz edilmesi amacıyla EPIAŞ (Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.) tarafından yayımlanan saatlik Piyasa Takas Fiyatı (PTF) verileri esas alınmıştır. Gerçekleştirilen maliyet analizinde, bir gün boyunca elektrikli aracın şarj edildiği ve şebekeye enerji geri beslemesi yaptığı saatler dikkate alınarak enerji alış ve satış fiyatları karşılaştırılmıştır.

PTF, elektrik piyasasında arz ve talep dengesinin sağlandığı noktada oluşan saatlik fiyatları ifade etmektedir. Bu kapsamda, şarj işlemleri için düşük PTF değerlerinin bulunduğu saatler tercih edilerek maliyetin azaltılması hedeflenmiştir. Benzer şekilde, EA'nın bataryasında depolanan enerjinin şebekeye geri satıldığı saatlerde, PTF'nin yüksek olduğu zaman dilimleri seçilerek gelir maksimizasyonu amaçlanmıştır. Böylece, sistemin yalnızca teknik değil, aynı zamanda ekonomik anlamda da sürdürülebilir olup olmadığı değerlendirilmiştir.

V2G teknolojisinin devreye alındığı senaryoda, elektrikli aracın düşük tarifeli saatlerde şarj edilip, yüksek tarifeli saatlerde şebekeye enerji verdiği varsayılmıştır. Bu işlemde elde edilen ekonomik kazanç, saatlik bazda hesaplanmış olup, araçtan çekilen ve şebekeye verilen enerji miktarları ile EPIAŞ fiyatları çarpılarak net gelir/zarar durumu ortaya konmuştur. Hesaplamalarda şebekeye verilen enerji için satış geliri, şarj işlemi içinse alış maliyeti dikkate alınmıştır.

Bu analiz sonucunda, V2G sisteminin yalnızca enerji yönetimi değil, aynı zamanda tüketici düzeyinde bir gelir modeli oluşturabileceği ortaya konmuştur. Elektrikli araçların enerji piyasasındaki saatlik dalgalanmalardan yararlanarak hem şebekenin dengelenmesine katkı sağlaması hem de kullanıcıya ekonomik fayda sunması, bu teknolojinin yaygınlaştırılabilirliğini desteklemektedir.

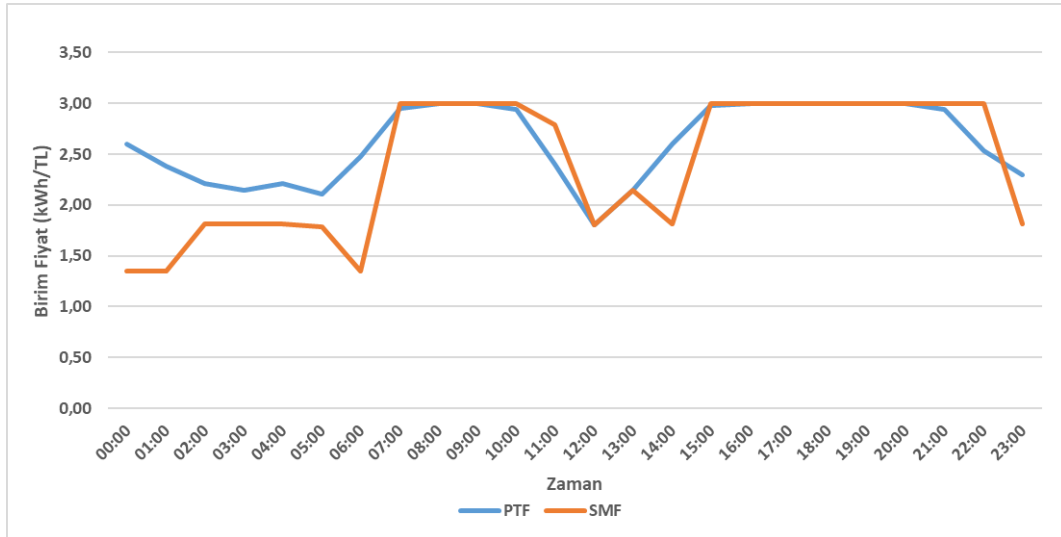
6.1. EPIAŞ Verileriyle Günlük Enerji Alış Satış (V2G) Maliyet Analizi

Bu tez çalışmasında, 19 Aralık 2024 tarihine ait EPIAŞ (Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.) tarafından yayımlanan saatlik Piyasa Takas Fiyatı (PTF) ve Sistem Marjinal Fiyatı (SMF) verileri kullanılarak, bir elektrikli aracın enerji alış (şarj) ve satış (deşarj) senaryosu üzerinden günlük maliyet analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın temel amacı,

elektrikli aracın farklı saat dilimlerinde şarj edilip şebekeye enerji sattığı durumlarda, saatlik piyasa fiyatlarındaki değişimlerin ekonomik etkilerini ortaya koymaktır.

PTF, gün öncesi piyasasında arz ve talebin eşleştiği noktada oluşan ortalama birim elektrik fiyatını temsil ederken; SMF, sistem dengesini sağlamak amacıyla kabul edilen en pahalı teklifin fiyatı olup, piyasanın marjinal maliyet sinyalini yansıtır. Bu nedenle, SMF genellikle sistemin ihtiyaç duyduğu son birim enerjinin maliyetini gösterir ve bazı saatlerde PTF'den yüksek olabilir. Özellikle sistem dengesizliklerinin arttığı yoğun talep dönemlerinde SMF değerinin öne çıkması, şebeke dengeleme maliyetlerinin belirlenmesinde kritik rol oynar.

Şekil 6.1'de, EPİAŞ tarafından yayımlanan 19.12.2024 tarihli saatlik PTF ve SMF değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, gece saatleri olarak örnek verecek olursak 00:00–06:00 arasında hem PTF hem de SMF değerlerinin görece düşük olduğu, buna karşın sabah saatlerinden itibaren özellikle akşam pik talep saatlerinde ise 17:00–20:00 arasında fiyatların belirgin şekilde yükseldiği gözlemlenmektedir. Bu durum, enerji alış (şarj) işlemlerinin düşük fiyatlı gece saatlerinde gerçekleştirilmesinin maliyet avantajı sağladığını; buna karşılık, enerji satışının (deşarj) ise yüksek fiyatların geçerli olduğu akşam saatlerine kaydırılmasının ekonomik kazancı maksimize ettiğini göstermektedir.



Şekil 6.1. EPİAŞ tarafından 19.12.2024 tarihi için yayımlanan PTF ve SMF değerleri (EPİAŞ,2024)

6.1.1. Senaryo 1 (Zaman bazlı maliyet analizi)

PTF ve SMF verilerine dayalı analizler, elektrikli araçların şebeke ile etkileşiminde zamanlama optimizasyonunun önemini ortaya koymakta; doğru stratejiyle uygulanan V2G senaryolarının sistem dengesine katkı sağlarken aynı zamanda ekonomik fayda yaratabileceğini göstermektedir. Enerji alış/satış senaryosuna göre maliyet analizi Çizelge 6.1. 'de gösterilmektedir.

Çizelge 6.1. Senaryo 1'e göre enerji alış/satış maliyet analizi

Saat	PTF (TL/kWh)	Enerji Değişimi (kWh)	Enerji Alış/Satış	Net Gelir (TL)
03:00	2,14	+10,5	Şarj	-23
04:00	2,22	+10,5	Şarj	-23
05:00	2,11	+10,5	Şarj	-22
15:00	2,98	-7	Deşarj	+21
16:00	3,00	-7	Deşarj	+21
17:00	3,00	-7	Deşarj	+21

Örnek senaryo için Çizelge 6.1.'de Nissan Leaf e+ (ZE1) model bir elektrikli aracın sabah saat 03:00 ile 06:00 arasında toplam 3 saat boyunca şarj edildiği varsayılmıştır. Bu süre zarfında aracın toplamda yaklaşık 31,5 kWh (3 x 10,5 kWh) enerji çektiği ve her saat için geçerli olan PTF'ye göre ödeme yaptığı kabul edilmiştir.

Enerji alış ve satış saatlerine ilişkin PTF değişimleri, sistemin ekonomik performansı üzerinde belirleyici bir etki yaratmaktadır. 19.12.2024 tarihinde PTF verilerine göre, sabah 03:00–05:00 saatleri arasındaki değerler 2,11–2,22 TL/kWh aralığında seyretmiştir. Bu saatlerde şarj edilen EA'da 31,5 kWh enerji için toplam 68 TL ödeme yapılmıştır.

Aynı EA'nın 15:00–17:00 saatleri arasında V2G teknolojisi ile şebekeye enerji sattığı kabul edilmiştir. Bu saatlerde PTF değeri 3,00 TL/kWh seviyesindedir. Araçtan toplam 21 kWh (3 x 7 kWh) enerji şebekeye verilmiş ve bu miktar saatlik PTF değerine göre gelir olarak hesaplanmıştır.

Gerçekleştirilen deşarj işlemleri sırasında 15:00–17:00, PTF değerleri 2,98–3,00 TL/kWh gibi görece yüksek seviyelere ulaşmış ve bu sayede satılan 21 kWh (3 x 7 kWh) enerji karşılığında toplam 63 TL gelir elde edilmiştir.

Analizi yapılan bu senaryoda, satışa sunulan enerji miktarının alış miktarından düşük olması ve gelirlerin maliyetleri karşılayamamasına yol açmış ve sistemin net zarar ile kapatılmasına neden olmuştur.

Gerçekleştirilen bu senaryo analizi ile, V2G teknolojisinin EPİAŞ tarafından yayımlanan saatlik fiyat verilerine göre dinamik bir şarj-deşarj stratejisi ile yönetilmesi halinde, sistemin ekonomik açıdan kârlı hale getirilebileceğini göstermektedir. Doğru zamanlama, fiyat takibi ve enerji miktarı optimizasyonu, elektrikli araç sahipleri ve enerji yönetim sistemleri açısından temel başarı kriterleridir.

Sonuç olarak, bu çalışma V2G uygulamalarının sadece teknik değil, aynı zamanda finansal açıdan da dikkatli planlama gerektirdiğini ortaya koymaktadır.

6.1.2. Senaryo 2 (Enerji bazlı maliyet analizi)

Bu çalışmada, EA'ların şebeke ile çift yönlü enerji etkileşimi kapsamında enerji alış ve satış işlemlerine ilişkin maliyet analizi, EPİAŞ tarafından yayımlanan PTF ve SMF verilerine dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Analiz, Nissan Leaf e+ (ZE1) model bir elektrikli aracın belirli saat aralıklarında şarj vedeşarj işlemleri gerçekleştirdiği Senaryo 2 üzerinden yürütülmüştür. İlgili işlem saatleri, enerji alış/satış yönü, birim fiyatlar ve net gelir kalemleri Çizelge 6.2'de sunulmaktadır.

Çizelge 6.2. Senaryo 2'ye göre enerji alış/satış maliyet analizi

Saat	PTF (TL/kWh)	Enerji Değişimi (kWh)	Enerji Alış/Satış	Net Gelir (TL)
04:00	2,22	+10,5	Şarj	-23
05:00	2,11	+10,5	Şarj	-22
15:00	2,98	-7	Deşarj	+21
16:00	3,00	-7	Deşarj	+21
17:00	3,00	-7	Deşarj	+21

Senaryo 2 kapsamında, EA'nın saat 04:00 ve 05:00'te toplam iki saat boyunca şarj edilerek bataryasına 21 kWh enerji yüklendiği; bu enerjinin ise aynı gün saat 15:00, 16:00 ve 17:00'de üç saatlik bir zaman dilimi boyuncadeşarj edilerek şebekeye aktarıldığı varsayılmıştır. Her bir işlem saati için EPİAŞ tarafından yayımlanan saatlik PTF değerleri esas alınarak, enerji alış ve satış maliyetleri hesaplanmıştır.

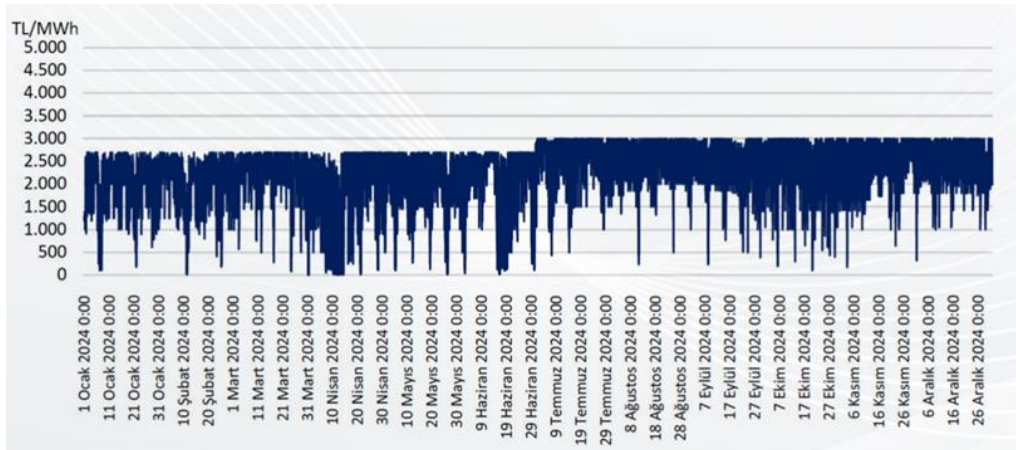
Şarj işlemleri sırasında aracın enerji satın aldığı saatlerdeki PTF değerleri sırasıyla 2,22 TL/kWh (04:00) ve 2,11 TL/kWh (05:00) olarak gerçekleşmiştir. Bu işlemler sonucunda oluşan toplam şarj maliyeti 45 TL olup, saatlik bazda 23 TL ve 22 TL şeklinde hesaplanmıştır.

Deşarj işlemleri sırasında ise araç, V2G teknolojisi aracılığıyla şebekeye enerji aktarmış; bu işlemler sırasında SMF değerleri sabit olarak 3,00 TL/kWh seviyesinde kalmıştır. Deşarj işlemleriyle elde edilen toplam gelir 63 TL olup, her saat için 21 TL kazanç sağlanmıştır.

Analiz sonucunda, toplamda 45 TL’lik enerji alım maliyetine karşılık, 63 TL’lik bir enerji satış geliri elde edilmiş; böylece senaryo bazında net 18 TL ekonomik fayda sağlandığı görülmüştür. Bu sonuç, enerji alış ve satış saatlerinin doğru seçilmesi durumunda, V2G teknolojinin sistem operatörüne olduğu kadar araç sahibine de doğrudan finansal katkı sağlayabileceğini ortaya koymaktadır.

6.1.3. Senaryo 3 (Geniş ölçekte enerji alış satışının değerlendirilmesi)

Eşit miktarda enerji şarj-deşarj döngüsünde kullanıcının kâr edebildiği fikrinden yola çıkılarak, Şekil 6.2’de 2024 yılı EPIAŞ PTF verileri baz alınıp kullanıcının günlük yaşam rutinine uygun olduğu değerlendirilen farklı saat dilimleri seçilerek geniş ölçekte bir yıllık periyot için günlük düzenli enerji alış ve satış faaliyetleri modellenmiştir.

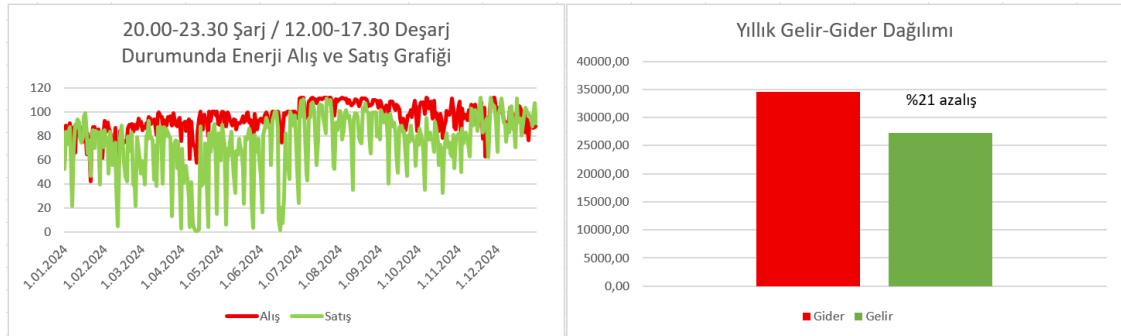


Şekil 6.2. EPIAŞ tarafından yayımlanan 2024 saatlik PTF değerleri (EPIAŞ,2024)

6.1.3.1. Senaryo 3 (20.00-23.30 Şarj / 12.00-17.30 Deşarj)

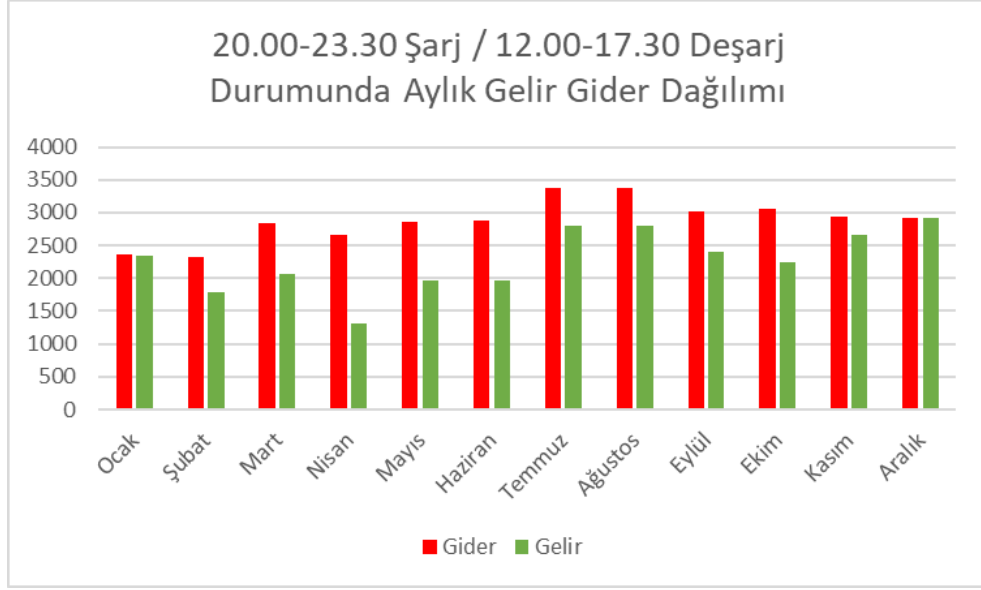
Senaryo 3 kapsamında ilk yaklaşım; kullanıcı elektrikli aracını her gün saat 20:00–23:30 arasında evinde şarj etmiş, uyumadan önce ise aracı şarjdan çıkarmıştır. Gün içinde ise 12:00–17:30 saatleri arasında, mesaiyken aracın şebekeye aynı miktarda enerjiyi V2G bağlantısıyla deşarj etmesi sağlanmıştır. Belirlenen 37,2 kW’lık enerji miktarı, batarya sağlığını korumak amacıyla batarya kapasitesinin %20 ile %80 doluluk seviyeleri arasında işlem yapıldığı varsayılarak ve ara kayıplar ihmal edilerek hesaplanmıştır.

Bu düzenli şarj-deşarj döngüsünün sonuçları Şekil 6.3’te gösterilmektedir. Yıllık bazda yapılan hesaplamalarda, enerji satışından elde edilen gelir, enerji alımı için ödenen toplam maliyetin altında kalmış ve kullanıcı ekonomik olarak zarar etmiştir. Bu durum, yalnızca aktarılan enerji miktarının değil, şarj ve deşarj işlemlerinin gerçekleştirildiği zaman dilimlerinin de ekonomik getiri açısından kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.



Şekil 6.3. Saat 20.00-23.30 Şarj / 12.00-17.30 deşarj döngüsünde yıllık enerji alış satış grafiği

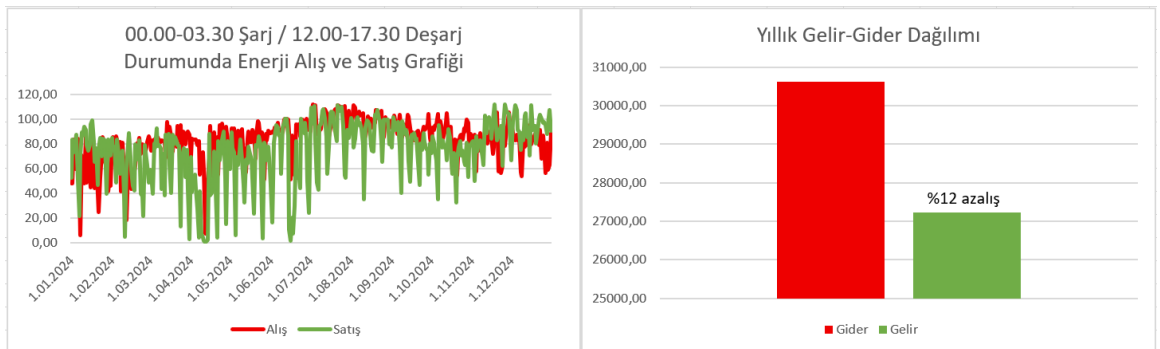
Şekil 6.4’te 20:00–23:30 saatleri arasında şarj ve 12:00–17:30 saatleri arasında deşarj işlemine göre 2024 yılı aylık gelir-gider dağılımı gösterilmektedir. Bu durumda seçilen şarj-deşarj döngüsünde giderin geliri aştığı görülmüş olup kullanıcı her ay zarar etmiştir.



Şekil 6.4. Saat 20.00-23.30 Şarj / 12.00-17.30 deşarj döngüsünde aylık enerji gelir gider grafiği

6.1.3.2. Senaryo 3 (00.00-03.30 Şarj / 12.00-17.30 Deşarj)

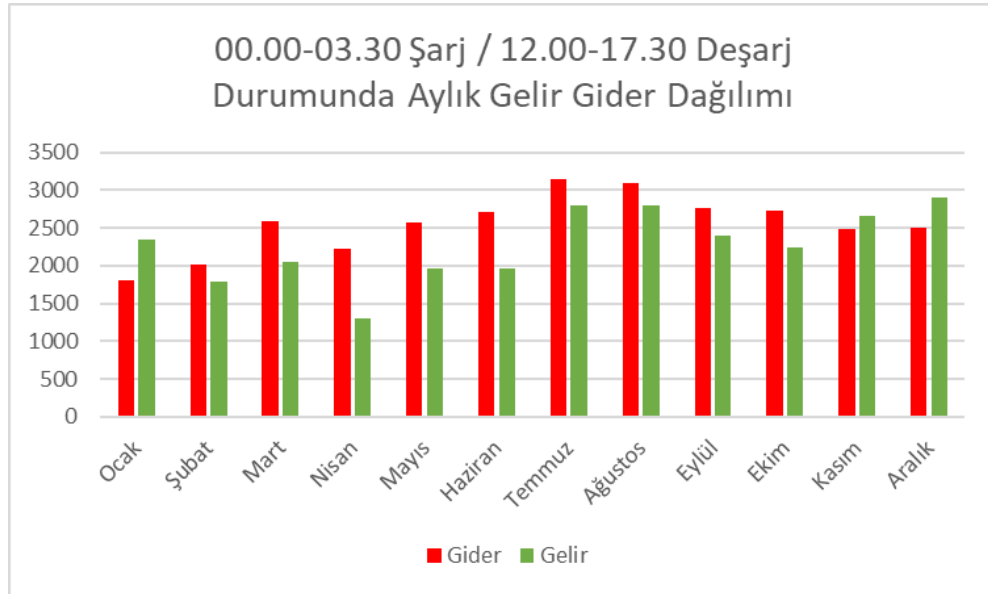
Senaryo 3 kapsamında ikinci yaklaşım; şarj işlemi önceki durumdan farklı olarak gece 00:00–03:30 saatleri arasında gerçekleştirilmiş, kullanıcı gece yatmadan önce aracını şarja bağlamıştır. Deşarj işlemi ise yine mesai saatleri içerisinde 12:00–17:30 arasında yapılmıştır. Bu değişikliklerle birlikte şarj-deşarj döngüsünün zamanlaması optimize edilerek, enerji fiyatlarının daha uygun olduğu gece saatlerinden yararlanılması amaçlanmıştır. Yapılan bu zamanlama ayarlaması sonucunda elde edilen kâr-zarar grafiği Şekil 6.5’te gösterilmektedir.



Şekil 6.5. Saat 00.00-03.30 Şarj / 12.00-17.30 deşarj döngüsünde yıllık enerji alış satış grafiği

Şekil 6.6’da 00:00–03:30 saatleri arasında şarj ve 12:00–17:30 saatleri arasında deşarj işlemine göre 2024 yılı aylık gelir-gider dağılımı gösterilmektedir. Bu durumda

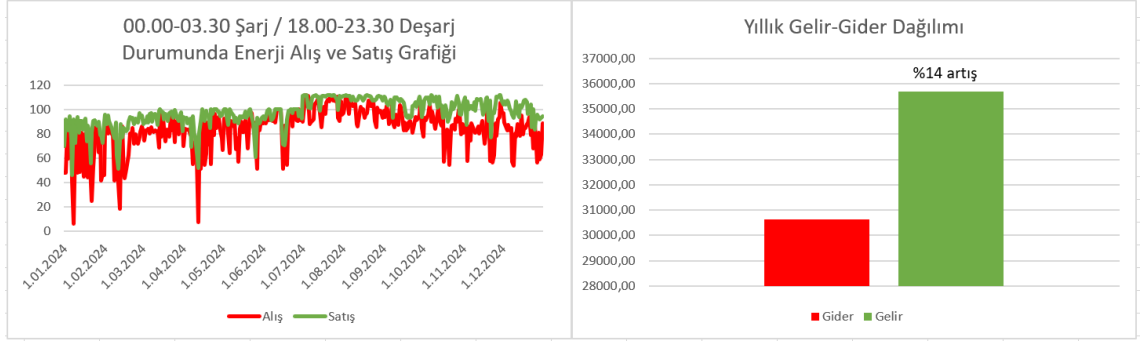
seçilen şarj-deşarj döngülerinde bazı aylar kar edilmiş olsa da yıl sonunda kullanıcı zarar etmiştir.



Şekil 6.6. Saat 00.00-03.30 Şarj / 12.00-17.30 deşarj döngüsünde aylık enerji gelir gider grafiği

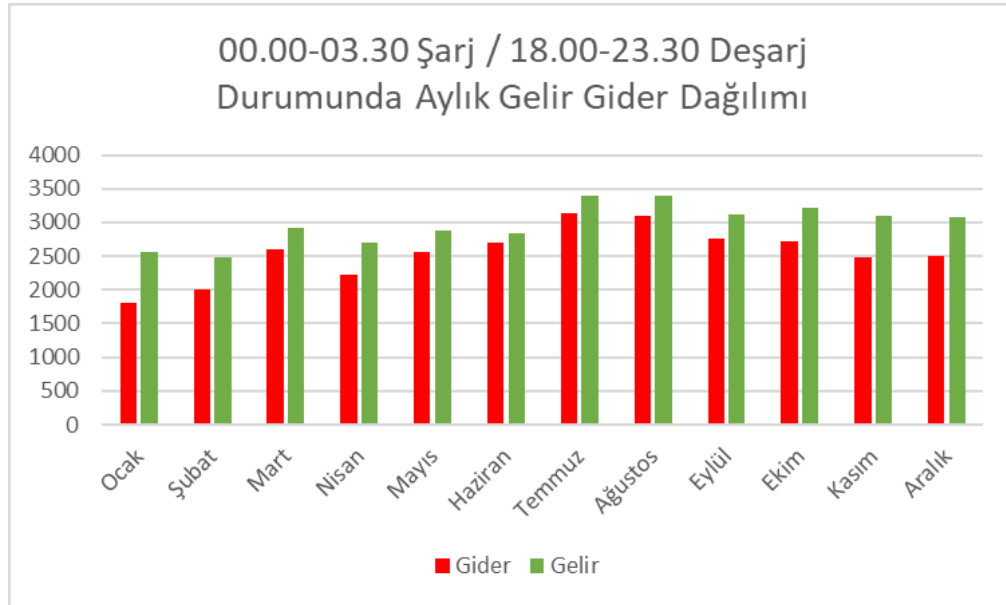
6.1.3.3. Senaryo 3 (00.00-03.30 Şarj / 18.00-23.30 Deşarj)

Senaryo 3 kapsamında değerlendirilen üçüncü yaklaşımda, kullanıcı aracı gece saat 00:00–03:30 arasında şarj etmiş; mesai bitiminin ardından ise 18:00–23:30 saatleri arasında şebekeye enerji aktarımı gerçekleştirmiştir. Bu şarj-deşarj döngüsüne ait yıllık enerji alış ve satış eğilimleri Şekil 6.7’te sunulmakta olup, uygulanan zamanlamanın ekonomik getiri üzerindeki doğrudan etkisi açıkça gözlemlenmiştir. Aynı şekilde, söz konusu zamanlama düzenlemesi sonucunda oluşan yıllık kâr-zarar durumu da grafiksel olarak ilgili şekilde ortaya konmuş; böylece enerji fiyatlarının saatlik dalgalanmasının sistem performansı ve ekonomik kazançlar üzerindeki belirleyici rolü net bir biçimde gösterilmiştir.



Şekil 6.7. Saat 00.00-03.30 Şarj / 18.00-23.30 deşarj döngüsünde yıllık enerji alış satış grafiği

Şekil 6.8’de 00:00–03:30 saatleri arasında şarj ve 18:00–23:30 saatleri arasında deşarj işlemine göre 2024 yılı aylık gelir-gider dağılımı gösterilmektedir. Her ayda gelirin gideri aştığı görülmektedir. Bu durum, enerji fiyatlarının zamanlamayla uyumlu şekilde değerlendirildiğinde kârlı bir şarj-deşarj döngüsünün mümkün olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 6.8. Saat 00.00-03.30 Şarj / 18.00-23.30 deşarj döngüsünde aylık enerji gelir gider grafiği

Bu çalışma kapsamında yapılan yıllık analizler sonucunda, EA kullanıcılarının enerji piyasasında yer alarak ekonomik kazanç elde edebilmesinin yalnızca aktarılan enerji miktarına değil, aynı zamanda bu enerjinin şarj ve deşarj edildiği saat aralıklarının doğru seçilmesine bağlı olduğu ortaya konmuştur.

Özellikle enerji birim fiyatlarının saatlik değişkenlik gösterdiği piyasa koşullarında, gece düşük fiyatlı saatlerde şarj edilen enerjinin, gündüz yüksek fiyatlı saatlerde şebekeye aktarılması senaryoları incelenmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonlar, aynı miktarda enerjiyle işlem yapılmasına rağmen yalnızca satış saatlerindeki değişikliklerle kullanıcıların zarar edebileceği veya kâr elde edebileceğini göstermiştir. Bu bulgular, EA kullanıcılarının V2G sistemlerini etkin kullanabilmesi için yalnızca batarya yönetimini değil, aynı zamanda enerji piyasasındaki fiyat dalgalanmalarını da dikkate alarak stratejik zamanlamalarla işlem yapmalarının gerekliliğini ortaya koymuştur.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, elektrikli araçların (EA) dağıtım şebekesine entegrasyonu ve V2G teknolojisinin uygulanabilirliği teknik ve ekonomik açılardan ele alınmış; gerçek zamanlı şebeke verileri ve piyasa fiyatları ışığında analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada örnek araç olarak Nissan Leaf e+ (ZE1) modeli seçilmiş, bu modelin hem AC hem de DC şarj altyapıları üzerinden şarj ve deşarj işlemleri MATLAB/Simulink ortamında modellenmiştir. Şarj istasyonları ile batarya arasındaki enerji akışı inverter ve güç elektroniği devre elemanları kullanılarak yapılandırılmıştır.

Gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda, 62 kWh kapasiteye sahip olan Nissan Leaf e+ model elektrikli aracın 11 kW gücündeki AC şarj istasyonu aracılığıyla yaklaşık 6 saatte tam doluma ulaşabileceği belirlenmiştir. Simülasyon süresi boyunca aracın batarya doluluk oranının %60'tan %76.95 seviyesine ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu süreçte saatlik ortalama 10.5 kWh enerji depolandığı tespit edilmiştir. Öte yandan, literatürden ve katalog verilerinden elde edilen bilgilere göre, aynı aracın DC şarj altyapısı üzerinden şebekeye enerji geri beslemesi durumunda saatte yaklaşık 7 kWh enerji aktarımı yapılabildiği belirlenmiştir. Böylece V2G teknolojisi kapsamında, elektrikli araçların yalnızca enerji tüketicisi değil aynı zamanda enerji sağlayıcısı olarak da değerlendirilebileceği ortaya konmuştur.

Batman ilinde bulunan ve enerji tüketimi yüksek olan F1 fideri üzerinden elde edilen saatlik, günlük ve aylık tüketim verileri doğrultusunda gerçekleştirilen analizler, mevsimsel ve saatlik değişkenliğin elektrikli araçların şarj ve deşarj senaryoları üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermiştir. Özellikle kış aylarında, ısıtma ihtiyacının artmasına bağlı olarak enerji talebinin yükseldiği; yaz aylarında ise tüketimin daha dengeli bir seyir izlediği belirlenmiştir. 19 Aralık 2024 tarihine ait günlük tüketim verileri, bu tarihin yılın en yüksek tüketim seviyesine ulaşılan günlerden biri olduğunu ortaya koymuştur. Bu doğrultuda, akşam saatlerinde yaşanan pik yüklenmelerin, şebekenin yük dengesini olumsuz etkileyebileceği değerlendirilmiştir.

Şebekenin bu denli yüklendiği saatlerde, EA'ların şarj edilmesi yerine V2G teknolojisi ile enerji geri beslemesi yapılmasının hem şebeke istikrarı hem de sistem güvenliği açısından olumlu katkılar sağlayacağı tespit edilmiştir. Gerçek zamanlı saatlik enerji fiyatlarının analiz edildiği bölümde ise, EPIAŞ tarafından yayımlanan Piyasa Takas Fiyatı (PTF) verileri esas alınarak yapılan maliyet analizinde, düşük fiyatlı gece

saatlerinde aracın şarj edilmesi ve yüksek fiyatlı pik saatlerde şebekeye enerji satılması stratejisinin ekonomik avantaj sağladığı belirlenmiştir. Ancak, örnek senaryoda şarj edilen enerji miktarının satışa sunulan enerjiden fazla olması nedeniyle sistemin net zarar ile kapandığı da göz önünde bulundurulmuştur. Bu durum, sadece zamanlamanın değil, aynı zamanda şarj-deşarj enerji miktarlarının dikkatli planlanmasının da önemli olduğunu göstermektedir.

Elde edilen bulgular doğrultusunda, V2G teknolojisinin hem şebeke yönetimi hem de tüketici açısından fayda sağlayabilmesi için zamanlama temelli akıllı şarj stratejilerinin geliştirilmesi gerekmektedir. EA kullanıcılarının düşük tarifeli saatlerde şarj edilmesini sağlayacak esnek tarife sistemlerinin hayata geçirilmesi, şebeke üzerindeki yükü dengeleyici bir unsur olacaktır. Aynı zamanda, batarya ömrünü olumsuz etkileyebilecek yoğun şarj-deşarj döngülerinin, batarya sağlığını izleyen yazılımlar aracılığıyla optimize edilmesi gerekmektedir. Sistemden elde edilecek ekonomik faydanın artırılması için, EPIAŞ fiyatlarına dayalı dinamik karar sistemlerinin geliştirilmesi önerilmektedir.

Çalışmanın bulguları, elektrikli araçların (EA) V2G (Vehicle-to-Grid) teknolojisi aracılığıyla yalnızca bireysel kullanıcılar için ekonomik kazanç sağlamanın ötesinde, enerji sistemine de önemli katkılar sunabileceğini göstermektedir. Özellikle enerji talebinin yüksek olduğu saatlerde şebekeye enerji aktarımı yapılması durumunda, sistem üzerindeki yük azaltılarak arz-talep dengesi daha etkin şekilde sağlanabilir. Bu kapsamda, EA kullanıcılarının yoğun talep dönemlerinde enerji satışı yapmalarını teşvik edici dinamik tarife sistemlerinin geliştirilmesi önem arz etmektedir. Talep tarafı katılımını destekleyecek şekilde kurgulanacak bu tarifeler, hem kullanıcıların ekonomik faydasını artıracak hem de şebeke stabilitesine katkı sağlayarak enerji sisteminin sürdürülebilirliğine olumlu etki edecektir.

Sonuç olarak, bu çalışma, V2G uygulamalarının sadece teknik olarak değil, ekonomik olarak da dikkatli bir planlama ile kurgulanması gerektiğini ortaya koymaktadır. Elektrikli araçların yalnızca bireysel ulaşım aracı olarak değil, enerji sisteminin aktif bir parçası olarak değerlendirilmesi, sürdürülebilir enerji yönetimi açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda farklı elektrikli araç modelleriyle yapılacak senaryo analizlerinin, sistemin esneklik ve ölçeklenebilirlik boyutlarını ortaya koyacağı düşünülmektedir. Ayrıca, bu teknolojilerin yaygınlaşabilmesi için enerji politikalarının, altyapı yatırımlarının ve teşvik mekanizmalarının bütüncül bir yaklaşımla ele alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- Amer, M., Masri, J., Dababat, A., Sajjad, U., & Hamid, K. (2024). Electric vehicles: Battery technologies, charging standards, AI communications, challenges, and future directions. *Energy Conversion and Management*: X, 24, Article 100751. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100751>
- Çakmak, R., & Turan, A. (2022). Türkiye’de iller bazında elektrikli araç şarj istasyonu altyapısı: Ölçevler aracılığıyla analizi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 246–268.
- Çetin, M. S., & Gençoğlu, M. T. (2023). Elektrikli araçlar ve şarj teknolojileri. Fırat Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü.
- Çimen, M. A. (2010). Elektrikli ve seri hibrit elektrikli araçlarda simülasyon kullanılarak kalıcı mıknatıslı senkron tahrik motoru kontrolü (Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Durmuş, F. S., & Kaymaz, H. (2020). Elektrikli araç şarj yöntemleri. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 3(2), 123–139.
- Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK). (2024). Haziran 2024 şarj hizmeti aylık istatistikleri. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/2-15555/sarj-hizmeti-piyasasi-aylik-istatistikleri->
- EPİAŞ. (2024, Aralık 19). Elektrik piyasası bültenleri. <https://www.epias.com.tr/spot-elektrik-piyasasi/elektrik-piyasasi-bultenler/#jump>
- Gücin, T. N. (2013). Elektrikli araçlar için rüzgar ve güneş enerjisi kullanan hızlı şarj istasyonu tasarlanması ve simülasyonu (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi). POLEN Tez Arşivi. <https://polen.itu.edu.tr/items/4fbf716b-a3cf-4086-8c99-c5a783f68b78>
- Hakam, Y., Gaga, A., & Elhadadi, B. (2024). Exploring the state of electric vehicles: An evidence-based examination of current and future electric vehicle technologies and smart charging stations. *Energy Reports*, 10, 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.04.002>
- IMB Electric. (n.d.). Elektrikli araç şarj istasyonları. İBB Elektrik. <https://imbelec.com/elektrikli-arac-sarj-istasyonlari/>
- International Energy Agency. (2024). Electric car sales, 2012–2024. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electric-car-sales-2012-2024>
- İpek, B. (2022). Elektrikli araçlar, elektrikli araç şarj istasyonları ve Türkiye için gelecek dönem elektrikli araç miktarı tahmini (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi). EMO Arşivi. https://www.emo.org.tr/ekler/029bfbb201f09a0_ek.pdf

- Karapınar, F., & Daldaban, F. (2022). Elektrikli araçların şarj yöntemleri ve şarj istasyon tipleri. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 38(3), 549–556.
- Kerem, A. (2014). Elektrikli araç teknolojisinin gelişimi ve gelecek beklentileri. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(1), 1–13.
- Kircioğlu, O., Çamur, S., Arifoğlu, B., Beşer, E., Ünlü, M., & Beşer, E. K. (2023). Elektrikli araçlarda şarj sistemleri. *Elektrik Mühendisleri Odası*.
- Liu, X., Du, J., Ma, J., Liu, G., & Xiong, Y. (2024). An adaptive co-state design method for PMP-based energy management of plug-in hybrid electric vehicles based on fuzzy logical control. *Journal of Energy Storage*, 102(Part A), Article 114118. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114118>
- Madaram, V. G., Biswas, P. K., Sain, C., Thanikanti, S. B., & Balachandran, P. K. (2024). Advancement of electric vehicle technologies, classification of charging methodologies, and optimization strategies for sustainable development – A comprehensive review. *Heliyon*, 10(1), Article e39299. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39299>
- Nurmuhammed, M., & Karadağ, T. (2021). Elektrikli araç şarj istasyonlarının konumlandırılması ve enerji şebekesi üzerine etkisi konulu derleme çalışması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Bölüm A: Mühendislik ve İnovasyon*, 8(2), 218–233.
- Özbey, B. (2020). Elektrikli araçlar için kablosuz şarj sistemi tasarımı ve optimizasyonu (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi). *POLEN Tez Arşivi*. <https://polen.itu.edu.tr/items/e88021f2-ddbb-4372-90db-0bca820cb511>
- SAE International. (2017). SAE electric vehicle and plug-in hybrid electric vehicle conductive charge coupler (Standard J1772_201710). https://www.sae.org/standards/content/j1772_201710/
- Saraswathi, V. N., & Ramachandran, V. P. (2024). A comprehensive review on charger technologies, types, and charging stations models for electric vehicles. *Heliyon*. (Çevrim içi yayımlanmış, cilt ve sayfa bilgisi eksik)
- Sayın, A. A., & Yüksel, İ. (2011). Elektrikli Renault Fluence aracı, lityum-iyon bataryasının modellenmesi ve batarya yönetimi. *Mühendis ve Makine*, 52(616), 75–82.
- TEHAD. (2024, 7 Ocak). 2023 yılı Türkiye elektrikli otomobil satış rakamları. <https://tehad.org/2024/01/07/2023-yili-turkiye-elektrikli-otomobil-satis-rakamlar/>
- Togun, H., Aljibori, H. S. S., Abed, A. M., Biswas, N., Alshamkhani, M. T., Niyas, H., Muhammed, H. I., Rashid, F. L., Dhabab, J. M., & Paul, D. (2024). Yakıt hücreli hibrit elektrikli aracın yakıt ekonomisini ve performansını iyileştirmeye yönelik son gelişmelerin incelenmesi. *Uluslararası Hidrojen Enerjisi Dergisi*, 89, 22–47. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.09.298>

- Tor, O. B., Teimourzadeh, S., Koc, M., Cebeci, M. E., Akıncı, H., Gemici, O., ... & Saygin, D. (2021). Transport sector transformation: Integrating electric vehicles in Turkey's distribution grids. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 16(11–12), 1026–1047.
- Tuncay, R. N., & Üstün, Ö. (2012). Otomotiv sektör kurulu raporu: Elektrikli araçlarda geçmişten geleceğe bakış.
- Yazıcı, V., & Özdemir, E. (2013, Mayıs 23–24). Elektrikli araç şarj yöntemleri. 5. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli, Türkiye.
- Yılmaz, N. (2024). Elektrikli araçlar için şarj sisteminin tasarımı (Yüksek lisans tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi). ERU Açık Erişim. <https://acikerisim.erbakan.edu.tr/items/02a84650-c534-4b85-a772-33f3f4e88fd1>