

**TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İŞLETME ANA BİLİM DALI**

**OECD ÜLKELERİNİN ELEKTRİKLİ ARAÇ ADAPTASYONUNUN VE
ÇEVRESEL ETKİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMALI ANALİZİ**

SEVGİ EŞİYOK

DOKTORA TEZİ

ADANA / 2025

**TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İŞLETME ANA BİLİM DALI**

**OECD ÜLKELERİNİN ELEKTRİKLİ ARAÇ ADAPTASYONUNUN VE
ÇEVRESEL ETKİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMALI ANALİZİ**

SEVGİ EŞİYOK

Danışman: Doç. Dr. Mert DEMİRCİOĞLU

Jüri Üyesi: Prof. Dr. Mustafa GÖÇKEN

Jüri Üyesi: Doç. Dr. Behiye Gülsün KARAÇAY

Jüri Üyesi: Doç. Dr. Berna BULĞURCU

Jüri Üyesi: Doç. Dr. Ayşe Tuğba DOSDOĞRU

DOKTORA TEZİ

ADANA / 2025

ukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Müdürlüğüne;

Bu alışma, jürimiz tarafından İşletme Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Doç. Dr. Mert DEMİRCİOĞLU
(Danışman)

ye: Prof. Dr. Mustafa GÖÇKEN

ye: Doç. Dr. Behiye Gülsün KARAÇAY

ye: Doç. Dr. Berna BULĞURCU

ye: Doç. Dr. Ayşe Tuğba DOSDOĞRU

ONAY

Yukarıdaki imzaların, adı geçen ğretim elemanlarına ait olduklarını onaylarım.
.../.../2025

Prof. Dr. Hüseyin GÜLER
Enstitü Müdürü

NOT: Bu tezde kullanılan ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, izelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu'ndaki hükümlere tabidir.

ETİK BEYANI

Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim. / / 2025

Sevgi EŞİYOK

ÖZET

OECD ÜLKELERİNİN ELEKTRİKLİ ARAÇ ADAPTASYONUNUN VE ÇEVRESEL ETKİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMALI ANALİZİ

Sevgi EŞİYOK

Doktora Tezi, İşletme Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mert DEMİRCİOĞLU

Aralık 2025, 144 Sayfa

Enerji ve ulaşım alanları, sanayi üretimiyle birlikte günlük yaşamın neredeyse tüm aşamalarını doğrudan etkileyen kritik sektörlerdir. Küresel enerji talebinin büyük ölçüde fosil yakıtlardan karşılanması ve ulaşımdaki geleneksel fosil yakıt bağımlılığı, bu alanları sera gazı salımlarının ve buna bağlı iklim değişikliğinin başlıca kaynakları hâline getirmektedir. Teknolojideki hızlı ilerlemeler bu sektörlerde olan talebi sürekli artırırken ortaya çıkan çevresel kaygılar, ülkeleri yenilenebilir enerji çözümleri ile alternatif enerji teknolojilerine yönelmeye zorlamaktadır.

Bu çalışmada, enerji ve ulaşım sektörlerinin küresel sera gazı emisyonları ve iklim değişikliği üzerindeki etkileri çerçevesinde, OECD üyesi ülkelerin elektrik üretim yapıları, bu üretimin çevresel sonuçları, yenilenebilir enerjiye geçiş düzeyleri ve yeni nesil enerji araçlarını benimseme süreçleri karşılaştırmalı biçimde incelenmektedir. Araştırma kapsamında elde edilen verilerle, Türkiye'nin diğer OECD ülkeleri arasındaki yeri ortaya koyulurken; Türkiye'nin elektrikli araç kullanımı ve yakıt türlerine göre motorlu kara taşıt sayısına ilişkin geleceğe yönelik öngörüler geliştirilmiştir. Benzer performans gösteren ülkelerin gruplandırılması ve ortak özelliklerinin değerlendirilmesi, çevresel hedeflere ulaşmada hangi stratejik adımların öne çıkarılması gerektiğine dair yol gösterici niteliktedir ve çalışmanın özgünlüğünü pekiştirmektedir. Türkiye özelinde ise enerji ve ulaşım sektörlerine yönelik sürdürülebilirlik perspektifinden geleceğe ilişkin analiz ve öneriler sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Yenilenebilir enerji, sürdürülebilir enerji, elektrikli araçlar, sürdürülebilir ulaşım

ABSTRACT**COMPARATIVE ANALYSIS OF ELECTRIC VEHICLE ADAPTATION
AND ENVIRONMENTAL IMPACTS IN OECD COUNTRIES****Sevgi EŞİYOK****Doctoral Thesis, Department of Business Administration****Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mert DEMİRCİOĞLU****December 2025, 144 pages**

The energy and transportation sectors are critical industries that directly impact nearly all aspects of daily life alongside industrial production. The global energy demand being largely met by fossil fuels, coupled with the transportation sector's reliance on conventional fossil fuels, has made these sectors major sources of greenhouse gas emissions and contributors to climate change. Rapid technological advancements continue to increase demand in these sectors, while growing environmental concerns are pushing countries toward renewable energy solutions and alternative energy technologies.

In this study, within the framework of the impacts of the energy and transportation sectors on global greenhouse gas emissions and climate change, OECD member countries' electricity generation structures, the environmental consequences of this generation, their levels of transition to renewable energy, and their processes of adopting next-generation energy vehicles are examined in a comparative manner. Using the collected data, the study also positions Türkiye relative to other OECD countries and develops future projections regarding Türkiye's use of electric vehicles and the number of motor vehicles according to fuel type. Grouping countries with similar performance and evaluating their common characteristics provide guidance on which strategic measures are most critical to achieving environmental goals, thereby enhancing the originality of the study. For Türkiye specifically, future-oriented analyses and recommendations are presented from a sustainability perspective with regard to the energy and transportation sectors.

Keywords: Renewable energy, sustainable energy, electric vehicles, sustainable transportation

ÖN SÖZ

Enerji ve ulaşım sektörü, endüstriyel üretkenliğin ve günlük yaşamın neredeyse her yönünü etkileyen en önemli sektörlerindendir. Dünyanın ihtiyaç duyduğu enerjinin fosil kaynaklardan sağlanması, ulaşımında büyük oranda geleneksel fosil bağımlı yakıtların kullanılması bu sektörleri, küresel emisyonlardan ve emisyonların neden olduğu iklim değişikliğinden büyük ölçüde sorumlu hale getirmektedir. Son teknolojik gelişmelerle enerji ve ulaşım sektörüne olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Sektörlerin endişelendiren çevresel etkileri, dünya çapında ülkeleri yenilenebilir enerji kaynakları ve yeni enerji araçlarına yönlendirmiştir. Bu çalışma ile dünyadaki belirli ülke topluluğunun elektrik enerjisi üretim profili, bu üretimin çevresel etkileri, yenilenebilir enerjiye geçiş düzeyi ve yeni nesil enerji araçlarına adaptasyonları bakımından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Gerçekleşen verilerle Türkiye'nin bu gruplar içindeki konumu ortaya konmuş, gelecek dönemler için tahminler gerçekleştirilmiştir. Ülkelerin mevcut durumlarının birçok analizle ortaya konması, benzer performans gösteren ülkelerin ortak özelliklerinin incelenmesi, ülkelerin çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşabilmesi için hangi noktalara odaklanması gerektiği konusunda yol göstermesi tez çalışmasını özgün hale getirmektedir. Çalışma ile ayrıca Türkiye için enerji ve ulaşım sektörü açısından geleceğe yönelik tahminler gerçekleştirilmiştir.

Bu tez Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiş olup proje araştırma numarası SDK-2024-16782'dir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ	vi
KISALTMALAR	xi
TABLolar LİSTESİ	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiv

BÖLÜM I

GİRİŞ

1.1. Problem.....	1
1.2.Çalışmanın Amacı.....	3
1.3.Çalışmanın Önemi	4
1.4.Sınırlılıklar	5

BÖLÜM II

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Elektrikli Araçlar ve Kümeleme Analizi ile Gerçekleştirilen Çalışmalar	7
2.2. Elektrikli Araçlar ve ÇKKV ile Gerçekleştirilen Çalışmalar	16
2.3. Elektrikli Araç Sayıları Tahmini için Gerçekleştirilen Çalışmalar.....	21
2.4. Elektrikli Araçların Enerji Tüketimi ve CO ₂ Emisyonları Üzerindeki Etkilerini İnceleyen Çalışmalar.....	32

BÖLÜM III

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR VE ÇEVRESEL ETKİLERİ

3.1. Dünyada Ulaşım Sektörü ve Elektrikli Araçların Tarihi Gelişimi	43
3.2. Türkiye’de Ulaşım Sektörü ve Elektrikli Araçların Tarihi Gelişimi	47
3.3. Sürdürülebilir Ulaşım Sektörü için Elektrikli Araçlar	50
3.3.1. Bataryalı Elektrikli Araçlar (BEA)	52

3.3.2. Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (YHEA).....	53
3.3.3. Plug-in Hibrit Elektrikli Araçlar (PHEA).....	54
3.3.4. Hibrit Elektrikli Araçlar (HEA).....	55
3.3.5. Hafif Hibrit Elektrikli Araçlar (HHEA)	56
3.4. Dünya Enerjisinin Mevcut Durumu ve Çevresel Etkileri	58
3.5. Türkiye Enerjisinin Mevcut Durumu ve Çevresel Etkileri	59

BÖLÜM IV

YÖNTEM

4.1. Araştırma Verilerinin Toplanması ve Analizi	61
4.2. Korelasyon Analizi	63
4.3. Kümeleme Analizi	64
4.4. ÇKKV Yöntemleri.....	65
4.4.1. CRITIC Yöntemi	65
4.4.2. COPRAS Yöntemi.....	67
4.5. Tahmin Yöntemleri.....	69
4.5.1. Holt Winters Yöntemi.....	69
4.5.1.1. Çarpımsal Mevsimsel Holt Winters Yöntemi	70
4.5.1.2. Toplamsal Mevsimsel Holt Winters Yöntemi.....	71
4.5.2. ARIMA Yöntemi	72
4.5.3. SARIMA Yöntemi.....	75
4.5.4. Prophet Yöntemi.....	77
4.6. Performans Metrikleri.....	79
4.6.1. Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (MAPE)	79
4.6.2. Kök Ortalama Karesel Hata (RMSE)	80
4.6.3. Ortalama Mutlak Hata (MAE).....	80

BÖLÜM V

BULGULAR

5.1. Kriterlerin Korelasyon Analizi ile Değerlendirilmesi	81
5.2. Kriterlerin CRITIC Yöntemi ile Değerlendirilmesi.....	81
5.3. Ülkelerin Kümelenmesi	84

5.3.1. Ülkelerin Üçlü Kümelenmesi	84
5.3.2. Ülkelerin Dörtlü Kümelenmesi.....	86
5.4. Ülkelerin COPRAS Yöntemi ile Sıralanması	89
5.4.1. Ülkelerin Üçlü Kümeye Göre Sıralanması	89
5.4.2. Ülkelerin Dörtlü Kümeye Göre Sıralanması	93
5.5. OECD Ülkeleri ve Türkiye'nin Elektrikli Araç Sektörü Açısından Değerlendirilmesi	98
5.5.1.Ülkelerin Üçlü Kümelemeye Göre Elektrikli Araç Sektörü Açısından Değerlendirilmesi.....	98
5.5.2.Ülkelerin Dörtlü Kümelenmeye Göre Elektrikli Araç Sektörü Açısından Değerlendirilmesi.....	102
5.6. Türkiye'deki Araç Sektörünün Mevcut Durumu, Gelecek Dönemler için Tahmini ve Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi	108
5.6.1. Türkiye'deki Araç Sektörünün Mevcut Durumu.....	108
5.6.2. Türkiye'nin Gelecek Dönemlerdeki Araç Sayılarının Yakıt türüne Göre Tahmini ve Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi.....	110
5.6.2.1. Benzinli Araç Sayılarının Tahmini ve Çevresel Etkileri.....	111
5.6.2.2. Dizel Araç Sayılarının Tahmini ve Çevresel Etkileri.....	113
5.6.2.3. LPG'li Araç Sayılarının Tahmini ve Çevresel Etkileri	115
5.6.2.4. Hibrit Araç Sayılarının Tahmini ve Çevresel Etkileri.....	117
5.6.2.5. Elektrikli Araç Sayılarının Tahmini ve Çevresel Etkileri	119

BÖLÜM VI

SONUÇ VE ÖNERİLER

KAYNAKÇA	129
----------------	-----

KISALTMALAR

- AB:** Avrupa Birliği
- AHP:** Analytical Hierarchy Process
- ARIMA:** AutoRegressive Integrated Moving Average
- BEA:** Bataryalı Elektrikli Araçlar
- CBS:** Coğrafi Bilgi Sistemleri
- COPRAS:** Complex Proportional Assessment
- CRITIC:** Criteria Importance Through Intercriteria Correlation
- ÇKKV:** Çok Kriterli Karar Verme
- DEMATEL:** The Decision Making Trial and Evaluation Laboratory)
- EA:** Elektrikli Araçlar
- EAŞİ:** Elektrikli Araç Şarj İstasyonu
- GSYİH:** Gayri Safi Yurt İçi Hasıla
- HEA:** Hibrit Elektrikli Araçlar
- HHEA:** Hafif Hibrit Elektrikli Araçlar
- MABAC:** The Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison
- MAE:** Mean Absolute Error
- MAPE:** Mean Absolute Percentage Error
- OECD:** Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü
- PHEA:** Plug-in Hibrit Elektrikli Araçlar
- RMSE:** Root mean square error
- SARIMA:** Seasonal Autoregressive Integrated Moving-Average
- SWARA:** Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis
- TOPSIS:** Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
- TÜBİTAK:** Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
- TÜFE:** Tüketici Fiyat Endeksi
- TÜİK:** Türkiye İstatistik Kurumu
- UEA:** Uluslararası Enerji Ajansı
- YHEA:** Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar

TABLOLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1. Değişkenlerin Korelasyon Analizi.....	81
Tablo 2. 2012 yılı kriterlerinin “CRITIC” ağırlık katsayıları	82
Tablo 3. 2017 yılı kriterlerinin “CRITIC” ağırlık katsayıları	83
Tablo 4. 2022 yılı kriterlerinin “CRITIC” ağırlık katsayıları	84
Tablo 5. Ülkelerin Değişken Ortalamaları (Üçlü Küme).....	86
Tablo 6. Ülkelerin Değişken Ortalamaları (Dörtlü Küme)	89
Tablo 7. Birinci Kümedeki Ülkelerin “COPRAS” Yöntemi ile Sıralanması (Üçlü Küme)	90
Tablo 8. İkinci Kümedeki Ülkelerin “COPRAS” Yöntemi ile Sıralanması (Üçlü Küme)	92
Tablo 9. Üçüncü Kümedeki Ülkelerin “COPRAS” Yöntemi ile Sıralanması (Üçlü Küme)	93
Tablo 10. Birinci Kümedeki Ülkelerin “COPRAS” Yöntemi ile Sıralanması (Dörtlü Küme)	94
Tablo 11. İkinci Kümedeki Ülkelerin “COPRAS” Yöntemi ile Sıralanması (Dörtlü Küme)	96
Tablo 12. Üçüncü Kümedeki Ülkelerin “COPRAS” Yöntemi ile Sıralanması (Dörtlü Küme)	97
Tablo 13. Dördüncü Kümedeki Ülkelerin “COPRAS” Yöntemi ile Sıralanması (Dörtlü Küme)	98
Tablo 14. Yöntemlerin Hata Metrikleri (Benzinli Araç)	111
Tablo 15. Tahmin Edilen Araç Sayıları ve Emisyon Miktarları (Benzinli Araç)	112
Tablo 16. Yöntemlerin Hata Metrikleri (Dizel Araç)	113
Tablo 17. Tahmin Edilen Araç Sayıları ve Emisyon Miktarları (Dizel Araç)	114
Tablo 18. Yöntemlerin Hata Metrikleri (LPG'li Araç)	115
Tablo 19. Tahmin Edilen Araç Sayıları ve Emisyon Miktarları (LPG'li Araç)	116
Tablo 20. Yöntemlerin Hata Metrikleri (Hibrit Araç)	117
Tablo 21. Tahmin Edilen Araç Sayıları ve Emisyon Miktarları (Hibrit Araç)	118
Tablo 22. Yöntemlerin Hata Metrikleri (Elektrikli Araç).....	119
Tablo 23. Tahmin Edilen Araç Sayıları ve Emisyon Miktarları (Elektrikli Araç).....	120
Tablo 24. Dörtlü Kümeleme Karşılaştırması	122

Tablo 25. Dörtlü Küme Sıralama Karşılaştırması.....	123
--	-----

Tablo 26. Yakıt Türlerine Göre Tahmin Edilen Yıllık Araç Sayısı ve CO ₂ Miktarları	126
--	-----

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1. Ülke atıf analizi (kümeleme analizi çalışmaları).....	13
Şekil 2. Kaynak atıf analizi (kümeleme analizi çalışmaları)	14
Şekil 3. Doküman atıf analizi (kümeleme analizi çalışmaları).....	15
Şekil 4. Anahtar sözcük analizi (kümeleme analizi çalışmaları).....	15
Şekil 5. Ülke atıf analizi (ÇKKV çalışmaları).....	19
Şekil 6. Kaynak atıf analizi (ÇKKV çalışmaları)	20
Şekil 7. Doküman atıf analizi (ÇKKV çalışmaları).....	20
Şekil 8. Anahtar sözcük analizi (ÇKKV çalışmaları).....	21
Şekil 9. Ülke atıf analizi (tahmin çalışmaları)	29
Şekil 10. Kaynak atıf analizi (tahmin çalışmaları)	30
Şekil 11. Doküman atıf analizi (tahmin çalışmaları).....	31
Şekil 12. Anahtar sözcük analizi (tahmin çalışmaları)	31
Şekil 13. Ülke atıf analizi (enerji tüketimi ve CO ₂ emisyonuna ilişkin çalışmalar).....	40
Şekil 14. Kaynak atıf analizi (enerji tüketimi ve CO ₂ emisyonuna ilişkin çalışmalar) ..	41
Şekil 15. Doküman atıf analizi (enerji tüketimi ve CO ₂ emisyonuna ilişkin çalışmalar)41	
Şekil 16. Anahtar sözcük analizi (enerji tüketimi ve CO ₂ emisyonuna ilişkin çalışmaları).....	42
Şekil 17. Elektrikli araçların gelişimi	43
Şekil 18. 2021-2025 elektrikli araç sayıları	49
Şekil 19. Elektrikli araçların sınıflandırılması.....	57
Şekil 20. Araştırma metodolojisi	63
Şekil 21. Ülkelerin üçlü kümelenmesi.....	85
Şekil 22. Ülkelerin dördlü kümelenmesi	87
Şekil 23. Birinci küme ülkeleri elektrikli araç satış oranı (üçlü küme)	99
Şekil 24. İkinci küme ülkeleri elektrikli araç satış oranı (üçlü küme).....	101
Şekil 25. Üçüncü küme ülkeleri elektrikli araç satış oranı (üçlü küme).....	102
Şekil 26. Birinci küme ülkeleri elektrikli araç satış oranı (dördlü küme)	103
Şekil 27. İkinci küme ülkeleri elektrikli araç satış oranı (dördlü küme).	104
Şekil 28. Üçüncü küme ülkeleri elektrikli araç satış oranı (dördlü küme).....	106
Şekil 29. Dördüncü küme ülkeleri elektrikli araç satış oranı (dördlü küme)	107
Şekil 30. Yakıt türüne göre araç satış sayıları	108
Şekil 31. Ortalama emisyon değerleri	110

Şekil 32. Tahmin edilen ve gerçekleşen araç sayıları (benzinli araç)	112
Şekil 33. Tahmin edilen ve gerçekleşen araç sayıları (dizel araç).....	114
Şekil 34. Tahmin edilen ve gerçekleşen araç sayıları (LPG'li araç).....	116
Şekil 35. Tahmin edilen ve gerçekleşen araç sayıları (hibrit araç).....	118
Şekil 36. Tahmin edilen ve gerçekleşen araç sayıları (elektrikli araç).....	119
Şekil 37. Kümelerin elektrikli araç satış oranları (dörtlü küme)	125



BÖLÜM I

GİRİŞ

1.1. Problem

Dünya nüfusunun artmasıyla birlikte enerji talebi ve fosil kaynakların tüketimi her geçen gün artmaktadır. Teknolojik gelişmelerle birlikte daha konforlu yaşam standartlarına ulaşmak için insanların enerjiyi ve doğadaki fosil kaynakları tüketim hızı da artmaya devam etmektedir. Artan tüketim ihtiyaçları, ticaretin küresel çapta gelişmesi, ekonomik gelişme ve büyüme, enerji ve fosil yakıt tüketim sorunları yanında ulaşım sorunlarını da beraberinde getirmektedir.

Ulaşım sektörü, insan ihtiyaçlarının karşılanması açısından ekonominin ve işgücünün temel yapı taşı oluşturmaktadır. Ulaşım araçlarının sayısı yıllar geçtikçe sürekli olarak artmakta ve bu da sera gazı emisyonlarında ve özellikle atmosferik CO₂ emisyonunda artışa neden olmaktadır. Bu durum çevre kalitesini olumsuz yönde etkilemekte ve hava kirliliğine neden olmaktadır.

Dünya genelinde ulaşım, büyük oranda fosil yakıtlara bağımlıdır ve sera gazı emisyonlarına neden olmaktadır. Geleneksel içten yanmalı fosil yakıtlı motorların araçlarda kullanılmaya devam edilmesi, ulaştırma sektörünü, özellikle de kara yolu taşımacılığını, çevreyi en fazla kirleten faktörlerden biri haline getirmiştir. Günümüzde kara yolu taşımacılığı sera gazı emisyonlarından büyük ölçüde sorumludur (Gryparis, Papadopoulos, Leligou, & Psomopoulos, 2020, s.475-476).

Artan küresel çevre kirliliğinin ve enerji tasarrufu ile emisyon azaltımının savunulmasının arka planında, temiz enerji ve düşük karbon ekonomisinin geliştirilmesi, otomobil endüstrisinin ana eğilimi haline gelmiştir. Geleneksel araçlarla karşılaştırıldığında, yeni enerji araçları düşük emisyon ve daha az kirlilik gibi avantajlara sahiptir ve bu sebeple yeni enerji araç endüstrisi hızlı bir gelişme aşamasındadır.

Elektrikli araçlar (EA), kara yolu ulaşımının sürdürülebilirliği için umut verici bir seçenektir. Yeni enerji araçlarının birçoğu fosil yakıt tüketmemekte, elektrik enerjisi ile çalışmaktadır. İhtiyaç duyulan elektriğin üretiminde geleneksel yenilenemeyen kaynaklar yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması durumunda EA'lar ile ulaşım, daha çevreci ve sürdürülebilir bir seçenek haline gelecektir.

Türkiye’de kara yolu ulaşım sektöründen kaynaklanan kirletici emisyonlar yıllar içinde büyük miktarda artış göstermiştir. TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu)’ın 2020 yılı sera gazı emisyon envanteri verilerine göre ulaştırmadan kaynaklanan CO₂ emisyonunun %94,9’u kara yolundan kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, kara yolu ulaşım sektöründen kaynaklanan emisyonları azaltmak için yenilikçi, çevreci ve sürdürülebilir ulaşım stratejileri uygulamak çok önemlidir. Kara yolu ulaşım sektörünün sürdürülebilirliği alternatif yenilenebilir kaynaklara ve EA’lara dayanmaktadır.

Türkiye'nin coğrafi konumu, yenilenebilir enerji kaynaklarının çoğunun yaygın kullanımı için çeşitli avantajlara sahiptir. Bu bağlamda yenilenebilir enerji kaynakları, Türkiye'de temiz ve sürdürülebilir enerji gelişimi için en verimli ve etkili çözümler olarak karşımıza çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, Türkiye'nin sürdürülebilir ve bağımsız enerji geleceğine katkısı için çok büyük bir potansiyele sahiptir. Bu kaynaklar, Türkiye'nin çevresel hedeflerine ulaşmasına ve ithal yakıt kaynaklarına olan bağımlılığı azaltarak enerji arzına büyük miktarda katkı sağlamaktadır. Önümüzdeki dönemlerde ulaşım sektöründeki yeni nesil enerji araçlarının oranının artması, bunun için gerekli olan enerji talebinin yenilenebilir kaynaklardan sağlanması ulaşım sektörünün sürdürülebilirliğini artıracaktır.

Bu çalışmada öncelikle Türkiye’nin de içinde bulunduğu 38 OECD ülkesinin, TÜFE (Tüketici Fiyat Endeksi), yıllık CO₂ emisyonları, GSYİH (Gayri Safi Yurt İçi Hasıla) için satın alma gücü pariteleri, yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretiminin payı, kişi başı GSYİH, birincil enerji tüketimi (Twh), elektrik üretimi (Twh), yıllık sıcaklık anomalisi ve elektrik üretiminin karbon yoğunluğu gibi kriterlerle performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Belirlenen kriterlerin ağırlıkları, ÇKKV (Çok Kriterli Karar Verme) yöntemlerinden CRITIC (CRiteria Importance Through Intercriteria Correlation) yöntemi ile belirlenmiştir. Kriter ağırlıklarının belirlenmesi 2012, 2017 ve 2022 yılları için gerçekleştirilmiştir. Ayrıca 9 kriterin birbiri ile ilişkisinin test edilmesi için korelasyon analizi gerçekleştirilmiş ve birbiri ile ilişkili olan değişkenler analize dahil edilmemiştir. Korelasyon analizi sonucunda ve CRITIC yönteminde ağırlıkları da yüksek belirlenen 5 kriter belirlenmiştir. Yıllık CO₂ emisyonları (kişi başı), GSYİH (kişi başı), elektrik üretimi (Twh), yıllık sıcaklık anomalisi ve elektrik üretiminin karbon yoğunluğu kriterleri ile gerçekleştirilen kümeleme analizi ile birbirine yakın performans sergileyen ülkelerin göstergeleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Kümeleme analizi ile performanslarına göre üçlü ve dörtlü gruplara ayrılan ülkeler, kendi grupları içerisinde COPRAS (COMplex PROportional ASsessment) yöntemi ile sıralanmış ve belirlenen

sıralamalar değerlendirilmiştir. Çalışmanın ilerleyen bölümünde OECD ülkelerinin EA'lara adaptasyonunu değerlendirmek amacıyla ülkelerin EA satış oranları, yer aldıkları grup içerisinde değerlendirilmiş ve kıyaslanmıştır. Araştırmanın son bölümünde Türkiye'nin mevcut durumda kullanılan yakıt türlerine göre değişen motorlu kara taşıt sayılarından hareketle gelecek dönemler için tahminler gerçekleştirilmiştir. Tahmin edilen değerlere bağlı olarak yakıt türlerine göre değişen, kara yolu taşıtlarından kaynaklı, CO₂ emisyon miktarları incelenmiş ve yorumlanmıştır. Ulaşımda kullanılacak tahmini EA'lar için gerekli olan enerji talebinin yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesinin çevre ve sürdürülebilir bir gelecek açısından ne gibi yararlar sağlayacağı tartışılmış ve değerlendirilmiştir.

1.2. Çalışmanın Amacı

Küresel toplum, kara yolu taşımacılığına bağımlıdır ve kalkınma eğilimleri, önümüzdeki yıllarda kara yolu taşımacılığında önemli bir büyüme öngörülmektedir. Hafif ticari araçlar küresel enerji kullanımının ve sera gazı emisyonlarının yaklaşık %10'unu oluşturmaktadır. Ayrıca araç sayılarındaki artış, iklim değişikliği ve kentsel hava kalitesi üzerindeki etkilerinin yanı sıra ilgili enerji güvenliği endişeleriyle birlikte benzin ve dizel taleplerinde de dramatik bir artışa neden olmaktadır. Elektrikli yeni nesil araçlar küresel çapta, mevcut ulaşım alternatifleri arasında güçlü bir aday olarak görülmektedir. Avrupa Birliği (AB), Amerika Birleşik Devletleri (ABD) ve daha birçok ülke, EA'ların teşviki için farklı düzeylerde planlar ve stratejiler düzenlemiştir (Hawkins, Singh, Majeau-Bettez, & Strømman, 2013, s.53-54).

Sağladığı birçok çevresel ve ekonomik faydalar nedeniyle son dönemlerde elektrikli yeni nesil araçlara talep, tüm dünya ülkelerinde artış eğilimindedir. Bu çalışmada;

-Türkiye'nin de içinde bulunduğu OECD'ye bağlı 38 ülke, ekonomik durumu, elektrik enerjisi faaliyetleri, elektrik enerjisi faaliyetlerinin yarattığı çevresel etkiler ve yenilenebilir enerji kaynaklarına adaptasyonu açısından hangi seviyededir? Performans açısından birbirine yakın ülkeler hangileridir? Türkiye, bu alanlarda OECD ülkeleri içerisinde hangi konumdadır?

-Performans açısından birbirine yakın ülkeler, yeni nesil enerji kaynaklarının teşvikleri ve yeni enerji araçlarını kullanım potansiyelleri açısından hangi seviyededir? Türkiye bu adaptasyonda ne konumdadır?

-Türkiye’de geçmiş dönemlerde ve mevcut durumda yakıt türlerine bağlı kullanılan motorlu kara taşıtları ne durumdadır?

-Gelecek dönemlerde Türkiye’de ulaşım sektöründeki içten yanmalı araç miktarları ve EA miktarı ne olacaktır?

-Gelecekteki içten yanmalı araçların yarattığı CO₂ emisyon miktarı ve EA’ların kullanacağı elektriğin üretiminden kaynaklı CO₂ emisyon miktarı ne olacaktır?

-Gerekli elektriğin üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı CO₂ emisyon miktarını nasıl etkileyecektir?

gibi sorulara cevap aranmaya çalışılacaktır.

1.3. Çalışmanın Önemi

Dünya nüfusunun hızla artması beraberinde, dünyada tüketim hızının artması ve dünya kaynaklarının bilinçsizce kullanılması sorununu getirmiştir. Bu sorun, tüm dünya ülkeleri açısından çözülmesi zor bir problem haline gelmiştir. Doğal kaynakların bilinçsiz kullanımındaki artışın getirdiği en büyük olumsuzlukların başında çevre sorunları gelmektedir. Çevre sorunlarının çözümü için dünya çapında birçok örgüt ve kuruluş çalışmalarında bulunmaktadır. Avrupa Komisyonu, 2030 yılına kadar sera gazı emisyonlarını en az %55 oranında azaltmayı hedeflemektedir ve bu hedef, Avrupa'yı 2050 yılına kadar iklim açısından nötr olma yolunda sorumlu bir yola sokmaktadır. Ulaşım sektörü, dünya genelinde çevre kirliliği ve sera gazı emisyon miktarı açısından önemli bir faktördür. 2050 yılına kadar iklim nötrlüğüne ulaşabilmek için ulaşım emisyonlarında en az yüzde 90 düşüş gerekmektedir (Neshat, Kaya, & Ghaboulia Zare, 2023, s.1-2). Avrupa Komisyonu’na göre, AB'nin fosil yakıtlara olan bağımlılığının azaltılması, 2030 yılına kadar en az 30 milyon sıfır emisyonlu aracın yollara koyulmasını gerektirecektir.

Artan çevresel kaygılar, otomotiv endüstrisinde kirletici ve küresel ısınma emisyonlarını azaltmaya yönelik teknolojik gelişmeleri de hızlandırmıştır. Çünkü ulaştırma sektöründe yoğun olarak kullanılan içten yanmalı motorlarla çalışan araçlar, önemli bir kirletici ve sera gazı kaynağıdır (Baran & Legey, 2013, s.907-908). Uluslararası Enerji Ajansı (UEA)’na göre 2020 yılında ulaştırma sektörünün enerji ihtiyacının %90'ı petrol ürünleri yoluyla sağlanmıştır ve bu da ulaşım sektörünü sera gazı emisyonlarına en fazla katkıda bulunan sektörlerden biri haline getirmiştir.

Dünya CO₂ emisyonundan büyük ölçüde sorumlu olan geleneksel araçlara en büyük alternatif, yeni enerji araçları görülmektedir. İklim değişikliğinin azaltılmasına yönelik belirli hedefler doğrultusunda hareket eden dünya çapındaki hükümetler, EA'ların benimsenmesini artırmak için çeşitli hedefler belirlemiştir. Dünya EA endüstrisi, son dönemlerde hızlandırılmış bir gelişmenin yeni bir aşamasına girmiştir. Pek çok ülke, EA sektörünü geliştirmek için birçok politika ve önlemler almaktadır. Japon hükümeti, EA'ların geliştirilmesini "düşük karbon devrimi"nin temel içeriği olarak ele almakta ve EA'lar da dahil olmak üzere "yeni nesil otomobillerin" kullanım miktarını artırmaya çalışmaktadır. Almanya Federal Konseyi 2016 yılında, fosil yakıtlarla çalışan içten yanmalı motorlu araçların 2030'dan itibaren yasaklanmasına ilişkin bir kararı onaylamıştır. Almanya'nın 2050 yılına kadar %95'lik bir karbon azaltma hedefi vardır ve bu da muhtemelen önemli düzeyde araç elektrifikasyonu gerektirmektedir (de Souza vd., 2018, s.446). ABD, EA'ların ulusal stratejinin önemli bir parçası olarak kabul edildiği Yeşil Yeni Düzen'i hayata geçirmiştir (Peng, Yu, Wang, & Yang, 2015, s.366). Bu bağlamda, küresel ve yerel emisyon azaltımına olan katkıları ve ayrıca hükümetlerin hızlandırıcı önlemleriyle EA'ların benimsenme oranının son yıllarda artması beklenmektedir.

EA'ların sağladığı yararların yanında, kullanımıyla ilgili çevresel tartışmalar hâlâ mevcuttur. Çünkü otomobillerden kaynaklanan emisyonların azaltılmasının ardından enerji üretimindeki emisyonların artması da söz konusu olabilmektedir. UEA'ya göre, dünyadaki CO₂ emisyonlarının %42'si elektrikten ve yakıtın yanmasından kaynaklanan ısı üretiminden kaynaklanmaktadır ve dünya elektriğinin %40'ı bu süreçle üretilmektedir (Teixeira & Sodré, 2018, s.376). EA kullanımının yaygınlaşmasının CO₂ emisyon değerlerindeki olumlu azalmaların yanında, elektrik talebinin artışından kaynaklı CO₂ emisyonlarında artışa neden olabilmektedir. Bu noktada gerekli elektriğin yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi son derece önemli hale gelmektedir.

1.4. Sınırlılıklar

Verilere ulaşım zorluğundan verilerin zaman aralığı ulaşılabilen dönemleri kapsamaktadır. Çalışmada kümeleme analizi yapılacağından veriler belirli bir ülke topluluğundan seçilmiştir. Ancak belirlenecek kriterler baz alınarak Türkiye'nin de içerisinde bulunduğu OECD ülkelerinin verilerine ulaşılabilirdiği için bu ülkeler ele

alınmıştır. Gerekli verilerine ulaşamadığı için OECD ülkelerinden Kosta Rika analize dahil edilememiştir.



BÖLÜM II

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

İklim bilimcileri, atmosferdeki CO₂ konsantrasyonunun geçtiğimiz yüzyılda sanayi öncesi döneme kıyasla önemli ölçüde arttığını gözlemlemiştir. Günümüzde kara yolu taşımacılığı, küresel CO₂ emisyonlarındaki bu artışın önemli bir payından sorumlu olarak görülmektedir. Bunun temel nedeni petrol bazlı yakıtlara olan bağımlılıktır (de Souza vd., 2018, s.444). Elektrikli güç aktarma organları, geleneksel içten yanmalı araçlara karşı baskın bir temiz yakıt alternatifi olarak dünya çapında popülerlik kazanmaya devam etmektedir (Heidrich vd., 2017, s.17-18).

Artan çevresel endişeler, tüm dünya ülkelerini ulaştırmadan kaynaklı çevre kirliliklerine ilişkin farklı alternatif senaryoları değerlendirmeye itmiştir. Ülkeler, karar vericiler ve yöneticiler, ulaştırma sektöründen kaynaklı çevresel kirliliğe yoğunlaşmış ve son dönemlerde akademik çevrede de bu alandaki çalışmalar artmıştır. Çalışma kapsamında ilgili konu ile ilgili literatür araştırması 4 ana başlıkta toplanmıştır. Ele alınan ülke performanslarının değerlendirilmesi için bir veri madenciliği algoritması olan kümeleme analizinden yararlanılmıştır. İlk bölümde literatürde ilgili alanda kümeleme analizinden yararlanılan çalışmalar değerlendirilmiştir. Araştırmada ülkelerin ekonomik durumu, elektrik enerjisi faaliyetleri, elektrik enerjisi faaliyetlerinin yarattığı çevresel etkiler ve yenilenebilir enerji kaynaklarına adaptasyonunu değerlendirmek amacıyla ÇKKV yöntemlerinden yararlanılmıştır. Literatür araştırmasının ikinci bölümünde EA'ların ÇKKV yöntemleri ile ele alındığı çalışmalar değerlendirilmiştir. Ulaştırma sektörünün yarattığı CO₂ emisyon miktarı ve enerji tüketim talebi incelenirken araç sayıları için tahmin çalışması gerçekleştirilmiştir. Literatür araştırmasının üçüncü bölümü, araç sayısı tahmini için gerçekleştirilen çalışmalara ayrılmıştır. Çalışmada son olarak önümüzdeki dönemlerde araç sayılarındaki değişimlerin yaratacağı, CO₂ emisyon miktarı ve elektrik tüketim değerlerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bu sebeple literatür araştırmasındaki son bölüm, araçların enerji tüketimi ve CO₂ emisyonları üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalara ayrılmıştır.

2.1. Elektrikli Araçlar ve Kümeleme Analizi ile Gerçekleştirilen Çalışmalar

Veri biliminin yükselişiyle birlikte veriler, bilgi çağında değerli bir varlık haline gelmiştir. Veri madenciliği, çok sayıda veriden gizli ve potansiyel olarak yararlı bilgilerin

çıkarılması işlemidir. Yeni enerji otomobil işletmelerinin ve ülkelerin, üretim ve işletme faaliyetlerine daha bilimsel rehberlik sağlamak, ilgili karar modelini oluşturmak ve karar desteği sağlamak için büyük verilerin analizini yaygınlaştırmalıdır (Long & Liu, 2021, s.1019). Kümeleme analizi, yaygın kullanılan bir veri madenciliği algoritmasıdır. İlk bölümde literatürde kümeleme analizi ile ele alınan çalışmalar değerlendirilmiştir.

Kucukvar vd. (2022) 27 Avrupa ülkesinde akülü EA'ların çevresel verimliliğine ilişkin ampirik bir analiz sunmayı amaçlamışlardır. Çevresel verimliliği hesaplamak için girdi odaklı veri zarflama analizinin kullanıldığı çalışmada ülkeler çevresel verimlilik performanslarına göre kümelenmiştir.

Esteves, Alonso-Martínez, & De Haro (2021) İspanyol vatandaşlarından oluşan geniş ölçekli bir örnekleme temel alan çalışmalarında potansiyel EA alıcıların demografik özelliklerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamak için kümeleme analizini kullanmışlardır. Özellikle otomotiv endüstrisindeki yöneticiler, politika yapıcılar ve sürdürülebilirlik stratejistlerine yol göstermesi adına farklı sosyo-demografik özelliklere sahip dört tür EA potansiyel alıcısı belirlenmiştir.

Kutty, Al-Jondob, Abdella, & El-Mekkawy (2021) EA verimliliğini, 28 AB üye ülkesi için su tüketimi, sera gazı emisyonları, enerji tüketimi ve GSYİH'ya katkıları çerçevesinde değerlendirmişlerdir. Verimlilik puanlarının hesaplanmasında girdi odaklı VZA modelinden yararlanılmıştır. Daha sonra 28 ülke performans değerlerine göre K-ortalamlar kümeleme algoritması ile yüksek, orta ve düşük verimli olarak gruplandırılmıştır. Çalışma sonucuna göre toplam verimlilik puanları, güneş enerjisi kullanımının karma kaynaklı enerji kaynaklarına göre daha verimli olduğunu göstermiştir.

Jahangir vd. (2020) EA'ların talebindeki belirsizliği gidermek için, PHEA (plug-in hibrit elektrikli araç) sahiplerinin seyahat özelliklerini dikkate alan derin öğrenmeye dayalı bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Öncelikle PHEA sahipleri farklı parametrelere göre K-ortalamlar yöntemi ile 5 farklı kümeye ayrılmıştır. Önerilen yöntem, kalkış zamanı, varış zamanı ve seyahat mesafesi gibi PHEA seyahat parametreleri arasındaki korelasyonun gözlemlenmesine olanak sağlar. Önerilen yöntemin etkinliğini doğrulamak için, PHEA talebinin kesin tahmininin, Kaliforniya Bağımsız Sistem Operatörü pazarının enerji piyasasındaki mali karı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sayısal sonuçlar, önerilen derin öğrenmeye dayalı yöntemin, Monte Carlo, Quasi-Monte Carlo ve Copula gibi bu alandaki kıyaslama yaklaşımlarına kıyasla PHEA talebini tahmin etmede daha iyi performansa sahip olduğunu göstermiştir.

Mukherjee & Ryan (2020) İrlanda’da EA’ların benimseme oranlarını etkileyen faktörleri analiz etmişlerdir. Analizde İrlanda’nın çeşitli sosyo-demografik ve mekansal değişkenleri ayrıntılı bir ölçekte birleştirilmiştir. Analiz sonucu, İrlandalı BEA (bataryalı elektrikli araç) sahiplerinin en yüksek nüfus yoğunluğuna sahip ana kent merkezleri etrafında kümelenme eğiliminde olduklarını göstermiştir.

Noel, Zarazua de Rubens, Kester, & Sovacool (2020) ulaşımdaki elektrifikasyonun önündeki engelleri belirlemek için Danimarka, Finlandiya, İzlanda, Norveç ve İsveç’teki on yedi şehirde 201 kurumdan ulaşım ve elektrik uzmanlarıyla 227 görüşme gerçekleştirmişlerdir. Niteliksel sonuçlar ve bunun sonucunda ortaya çıkan kümeleme analizi, son yıllardaki teknolojik gelişmelere rağmen menzil, fiyat ve şarj altyapısı gibi ortak engellerin devam ettiğini göstermiştir. Aynı zamanda sonuçlar, engellerin birbiriyle yüksek düzeyde bağlantılı olduğunu ve genellikle tüketici bilgi ve deneyimiyle bağlantılı olduğunu da göstermiştir.

Al-Ogaili vd. (2019) gerçek verileri kullanarak EA kontrol şarj stratejilerini kapsamlı bir şekilde gözden geçirmişlerdir. Araştırmada, EA kontrol ücretlendirme stratejileri planlama, kümeleme ve tahmin stratejileri kullanılarak sınıflandırılmıştır. Günlük EA şarj talebinin analizi, ilgili profilleri aynı alt gruplara bölmek için kümeleme stratejilerinin uygulanmasını ve böylece en tipik yük profillerinin ortaya çıkarılmasını içermektedir. EA şarjında kullanılan teknikleri karşılaştırmak ve değerlendirmek için EA kontrol şarj stratejileri modelleri vurgulanmış ve uygulanan farklı yöntemlerin avantaj ve dezavantajları belirlenmiştir. Çalışma sonucunda yeni nesil akıllı şebeke uygulamalarında EA şarj kontrolünün geliştirilmesinde birçok faktöre ve zorluğa işaret edilmiş ve potansiyel öneriler sunulmuştur.

Aloqaily, Otoum, Ridhawi, & Jararweh (2019) akıllı şehirlerde paylaşılan kişisel bilgilerin güvenlik sorunları ile ilgili endişeleri azaltma amacıyla bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada akıllı bağlantılı araçlar için güvenlik saldırılarına karşı bir saldırı tespit mekanizması sağlayan, kullanıcıların hizmet kalitesi ve deneyim kalitesi gereksinimlerini karşılayan hizmetler sunan otomatik, güvenli ve sürekli bir bulut hizmeti kullanılabilirliği sunulmuştur. Araştırmanın çözümü, sırasıyla veri azaltma, sınıflandırma ve karar ağacı makine öğrenimi mekanizmalarını benimser. Çerçeve, saldırı tespiti açısından çözümün etkinliğini göstermek için simülasyonlar aracılığıyla doğrulanmıştır. Önerilen çözüm, %99,92 tespit oranı ve %0,96 yanlış pozitif ve %1,53 yanlış negatif oranıyla %99,43 genel doğruluk elde etmiştir.

De Quevedo, Munoz-Delgado, & Contreras (2019) yenilenebilir enerji kaynakları, enerji depolama sistemleri ve EA şarj istasyonlarına yapılan yatırımların ortaklaşa değerlendirildiği planlama modeli sunmuşlardır. EA'ların şarj talebi, seyahat modellerine dayalı bir araç modeli kullanılarak değerlendirilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları ve talep ile ilgili değişkenlik için bir dizi senaryo geliştirilmiştir. Senaryolar, belirsizlik kaynaklarının bilgilerindeki korelasyonun korunmasını sağlayan K-ortalamalar kümeleme tekniği ile üretilmiştir. İlgili senaryolar, deterministik karma tamsayılı doğrusal bir program olarak formüle edilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Li, Zhang, Peng, Wang, & Wang (2019) EA kullanıcıların araçlarını nasıl kullandıklarını tanımlayarak kullanıcıların alışkanlıklarını değerlendirmişlerdir. Bu modellerin aracın enerji tüketimi üzerinde olumlu etkileri olduğu gözlemlenmiştir. EA'ların sürüş şekillerini belirlemek için iki seviyeli bir kümeleme modeli önerilmiştir. 1 Eylül 2015'ten 1 Eylül 2016'ya kadar Çin'deki 1463 elektrikli aracın verileri toplanmıştır. Kümelerin özellikleri çıkarılarak çok yönlü sürüş biçimlerinin coğrafi dağılım analizi yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, EA'ların birçok sürüş şeklinin olduğunu ortaya koymuştur.

Crozier, Apostolopoulou, & McCulloch (2018) tipik geleneksel araç kullanım profillerini belirlemek için İngiltere'deki seyahat anketi verilerini kullanarak kümeleme analizi gerçekleştirmişlerdir. Ulusal Seyahat Araştırması'ndan elde edilen araç kullanım profillerinin belirlenmesi için K-Ortalamalar algoritması kullanılmıştır. Analiz sonucunda beş küme belirlenmiş ve mevcut elektrikli filo davranışını, geleneksel olanla karşılaştırmak için EA veri seti kullanılmıştır.

Lv vd. (2018) EA'larda gelişmiş kontrol ve enerji yönetimi açısından sürücünün frenleme yoğunluğunu değerlendirmişlerdir. Frenleme yoğunluğu, yeni hibrit denetimsiz ve denetimli öğrenme yöntemlerine dayalı olarak üç seviyeye göre sınıflandırılmıştır. İlk olarak, frenleme olaylarını fren basıncıyla otomatik olarak kümelemek için denetimsiz bir Gauss karışım modeli kullanılmıştır. Daha sonra rastgele orman modeli ile aracın ve güç aktarım sisteminin durum sinyalleri, doğru frenleme yoğunluğu seviyelerini sınıflandırmak için eğitilmiştir. Daha verimli bir sınıflandırıcı elde etmek için kritik özellikler analiz edilmiştir. Ayrıca araç durumlarının önceden belirlenen özelliklerini kullanarak fren yoğunluğunun kantitatif analizi ve tanınması için yapay sinir ağlarına dayalı yeni bir sürekli gözlem yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemlerin sınıflandırma ve regresyon sonuçları değerlendirilip tartışılmıştır.

Muratori (2018) ABD'deki konutların güç talebi profilini oluşturmak için bir modelleme geliştirmiştir. Kullanıcılar, şarj için harcadıkları enerji miktarına göre iki gruba ayrılmış ve çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir. Hanehalkı üyelerinin davranışları, ABD Çalışma İstatistikleri Bürosu tarafından toplanan zaman kullanımı verileri kullanılarak kalibre edilen bir Markov süreci kullanılarak simüle edilmiştir. Çalışmanın verileri, 502 birey ve 348 binek araçtan oluşan, Konut Enerji Tüketimi Araştırması'nda yer alan konut birimlerinin temsili bir örneğinden alınmıştır. Çalışma sonucunda alternatif yakıtlı araçların benimsenmesi, bireysel müşterilerin hanenin konumu ile ilişkili farklı araçları satın alma kararını etkileyen sosyo-ekonomik ve davranışsal faktörler tarafından yönlendirilen önemli kümelenme etkileriyle karakterize edildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Priessner, Sposato, & Hampl (2018) Avusturya vatandaşlarına yönelik temsili bir anketten yararlanarak EA'ları kullananları analiz etmişlerdir. Kümeleme analizini kullanan bu çalışmada, EA satın alma ve satın alma dışı motivasyonlara ilişkin değerlendirmelerine dayalı olarak potansiyel elektrikli aracı benimseyenlerden oluşan dört grup tanımlanmıştır. Araştırma sonucunda grupların sosyo-demografik ve psikolojik özelliklerinin yanı sıra politika teşviklerine ilişkin tercihleri bakımından da önemli ölçüde farklılık gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Boyacı, Zografos, & Geroliminis (2017) araç paylaşımında araç ve personelin yer değiştirmesine yönelik operasyonel kararları optimize etmek için entegre çok amaçlı karma tamsayılı doğrusal programlama optimizasyonu ve ayrık olay simülasyon çerçevesi geliştirmişlerdir. Operasyonel problemin boyutunu bölümleyebilmek adına kümeleme algoritmasından yararlanılmıştır. Optimizasyon çerçevesi istasyon kümelemesi, operasyon optimizasyonu ve personel akışı olmak üzere 3 kısımdan oluşmaktadır. Önerilen model, Fransa'nın Nice şehrinde faaliyet gösteren gerçek dünya sisteminden elde edilen verileri kullanarak uygulanmıştır ve sonuçlar yorumlanmıştır.

Chen vd. (2017) PV destekli EA şarj istasyonu için gerçek zamanlı fiyat bazlı bir otomatik talep yanıt stratejisi önermişlerdir. Şarj süreci, hem küresel hem de gerçek zamanlı optimizasyonun avantajlarını yakalamak için dinamik bir doğrusal program olarak modellenmiştir. Geleneksel fiyat tahmin algoritmalarından farklı olarak, belirli bir güne ait, kümeleme algoritmasına dayalı dinamik bir model önerilmiştir. Geçmiş fiyat verilerinin ele alınmasında bulanık K-ortalamlar kümeleme algoritması ile K-ortalamlar kümeleme algoritması arasında karşılaştırmalı bir çalışma yapılmıştır. Önerilen modelin elektrik maliyetlerini azaltma, azami şarj talebini azaltma ve tüketim

miktarlarındaki iyileştirme konusundaki geçerliliği, simülasyon senaryoları aracılığıyla doğrulanmıştır.

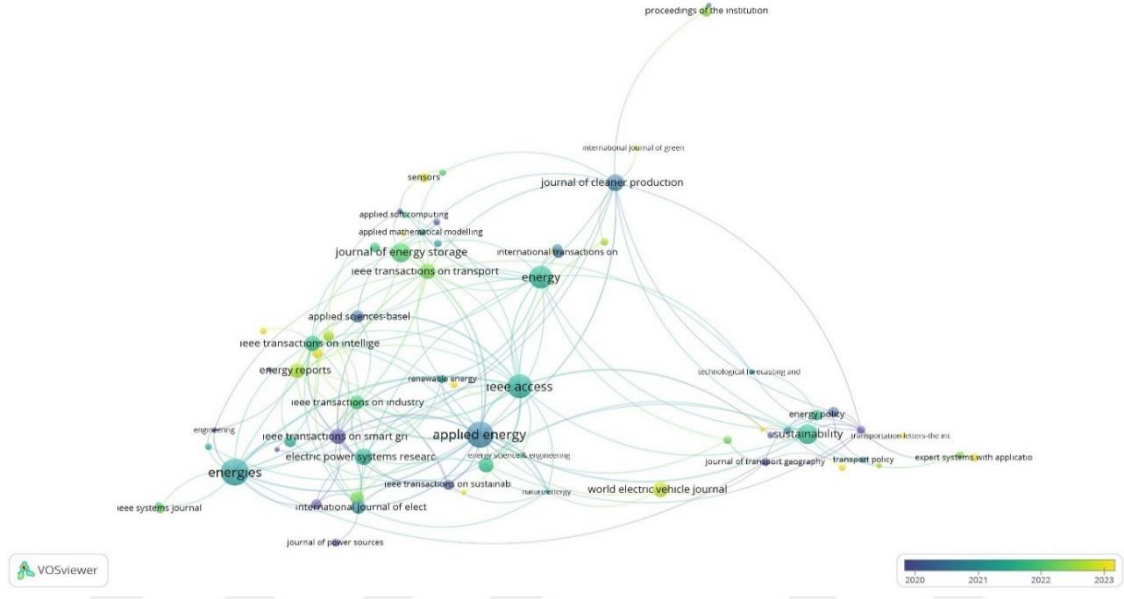
W. Wang, Xi, Chong, & Li (2017) sürüş tarzlarını modellemek, sınıflandırmak ve anlamak için yarı denetimli bir destek vektör makinesi yöntemi geliştirmişlerdir. İlk olarak, birkaç veri kümesi seçilmiş ve K-ortalamlar kümeleme yöntemi ile manuel olarak etiketlenmiştir. Tüm eğitim verilerine en uygun etiketi atamak için popüler algoritmalarından olan Newton algoritmasından yararlanılmıştır. Son olarak, farklı miktarlardaki etiketli verilerden sürüş stillerini sınıflandırmak için S3VM yöntemi bir destek vektör makinesi yöntemiyle karşılaştırılmıştır.

Arias & Bae (2016) büyük veri teknolojilerine dayalı olarak EA şarj talebini tahmin etmek için bir tahmin modeli sunmuşlardır. Tahmin modelini formüle etmek için Güney Kore'nin geçmiş trafik verileri ve hava durumu verileri kullanılmıştır. Tahmin için öncelikle trafik modellerini sınıflandırmak için bir kümeleme analizi gerçekleştirilmiştir. Etkili faktörleri belirlemek için ilişkisel analizden yararlanılmış ve sınıflandırma kriterlerini oluşturmak için karar ağacı oluşturulmuştur. Önerilen EA şarj talep modelinin, EA'ların şarj edilmesinin güç sistemi üzerindeki etkisine ilişkin araştırmaya temel oluşturabileceği savunulmuştur.

Hu, Li, & Yang (2016) EA'larda güvenilir pil yönetimini gerçekleştirmek için, makine öğrenimi metodolojisi aracılığıyla bir şarj durumu tahmincisi geliştirmişlerdir. EA'larda kullanılan bir lityum iyon pil modülü için yeni makine öğrenmesi özellikli SOC tahmincisi oluşturulan çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk adımda, çıkarımlı kümeleme ve doğrudan arama algoritmasının dahil edildiği genetik bulanık kümeleme tekniği kullanılmıştır. İkinci adımda, ilk adım sonuçlarına göre geri yayılım öğrenme algoritması ile eş zamanlı bir optimizasyon gerçekleştirilmiştir. K-ortalamlar kümeleme tekniği, örneklenen batarya test verilerini bölmek için kullanılmıştır. Sübjektif yargının olumsuz etkilerini azaltmak veya ortadan kaldırmak amacıyla kümeleme alternatifleri tercih edilmiştir.

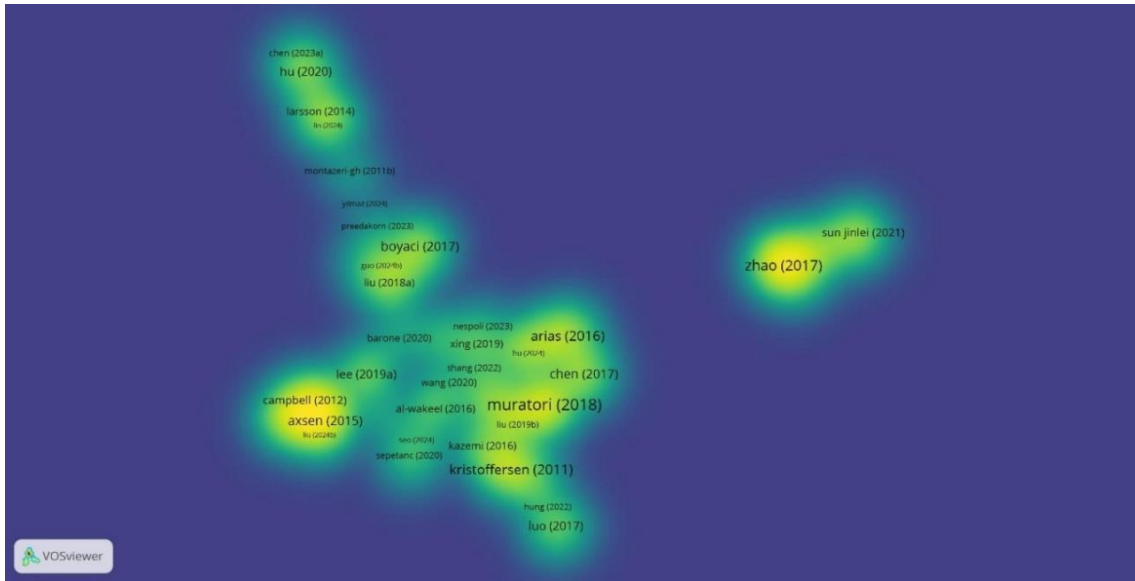
Axsen, Bailey, & Castro (2015) fişli hibritler ve EA'lar dahil olmak üzere, fişli EA'lara ilişkin tercihleri analiz eden bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. 2013 yılında Kanada'da yeni araç satın alan 1754 haneden toplanan anket verileri kullanılarak katılımcılar kümelerine ayrılmıştır. Belirlenen kümelerin genel tercihleri, oldukça benzer çıkmıştır. Ancak tercihlerin, yaşam tarzlarına ve çevresel kaygılara göre önemli ölçüde farklılık gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

EA’lar ve kümeleme analizi alanında yapılan çalışmaların kaynakları arasındaki ilişki ağ haritası Şekil 2’de gösterilmiştir. Görsel üzerindeki veriler seçilirken atıf sayısı “2” ve üzerindeki dokümanlar seçilmiştir. Şekildeki 67 kaynağın 11 kümeye ayrıldığı gözlemlenmiştir. Energies, Applied Energy ve IEEE Access dergileri EA’ların kümeleme analizi ile değerlendirildiği çalışmalar alanında en temel, World Electric Vehicle Journal, Sensors, Frontiers in Energy Research gibi dergiler en güncel kaynaklardır.



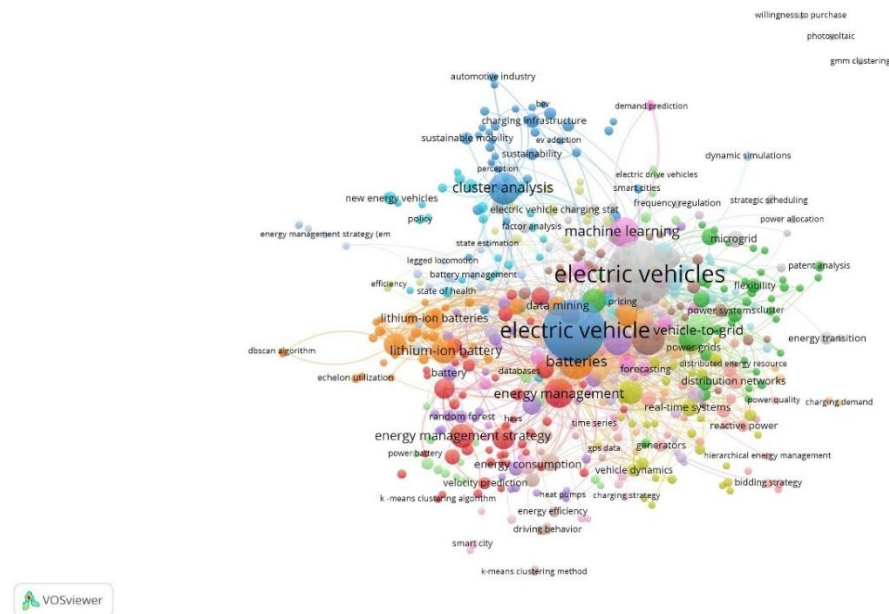
Şekil 2. Kaynak atıf analizi (kümeleme analizi çalışmaları)

EA’lar ve kümeleme analizi alanında yapılan çalışmaların doküman atıf ağ haritası Şekil 3’te gösterilmiştir. Görsel üzerindeki veriler seçilirken atıf sayısı “1” ve üzerindeki dokümanlar seçilmiştir. Haritada dokümanlar 27 kümeye ayrılmıştır. Kümelerin büyüklüklerine bakıldığında Muratori, Kristoffersen ve Zhao oldukları gruplarda en çok atıf alan yazarlardır. Harita genel anlamda her grubun altındaki yazarların kendi içlerinde birbirlerine yakın bir ilişki içerisinde olduğunu ve gruplarında birbirlerine yakın olduğunu göstermektedir.



Şekil 3. Doküman atıf analizi (kümeleme analizi çalışmaları)

EA'lar ve kümeleme analizi alanındaki yayınlarda yer alan kelimeler için veri madenciliğinde kelimeler arasındaki ilişki Şekil 4'te gösterilmiştir. Görsel üzerindeki veriler seçilirken bir anahtar kelimenin minimum tekrarlanma sayısı "2" ve üzerindeki dokümanlar seçilmiştir. "Electric vehicles", "electric vehicle" ve "cluster analysis" en önemli kavramlardır ve birbirlerine yakın bir şekilde kümelenmiştir.



Şekil 4. Anahtar sözcük analizi (kümeleme analizi çalışmaları)

2.2. Elektrikli Araçlar ve ÇKKV ile Gerçekleştirilen Çalışmalar

ÇKKV yöntemleri, farklı kriterler ve bu kriterlerin önem sırasını kullanarak karar alma sürecini destekler. ÇKKV yöntemleri, bu kriterlerin her birinin önem düzeyini belirlemek için kullanılır. Kriterler ağırlıklandırılır ve önem düzeyleri belirlenir. Bu analiz süreci, karar alma sürecine objektif bir şekilde rehberlik etmeye yardımcı olur (Güler & Polatgıl, 2024, s.2-3). Sürdürülebilir kararlar almak ve dikkat çekmek için ön veri analizi, şirket içi veya şirket dışı veri değerlendirmesi ve güvenilir bir analiz sistemi aracılığıyla karar alma gereklidir. ÇKKV yöntemlerinin sonuçları, hükümetler, devlet kurumları ve dış kuruluşlar tarafından farklı türde kararlar almada yol gösterici olmaktadır. ÇKKV yöntemleri, EA'larla ilgili yapılan birçok araştırmada da yaygın olarak tercih edilen yöntemlerdendir. Analizler, gerçek koşulların öngörülenden farklı olup olmadığını belirlemek için bu karar destek araçları, karar vericilere bir kriter raporu sunar (Aungkulanon, Atthirawong, & Luangpaiboon, 2023, s.3). Literatür araştırmasının son bölümü, EA'ların ÇKKV yöntemleri ile değerlendirildiği çalışmalara ayrılmıştır.

Abdel-Basset, Gamal, Hezam, & Sallam (2024) bir EA şarj istasyonu için en sürdürülebilir konumun değerlendirilmesi, işletilmesi ve belirlenmesi için Mısır, Zagazig'de gerçek bir vaka çalışması gerçekleştirmişlerdir. Araştırma için on dokuz alt faktöre ek olarak altı temel faktörü içeren genel bir değerlendirme sistemi geliştirilmiştir. Faktörlerin değerlendirilmesi için ÇKKV yaklaşımı uygulanmıştır. İlk olarak, DEMATEL (The Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) yöntemi, temel faktörleri ve alt faktörleri önceliklendirmek için kullanılmıştır. Ardından, COPRAS tekniği ile EA şarj istasyonları için altı sürdürülebilir yer seçilmiştir.

Yetersiz EAŞİ (elektrikli araç şarj istasyonu)'lerin, EA'ların daha geniş çapta benimsenmelerini engellediğini belirten Elomiya vd. (2024) optimal EAŞİ yer seçimi için ÇKKV analizleri ve CBS (coğrafi bilgi sistemleri)'den yararlanmışlardır. Araştırmada yer seçimi problemlerinde ilk kez, CBS, makine öğrenimi ve ÇKKV'yi entegre eden ve kentsel ortamlarda EAŞİ' nin uygunluğunu etkili bir şekilde haritalayan yenilikçi bir metodoloji sunulmuştur. Çalışmada, mevcut EAŞİ yerlerindeki hem birincil hem de ikincil kriterleri incelemek için geriye dönük bir yaklaşım benimsenerek yoğun kentleşmiş alanlarda EAŞİ yerleşiminin değerlendirilmesindeki boşluğu doldurma amaçlanmıştır. Kriter ağırlıklarını ve uygunluk haritalarını türetmek için AHP (Analytical Hierarchy Process), Bulanık AHP ve SWARA (Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis) kullanılmıştır. Karşılaştırmalı sonuçlar, EAŞİ yerleştirmek için uygunluk

analizini modellemede diğer ÇKKV yöntemlerine kıyasla bulanık AHP'ye daha fazla öncelik verildiğini göstermiştir.

Güler & Polatgıl (2024), Türkiye'de mevcut 44 EA modelini 11 farklı kritere göre değerlendirmişlerdir. Kriterleri ağırlıklandırmak için uzman görüşleri kullanılarak AHP ve SWARA yöntemleri kullanılmıştır. Bu ağırlıklar kullanılarak üç farklı ÇKKV yöntemi ile 16 model oluşturulmuştur. Çalışmanın sonuçları Copeland ve Borda yöntemleri kullanılarak birleştirilmiştir. Sonuçlar karşılaştırılarak uzmanlardan farklı şekillerde görüş almanın sıralama üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçların, tüketicilerin doğru EA'yı seçmelerine yardımcı olması ve ulaşımın önemini vurgulaması beklenmektedir.

Aungkulanon vd. (2023) bir ÇKKV tekniği olan bulanık analitik hiyerarşi sürecini kullanarak Tayland'da EA'ların benimsenmesinin önündeki engelleri ve alt engelleri sıralamışlardır. Araştırma sonuçları, altyapı politikası, teknoloji ve pazarın araç benimsemesinin önündeki temel engeller olduğunu göstermiştir. Yetersiz şarj altyapısı ağı, uygun devlet desteği/teşviklerinin ve iş birliğinin eksikliği, yetersiz elektrik enerjisi arzı, yüksek sermaye maliyeti ve EA şarj süresi ise Tayland'da EA benimsenmesinin önündeki temel alt engellerdir.

Elghanam, Ndiaye, Hassan, & Osman (2023) kablosuz şarj şeritleri uygulaması için potansiyel konumları coğrafi, çevresel, teknik ve ekonomik kriterlere göre değerlendirmek üzere TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemi ile hedef programlamayı birleştiren iki aşamalı bir ÇKKV çerçevesi önermişlerdir. İlk aşamada, TOPSIS yöntemi, çeşitli alternatif konumları coğrafi, çevresel ve teknik özelliklerine göre sıralamak için kullanılmıştır. En yüksek sıralamaya sahip alternatifler daha sonra matematiksel bir model kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu model, ekonomik değerlendirme kriterlerine göre bütçe kısıtlamalarını karşılayan en uygun konumlar ve ilgili kablosuz şarj şeritleri uzunlukları hakkında öneriler sunmaktadır. Önerilen entegre TOPSIS-BGP modeli, tek bir matematiksel programa entegre edilmesi zor olan çeşitli kriterleri dikkate alarak kapsamlı bir karar alma yaklaşımı sunar.

Ghose, Pradhan, Tamuli, & Shabbiruddin (2023) sera gazı emisyonu olmayan ve yenilenebilir enerjiye dayalı çalışan güneş enerjili araçların, malzeme seçimi için ÇKKV yöntemlerinden yararlanmışlardır. Çalışmada, 19 farklı uygulanabilir malzemenin 14 farklı özelliğinin bir hiyerarşisi kullanılarak optimum malzemenin seçimi için sistematik bir yapı sunulmaktadır. Bu hiyerarşide, bulanık COPRAS modeli kullanılmıştır. Elde edilen çözümün sağlamlığını hesaba katmak için bir duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir.

Sonuçlar, bu yaklaşımın bir güneş enerjili araç üretimi için optimum malzemenin seçimindeki etkinliğini kanıtlamaktadır.

Tian, Liang, Nie, Wang, & Wang (2023) piyasaya sürülen EA'ların rekabet gücünün nasıl artırılacağı sorusuna cevap aramak için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmada müşterilerin EA alım tercihlerini etkileyen kriterlerin belirlenmesi için bir ÇKKV yöntemi önerilmiştir. Her alternatif için grup görüşü, çevrimiçi otomobil incelemelerinin duygu analizi sonuçlarının tereddütlü sezgisel bulanık unsurlara dönüştürülmesiyle elde edilmiştir. Kriterlerin ağırlıklarını belirlemek için en iyi-en kötü yöntemini ve maksimize edici sapma yöntemini birleştiren kapsamlı bir ağırlıklandırma yöntemi geliştirilmiştir. Önerilen yöntemin, tüketicilerin EA satın alma tercihlerinde yardımcı olacağı savunulmuştur.

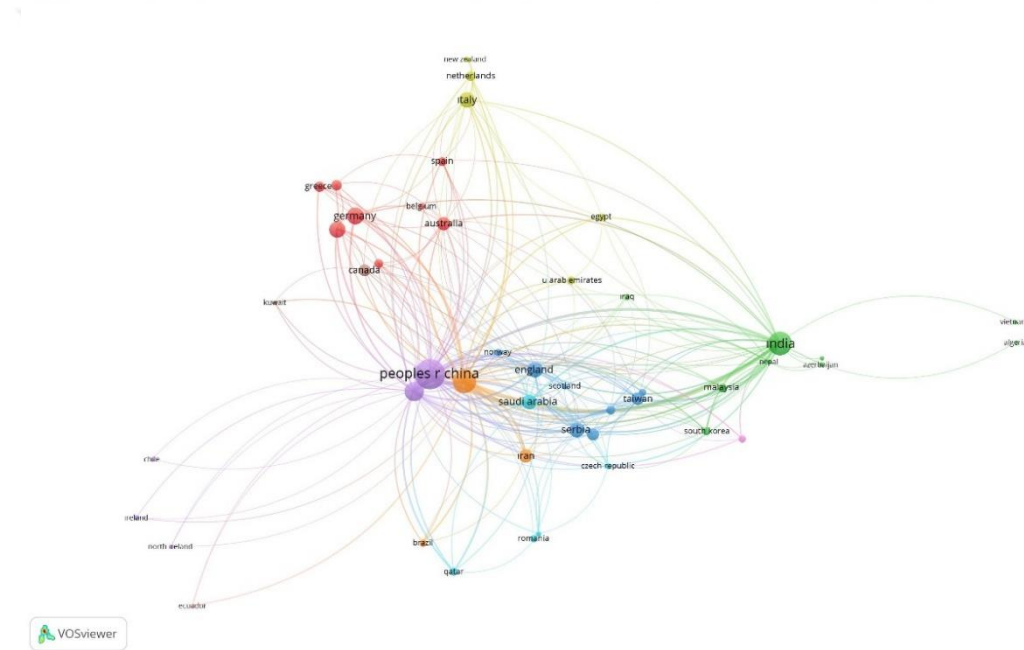
Koirala, Tamang, & Shabbiruddin (2022) pil değiştirme istasyonunun optimum yerini planlamak için ÇKKV yöntemini kullanmışlardır. Hindistan Yarımadası'nda yapılan yenilikçi çalışmada, mevcut bazı araştırma ve literatürden yararlanılarak bir değerlendirme sistemi oluşturulmuş ve ardından pil değiştirme istasyonu yer seçiminde ekonomik, teknik ve sosyal yönlerden farklı kriterler dikkate alınmıştır. Hindistan, Kalküta Metropol Alanı'ndaki seçilen konumları sıralamak için COPRAS yönteminden yararlanılmıştır. Araştırma sonucunda geri ödeme süresi, arazi edinim maliyeti ve makine satın alma maliyeti gibi maliyetle ilgili kriterlerin diğer kriterlere baskın olduğu sonucuna varılmıştır.

EA'ların cazibesini etkileyen teknik ve müşteriyle ilgili faktörleri tespit etmeyi amaçlayan Pradhan, Shabbiruddin, & Pradhan (2022) müşterilerin en uygun elektrikli aracı seçmelerine yardımcı olacak bir model önermişlerdir. Hindistan'daki en popüler altı EA modeli, bulanık tabanlı ÇKKV modeli kullanılarak sıralanmak üzere, biri elektrikli aracın teknik özelliklerini vurgulayan, diğeri ise maliyet, garanti, şarj tesisi vb. gibi özellikler de dahil olmak üzere yalnızca müşterinin bakış açısını tanımlayan iki kriter kümesi dikkate alınmıştır. Çalışmanın sonucunun, yeni bir EA satın almayı planlayan herhangi bir müşteri için hızlı bir kılavuz görevi gördüğü savunulmuştur.

Sonar & Kulkarni (2021) en iyi EA alternatifinin seçimi ve sıralaması için ÇKKV aracı olarak AHP ve MABAC (The Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison) yönteminin entegre bir yaklaşımını kullanmışlardır. AHP yöntemi, kriterlerin ağırlık katsayılarını elde etmek için kullanılır ve EA alternatiflerinin seçimi MABAC yöntemi kullanılarak değerlendirilir. Çalışma için, altı uygulanabilir alternatiften oluşan bir örneklem dikkate alınmıştır. Bu çalışma, kapsamlı bir seçim kriteri

seti için gerçek bir tercih sunarak ve mevcut EA'lar arasından en uygun olanı seçmeyi amaçlamıştır.

Bibliyometrik analizin ikinci bölümünde EA'ların ÇKKV yöntemleri ile değerlendirildiği 402 İngilizce yayın incelenmiştir. ("Electric vehicles" or "electric vehicle") and ("mcdm" or "multi criteria") kelimeleri ile Web of Science veri tabanında aranan 402 yayına ait ülkeler arasındaki ilişki ağ haritası Şekil 5'te gösterilmiştir. Görsel üzerindeki veriler seçilirken atıf sayısı "2" ve üzerindeki dokümanlar seçilmiş ve çalışmaya 68 ülke arasından 56 ülke dahil edilmiştir. Şekilde ülkeler 11 kümeye ayrılmıştır. EA'ların ÇKKV yöntemleri ile değerlendirildiği makaleler arasında en fazla yayın yapılan ülke Çin kendi grubundan Şili, İrlanda ve ABD ile ilişki içerisinde. Türkiye ve Hindistan bu alanda en fazla yayın yapılan ülkelerdendir.



Şekil 5. Ülke atıf analizi (ÇKKV çalışmaları)

EA'ların ÇKKV yöntemleri ile değerlendirildiği çalışmaların kaynakları arasındaki ilişki ağ haritası Şekil 6'da gösterilmiştir. Görsel üzerindeki veriler seçilirken atıf sayısı "2" ve üzerindeki dokümanlar seçilmiştir. Şekildeki 46 kaynağın 11 kümeye ayrıldığı gözlemlenmiştir. Energies, Sustainability, Journal of Cleaner Production dergilerinin EA'ların ÇKKV yöntemleri ile değerlendirildiği çalışmalar alanında en temel kaynaklar olduğu görülürken Environment Development and Sustainability, Renewable Energy gibi dergiler en güncel kaynaklar arasındadır.

için gri Bernoulli modeli önermişlerdir. Dizilerin doğrusal olmayan gelişen eğilimlerini keşfetmek için öncelikle zamanla değişen parametreler tasarlanmıştır. Daha sonra karmaşık optimizasyon problemleriyle başa çıkma konusundaki yetkinliği nedeniyle guguk kuşu arama algoritması ile optimum çözümler belirlenmiştir. Bu yeni modeli doğrulamak için küresel EA stoğu ve Fransa'daki EA satışları, altı referans modelle karşılaştırılarak tahmin edilmiştir. Ampirik bulgular, önerilen modelin tahmin kapasitesi açısından üstün olduğunu, EA stoğu ve satış tahmini için gelecek vaat ettiğini göstermiştir.

Liu, Liu, Wu, Zhu, & Shang (2022) Çin'in yeni enerjili taşıt endüstrisinin gelişim eğilimini tahmin etmek için gri bilgi faktörü ile zamansal faktör arasındaki doğrusal olmayan ilişkiye uyacak şekilde optimize edilmiş bir ayrık gri güç modeli önermişlerdir. Önerilen yöntemin etkinliğini doğrulamak için simülasyon deneyleri kullanılmıştır. Çin'deki yeni enerji araçlarının yıllık satışlarının tahmin edildiği çalışmada, 2025 yılına kadar Çin'in yeni enerji aracı satışlarının 8,84 milyona ulaşacağını, bu rakamın toplam araç satışlarının yaklaşık %24'ünü oluşturacağını ve Çin hükümeti tarafından belirlenen sektör geliştirme hedefini aşacağı gösterilmiştir.

Bitencourt, Abud, Santos, & Borba (2021) bass yayılma modeline dayanarak Brezilya'da EA'ların yayılmasında kamu politikalarının etkisini değerlendirmişlerdir. Ayrıca çalışmada, makroekonomik ve sosyal göstergeler dikkate alınarak bir regresyon modeli aracılığıyla Brezilya'daki toplam binek otomobil tahmini gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, yüksek EA fiyatlarının Brezilya'da incelenen ufukta EA yayılımının önündeki en büyük engel olmaya devam edebileceğini ve EA'ları nüfusun çoğunluğu için erişilemez kılabileceğini göstermiştir. Bu nedenle, EA'ları sübvans etmeyi amaçlayan politikaların, EA satışlarını teşvik etmede daha etkili olabileceği savunulmuştur.

Enerji kıtlığı ve çevre sorunlarının yarattığı tehdit edici baskıyı hafifletmek için EA'ların benimsenmesini etkili bir önlem olarak gören (Ding & Li, 2021) EA satış ve stoklarının doğru tahminin önemine değinmiştir. Bu amaçla, EA tahmini için optimize edilmiş gri model önermişlerdir. Araştırmada ilk olarak, yeni verileri bilgi eksiklikleri olmadan yeterince vurgulayarak mevcut gözlemlerden daha fazla değer elde etmek için dinamik ağırlıklı bir dizi oluşturulmuştur. İkinci olarak, ağırlıklı katsayı ve değiştirilmiş başlangıç koşullarına göre çeşitli örneklerle göre ayarlanabilir bir model geliştirilmiştir. Üçüncü olarak, Simpson formülü arka plan değerini yeniden oluşturmak için kullanılmış ve ardından veri sıçramalarını yumuşatmak ve tahmin hassasiyetini daha da artırmak için değiştirilmiş başlangıç koşuluyla entegre edilmiştir. Yeni modelin rasyonelliğini ve

etkinliğini doğrulamak için, önerilen model tarafından EA satışları ve stoklarıyla ilgili dört vaka simüle edilmiş ve altı kıyaslama ölçütüyle karşılaştırılmıştır. Ampirik sonuçlarda da gösterildiği gibi, yeni model çoğu durumda en yüksek tahmin hassasiyetini göstermiştir.

Long & Liu (2021) yeni EA şirketlerinin daha yüksek kar elde edebilmeleri için ürünleri nasıl optimize edeceğini ve makul fiyatlandırma politikalarını bulmak için veri madenciliği ve ampirik analizden yararlanmışlardır. Yeni enerji araçlarının 2011'den 2019'a kadar olan satış verileri, Python aracılığıyla SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving-Average) modeli ve üstel düzeltme yöntemi ile incelenmiştir. 2025 yılı satışlarını tahmin etmek için ise SARIMA modeli kullanılmıştır. Parametrelerin yeni enerji araçlarının satışlarına etkisini incelemek için LASSO regresyonundan yararlanılmıştır. Ardından korelasyon analizi için K-ortalamlar algoritması ile kümeleme analizi ve çoklu doğrusal regresyon kullanılmıştır.

Jang & Choi (2021) EA'ların ve içten yanmalı motorların özelliklerine ilişkin tüketici tercihlerini analiz etmişlerdir. Veri toplamak için, Gallup Kore tarafından birleşik anketler kullanılarak yönetilen, Kore'deki metropol bölgelerde yaşayanlar arasında 350 yüz yüze ayrık seçim anketi gerçekleştirilmiştir. Karışık bir logit modeli kullanılarak EA niteliklerine ilişkin tüketici tercihleri tahmin edilmiştir. Oluşturulan model ile yakıt ekonomisinin, satın alma fiyatının, şarj istasyonuna olan mesafenin, sürüş menzilin, şarj süresinin ve otonom sürüşün istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Williams vd. (2021) ABD'de enerji ve sanayi sistemi için yeni analiz araçlarıyla 2050 yılına kadar net sıfır ve net negatif CO₂ emisyonlarına yönelik modeller geliştirmişlerdir. Çalışmadaki amaç, 2050 yılına kadar net sıfır veya net negatif CO₂ emisyonlarına ulaşırken enerji hizmetlerine yönelik tüm tahmini talebi mümkün olan en düşük maliyetle karşılayan senaryoları geliştirmektir. Araştırma sonucu ile CO₂ emisyonları, maliyet, enerji karışımı, altyapı gereksinimleri ve arazi kullanımı açısından karbonsuzlaştırılmış durumlarla karşılaştırılmak üzere ABD Enerji Bakanlığı'nın yıllık verilerine dayanan olağan durum senaryosu geliştirilmiştir.

Kapustin & Grushevenko (2020) EA'lara ilişkin uzun vadeli genel bir değerlendirme gerçekleştirmişler ve bunların elektrik şebekelerine potansiyel etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, EA filosunun uzun vadeli dinamikleri, söz konusu filonun ürettiği elektrik talebi ve dolayısıyla elektrikli ulaşım gelişiminin dünya bölgelerinin enerji sistemleri üzerindeki etkisi hakkında bilimsel temelli bir bakış açısı sağlanması amaçlanmıştır. Araştırma sonucu 2018 yılında EA'ların hâlâ geleneksel otomobillerle eşit

düzeyde rekabet edemediğini göstermiştir. Bununla birlikte, hükümet ve otomobil üreticilerinin mevcut gelişme hızını sürdürmesi durumunda, içten yanmalı motorlu araçlar ile EA'lar arasındaki gerçek rekabet gücünün, düşük petrol fiyatı ortamında bile 2035 yılına kadar sağlanabileceği savunulmuştur.

Rietmann, Hügler, & Lieven (2020) lojistik büyüme modeli aracılığıyla beş kıtadaki 26 ülkenin EA envanterinin uzun vadeli tahminini gerçekleştirmişlerdir. 2010'dan 2018'e kadar olan gerçek satış verileri kullanılarak bu ülkeler için 2035'e kadar tahminler gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucu, ülkelerin yenilenebilir enerji kaynaklarına yoğun yatırım yapması göz önüne alındığında, öngörülen EA büyümesiyle CO₂ emisyonlarında azalma sağlanabileceğini göstermiştir. Mevcut enerji karışımları göz önüne alındığında, dünya çapındaki CO₂ emisyonlarının, EA'ların yaklaşık %50'lik payına rağmen 2035 yılına kadar artmaya devam edeceği sonucuna ulaşılmıştır.

Scharf, Heide, Grahle, Syré, & Göhlich (2020) çeşitli otomobil sübvansiyonu konseptlerinin uzun vadeli çevresel etkilerine ilişkin bir öngörü ortaya koymuşlardır. Alman otomobil filosunun satın alma sübvansiyonlarından etkilenen CO₂ emisyonları belirlenmiştir. CO₂ emisyonlarına odaklanılarak ekolojik yönlere ilişkin çeşitli sübvansiyon konseptlerinin sayısal bir değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Çeşitli sübvansiyon konseptlerinin çevresel etkilerine ilişkin bütünsel bir bakış sağlamak amacıyla, üretim, işletme ve kullanım ömrü sonu emisyonları dahil olmak üzere yaşam döngüsü dikkate alınmaktadır. Oluşturulan tüm senaryolar, dikkate alınan dönem içerisinde üretimin gerektirdiği ek emisyonları telafi etmekte ve dolayısıyla birikmiş CO₂ emisyonlarını 2030 yılına kadar azaltmaktadır.

Wang, Yu, & Okubo (2020) ikinci el hibrit araç ihracat eğilimi doğrultusunda Japonya'daki gerçek araç kayıt silme oranını kullanarak geri dönüştürülebilir hibrit araç sayısını tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Araştırmada Japonya'daki hibrit araçlara odaklanılmış ve hibrit araç satışlarını ve özellikle ikinci el hibrit araç ihracatını dikkate aldıktan sonra Japonya'da geri dönüştürülebilir hibrit araç sayısını tahmin etmek için yeni bir yöntem sunulmuştur. Çalışma sonucunda, temel senaryo kapsamında 2030 yılında Japonya'da yalnızca 0,11 milyon atık hibrit elektrikli aracın geri dönüştürüleceği ve her 3 ek senaryoda da bu rakamın 1 milyonu geçemeyeceği gösterilmiştir.

Huang & Ge (2019) planlı davranış teorisine dayanarak EA'lar için bir satın alma niyeti etki mekanizması modeli oluşturmuşlardır. Bu amaçla Pekin'deki potansiyel tüketiciler arasında 2018 yılının mart ayından nisan ayına kadar bir anket araştırması

gerçekleştirilmiştir. Toplam 502 geçerli anket yanıtı elde edilmiş ve EA satın alma niyetini etkileyen faktörlerin ampirik analizi için bir yapısal eşitlik modeli kullanılmıştır.

Lee, Hardman, & Tal (2019) Kaliforniya'daki 11.037 plug-in EA kullanıcısının sosyo-demografik profiline ilişkin 2012-2017 anket verileri kullanılmıştır. Alıcılar, özelliklerine göre %49'u yüksek gelirli aileler, %26'sı orta/yüksek gelirli yaşlı aileler, %20'si orta/yüksek gelirli genç aileler ve yaklaşık %5'i orta gelirli kiracılar olmak üzere dört heterojen gruba ayrılmıştır. Bass yayılım modeli kullanılarak, yüksek gelirli ailelerin plug-in EA'ları benimseyen en büyük grup olmaya devam etmeyebileceği gösterilmiştir. Pazarın büyümeye devam edebilmesi için orta/yüksek ve orta gelir kümelerinin plug-in EA'ları bugünkünden daha fazla sayıda benimsemeye başlaması gerekmektedir. Politika yapıcılar, bu tüketicilerin yüksek gelirli ailelere kıyasla altyapı ve teşviklere yönelik farklı ihtiyaçlarını göz önünde bulundurmaları gerektiği savunulmuştur.

Okada, Tamaki, & Managi (2019) Japonya'da anket çalışması ile EA sahibi olmayanların niyetini ve EA sahiplerinin satın alma sonrası memnuniyetini araştırmışlardır. Her iki faktörün yapısal ilişkisi, yapısal eşitlik modellemesi kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz çevre bilinci çerçevesinde gerçekleştirilmektedir. EA kullanıcısı olmayanların satın alma niyetleri ile EA kullanıcılarının satın alma sonrası memnuniyeti arasındaki tahminler karşılaştırılmıştır. Araştırma sonuçları, EA kullanıcısı olmayanların satın alma niyeti yapılarının ve EA'nın satın alma sonrası memnuniyetinin farklı olduğunu göstermektedir. EA'ların değerlendirilmesi, çevre bilincinin EA kullanıcısı olmayan bir kişinin satın alma niyeti üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olduğunu, EA kullanıcısının satın alma sonrası memnuniyeti üzerinde ise dolaylı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Zhu & Du (2018) bas difüzyon modelini kullanarak EA sayısını tahmin etmişlerdir. 2020 yılına kadar satış tahmini yapılan çalışmada, EA'lara ilişkin yeterli tarihsel veri bulunmadığı için özel araçların geçmiş verileri kullanılmıştır. Bas modelinin parametrelerini tahmin etmek için kullanıcıların araç satın alma kararlarını etkileyen ana faktörlerin ağırlıklı ortalaması, bulanık analitik hiyerarşi süreci ile hesaplanmıştır.

Berckmans vd. (2017) iki hususu göz önünde bulundurarak 2030 yılında bir pil takımının maliyetini tahmin etmişlerdir. Araştırma ile ilk olarak, on yıllık bir çerçevede, bir pilin kimyasal bileşimini değiştirerek malzeme bilimlerinde bir gelişme sağlanması amaçlanmıştır. İkinci olarak, pazarın olgunlaşması ve seri üretim durumuna doğru evrilmesi nedeniyle fiyat düşüşünü göz önünde bulundurarak üretim maliyeti optimizasyonunun gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma sonucunda silikon bazlı

lityum iyon pil satışının 2020-2025 yılları arasında, NMCbatteries pillerinin ise 2025-2030 yılları arasında 100 dolar/kWh satış bariyerine ulaşılacağı sonucuna varılmıştır.

Kieckhäfer, Wachter, & Spengler (2017) EA'ların pazar yayılımını desteklemek için üreticilerin gücünü analiz etmek amacıyla otomotiv pazarı simülatörü (AMASi) uygulamışlardır. Alman otomobil pazarı için modelin parametrelendirilmesi ve araç modellerinin piyasaya sürülmesi ve kaldırılmasının zamanlaması ile ilgili farklı ürün portföyü seçenekleri simüle edilmiştir. Araştırmada toplu bir endüstrinin yanı sıra bireysel bir üreticinin bakış açısı da dikkate alınmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre EA'lar, iyimser senaryoya göre 2030'da satışların %30,6'sına ulaşacak, kötümser senaryoda ise %5,3'üne ulaşabilecektir. Üreticilerin portföy kararlarının EA'ların pazar gelişimi üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu ve rekabet avantajı elde etmek için kullanılabileceği savunulmuştur.

Zhang, Zhong, Geng, & Jiang (2017) Çin'deki pilli ve fişli EA satışları için uzun ve kısa dönemli tahmin yapmışlardır. Her iki tahmin için de Ocak 2011'den Aralık 2015'e kadarki 60 aylık veriler kullanılmıştır. 6 ekonomik değişkenle gerçekleştirilen çalışmada, tahmin için VAR (Vector Autoregressive Model) ve SSA (Singular Spectrum Analysis) yöntemleri kullanılmıştır. Çalışma ile pilli ve fişli EA'lar olarak kategorize edilen Çin'deki EA satışları, Çin EA endüstrisinin büyümesinin istatistiksel kanıtı olarak hem kısa vadede (Aralık 2017'ye kadar) hem de uzun vadede (2020'ye kadar) tahmin edilmiştir.

Braz da Silva & Moura (2016) 2030 yılına kadar EA'ların Portekiz otomobil filosunda potansiyel olarak ne ölçüde yayılabileceğini belirlemeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla Portekiz otomobil filosu için sistem dinamiği modeli geliştirilmiştir. Bu çerçevede genel araç filosu performans değişiminin göstergeleri olarak, 2030'a kadar filo genelindeki enerji tüketimi ve buna karşılık gelen CO₂ emisyonları tahmin edilmiştir. Nihai toplam enerji ve karbon yoğunlukları ve BEA pazarı yayılımı, bir temel senaryoya göre gelişen çeşitli senaryolar için karşılaştırılmıştır.

Hagman, Ritzén, Stier, & Susilo (2016) içten yanmalı motorlu araçlar, HEA'lar ve BEA'lar arasındaki satın alma fiyatı ile toplam sahip olma maliyeti arasındaki olası farklılığı araştırmak için tüketici merkezli bir toplam sahip olma maliyeti modelini araştırmışlardır. Modelin oluşturulmasının ve test edilmesinin, ilgili verilere sınırlı erişim ve gelecekteki koşulların tahmin edilmesinin güçlüğü nedeniyle tüketiciler için zorlu bir görev olabileceği ortaya konulmuştur.

Block, Harrison, & Brooker (2015) ABD pazarının mevcut durumunu değerlendirmişler ve EA'ların ABD pazarındaki gelecek nüfuzunu tahmin etmişlerdir. Tahmin yöntemi, 2010'dan 2014'e kadar yollardaki kümülatif araçları ve bu beş yılın büyüme oranlarını veren yıllık EA satışlarına dayanmaktadır. Çalışmada bu büyüme değerleri kullanılarak gelecek on yıllık değerler hesaplanmıştır.

Gnann, Plötz, Kühn, & Wietschel (2015) çeşitli faktörlerin birleşik etkisi ve bunun sonucunda ortaya çıkan gelecekteki belirsiz pazar evrimi için 2020 yılına kadar Almanya için bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre, dış koşullar ve kullanıcıların ödeme istekliliği nedeniyle PE'lerin pazar evriminde büyük bir belirsizlik olduğu ortaya konmuştur. Alman binek otomobil stoğunda PHEA'ların gelecekteki payının 2020 yılına kadar %0,4 ile %3 arasında değişeceği öngörülmüştür. Enerji fiyatlarının ve devlet teşviklerinin PHEA pazar evrimi üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu vurgulanmıştır.

Peng vd. (2015) ABD'deki EA sanayisinin geleceğini tahmin etmek için Aralık 2010'dan Aralık 2013'e kadar olan tarihsel 37 aylık otomobil satış rakamlarından yararlanmışlardır. Çalışmanın sonuçları kullanılarak Çin hükümetinin ve otomobil şirketlerinin Çin'in EA sanayileşmesini teşvik etmesine yardımcı olabilecek temel önlemler ortaya konulmuştur. Araştırmanın ana amacı, EA talebini ve bunun tüm otomobil satışları içindeki oranını tahmin etmektir.

Brown (2013) EA yayılımını simüle etmek için iki ayrı modeli birleştirerek geliştirmiştir. Geliştirilen ilk model, ABD Ulaştırma Bakanlığı'nın 2009 Ulusal Hanehalkı Seyahat Anketi verilerine uygulanan karma (rastgele parametreler) bir lojistik regresyondur. İkinci model ise araç seçim setlerinin belirlendiği sosyal ağ etkileşimlerini simüle eder. Birinci modeldeki parametreler ikinci modelde belirlenen seçim setlerine uygulanmıştır. Araştırma sonucuna göre daha düşük fiyat, araçlar için rekabet avantajının ana kaynağıdır ancak araç sınıflandırması ve menzili gibi diğer özelliklerin de tüketici tercihini etkilediği gösterilmiştir. Devlet mali teşviklerinin, başlangıç yıllarında daha büyük pazar paylarına yol açtığı gözlemlenmiştir.

Higgins, Paevere, Gardner, & Quezada (2012) tüketicilerin satın alma kararlarını maliyet/fayda, performans, çekicilik/statü, risk, psikografik ve demografik özellikler gibi çeşitli karmaşık kriterler açısından incelemişlerdir. Tüketicilerin EA teknoloji seçeneklerini heterojen tüketicilerden oluşan bir ortamda benimsenmesini tahmin etmek için çok kriterli analiz ve seçim modelleme özelliklerini birleştiren yenilikçi bir yayılma modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model, Victoria, Avustralya'daki 1,5 milyon hanedeki

araç stoğunu kullanarak 2030 yılına kadar EA'ların pazar payını tahmin etmek için test edilmiştir. Odak grupları ve geniş ölçekli bir anket aracılığıyla finansal ve finansal olmayan kriterler dahil edilmiştir. EA'ların alımındaki coğrafi farklılıkların öncelikle sürüş mesafesi, istihdam durumu ve hane halkı gelirinden kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır. Kentsel alanlardaki alımın ise diğer bölgelere göre yaklaşık üç kat daha fazla olduğu belirtilmiştir.

Shepherd, Bonsall, & Harrison (2012) şarj edilebilir hibrit ve akülü EA'ların yaygınlaşmasını etkileyen faktörleri, CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini ve 2050 yılına kadar olan dönemde hükümete olan maliyetini incelemek üzere bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Pazar payının gelecekteki 40 yıl içinde gelişeceğinin varsayıldığı çalışmada, devlet sübvansiyonlarının kısa vadede ekstra satışlar açısından önemli olduğu ancak filo payı veya emisyonlar üzerinde uzun vadede çok az etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

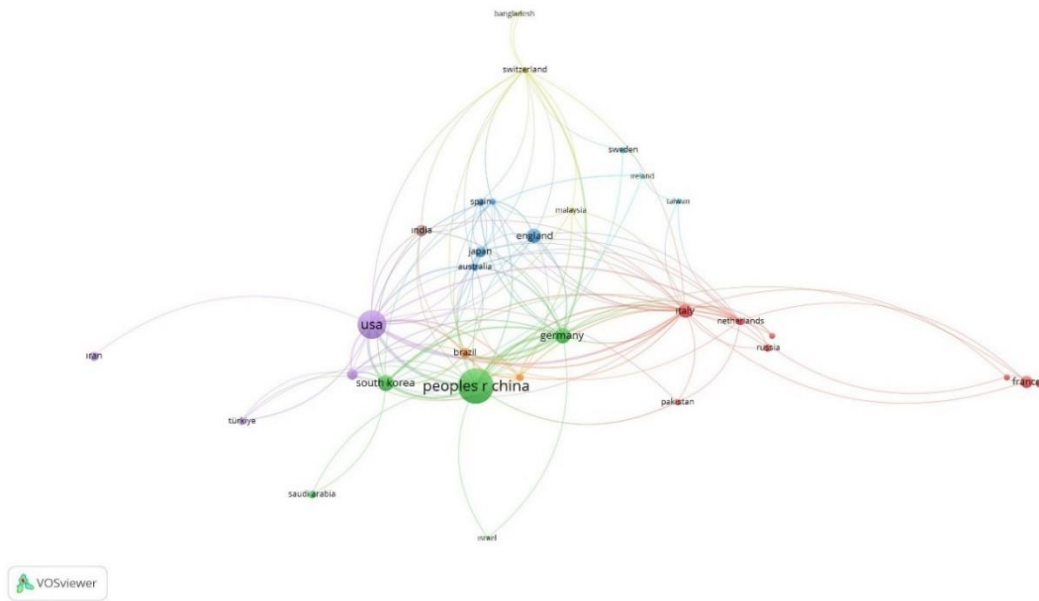
Orbach & Fruchter (2011) EA pazar ve sektör verilerine dayanarak satışları ve ürün gelişimini tahmin eden bir model sunmuşlardır. Nitelik iyileştirmeleri ile her neslin kümülatif benimseme düzeyleri arasındaki karşılıklı bağımlılığa dayanan dinamik bir model önerilmiştir. Model, ürünlerin evriminin bir sonucu olarak kümülatif benimseme seviyelerinin zaman içindeki gelişimi ve müşterinin satın alma karar sürecine dayanmaktadır. Araştırmada nitelik düzeylerinin benimseme düzeylerine bağımlılığını bulmak için bir endüstri ve teknoloji analizi gerçekleştirilmiştir. Benimseme seçimlerini niteliklerin düzeyleriyle ilişkilendirmek için ortak bir çalışmayla toplanan veriler kullanılmıştır.

Axsen, Mountain, & Jaccard (2009) hibrit araç kullanıcılarının tercihlerini inceleyen bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. HEA'lara odaklanan bir anket deneyi, farklı piyasa koşulları altında 535 Kanadalı ve 408 Kaliforniyalı araç sahibinden belirtilen tercih verileri toplanmıştır. Açıklanan tercih verileri, farklı derecelerde HEA popülaritesine sahip bölgelerden son araç satın alımlarının yılı, markası ve modeli belirlenerek aynı katılımcılardan toplanmıştır. Genel olarak çalışma ile, tercih dinamiklerinin araştırılmasının doğasında bulunan büyük karmaşıklık ve belirsizlik ortaya konmuştur. Mevcut tercihlerin ayrıştırılmasının zor olduğu ve gelecekteki tercih senaryolarının oldukça spekülatif olduğu savunulmuştur.

Becker, Sidhu, & Tenderich (2009) 2030 yılına kadar ABD'de EA'ların pazarda benimsenme oranını tahmin etmişlerdir. Temel tahmine göre EA'lar, 2030 yılına kadar ABD hafif araç satışlarının %64'ünü oluşturacak ve ABD hafif araç pazarının %24'ünü

oluşturacaktır. Çalışmada ayrıca elektrikli otomobil kullanımının ticaret dengesi, iş yatırımı, istihdam, sağlık bakım maliyetleri ve sera gazı emisyonları üzerindeki etkisi de analiz edilmiştir.

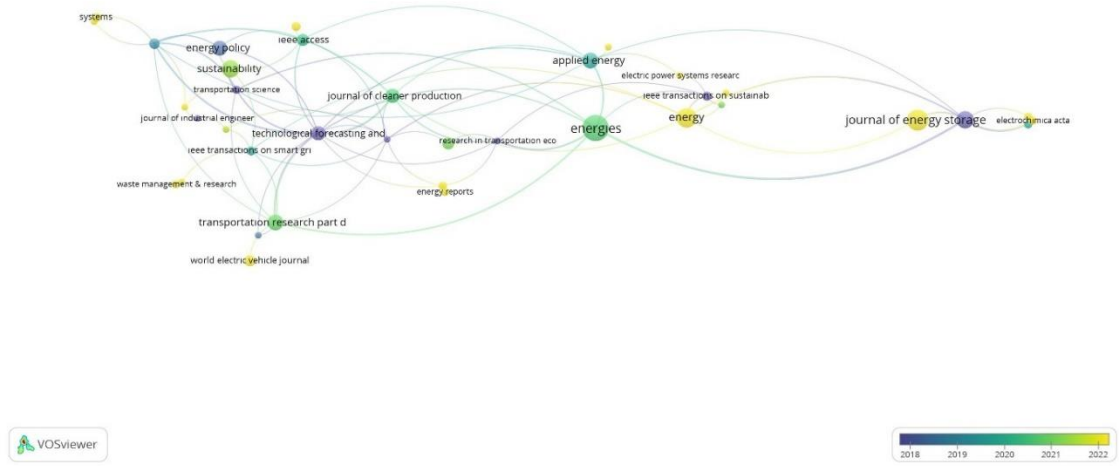
Bibliyometrik analizin üçüncü bölümünde EA sayılarını ve EA'ların sektördeki yayılım tahmininin değerlendirildiği 385 İngilizce yayın elde edilmiştir. ("estimation" or "forecasting" or "prediction") and ("electric vehicle diffusion" or "electric vehicle sales") kelimeleri ile Web of Science veri tabanında aranan 385 yayına ait ülkeler arasındaki ilişki ağ haritası Şekil 9'da gösterilmiştir. Görsel üzerindeki veriler seçilirken atıf sayısı ve doküman sayısı "2" ve üzerindeki seçilmiş ve çalışmaya 50 ülke arasından 36 ülke dahil edilmiştir. Şekilde ülkeler 8 kümeye ayrılmıştır. EA sayılarını ve EA'ların sektördeki yayılım tahminini gerçekleştiren yayınlar arasında en fazla yayın yapılan ülke Çin kendi grubundan Almanya, İsrail, Suudi Arabistan ve Güney Kore ile ilişki içerisindedir. ABD sahip olduğu atıf ve işbirlikleriyle EA'ların sektördeki yayılımını değerlendiren yayınlar arasında merkezde yer almakla beraber Kanada, İran ve Türkiye ile de yakın ilişki içerisindedir.



Şekil 9. Ülke atıf analizi (tahmin çalışmaları)

EA'ların sektördeki yayılım tahmininin yapıldığı çalışmaların kaynakları arasındaki ilişki ağ haritası Şekil 10'da gösterilmiştir. Görsel üzerindeki veriler seçilirken atıf sayısı "2" ve üzerindeki dokümanlar seçilmiştir. Şekildeki 37 kaynağın 8 kümeye ayrıldığı gözlemlenmiştir. Energies ve Journal of Energy Storage dergilerinin EA'ların sektördeki yayılım tahmininin gerçekleştirildiği çalışmalar alanında en temel kaynaklar

olduğu görülürken Energy, Energy Reports gibi dergilerin güncel kaynaklar olduğu görülmektedir.



Şekil 10. Kaynak atıf analizi (tahmin çalışmaları)

EA'ların sektördeki yayılımı ve sayılarını tahmin için gerçekleştirilen çalışmaların doküman atıf ağ haritası Şekil 11'de gösterilmiştir. Görsel üzerindeki veriler seçilirken atıf sayısı "1" ve üzerindeki dokümanlar seçilmiştir. Haritada dokümanlar 18 kümeye ayrılmıştır. Kümelerin büyüklüklerine bakıldığında Rietmann, Hagman ve Arias oldukları gruplarda en çok atıf alan yazarlardır. Harita genel anlamda her grubun altındaki yazarların kendi içlerinde birbirlerine yakın bir ilişki içerisinde olduğunu ve gruplarında birbirlerine yakın olduğunu göstermektedir.

2.4. Elektrikli Araçların Enerji Tüketimi ve CO₂ Emisyonları Üzerindeki Etkilerini İnceleyen Çalışmalar

EA'lar, daha temiz bir ulaşım sektörü için içten yanmalı motorlu araçlara en umut verici alternatif olarak değerlendirilmektedir. Egzoz borusu emisyonları sıfır olan EA'lar, özellikle aşırı nüfuslu kentsel alanlarda önemli olan yerel kirlilikle mücadelede katkıda bulunmaktadır. Çevresel açıdan bakıldığında EA'nın egzoz borusu emisyonları sıfırdır ve bu da özellikle kentsel yoğunlaşmalarda önemli bir gerçek olan yerel kirlilikle mücadeleye yardımcı olmaktadır. Ancak bu, EA'ların hiçbir çevresel yükü olmadığı anlamına gelmemektedir. EA'ları şarj etmek için kullanım aşamasında tüketilen elektrik çoğunlukla mevcut elektrik şebekesinden gelmektedir ve bu enerji talebinin üretimi esnasında da çeşitli gaz emisyonları meydana gelmektedir (Canals Casals, Martinez-Laserna, Amante García, & Nieto, 2016, s.426). Son dönemlerde EA'ların artan popüleritesi, benzer birçok yarar ve sorunları da beraberinde getirmiş, literatüre çok sayıda araştırma kazandırmıştır. Literatür araştırmasının son bölümü, EA'ların enerji tüketimi ve CO₂ emisyonları üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalara ayrılmıştır.

Oyedeji, Aldhaifallah, Rezk, & Mohamed (2023) Barselona şehrinde EA'ların enerji tüketiminin tahmin edilmesinden yola çıkarak bazı hesaplama modelleri geliştirmişlerdir. Tahmin modellerini eğitmek için destek vektör regresyonu, Gauss süreç regresyonu, yapay sinir ağları, karar ağacı ve topluluk öğrenmesi yöntemleri olmak üzere beş farklı makine öğrenme algoritması kullanılmıştır. EA talebinin modellenmesine yönelik etkin özellikler önermek amacıyla Tip-I ve Tip-II modeli olmak üzere iki farklı model yapısı incelenmiştir. Çalışmada formüle edilen modellerin, şehir enerji yönetimi planlamasında faydalı olabileceği savunulmuştur.

Tören & Mollahasanoğlu (2022) elektrikli ve hibrit araçların tarihi gelişimi ve yapısını inceleyerek kullanılan elektrik motor tiplerinin diğer araç motorlarına göre sağlayacakları verimlilik ve CO₂ emisyonu etkisi ile önümüzdeki dönemler için tahmin yapmışlardır. Elektrikli ve hibrit araçlarda tercih edilen motorlar; verimlilik, maliyet, güç yoğunluğu ve güvenilirlik kriterleri açısından karşılaştırılmıştır. İçten yanmalı motor kullanan araçlar ile elektrikli ve hibrit araçlarda kullanılan motor tiplerinin CO₂ emisyon değerleri, temel istatistik tahmin yöntemleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Araştırma sonucunda, gelecekteki dönemlerde CO₂ emisyon oranının % 2 ve üzerinde azalacağı savunulmuştur.

Gryparis, Papadopoulos, Leligou, & Psomopoulos (2020) Eurostat'ın resmi verileri ile gerçekleştirdikleri çalışmada EA sayısındaki değişimin elektrik talebi ve ilgili

emisyonlar üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. Öncelikle EA'ların Avrupa ülkelerine girişi literatür taramasıyla değerlendirilmiş, ardından EA'ların yaygınlaşmasının elektrik talebindeki etkisi tahmin edilmiş ve son olarak elektrik talebindeki bu değişikliklerin neden olduğu CO₂ gazı emisyonları hesaplanmıştır.

Holmberg & Erdemir (2019) mevcut ulaşım, endüstriyel ve konut sistemlerinin enerji verimliliği ve çevresel etkilerinin neler olduğuna ve bu verimliliğin ne kadarının hareketli mekanik parça ve bileşenlerdeki sürtünme ve aşınma kayıplarından olumsuz etkilendiğine dair kısa bir genel bakış sunmuşlardır. Yeni malzemeler, yağlayıcılar ve özellikle sürtünme ve aşınmadan kaynaklanan enerji kayıplarını %18-40 oranında azaltabilecek tasarım değişikliklerindeki son gelişmelere değinmişlerdir. Tasarrufun, toplam küresel enerji kullanımında %8,7 ve gayri safi milli hasılda ise %1,4 olacağı savunulmuştur. Çalışmada ayrıca aküyle çalışan elektrikli binek otomobillerdeki enerji tüketimini ve sürtünme kayıpları hesaplanmış ve yanmalı motorla çalışan otomobillere kıyasla toplam enerji kullanımının ortalama 3-4 kat daha düşük olduğu gösterilmiştir. Yanmalı motorlu bir otomobilin CO₂ emisyonu, elektrikli bir otomobile göre 4-5 kat daha yüksektir. Çalışma ile fosilden yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişin, enerji üretiminde sürtünmeden kaynaklanan enerji kayıplarını %60'tan fazla azaltabileceği savunulmuştur.

Liang vd. (2019) Çin'deki çeşitli EA penetrasyon seviyelerini göz önünde bulundurarak birden fazla senaryonun hava kalitesi etkilerini değerlendirmek için bir model geliştirmişlerdir. 2030 yılına kadar Çin'de EA teknolojilerinin gelecekteki nüfuzuna ilişkin senaryolar değerlendirilmiştir. Gelecekteki EA penetrasyon oranlarındaki belirsizlikler altında ilgili çevresel, sağlık ve iklim etkilerini ölçmek için farklı seviyelerde EA benimsenmesine sahip dört senaryo geliştirilmiştir. Filo elektrifikasyon senaryoları ile Çin'deki EA'sız senaryo arasındaki PM_{2,5}, O₃ ve NO₂ ortam konsantrasyonu değişiklikleri değerlendirilmiştir. Filo elektrifikasyonunun sağlık üzerindeki etkileri, uzun vadeli PM_{2,5} ve O₃ maruziyetine atfedilen ölüm oranlarının önlenmesi açısından değerlendirilmiş ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasının iklim açısından sağladığı faydalarla karşılaştırmak için ekonomik açıdan da analiz edilmiştir.

Zhang, Yang, Ke, Liu, & Yuan (2019) EA'ların enerji tüketimini ve sera gazı emisyonlarını ölçmek için model geliştirmişlerdir. Olası sürüş verileri ve senaryolara dayanarak New York City'de faaliyet gösteren orta boy otonom EA taksisi üzerinde bir vaka çalışması yapılmıştır. Çalışma ile otonom bir elektrikli aracın enerji tüketimini ve sera gazı emisyonlarını ölçmek için fiziksel bir yaklaşım sağlanmış ve gelecekteki otonom EA teknolojilerinin sürdürülebilir gelişimi ve dağıtımı desteklenmiştir.

Brown, Schlachtberger, Kies, Schramm, & Greiner (2018) tüm Avrupa'yı kapsayan ilk açık, mekansal ve zamansal olarak çözümlenmiş ve sektöre bağlı enerji modeli olan PyPSA-Eur-Sec-30 modelini sunmuşlardır. Araştırmada, Avrupa bağlamında ısıtma ve ulaştırma sektörlerinin elektriğe bağlanması, hem modelde toplam nihai enerji kullanımının daha yüksek bir payının dikkate alınmasını hem de yüksek oranda yenilenebilir senaryolarda sınır ötesi iletim ile sektöre bağlılığın sağladığı gelişmiş esnekliğin faydalarının değerlendirilmesini mümkün kılacağı savunulmuştur. Çalışmada ülke başına bir düğüm noktası olan basitleştirilmiş bir ağ kullanılarak, elektrik, ulaşım ve ısı talebini de içeren, 1990 yılına kıyasla CO₂ emisyonlarında %95'lik bir azalma için maliyet açısından en uygun sistem hesaplanmıştır.

Burchart-Korol vd. (2018) Çek Cumhuriyeti ve Polonya'daki EA'ların yaşam döngüsü değerlendirmesi için iki senaryo geliştirmişlerdir. Mevcut durum ve gelecek için planlanan yenilenebilir enerjinin daha çok kullanıldığı senaryolar karşılaştırılmıştır. Araştırma sonucunda EA kaynaklı sera gazı emisyonu miktarlarının ve fosil yakıt tüketiminin içten yanmalı motorlara kıyasla daha düşük olduğu belirtilmiştir. Karasal ekosistemlerdeki asidifikasyon, tatlı sulardaki ötrofikasyon, insan sağlığına toksik etkiler ve partikül madde oluşumu gibi çevresel etkilerin ise EA'lar ile kıyaslandığında içten yanmalı motorlu araçlarda daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca EA'lar için kullanılan elektriğin yenilenebilir enerjiden sağlanmasının çevresel etkileri daha da azaltacağı belirtilmiştir.

de Souza vd. (2018) Brezilya'daki araçlar için mevcut yakıt kullanımını, hava kirliliğini ve sera gazı emisyonlarını azaltmak için yeni alternatif güç kaynaklarını değerlendirmişlerdir. Brezilya bağlamında araçların çevresel etkilerini araştırmış ve karşılaştırmışlardır. Yaşam döngüsü değerlendirmesi ile gerçekleştirilen çalışmada benzinle çalışan geleneksel içten yanmalı motorlu araç, sulu etanolle çalışan geleneksel içten yanmalı motorlu araç, benzin ve sulu etanol karışımıyla çalışan geleneksel içten yanmalı motorlu araç, plug-in hibrit EA ve akülü EA'ların kullanıldığı beş farklı durum senaryosu oluşturulmuştur.

Kim, Oh, Park, & Joo (2018) Kore'deki EA sektörünün gelişmesinde çevresel özelliklerin ve devlet desteğinin etkisini belirlemişlerdir. 285 sürücü ile gerçekleştirilen anket çalışmasının verilerini kullanarak değerlendirmeler yapılmıştır. EA'ların sağladığı ekonomik yararların sektörün gelişmesinde güçlü bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca EA'ların çevre dostu olmasının da sektörün gelişmesini olumlu yönde etkilediği savunulmuştur.

Teixeira & Sodré'nin 2018 yılında yapmış olduğu çalışma, motorlu araçların EA'larla değiştirilmesinin CO₂ emisyonları ve enerji tüketimi üzerindeki etkilerini değerlendirmektedir. AVL Cruise yazılımının CO₂ emisyonlarını, yakıt tüketimini ve enerji verimliliğini hesaplamak amacıyla kullanıldığı çalışmada, biri elektrikli, diğeri motorlu iki araç simülasyon için kullanılmıştır. Simüle edilen sonuçlarla karşılaştırma yapmak için Brezilya'daki elektrik enerjisi üretiminden elde edilen mevcut CO₂ emisyon verileri kullanılmıştır. Simülasyonlar, EA'ların elektrik enerjisi tüketiminin içten yanmalı motorlu araçların yakıt tüketiminden yaklaşık dört kat daha düşük olduğunu göstermiştir. Çalışma sonucunda, en olumsuz senaryo göz önünde bulundurularak EA'ların içten yanmalı motorlu araç filosuna göre daha az CO₂ emisyonu üreteceği savunulmuştur.

Hao, Qiao, Liu, & Zhao (2017) bir yaşam döngüsü değerlendirme çerçevesi kullanarak geri dönüşümün olmadığı koşullar altında EA üretiminden kaynaklanan enerji tüketimini ve sera gazı emisyonlarını karşılaştırmışlardır. Veri tabanı, önümüzdeki yıllarda çok sayıda elektrikli aracın kullanım ömrünün sonuna gelmesinin beklendiği Çin 2025 örneğini temel alarak oluşturulmuştur. Analize göre Çin'in EA'ların daha temiz üretimini gerçekleştirmek için EA'ların, özellikle de pillerin geri dönüşümüne öncelik vermesi önerilmiştir.

Requia, Adams, Arain, Koutrakis, & Ferguson (2017) spesifik olarak, 8 Kanada şehrinde (Vancouver, St John's, Charlottetown, Halifax, Montreal, Toronto, Regina ve Calgary) yaşam döngüsü analizini kullanarak hibrit araçların CO₂ emisyonlarını tahmin etmişlerdir. Kanada genelinde değişen elektrik üretim profillerinin CO₂ emisyonlarını azaltma potansiyelini olumlu yönde etkilediği saptanmıştır.

Canals Casals, Martinez-Laserna, Amante García, & Nieto (2016), EA emisyonlarının içten yanmalı motorlu araçlarla karşılaştırıldığında, elektrik santrali filosuna ve kullanım aşamasındaki verimliliğe bağlı olarak nasıl değiştiğinin analizine odaklanmışlardır. Bunun için Avrupa'da en çok satan elektrikli aracın elektrik üretimine ilişkin küresel ısınma potansiyeli hesaplanmıştır ve EA'lar ile içten yanmalı motorlu araçların küresel ısınma potansiyeli karşılaştırma yapılarak değerlendirilmiştir. Çalışma ile Avrupa'da birçok ülkede EA'ların yaygın kullanımının uygunluğu ele alınırken yeni bir yaklaşım olduğu da ortaya konmuştur.

Fiori, Ahn, & Rakha (2016) giriş değişkeni olarak saniye saniye araç hızı, ivmelenme ve kara yolu eğimi verilerini kullanarak EA anlık enerji tüketimini hesaplayan basit bir EA enerji modeli geliştirmişlerdir. EA enerji tüketimi modellerini geliştirmek amacıyla önerilen model, anlık araç operasyonel değişkenlerini kullanarak rejeneratif

frenleme verimliliğini hesaplamaktadır. Model, ampirik verilere göre ortalama %5,9'luk bir hata üreterek enerji tüketimini doğru bir şekilde tahmin etmiştir. Çalışma aynı zamanda farklı EA'ları karşılaştırmış ve önerilen enerji modelini kullanarak klima ve ısıtma sistemleri de dahil olmak üzere yardımcı sistemlerin araç enerji tüketim seviyeleri üzerindeki etkisini ölçmüştür.

Grunditz & Thiringer (2016) küresel çapta 40'tan fazla akülü elektrikli aracın kapsamlı bir performans analizini gerçekleştirmişlerdir. Analizde 2014 ve 2015 yıllarında ABD, Avrupa, Japonya ve Çin'de en çok satılan modellerin yanı sıra çok sayıda iki koltuklu elektrikli spor otomobil modeli de yer almaktadır. Analiz, çoğunluğu üretici spesifikasyonlarından gelen spesifikasyon verilerinin kapsamlı bir şekilde toplanmasına ve analizine dayanmaktadır. İşlenen tüm veriler, daha ileri akademik çalışmaları kolaylaştırmak için açıkça sunulmuştur. İncelenen akülü elektrikli araç modelleri arasında, spesifikasyon verilerinin büyük çoğunluğunda araç boyutları ve kütlesi, elektrik motorunun performansı, pil kapasitesi, kütle ve şarj gücü gibi kategorilere ilişkin önemli bir dağılım olduğu tespit edilmiştir.

Hofmann, Guan, Chalvatzis, & Huo (2016) içten yanmalı motorlu araçların yerine EA'ların kullanılmasının petrol ve elektrik sektörlerinde yaratacağı değişimleri ve bunun CO₂ emisyonları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çevresel girdi çıktı modeli ile gerçekleştirilen çalışmada elektrik üretim sektörünün enerji yapısını değiştirmemesi durumunda ulusal toplam CO₂ emisyonlarının değişmeyeceği kanıtlanmıştır.

De Cauwer, Van Mierlo, & Coosemans (2015) enerji tüketimi hesaplama modellerini oluşturmak için EA enerji tüketimine ilişkin gerçek dünya verilerini kullanmışlardır. Temel fiziksel model olarak araç dinamiği denkleminde dayanarak model oluşturmak için çoklu doğrusal regresyon kullanılmıştır. Kurulan ilk model, seyahat mesafesi, seyahat süresi ve sıcaklık gibi temel, kolayca bulunabilen girdi parametreleriyle tahmin yapılmasına olanak tanımaktadır. İkinci model, ayrıntılı ivme verilerini dahil ederek ilk modelin işleyişini genişletmektedir. Üçüncü model ise enerji tüketimini tahmin etmek için kinematik parametrelerin ham verilerini girdi parametresi olarak kullanmaktadır. Kurulan her üç model de gerçek verilerle test edilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Dunn, Gaines, Kelly, James, & Gallagher (2015) otomotiv lityum iyon pillerinin enerji ve çevresel etkilerini araştırmışlardır. Çalışma ile EA'ların içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla daha iyi enerji ve çevre performansı sunup sunmadığı analiz edilmiştir. Bu analiz ile düşük verimli bir tesisi yansıtan bir batarya montaj enerjisi benimsense bile,

EA'ların yaşam döngüsü bazında bir içten yanmalı motorlu araçlardan daha az petrol tükettiği ve daha az sera gazı saldıgı gösterilmiştir.

Goeke & Schneider (2015) elektrikli ticari araçlar ve geleneksel içten yanmalı ticari araçlardan oluşan karma bir filonun rotasını optimize etmek için zaman pencereli ve karma filolu EA rotalama problemini önermişlerdir. Enerji tüketiminin kat edilen mesafenin doğrusal bir fonksiyonu olduğunu varsayan mevcut elektrikli ticari araçların rotalama modellerinin aksine, hız, eğim ve kargo yük dağılımını içeren gerçekçi bir enerji tüketimi modeli kullanılmıştır. Geliştirilen modelin, elektrikli ticari araçlar bağlamında oldukça önemli olduğu, enerji tüketimi, elektrikli ticari araçların maksimum sürüş menzilini ve istasyonlardaki şarj sürelerini belirlediği savunulmuştur.

Tamayao, Michalek, Hendrickson, & Azevedo (2015) bölgesel elektrik emisyon faktörleri, bölgesel sınırlar ve şarj şemaları için alternatif varsayımlar altında, ABD'deki fişli hibrit elektrikli araçlar ve akülü elektrikli araçlar için katedilen mil başına bölgeye özgü yaşam döngüsü CO₂ emisyonlarını değerlendirmişlerdir. Farklı araç türleri için oluşturulan farklı senaryolarla oluşan CO₂ emisyon miktarları değerlendirilmiştir.

Wu, Freese, Cabrera, & Kitch (2015) EA'ların enerji tüketiminin nasıl ölçüleceği ve tahmin edileceğini değerlendirmişlerdir. İlk olarak kullanımdaki EA verilerini ve araç sürüş verilerini toplayabilen bir sistem geliştirilmiştir. Bu sistem daha sonra araştırmada test aracı olarak inşa edilen bir EA dönüşüm aracında denenmiştir. Araştırmada yaklaşık 5 aylık EA verileri toplanmıştır ve bu veriler hem EA performansını hem de sürücü davranışlarını analiz etmek için kullanılmıştır. Çalışma sonuçları, EA'nın şehir içi rotalarda sürüş yaparken otoyol rotalarında sürüşe göre daha verimli olduğunu göstermiştir.

Faria vd. (2013) geleneksel ve EA teknolojileri için çevresel ve ekonomik bir yaşam döngüsü değerlendirmesi gerçekleştirmişlerdir. Esas olarak birincil enerji kaynağı sera gazı emisyonlarına odaklanmışlardır. Araçların kullanım profili, araçlara monte edilmiş bir veri toplama sistemi tarafından elde edilen verilere dayanmaktadır. Sonuçlar, diğer teknolojilerle karşılaştırıldığında, EA'ların çevresel ve ekonomik açıdan daha sürdürülebilir olduğunu göstermektedir. Ancak EA teknolojisinde de yakıt teknolojisinin iyileştirilmesi, çevreci bir sürüş tutumu ve çevre dostu elektrik karışımı gibi üç ana faktörün gerekliliği savunulmuştur.

Hawkins, Singh, Majeau-Bettez, & Strømman (2013) Avrupa genelinde desteklenen EA'ların küresel ısınma potansiyelinde, içten yanmalı motorlu araçlara oranla %10-24 oranında bir düşüş sağladığını savunmuşlardır. Ayrıca hem elektrik hem

de ulaştırma sektöru tarafından üretilen net sera gazı emisyonlarında düşüş sağlamak için mevcut altyapının iyileştirilmesi ve yenilenebilir enerji payının artırılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Tang, Wu, & Zhang (2013) gelecek dönemler için yeni enerji araçlarının pazar payını tahmin etmek için bir lojistik eğri kullanmış ve ardından Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) 2006 raporuna göre her bir otomobilin potansiyel çevre faydalarını hesaplamışlardır. Her otomobilin toplam enerji tüketimini ve CO₂ emisyonlarının değerlendirildiği çalışma sonuçları, yeni enerji araçlarının özellikle EA'ların hedeflere ulaşmada faydalı olduğunu göstermiştir. Ancak kısa vadede etkilerinin sınırlı olacağı savunulmuştur.

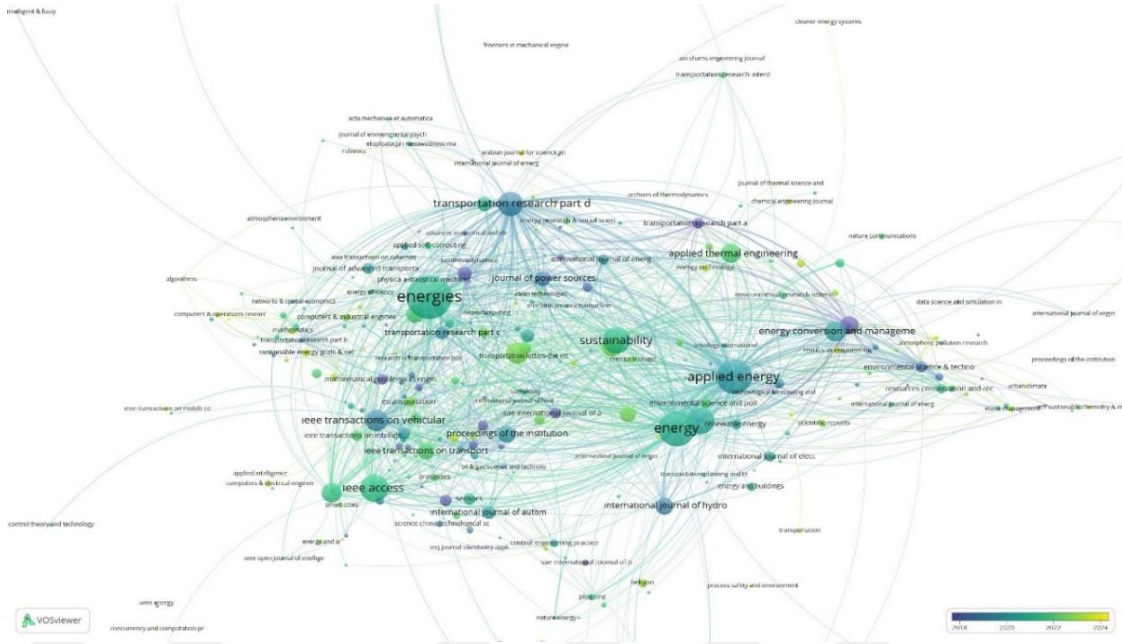
Gerssen-Gondelach & Faaij (2012) akülü EA'lara yönelik mevcut ve yeni akü teknolojilerinin geleceğini incelemişlerdir. Seçilen beş pil teknolojisi, kısa, orta ve uzun vadede pil performansı ve maliyetine göre değerlendirilmiştir. Pillerin orta vadede BEA'ların enerjik, çevresel ve ekonomik performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek için sürüş döngüsü simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda tüm piller için, orta ve hatta uzun vadede belirli enerji, güç, verimlilik, çevrim ömrü, kullanım ömrü, güvenlik ve maliyetlerle ilgili gereksinimleri eş zamanlı olarak karşılamamanın hâlâ bir zorluk olmaya devam ettiği sonucuna ulaşılmıştır.

Van Vliet, Brouwer, Kuramochi, Van Den Broek, & Faaij (2011) EA'ların şarj edilmesinin elektrik talebi, üretim ve dağıtım altyapısı üzerindeki etkisi de dahil olmak üzere, mevcut ve gelecekteki EA'ların verimliliğini, maliyetlerini ve sera gazı emisyonlarını incelemişlerdir. Mevcut ve gelecekteki EA'ların verimliliği ve maliyetlerinin yanı sıra EA şarjının elektrik talebi, üretim ve dağıtım altyapısı ve dolayısıyla sera gazı emisyonları üzerindeki etkisi ele alınmıştır. EA konfigürasyonları normal benzinli araba, dizel araba, paralel hibrit araba ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın veri seti herhangi bir ülkeye özgü değildir. Ancak elektrik talebi, elektrik üretim kapasitesi ve ulaşım talebi gibi ülkeye bağlı faktörler için Hollanda'ya ait veriler kullanılmıştır. Analizin geçerliliğini genişletmek için, tüm AB'ye ait veriler diğer ülkelerin verileri ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucu ile EA şarjından kaynaklanan emisyonlar, normal veya paralel hibrit arabalardan kaynaklanan emisyonlardan daha düşük çıkmıştır.

CO₂'nin önemli ölçüde azaltılması için büyük ölçekli sürdürülebilir enerji sistemlerinin gerekli olduğunu savunan Lund & Kempton (2008) ulaştırma sektöründeki petrol kullanımının azaltılması gerektiğini ve gerekli elektriğin de yenilenebilir enerji

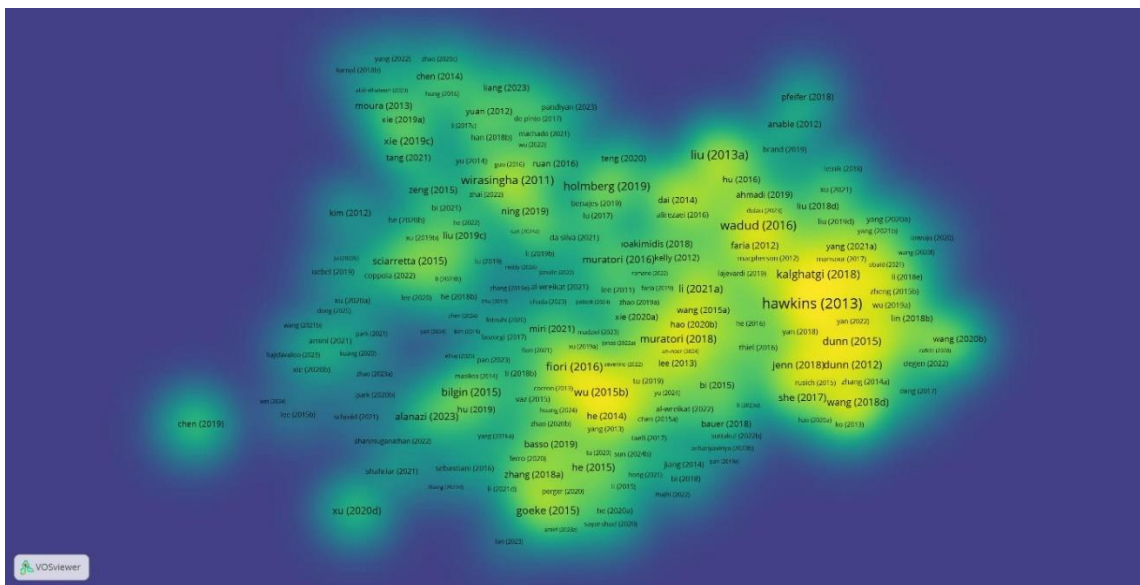
kaynaklarından elde edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Çalışmada iki ulusal enerji sistemi için model oluşturulmuştur. Oluşturulan model, elektrik, ulaşım ve ısı için enerjiyi entegre etmekte, insan ihtiyaçları ve çevredeki saatlik dalgalanmaları içermektedir. %0 ila %100 arasında değişen rüzgar nüfuzu seviyeleri altında dört tip araç filosu modellenmiştir. EA'ların şarj süresi açısından önemli esneklik sağlayan yüksek güçlü bağlantılara sahip olduğu varsayılmıştır. EA'ların ve V2G (araçtan şebekeye)'nin bu ulusal enerji sistemlerine eklenmesinin, aşırı elektrik üretimi olmadan çok daha yüksek düzeyde rüzgar elektriğinin entegrasyonuna olanak sağladığı ve ulusal CO₂ emisyonlarını büyük ölçüde azalttığı sonucuna varılmıştır.

Bibliyometrik analizin son bölümünde EA'ların neden olduğu enerji tüketiminin ve CO₂ emisyon miktarlarının değerlendirildiği 4026 İngilizce yayın elde edilmiştir. ("electric vehicle" or "electric vehicles") and ("CO₂ emission" or "energy consumption") kelimeleri ile Web of Science veri tabanında aranan 4026 yayına ait ülkeler arasındaki ilişki ağ haritası Şekil 13'te gösterilmiştir. Görsel üzerindeki veriler seçilirken atıf sayısı "2" ve üzerindeki dokümanlar seçilmiş ve çalışmaya 105 ülke arasından 90 ülke dahil edilmiştir. Şekilde ülkeler 16 kümeye ayrılmıştır. EA'ların neden olduğu enerji tüketiminin ve CO₂ emisyon miktarlarının değerlendirildiği yayınlar arasında en fazla yayın yapılan ülke Çin kendi grubundan Afganistan, Ermenistan, Belçika, Filistin ve Türkiye ile ilişki içerisindedir. ABD sahip olduğu atıf ve işbirlikleriyle EA'ların neden olduğu enerji tüketiminin ve CO₂ emisyon miktarlarının değerlendirildiği yayınlar arasında merkezde yer almakla beraber Kazakistan ile de yakın ilişki içerisindedir.



Şekil 14. Kaynak atıf analizi (enerji tüketimi ve CO₂ emisyonuna ilişkin çalışmalar)

EA'ların neden olduğu enerji tüketiminin ve CO₂ emisyon miktarlarının değerlendirildiği çalışmaların ağ haritası Şekil 15'te gösterilmiştir. Görsel üzerindeki veriler seçilirken atıf sayısı "1" ve üzerindeki dokümanlar seçilmiştir. Haritada dokümanlar 19 kümeye ayrılmıştır. Kümelerin büyüklüklerine bakıldığında Hawkins, Wadud ve Liu oldukları gruplarda en çok atıf alan yazarlardır. Harita genel anlamda her grubun altındaki yazarların kendi içlerinde birbirlerine yakın bir ilişki içerisinde olduğunu ve gruplarında birbirlerine yakın olduğunu göstermektedir.



Şekil 15. Doküman atıf analizi (enerji tüketimi ve CO₂ emisyonuna ilişkin çalışmalar)

BÖLÜM III

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR VE ÇEVRESEL ETKİLERİ

Bir araç, geleneksel içten yanmalı motorlardan daha çevre dostu olduğunda çevreye duyarlı olarak kabul edilir. Bu motorlara, HEA, Plug-in EA, yakıt hücresi, biyoyakıt vb. gibi yakıt ekonomisini iyileştiren geleneksel olmayan araçlar da dahildir. EA'nın gelişimi yüzyılı aşkın bir süredir devam etmektedir. EA'lerin gelişimi halen devam etmekte olsa da hibrit elektrikli araçlar son yıllarda ciddi ivme kazanmıştır.

Enerji bağımsızlığı ve çevre sorunlarıyla ilişkilendirilen alternatif yakıtlı araçlar, özellikle de elektrikli ve hibrit araçlar, tüm dünyada hükümet politikalarının da bir parçası haline gelmiştir. ABD, Çin gibi büyük ekonomiler, EA'ların yaygınlaşmasını hızlandırmak ve desteklemek için yeni politikalar geliştirmektedir (Situ, 2009, s.1).

3.1. Dünyada Ulaşım Sektörü ve Elektrikli Araçların Tarihi Gelişimi

EA'ların gelişimi uzun bir geçmişe sahiptir. Elektrik motorunun icadından bu yana, EA'lar 150 yıldır varlığını sürdürmektedir. Basit, şarj edilemeyen bir sistemden modern, son teknoloji bir kontrol sistemine kadar, EA'ların gelişimi Şekil 17'deki gibi üç aşamaya ayrılabilir: İlk Yıllar, Orta Dönem ve Günümüz



Şekil 17. Elektrikli araçların gelişimi

Kaynak: Chen vd., 2020, s.2

EA'lar, en eski otomobillerden biri olarak kabul edilmektedir. 1920'lerin sonlarından 1930'lara kadar benzinli araçlara kıyasla araç tescilinde 3:1'lik bir oranla başı çekmiş ve 1900'lerin başlarında kara taşıtı performans kayıtlarının başında gelmiştir. O dönemlerde EA'lar önemli bir ulaşım aracı olmuştur ve at arabalarından geliştirilmiş yerel ulaşımında yaygın olarak kullanılmıştır. 1930'a kadar süren EA liderliği, benzinli araç geliştirme tarafından geride bırakılmıştır.

Zamanla benzinli araçlar liderliği ele geçirmiş ve hem performans hem de maliyet açısından EA'ları tamamıyla geride bırakmıştır. Altyapı iyileştirmeleri ve şehirlerarası seyahat talebi, daha önce EA'ların asla yararlanamadığı daha uzun bir seyahat mesafesi gerektirmiştir. Şarj altyapısının gelişmemesi, güvenilir elektrik iletimi ve sınırlı seyahat mesafesi nedeniyle, EA'lar artık tüketici talebini karşılayamamış ve normal benzinli araçlar karşısındaki üstünlüğünü yitirmiştir. Sınırlı veya hiç elektrik altyapısı desteği olmaması, EA'lardan vazgeçilmesine neden olmuştur. Benzinin yaygın olarak keşfedilmesi ve ucuz yakıtın kolayca bulunabilmesi de benzinli araçların yaygınlaşmasına katkıda bulunmuştur. 1930'larda benzin, araç taşımacılığı için doğrudan ve ucuz bir enerji kaynağı sağlamıştır.

EA üretimi ve geliştirilmesi, 1935'te içten yanmalı motorların yaygınlaşmasıyla birlikte durma noktasına gelmiştir. OPEC ile siyasi hassasiyet, 1960'lar ve 1970'lerde enerji bağımsızlığı gerekliliğini doğurmuştur. ABD Hükümeti ve çevreciler, sektör için daha sıkı yakıt verimliliği standartlarını yeniden yürürlüğe koymuş ve bu dönemde yönetim kurulunun EA'lara olan ilgisini ateşlemiştir. 70'lerin başındaki enerji krizi, ABD Posta Servisi'ni 350 EA'lık test filosu için büyük bir sipariş vermeye yöneltmiştir. Bu, orta vadeli gelişimin en yüksek noktasıdır. Ancak, kısmen sınırlı performans, diğer hükümet öncelikleri, yönetim kurulu altyapı desteğinin eksikliği ve şirket katılımının çeşitliliği nedeniyle, bu dönemde gelişim hızla durmuştur.

Modern EA geliştirme, General Motors (GM) tarafından filo uygulamaları için üretilen EV1 tarafından domine edilmiştir. Enerji Bakanlığı tarafından finanse edilen bir programın ardından Ford, Ranger elektrikli kamyonetini geliştirmiş, Toyota Rav4 EA sağlamış ve Honda da 1990'ların sonu ve 2000'lerin başında bir EA piyasaya sürmüştür. Ancak EA'ların bu kısa süreli kullanılabilirliği, araç üretim maliyeti ve güvenlik endişelerini de içeren karmaşık bir politik, ekonomik, eğitim ve teknoloji sorunu nedeniyle ticari üretime geçememiştir.

1999'da ve 2000'lerin başında, tamamen EA'lardan yeni bir EA türü ortaya çıkmıştır. Honda, otomotiv endüstrisinde yeni bir dönüm noktası olan ilk HEA'ı Honda

Insight'ı ABD pazarına sunmuştur. Ford, "Manhattan on a Tank" etkinliği sırasında ilk Amerikan hibrit elektrikli aracı Escape SUV HEA'ı tanıtmıştır ve yoğun şehir trafiğinde depo başına 600 mil yol kat ederek ABD'de HEA'lar arasında yeni bir rekabet dönemi başlatmıştır.

2008 yılı itibarıyla, HEA satışları toplam satış hacminin %2,5'inden fazladır. Toyota, Honda ve Ford'un yeni nesil HEA'ları, güncellenmiş teknolojiyle birlikte daha da geliştirilerek 2009 yılında piyasaya sürülmüştür. Aynı zamanda yakıt verimliliği de iyileştirilmiştir. Toyota, "sinerji tahrik sistemi" ile HEA alanında hacim ve model yelpazesi açısından açık ara lider olmuştur. Honda ve Ford, tam hibrit seçenekleriyle hemen arkalarındadır. GM, "iki modlu" teknolojisini, hibrit binek otomobillerde ve kamyonetlerde de sunmaktadır.

Birçok yeni teknoloji gibi, EA geliştirme çabaları uzun zamandır mevcuttur. HEA'lar, başlangıçta benzinli araçlara iyi bir alternatif olarak görülse de yalnızca ara bir adım veya yakın vadeli bir çözüm olarak temsil edilmektedir. Ancak özellikle hükümet düzenlemelerinin ve çevresel beklentilerin, ulaşımın elektrifikasyonunun benimsenmesini hızlandırması öngörülmektedir. Bu çerçevede EA nihai hedef olmaktadır. Yolda olan yeni EA geliştirmeleriyle birlikte, özellikle güç elektroniği alanında ilgili teknolojide de muazzam bir fırsat sunacaktır (Situ, 2009, s.1-2).

Dünyadaki tüm hükümetler, vizyon ve hedefler belirleyerek EA'ların yaygınlaşmasını teşvik etmek için politikalar geliştirmektedir. Temel adım, EA'ların benimsenmesi ve gerekli altyapının geliştirilmesidir. Otomobil üreticileri de EA'ların piyasada bulunabilirliğini artırma talebini canlandırmaya yardımcı olan ve ayrıca halka açık şarj altyapısının ilk kez kullanıma sunulması için ivme sağlayan tedarik programlarıyla teşvikler geliştirmektedir. Hükümetler ayrıca, özellikle EA'lar ile daha ucuz içten yanmalı motorlu araçlar arasındaki maliyet farkını kapatmak ve şarj altyapısının erken devreye alınmasını teşvik etmek için ekonomik teşvikler sağlamaktadır. Ekonomik teşvikler genellikle, EA'ların yerel hava kirliliği açısından daha iyi performansına dayanan, EA'ların değer teklifini artıran diğer politika önlemleriyle birleştirilmektedir. Düşük ve sıfır egzoz emisyonlu araçların bulunabilirliğini artırmak için önemli teşvikler sağlayan önlemler arasında yakıt ekonomisi standartları, sıfır emisyonlu araç zorunlulukları ve kamu alım programlarının artan hedefleri yer almaktadır. Şarj altyapısıyla ilgili düzenleyici önlemler arasında yeni veya yenilenmiş binalarda ve otoparklarda EA hazırlığını sağlamak için asgari gereklilikler, şehirlerde ve otoyol ağlarında halka açık şarj cihazlarının konuşlandırılması yer almakta ve halka açık

şarj altyapısı için birlikte çalışabilirlik ve asgari kullanılabilirlik seviyeleriyle ilgili gerekliliklerle tamamlanmaktadır. Şimdiye kadar yalnızca Norveç'te gözlemlenen bu durum, EA ve şarj altyapısının konuşlandırılmasının evrimleşmesiyle birlikte, piyasalar ve altyapı olgunlaştıkça bazı politika önlemlerinin ayarlanması gerekebileceğini göstermektedir.

AB, son beş yılda birçok önemli politikayı onaylamıştır. Bunlardan bazıları, şarj altyapısının geliştirilmesi için Connecting Europe Tesisinden geri ödemesiz hibeler sağlayarak mali destek sağlamak, AB'nin Ufuk 2020 veya Avrupa Yatırım Bankası'ndan elektrikli mobilite alanında araştırma ve inovasyona odaklanan projelere destek sağlamak ve EA'ların satın alınmasını ve kullanımını teşvik etmek için olanaklar sağlamaktır. Hindistan Hükümeti, EA satın alımlarında teşvikler sunarak ve EA'lar için gerekli şarj altyapısını oluşturarak elektrikli ve hibrit araçların daha hızlı benimsenmesini teşvik etmektedir. Japonya, otomobil üreticileri ve malzeme tedarikçileri arasındaki iş birliği yoluyla, binek araç başına yaklaşık %90 oranında sera gazı emisyonlarını azaltmayı ve 2050 yılına kadar Japon otomobil üreticisi tarafından üretilen her aracı elektrikli hale getirmeyi hedeflemektedir. Çinli otomobil üreticileri için daha rekabetçi bir pazar yaratmak amacıyla otomobil endüstrisindeki yabancı yatırım şartlarını gevşetmeyi taahhüt etmiştir. Çin, yakın zamanda, üreticileri araç modellerinin yakıt tüketimi ve sürüş menziline göre pozitif veya negatif kredilerle ödüllendiren veya cezalandıran bir çift kredi düzenleme sistemi başlatmıştır. Kore Hükümeti, EA sahiplerine EA satışlarını artırmaları için çok sayıda teşvik sağlamaktadır. Otoyol geçiş ücretlerinde %50'ye varan indirim, halka açık otopark indirimleri, elektrik taban ücretinden muafiyet ve indirimli hızlı şarj ücreti bunlardan bazılarıdır. Şili ise Çin'den sonra en büyük elektrikli otobüs filosuna sahip ülke konumundadır. Toplu taşımayı 2040 yılına kadar %100, özel taşımacılığı ise 2050 yılına kadar %40 oranında elektrikleştirmeyi hedeflemektedir. Yeni Zelanda da 2050 yılına kadar tamamen EA'lara geçmeyi hedeflemektedir (Agrawal & Rajapatel, 2020, s.8-9). UEA verilerine göre dünya genelinde alınan bu önlemlerle, elektrikli otomobil satışları 2024 yılında küresel olarak artmaya devam etmiş ve %25'ten fazla artarak 17 milyon adedin üzerine çıkmıştır. EA satışları, 2024'teki tüm otomobil satışlarının %20'sinden fazlasını oluşturmuştur.

Çin, 2024 yılında küresel elektrikli otomobil satışlarının neredeyse üçte ikisini oluşturarak büyümenin öncüsü olmuştur. Ülkenin EA satışları, yaklaşık %40'lık etkileyici bir yıllık büyüme oranı kaydetmiştir. Bu büyümenin büyük bir kısmı, satışların %80 arttığı PHEA'lardan gelmiştir. Bu artış, BEA'larda yaklaşık %20'lik bir artışla

gerçekleşmiştir. Ülke pazarı, tüketicileri eski ve daha az verimli otomobillerini yeni enerji araçlarıyla değiştirmeye teşvik etmek için yaklaşık 3.000 ABD dolarına kadar sübvansiyon içeren araç takas programıyla daha da desteklenmiştir.

ABD, büyük ölçüde yeni EA modellerinin piyasaya sürülmesi ve tüketicilere finansal destek sağlayan EA vergi indirimlerinin mevcudiyeti sayesinde %10'un üzerinde satış büyümesi yaşamıştır.

AB'deki elektrikli otomobil satışları, büyük ölçüde 2023 sonunda satın alma sübvansiyonlarının kaldırıldığı Almanya'daki satışların azalması nedeniyle %6 düşmüştür. Buna karşılık, İngiltere'deki EA satışları, sıfır emisyonlu araç zorunluluğunun etkisiyle artmıştır. Sonuç olarak, İngiltere 2024 yılında Avrupa ülkeleri arasında bataryalı elektrikli otomobil satışlarında lider olarak ortaya çıkmıştır ve Almanya'yı ilk kez geride bırakmıştır.

Çin dışındaki gelişmekte olan pazarlar ve gelişmekte olan ekonomiler, EA satışlarında yıllık %80'lik önemli bir artışa tanık olmuştur. Brezilya ve Endonezya gibi pazarlarda satışlar sırasıyla %140 ve %190 artmıştır. Türkiye'de ise 2024 yılında tam elektrikli otomobil satışları yüzde 51,7 artışla toplam 99.489 adede ulaşarak pazar payını yüzde 6,8'den yüzde 10,1'e yükseltmiştir (UEA Küresel Enerji İncelemesi, 2025).

3.2. Türkiye'de Ulaşım Sektörü ve Elektrikli Araçların Tarihi Gelişimi

Küresel pazara ayak uydurmak için Türkiye EA üretmeye başlamıştır. EA üretimindeki ilk girişimler, 2000'li yılların başında TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) gözetiminde gerçekleşmiştir. 2003 yılında TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., Türkiye'nin ilk EA'sı olarak Doblo'yu tanıtmıştır. ELİT-1, hem benzin hem de elektrikle çalışabilen Türkiye'nin ilk hibrit elektrikli aracıdır. Ülkemizde, çeşitli üniversitelerde, bağımsız olarak veya sanayi ile iş birliği içinde EA ve ekipman üretimi üzerine araştırmalar yürütülmektedir (Simav & Ustabas, 2017, s.312). Türkiye'nin milli EA projesini yürütmek üzere 2019 yılında İtalya'da kurulan Türkiye Otomobil Ortak Girişim Grubu A.Ş., 2030 yılına kadar dünya otomotiv pazarına farklı modeller sunmayı hedeflemektedir. Ülkemizde fikri ve sınai hakları, tamamen SUV ve sedan modelleri üreten TOGG'a aittir.

Gelişmelerin sürdürülmesi ve EA'ların yaygınlaştırılması için şarj istasyonlarının yaygınlaşması ve geliştirilmesi önemli bir faktördür. EA'lar ve şarj istasyonları arasındaki bu doğrudan ilişki, bu araçların çekiciliğine önemli ölçüde katkıda

bulunmaktadır. Esarj, Gersan, Sharz, Voltrun ve ZES gibi çeşitli kuruluşlar, Türkiye'nin şarj istasyonu ağını genişletmek ve yollardaki EA sayısını artırmak için bu alana yatırım yapmaktadır. Türkiye'nin yatırımları özellikle İstanbul, Ankara ve İzmir gibi kentsel alanlarda yoğunlaşmıştır. Şehir merkezlerindeki yatırım yoğunluğunun temel nedenleri, araçların düşük akü kapasiteleri ve sınırlı azami seyahat mesafesi nedeniyle şehirlerarası seyahatin zorluğudur. Ayrıca, mevzuat ve yönetmelikler, EA şarj istasyonu geliştiren şirketleri kısıtlamaktadır. Otopark yönetmeliğinde yer alan yasal yaptırımlar sonucunda, elektrikli şarj istasyonu zorunluluğu, konutlara ve işyerlerine şarj istasyonları kurulmasını teşvik ederek şehir merkezindeki şarj istasyonu sayısını artırmaktadır (Demirtaş vd., 2021, s.17-18).

Türkiye, Avrupa ve Asya arasında bir kavşak noktasında yer almaktadır. Coğrafi konumu, rekabetçi, yetenekli ve ucuz iş gücü, Türkiye'yi Avrupa'nın önde gelen otomotiv üretim üslerinden biri haline getiren faktörler arasındadır. Bu sebeple Türkiye, dinamik bir araç pazarına sahip ülkelerden biridir. Güçlü otomotiv endüstrisine ve yerli araç üretiminin ülke pazarında önemli bir yere sahip olmasına rağmen, Türkiye, EA pazarında henüz emekleme aşamasındadır. Son yıllarda bazı gelişmeler ve girişimler ortaya çıkmış olsa da, kayıtlı EA sayısı hala düşüktür ve EA pazarının iyileştirilmesi ve teşviki için yasal ve siyasi destek eksikliği bulunmaktadır.

Türkiye'de 2011 yılından itibaren EA ve şarj altyapıları için çeşitli yasal düzenlemeler yapılmıştır. Bunlar arasında bazı vergi indirimleri ve devlet destekleri yer almaktadır. Türkiye ilk olarak 2011 yılında EA teşvikini uygulamaya koymuştur. Bu düzenlemeyle, içten yanmalı motorlu araçlar için %45 ile %160 arasında değişen ÖTV oranı, motor kapasitesine bağlı olarak EA için %3 ile %15 arasında belirlenmiş ve tüm EA'lar MTV'den muaf tutulmuştur. ÖTV indirimi yalnızca EA'ları kapsamakta olup hibrit elektrikli araçlar bu indirimden yararlanamamıştır. 2013 yılında, elektrik dağıtım şirketleri tarafından teknik olarak onaylanan bölgelerde ve akaryakıt istasyonlarında EA kurulması mümkün hale gelmiştir.

2018 yılına gelindiğinde daha önce %0 olarak sabitlenen MTV oranı, eşdeğer güce sahip içten yanmalı motorlu araçlar tarafından verilen MTV'nin %25'i olarak belirlenmiştir. 2018 yılında ayrıca özel otoparklarda ve alışveriş merkezi otoparklarında maksimum araç kapasitesinin 1/50'si oranında EAŞİ'lerin konuşlandırılması zorunlu hale getirilmiştir. Tüm bu girişimlere rağmen EA'lar, yetersiz şarj altyapısı, yüksek fiyatlar ve tüketicilerin teknolojiye aşina olmaması nedeniyle bugüne kadar Türkiye'de yeterli ilgiyi görememiştir.

EA'ların yakın gelecekte günlük hayatımızın bir parçası olması öngörülmektedir. Ancak, araç pazarına girme hızları her ülkede aynı olmayacaktır. Buradaki temel belirleyici kriterler, teşvikler ve yaptırımların yanı sıra bir ülkedeki satın alma gücüdür. Dünya çapında EA'lar için uygulanan temel teşvikler; satın alma sübvansiyonları, vergi indirimleri, üretim teşvikleri ve şarj altyapısıyla ilgili teşviklerdir. Ayrıca, birçok ülke içten yanmalı motorlu araçlar için satış yasağı getirmektedir. Türkiye bugün itibarıyla yalnızca vergi indirimleri (KDV, ÖTV, MTV) uygulamaktadır. Vergi indirimi güçlü bir teşvik olarak kabul edilse de, Türkiye'deki düşük satın alma gücü, EA pazarını canlandırmak için ek önlemler gerektirmektedir. "Serbest piyasa" açısından bakıldığında, bir ülkede EA geçişinin hızlı olması gerekmediği söylenebilir. Ancak, CO₂ emisyonu tehdidi gibi küresel faktörlerin yanı sıra, Türkiye'de EA'lara hızlı bir geçişi gerektiren yerel faktörler de bulunmaktadır (Gönül, Duman, & Güler, 2021, s.7-8).

Hibrit ve elektrikli araçlar, içten yanmalı araçlara kıyasla daha düşük maliyetleri, çevre dostu olmaları ve konforları nedeniyle otomotiv sektöründe popülerlik kazanmıştır. Bunun sonucunda, otomobil üreticileri elektrik destekli araç seçeneklerini hızla genişletmiş ve Türkiye'nin küresel EA pazarında yükselmesi için çalışmalar sürdürülmüştür. Türkiye'de satılan %100 EA sayısı 2011 yılında 500'ün altındayken 2012 yılında yalnızca 175 adet olarak gerçekleşmiştir. 2013 yılında yalnızca 353 adet EA satılmış, bunu 2014 yılında 412 adet, 2015 yılında 565 adet ve 2016 yılında 643 adet takip etmiştir. 2025 yılının Haziran ayına kadar ise bu rakam 265.847'ye ulaşmıştır. Şekil 18'de, EA'ların yıllar içindeki kümülatif satışları detaylandırılmaktadır (TÜİK).



Şekil 18. 2021-2025 elektrikli araç sayıları

Kaynak:TÜİK

3.3. Sürdürülebilir Ulaşım Sektörü için Elektrikli Araçlar

Enerji ve elektrik sektörü, endüstriyel üretkenliğin ve günlük yaşamın neredeyse her yönünün elektriğe bağlı olması nedeniyle dünyanın en önemli sektörlerinden biridir. Bu sektör, küresel CO₂ üretiminin %40'ından sorumlu olan küresel emisyonun büyük bir bölümünü temsil eder ve bunu ulaştırma sektörü (%24) takip eder. Önlenemeyen bir iklim değişikliğinin tahmini maliyetleri, küresel GSYİH'in %20'si kadardır. Ancak, uygun önlemler alınarak bu maliyetler GSYİH'nin yaklaşık %1'i ile sınırlandırılabilir. Sera gazı emisyonlarının neden olduğu iklim değişikliğinin, artık insanlık için potansiyel ciddi sonuçları olan gerçek bir durum olduğu yaygın olarak kabul edilmektedir ve endüstrilerin bunu stratejik planlarına dahil etmeleri gerekmektedir. Bu nedenle, çevre dostu modern bir planlama şarttır.

Günümüzde ulaştırma sektörü, petrol ürünlerine dayalı enerji modeliyle ilgili önemli zorluklarla karşı karşıyadır. Bu bağımlılık ve aşırı petrol kullanımı, iklim değişikliği ve büyük şehirlerdeki kirlilik gibi çevre sorunları, artan petrol fiyatları nedeniyle oluşan ekonomik sorunlar ve üretici ülkelerin istikrarsızlığı ve petrolün ekonomik silah olarak kullanılması nedeniyle oluşan jeopolitik sorunlar gibi birçok sorunu beraberinde getirmektedir (García-Villalobos, Zamora, San Martín, Asensio, & Aperribay, 2014, s. 717-718).

Güvenli enerji sistemleri, günün her anında talebi karşılayacak kadar üretime sahip olmalıdır. Ayrıca, beklenmedik durumlarla başa çıkmak için yeterli rezerve de sahip olmalıdırlar. Son teknolojik gelişmeler ve geleneksel yakıt kullanımının sürdürülebilirliği ve çevresel etkisi konusunda artan endişelerle teşvik edilen yenilenebilir enerji kaynaklarından önemli miktarlarda temiz ve sürdürülebilir enerji üretme olasılığı, dünya çapında ilgi uyandırmaktadır (Saber & Venayagamoorthy, 2009, s.141).

İnsanların ve malların hareket etme biçiminin, önümüzdeki yirmi yıl içinde politika, teknoloji, ekonomi, demografi ve değişen tüketici tercihlerinin bir araya gelmesiyle önemli ölçüde değişmesi öngörülmektedir. Bu değişimin önemli bir parçası olan EA'lar, ilk olarak 19. yüzyılın ortalarında, elektriğin motorlu taşıt tahriki için tercih edilen yöntemlerden biri olduğu ve o dönemin benzinli otomobillerinin sağlayamadığı bir konfor ve kullanım kolaylığı sağladığı bir dönemde ortaya çıkmıştır. Modern içten yanmalı motorlar, yaklaşık 100 yıldır motorlu taşıtlar için baskın tahrik yöntemi olmuştur. Ancak elektrik gücü trenler ve her türden küçük taşıtlar gibi diğer taşıt türlerinde yaygın olarak kullanılmaya devam etmiştir. 19 yüzyıldan bu yana çeşitli sebeplerden dolayı

sektördeki yerini koruyamayan EA'ların gelişimi, çevre koruma ve enerji tasarrufunun önemli endişeler olduğu günümüz dünyasında hız kazanmıştır (Agrawal & Rajapatel, 2020, s.8). UEA'nın 2024 verilerine göre, küresel elektrikli otomobil satışları %25'in üzerinde artarak 17 milyon adedi aşmış ve tüm otomobil satışlarının beşte birini oluşturmuştur.

Ulaştırma sektörü, birçok ülkede yoğun petrol kullanımı ve sera gazı emisyonları açısından üst sıralarda yer almaktadır. Bu nedenle, birçok ülke hızla artan enerji talebini karşılayabilecek ve sürdürülebilir ulaşım gelişimi sağlayabilecek ileri teknolojileri teşvik etmektedir. Geleneksel araçlara alternatif olarak hibrit ve ful elektrikli araç teknolojileri, petrol ve sera gazı emisyonlarını azaltmanın yanı sıra yerel hava kalitesini iyileştirmenin en umut verici yollarından biridir (Zhou vd., 2015, s.777-778).

AB tarafından hazırlanan bir rapora göre, ulaşım sektörü toplam CO₂ emisyonlarının yaklaşık %28'inden sorumluyken kara yolu taşımacılığı ulaşım sektörü emisyonlarının %70'inden fazlasından sorumludur. Bu nedenle, çoğu gelişmiş ülkenin yetkilileri, hava kirleticileri, CO₂ ve diğer sera gazlarının yoğunlaşmasını önlemek için EA'ların kullanımını teşvik etmektedir. EA'lar, geleneksel araçlara göre aşağıdaki avantajları sunmaktadır:

Sıfır emisyon: Bu tür araçlar egzoz gazı emisyonları (CO₂ veya NO₂) yaymaz. Bu araçların akü üretimi karbon ayak izini olumsuz etkilese de, üretim aşamaları daha duyarlı olmaya devam etmektedir.

Sadelik: EA motor elemanlarının sayısı daha azdır. Bu da çok daha ucuz bakım imkanları sağlamaktadır. Bu araçların motorları daha basit ve daha kompakttır.

Güvenilirlik: Daha az ve daha basit bileşenlere sahip olmaları, bu tür araçların daha az arızalanmasını sağlar. Ayrıca, EA'lar, motor patlamaları, titreşimler veya yakıt korozyonunun neden olduğu doğal aşınma ve yıpranmadan etkilenmez.

Maliyet: Aracın bakım maliyeti ve gereken elektriğin maliyeti, geleneksel içten yanmalı araçların bakım ve yakıt maliyetlerine kıyasla çok daha düşüktür.

Konfor: Titreşim veya motor gürültüsünün olmaması nedeniyle EA'larda seyahat etmek daha konforludur.

Verimlilik: EA'lar, geleneksel araçlardan daha verimlidir. Ancak, genel kuyudan tekerleğe (WTW) verimlilik, güç santrali verimliliğine de bağlı olacaktır. Örneğin, benzinli araçların toplam WTW verimliliği %11 ile %27 arasında değişirken, dizel araçların %25 ile %37 arasında değişmektedir. Buna karşılık, doğal gaz santraliyle çalışan

EA'lar %13 ila %31 arasında değişen bir atık su çevrimi verimliliği gösterirken yenilenebilir enerjiyle çalışan EA'ların %70'e varan genel bir verimlilik göstermektedir.

Erişilebilirlik: Bu tür araçlar, diğer içten yanmalı araçların girmesine izin verilmeyen kentsel alanlara (örneğin, düşük emisyonlu bölgeler) erişim sağlar. EA'lar, özellikle kirlilik seviyesinin yüksek olduğu büyük şehirlerde aynı trafik kısıtlamalarından etkilenmez (Sanguesa, Torres-Sanz, Garrido, Martinez, & Marquez-Barja, 2021, s.372-374).

3.3.1. Bataryalı Elektrikli Araçlar (BEA)

BEA, motorunu çalıştırmak için güç kaynağı olarak elektrik enerjisi kullanan bir elektrikli araçtır. Fosil yakıtlı veya hibrit araçların aksine, BEA'lar tamamen şarj edilebilir pillere dayanır. Bu nedenle çalışma sırasında karbon emisyonu üretmezler. BEA'lar, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak ve ulaşım sektörünün karbonsuzlaştırılmasını desteklemek için tasarlanmış çevre dostu bir ulaşım çözümü olarak bilinir. Bu araçlarda, tekerleklerin çalıştırılması için pillerde depolanan elektrik enerjisi mekanik enerjiye dönüştürölür (Kusuma, Ruliyanta, Kusumoputro, & Iswadi, 2025, s.71). BEA'lar %100 elektrik enerjisiyle çalışır. BEA'ların içten yanmalı motoru yoktur ve herhangi bir sıvı yakıt kullanmazlar. BEA'lar, araca kabul edilebilir bir otonomi sağlamak için genellikle büyük batarya paketleri kullanır (Sanguesa vd., 2021, s.377).

BEA'lar, benzinli içten yanmalı motor yerine yalnızca bir elektrik motoru veya çekiş motoruyla çalışır. Elektrik, genellikle araç içi şarj edilebilir pil paketleriyle ve bazı durumlarda kapasitör veya volan kullanımıyla üretilir. Pilin şarjı, PHEA'larinkine benzer şekilde, yani standart ev elektrik prizlerinde veya harici özel şarj istasyonlarında yapılabilir. HEA'larda ve PHEA'larda olduğu gibi, BEA'lar da geleneksel içten yanmalı motorlara kıyasla ulaşım sektörünün zararlı sera gazı emisyonlarında önemli bir azalma sağlama potansiyeline sahiptir. Aslında, BEA'ların emisyon azaltım seviyesi, potansiyel olarak PHEA'larinkinden çok daha yüksektir. Bu elbette, aracın pil paketini şarj edeceği belirli bölgedeki elektrik üretim sisteminin verimliliğine ve emisyon yoğunluğuna bağlıdır. Potansiyel emisyon avantajının yanı sıra, BEA'lar geleneksel benzinli araçlara kıyasla performans açısından da belirli avantajlar sağlar. Bu avantajlar, dahili yüksek güçlü akü gruplarının bir sonucudur. Bu tür akü grupları, düşük araç hızlarında yüksek torka sahip elektrik motorlarını çalıştırır. Bu da BEA'ların herhangi bir şanzıman veya

debriyaj sistemi kullanmadan geleneksel araçlara göre çok daha hızlı çalışabileceği ve hareketsiz halden daha hızlı ivmelenebileceği anlamına gelir (Poullikkas, 2015, s.1281).

BEA'lar, içten yanmalı motor veya yakıt deposuna sahip olmadıkları için sıfır emisyonlu araç olarak kabul edilirler. Hareket etmek için ihtiyaç duydukları tüm elektrik, araca entegre bir akü paketinde depolanır. Bu araçlar harici bir güç kaynağına bağlıdır, akü paketlerindeki kimyasal enerjiyi, aracın işlevlerini çalıştırmak için kullanılan elektrik enerjisine dönüştürürler. Motor doğrudan tekerleklerle bağlanabilir veya aracın torkunu ve hızını değiştirmek için faydalı olan bir şanzıman sistemi aracılığıyla bağlanabilir. Akü paketi, gerekli voltaj ve kapasiteye ulaşmasına yardımcı olmak için çeşitli seri ve paralel konfigürasyonlarda düzenlenmiş birçok hücreye sahiptir (Pergamalis, Tsampasis, Dedes, & Elias, 2024, s.1).

3.3.2. Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (YHEA)

YHEA, hidrojenden elektrik üretmek için yakıt hücresi kullanan bir elektrikli araçtır. Enerjiyi bir bataryada depolayan BEA'nın aksine YHEA, bir tankta depolanan hidrojen ile havadaki oksijen arasındaki kimyasal reaksiyon yoluyla doğrudan elektrik üretir. YHEA, bu sürecin tek yan ürünü su olduğu için sıfır emisyonlu bir çözüm sunar. Bu araçlar ana enerji kaynağı olarak yakıt hücrelerine güvenerek çalışır (Kusuma vd., 2025, s.74). YHEA'lar, sıkıştırılmış hidrojen ve havadan elde edilen oksijen karışımını kullanan bir elektrik motoruyla donatılmıştır ve bu işlemde kaynaklanan tek atık sudur. Bu tür araçların "sıfır emisyon" sağladığı düşünülse de yeşil hidrojen olmasına rağmen, kullanılan hidrojenin çoğu doğal gazdan elde edilmektedir (Sanguesa vd., 2021, s.377).

YHEA'lar, BEA'lardan farklıdır. Çünkü zaman ve emek gerektiren bir süreçte taşımaları ve şarj etmeleri gereken elektrik pilleri yerine elektrik motorlarına güç sağlamak için hidrojen kullanır. YHEA'ların temel avantajı, yalnızca yeniden doldurulabilen ve nispeten kolay taşınabilen hidrojen taşımaları gerekmesidir. BEA'lar şarjlarını, taşıdıkları ağır pillerde depolarken YHEA'lar yakıt yığını kullanarak elektriklerini gerçek zamanlı ve araçta üretirler. Bu da güç üretimi kullanımı açısından nispeten daha kolaydır.

YHEA'ların bir diğer önemli avantajı, fosil yakıtlar yerine sıkıştırılmış veya sıvılaştırılmış hidrojen dağıtan geleneksel benzin istasyonlarına benzeyen hidrojen yakıt istasyonlarında yakıt ikmallerinin yapılmasıdır. Yakıt ikmali işlemi genellikle yaklaşık beş dakika sürer. Bu nedenle bu konuda içten yanmalı motorlu araçlarla rekabet

edebilirler ve sürüş menzillerinin tek sınırı hidrojen tanklarının basıncı ve boyutudur. YHEA'lar tüm bu avantajları ile hava kalitesini iyileştirebilir ve iklim değişikliğiyle mücadelede yardımcı olabilirler.

YHEA'lar söz konusu olduğunda tek zorlu gereklilik, araç içinde yüksek basınçlı bir hidrojen tankı ve atmosferdeki oksijenle etkileşime giren bir yakıt ünitesine ihtiyaç duymalarıdır. Yakıt hücresi ünitesi, yalnızca aracı iten elektrik motorunu çalıştırmakla kalmayıp aynı zamanda hızlanma veya frenleme için ekstra güç sağlayan küçük akü veya kapasitörü de çalıştıran elektrik üretiminde kullanılır (Pergamalis vd., 2024, s.2).

3.3.3. Plug-in Hibrit Elektrikli Araçlar (PHEA)

PHEA'lar geleneksel bir yanıcı motor ve fişe takılabilir harici bir elektrik kaynağıyla şarj edilen bir elektrikli motorla çalışır. PHEA'lar, normal sürüş koşullarında yakıt tüketimlerini önemli ölçüde azaltmak için şebekeden yeterli elektrik depolayabilir (Sanguesa vd., 2021, s. 377). PHEA'lar hem elektrikle hem de benzinle çalışabilir. Bu araçların aküleri evde veya başka yerlerde sıradan bir prizle şarj edilebilir. Benzin, yalnızca uzun yolculuklarda, araçların aküleri tükendiğinde kullanılır (Waraich vd., 2013, s. 74-75).

PHEA'lar, ulaşım sektöründe yeni ve gelecek vaat eden bir teknolojidir. Temel olarak, sürüş gücü sağlamak için hem içten yanmalı motor hem de batarya paketine sahip olmaları bakımından HEA'lara benzerlerdir. Aslında, PHEA'lar, 4 kWh veya daha fazla kapasiteli bir batarya depolama sistemine, bataryayı harici bir kaynaktan şarj etme olanağına ve elektrikli modda en az 16 km sürüş kabiliyetine sahip HEA'lar olarak tanımlanır. Bu araçlar, fosil yakıtlarla ve elektrikle veya her ikisinin bir kombinasyonuyla çalışabilir ve bu da petrol bağımlılığının azalması, artan yakıt ekonomisi, artan güç verimliliği, daha düşük sera gazı emisyonları ve V2G teknolojisi dahil olmak üzere çok çeşitli potansiyel avantajlar sağlar. Verimlilik açısından, PHEA'lar, HEA'lardan daha verimli olma potansiyeline sahiptir. Çünkü içten yanmalı motorun daha sınırlı ve seçici kullanımı, toplam kombine araç verimliliğini artırır ve içten yanmalı motorun yalnızca yüksek araç hızlarında çalışarak en yüksek verimliliğine daha da yakın kullanılmasını sağlar.

Benzin, PHEA'ların çalışmasında kullanılan tipik fosil yakıttır, ancak dizel veya daha az ölçüde etanol de kullanılabilir. PHEA'lar, aküyü şarj etmek için HEA'lardaki gibi içten yanmalı motoru kullanmaz. HEA'larda ise bu, birincil şarj yöntemidir. Bunun

yerine, bu tür araçlarda, aracın 120/240 V AC standart bir elektrik prizine takılmasıyla elektrik şebekesi tarafından tamamen şarj edilebilen bir akü paketi bulunur. Ayrıca, rejeneratif frenleme de PHEA'ların bir özelliğidir ve bu özellik, araç içi bir akü şarj alternatifi de sağlayabilir. Çeşitli çalışmalar, elektrik şebekesinden şarj edildiklerinde, PHEA'ların tüm yakıt döngüleri boyunca geleneksel içten yanmalı araçlara ve HEA'lara göre daha az CO₂ ve diğer kirleticiler yayabileceğini göstermiştir. Bu nedenle, şebeke elektriğinin benzin veya dizel yakıtlardan daha temiz bir ulaşım yakıtı kaynağı olması koşuluyla, PHEA'lar birçok bölgede ulaşım sektörünün emisyon etkisini azaltabilir. Bu, elektrik üretiminde kullanılan yakıt karışımının, geleneksel bir benzinli aracın ortalama emisyonlarından daha az emisyon üretmesi gerektiği anlamına gelir. Bir HEA ile karşılaştırıldığında, bir PHEA, NO_x'te %25-55, sera gazlarında %35-65 ve benzin tüketiminde %40-80 azalma sağlayabilir. Özellikle sera gazı emisyonları açısından, PHEA'larda kullanılan elektriğin, hidroelektrik, güneş veya rüzgar gibi sıfır emisyonlu yenilenebilir enerji kaynakları da dahil olmak üzere herhangi bir enerji kaynağından gelmesi durumunda PHEA'ların sera gazı emisyonları sıfıra yakın olacaktır. Bu nedenle, PHEA'ların çevresel faydalarından tam olarak yararlanabilmek için, bunların pazara girişinin sıfır emisyonlu elektrik üretim teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla ideal olarak birleştirilmesi gerekir (Poullikkas, 2015, s.1280).

3.3.4. Hibrit Elektrikli Araçlar (HEA)

HEA'lar geleneksel bir içten yanmalı motor ve bir elektrikli motorun birleşimiyle çalışır. PHEA'larla arasındaki fark, HEA'ların şebekeye bağlanamamasıdır. Aslında, elektrik motoruna enerji sağlayan batarya, aracın içten yanmalı motorunun ürettiği güç sayesinde şarj olur. Modern modellerde, frenleme sırasında üretilen enerji sayesinde bataryalar da şarj edilebilir ve bu da kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür (Sanguesa vd., 2021, s.377).

HEA'lar, sürüş gücü sağlamak için iki farklı güç kaynağını birleştiren bir hibrit araç türüdür. Bu araçlarda güç kaynağı, geleneksel bir içten yanmalı motor ve bir akü/elektrik motoru sistemidir. Akü ve elektrik motoru sisteminin varlığı, geleneksel bir içten yanmalı araca göre daha iyi araç yakıt ekonomisi veya daha iyi performans sağlamayı amaçlamaktadır. Bu, esasen düşük verimli içten yanmalı motorun artık akü gibi çok daha yüksek verimli bir güç kaynağıyla birlikte kullanılmasıyla sağlanır. Şu anda otomotiv pazarında, farklı derecelerde bağımsız içten yanmalı motor/elektrik motoru

çalışmasına sahip çeşitli HEA türleri mevcuttur. İçten yanmalı motor ve elektrik motoru gibi bileşenlerin boyutu, HEA'nın kontrol stratejisini önemli ölçüde etkileyebilir (Poullikkas, 2015, s.1278-1279).

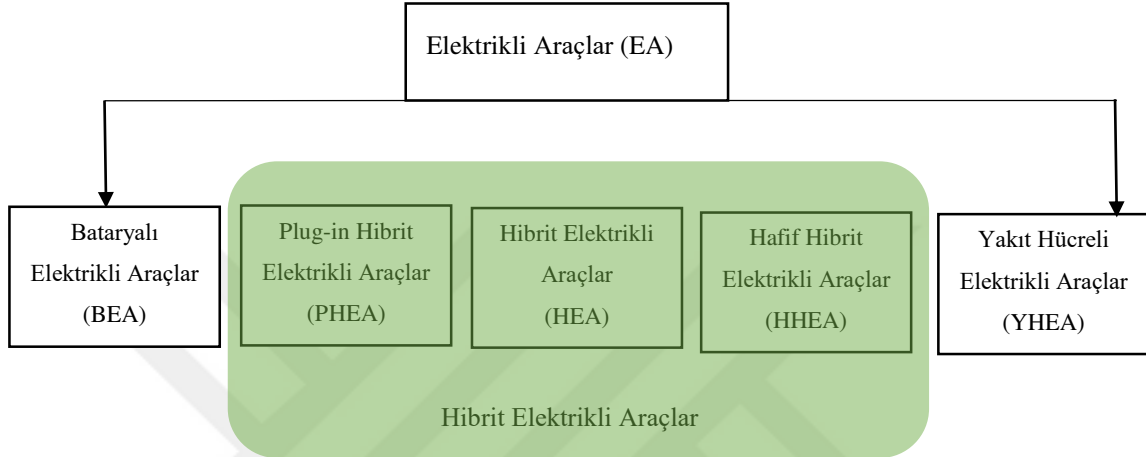
HEA, geleneksel araçlara kıyasla yakıt verimliliğini artırmak ve egzoz emisyonlarını azaltmak üzere tasarlanmıştır. Bu araçlar, maksimum verimlilik için içten yanmalı motor ve elektrik motorunun kullanımını otomatik olarak düzenleyen bir sistem kullanır. Bu sistem, HEA'nın sürüş koşullarına ve güç gereksinimlerine dinamik olarak uyum sağlamasını sağlayarak performans ve verimlilik arasında bir denge sağlar. HEA'lar, çevre dostu araçlar için erken bir çözüm olarak popüler olmalarını sağlayan çeşitli avantajlar sunar. Şarj altyapısına bağımlı olmadan, elektrikli şarj istasyonu tesislerinin bulunmadığı bölgeler de dahil olmak üzere tüm bölgelerde doğrudan kullanılabilirler. Ayrıca, HEA'lar önemli bir yakıt verimliliği sunar ve bu da yakıt fiyatlarındaki dalgalanmalar arasında bir avantajdır. Ancak, nispeten yüksek fiyatları ve hibrit teknolojisinin faydaları konusunda kamuoyunun sınırlı farkındalığı nedeniyle HEA'ların benimsenmesi hâlâ sınırlıdır. Vergi teşvikleri ve destekleyici hükümet politikaları, HEA'ların iç pazardaki çekiciliğini artırmaya yardımcı olabilir (Kusuma vd., 2025, s.73-74).

3.3.5. Hafif Hibrit Elektrikli Araçlar (HHEA)

HHEA'lar, içten yanmalı motor ve bir elektrik motoru/jeneratörüyle donatılmış araçlardır. Bu tasarım, aracın trafik ışıklarında 5 saniyeden fazla durduğunda motorun durdurulmasını ve debriyaj pedalına tekrar basıldığında motorun hemen yeniden çalıştırılmasını sağlar. HHEA'lar, içten yanmalı motora rejeneratif yavaşlama ve bir miktar yoğunluk desteği sağlayabilir, ancak yalnızca elektrikle çalışan bir itme sistemine sahip değildir. HHEA teknolojisinde, alternatörü veya marş motorunu güç aktarma sistemini destekleyen tek bir cihazla değiştirerek daha yüksek verimlilik sağlayan bir elektrikli motor kullanılır (Singh, Singh, Kumar Pundir, & Saini, 2021, s.4406). HHEA'lar araç seyir halindeyken, fren yaparken veya dururken motorun kapatılmasına ve hızlı ve temiz bir şekilde yeniden çalıştırılmasına olanak tanıyan, büyük boyutlu marş motorlarına sahip geleneksel araçlardır. Aksesuarlar, motor kapalıyken elektrik gücüyle çalışmaya devam edebilir ve motor, enerjiyi geri kazanmak için rejeneratif frenleme için kullanılır. Motor, yakıt enjekte etmeden önce motoru çalışma hızına çıkarmak için kullanılır (Momoh & Omoigui, 2009, s.1288). Diğer hibrit elektrikli araç türleriyle

karşılaştırıldığında, hafif hibrit araçlar basit bir sistem yapısı, araç şasisinde minimum değişiklik, düşük maliyet, kısa üretim döngüsü ve kolay seri üretim ile öne çıkar. HHEA'lardaki tasarım, aracın güç talebine göre güç aktarma organlarının farklı güç kaynakları arasındaki enerji akışını kontrol ederek enerji tüketimini ve emisyon kirliliğini azaltmayı amaçlar (Lv, Song, Zhang, Wang, & Qi, 2022, s.1).

Elektrikli ve hibrit elektrikli araçların genel sınıflandırılması Şekil 19'daki gibi değerlendirilir.



Şekil 19. Elektrikli araçların sınıflandırılması

İçten yanmalı motorlu araçlar ve hibrit araçlarla karşılaştırıldığında, EA'ların egzoz emisyonu olmaması gibi bir avantajı vardır. Bu da özellikle elektrik, sürdürülebilir bir şekilde üretiliyorsa sera gazı emisyonlarını azaltabilecekleri anlamına gelir. Ayrıca, bu araçlar daha geleneksel araçlar gibi bakım, yağ değişimi veya benzin dolumu gerektirmediğinden, daha düşük işletme ve bakım maliyetlerine sahiptir. BEA'lar ayrıca tasarımlarına bağlı olarak anında tork ve hızlanma avantajına sahiptir. Böylece sürücüye içten yanmalı motorlarda eş benzeri olmayan mükemmel bir sürüş ve konfor deneyimi sunabilirler.

BEA'lar vergi indirimleri, indirimler ve araç paylaşım şeritlerine erişim gibi çok çeşitli teşviklerden yararlanabilirler. Çünkü hükümetler bu teknolojinin otomobil pazarında mümkün olduğunca çok kişi tarafından benimsenmesini ve yaygınlaşmasını sağlamak istemektedir. BEA'ların temel eksikliklerinden biri, içten yanmalı ve hibrit araçlara kıyasla sınırlı sürüş menzilleridir. Bu nedenle, araç sahipleri uzun yolculuklar planlarken zorluklar ve menzil kaygısı yaşayabilmektedir. Ayrıca, ürünlerin uzun vadeli değerlemesinde pil paketleri dikkate alındığında, BEA'ların ön maliyetleri daha yüksek ve yeniden satış değerleri daha düşüktür (Pergamalis vd., 2024, s.2).

3.4. Dünya Enerjisinin Mevcut Durumu ve Çevresel Etkileri

Medeniyet, insanların ateşi yaygın olarak nasıl kullanacaklarını keşfetmeleriyle başlamıştır. Yanma sırasında odundaki karbon, O₂ ile birleşerek CO₂ oluşturur. Bu da bitkiler tarafından emilir ve tekrar yakıt olarak kullanılmak üzere karbona dönüştürülür. Odun tüm yakıt taleplerini karşılayamadığı ve başka sınırlamaları olduğu için petrol, kömür ve gaz gibi fosil yakıtların kullanımıyla sanayi devrimi başlamıştır. Bu tür yakıtların kullanımı havadaki CO₂ konsantrasyonunu artırarak küresel ısınmanın başlamasına yol açmıştır.

Dünya nüfusunun gün geçtikçe artması, gelişen sanayi faaliyetleri, teknolojiye yaşanan gelişmeler, yaşanan CO₂ konsantrasyonunu da beraberinde artırmaktadır. Dünya genelinde enerji hizmetlerine olan küresel talebin 2050 yılına kadar bir kat, birincil enerji taleplerinin ise 1,5-3 kat artması beklenmektedir. Aynı zamanda, asit yağışları, stratosferik ozon tabakasının incilmesi ve küresel iklim değişikliği gibi enerjiyle ilgili çevresel endişeler de muhtemelen artacaktır. Bu ve diğer gözlemler, enerjinin sürdürülebilir kalkınma tartışmalarında dikkate alınması gereken temel faktörlerden biri olduğunu göstermektedir. Son yirmi yılda, kamuoyu sürdürülebilir kalkınma ve küresel ısınma konusunda daha bilinçlenmiştir. Araştırmacılar ile politika yapımcılar enerji, çevre ve sürdürülebilir kalkınmayı göz önünde bulundurarak bu ve ilgili konulara odaklanmışlardır. Enerji endüstrileri ve kamuoyu tarafından diğer çevresel hususlara giderek daha fazla önem verilmeye başlanmıştır (Dincer & Rosen, 1998, s. 1305-1306).

Günümüzde gelişen teknolojik gelişmelerin hemen hepsi enerjiye bağlıdır. UEA verileri, dünyanın enerji talebinin 2024 yılında ortalamanın üzerinde bir hızla arttığını ve bunun sonucunda petrol, doğal gaz, kömür, yenilenebilir enerji ve nükleer enerji de dahil olmak üzere tüm enerji kaynaklarına olan talebin arttığını göstermektedir. Bu büyümeye enerji sektörü öncülük etmiştir ve elektrik talebi, sanayinin artan tüketimi, ulaşımın elektrifikasyonu ve veri merkezleri ile yapay zekanın büyümesi nedeniyle genel enerji talebinin neredeyse iki katı hızla artmıştır.

Enerji sektöründen kaynaklanan CO₂ emisyonları 2024 yılında da artmaya devam etmiştir. Ancak bu artış 2023'e göre daha yavaş bir oranda gerçekleşmiştir. Bunun temel nedeni gerçekleşen rekor sıcaklıklardır. Aynı zamanda, yeni bir analize göre, temiz enerji teknolojilerinin hızla benimsenmeye devam etmesi emisyon artışını sınırlandırmaktadır ve yılda 2,6 milyar ton ek CO₂ emisyonunun önüne geçmektedir.

Küresel enerji talebi 2024 yılında %2,2 oranında artmıştır. Bu artışa, rekor sıcaklıklar, elektrifikasyon ve dijitalleşmenin etkisiyle küresel GSYİH'deki %3,2'lik büyümenin oldukça üzerinde, %4,3 oranında artan elektrik talebiyle enerji sektörü öncülük etmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları, küresel enerji arzındaki büyümenin en büyük payını (%38) oluştururken bunu doğal gaz (%28), kömür (%15), petrol (%11) ve nükleer (%8) izlemiştir.

2024 yılında, küresel elektrik üretimindeki büyümenin %80'i yenilenebilir kaynaklar ve nükleer enerjiden sağlanmıştır. Bu kaynaklar, toplam üretimin %40'ını oluştururken yenilenebilir enerji kaynakları tek başına %32'sini sağlamıştır. Yeni yenilenebilir enerji tesisleri, 22. kez üst üste rekor seviyelere ulaşmıştır ve 2024 yılında yaklaşık 700 GW toplam yenilenebilir enerji kapasitesi eklenmiştir. Güneş fotovoltaik santralleri ve rüzgardan elde edilen üretim rekor bir şekilde 670 TWh artarken doğal gazdan elde edilen üretim 170 TWh, kömürden elde edilen üretim ise 90 TWh artmıştır. AB'de, güneş fotovoltaik santralleri ve rüzgardan sağlanan üretimin payı, ilk kez kömür ve gazın toplam payını geçmiştir. ABD'de, güneş fotovoltaik santralleri ve rüzgarın payı %16'ya yükselerek kömürün payını geçmiştir. Çin'de ise güneş fotovoltaik santralleri ve rüzgarın payı toplam üretimin yaklaşık %20'sine ulaşmıştır (*UEA Küresel Enerji İncelemesi*, 2025).

3.5. Türkiye Enerjisinin Mevcut Durumu ve Çevresel Etkileri

Türkiye'deki enerji sektörünün temel politika kurumu Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB)'dir. Görevi, ülkenin kısa ve uzun vadeli enerji ihtiyaçlarını belirlemek ve talebi karşılamak için yeterli arzı sağlamak üzere gerekli politikaların oluşturulmasına yardımcı olmaktır.

UEA'nın Türkiye analizlerine göre fosil yakıtlar, özellikle petrol ve gazda ithalata büyük bir bağımlılıkla Türkiye ekonomisini yönlendirmeye devam etmektedir. Türkiye, petrol ve gaz ithalatına olan bağımlılığını azaltmak için yerli arama ve üretim faaliyetlerinin genişletilmesine öncelik vermektedir. Ancak, üretim kaynaklarına getirilen sınırlamalar ve emisyon azaltımı göz önünde bulundurulduğunda, Türkiye'nin ulaştırma sektöründe verimlilik iyileştirmeleri ve yakıt değişimi gibi maliyet açısından optimum talep önlemlerine de gereken önemi vermesi gerekmektedir. Türkiye'de ulaşım sektörü neredeyse %98 oranında petrole bağımlıdır. Türkiye'nin yenilenebilir enerjide sadece

elektrikte değil, ısıtma gibi diğer sektörlerde de daha iddialı bir büyüme hedeflemesi gerekmektedir.

Türkiye, son on yılda yenilenebilir enerji kaynaklarında (özellikle güneş, rüzgar ve jeotermal) etkileyici bir büyüme yaşamıştır. Bu büyüme, elverişli kaynak zenginliği, güçlü enerji talebi artışı ve destekleyici hükümet politikaları sayesinde gerçekleşmiştir. Özellikle, yenilenebilir elektrik üretimi son on yılda neredeyse üç katına çıkmış ve toplam enerji üretimindeki payı 2024'te %46'ya ulaşmıştır. Türkiye, yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşmasını teşvik etmeye devam etmeyi hedeflemektedir ve 2017-2027 döneminde her biri 10 gigawatt (GW) güneş ve rüzgar kapasitesi devreye alacaktır.

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) uyarınca Türkiye, sera gazı emisyonlarını 2030 yılına kadar olağan işleyiş seviyesinden %21'e kadar azaltmayı taahhüt etmiştir. Türkiye'nin büyüyen ekonomisi ve kalkınma düzeyi, emisyon seviyelerini mevcut seviyelerden düşürme kabiliyetini sınırlamaktadır ve bu da ülkeyi, mevcut seviyelerden bir miktar emisyon artışına izin veren olağan işleyiş temel çizgisini tercih etmeye yöneltmiştir. Güneş ve rüzgar dahil olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarının genişletilmesi, hedeflere ulaşmak için kritik bir bileşendir (*UEA Küresel Enerji İncelemesi*, 2025).

BÖLÜM IV

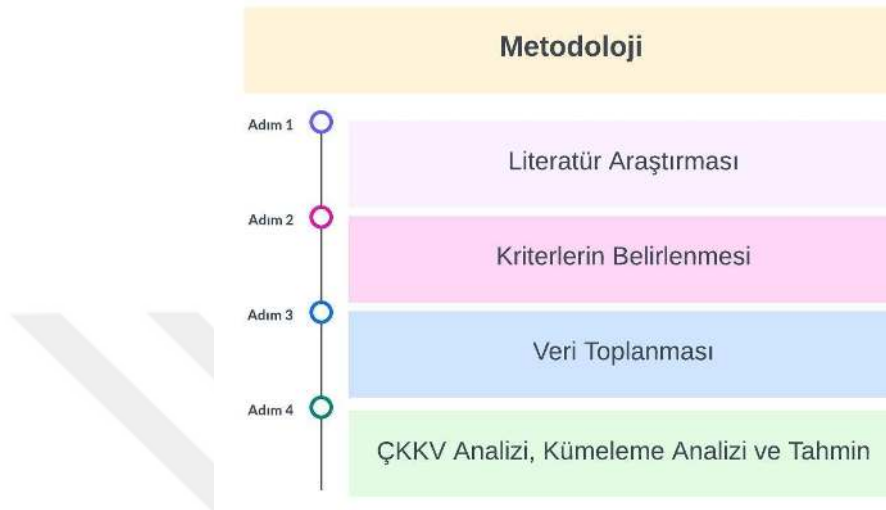
YÖNTEM

4.1. Araştırma Verilerinin Toplanması ve Analizi

38 OCED ülkesinin ekonomik durumu, elektrik enerjisi faaliyetleri, elektrik enerjisi faaliyetlerinin yarattığı çevresel etkiler ve yenilenebilir enerji kaynaklarına adaptasyonunu değerlendirmek amacıyla, araştırma prosedürüne ilişkin metodoloji Şekil 20'deki aşamaları içerecek şekilde önerilmiştir. Araştırma kriterleri belirlenirken kapsamlı bir literatür araştırması gerçekleştirilmiştir. Sueyoshi, Mo, & Wang (2022) ülkelerin sürdürülebilir kalkınmasını değerlendirmekte ve yenilenebilir enerjinin ülke düzeyinde sürdürülebilirlik üzerindeki etkisini veri zarflama analizi ile incelerken enerji kullanımı, GSYİH ve CO₂ emisyonu değişkenlerini kullanmışlardır. Aytekin (2022) ülkeleri enerji, çevre ve sürdürülebilirlik açısından değerlendirirken yenilenebilir enerji üretimi, hava kalitesi, iklim değişikliği, çevresel duyarlılık gibi değişkenleri tercih etmiştir. Troldborg, Heslop, & Hough (2014) yenilenebilir enerji teknolojilerinin sürdürülebilirliğini ÇKKV ile değerlendirirken toplam güç üretimi, CO₂ emisyonu gibi değişkenleri kullanmışlardır. Phillis, Grigoroudis, & Kouikoglou (2020) 43 Avrupa ülkesinin sürdürülebilirlik performansını ve sürdürülebilir enerji sistemlerini değerlendirirken CO₂ emisyonu, kişi başı GSYİH, yenilenebilir enerji kaynaklarının payı, kişi başı enerji kullanımı, hava kirliliği gibi kriterlerden yararlanmışlardır. Tabrizi, Yousefi, Abdoos, & Ghasempour (2025) G7 ülkelerinin yenilenebilir enerjiye adaptasyonunun ÇKKV ile değerlendirmek için kişi başına yenilenebilir enerji üretim kapasitesi oranı, küresel ısınmanın GSYİH'ya etkisi, yenilenebilir enerji yatırımı, GSYİH başına karbon emisyonları gibi değişkenleri kullanmışlardır. Dugo, Gálvez-Ruiz, & Díaz-Cuevas (2025), 30 Avrupa ülkesini 2004–2018 dönemine ait GSYİH, sera gazı emisyonu, enerji verimliliği, yenilenebilir enerjinin payı, birincil enerji tüketimi gibi kriterlerle ekonomik yapı, enerji arz politikası ve enerji tüketimi açısından kümeleme analizi ile gruplandırmışlardır. Włodarczyk vd. (2021) AB ülkelerinde sürdürülebilir kalkınma ile yenilenebilir enerji kaynakları arasındaki ilişkiyi incelerken enerji verimliliği, elektrikte yenilenebilir enerjinin payı, sera gazı emisyonlarının enerji tüketimi yoğunluğu gibi kriterlerden yararlanmışlar ve ülkeleri gruplamak için kümeleme analizi gerçekleştirmişlerdir. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde ülkelerin ekonomik durumu, elektrik enerjisi faaliyetleri, elektrik enerjisi faaliyetlerinin yarattığı çevresel

etkiler ve yenilenebilir enerji kaynaklarına adaptasyonu değerlendirilirken sıklıkla ÇKKV yöntemlerine ve kümeleme analizine başvurulmuştur. Bu sebeple bu araştırmada ülke performansları değerlendirilirken bu iki yöntem tercih edilmiştir. Çalışma üç aşamadan oluşmaktadır. Analizlerde tercih edilen performans değişkenleri literatürden yararlanılarak belirlenmiştir. Öncelikle TÜFE (V1), yıllık CO₂ emisyonları (V2), GSYİH için satın alma gücü pariteleri (V3), yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretiminin payı (V4), kişi başı GSYİH (V5), birincil enerji tüketimi-Twh (V6), elektrik üretimi- Twh (V7), yıllık sıcaklık anomalisi (V8) ve elektrik üretiminin karbon yoğunluğu- gCO₂ (V9) gibi kriterlerle ülkelerin performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Kapsamlı bir literatür araştırmasının ardından geçmiş kaynaklara dayanarak çalışmanın değişkenleri belirlenmiştir. Yıllık CO₂ emisyonları (V2), yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretiminin payı (V4), birincil enerji tüketimi-Twh (V6), elektrik üretimi- Twh (V7), yıllık sıcaklık anomalisi (V8) ve elektrik üretiminin karbon yoğunluğu- gCO₂ (V9) değişkenleri Our World in Data resmi sitesinden, TÜFE (V1) ve GSYİH için satın alma gücü pariteleri (V3) değişkenleri OECD resmi sitesinden elde edilirken kişi başı GSYİH (V5) değişkeni IMF resmi sitesinden elde edilmiştir. 38 ülke için 9 farklı değişkenle analiz gerçekleştirilen çalışmada Kosta Rika, bazı verilerinin eksikliğinden kaynaklı araştırmaya dahil edilememiştir. Kriterlerin birbiriyle ilişkilerinin değerlendirilmesi için korelasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Ardından kriter ağırlıklarının belirlenmesi için bir ÇKKV tekniği olan CRITIC yönteminden yararlanılmıştır. Kriter ağırlıklarının belirlenmesinin ardından 2012, 2017 ve 2022 yıllarında önem sıralaması pek değişmeyen yıllık CO₂ emisyonları (kişi başı), elektrik üretimi (TWh), yıllık sıcaklık anomalisi, GSYİH (kişi başı) ve elektrik üretiminin karbon yoğunluğu kriterleri ile ülkeleri gruplara ayırmak adına K-ortalamalar algoritması kullanılarak kümeleme analizi gerçekleştirilmiştir. Kümeleme analizi ile birbirine yakın performans sergileyen ülkelerin değerlendirilmeleri üçlü ve dörtlü kümeleme sonuçlarına göre ayrı ayrı yapılmıştır. Kümeleme analizi ile birbirine yakın performans sergileyen ülkeler, üçlü ve dörtlü kümeleme analizi için kendi ülke grupları içerisinde COPRAS yöntemi ile sıralanmıştır. Çalışmanın diğer aşamasında analizdeki OECD ülkelerinin kendi küme grupları içerisinde EA'lara adaptasyonlarını incelemek adına üçlü ve dörtlü küme analizi doğrultusunda değerlendirilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır. Araştırmanın son aşamasında Türkiye'nin gelecek dönemlerdeki kara yollarındaki otomobil sayıları, yakıt türleri de baz alınarak farklı tahmin yöntemleri ile tahmin edilmiştir. 4 farklı tahmin modeli kullanılarak gerçekleştirilen tahminleme algoritmaları için Python programlama

dilinden yararlanılmıştır. Tahmin edilen olası araç sayılarına bağlı olarak gelecek dönemlerdeki ulaşım sektöründen kaynaklı ortaya çıkacak CO₂ emisyon miktarları tespit edilmiştir. Ulaşımında kullanılacak tahmini EA'lar için gerekli olan enerji talebinin yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesinin çevre ve sürdürülebilir bir gelecek açısından ne gibi yararlar sağlayacağı tartışılmıştır.



Şekil 20. Araştırma metodolojisi

4.2. Korelasyon Analizi

Ülkelerin yenilenebilir enerji kaynaklarına adaptasyonunu etkileyen değişkenlerin ilişkileri korelasyon analizi ile incelenmiştir. Korelasyon analizi, iki veya daha fazla değişkenin birbirleriyle ne kadar ilişkili olduğunu ifade eden istatistiksel bir yöntemdir. Değişkenler arasındaki doğrusal ilişkilerin büyüklüğü ve yönü tahmin edilir. Bu analiz yalnızca değişkenler arasındaki ilişkiyi araştırmak içindir ve değişkenler arasındaki nedensellik ilişkisini ortaya çıkarmak için uygun değildir.

İki değişkenli, kısmi ve çoklu korelasyon analizleri, korelasyon analizinin en yaygın kullanılan çeşitleridir. İki değişkenli korelasyon, iki değişken arasındaki ilişkiyi ölçerken kısmi korelasyon, üçüncü bir değişkenin etkisini dikkate alarak iki değişken arasındaki ilişkiyi inceler. Çoklu korelasyon analizi ise sonuç değişkeni ile diğer değişkenlerin birleşik etkisi arasındaki korelasyonu inceler.

Aralık/oran değişkenleri arasındaki korelasyonu ölçmek için en yaygın kullanılan katsayı, doğrusal bir ilişkinin büyüklüğü ve yönü için bir ölçü sağlayan Pearson korelasyon katsayısıdır. Bu katsayı, -1,00 ile +1,00 arasında değişmektedir. Sıfır korelasyon katsayısı, değişkenler arasında doğrusal bir ilişki olmadığını gösterir; -1,00,

mükemmel bir negatif doğrusal ilişkiyi belirtir ve +1.00, mükemmel bir pozitif doğrusal ilişkiyi belirtir (Prematunga, 2012, s.196).

4.3. Kümeleme Analizi

Araştırmada ele alınan ülke topluluğu, performans kriterlerine göre kümeleme analizi ile gruplandırılmıştır. Kümeleme analizi, yaygın kullanılan veri madenciliği yöntemlerinden biridir. Anlamsız ve yığın halindeki verilerden trendler, özellikler veya modeller gibi ilginç ve değerli bilgilerin çıkarılması anlamına gelen veri madenciliği, verilere yeni bir bakış açısı sağlamak için istatistik, makine öğrenimi, veritabanı yönetimi ve veri görselleştirmenin kesiştiği çok disiplinli bir analiz alanıdır. Çeşitli algoritmalarla, yığın halindeki anlamsız verilerden yorumlanabilen anlamlı sonuçlar çıkaran veri madenciliği yöntemlerinin en popülerlerinden biri, kümeleme analizidir.

Veriyi birbirine benzeyen alt kümelerle ayırma işlemine kümeleme adı verilir. Kümeleme analizinde bir dizi veri nesnesi alt kümeler halinde bölünür. Bölünen her kümedeki nesneler birbirine benzer ancak diğer kümelerdeki nesnelere benzemez (Özkan, 2008, s.155). İstatistik, örüntü tanıma, makine öğrenimi ve veri madenciliği gibi birçok alanda aktif araştırma konusu olan kümeleme analizi, belirli bir veri veya nesne kümesinin gruplara ya da sınıflara bölünmesidir. Kümeleme analizinin amacı benzer nesneleri bir arada gruplamaktır. Kümeleme analizinde hiyerarşik kümeleme, bölüm tabanlı kümeleme, yoğunluk tabanlı kümeleme, yapay zeka tabanlı kümeleme gibi birçok yöntem uygulanmaktadır (Kuo, Wang, Hu, & Chou, 2005, s.1710).

Kümeleme yöntemleri genel olarak hiyerarşik ve hiyerarşik olmayan kümeleme yöntemleri olarak iki ana başlık altında toplanır. Çalışma kapsamında hiyerarşik olmayan kümeleme yöntemlerinden K-ortalamlar yöntemi ele alınacaktır.

- **K-ortalamlar Yöntemi**

K-ortalamlar yönteminde kümenin merkezi, kümedeki tüm verilerin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanır (Soni Madhulatha, 2012, s.721).

K-ortalamlar yönteminin işlem adımları şu şekildedir:

- 1)Öncelikle K küme sayısı belirlenir.
- 2)Belirlenen her bir kümenin merkezi belirlenir ($M_1, M_2, M_3 \dots \dots M_n$).
- 3)Kümelerin merkez değerleri (M_k) ile gözlem değerleri arasındaki uzaklıklar hesaplanır. Gözlem değeri hangi merkeze yakın ise o merkezin kümesine dahil edilir.

4)Kümelerde herhangi bir değişiklik olmayıncaya kadar ikinci ve üçüncü adımlara devam edilir (Özkan, 2008, s.149-150).

✓ N örnekli kümelerin olduğu, N boyutlu bir uzayın $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ biçiminde k kümeye ayrıldığı varsayılın. $\sum n_k = N$ ($k = 1, 2, \dots, k$) olmak üzere C_k kümesinin ortalama vektörü M_k Denklem (1)'deki gibi hesaplanır:

$$M_k = \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} X_{ik} \quad (1)$$

✓ X_k değeri C_k kümesine ait olan i. veridir. Her iterasyonda minimize edilmesi amaçlanan kare hata değeri, her küme için hesaplanır. C_k kümesi için kare hata her bir C_k örneği ile onun merkezi arasındaki Öklid uzaklıkları toplamıdır. Kare hata değeri Denklem (2)'deki gibi hesaplanabilir:

$$e_i^2 = \sum_{i=1}^{n_k} (X_{ik} - M_k)^2 \quad (2)$$

✓ K kümesini içeren bütün kümeler uzayı için kare hata değeri, küme içindeki değişimlerin toplamıdır. Söz konusu değer Denklem (3)'teki gibi hesaplanır:

$$E_k^2 = \sum_{k=1}^K e_k^2 \quad (3)$$

4.4. ÇKKV Yöntemleri

Çalışmada değişkenlerin ağırlıklarının belirlenmesi için bir ÇKKV yöntemi olan CRITIC yönteminden, sıralama içinse COPRAS yönteminden yararlanılmıştır.

4.4.1. CRITIC Yöntemi

CRITIC yöntemi, bir korelasyon yöntemidir. Sütunlardaki seçeneklerin sıralı kriter değerlerinin standart sapmaları ve tüm eşleştirilmiş sütunların korelasyon katsayıları kriter karşıtlıklarını belirlemek için kullanılır (Pamucar, Žižović, & Đuričić, 2022, s.365). CRITIC yöntemi beş aşamadan oluşur ve yönteme ait adımlar aşağıdaki gibidir (Diakoulaki, Mavrotas, & Papayannakis, 1995, s.765):

Aşama 1: Karar Matrisinin Oluşturulması

Karar matrisi farklı alternatiflere karşılık gelen kriter değerlerini içerir. Denklem (4)'teki gibi oluşturulur.

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

x_{ij} , i. alternatifin j.kriter değerini ifade eder.

Aşama 2: Karar Matrisinin Normalizasyonu

Normalizasyon işleminde maksimizasyon yönlü kriterler için Denklem (5), minimizasyon yönlü kriterler için Denklem (6)'dan yararlanılır.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (5)$$

$$r_{ij} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (6)$$

Aşama 3: İlişki Katsayı Matrisinin Oluşturulması

Değerlendirme kriterleri arasındaki ilişkilerin derecesini ölçmek için kullanılan ilişki katsayıları (ρ_{jk}) Denklem (7)'deki gibi hesaplanır.

$$\rho_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j) \cdot (r_{ik} - \bar{r}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j)^2 \cdot \sum_{i=1}^m (r_{ik} - \bar{r}_k)^2}} \quad j, k = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

Aşama 4: C_j Değerlerinin Hesaplanması

Her iki özelliği birleştiren ve j.kriterde bulunan toplam bilgiyi ifade eden C_j , normalize edilmiş karar matrisinin sütun değerlerinin standart sapması σ_j da kullanılarak hesaplanır. Bu işlemler için Denklem (8) ve Denklem (9)'dan yararlanılabilir.

$$C_j = \sigma_j \sum_{k=1}^n (1 - \rho_{jk}) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j)^2}{m - 1}} \quad (9)$$

Aşama 5: Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması

Kriterlere ait nesnel ağırlıklar Denklem (10) yardımıyla hesaplanabilir.

$$W_j = \frac{c_j}{\sum_{k=1}^n c_k} \quad j, k = 1, 2 \dots n \quad (10)$$

Nesnel ağırlık değerleri büyükten küçüğe sıralanır. Ortaya çıkan en yüksek ağırlığa sahip kriterin daha önemli olduğu sonucuna ulaşılır.

4.4.2. COPRAS Yöntemi

COPRAS yöntemi ilk olarak Zavadskas ve Kaklauskas tarafından ÇKKV yöntemi olarak ortaya atılmıştır. COPRAS yöntemi, alternatiflerin önem ve fayda derecesi açısından aşamalı olarak sıralanması ve değerlendirilmesi prosedürünü kullanır (Organ & Yalçın, 2016, s.103). COPRAS, kriterlerin doğasını göz önünde bulundurarak ağırlıklı aritmetik işlemler fikriyle çalışan bir fayda tabanlı sıralama yaklaşımıdır. Yöntem sadeliği nedeniyle, karar problemlerini çözmek için birçok araştırmacı tarafından tercih edilmektedir (Venkata Ramana, Krishankumar, Trzin, Amritha, & Pamucar, 2022, s.4).

COPRAS yöntemi 7 aşamadan oluşur. Yöntemin aşamaları şu şekildedir (Organ & Yalçın, 2016, s.104-105):

Aşama 1. Karar Matrisinin Oluşturulması

Tüm çok kriterli karar verme problemlerinde olduğu gibi öncelikle karar matrisi oluşturulur. Karar matrisi Denklem (11)'deki gibidir:

$$D = \begin{matrix} A_1 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Aşama 2. Karar Alma Matrisinin Normalizasyonu

Dikkat edilen alternatiflerin performanslarını karşılaştırılabilir boyutsuz değerlere dönüştürmek için normalizasyon prosedürü kullanılır. COPRAS yönteminde normalizasyon için Denklem (12)'deki formül kullanılır:

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (12)$$

Burada x_{ij} , j'inci kritere göre i'inci alternatifin performansı, $\tilde{x}_{ij}$ normalize edilmiş değeri ve m alternatif sayısıdır.

Aşama 3. Ağırlıklandırılmış Normalleştirilmiş Karar Alma Matrisinin Belirlenmesi

Normalleştirilmiş karar alma matrisi oluşturulduktan sonraki aşama, Denklem (13)'teki formül kullanılarak ağırlıklı normalleştirilmiş karar alma matrisinin oluşturulmasıdır:

$$D' = d_{ij} = x_{ij}^* \cdot w_j \quad (13)$$

Aşama 4. Her Alternatif için Maksimize ve Minimize Etme Endeksinin Hesaplanması

Bu aşamada her alternatif, Denklem (14) ve (15) ile maksimize ve minimize etme endeksi olarak kategorize edilir:

$$S_{i+} = \sum_{j=1}^k d_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, k \text{ maksimizasyon endeksi} \quad (14)$$

$$S_{i-} = \sum_{j=k+1}^n d_{ij} \quad j = k + 1, k + 2 \dots, n \text{ minimizasyon endeksi} \quad (15)$$

Aşama 5. Her alternatifin bağıl ağırlığının hesaplanması

i-inci alternatifin bağıl ağırlığı Q_i Denklem (16)'daki gibi hesaplanır:

$$Q_i = S_{i+} + \frac{\min_i S_{-i} \sum_{i=1}^m S_{-i}}{S_{-i} \sum_{i=1}^m \frac{\min_i S_{-i}}{S_{-i}}} \quad (16)$$

Aşama 6. Alternatiflerin öncelik sırasını belirleyin

Karşılaştırılan alternatiflerin öncelik sırası Denklem (17)'ye göre belirlenir. Daha yüksek göreceli ağırlığa sahip alternatif daha yüksek önceliğe (sıralamaya) sahiptir ve en yüksek göreceli ağırlığa sahip alternatif en kabul edilebilir alternatiftir.

$$A^* = A_i \max_i Q_i \quad (17)$$

Aşama 7. Her Alternatif İçin Performans Endeksi (Pi) Değerinin Hesaplanması

Son bölümde, Pi değerleri Denklem (18) kullanılarak hesaplanır:

$$P_i = \frac{Q_i}{Q_{\max}} 100\% \quad (18)$$

Yüzde oranı 100'e en yakın olan alternatif en iyi olanıdır. Alternatiflerin sıralaması büyükten küçüğe doğru yapılır.

4.5. Tahmin Yöntemleri

Bu çalışmada birden fazla tahmin yönteminden yararlanılmıştır. Bu bölümde kullanılan modellere ilişkin detaylar yer almaktadır. Modellerin genel yapıları ve formülasyonları ayrı ayrı verilmiştir.

4.5.1. Holt Winters Yöntemi

Standart Holt-Winters yöntemi Winters tarafından ortaya atılmıştır. Winters yöntemi, mevsimsel zaman serilerini doğrudan analiz edebilen birkaç üstel düzeltme yönteminden biridir. (Saleh Al-Hafid & Hussein Al-maamary, 2012, s.17). Holt-Winters yöntemi, bir zaman serisinin üç temel bileşeninin değerlerini tahmin etmek için basit üstel düzeltmeyi kullanır: seviye (ortalama değer), trend ve mevsimsellik (Kotsialos, Papageorgiou, & Poulimenos, 2005, s.134). Bu yöntem, bazı rastgele dalgalanmaları ortadan kaldırırken aynı zamanda mevsimsellik eğilimini de düzeltir. Her dönemin verilerine farklı ağırlıklar verir ve gelecekteki gelişme eğilimini makul bir şekilde tahmin eder (Shuai Wang, Wei, Li, Wang, & Wei, 2022, s.1264). Holt-Winters, uzun vadeli tahminleri de öngörebilen mevsimsellik verileri için daha uygundur. Çarpımsal etki varsayımı ve bağımlılık etkisi varsayımı olmak üzere iki varsayımdan oluşur. Çarpımsal etki, mevsimsel değişimin büyüklüğünün veri serisinin artış seviyesine göre artması anlamına gelir. Bağımlılık etkisi ise, değişimin mutlak büyüklüğünün birbirinden bağımsız olması anlamına gelir (Lip vd., 2020, s.45).

Holt Winters yöntemi, verilerdeki mevsimsel etkiyi doğrudan analiz edebilir. Üstel düzeltme yöntemlerinden biridir. Yöntemin formülasyonu üç ayrı denklemden oluşur: trend, seviye ve mevsimsellik. Mevsimsel denklem, toplamsal veya çarpımsal olmalıdır. Planlanan analizde, mevsimsel etki trendle birlikte düzenli bir artış veya azalış gösteriyorsa çarpımsal mevsimsel yöntemin, mevsimsellik etkisi düzensiz bir eğilimle

artış veya azalış gösteriyorsa toplamsal mevsimsel yöntemin kullanılması önerilir (İmece, 2019, s.23).

4.5.1.1. Çarpımsal Mevsimsel Holt Winters Yöntemi

Çarpımsal mevsimsel Holt Winters yöntemi için kullanılan genel formüller Denklem (19), (20), (21) ve (22)'deki gibi yazılabilir:

$$L_t = \alpha \frac{Y_t}{S_{t-s}} + (1 - \alpha)(L_{t-1} + b_{t-1}) \quad (19)$$

$$b_t = \beta(L_t + L_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1} \quad (20)$$

$$S_t = \gamma \frac{Y_t}{L_t} + (1 - \gamma)S_{t-s} \quad (21)$$

$$F_{t+m} = (L_t + b_t m)S_{t-s+m} \quad (22)$$

Burada;

α, β, γ : Sipariş parametreleri

t : Zaman periyodu

y_t : t zamanındaki gözlem

s : Mevsimsel uzunluk

L_t : t zamanındaki seviye bileşeni

b_t : t zamanındaki trend bileşeni

S_t : t zamanındaki mevsimsel bileşen

F_{t+m} : m periyodundaki tahmin değerini ifade eder.

Denklem (22)'deki tahmin denklemi, üç bileşeni de içeren bir denklemdir. Bu bileşenler de (19), (20) ve (21)'deki denklemlerle hesaplanır ve her bileşen denklemi (α, β, γ) sıra parametrelerini içerir. İlk olarak, algoritma hesaplamasını yapabilmek için bileşen değerlerinin hesaplanması gerekir. Başlangıç çözümleri için kullanılacak formüller Denklem (23), (24) ve (25)'teki gibidir:

$$L_s = \frac{1}{s} (Y_1 + Y_2 + \dots + Y_s) \quad (23)$$

$$b_s = \frac{1}{s} \left[\frac{y_{s+1} - y_1}{s} + \frac{y_{s+1} - y_2}{s} + \dots + \frac{y_{s+s} - y_s}{s} \right] \quad (24)$$

$$S_1 = \frac{y_1}{L_s}, S_2 = \frac{y_2}{L_s}, \dots, S_s = \frac{y_s}{L_s} \quad (25)$$

4.5.1.2. Toplamsal Mevsimsel Holt Winters Yöntemi

Holt Winters yönteminin mevsimsel bileşeni, çok yaygın olmasa da, toplamsal olabilir. Toplamsal mevsimsel Holt Winters tekniği için kullanılan genel formülasyon Denklem (26), (27), (28) ve (29)'daki gibidir:

$$L_t = \alpha (Y_t - S_{t-s}) + (1 - \alpha)(L_{t-1} + b_{t-1}) \quad (26)$$

$$b_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1} \quad (27)$$

$$S_t = \gamma (Y_t - L_t) + (1 - \gamma)S_{t-s} \quad (28)$$

$$F_{t+m} = (L_t + b_t m)S_{t-s+m} \quad (29)$$

Toplamsal mevsimsel Holt Winters tekniğini, çarpımsal mevsimsel Holt Winters tekniğinden ayıran en önemli fark, mevsimsel indekslerin çarpma ve oranlama yerine toplama ve çıkarma yoluyla hesaplanmasıdır (İmece, 2019, s.23-25).

Holt-Winters yöntemi, trend ve mevsimselliği hesaba katması ve kısa vadeli tahminlerde başarısı nedeniyle avantajlıdır. Ancak ani değişimlere ve uç değerlere karşı hassastır, uzun vadeli tahminlerde doğruluğu düşebilir. Genel olarak, Holt-Winters yöntemi, trend ve mevsimselliğe sahip zaman serilerini tahmin etmek için basit, hızlı ve etkili bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Zaman serilerinin analizi için literatürde sıklıkla başvurulmuş yöntemlerden biridir.

Pakistan'ın mevcut durumu için çeşitli şarj yöntemlerinin kritik bir karşılaştırmasını yapan Ali & Ayaz (2024), Pakistan'ın elektrik sistemi bağlamında çeşitli EA şarj senaryolarını ayrıntılı biçimde incelerken araçların müsaitliği ve mevcut araç sayısı tahmini için Holt Winters yönteminden yararlanmışlardır.

Vijayakumar & Suresh (2023) otomobil endüstrisinde gelecekteki satışları tahmin etmek için istatistiksel ve yapay sinir ağı yaklaşımlarını kullanan otomatik bir satış tahmin modeli tasarlamaya odaklanmışlardır. Üç otomobil firmasından geçmiş satış verileri ile gerçekleştirdikleri araştırmada Holt Winters tabanlı karma bir model önermişlerdir.

Geleneksel tahmin yöntemlerinin sektördeki mevsimsel dalgalanmalar, trendler ve beklenmedik değişiklikler nedeniyle tahminde zorlandığını belirten Subramanian, Othman, Sokkalingam, Thangarasu, & Kayalvizhi (2020) Hindistan'daki otomotiv sektörü için önerdikleri bütünleşik modelde Holt Winters yöntemine başvurmuşlardır.

4.5.2. ARIMA Yöntemi

1970 yılında Box ve Jenkins tarafından ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) olarak kısaltılan Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama Modeli, gelecekteki değerlerin geçmiş zaman serilerine bağlı olarak tahmin edilmesini sağlayan istatistiksel bir modeldir. Bu model, tahmin yaparken aynı zamanda zaman serilerinin geçmiş davranışlarının anlaşılmasına da yardımcı olur (Parlak, 2023, s.13). ARIMA, zaman serisi analizinde ve bir zaman serisinin olası gelecekteki değerlerinin tahmin edilmesinde kullanılan en popüler tekniklerden biridir (Wang & Guo, 2020, s.207). ARIMA süreçleri, zaman serilerini analiz etmek için kullanılan bir stokastik süreç sınıfıdır (Contreras, Espínola, Nogales, & Conejo, 2003, s.1014). Model, durağan zaman serisi verilerindeki doğrusal eğilimleri izlemek için kullanılan ve zaman serisinin gelecekteki değerlerinin geçmişte gözlemlenen doğrusal fonksiyonlardan üretildiği doğrusal bir regresyon modelidir (Wang & Guo, 2020, s.208).

ARIMA (p, d, q), diferansiyel otoregresif hareketli ortalama modeli olarak adlandırılır; AR, otoregresiftir; MA, hareketli ortalamadır; p ve q, karşılık gelen sıralardır ve d, zaman serisinin durağan hale gelme sayısıdır (Wang & Guo, 2020, s.208).

Bir ARIMA modeli, ARIMA modeli (p, d, q) olarak etiketlenir. Burada:

p: otoregresyon (AR) modelinin derecesi,

d: fark alma işlemi sayısı

q: hareketli ortalama (MA) modelinin derecesi (Fattah, Ezzine, Aman, El Moussami, & Lachhab, 2018, s.3).

Box Jenkins modelleri, kesikli ve doğrusal stokastik verilerin analizinde kullanılır. Otoregresif (AR) ve hareketli ortalama (MA) modelleri ve bu ikisinin birleşimi olan (ARMA) modeller durağan verilere uygulanırken otoregresif düzeltilmiş hareketli ortalama (ARIMA) modelleri durağan olmayan serilere uygulanabilir. ARIMA modeli dört aşama ile tahmin sonucu üretir (Kayhan, 2019, s.43).

1. Belirleme aşamasında trende sahip, durağan olmayan verilere fark alma işlemi uygulanarak veriler, durağan hale getirilir.

2. Hesaplama aşamasında süreçteki parametreler hesaplanır.

3. Uygunluk testi aşamasında değerlerin parametrelerinde anlamlı ve ilişkisel bir durum olup olmadığı kontrol edilir. Değerler arasında kabul edilmeyen bir anlamlılık düzeyi mevcutsa başta kurulan model kabul edilmez ve bir önceki işlem tekrar edilir.

4. Tahmin aşamasında, uygunluk testinden geçen bir model bulunduğu takdirde tahmin gerçekleştirilir. Tahmin edilen her değerin güven aralığı içinde olup olmadığı kontrol edilir.

ARIMA, Otoregresif (AR) süreci, Entegrasyon ve Hareketli Ortalama (MA) süreçlerini birleştirerek zaman serisinin bileşik bir modelini oluşturur. Modelin temel parametreleri p, d ve q'dur (Parlak, 2023, s.13-14).

- ✓ (AR): Otoregresyon, bir gözlem ile bir dizi gecikmeli gözlem arasındaki bağımlılıkları kullanır (p: AR' nin gecikme sayısı).
- ✓ (I): Entegre, farklı zamanlardaki gözlemlerin farklarını ölçerek zaman serisini durağan hale getirmek anlamına gelir (d: fark sayısı).
- ✓ (MA): Hareketli Ortalama, hareketli ortalama modelinin gecikmeli gözlemlere göre gerçekleştirilmesi durumunda gözlemler ile kalıntı hata terimleri arasındaki bağımlılığı gösterir (q: MA' nın mertebesi).

-Otoregresif Model (AR)

AR modeli zaman serisinin belirli bir dönemi için geçmiş değerlerin doğrusal toplamı ve rastgele hatadan oluşan bir eşitliktir. Bu modeller, içerdikleri geçmiş dönem gözlem değerleri sayısına göre isimlendirilirler. AR modeli, otoregresyon, bir gözlem ile bir dizi gecikmeli gözlem arasındaki bağımlılıkları kullanır. P adet gözlem değeri içeren bir AR(p) modelinin genel formülasyonu Denklem (30) ile ifade edilir (Kayhan, 2019, s.45).

$$Y_t = \Phi_0 + \Phi_1 Y_{t-1} + \Phi_2 Y_{t-2} + \dots + \Phi_p Y_{t-p} + e_t \quad (30)$$

Burada,

Y_t , t dönemindeki gerçek değeri,

$Y_{t-1}, Y_{t-2}, \dots, Y_{t-p}$ geçmiş dönemdeki gerçekleşen değerleri,

$\Phi_0, \Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_p$, katsayı değerini,

e_t , t dönemindeki hata değerini ifade etmektedir.

-Hareketli Ortalama Modeli (MA)

Zaman serisinin q gecikmeli hata değeri aynı dönemdeki hata değerini etkiliyorsa hareketli ortalama süreci tercih edilir. MA modelleri içerdikleri geçmiş dönem hata terimi

sayısına göre isimlendirilirler (Kayhan, 2019, s.44). MA, hareketli ortalama modelinin gecikmeli gözlemlerde gerçekleştirilmesi durumunda gözlemler ile kalıntı hata terimleri arasındaki bağımlılığı gösterir (Parlak, 2023, s.14). Q adet hata terimi olan bir MA modeli Denklem (31)'deki gibi ifade edilir (Kayhan, 2019, s.44-45).

$$Y_t = \mu + e_t - \omega_1 e_{t-1} - \omega_2 e_{t-2} + \dots \omega_q e_{t-q} \quad (31)$$

Burada,

Y_t , t dönemindeki gerçek değerini,

μ , sabit ortalama değerini,

$\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_q$, katsayı değerlerini,

e_t , t dönemindeki hata değerini,

$e_{t-1}, e_{t-2}, \dots, e_{t-q}$, Y_t değerini oluşturan geçmiş dönem hata değerlerini ifade etmektedir.

-Otoregresif Hareketli Ortalama Modeli (ARMA)

Otoregresif Hareketli Ortalama (ARMA) modeli, durağan zaman serilerinde hem otoregresif (AR) hem de hareketli ortalama (MA) modellerinin özelliklerini bir araya getiren bir yaklaşımdır. P dereceli AR modeli ile q dereceli MA modelinin birleşimi sonucunda ARMA(p,q) modeli elde edilir.

Genel bir ARMA (p,q) modeli Denklem (32) ile gösterilir (Kayhan, 2019,s.45).

$$Y_t = \Phi_0 + \Phi_1 Y_{t-1} + \Phi_2 Y_{t-2} + \dots \Phi_p Y_{t-p} + e_t - \omega_1 e_{t-1} - \omega_2 e_{t-2} + \dots \omega_q e_{t-q} \quad (32)$$

-Otoregresif Düzeltilmiş Hareketli Ortalama Modeli ARIMA (p,d,q)

Günlük yaşamdaki zaman serilerinin durağanlıktan uzak yani belirli bir ortalamaya sahip olmayan bir davranış sergilemektedir. ARMA modeli durağan modeller için yani verileri sabit bir ortalamaya sahip olan modeller için kullanılır. ARIMA (p,d,q) modeli, durağan olmayan zaman serilerini durağan hale getirip bu veriler üzerinde otoregresif (AR) ve hareketli ortalama (MA) modellerinin birleşimiyle oluşturulan bir yaklaşımdır. Bu modelde, ARMA (p,q) modelinde doğrudan gözlem değerleri kullanılırken ARIMA modelinde verinin farkı alınarak elde edilen değerler kullanılır. Yani, iki ardışık gözlem arasındaki fark hesaplanarak seri durağanlaştırılır ve tahminleme işlemi bu farkı alınmış, durağan hale getirilmiş seri üzerinden gerçekleştirilir.

ARIMA modeli genel olarak Denklem (33) ile gösterilmektedir. Eşitlikte d fark alma derecesi, B ise geri alma operatörü olarak belirlenmektedir (Kayhan, 2019, s.46).

$$\Delta^d Y_t = (1 - B)^d Y_t \quad (33)$$

4.5.3. SARIMA Yöntemi

SARIMA, Mevsimsel Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama modelidir. Zaman serisi verilerini tahmin etmek için yaygın olarak kullanılan ARIMA modelinin mevsimsellik içeren bir uzantısıdır. SARIMA modellerinde "S" mevsimsellik anlamına gelir. ARIMA'ya benzer şekilde SARIMA, otoregresyon (AR), fark alma (I) ve hareketli ortalama (MA) parametrelerini içerir. Ancak SARIMA ayrıca verilerin mevsimsel bileşenini modellemek için özel olarak tasarlanmış ek parametreler de içerir.

Otoregresif Bileşen (AR): Mevcut gözlem ile önceki gözlemler arasındaki ilişkiyi araştırır. Bu bileşen, bir zaman serisinin mevcut değerinin geçmiş değerlerine doğrusal olarak nasıl bağlı olduğunu temsil eder.

Tümleşik Bileşen (I): Zaman serisi verilerinin durağan hale getirilmesi için kullanılan fark alma işlemini temsil eder. Bir zaman serisinde durağanlık, verilerin ortalama ve varyans gibi istatistiksel özelliklerinin zaman içinde sabit kalmasıdır. Farklılaştırma, önceki gözlemin mevcut gözlemde çıkarılması ile elde edilir.

Hareketli Ortalama Bileşeni (MA): Geçmiş tahmin hatalarının doğrusal bir kombinasyonunu kullanarak gelecekteki değerleri tahmin etmek için tasarlanmıştır. Mevsimsel olmayan bileşeni temsil eder ve verilerdeki düzensiz varyasyonları yakalamaya çalışır. Geçmişteki tahmin hatalarının ortalaması alınarak gelecekteki tahminlerde kullanılır. Bu şekilde verilerin ani dalgalanmaları göz önünde bulundurularak tahmin performansı artırılmaya çalışılır. MA bileşeni sayesinde, SARIMA modeli, ARIMA modelinden farklı olarak, zaman serisi verilerindeki rastgele varyasyonları ortaya koymak ve tahmin etmek için güçlüdür.

Mevsimsel Otoregresif Bileşeni (SAR): AR bileşeninin mevsimsel karşılığıdır. Mevcut gözlem ile gecikmeli mevsimsel zaman noktalarındaki önceki gözlemler arasındaki ilişkiyi bulmaya çalışır.

Mevsimsel Hareketli Ortalama Bileşeni (SMA): MA bileşenine benzer, ancak mevsimsel gecikmeli zaman noktalarında mevcut gözlem ile mevsimsel aralıklarla belirli sayıda gecikmeli gözlem arasındaki ilişkiyi temsil eder.

Mevsimsel olmayan ARIMA bileşeni: Bu bileşen, mevcut gözlem verileri ve bu verilerin geçmişteki değerleri arasındaki ilişkiyi inceler ve hata değerlerini belirler. ARIMA modelindeki gibi üç parametre ile ifade edilir:

p: Otoregresyon sırası

d: Fark alma sırası

q: Hareketli ortalamanın sırası

Mevsimsel SARIMA bileşeni: Bu bileşen, mevcut gözlem verileri ve bu verilerin belirli dönemlerdeki geçmiş değerleri arasındaki ilişkiyi belirler. Mevsimsel SARIMA bileşeni üç parametre ile ifade edilir:

P: Mevsimsel otoregresyon sırası

D: Mevsimsel farkların sırası

S: Mevsimsel hareketli ortalamanın sırası

Genel SARIMA modeli SARIMA (p, d, q) (P, D, Q)_s gösterimiyle temsil edilir; burada s, gün, hafta, ay ya da yıl gibi mevsimsel bir dönemi ifade eder.

SARIMA modelleri, öncelikle geçmiş zaman verilerini kullanarak zaman serisi içinde belirli bir dönemi tahmin ederler. Başarılı bir tahmin yapılması durumunda parametreler değiştirilmeden serinin gelecekteki değerlerinin tahmin edilmesinde kullanılır.

(p,d,q)(P,D,Q)_S SARIMA parametreleri otokorelasyon fonksiyonu (ACF) ve kısmi otokorelasyon fonksiyonu (PACF) grafiklerinden elde edilir.

p : ACF grafiğinde güven aralığının altına düşmeyen en son değerdir.

d : Durağanlık testi farklılaşmama durumunda anlamlıdır, yani d=0

q : PACF grafiğinde güven aralığının altına düşmeyen son değer alınır

P : ACF gecikmesi S'de pozitif ise $P \geq 1$, aksi takdirde $P=0$ ve $P+Q \leq 2$.

D : D=1, seri zaman içinde istikrarlı bir mevsimsel yapıya sahiptir.

Q : ACF gecikmesi S'de negatif ise $Q \geq 1$, aksi takdirde $Q=0$, ve $P+Q \leq 2$.

S : ACF grafiğindeki en yüksek gecikme noktasıdır.

Otokorelasyon Fonksiyonu (ACF) zaman serisindeki bir değişkenin kendisi ile önceki zaman noktaları arasındaki ilişkiyi gösterir. ACF grafiği, yatay ekseninde gecikme zamanlarını ve dikey ekseninde otokorelasyon katsayılarını (korelasyon değerlerini) gösterir.

Kısmi otokorelasyon Fonksiyonu (PACF) zaman serisindeki belirli bir zaman noktasındaki değer, o zaman noktasından önceki diğer zaman noktalarındaki değerlerle olan ilişkisini gösterir. Bu ilişki, diğer tüm gecikme zamanlarının etkisini kontrol ederek

belirlenir. PACF grafiği ve ACF grafiği birlikte kullanılarak zaman serisi verilerinin modellenmesi ve tahminine olanak tanır (Özmen, 2024, s.10-12).

ARIMA geçmiş verilere bakarak trendleri ve rastgele dalgalanmaları yakalayan, mevsimsel özelliği olmayan zaman serileri için uygundur. SARIMA ise ARIMA'nın tüm bu özelliklerine ek olarak mevsimsel dalgalanmaları da modele dâhil eder. Düzenli tekrar eden aylık, haftalık veya günlük döngülerin olduğu serilerde daha doğru sonuç verir. Küçük veri setlerinde de tercih edilebilmeleri ve yorumlama kolaylıkları sayesinde ARIMA ve SARIMA yöntemleri literatürde zaman serisi analizlerinde sıklıkla tercih edilen tahmin yöntemlerdendir.

Saraç ve Ertürk (2025) Türkiye'de elektrikli ve hibrit araç kullanımının 2030'a kadar nasıl artacağını tahmin etmek için SARIMA yöntemini tercih etmişlerdir.

EA satışlarını tahmin etmenin karmaşıklığı ve zorluklarını ele almak amacıyla zaman serisi modeli, destek vektör makinesi ve birleşik bir modeli bir araya getiren Yu, Wang, Xu, & Zhang (2024) Çin'deki EA satışlarını tahmin ederken SARIMA modelini de içeren karma bir model önermişlerdir.

Yeni enerji araçlarının satış verilerinde hem rastgele olmayan hem de rastgele dalgalanmaları tahmin etmede standart geri yayılım sinir ağlarının doğruluğunu artırmak için geliştirilmiş bir tahmin modeli öneren Qifu Chen, Hong, Chen, & You (2024) satış verilerindeki rastgele olmayan dalgalanma dizisini tahmin etmek için SARIMA modeline başvurmuşlardır.

EA'ların satış fiyatlarının tahmini için hem zaman serisi hem de diğer regresyon modellerini kullanan Warpe, Buchkul, Chobe, & Pardeshi (2024) ARIMA, SARIMA yöntemlerine de başvurmuştur.

4.5.4. Prophet Yöntemi

Prophet yöntemi, geçmiş trendler için bir tahmin algoritmasıdır (Parlak, 2023, s.28). Zaman serisi tahminine dayalı derin öğrenme yaklaşımıdır (Kıganda, 2023, s.46). Prophet, başlangıçta ayrıştırılabilir bir zaman serisi modeli olan Taylor ve Letham (2017) tarafından önerilmiştir. Facebook tarafından, özellikle iş problemlerinde zaman serisi analizi için açık kaynaklı olarak geliştirilen bir tahmin aracıdır (Sarışen, 2024, s.19-20). Trend ve mevsimsel değişim gösteren verileri incelemek için kullanılır. Doğrusal olmayan verilerde, yıllık, aylık ve günlük frekanslara sahip veri kümeleri için tatil etkilerini de içeren gelecekteki değerleri tahmin edebilir. Prophet modeli, sezgisel bir

yaklaşımına sahiptir ve bu sayede verilerin ayrıntılarında boğulmadan tahmin yapabilir. Doğrusal model ve toplamsal model özelliklerine sahiptir. Daha iyi tahmin sonuçları elde etmek için mevsimsel etkileri hesaba katar. Genel bir Prophet tahmin denklemi Denklem (34)'te verilmiştir.

$$y_t = g(t) + s(t) + h(t) + \varepsilon_t \quad (34)$$

Burada $g(t)$ büyüme eğrisini, $s(t)$ haftalık veya yıllık mevsimsellik gibi periyodik değişimleri gösterir. $h(t)$ ve ε_t sırasıyla düzensiz tatilleri ve hata terimini gösterir (Parlak, 2023, s.29).

Prophet modelinin en güçlü yanlarından biri, eksik veriler ve aykırı değerlerle başa çıkmadaki esnekliğidir. Diğer geleneksel modellerin aksine, Prophet verilerinin durağan olmasına veya yeniden işlenmesine hiç ihtiyaç duymaz. Aykırı değerleri ve mevsimsel değişiklikleri otomatik olarak tespit edip hesaba katar; bu da onu, genellikle verilerin önceden ayarlanmasını gerektiren ARIMA veya SARIMA gibi modellerden daha sağlam kılar. Prophet, doğrusal olmayan eğilimleri modellemek için parçalı doğrusal veya lojistik bir büyüme eğrisi kullanır. Bu nedenle genellikle doğrusal olmayan ve yine de altında yatan öngörülebilir bir büyüme modeline sahip gelecekteki değerlere dair tahminler sağlayabilir.

Prophet modelindeki mevsimsellik birden fazla düzeyde modellenenebilir; bu da verilerde farklı türde periyodik davranışların modellenenebileceği anlamına gelir. Örneğin, günlük ve yıllık mevsimsellik ayrı ayrı modellenenebilir. Ayrıca, Prophet modeli, özel tatillerin de dahil edilmesine olanak tanır. Bu da modelin daha güçlü tahminler yapmasını sağlar.

Prophet modelinin diğer önemli güçlü yanı arasında basitlik yer alır. Model için minimum yapılandırma gerekir ve Python veya R'da birkaç satır kodla uygulanabilir. Bu kullanım kolaylığı, onu güçlü istatistik geçmişine sahip olmayan kullanıcıların bile anlayabileceği bir hale getirir. Ayrıca, Prophet modeli kullanıcının büyüme trendleri, mevsimsellik ve tatiller gibi parametreleri değiştirmesine olanak tanıyan sezgisel bir arayüze sahiptir ve bu da tahmin modeline daha fazla güç kazandırır. Tüm bu yönleri ile Prophet modeli, genel olarak güçlü ve kullanımı kolay bir tahmin aracıdır ve özellikle döngüsel ve mevsimsel eğilimleri tahmin etmek için oldukça uygundur (Alwadiya, 2024, s.49-50).

Kullanım kolaylığı ve tahminlemedeki yüksek performansı sayesinde Prophet yöntemi literatürde sıklıkla tercih edilen tahmin yöntemlerdendir.

EA'ların şarj talebinin hızla artmasının elektrik güç şebekesinin güvenli ve ekonomik işletimi üzerinde önemli etkiler yarattığını vurgulayan Li vd. (2022) kısa vadeli EA şarj yükünün tahmini için farklı makine öğrenmesi algoritmaları ile Prophet yöntemini kullanmıştır.

Veikkolainen (2024) EA'ların şarj ağlarının güç tüketimini doğru şekilde tahmin etmek, şebeke istikrarını desteklemek ve altyapı planlamasını gerçekleştirmek için tahminleme yöntemlerinden biri olarak Prophet yöntemini tercih etmiştir.

İngiltere'deki 2035 yılına kadar EA benimsenmesinin geleceğini değerlendirmek için kapsamlı bir tahmin yaklaşımı sunan Veysi, Moshfeghi, Sadrfaridpour, & Emamy (2025) Prophet yöntemini tahminleme yöntemlerinden biri olarak kullanmışlardır.

Anvekar, Gurav, & Oza (2025) otomotiv sektöründeki öngörü performansını geliştirmek amacıyla makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanımını özellikle Prophet yöntemini savunmuşlardır. Hindistan'daki otomobil satış tahminini gerçekleştirdikleri çalışmalarında Prophet algoritmasından yararlanmışlardır.

4.6. Performans Metrikleri

Literatürde model tahmin performanslarını karşılaştırmak için birçok ölçüm yöntemleri bulunmaktadır. Bu çalışmada, tahmin doğruluğunu kontrol etmek için MAPE (Mean Absolute Percentage Error), RMSE (Root mean square error) ve MAE (Mean Absolute Error) olmak üzere üç ölçüt kullanılmıştır.

4.6.1. Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (MAPE)

Ortalama mutlak yüzde hatası, istatistikteki en ünlü performans metriklerinden biridir. Bir tahmin tekniğinin doğruluğunu ölçer ve Denklem (35) ile formüle edilen bir oran olarak gösterilir:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{Y_t - \hat{Y}_t}{Y_t} \right| \quad (35)$$

Burada, n veri değerlerinin sayısını, Y_t gerçek veri noktasını, $\hat{Y}_t$ ise ilgili veri noktasının tahmin edilen değerini gösterir. Elde edilen sonuç yüzde ifade ettiğinden daha titiz bir yaklaşım için elde edilen sonuç 100 ile çarpılmalıdır.

MAPE, tahminde gerçek veri noktasına kıyasla ne kadar hata değeri olduğunu gösterir. Aslında tahmin edilen veri noktasının gerçek veri değerinden sapmasını ölçer. Karşılaştırma durumunda, en küçük MAPE değerini veren model daha iyi bir tahmin yöntemi olarak kabul edilir (Parlak, 2023, s.31).

4.6.2. Kök Ortalama Karesel Hata (RMSE)

Ortalama karesel hata, ortalama karesel hatanın (MSE) kareköküdür. MSE'ye benzer şekilde, RMSE de hata değerinin karesi nedeniyle ortalama hata değerini artırarak daha büyük hataları daha fazla cezalandırır. Formülasyonu Denklem (36)'ya eşittir:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Y_t - \hat{Y}_t)^2} \quad (36)$$

Burada, n tahmin edilen veri değerlerinin sayısıdır ve Y_t gerçek veri noktasını, $\hat{Y}_t$ ise tahmin edilen veri noktasını gösterir. Karşılaştırmada en küçük RMSE'ye sahip model en iyi tahmin yöntemi olarak kabul edilir (Parlak, 2023, s.31-32).

4.6.3. Ortalama Mutlak Hata (MAE)

Ortalama mutlak hata, model tahmininin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan standart bir ölçüttür. MAE'de puanlar, hatalardaki artışla doğrusal olarak artar. MAE'nin formülasyonu Denklem (37)'de verilmiştir.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |Y_t - \hat{Y}_t| \quad (37)$$

Burada n gözlem sayısını, Y_t ve $\hat{Y}_t$ ise sırasıyla gerçek ve tahmin edilen veri noktalarını göstermektedir. Diğer metriklerde olduğu gibi, yöntemlerin karşılaştırılmasında en küçük MAE değerini veren model tercih edilmektedir (Parlak, 2023, s.32).

BÖLÜM V

BULGULAR

5.1. Kriterlerin Korelasyon Analizi ile Değerlendirilmesi

Kapsamlı bir literatür araştırması sonucu belirlenen 9 farklı değişkenin birbiri ile olan ilişkilerinin değerlendirilmesi için korelasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Tablo 1’de görülen analiz sonucuna göre, birbiri ile ilişkisi yüksek çıkan birincil enerji tüketimi-TWh (V6) ve elektrik üretimi-TWh (V7) değişkenlerinden elektrik üretimi değişkeni analize dahil edilmiştir.

Tablo 1.

Değişkenlerin Korelasyon Analizi

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9
V1	1.000								
V2	-0.129	1.000							
V3	0.018	-0.131	1.000						
V4	-0.015	-0.154	0.020	1.000					
V5	-0.303	0.414	-0.285	0.394	1.000				
V6	-0.002	0.500	-0.020	-0.254	0.130	1.000			
V7	-0.012	0.500	-0.020	-0.258	0.133	0.998	1.000		
V8	-0.142	-0.280	-0.371	-0.041	0.162	-0.189	-0.184	1.000	
V9	0.176	0.295	0.030	-0.676	-0.352	0.192	0.190	-0.309	1.000

5.2. Kriterlerin CRITIC Yöntemi ile Değerlendirilmesi

Belirlenen 8 kriterin ağırlığı 2012, 2017 ve 2022 yılları için ayrı ayrı bir ÇKKV yöntemi olan CRITIC yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. 8 farklı değişken ile CRITIC yöntemi kullanılarak hesaplanan 2012 performans kriteri ağırlıkları Tablo 2’de gösterilmiştir. Yıllık CO₂ emisyonları (kişi başı), GSYİH (kişi başı), elektrik üretimi (Twh), yıllık sıcaklık anomalisi ve TÜFE değişkenlerinin ağırlık değerleri ilk beşte yer almıştır. En yüksek ağırlığa sahip kriter yıllık kişi başı CO₂ emisyonlarıdır (0,15284). Bu, çevresel etkiler içinde en kritik belirleyici olarak görülmüştür. CO₂ emisyonlarının ülkelerin sürdürülebilirlik performansını değerlendirmede önemli bir rolü vardır. Ekonomik büyüklük ve üretimle ilgili kriterler kişi başı GSYİH (0,14681) ve elektrik üretimi (0,14435) yüksek ağırlıklara sahiptir. Bu, ekonomik ve enerji üretim kapasitesinin

diğer kriterleri ile karşılaştırıldığında güçlü bir etkisi olduğunu göstermektedir. İklim ve enflasyon faktörleri yıllık sıcaklık anomalisi (0,12139) ve TÜFE'dir (0,11402). Yıllık sıcaklık anomalisi iklim değişikliğinin ölçütleri arasında önemli bir yere sahiptir. Tüketicinin alım gücünün bir ölçüsü olan TÜFE, ekonomik istikrar açısından dikkate değer bir paya sahiptir. GSYİH için satın alma gücü pariteleri (0,11191), elektrik üretiminin karbon yoğunluğu (0,10613) ve yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretiminin payı (0,10255) ise daha düşük ama yine de dikkate değer ağırlıklar taşımaktadır. Bu durum, ekonomik ve çevresel göstergeler arasında bir denge gözetildiğini, ancak yenilenebilir enerji payının 2012'de nispeten daha az önceliklendirildiğini göstermektedir. Genel olarak 2012 yılında sürdürülebilirlik ve ekonomik performans ölçümlerinde çevresel göstergelerin (CO₂ emisyonu, sıcaklık anomalisi, karbon yoğunluğu) önemli rol oynadığı ancak ekonomik göstergelerin (GSYİH, elektrik üretimi, satın alma gücü) dengeli şekilde ağırlıklandırıldığı ortaya konmuştur.

Tablo 2.

2012 yılı kriterlerinin "CRITIC" ağırlık katsayıları

Değişkenler	Ağırlıklar
Yıllık CO ₂ emisyonları (kişi başı)	0,15284
GSYİH (kişi başı)	0,14681
Elektrik üretimi (TWh)	0,14435
Yıllık sıcaklık anomalisi	0,12139
TÜFE	0,11402
GSYİH için satın alma gücü pariteleri	0,11191
Elektrik üretiminin karbon yoğunluğu	0,10613
Yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretiminin payı	0,10255

2017 performans kriteri ağırlıkları Tablo 3'te gösterilmiştir. Yıllık kişi başı CO₂ emisyonları, elektrik üretimi (TWh), TÜFE, GSYİH için satın alma gücü pariteleri ve kişi başı GSYİH değişkenlerinin ağırlık değerleri ilk beşte yer almıştır. 2017 yılında da en yüksek ağırlığa sahip kriter yıllık kişi başı CO₂ emisyonları (0,14629) olmuştur. Bu kriter, çevresel etki göstergeleri içinde 2012 yılı ile aynı sırada yer olmaya devam etmiştir. Elektrik üretimi (0,13605) 2017'de ikinci sıraya yükselmiştir. TÜFE (0,12899) bu yılda da oldukça belirgin bir kriter olmuştur ve üçüncü sıraya çıkmıştır. GSYİH için satın alma gücü pariteleri (0,12697) 2017'de 2012'ye göre önem kazanmıştır. Kişi başı GSYİH (0,12604), yenilenebilir enerji adaptasyonu analizinde 2012 yılı kadar olmasa da 2017'de

de önemli paya sahiptir. Yıllık sıcaklık anomalisi (0,11576) 2017’de sıralamada biraz gerilemiştir. Yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretiminin payı (0,11518) ve elektrik üretiminin karbon yoğunluğu (0,10473) bu yılda da hâlâ CO₂ emisyonu veya enerji üretimi kadar kritik görülmemektedir.

Tablo 3.

2017 yılı kriterlerinin “CRITIC” ağırlık katsayıları

Değişkenler	Ağırlıklar
Yıllık CO ₂ emisyonları (kişi başı)	0,14629
Elektrik üretimi (TWh)	0,13605
TÜFE	0,12899
GSYİH için satın alma gücü pariteleri	0,12697
GSYİH (kişi başı)	0,12604
Yıllık sıcaklık anomalisi	0,11576
Yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretiminin payı	0,11518
Elektrik üretiminin karbon yoğunluğu	0,10473

2022 performans kriteri ağırlıkları Tablo 4’te gösterilmiştir. Yıllık CO₂ emisyonları (kişi başı), elektrik üretimi (TWh), yıllık sıcaklık anomalisi, GSYİH (kişi başı) ve elektrik üretiminin karbon yoğunluğu değişkenlerinin ağırlık değerleri ilk beşte yer almıştır. En önemli kriterler yıllık kişi başı CO₂ emisyonları (0,15429) ve elektrik üretimidir (0,14840). Bu, ülkelerin karbon ayak izini azaltma gerekliliğini öne çıkarmaktadır. Yıllık sıcaklık anomalisi (0,13270) 2017’ye kıyasla 2022’de önem kazanmıştır. İklim değişikliğinin etkileri ölçümlerde önemlidir ancak CO₂ emisyonuna göre daha düşük ağırlıktadır. Kişi başı GSYİH (0,12881) 2017’ye göre fazla bir değişiklik göstermemiştir. Elektrik üretiminin karbon yoğunluğu (0,11652) 2017’ye oranla önem kazansa da yine alt sıralarda yer almıştır. GSYİH için satın alma gücü pariteleri (0,11185) 2017 yılına kıyasla biraz önem kaybetmiştir ve sıralamada gerilemiştir. TÜFE (0,10606) 2017’ye kıyasla önem sıralamasında değer kaybetmiştir. Yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretiminin payı (0,10138) 2022 yılında da çok önemli bir düzeyde değildir. Özetle, 2022’de çevresel faktörler (CO₂ emisyonu, sıcaklık anomalisi) ve elektrik üretimi, kişi başı GSYİH gibi ekonomik faktörler çok önemlidir.

Tablo 4.

2022 yılı kriterlerinin “CRITIC” ağırlık katsayıları

Değişkenler	Ağırlıklar
Yıllık CO ₂ emisyonları (kişi başı)	0,15429
Elektrik üretimi (TWh)	0,14840
Yıllık sıcaklık anomalisi	0,13270
GSYİH (kişi başı)	0,12881
Elektrik üretiminin karbon yoğunluğu	0,11652
GSYİH için satın alma gücü pariteleri	0,11185
TÜFE	0,10606
Yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretiminin payı	0,10138

5.3. Ülkelerin Kümelenmesi

37 OECD ülkesi, 2022 verilerine göre K-ortalamalar algoritması ile üçlü ve dördü kümelerine ayrılmıştır. Bu bölümde sırasıyla ülkelerin üçlü ve dördü kümeleme sonuçları verilecek ve yorumlanacaktır.

5.3.1. Ülkelerin Üçlü Kümelenmesi

Kümeleme analizinde incelenen üç dönemde de önem sıralaması pek değişmeyen yıllık CO₂ emisyonları (kişi başı), elektrik üretimi (TWh), yıllık sıcaklık anomalisi, GSYİH (kişi başı) ve elektrik üretiminin karbon yoğunluğu kriterlerinin 2022 değerleri kullanılmıştır. 2022 verilerinden, ülkelerin K-Ortalamlar algoritması ile üçlü gruplara ayrılması Şekil 21’deki gibi gerçekleşmiştir. İlk küme ABD, Kanada, Çek Cumhuriyeti, Estonya ve Almanya gibi ülkeleri içeren 8 ülkeden oluşmaktadır. İkinci küme Avusturya, Belçika, Danimarka ve Finlandiya gibi ülkeleri içeren 20 ülkeden oluşmaktadır. Son küme Avustralya, Şili, Kolombiya ve Yunanistan gibi ülkeleri içeren 9 ülkeden oluşur. Türkiye, Kolombiya, Şili, Avustralya gibi ülkelerin yer aldığı üçüncü kümede yer almıştır.

ABD, Kanada, Japonya gibi ülkelerden oluşan 1.kümede genellikle yüksek kişi başı GSYİH, yüksek kişi başı CO₂ emisyonu, yüksek elektrik üretimi görülmüştür. Bazı ülkeler, görece daha düşük karbon yoğunluğuna sahiptir. 2.küme genellikle Avrupa’nın kuzey ve batısındaki ülkelerden oluşmaktadır. Ülkelerin ortak özellikleri orta/yüksek kişi başı GSYİH, düşük karbon yoğunluğu (hidro, nükleer, rüzgar ağırlıklı elektrik üretimi) ve daha düşük CO₂ emisyonudur. Türkiye, Meksika, Avustralya, bazı Güney Amerika

lkeleri gibi ülkelerden oluşan 3.kümedeki ülkelerin ortak özelliği, orta gelire ve yüksek karbon yoğunluğuna sahip olmalarıdır. Bu ülkelerde elektrik üretimi çoğunlukla kömür/doğalgaza dayalıdır.



şekil 21. Ülkelerin l kümelenmesi

Tablo 5’te ülke değişkenlerinin l kümelemeye göre değişken ortalamaları görülmektedir. TÜFE değeri 1.kümede 122,00, 2.kümede 118,20, 3.kümede ise 154,72 olarak gerçekleşmiştir. TÜFE değerleri en yüksek 3.kümede gerçekleşirken 1.küme ve 2 değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Yıllık CO₂ emisyon değeri 1.kümede 10,34, 2.kümede 6,08, 3.kümede ise 5,53 olarak gerçekleşmiştir. Kişi başi en yüksek CO₂ salınımı 1.kümededir. 2.küme ve 3 daha düşük emisyonlara sahiptir. GSYİH için satın alma gücü pariteleri, 1.kümede 118,49, 2.kümede 17,12, 3.kümede ise 206,20 olarak gerçekleşmiştir. En yüksek satın alma gücü paritesi 3.kümededir. Yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretimi payı, 1.kümede 28,85, 2.kümede 54,67, 3.kümede ise 47,61 olarak gerçekleşmiştir. Yenilenebilir enerji payı en yüksek 2.kümededir. 1.küme, yenilenebilir enerji kullanımında geri kalmıştır. Kişi başi GSYİH, 1.kümede 39.964,93, 2.kümede 56.539,44, 3.kümede ise 25.639,83 olarak gerçekleşmiştir. En yüksek ekonomik büyüklük 2.kümededir. 3.küme ekonomik olarak daha küçük ülkelerden oluşmaktadır. Elektrik retimi (TWh), 1.kümede 929,88, 2.kümede 117,49, 3.kümede ise 137,76 olarak gerçekleşmiştir. 1.kümedeki ülkeler, elektrik üretiminde açık ara öndedir. Bu kümede büyük enerji üreticileri vardır. Yıllık sıcaklık anomalisi (°C), 1.kümede 0,64,

2.kümede 1,00, 3.kümede ise 0,23 olarak gerçekleşmiştir. En yüksek sıcaklık artışı 2.kümededir. 3.küme, iklim değişiminden görece daha az etkilenmektedir. Elektrik üretiminin karbon yoğunluğu (gCO_2/kWh), 1.kümede 454,16, 2.kümede 172,27, 3.kümede ise 371,81 olarak gerçekleşmiştir. Karbon yoğunluğu en yüksek 1.kümededir. Bu kümedeki ülkelerde genel olarak fosil yakıt ağırlıklı üretim yapılmaktadır. 2.kümede ise karbon yoğunluğu oldukça düşüktür. Genel anlamda, 1.küme, büyük elektrik üretimi yapan, kişi başı yüksek CO_2 salınımına sahip, yüksek karbon yoğunluğu olan, fosil yakıta bağımlı, yüksek tüketim ekonomilerinden oluşmaktadır. 2.küme, yüksek kişi başı GSYİH'ye sahip, yenilenebilir enerji payı yüksek, karbon yoğunluğu düşük, kişi başı CO_2 salınımı görece daha az olan çevreci profilli ülkelerden oluşmaktadır. 3.küme ise, ekonomik olarak daha küçük, orta düzeyde yenilenebilir enerji kullanan, düşük kişi başı CO_2 salınımına sahip ülkelerden oluşmaktadır.

Tablo 5.

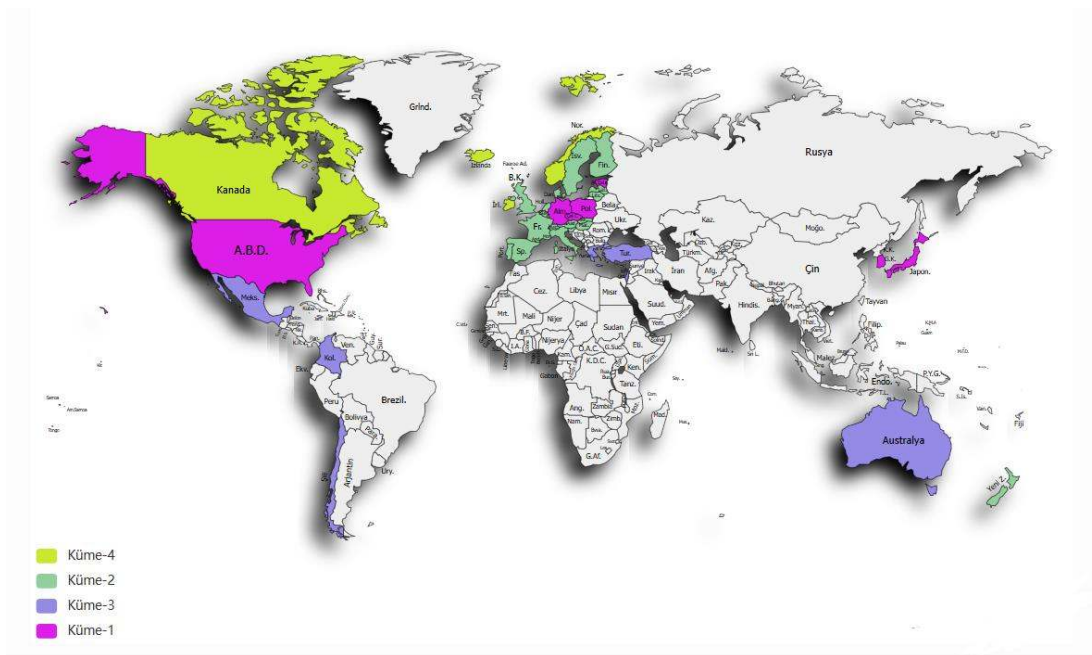
Ülkelerin Değişken Ortalamaları (Üçlü Küme)

	Ortalama		
	Küme 1	Küme 2	Küme 3
TÜFE	122,00	118,20	154,72
Yıllık CO_2 emisyonları (kişi başı)	10,34	6,08	5,53
GSYİH için satın alma gücü pariteleri	118,49	17,12	206,20
Yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretiminin payı	28,85	54,67	47,61
GSYİH (kişi başı)	39.964,93	56.539,44	25.639,83
Elektrik üretimi (TWh)	929,88	117,49	137,76
Yıllık sıcaklık anomalisi	0,64	1,00	0,23
Elektrik üretiminin karbon yoğunluğu	454,16	172,27	371,81

5.3.2. Ülkelerin Dörtlü Kümelenmesi

2022 verileri ile ülkelerin K-ortalamlar algoritması ile dörtlü kümelere ayrılması Şekil 22'deki gibi gerçekleşmiştir. İlk küme Çek Cumhuriyeti, Estonya, Almanya Japonya gibi ülkeleri içeren 7 ülkeden oluşmaktadır. İkinci küme Avusturya, Belçika, Danimarka ve Finlandiya gibi ülkeleri içeren 18 ülkeden oluşmaktadır. Üçüncü küme Avustralya, Şili, Kolombiya ve Yunanistan gibi ülkeleri içeren 7 ülkeden oluşmaktadır. Son küme Kanada, İzlanda, İrlanda ve Lüksemburg gibi ülkeleri içeren 5 ülkeden oluşurken Türkiye, bu grupta üçüncü kümede yer almıştır.

ABD, Japonya gibi ülkelerin yer aldığı 1.kümedeki ülkeler genellikle yüksek kişi başı GSYİH, yüksek kişi başı CO₂ emisyonuna sahiptir. Bu ülkelerin elektrik üretiminde kömür, doğal gaz gibi fosil kaynakların payı yüksektir. Ama aynı zamanda nükleer enerjinin de etkisi vardır (özellikle Japonya'da). İklim anomalileri orta seviyededir. 2.küme İsveç, Finlandiya, Fransa, Hollanda, Belçika ve Yeni Zelanda gibi Kuzey ve Batı Avrupa ülkeleri oluşturmaktadır. Ülkelerde genel olarak orta-yüksek kişi başı GSYİH, düşük kişi başı CO₂ emisyonu hakimdir. Ayrıca elektrik üretiminde yenilenebilir ve nükleer enerji oranı yüksektir, karbon yoğunluğu düşüktür. İklim anomalisi bazı bölgelerde belirgindir. 3.küme Avustralya, Şili, Türkiye ve bazı Latin Amerika ülkelerinden oluşmaktadır. Ülkeler genel olarak, orta gelir düzeyine sahiptir. Elektrik üretiminde kömür/doğal gaz ağırlıklı üretim hakimdir ve yüksek karbon yoğunluğu vardır. Kişi başı CO₂ bazı ülkelerde yüksek (özellikle Avustralya), bazılarında daha düşüktür. Yine de yenilenebilir enerji oranı düşüktür. 4.küme, Kanada, İzlanda gibi enerji yoğun ülkelerden oluşmaktadır. Ülkeler, yüksek kişi başı GSYİH ve yüksek elektrik üretimi ve tüketimine sahiptir. Ancak elektrik üretiminde yenilenebilir (hidro, jeotermal) oranı çok yüksektir. Dolayısıyla karbon yoğunluğu çok düşüktür. Genel olarak, yüksek gelirli ama düşük karbon yoğunluğu olan ülkeler (4.küme) ile yüksek gelirli ama hâlâ fosil ağırlıklı enerji kullanan ülkeler (1.küme) birbirinden ayrılmıştır. Ayrıca orta gelir ve fosil ağırlıklı (3.küme) ülkeler ile orta-yüksek gelirli ve düşük karbon yoğunluklu (2.küme) ülkeler de birbirinden ayrılmıştır.



Şekil 22. Ülkelerin dörtlü kümelenmesi

Tablo 6’da ülke değişkenlerinin dörtlü kümelemeye göre değişken ortalamaları görülmektedir. TÜFE ortalaması, 1.kümede 122,36, 2.kümede 119,86, 3.kümede 160,15, 4.kümede ise 119,48 olarak gerçekleşmiştir. Enflasyon sorunu en belirgin şekilde 3.kümede görülmektedir. Diğer kümeler görece dengelidir. Yıllık CO₂ emisyonları ortalaması, 1.kümede 9,80, 2.kümede 5,24, 3.kümede 5,96, 4.kümede ise 9,90 olarak gerçekleşmiştir. 2.küme ve 3’deki ülkeler daha çevreci profil sergilerken 1.küme ve 4’teki ülkelerin kişi başı emisyon değerleri daha yüksek gerçekleşmiştir. GSYİH için satın alma gücü pariteleri ortalaması, 1.kümede 135,24, 2.kümede 10,55, 3.kümede 264,97, 4.kümede ise 30,95 olarak gerçekleşmiştir. 3.kümede satın alma gücü yüksektir. Yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretimi payı ortalaması, 1.kümede 23,22, 2.kümede 51,18, 3.kümede 39,64, 4.kümede ise 78,28 olarak gerçekleşmiştir. 4.küme, yenilenebilir enerjide en başarılı gruptur. 1.kümede yenilenebilir enerji kullanımı çok zayıftır. Kişi başı GSYİH ortalaması, 1.kümede 37.811,85, 2.kümede 42.633,27, 3.kümede 26.260,41, 4.kümede ise 93.072,41 olarak gerçekleşmiştir. 4.küme, açık ara en güçlü ekonomilere sahiptir. 3.küme, ekonomik büyüklük açısından en zayıf gruptur. Elektrik üretimi (TWh) ortalaması, 1.kümede 968,49, 2.kümede 119,88, 3.kümede 175,82, 4.kümede ise 172,16 olarak gerçekleşmiştir. Elektrik üretiminde 1.küme diğerlerinden çok öndedir. Bu kümede büyük enerji üreticisi ülkeler bulunmaktadır. Yıllık sıcaklık anomalisi (°C) ortalaması, 1.kümede 0,71, 2.kümede 1,03, 3.kümede 0,15, 4.kümede ise 0,55 olarak gerçekleşmiştir. 2.kümedeki ülkeler iklim değişikliğinden en fazla etkilenmektedir. 3.kümede sıcaklık artışı çok düşüktür. Elektrik üretiminin karbon yoğunluğu (gCO₂/kWh) ortalaması, 1.kümede 495,98, 2.kümede 179,14, 3.kümede 433,26, 4.kümede ise 139,18 olarak gerçekleşmiştir. 4.küme elektrik üretiminde çevresel olarak en verimli gruptur. 1.küme ve 3.küme ise yüksek karbon yoğunluğu ile fosil yakıta bağımlıdır. Genel anlamda 1.küme, fosil yakıt yoğun, sanayileşmiş ülkelerden oluşurken 2.küme, orta gelirli, düşük emisyonlu, yenilenebilir odaklı ülkelerden oluşmaktadır. 3.küme, ekonomik açıdan küçük, fosil bağımlı ülkelerden oluşur. 4.küme ise büyük ekonomiler, yüksek yenilenebilir payı ve düşük karbon yoğunluğu ile çevresel performansı en iyi gruptur.

Tablo 6.

Ülkelerin Değişken Ortalamaları (Dörtlü Küme)

	Ortalama			
	Küme 1	Küme 2	Küme 3	Küme 4
TÜFE	122,36	119,86	160,15	119,48
Yıllık CO ₂ emisyonları (kişi başı)	9,80	5,24	5,96	9,90
GSYİH için satın alma gücü pariteleri	135,24	10,55	264,97	30,95
Yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretiminin payı	23,22	51,18	39,64	78,28
GSYİH (kişi başı)	37.811,85	42.633,27	26.260,41	93.072,41
Elektrik üretimi- TWh	968,49	119,88	175,82	172,16
Yıllık sıcaklık anomalisi	0,71	1,03	0,15	0,55
Elektrik üretiminin karbon yoğunluğu	495,98	179,14	433,26	139,18

5.4. Ülkelerin COPRAS Yöntemi ile Sıralanması

Korelasyon analizi sonucunda belirlenen 8 kriterin 2012, 2017 ve 2022 yılları için ayrı ayrı CRITIC yöntemi ile ağırlıkları belirlenmiş ve aynı küme içerisinde yer alan ülkelerin sıralaması COPRAS yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Sıralama, ülkelerin hem üçlü küme hem de dörtlü küme gruplanmasına göre incelenmiştir.

5.4.1. Ülkelerin Üçlü Kümeye Göre Sıralanması

Ülkelerin ekonomik durumu, elektrik enerjisi faaliyetleri, elektrik enerjisi faaliyetlerinin yarattığı çevresel etkiler ve yenilenebilir enerji kaynaklarına adaptasyonunu değerlendirmek amacıyla değerlendirildiği üçlü kümeleme analizi sonucunda birinci kümede ABD, Kanada ve Japonya gibi ülkeler yer almıştır. Birinci kümedeki ülkelerin sıralaması Tablo 7'deki gibi gerçekleşmiştir. Birinci kümede Güney Kore 8 ülke arasından ilk sırada yer almıştır. Güney Kore, sanayi yoğun, elektrik üretimi yüksek olan bir ülkedir. Elektrik üretiminde halen kömür ağırlıklı olduğundan ülkede karbon yoğunluğu yüksektir. Ülke genelinde nükleer enerji önemli yer tutar ve yenilenebilir enerjinin payı düşüktür. Ülkenin kişi başı GSYİH yüksektir. ABD'nin elektrik üretimi çok yüksektir. Aynı zamanda dünyanın en büyük CO₂ üreten ülkelerinden biridir. Ülkede yenilenebilir enerji artsa da halen enerji üretimi, doğalgaz ve kömüre bağımlıdır. ABD, bu küme grubu içerisinde en yüksek kişi başı GSYİH sahip ülkedir. Kanada'da hidroelektrik santralleri yoğunluktadır ve ülkenin genel anlamda karbon yoğunluğu düşüktür. Kış koşulları zorlu olduğundan ülkenin kişi başı enerji tüketimi yüksektir. Ancak buna karşın nüfusa göre enerji üretimi yüksektir. Kanada, yüksek kişi

başı GSYİH sahiptir. Japonya, elektrik üretiminde genel olarak kömüre bağımlıdır ve bu sebeple karbon yoğunluğu yüksektir. Yenilenebilir enerji konusunda yeni yatırımlar yapılsa da halen istenilen düzeyde değildir. Ülkenin kişi başı GSYİH yüksektir. Almanya, yenilenebilir enerji açısından iyi bir seviyededir. Ancak enerji üretiminde halen kömüre bağımlılık yüksektir. Almanya, elektrik üretim sürecinde karbonsuzlaşmaya çalışan ama enerji dönüşüm sürecinde zorluk yaşayan bir ülkedir. Ülkenin kişi başı GSYİH yüksektir. Estonya, elektrik üretiminde fosil kaynaklara bağımlı bir ülkedir. Ülkede karbonsuzlaşma adımları atılsa da halen karbon yoğunluğu yüksektir. Ülkenin kişi başı GSYİH düşüktür. Polonya, elektrik üretiminde kömüre bağımlıdır. Ülkede yenilenebilir enerji yatırımı ve kişi başı GSYİH düşüktür. Çek Cumhuriyeti’nde nükleer enerji üretimi yaygındır ve enerji üretiminde genel olarak kömüre bağımlılık vardır. Ülkede yenilenebilir enerji gelişimi düşüktür. Ülke orta seviye kişi başı GSYİH sahiptir.

Tablo 7.

Birinci Kümedeki Ülkelerin “COPRAS” Yöntemi ile Sıralanması (Üçlü Küme)

Ülke	Sıralama
Güney Kore	1
ABD	2
Kanada	3
Japonya	4
Almanya	5
Estonya	6
Polonya	7
Çek Cumhuriyeti	8

K-ortalamalar algoritması ile gerçekleştirilen kümeleme analizi sonucunda Macaristan, İsveç, Fransa gibi ülkeler ikinci kümede yer almıştır. Küme içerisinde 20 ülke arasından İzlanda performans açısından ilk sırada yer almıştır. İkinci kümedeki ülkelerin sıralaması Tablo 8’deki gibi gerçekleşmiştir. İzlanda, %100’e yakın yenilenebilir enerji üretimi yapan bir ülkedir ve bu sebeple karbon yoğunluğu çok düşüktür. Macaristan, nükleer santraller ve yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üreten bir ülkedir ve genel anlamda düşük karbon hedeflerine yakındır. Ülkenin kişi başı GSYİH orta seviyelerdedir. İsveç, refah seviyesi yüksek bir ülkedir. Yenilenebilir enerji (hidro, rüzgar) ve nükleer sayesinde karbon yoğunluğu düşüktür. Fransa, enerji üretimini

ağırlıklı olarak nükleer santrallerden sağlamaktadır. Ülkede yenilenebilir enerji yatırımları artmaktadır ve karbon yoğunluğu düşüktür. Norveç, enerji ihtiyacının büyük çoğunluğunu yenilenebilir kaynaklardan ve hidroelektrik santrallerden sağlamaktadır. Çevresel duyarlılık anlamında üst sıralarda yer alan bir ülkedir. İngiltere, yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişi büyük ölçüde başarmış bir ülkedir ve rüzgar enerjisinden elektrik üretiminde liderlerden birisidir. İsviçre, hidroelektrik, nükleer ve rüzgar enerjisinden elektrik üretimi yapan bir ülkedir. Ülkenin genel karbon yoğunluğu düşük seviyelerdedir. Ülke, AB ülkeleri arasında enerji verimliliği ve çevresel duyarlılık açısından üst seviyelerdedir. İspanya’da güneş ve rüzgar enerjisi yatırımları yüksektir. Yenilenebilir kaynaklara adaptasyon açısından iyi konumda olan ülkelere biridir. Danimarka, rüzgar enerjisinden elektrik üretiminde öncü ülkelere birisidir. İtalya’da güneş enerjisinden elektrik üretimi yüksektir ancak halen doğalgaza bağımlılık söz konusudur. Ülkenin karbon yoğunluğu ise AB ortalamasındadır. Finlandiya, enerji ihtiyacını nükleer, biyokütle ve hidroelektrikten karşılamaktadır. Ülkenin karbon yoğunluğu genel anlamda düşüktür. Yeni Zelanda, jeotermal ve hidroelektrik santrallerin yoğun olduğu bir ülkedir. Elektrik üretimi çevreci, ancak tarım ve ulaşım etkisiyle karbon yoğunluğu dengededir. Lüksemburg’un ülke nüfusuna oranla CO₂ salınımı yüksektir. Ülkede yenilenebilir kaynak kullanımı iyi seviyededir. Avusturya’da, hidroelektrik enerji üretimi yaygındır. İrlanda’da rüzgar enerjisi yatırımı yüksektir. Ancak üretimde halen doğalgaza bağımlılık vardır. Hollanda’da enerji üretiminde yenilenebilir kaynakların payı artırılrsa da halen fosil kaynaklara bağımlılık sürmektedir. Portekiz’de yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım artırılmaktadır. Ancak ülkede genel anlamda ekonomik açıdan sınırlayıcı faktörler söz konusudur. Belçika, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretimde AB ortalamasındadır. Enerji verimliliği halen dönüşüm sürecindedir. Slovakya’da enerji üretimi genel anlamda nükleer ve hidroelektrik santrallerinden sağlanmaktadır. Ülkede karbon yoğunluğu düşüktür ancak ekonomik kapasite sınırlıdır. Slovenya’da yenilenebilir kaynaklara adaptasyon orta seviyelerdedir.

Tablo 8.

İkinci Kümedeki Ülkelerin “COPRAS” Yöntemi ile Sıralanması (Üçlü Küme)

Ülke	Sıralama
İzlanda	1
Macaristan	2
İsveç	3
Fransa	4
Norveç	5
İngiltere	6
İsviçre	7
İspanya	8
Danimarka	9
İtalya	10
Finlandiya	11
Yeni Zelenda	12
Lüksemburg	13
Avusturya	14
İrlanda	15
Hollanda	16
Portekiz	17
Belçika	18
Slovakya	19
Slovenya	20

Türkiye'nin de içerisinde yer aldığı üçüncü kümede ise Şili, Avustralya, Meksika gibi ülkeler arasından Kolombiya ilk sırada yer almıştır. Aynı kümede Türkiye, performansı açısından beşinci sırada yer almıştır. Üçüncü kümedeki ülkelerin sıralaması Tablo 9'daki gibi gerçekleşmiştir. Kolombiya, elektrik üretiminin büyük kısmını hidroelektrikten karşılamaktadır. Bu yüzden karbon yoğunluğu düşüktür. Ülke ekonomik açıdan sınırlıdır. Şili, güneş enerjisinden elektrik üretiminde Latin Amerika lideridir. Ülkenin karbon yoğunluğu düşmektedir. Elektrik üretimini temiz kaynaklara kaydıran ülke, enerji dönüşüm performansı açısından güçlüdür. Avustralya'da kişi başına CO₂ oranı yüksektir. Elektrik üretimi yoğunluklu olarak kömüre bağlıdır. Ancak elektrik üretimi kapasitesi yüksektir. Meksika, fosil kaynaklara bağımlı bir ülkedir. Kişi başı CO₂ ortalama seviyelerdedir. Elektrik üretiminde jeotermal ve hidroelektrik yaygındır. Türkiye, elektrik üretiminde halen kömür ve doğalgaza bağımlıdır. Karbon yoğunluğu AB ortalamasına göre halen yüksektir. Ancak ülkemizde yenilenebilir enerji

kaynaklarının payı da her geçen gün artmaktadır. İsrail’de güneş enerjisinden elektrik üretiminin potansiyeli yüksektir. Ancak halen yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım sınırlıdır. Kişi başına CO₂ miktarları orta seviyelerdedir. Letonya’da hidroelektrik santralleri ağırlıktadır. Enerji üretimi açısından küçük ama temiz üretim yapan bir ülkedir. Genel anlamda karbon yoğunluğu düşüktür. Litvanya’nın karbon yoğunluğu halen yüksek seviyelerdedir. Enerji üretiminde halen fosil kaynaklara bağımlıdır. Ancak biyokütle rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklara yatırım artmaktadır. Yunanistan’da kişi başı CO₂ emisyonu orta seviyelerdedir. Güneş ve rüzgar enerjisine yatırımlar artmaktadır.

Tablo 9.

Üçüncü Kümedeki Ülkelerin “COPRAS” Yöntemi ile Sıralanması (Üçlü Küme)

Ülke	Sıralama
Kolombiya	1
Şili	2
Avustralya	3
Meksika	4
Türkiye	5
İsrail	6
Letonya	7
Litvanya	8
Yunanistan	9

Ülke performanslarının üçlü kümelemeye göre sıralamasında genel olarak yenilenebilir kaynak oranı, düşük kişi başı CO₂ emisyonu, karbon yoğunluğu, ve kısmen ekonomik üretkenlik (kişi başı GSYİH / enerji verimliliği) kriterleri etkili olmuştur.

5.4.2. Ülkelerin Dörtlü Kümeye Göre Sıralanması

Ülkelerin ekonomik durumu, elektrik enerjisi faaliyetleri, elektrik enerjisi faaliyetlerinin yarattığı çevresel etkiler ve yenilenebilir enerji kaynaklarına adaptasyonunu değerlendirmek amacıyla değerlendirildiği dörtlü kümeleme analizi sonucunda birinci kümede ABD, Güney Kore ve Japonya gibi ülkeler yer almıştır. Birinci kümedeki ülkelerin sıralaması Tablo 10’daki gibi gerçekleşmiştir. Birinci kümede ABD, 7 ülke arasından ilk sırada yer almıştır. ABD, bulunduğu kümede en yüksek kişi başı

GSYİH'e sahip, elektrik üretimi çok yüksek olan ülkelerden biridir. Ülkenin elektrik üretimi fosil ağırlıklı olduğundan kişi başı CO₂ emisyonu yüksektir. Yenilenebilir payı artmaktadır ancak hâlâ sınırlı düzeydedir. Güney Kore, orta büyüklükte ekonomiye sahip bir ülkedir. Ancak ülkede sanayileşme ve enerji yoğunluğu yüksektir. Kömür ve nükleer ağırlıklı elektrik üretimi yapılmaktadır, yenilenebilir enerji kullanımının payı düşüktür. Bu sebeple kişi başı CO₂ emisyonu yüksektir. Japonya, ekonomisi güçlü bir ülkedir ve ülkenin elektrik üretimi yüksektir. Ülke, genel anlamda fosil yakıt ithalatına bağımlıdır, yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş sınırlıdır. Ancak enerji verimliliği yüksektir. Kişi başı emisyon değeri, ABD ve Güney Kore'ye kıyasla biraz düşüktür. Almanya, Avrupa'nın en büyük ekonomilerinden birisidir. Yenilenebilir payında güçlüdür, kömür kaynaklı üretimden çıkış sürecindedir. Bu sebeple ülkenin karbon yoğunluğu düşüş eğilimindedir. Estonya, küçük ölçekli ekonomiye sahiptir. Petrole dayalı enerji üretimi nedeniyle kişi başı emisyonu yüksektir. Ülkede yenilenebilir enerjinin payı sınırlıdır. Polonya, orta ölçekli, AB içinde sanayi ağırlıklı bir ülkedir. Ülkede elektrik üretimi kömür odaklı olduğundan karbon yoğunluğu yüksektir, yenilenebilir enerji payı düşüktür. Çek Cumhuriyeti, orta ölçekli, sanayi ağırlıklı bir ülkedir. Kömür ve nükleer ağırlıklı enerji sisteminden dolayı karbon yoğunluğu yüksektir. Yenilenebilir enerji kullanımı sınırlıdır.

Genel anlamda, ekonomik açıdan ABD, Japonya ve Almanya gibi ülkeler ön plana çıkmaktadır. Almanya, yenilenebilir dönüşümü ile dikkat çekmektedir. Güney Kore, Estonya, Polonya, Çekya gibi ülkeler, yüksek karbon yoğunluğu ve düşük yenilenebilir payı nedeniyle diğer ülkelere oranla çevresel açıdan geri planda kalmaktadır. Japonya, yüksek ekonomisi ve orta düzey çevresel performansı ile dikkat çekmektedir.

Tablo 10.

Birinci Kümedeki Ülkelerin "COPRAS" Yöntemi ile Sıralanması (Dörtlü Küme)

Ülke	Sıralama
ABD	1
Güney Kore	2
Japonya	3
Almanya	4
Estonya	5
Polonya	6
Çek Cumhuriyeti	7

Ülkelerin dörtlü kümeleme analizi sonucunda ikinci kümede Macaristan, İsveç ve Fransa gibi ülkeler yer almıştır. İkinci kümedeki ülkelerin sıralaması Tablo 11'deki gibi gerçekleşmiştir. İkinci kümede Macaristan, 18 ülke arasından ilk sırada yer almıştır. Macaristan, orta büyüklükte bir AB üyesidir. Ülkenin elektrikte nükleer ve yenilenebilir kullanımı vardır. Kömür kullanımının payı düşmektedir. İsveç, refah seviyesi yüksek bir ülkedir. Yenilenebilir enerji (hidro, rüzgar) ve nükleer sayesinde karbon yoğunluğu düşüktür. Fransa, Avrupa'nın ikinci büyük ekonomisidir. Elektrikte nükleer ağırlığı sayesinde karbon yoğunluğu düşüktür. İngiltere, büyük, gelişmiş bir ekonomidir. Kömürden hızlı çıkış yapan bir ülkedir ve rüzgar enerjisinde lider ülkelerden biridir. İsviçre'de kişi başı GSYİH çok yüksektir. Hidroelektrik ve nükleer ağırlığıyla düşük karbon yoğunluğuna sahiptir. Danimarka, orta büyüklükte bir ekonomidir. Rüzgar enerjisinde dünya liderlerinden biridir ve yenilenebilir enerji payı çok yüksektir. İspanya, AB'nin büyük ekonomilerindendir. Güneş ve rüzgar yatırımlarıyla yenilenebilirde güçlüdür. Letonya, küçük ölçekli bir ekonomidir. Elektrik üretimi hidroelektrik ağırlıklıdır, karbon yoğunluğu düşüktür. İtalya, büyük bir ekonomidir. Ülkenin fosil bağımlılığı devam etse de yenilenebilir yatırımlar artmaktadır. Finlandiya, orta-büyük ölçekli bir ekonomidir. Biyokütle, hidro, nükleer enerji üretimi ile karbon yoğunluğu düşüktür. Yeni Zelanda, küçük ölçekli bir ekonomidir. Hidro ve jeotermal enerji sayesinde yenilenebilir payı yüksektir. Avusturya, orta ölçekli bir ekonomidir. Ülkede hidroelektrik üretimi çok yüksek paya sahiptir. Litvanya, küçük ölçekli bir ekonomidir. Ülkede, yenilenebilir enerji yatırımları artmaktadır. Hollanda, büyük bir ekonomidir. Fosil bağımlılığı yüksektir ancak rüzgar yatırımlarıyla dönüşümde ilerlemektedir. Portekiz, orta ölçekli bir ekonomidir. Yenilenebilir enerji payı (özellikle hidro ve rüzgar) yüksektir. Belçika, orta ölçekli bir ekonomidir. Ülkenin nükleer enerji sayesinde karbon yoğunluğu düşüktür ancak yenilenebilir payı sınırlıdır. Slovakya, küçük ölçekli bir ekonomidir. Ülkenin enerji üretimi nükleer ağırlıklıdır, karbon yoğunluğu düşüktür. Slovenya, küçük ölçekli bir ekonomidir. Ülkede hidroelektrik ve nükleer enerji kullanılmaktadır, karbon yoğunluğu çok yüksek değildir. Genel anlamda İsveç, İsviçre, Fransa, İngiltere, Danimarka gibi ülkeler yüksek ekonomiye ve yüksek çevreci profile sahip ülkelerdir. Yeni Zelanda, Letonya, Portekiz gibi ülkeler küçük ekonomi ve yüksek çevreci profile sahip ülkelerdir. İtalya, Hollanda ve Finlandiya gibi ülkeler, büyük ekonomi ve orta çevreci profile sahip ülkelerdir. Macaristan, Litvanya, Belçika, Slovakya ve Slovenya gibi ülkeler, küçük/orta ekonomi ve orta çevreci profile sahip ülkelerdir.

Tablo 11.

İkinci Kümedeki Ülkelerin “COPRAS” Yöntemi ile Sıralanması (Dörtlü Küme)

Ülke	Sıralama
Macaristan	1
İsveç	2
Fransa	3
İngiltere	4
İsviçre	5
Danimarka	6
İspanya	7
Letonya	8
İtalya	9
Finlandiya	10
Yeni Zelenda	11
Avusturya	12
Litvanya	13
Hollanda	14
Portekiz	15
Belçika	16
Slovakya	17
Slovenya	18

Ülkelerin dörtlü kümeleme analizi sonucunda üçüncü kümede Şili, Kolombiya ve Avustralya gibi ülkeler yer almıştır. Üçüncü kümedeki ülkelerin sıralaması Tablo 12’deki gibi gerçekleşmiştir. Üçüncü kümede Şili, 7 ülke arasından ilk sırada yer almıştır. Şili, küçük ölçekli bir ekonomidir. Ülkede güneş ve rüzgar enerjisi yatırımlarıyla yenilenebilir oranı artmaktadır. Kolombiya, küçük ölçekli bir ekonomidir. Elektrik üretiminde hidroelektrik yüksek paya sahiptir. Bu yüzden ülkede karbon yoğunluğu düşüktür. Avustralya gelişmiş bir ekonomidir. Kömür ihracatı ve kullanımı nedeniyle kişi başı CO₂ emisyonu çok yüksektir. Ancak son yıllarda yenilenebilir yatırımları artmaktadır. Meksika, sanayileşmiş ve gelişmekte olan bir ekonomidir. Ülkenin petrol ve gaz bağımlılığı yüksektir, yenilenebilir yatırımları sınırlıdır. Türkiye, büyük, yükselen bir ekonomidir. Elektrik üretiminde kömür, doğalgaz hâlâ yüksektir. Ancak hidro, güneş ve rüzgar yatırımları artmaktadır. Karbon yoğunluğu AB ortalamasından yüksektir. İsrail, küçük ama teknoloji yoğun, kişi başı GSYİH yüksek olan bir ülkedir. Fosil bağımlılığı yüksektir, güneş enerjisinde ilerleme vardır ama genel anlamda yenilenebilir enerji payı

sınırlıdır. Yunanistan, orta ölçekli bir AB üyesidir. Ülke, rüzgar ve güneş yatırımlarında ilerlemektedir, kömür kaynaklı elektrik üretiminden çıkış sürecindedir. Genel anlamda, Avustralya, Meksika ve İsrail yüksek ekonomik etkiye sahip ve düşük çevreci profile sahip ülkelerdir. Şili, Türkiye ve Yunanistan orta ekonomik etkiye sahip, orta-yüksek çevreci profile sahip ülkelerdir. Kolombiya ise düşük ekonomik etkiye sahip, yüksek çevreci profile sahip bir ülkedir.

Tablo 12.

Üçüncü Kümedeki Ülkelerin “COPRAS” Yöntemi ile Sıralanması (Dörtlü Küme)

Ülke	Sıralama
Şili	1
Kolombiya	2
Avustralya	3
Meksika	4
Türkiye	5
İsrail	6
Yunanistan	7

Ülkelerin dörtlü kümeleme analizi sonucunda dördüncü kümede İzlanda, Kanada ve Norveç gibi ülkeler yer almıştır. Dördüncü kümedeki ülkelerin sıralaması Tablo 13'teki gibi gerçekleşmiştir. Dördüncü kümede İzlanda, 5 ülke arasından ilk sırada yer almıştır. İzlanda, küçük bir ekonomiye sahiptir ancak kişi başı GSYİH yüksektir. Elektriğin neredeyse %100'ü yenilenebilir kaynaklardan (jeotermal + hidro) elde edilmektedir. Karbon yoğunluğu çok düşüktür. Kanada, G7 ülkeler içinde, büyük bir ekonomidir. Elektrikte hidro ağırlıklıdır. Ancak petrol ve gaz üretimi nedeniyle toplam CO₂ emisyonu ve kişi başı değerler yüksektir. Norveç, küçük nüfuslu ama yüksek kişi başı GSYİH sahip bir ülkedir. Elektrikte %95'ten fazla yenilenebilir kaynaklardan üretilmektedir. Karbon yoğunluğu çok düşüktür. Ancak petrol ve gaz ihracatı küresel çevre etkisini artırmaktadır. Lüksemburg, küçük bir ekonomidir ancak kişi başı GSYİH açısından dünya genelinde yüksek ülkelerden biridir. Ülkenin fosil bağımlılığı yüksektir, kişi başı CO₂ emisyonu AB ortalamasının üzerindedir. Yenilenebilir payı yüksektir. İrlanda, AB'nin hızlı büyüyen, yüksek kişi başı GSYİH ülkelerinden biridir. Rüzgar enerjisinde ilerleme kaydetmektedir, fakat tarımsal kaynaklı emisyonlar yüksektir. Karbon yoğunluğu yüksektir ve yenilebilir payı düşüktür. Genel anlamda, İzlanda ve

Norveç çok yüksek çevreci profile sahip ülkelerdir. Kanada, orta ekonomik etkiye sahip, orta düzeyde çevreci profile sahip bir ülkedir. Lüksemburg ve İrlanda yüksek ekonomik etkiye sahip, orta/düşük çevreci profile sahip bir ülkelerdir.

Tablo 13.

Dördüncü Kümedeki Ülkelerin “COPRAS” Yöntemi ile Sıralanması (Dörtlü Küme)

Ülke	Sıralama
İzlanda	1
Kanada	2
Norveç	3
Lüksemburg	4
İrlanda	5

Dört kümedeki ülkeler genel olarak değerlendirildiğinde, ABD, Güney Kore, Japonya gibi ülkeler, büyük sanayi ve yüksek emisyon değerlerine sahip ülkelerdir. İsveç, Fransa, İngiltere gibi ülkeler Avrupa’nın çevreci profile sahip ülkeleri arasındadır. Türkiye, Meksika, Avustralya gibi ülkeler refah düzeyleri, enerji üretim durumları ve çevresel etkiler açısından karma profile sahip ülkelere dendir. İzlanda, Kanada, Norveç gibi ülkeler refah düzeyleri oldukça yüksek, sürdürülebilir enerji lideri ülkeler arasındadır.

5.5. OECD Ülkeleri ve Türkiye’nin Elektrikli Araç Sektörü Açısından Değerlendirilmesi

Ülkelerin performans değerlendirilmesinin ardından ülkeler, kendi küme grupları içerisinde EA sektörü açısından değerlendirilmiştir. Bu bölümde ülkelerin, UEA elektrikli araç satış oranları verilerinden yararlanılarak oluşturulan üçlü ve dörtlü kümeler göre ısı haritaları oluşturulmuş ve ülke performansları değerlendirilmiştir.

5.5.1. Ülkelerin Üçlü Kümelemeye Göre Elektrikli Araç Sektörü Açısından Değerlendirilmesi

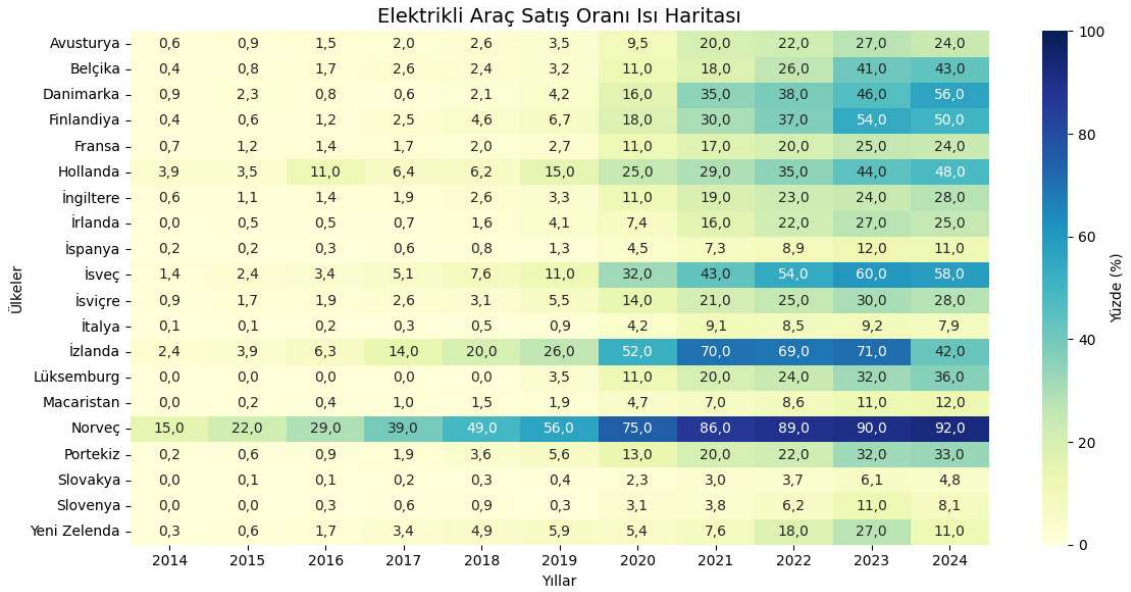
Ülkelerin performans değerlendirilmesinin ardından ülkeler, kendi küme grupları içerisinde EA sektörü açısından değerlendirilmiştir ve üç ayrı küme grubu için ısı haritaları oluşturulmuştur. Birinci kümede yer alan ülkelerin EA satış oranlarını gösteren ısı haritası Şekil 23’te görülmektedir. 2014-2024 dönemine ait veriler incelendiğinde 2014-2019 arasında tüm ülkelerde EA satış oranlarının neredeyse %0 seviyesinde olduğu

görülmektedir. EA satışları bu dönemde oldukça düşük seviyelerdedir. 2020'den sonra, çoğu ülkede oranlarda belirgin bir artış başlamıştır. 2022'de Almanya'da %31'e kadar çıkan oran, haritanın en yüksek değeri ve koyu mavi rengiyle dikkat çekmektedir. 2020-2024 yıllarında Kanada ve ABD'de de artışlar gözlenmektedir. 2020'den sonra, çoğu ülkede oranlarda belirgin bir artış başlamıştır. 2021-2022 döneminde oranlar % 30'a kadar çıkmış, ardından 2023-2024'te % 20 civarına gerilemiş ama yine de yüksek kalmıştır. Kanada, 2020 sonrası istikrarlı şekilde artış göstermiş ve 2024'te neredeyse %20'ye ulaşmıştır. Polonya, Güney Kore, Estonya, Çek Cumhuriyeti gibi ülkelerde de artışlar söz konusudur. Japonya'nın oranlarının düşük seviyelerde kalması dikkat çekmektedir. Bu, Japonya'da EA'ların benimsenme hızının görece düşük olduğunu göstermektedir. ABD, 2020'den sonra düzenli bir artışla 2024'te %10 seviyelerine ulaşmıştır. Genel olarak kümedeki ülke verileri incelendiğinde 2014-2019'da EA pazarının doymun olmadığı görülmüştür. Bu dönemde çoğu ülkede EA'lar yok denecek kadar az satılmıştır. 2020'den sonra tüm ülkelerde küçük de olsa artışlar başlamıştır. Bu da, küresel EA dönüşümünün 2020'lerde hızlandığını net şekilde ortaya koymaktadır. EA satışları, 2020'ye kadar çok sınırlı yayılmışken, son 5 yılda özellikle gelişmiş pazarlarda hızlı bir büyüme trendine girmiştir. Almanya gibi ülkelerde daha agresif büyüme yaşanırken bazı ülkelerde yaygınlaşma düşük kalmıştır.



Şekil 23. Birinci küme ülkeleri elektrikli araç satış oranı (üçlü küme)

İkinci kümede yer alan ülkelerin EA satış oranlarını gösteren ısı haritası Şekil 24'te görülmektedir. 2014-2024 dönemine ait veriler incelendiğinde EA liderinin Norveç olduğu görülmüştür. Norveç'te EA satış değerleri, 2014'te %0,1'den başlayıp her yıl kesintisiz büyüyerek 2020'de %75, 2021-2024 arasında %90 seviyesine ulaşmıştır. Gerçekleşen bu oranlar, Norveç'in EA satışında dünya lideri olduğunu net şekilde yansıtmaktadır. İzlanda, İsveç, Hollanda, Danimarka, Finlandiya 2020 sonrası %30'dan %60'a kadar çıkan oranlarla Norveç'ten sonra en hızlı büyüyen pazarlar arasındadır. Özellikle 2022-2024'te İzlanda %70, İsveç %60, Hollanda %50, Danimarka %60 civarına ulaşmıştır. Belçika, İsviçre, Lüksemburg gibi ülkelerde satışlar, 2020 sonrası %20-%40 bandında gerçekleşmiştir. Portekiz, İngiltere, İrlanda, Fransa'da 2020'den sonra düzenli artışlar görülmüştür. 2024'te oranlar %20-30 seviyelerine çıkmıştır. Yeni Zelanda, Slovenya, Slovakya, Macaristan, İspanya, ve İtalya gibi ülkelerde diğer ülkelere kıyasla EA yaygınlaşması yavaş ilerlemiştir. Elektrikli araç satış oranlarında en dikkat çeken ülke Norveç olmuştur. Ülkede oranlar, 2014'ten itibaren her yıl artış göstererek erken ve hızlı benimseme sergilemiştir. Norveç'in erken teşvik politikaları ve altyapı yatırımlarının etkisinin bu oranlarda etkisinin büyük olduğu düşünülmektedir. Avrupa genelinde kuzey ülkeleri fark yaratmıştır. İskandinav ülkeleri (Norveç, İsveç, Danimarka, Finlandiya) EA pazarında açık ara öndedir. Güney ve Doğu Avrupa ülkeleri ise bu ülkelere göre geride kalmıştır. Genel olarak ikinci kümede yer alan ülkelere ait veriler incelendiğinde 2014-2019 arası pazarın çoğu ülkede durağan olduğu, satış oranlarının düşük olduğu görülmektedir. 2020 itibarıyla Avrupa'nın genelinde EA satışlarının hız kazandığı çok belirgindir. 2022-2024 aralığı birçok ülkede satış oranlarının hızla tırmandığı dönemdir. Avrupa'da EA dönüşümünün bu dönemde ivme kazandığı açıkça görülmektedir. EA pazarının 2020'den sonra ciddi hız kazandığı ve başta Norveç olmak üzere Kuzey Avrupa'da satışların çok yüksek oranlara ulaştığı gözlemlenmiştir. EA'ların yaygınlaşmasında bölgesel farklılıklar net şekilde görülmüştür. Kuzey ve Batı Avrupa önde giderken Güney ve Doğu Avrupa daha yavaş ilerlemiştir.



Şekil 24. İkinci küme ülkeleri elektrikli araç satış oranı (üçlü küme)

Üçüncü kümede yer alan ülkelerin EA satış oranlarını gösteren ısı haritası Şekil 25'te görülmektedir. Listenin en hızlı artış gösteren ülkesi İsrail'dir. 2023'te %17'ye ulaşmış ve 2024'te de %21 seviyesinde kalmıştır. Litvanya, Letonya'da satışlar, 2020'de %1-2 seviyelerine yükselip 2022-2024'te %10 seviyelerinde sabit kalmıştır. Değerler, Baltık ülkeleri arasında EA'ların belirginleşmeye başladığını göstermektedir. Yunanistan, Türkiye, Avustralya'da satışlar 2022'den itibaren %10 seviyelerine ulaşmıştır ve 2023-2024'te bu oranı korumuştur. EA satışları, pazarın yavaş ama istikrarlı geliştiğini göstermektedir. Kolombiya'da EA satışları, 2024'te %7'ye ulaşarak hareketlilik göstermeye başlamıştır. Şili ve Meksika haritanın en dikkat çekici düşük performanslı ülkeleridir. EA satışları, 2014-2024 arasında neredeyse tamamen %0-2 seviyelerinde kalmış, 10 yılda kayda değer bir yaygınlaşma olmamıştır. Genel eğilimler incelendiğinde 2014-2019 yıllarında tüm ülkelerde oranlar düşük gerçekleşmiştir, satışlar yok denecek kadar azdır. 2020'den itibaren bazı ülkelerde EA satış oranlarında artışlar başlamıştır. Ancak artış hızı birinci ve ikinci kümedeki lider ülkelere göre çok daha sınırlıdır. Zaman bazında genel trende bakıldığında 2020'ye kadar bölge genelinde pazarın tamamen durağan olduğu görülmektedir. 2021'den sonra ülkelerde artışlar gözlenmeye başlamıştır. 2023-2024'te ise bazı ülkelerin satışları (İsrail başta olmak üzere) diğerlerinden ayrılarak %20 seviyesine kadar çıkmıştır. Ancak artış oranları, önceki kümelerde görüldüğü gibi Avrupa'nın kuzeyi veya Almanya gibi pazarlarla kıyaslandığında çok düşük kalmıştır. Bu durum EA yaygınlığının bu ülkelerde hâlâ

başlangıç aşamasında olduğunu göstermektedir. Harita genel anlamda, EA dönüşümünün Latin Amerika (Şili, Meksika) ve bazı gelişmekte olan ülkelerde çok yavaş ilerlediğini; İsrail, Baltık ülkeleri ve Avustralya gibi bazı pazarların ise yeni EA'lara yönelmeye başladığını ortaya koymaktadır. Bölgedeki teşvik politikalarının, altyapı eksikliklerinin ve ekonomik durumların bu yaygınlaşmadaki yavaşlığı etkileyen başlıca faktörler olduğunu düşündürmektedir.



Şekil 25. Üçüncü küme ülkeleri elektrikli araç satış oranı (üçlü küme)

5.5.2. Ülkelerin Dörtlü Kümelemeye Göre Elektrikli Araç Sektörü Açısından Değerlendirilmesi

Ülkeler, kendi küme grupları içerisinde UEA'dan elde edilen verilere göre EA sektörü açısından değerlendirilmiştir ve oluşturulan dört ayrı küme grubu için ısı haritaları oluşturulmuştur. Birinci kümede yer alan ülkelerin EA satış oranlarını gösteren ısı haritası Şekil 26'da görülmektedir. 2014–2024 yılları arasında farklı ülkelerde EA'ların satış oranları incelendiğinde ABD'de düzenli ve istikrarlı bir artış eğiliminin söz konusu olduğu görülmektedir. 2014'te %0.8 olan oran, kademeli olarak artarak 2024'te %10'a ulaşmıştır. Almanya, haritanın en dikkat çeken ülkesidir. Ülkenin oranları, 2019'da %3 iken, 2020'de %14'e, 2021'de %26'ya, 2022'de %31'e yükselmiştir. Ancak 2023 ve 2024'te düşüş gözlenmektedir. Ülkede hızlı büyüme sonrası doygunluk ve yavaşlama sürecine girilmiştir. Çek Cumhuriyeti'nde EA satış oranları, 2014–2017 arasında neredeyse yok denecek kadar azdır. Ülkede 2020'den sonra artış hızlanmaktadır. Almanya kadar olmasa da düzenli artış gözlenmektedir. Oranların 2014'te %0 iken,

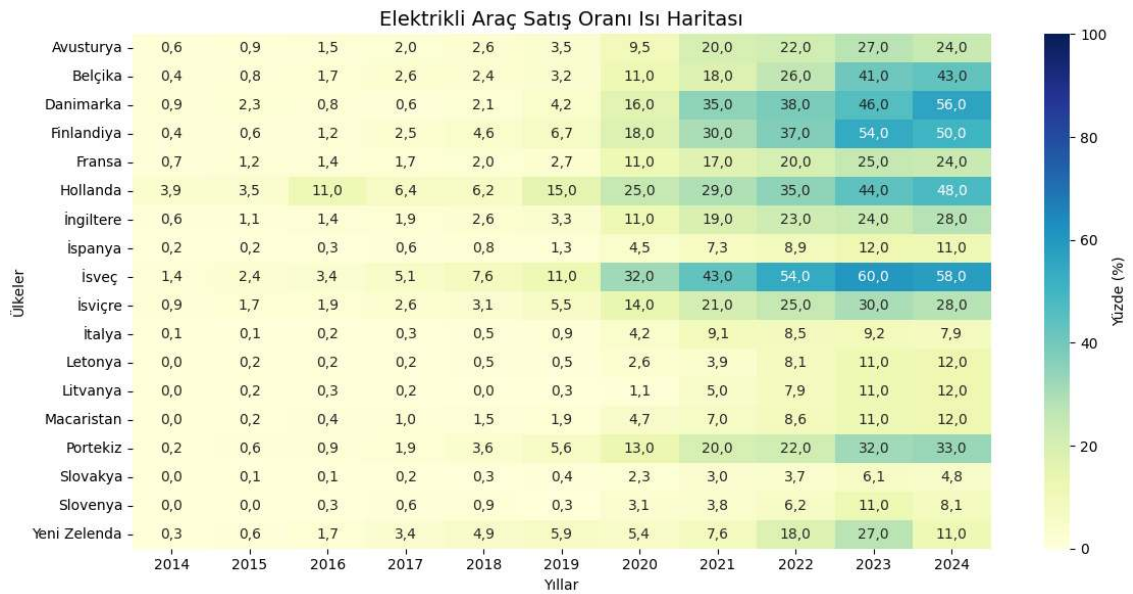
2024'te %10'a kadar yükselen Estonya'da küçük pazara rağmen güçlü bir artış trendi vardır. 2014'te %0,7, 2024'te ise sadece %2,8 oran gözlemlenen Japonya'da pazar durağan seyretmektedir. Ülkede EA adaptasyonu diğer ülkelere kıyasla yavaş ilerlemektedir. Güney Kore'de oranlar 2014'te %0,1, 2024'te %9,2 olarak gözlemlenmiştir. Ülkede özellikle 2017 sonrası hızlı bir yükseliş gözlenmektedir. Polonya'da yavaş ama sürekli bir artış eğilimi vardır. Artışlar 2020 sonrası hızlanmaya başlamıştır. Genel olarak Almanya, kümedeki en hızlı büyüyen pazardır, ancak son yıllarda artış eğiliminde düşüş yaşanmıştır. ABD, Estonya, Güney Kore düzenli ve güçlü artış eğilimindedir. Çek Cumhuriyeti ve Polonya orta hızda artış göstermektedir. Japonya, diğer ülkelere oranla EA'lara adaptasyon konusunda geride kalmıştır.



Şekil 26. Birinci küme ülkeleri elektrikli araç satış oranı (dörtlü küme)

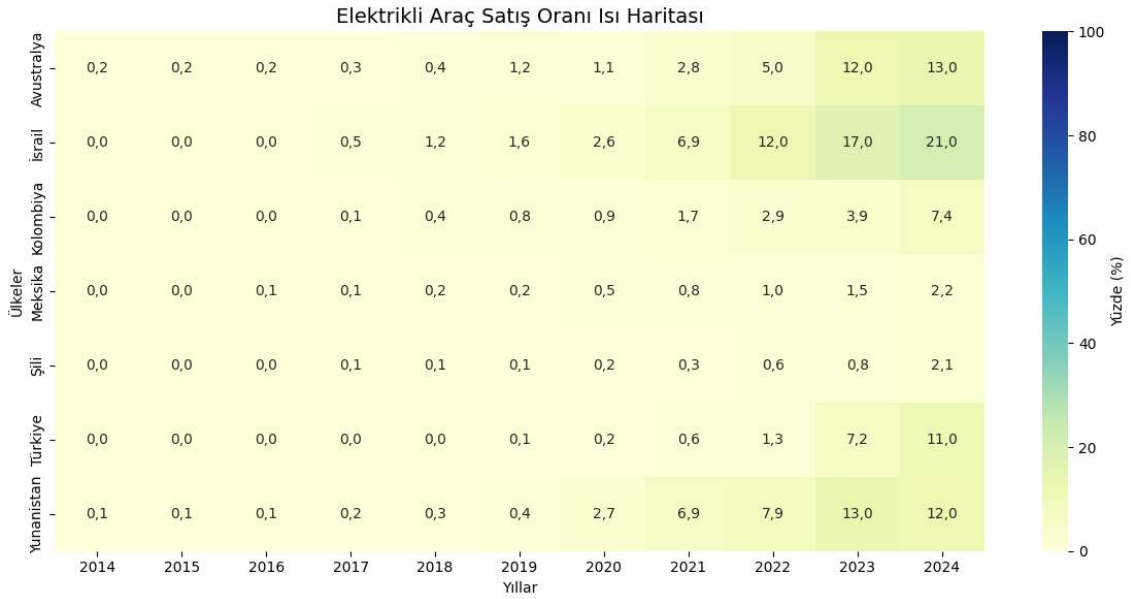
Şekil 27, 2014–2024 yılları arasında ikinci kümede yer alan ülkelerin EA satış oranlarının gelişimini göstermektedir. Şekil incelendiğinde en güçlü yükselişin Kuzey Avrupa ülkelerinde olduğu görülmektedir. İsveç'te oranların, 2014'te %1,4, 2023'te %60, 2024'te %58 şeklinde olduğu gözlemlenmektedir. Ülkede adaptasyon hızla artmıştır. Danimarka, 2014'te %0,9, 2024'te %56 oranla en hızlı yükseliş gösteren ülkelerdendir. Finlandiya, 2014'te %0,4, 2024'te %50 oranla istikrarlı ve güçlü büyüme göstermiştir. 2014'te %3,9, 2016'da %11, 2020'de %25, 2021'de %29, 2022'de %35, 2023'te %44, 2024'te %48 oranlara ulaşan Hollanda, istikrarlı bir artış eğilimindedir. İsviçre, 2014'te %0,9, 2024'te %28 ile yavaş ama sürekli yükseliş göstermiştir. Fransa, 2014'te %0,7,

2024'te %24 ile dengeli bir artış eğilimindedir. İngiltere, 2014'te %0,6, 2024'te %28 oran ile düzenli yükseliş göstermiştir. Özellikle 2020 sonrası artış gözlemlenen Belçika'da oranlar, 2014'te %0,4, 2024'te ise %43'tür. İspanya, İtalya, Portekiz gibi Güney Avrupa ülkelerinde yükseliş nispeten daha yavaş gerçekleşmiştir. İspanya'da 2014'te %0,2, 2024'te %11 ile düşük adaptasyon gerçekleşmiştir. İtalya, 2014'te %0,1, 2024'te %7,9 oran ile kümenin en yavaş adaptasyon yaşayan ülkelerinden biridir. Portekiz, 2014'te %0,2, 2024'te %33 ile daha iyi bir yükseliş eğilimi göstermiştir. Macaristan, Slovakya, Slovenya, Litvanya, Letonya gibi Orta ve Doğu Avrupa ülkeleri, %8–12 bandında seyrederek genel olarak düşük seviyede kalmışlardır. Bu ülkeler, Batı ve Kuzey Avrupa'ya kıyasla adaptasyonda daha zayıftır. Artış eğiliminden sonra düşüş eğilimine giren Yeni Zelanda ise, 2014'te %0,3, 2024'te %11 oranla Avrupa ortalamasına göre düşük bir artış göstermiştir. Genel olarak küme ülkelerinin adaptasyonları değerlendirildiğinde kümenin lider ülkeleri, İsveç (%60), Danimarka (%56), Finlandiya (%50), Hollanda (%48) ve Belçika (% 43)'dür. Avusturya, Fransa, İngiltere, İsviçre, Portekiz gibi ülkeler 20–40% arası oranlarla orta düzeyde ilerleyen ülkelerdir. İspanya, İtalya, Letonya, Litvanya, Macaristan, Slovakya, Slovenya ve Yeni Zelanda gibi ülkelerin oranları %10 civarında gerçekleşmiş ve diğer ülkelere göre geride kalmıştır. 2014'te tüm ülkeler %1–2 seviyelerindeyken, 2024'e gelindiğinde EA'lar, Kuzey ve Batı Avrupa'da yaygın kabul görmüş, Güney ve Doğu Avrupa ise daha yavaş ilerlemiştir.



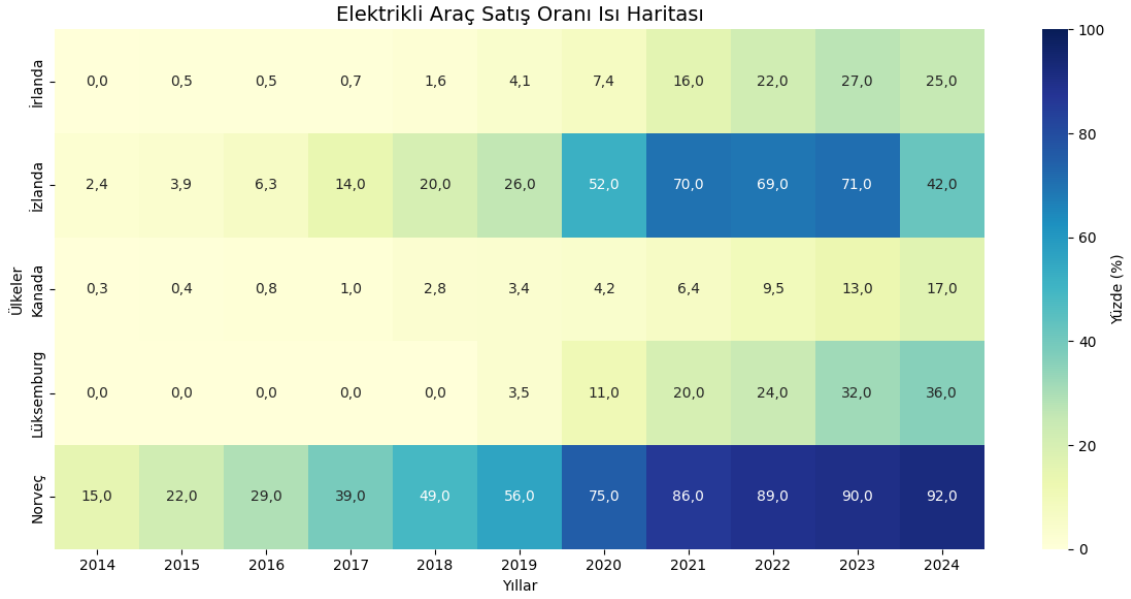
Şekil 27. İkinci küme ülkeleri elektrikli araç satış oranı (dörtlü küme).

Üçüncü kümede yer alan ülkelerin 2014–2024 yılları arasındaki EA satış oranları Şekil 28'deki gibidir. Avustralya, 2014'te %0,2, 2020'ye kadar %1 civarında seyretmektedir. 2021'den sonra hızlı yükseliş yaşamış ve 2024'te %13 seviyelerine ulaşmıştır. İsrail'de 2014–2016 arasında EA satışı gerçekleşmemiştir. Ülkede, 2017'den itibaren satışlar başlamıştır ve 2024'te %21 seviyelerine ulaşmıştır. Kümenin diğer ülkelerine kıyasla en hızlı yükselişi gösteren ülkedir. Kolombiya'da satışlar, 2014–2018 arasında yok denecek kadar düşüktür (%0,0–0,1). 2019'dan sonra kademeli artış görülmektedir. Oranların 2024'te %7,4'e kadar yükseldiği ülkede, yavaş ama istikrarlı büyüme söz konusudur. 2014–2018'de %0,1 seviyesinde oranlar gözlemlenen Meksika'da 2019 sonrası sınırlı artış vardır. Ülkede satış oranları, 2024'te sadece %2,2 seviyelerine ulaşabilmiştir. Ülke, küme ülkeleri içinde EA'lara en düşük adaptasyon sağlayanlardan birisidir. 2014–2019'da neredeyse hiç satış gerçekleşmeyen Şili'de, 2020 sonrası küçük artışlar gözlemlenmiştir. 2024'te satışların %2,1 seviyelerine ulaşan ülke yavaş ilerleyen ülkeler arasındadır. Satışların 2019'dan sonra başladığı ülkemizde, özellikle 2022 sonrası ciddi hızlanma gözlenmektedir. Türkiye'de 2024 yılında EA satışları %11 seviyelerine ulaşmıştır. 2014–2018 döneminde %0,1–0,3 seviyelerinde seyreden Yunanistan'da 2020'den sonra artışlar gözlenmektedir. Ülkede oranlar, 2023'te zirveye (%13) ulaşmış, 2024'te ise biraz düşüş (%12) yaşanmıştır. Genel olarak kümedeki ülkeler incelendiğinde, en hızlı yükseliş İsrail'de (%21) görülmüştür. Avustralya (%13), Türkiye (%11) ve Yunanistan (%12) yüksek artış gösteren ülkeler arasındadır. Kolombiya (%7,4) orta düzeyde uyum sağlayan ülkeler arasında yer almaktadır. Meksika (%2,2) ve Şili (%2,1) ise grupta diğer ülkelere kıyasla EA'lara uyumda geri kalan ülkelerdir. Genel olarak, 2020 sonrası tüm ülkelerde EA'lara yönelim başlamış; fakat adaptasyon hızı ülkeden ülkeye çok farklılık göstermiştir. İsrail, Türkiye ve Yunanistan öne çıkarken, Latin Amerika ülkeleri (Meksika, Şili, Kolombiya) daha yavaş ilerleme kaydetmiştir.



Şekil 28. Üçüncü küme ülkeleri elektrikli araç satış oranı (dörtlü küme)

Dördüncü kümede yer alan ülkelerin 2014–2024 yılları arasındaki EA satış oranları Şekil 29’daki gibidir. Norveç EA satış oranlarına göre kümedeki diğer ülkelere göre açık ara lider konumundadır. Ülke, 2014 yılından itibaren %15 ile yüksek bir orandan başlamıştır ve 2024’te %92’ye ulaşmıştır. Ülkede 2019’dan sonra çok hızlı bir ivme görülmektedir. Bu durum, ülkedeki güçlü teşvikler ve altyapı desteğinin etkisini yansıtmaktadır. İzlanda, 2014’te %2,4 ile başlamış ve 2021’de %70’e kadar yükselmiş, ancak 2024’te %42’ye düşmüştür. Bu son düşüş, pazar doygunluğu veya geçici ekonomik faktörlerden kaynaklanabilir. Satışların 2019’da başladığı Lüksemburg’da oranlar 2024’te, %36’ya ulaşmıştır. Kanada’da yavaş ve istikrarlı bir artış vardır. Ülkede oranlar, 2014’te %0,3 iken 2024’te %17’ye ulaşmıştır. İrlanda, 2014–2018 arası çok düşük seyirden sonra 2019 sonrası ivmelenmiştir. Ülkede oranlar, 2024’te %25 ile orta seviyeye ulaşmıştır. Genel anlamda Norveç, EA benimsemesinde açık ara öndedir ve neredeyse tam pazar dönüşümüne ulaşmış durumdadır. İzlanda ve Lüksemburg hızlı adaptasyon örneği sergilerken İrlanda orta hızda ilerleme kaydetmiştir. Kanada ise daha yavaş bir geçiş çizgisine sahiptir. Tüm ülkelerde 10 yıllık dönemde artış eğilimi vardır, ancak artış hızı ve düzeyi ülkeden ülkeye çok farklılık göstermektedir. Ülkeler arası bu farklılıklar, politik teşviklerin ve altyapının EA yaygınlığındaki kritik rolünü göstermektedir.



Şekil 29. Dördüncü küme ülkeleri elektrikli araç satış oranı (dörtlü küme)

Ülkelerin üçlü ve dörtlü kümelenmelerindeki genel tablo incelendiğinde, kümeler arasında özellikle 4. kümenin diğer gruplardan belirgin biçimde ayrıştığı görülmektedir. Bu durum, küresel elektrikli araç pazarının oldukça dengesiz bir büyüme gösterdiğini ve bazı ülkelerin politika desteği, altyapı kapasitesi ile teşvik mekanizmaları açısından çok daha ileri bir konumda bulunduğunu ortaya koymaktadır. Nitekim kümelerin yapısal özellikleri de bu farklılığı desteklemektedir. Küme 1, ekonomik olarak büyük ancak fosil yakıtlara yüksek bağımlılığı nedeniyle karbon yoğunluğu fazla olan ülkelerden oluşmaktadır. Küme 2 ise çoğunlukla Avrupa’da yer alan, düşük karbonlu yapıya geçmiş, enerji verimliliğine uyum sağlamış ülkeleri kapsamaktadır. Küme 3, geçiş sürecindeki, orta düzey karbon yoğunluğuna sahip daha karma bir profile işaret ederken; 4. küme hem çok yüksek gelir düzeyine hem de düşük karbon yoğunluğuna sahip seçkin ülkeleri temsil etmektedir.

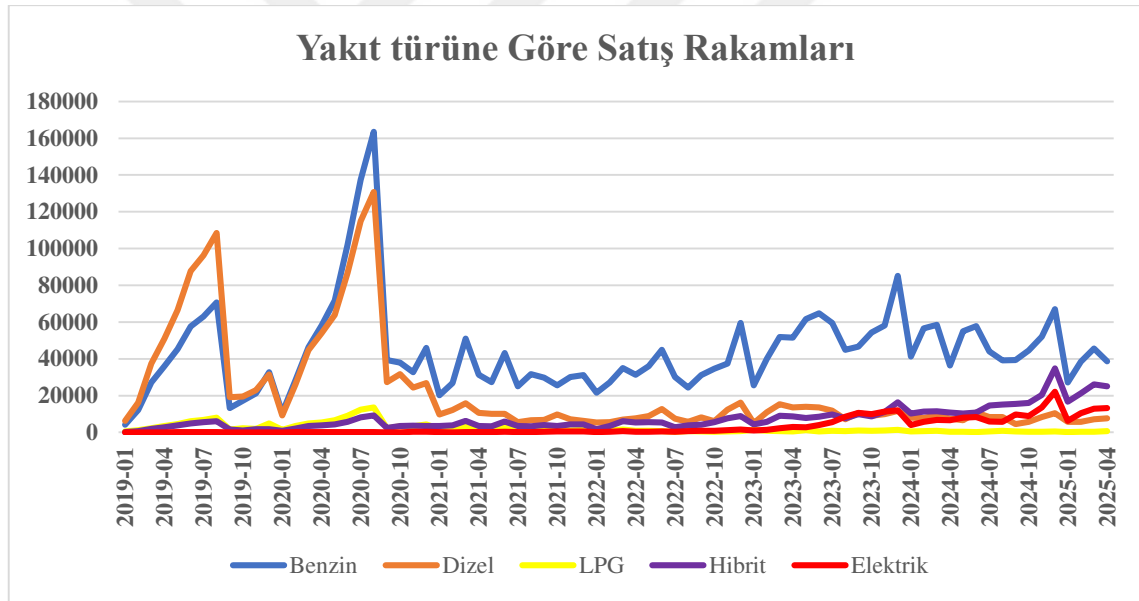
Bu genel yapı, ülkelerin elektrikli araç adaptasyon hızlarının politika tercihlerinden ekonomik kapasitelere, enerji sistemlerinin dönüşüm seviyesinden tüketici eğilimlerine kadar pek çok faktörden etkilendiğini göstermektedir. 4. kümede yer alan ülkeler hızlı ve kararlı bir dönüşüm süreci geçirirken, 2. küme istikrarlı bir ilerleme sergilemektedir. Buna karşın 1. ve 3. kümeler henüz elektrikli araçlara geçişin erken aşamalarında olup daha yavaş ilerleyen gruplar olarak öne çıkmaktadır. Bu bulgular, elektrikli araç pazarındaki farklılıkların arkasında ülkelere özgü yapısal ve politik unsurların kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır.

5.6. Türkiye’deki Araç Sektörünün Mevcut Durumu, Gelecek Dönemler için Tahmini ve Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi

Otomotiv Distribütörleri&Mobilité Derneği verilerine göre Türkiye’deki araç sektörünün mevcut durumu incelenmiş, gelecek dönemler için yakıt türlerine göre araç satış sayıları tahmin edilmiş, bu değerlerden kaynaklı CO₂ emisyon değerleri hesaplanmış ve yorumlanmıştır.

5.6.1. Türkiye’deki Araç Sektörünün Mevcut Durumu

Türkiye’nin gelecek dönemlerdeki araç satış tahmini için kullanılacak Ocak 2019-Nisan 2025 arasındaki satış verileri, Otomotiv Distribütörleri&Mobilité Derneği’nden alınmıştır ve Şekil 30’daki gibidir.



Şekil 30. Yakıt türüne göre araç satış sayıları

Grafikte 2019 başından 2025’in ilk çeyreğine kadar farklı yakıt türlerine göre satış rakamlarının zamana bağlı değişimi gösterilmiştir. Ana gözlemler şunlardır:

Benzinli araç satışları

- Satışlar 2019’dan 2020 ortasına kadar hızlı bir artış göstermiş ve 2020 ortasında en yüksek tepe noktasına ulaşmıştır (~160.000 adet civarında).
- 2020 ortasından sonra ise dramatik bir düşüş yaşanmış, ardından 2021’den itibaren daha dalgalı ama nispeten düşük seviyelerde seyretmiştir.

- 2022 ve sonrasında ise benzin satışlarında genel bir dalgalı artış eğilimi vardır. Ancak hiçbir zaman 2020'deki zirveye ulaşamamıştır.

Dizel araç satışları

- Benzinle paralel şekilde 2019'dan 2020 ortasına kadar keskin bir artış göstermiştir ve yaklaşık 120.000 adetle zirve yapmıştır.
- 2020 ortasından sonra satışlar hızla düşmüştür ve 2021'den sonra düşük seviyelerde dalgalı şekilde devam etmiştir.
- Satış rakamları detaylı incelendiğinde dizel araçlara rağbetin önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir.

LPG araç satışları

- Satışlar dönem boyunca çok düşük kalmıştır ve belirgin bir artış ya da azalış eğilimi göstermemiştir. Satış rakamları genellikle 10.000'in altında kalmıştır.

Hibrit araç satışları

- Satışlar 2019-2021 arası düşük seyretmiştir.
- 2021 sonlarından itibaren ise belirgin bir yükseliş trendine girmiştir ve 2024'te satışlar hızla artarak yaklaşık 30.000 seviyelerine ulaşmıştır. Bu, hibrit araçlara ilginin giderek arttığını göstermektedir.

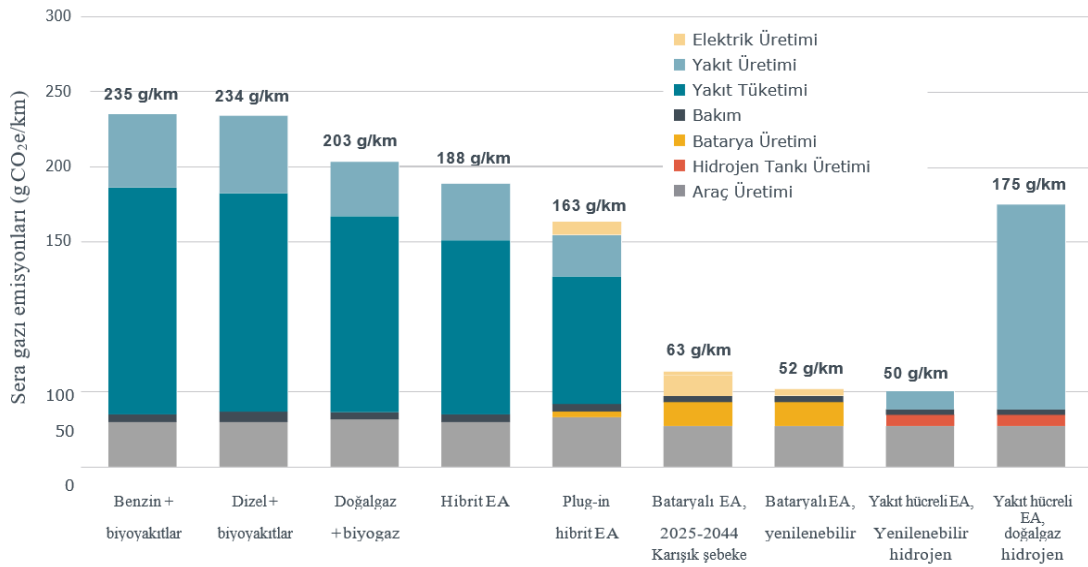
Elektrikli araç satışları

- Satışlar 2019-2021 arası neredeyse yok denecek kadar düşüktür.
- 2022'den itibaren kademeli bir artış başlamıştır ve 2024'te ciddi bir sıçrama yaparak 15.000'e kadar yükselmiştir. Bu, EA'ların pazar payının büyümeye başladığını göstermektedir.

Genel anlamda 2020 ortasındaki benzin ve dizel satışlarındaki zirve muhtemelen pandemi sonrası ertelenmiş talebin etkisini veya ekonomik/küresel koşulları yansıtmaktadır. 2021 sonrası dizel ve benzinde talep düşerken hibrit ve elektrikli araçların yükselişe geçtiği net bir şekilde görülmektedir. 2023-2025 arasında hibrit ve elektrikli araçların toplam satış içindeki payı hızla artmıştır. Elektrikli ve hibrit araç pazarındaki dönüşümün başladığı ve tüketicilerin alternatif yakıtlara yöneldiği açıkça görülmektedir. Pazar, 2020'ye kadar geleneksel yakıtlara (benzin ve dizel) bağımlıyken; 2021'den sonra hibrit ve elektrikli araç satışları yükselişe geçmiştir, bu da otomotiv sektöründe sürdürülebilirliğe ve yeni teknolojilere geçiş trendini açıkça ortaya koymaktadır.

5.6.2. Türkiye'nin Gelecek Dönemlerdeki Araç Sayılarının Yakıt türüne Göre Tahmini ve Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi

Bu bölümde araçların yakıt türlerine göre gelecek dönemler için satış tahminleri gerçekleştirilmiş ve tahmin edilen değerlere göre CO₂ emisyon değerleri hesaplanmıştır. Şekil 31'de görülen yakıt türlerine göre değişiklik gösteren CO₂ emisyon değerleri Uluslararası Temiz Ulaşım Konseyi'nin 2025 raporundan elde edilmiştir. Raporun ortalama değerlerine, elektrik üretimi, yakıt üretimi, yakıt tüketimi, bakım, batarya üretimi, araç üretimi gibi tüm süreçlerinden kaynaklanan emisyon değerleri dahil edilmiştir.



Şekil 31. Ortalama emisyon değerleri

Kaynak: Uluslararası Temiz Ulaşım Konseyi 2025 Raporu

Yakıt türlerine göre araçların CO₂ emisyon değerleri hesaplanırken Denklem (38)'den yararlanılacaktır. Denklemde yer alan ortalama kat edilen yol, km cinsinden TÜİK'in 2024 yılı için açıkladığı değer olan yıllık 13.564'tür. Yıllık değer, tahminleme aylık bazda yapıldığından aylık ortalama değer baz alınmıştır. Ortalama CO₂ emisyon değeri olarak Şekil 31'deki değerler baz alınmıştır.

Benzinli-Dizel-LPG-Hibrit ve Elektrikli Araçların CO₂ Emisyon Miktarı=Tahmin

edilen taşıt sayısı×ortalama katedilen yol×ortalama CO₂ emisyonu (38)

5.6.2.1. Benzinli Araç Sayılarının Tahmini ve Çevresel Etkileri

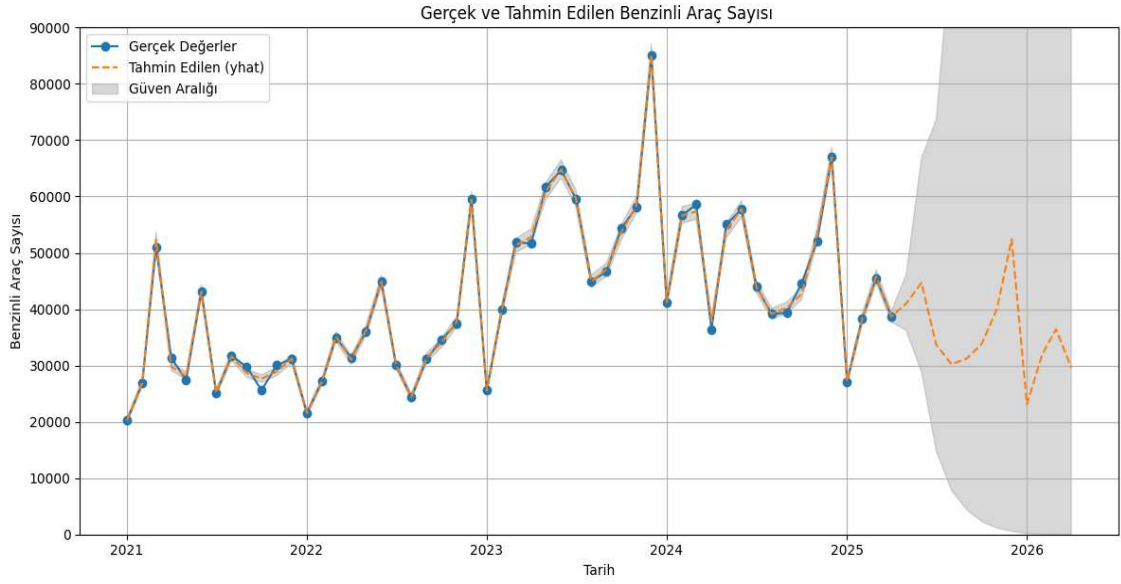
Türkiye'nin yakıt türüne göre bir yıllık otomobil satış değerleri Holt Winters, ARIMA, SARIMA ve Prophet yöntemi ile tahmin edilmiştir. Tahmin algoritmaları için Python programlama dilinden yararlanılmıştır. Yöntemlerin tahminlemede hiperparametre optimizasyonları uygulanmıştır. Benzinli araçların farklı yöntemlerle tahminlerinin hata metrikleri Tablo 14' teki gibi gerçekleşmiştir. Hata metriklerine göre en iyi tahmin sonucunu veren yöntem grid search optimizasyonlu Prophet yöntemidir. Bu nedenle Tablo 15'teki tahmin edilen araç sayısı değerleri için bu yöntemin sonuçları alınmıştır.

Tablo 14.

Yöntemlerin Hata Metrikleri (Benzinli Araç)

	MAE	RMSE	MAPE
Holt Yöntemi	3976,51	5249,52	9,27%
ARIMA Yöntemi	8077,63	10053,70	19,17%
SARIMA Yöntemi	6167,42	8734,68	15,28%
Prophet Yöntemi (Random Search Optimizasyonlu)	489,24	767,72	1,25%
Prophet Yöntemi (Grid Search Optimizasyonlu)	434,55	706,06	1,12%

2021 yılının başından Nisan 2025'e kadar benzinli araç sayısının gerçekleşen değerleri ile yine aynı dönem için modelin tahmin ettiği değerler Şekil 32'deki gibi gerçekleşmiştir. Şekilde ayrıca Nisan 2025'ten Nisan 2026'ya kadarki dönem için tahmin değerleri görülmektedir. Benzinli araç satış verilerinde her yıl içinde belirgin mevsimsellik söz konusudur ve bazı aylarda sert artış ve azalışlar görülmektedir. 2024 yılında benzinli araç sayısında zirve değerler yaşanmıştır. Modelin tahmin değerlerine göre gerçek ve tahmin edilen değerler neredeyse çakışmaktadır. Bu, modelin geçmiş veriye çok iyi uyduğunu göstermektedir.



Şekil 32. Tahmin edilen ve gerçekleşen araç sayıları (benzinli araç)

Benzinli araçlar, yakıt üretimi, yakıt tüketimi, bakım, araç üretimi gibi nedenlerle CO₂ emisyonuna neden olurlar Prophet yönteminin verdiği araç sayıları ve Denklem (38)'deki eşitlikten yararlanılarak elde edilen CO₂ emisyon değerleri Tablo 15'teki gibi gerçekleşmiştir.

Tablo 15.

Tahmin Edilen Araç Sayıları ve Emisyon Miktarları (Benzinli Araç)

Ay	Tahmin Edilen Araç Sayısı	CO ₂ Emisyonu (ton)
Mayıs 2025	40.997	10.890,09
Haziran 2025	44.664	11863,99
Temmuz 2025	33.665	8.942,29
Ağustos 2025	30.240	8.032,58
Eylül 2025	31.231	8.295,74
Ekim 2025	33.802	8.978,80
Kasım 2025	40.006	10.626,82
Aralık 2025	52.415	13.922,95
Ocak 2026	23.084	6.131,88
Şubat 2026	31.999	8.499,72
Mart 2026	36.427	9.675,93
Nisan 2026	29.596	7.861,57

5.6.2.2. Dizel Araç Sayılarının Tahmini ve Çevresel Etkileri

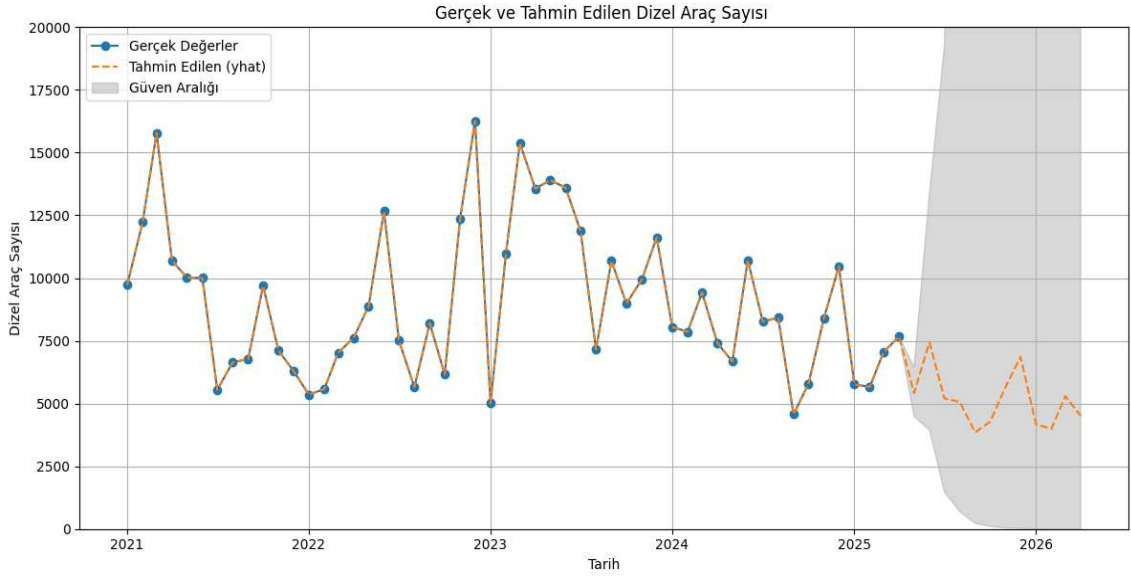
Dizel araçların farklı yöntemlerle tahminlerinin hata metrikleri Tablo 16’da görüldüğü gibidir. Hata metriklerine göre en iyi tahmin sonucunu veren yöntem grid search optimizasyonlu Prophet yöntemidir. Bu nedenle Tablo 17’de görülen tahmin edilen araç sayısı değerleri için bu yöntemin sonuçları alınmıştır.

Tablo 16.

Yöntemlerin Hata Metrikleri (Dizel Araç)

	MAE	RMSE	MAPE
Holt Yöntemi	1077,50	1330,84	12,70%
ARIMA Yöntemi	2060,48	2655,33	24,35%
SARIMA Yöntemi	1907,06	2489,38	22,23%
Prophet Yöntemi (Random Search Optimizasyonlu)	0,58	0,68	0,01%
Prophet Yöntemi (Grid Search Optimizasyonlu)	0,25	0,42	0,003%

Şekil 33’te 2021 yılının başından Nisan 2025’e kadar dizel araç sayısının gerçekleşen değerleri ile yine aynı dönem için modelin tahmin ettiği değerler görülmektedir. Şekilde ayrıca Nisan 2025’ten Nisan 2026’ya kadarki dönem için tahmin değerleri görülmektedir. Dizel araç satış verilerinde her yıl içinde belirgin mevsimsellik söz konusudur ve bazı aylarda sert artış ve azalışlar görülmektedir. 2021 ve 2023 yıllarında dizel araç sayısında zirve değerler yaşanmıştır. Modelin tahmin değerlerine göre gerçek ve tahmin edilen değerler neredeyse çakışmaktadır. Bu, modelin geçmiş veriye çok iyi uyduğunu göstermektedir.



Şekil 33. Tahmin edilen ve gerçekleşen araç sayıları (dizel araç)

Dizel araçlar, yakıt üretimi, yakıt tüketimi, bakım, araç üretimi gibi nedenlerle CO₂ emisyonuna neden olurlar Prophet yönteminin verdiği araç sayıları ve Denklem (38)'deki eşitlikten yararlanılarak elde edilen CO₂ emisyon değerleri Tablo 17'deki gibi gerçekleşmiştir.

Tablo 17.

Tahmin Edilen Araç Sayıları ve Emisyon Miktarları (Dizel Araç)

Ay	Tahmin Edilen Araç Sayısı	CO ₂ Emisyonu (ton)
Mayıs 2025	5.417	1.432,77
Haziran 2025	7.442	1.968,40
Temmuz 2025	5.207	1.377,12
Ağustos 2025	5.059	1.338,15
Eylül 2025	3.852	1.018,91
Ekim 2025	4.278	1.131,43
Kasım 2025	5.665	1.498,48
Aralık 2025	6.862	1.814,99
Ocak 2026	4.179	1.105,26
Şubat 2026	3.994	1.056,46
Mart 2026	5.291	1.399,35
Nisan 2026	4.504	1.191,39

5.6.2.3. LPG’li Araç Sayılarının Tahmini ve Çevresel Etkileri

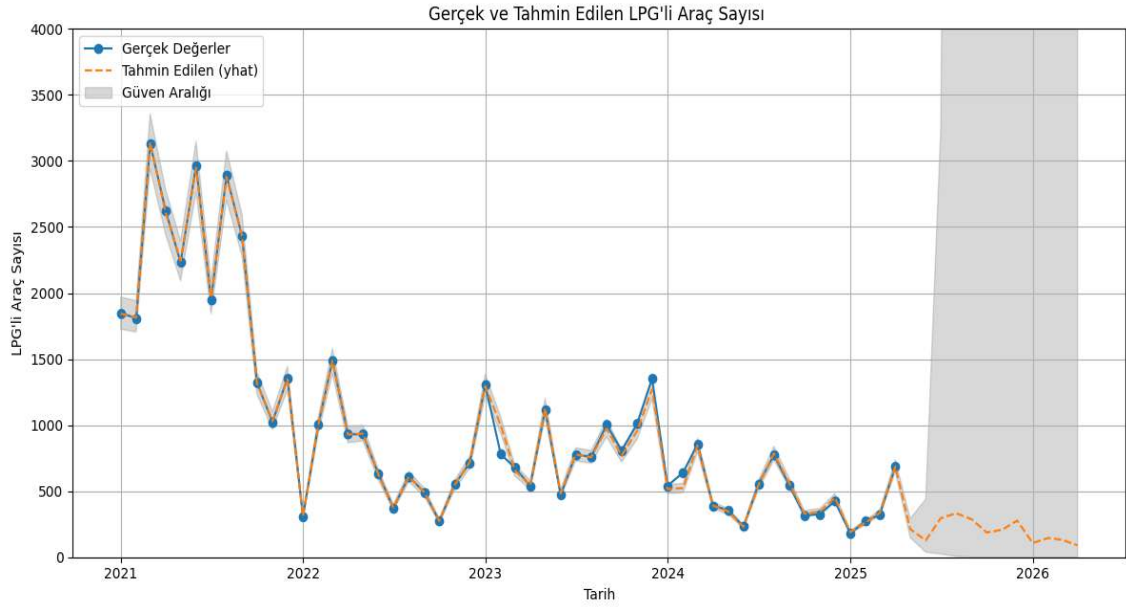
LPG’li araçların farklı yöntemlerle tahminlerinin hata metrikleri Tablo 18’deki gibi gerçekleşmiştir. Hata metriklerine göre en iyi tahmin sonucunu veren yöntem grid search optimizasyonlu Prophet yöntemidir. Bu nedenle Tablo 19’deki tahmin edilen araç sayısı değerleri için bu yöntemin sonuçları alınmıştır.

Tablo 18.

Yöntemlerin Hata Metrikleri (LPG’li Araç)

	MAE	RMSE	MAPE
Holt Yöntemi	159,48	236,12	25,29%
ARIMA Yöntemi	305,48	421,63	42,47%
SARIMA Yöntemi	297,78	410,36	39,94%
Prophet Yöntemi (Random Search Optimizasyonlu)	20,75	38,89	2,7
Prophet Yöntemi (Grid Search Optimizasyonlu)	17,66	38,77	2,5

Şekil 34’te 2021 yılının başından Nisan 2025’e kadar LPG’li araç sayısının gerçekleşen değerleri ile yine aynı dönem için modelin tahmin ettiği değerler görülmektedir. Şekilde ayrıca Nisan 2025’ten Nisan 2026’ya kadarki dönem için tahmin değerleri görülmektedir. LPG’li araç satış verilerinde her yıl içinde belirgin mevsimsellik söz konusudur. Bazı aylarda sert artış ve azalışlar görülmektedir ve son dönemlerde satış değerleri gittikçe azalmıştır. 2021-2022 yıllarından sonraki dönemlerde dizel araç sayısında ciddi azalma gözlenmektedir. Modelin geçmiş veriye çok iyi uyum sağladığı tahmin değerlerinden görülmektedir.



Şekil 34. Tahmin edilen ve gerçekleşen araç sayıları (LPG'li araç)

LPG'li araçlar, yakıt üretimi, yakıt tüketimi, bakım, araç üretimi gibi nedenlerle CO₂ emisyonuna neden olurlar. Prophet yönteminin verdiği araç sayıları ve Denklem (38)'deki eşitlikten yararlanılarak elde edilen CO₂ emisyon değerleri Tablo 19'daki gibi gerçekleşmiştir.

Tablo 19.

Tahmin Edilen Araç Sayıları ve Emisyon Miktarları (LPG'li Araç)

Ay	Tahmin Edilen Araç Sayısı	CO ₂ Emisyonu (ton)
Mayıs 2025	213	48,78
Haziran 2025	127	29,20
Temmuz 2025	295	67,71
Ağustos 2025	333	76,38
Eylül 2025	287	65,88
Ekim 2025	187	42,87
Kasım 2025	208	47,66
Aralık 2025	278	63,71
Ocak 2026	107	24,63
Şubat 2026	145	33,35
Mart 2026	132	30,25
Nisan 2026	89	20,52

5.6.2.4. Hibrit Araç Sayılarının Tahmini ve Çevresel Etkileri

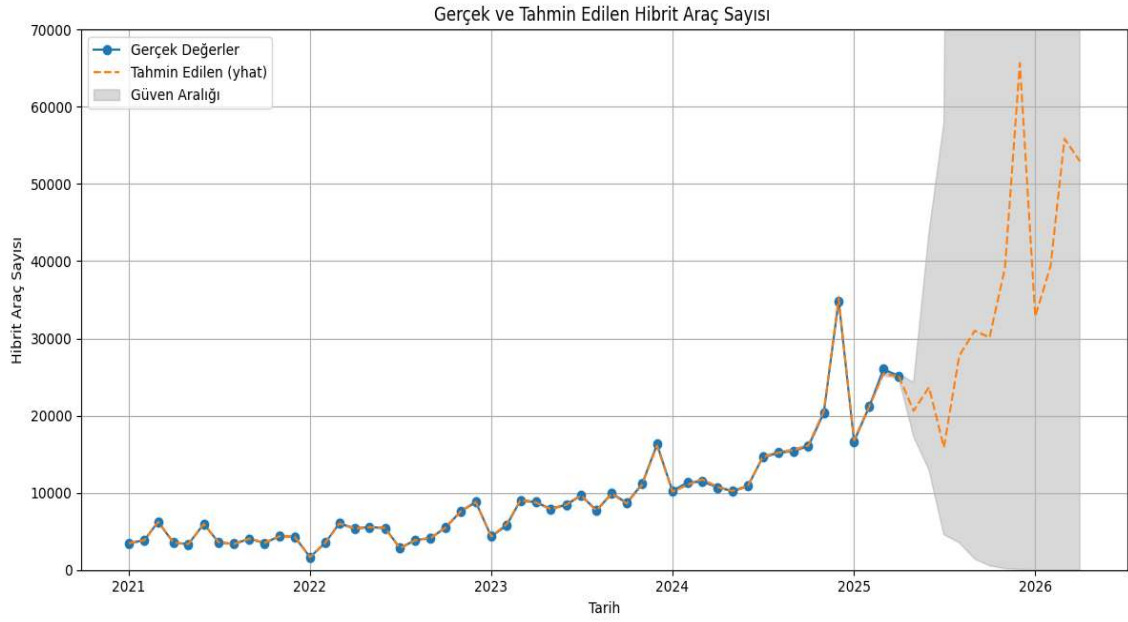
Hibrit araçların farklı yöntemlerle tahminlerinin hata metrikleri Tablo 20’deki gibi gerçekleşmiştir. Hata metriklerine göre en iyi tahmin sonucunu veren yöntem grid search optimizasyonlu Prophet yöntemidir. Bu nedenle Tablo 21’deki tahmin edilen araç sayısı değerleri için bu yöntemin sonuçları alınmıştır.

Tablo 20.

Yöntemlerin Hata Metrikleri (Hibrit Araç)

	MAE	RMSE	MAPE
Holt Yöntemi	747,93	1121,08	13,13%
ARIMA Yöntemi	1999,63	3409,75	22,62%
SARIMA Yöntemi	1645,72	2732,01	19,11%
Prophet Yöntemi (Random Search Optimizasyonlu)	171,49	252,30	2,18%
Prophet Yöntemi (Grid Search Optimizasyonlu)	59,50	128,86	0,44%

Şekil 35’te 2021 yılının başından Nisan 2025’e kadar hibrit araç sayısının gerçekleşen değerleri ile yine aynı dönem için modelin tahmin ettiği değerler görülmektedir. Şekilde ayrıca Nisan 2025’ten Nisan 2026’ya kadarki dönem için tahmin değerleri görülmektedir. Hibrit araç satış verilerinde her yıl içinde belirgin mevsimsellik söz konusu olsa da satışlar, genel anlamda artış eğilimindedir. Özellikle 2025’te ciddi artışlar gözlenmektedir. Prophet modeli ile tahmin edilen geçmiş değerleri, modelin geçmiş veriye çok iyi uyduğunu göstermektedir.



Şekil 35. Tahmin edilen ve gerçekleşen araç sayıları (hibrit araç)

Hibrit araçlar, EA'lerden farklı olarak yakıt üretimi, yakıt tüketimi, bakım, araç üretimi gibi nedenlerle CO₂ emisyonuna neden olurlar. Prophet yönteminin verdiği araç sayıları ve Denklem (38)'deki eşitlikten yararlanılarak elde edilen CO₂ emisyon değerleri Tablo 21'deki gibi gerçekleşmiştir.

Tablo 21.

Tahmin Edilen Araç Sayıları ve Emisyon Miktarları (Hibrit Araç)

Ay	Tahmin Edilen Araç Sayısı	CO ₂ Emisyonu (ton)
Mayıs 2025	20.615	4.380,69
Haziran 2025	23.664	5.028,61
Temmuz 2025	15.874	3.373,22
Ağustos 2025	27.770	5.901,30
Eylül 2025	30.981	6.583,58
Ekim 2025	30.128	6.402,33
Kasım 2025	39.109	8.310,81
Aralık 2025	65.655	13.951,91
Ocak 2026	32.837	6.977,89
Şubat 2026	39.396	8.371,79
Mart 2026	55.865	11.871,54
Nisan 2026	52.952	11.252,43

5.6.2.5. Elektrikli Araç Sayılarının Tahmini ve Çevresel Etkileri

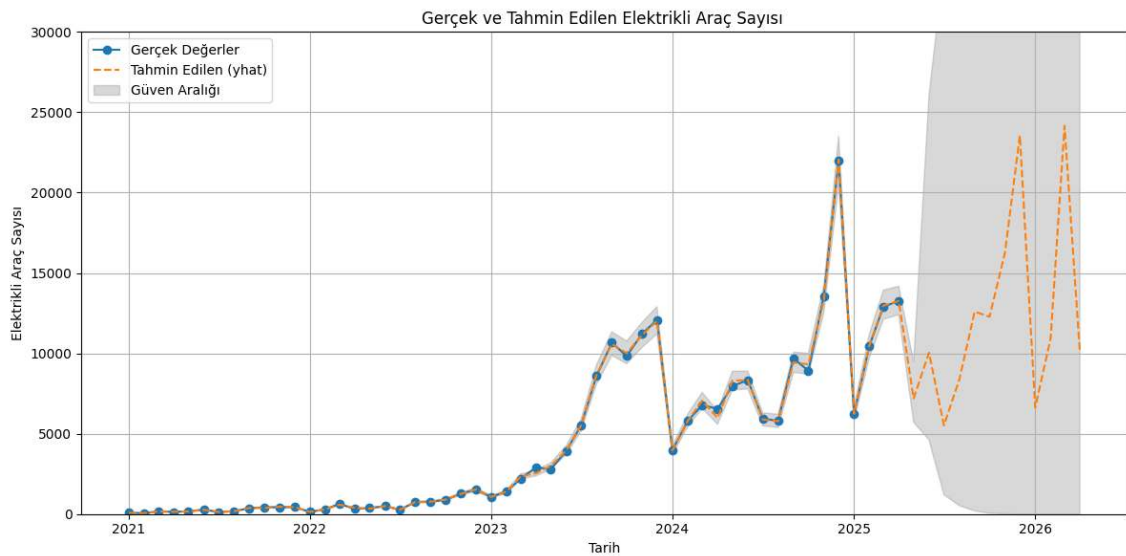
EA'ların farklı yöntemlerle tahminlerinin hata metrikleri Tablo 22'deki gibi gerçekleşmiştir. Hata metriklerine göre en iyi tahmin sonucunu veren yöntem grid search optimizasyonlu Prophet yöntemidir. Bu nedenle Tablo 23'deki tahmin edilen araç sayısı değerleri için bu yöntemin sonuçları alınmıştır.

Tablo 22.

Yöntemlerin Hata Metrikleri (Elektrikli Araç)

	MAE	RMSE	MAPE
Holt Yöntemi	444,72	735,08	16,54%
ARIMA Yöntemi	1145,82	2278,58	31,02%
SARIMA Yöntemi	860,56	1401,82	28,91%
Prophet Yöntemi (Random Search Optimizasyonlu)	80,48	146,48	3,18%
Prophet Yöntemi (Grid Search Optimizasyonlu)	75,96	144,95	3,11%

Şekil 36'daki grafikte 2021 yılının başından Nisan 2025'e kadar EA sayısının gerçekleşen değerleri ile yine aynı dönem için modelin tahmin ettiği değerler görülmektedir. Şekilde ayrıca Nisan 2025'ten Nisan 2026'ya kadarki dönem için tahmin değerleri görülmektedir. EA satış verilerinde her yakıt tipinde olduğu gibi mevsimsellik söz konusudur. Ancak son dönemlerde EA'larda ciddi bir artış söz konusudur. Özellikle 2025 yılının ilk aylarında EA'lara talep artmıştır. Prophet modeli, bu araç türü için tahminlemede de yüksek uyum göstermiştir.



Şekil 36. Tahmin edilen ve gerçekleşen araç sayıları (elektrikli araç)

Alternatif Yakıtlar Veri Merkezi , Çevre Koruma Ajansı ve Uluslararası Enerji Ajansı gibi kuruluşların yaptığı açıklamalara göre, EA'ların yaşam döngüsü emisyonları, kullanılan elektrik karışımına ve batarya üretim süreçlerine bağlıdır. EA'lar, araç kullanımı sırasında 0 g CO₂/km sahiptirler. Yani doğrudan egzoz emisyonları yoktur. Ancak kullandıkları elektriğin kaynağına bağlı olarak dolaylı olarak emisyonu neden olurlar. Prophet yönteminin verdiği araç sayıları ve Denklem (38)'deki eşitlikten yararlanılarak elde edilen CO₂ emisyon değerleri Tablo 23'deki gibi gerçekleşmiştir.

Tablo 23.

Tahmin Edilen Araç Sayıları ve Emisyon Miktarları (Elektrikli Araç)

Ay	Tahmin Edilen Araç Sayısı	CO ₂ Emisyonu (ton)
Mayıs 2025	7.195	512,35
Haziran 2025	10.042	715,08
Temmuz 2025	5.519	392,98
Ağustos 2025	8.362	595,44
Eylül 2025	12.596	896,99
Ekim 2025	12.279	874,38
Kasım 2025	16.263	1.158,09
Aralık 2025	23.556	1.677,43
Ocak 2026	6.632	472,28
Şubat 2026	10.930	778,35
Mart 2026	24.158	1.720,30
Nisan 2026	10.024	713,79

BÖLÜM VI

SONUÇ VE ÖNERİLER

Dünya nüfusundaki artış, enerjiye olan talebin ve fosil yakıt kullanımının her geçen yıl daha da yükselmesine yol açmaktadır. Teknolojik ilerlemelerle birlikte insanların daha rahat ve yüksek yaşam standartlarına ulaşma isteği, enerji ve doğal fosil kaynakların tüketim hızını sürekli artırmaktadır. Bu durum, artan tüketim ihtiyacı ve küresel ticaretin genişlemesiyle birleşerek yalnızca enerji ve fosil yakıt tüketimini değil, aynı zamanda ulaşım alanındaki sorunları da derinleştirmektedir.

Ekonomik faaliyetlerin sürdürülmesi ve insanların temel ihtiyaçlarının karşılanması açısından kritik bir sektör olan ulaşım, aynı zamanda ciddi çevresel etkiler yaratmaktadır. Araç sayısındaki sürekli yükseliş, sera gazı salımlarını ve özellikle atmosferdeki CO₂ miktarını önemli ölçüde artırmakta, bu da hava kalitesini bozarak çevreyi olumsuz etkilemektedir. Ulaşım sektörü hâlen büyük ölçüde fosil yakıtlara bağımlı olup küresel sera gazı emisyonlarının başlıca kaynağı arasında yer almaktadır. İçten yanmalı motorlara sahip fosil yakıtlı araçların yaygın biçimde kullanılması, özellikle kara yolu taşımacılığını çevreyi en çok kirlüten alanlardan biri hâline getirmiştir.

Artan küresel çevre kirliliği, enerji tasarrufu ve emisyonların azaltılması yönündeki çabaları ön plana çıkarmaktadır. Bu çerçevede temiz enerjiye geçiş ve düşük karbon ekonomisi, otomotiv sanayisinin ana eğilimlerinden biri hâline gelmiştir. Geleneksel araçlara kıyasla yeni enerji teknolojilerine sahip araçlar, düşük emisyon ve daha az çevresel zarar gibi avantajları sayesinde hızlı bir büyüme göstermektedir.

Kara yolu ulaşımında sürdürülebilirliği destekleyen önemli bir alternatif olarak EA'lar öne çıkmaktadır. Fosil yakıt kullanmayan ve tamamen elektrikle çalışan bu araçların ihtiyaç duyduğu enerjinin yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi, elektrikli ulaşımı çok daha çevreci ve uzun vadede sürdürülebilir bir seçenek hâline getirecektir.

Bu tez çalışması, enerji ve ulaşım sektörlerinin küresel sera gazı salımları ile iklim değişikliği üzerindeki etkilerini temel alarak OECD üyesi ülkeleri karşılaştırmalı biçimde incelemektedir. Çalışmada, ülkelerin elektrik üretim yapıları, bu üretimin çevresel etkileri, yenilenebilir enerjiye geçiş düzeyleri ve yeni nesil enerji araçlarını benimseme süreçleri değerlendirilmektedir. Teknolojik ilerlemeler enerji ve ulaşım talebini hızla

artırsa da fosil yakıtlara dayalı mevcut sistem, bu sektörleri sürdürülebilirlik açısından kritik bir noktaya taşımaktadır.

Araştırmada elde edilen bulgular, Türkiye'nin diğer OECD ülkeleri arasındaki konumunu ortaya koymakta; ayrıca Türkiye'de EA kullanımına ve yakıt türlerine göre motorlu kara taşıtlarının gelecekteki dağılımına yönelik tahminler sunmaktadır. Benzer performans sergileyen ülkelerin gruplandırılması ve ortak özelliklerinin incelenmesi, çevresel hedeflere ulaşmak için hangi stratejik adımların öncelik taşıdığına dair yol gösterici sonuçlar sağlamaktadır. Bu yaklaşım, çalışmanın özgün yönünü de güçlendirmektedir. Türkiye açısından ise enerji ve ulaşım sektörlerine yönelik sürdürülebilirlik perspektifinden ileriye dönük analizler ve öneriler geliştirilmiştir.

Tablo 24'teki kümeler, ülkeleri benzer makro göstergeler açısından gruplayan bir kümeleme analizinin çıktısını göstermektedir.

Tablo 24.

Dörtlü Kümeleme Karşılaştırması

1.Küme	2.Küme	3.Küme	4.Küme
ABD	Avusturya	Avustralya	İrlanda
Almanya	Belçika	İsrail	İzlanda
Çek Cumhuriyeti	Danimarka	Kolombiya	Kanada
Estonya	Finlandiya	Meksika	Lüksemburg
Japonya	Fransa	Şili	Norveç
Güney Kore	Hollanda	Türkiye	
Polonya	İngiltere	Yunanistan	
	İspanya		
	İsveç		
	İsviçre		
	İtalya		
	Letonya		
	Litvanya		
	Macaristan		
	Portekiz		
	Slovakya		
	Slovenya		
	Yeni Zelenda		

Dörtlü kümelemeye göre 1.küme; ABD, Almanya, Çek Cumhuriyeti, Estonya, Japonya, Güney Kore, Polonya gibi ülkelerden oluşmaktadır. Bu küme genel anlamda sanayileşmiş, enerji yoğun, yüksek emisyonlu ülkelerden oluşmaktadır. 2.küme;

Avusturya, Belçika, Danimarka, Finlandiya, Fransa, Hollanda, İngiltere, İspanya, İsveç, İsviçre, İtalya, Letonya, Litvanya, Macaristan, Portekiz, Slovakya, Slovenya, Yeni Zelanda gibi ülkelerden oluşmaktadır. Küme genel olarak, Avrupa'nın büyük kısmı ve Yeni Zelanda'yı içermektedir. Bu küme, Avrupa merkezli yüksek refah, sürdürülebilirlik odaklı çevreci ülkelerden oluşmaktadır. 3.küme; Avustralya, İsrail, Kolombiya, Meksika, Şili, Türkiye, Yunanistan gibi gelişmekte olan, karma profilli ülkelerden oluşmaktadır. 4.küme ağırlıklı olarak; İrlanda, İzlanda, Kanada, Lüksemburg, Norveç gibi refah düzeyi çok yüksek, yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir çevre koşullarına iyi adapte olabilmiş ülkelerden oluşmaktadır.

Ülkelerin belirli ekonomik, enerji ve çevresel değişkenlere göre dörtlü kümelemedeki sıralamaları Tablo 25 'teki gibi gerçekleşmiştir.

Tablo 25.

Dörtlü Küme Sıralama Karşılaştırması

Küme 1	Küme 2	Küme 3	Küme 4
1.ABD	1.Macaristan	1.Şili	1.İzlanda
2. Güney Kore	2.İsveç	2.Kolombiya	2.Kanada
3.Japonya	3.Fransa	3.Avustralya	3.Norveç
4.Almanya	4.İngiltere	4.Meksika	4.Lüksemburg
5.Estonya	5.İsviçre	5.Türkiye	5.İrlanda
6.Polonya	6.Danimarka	6.İsrail	
7.Çek Cumhuriyeti	7.İspanya	7.Yunanistan	
	8.Letonya		
	9.İtalya		
	10.Finlandiya		
	11.Yeni Zelanda		
	12.Avusturya		
	13.Litvanya		
	14.Hollanda		
	15.Portekiz		
	16.Belçika		
	17.Slovakya		
	18.Slovenya		

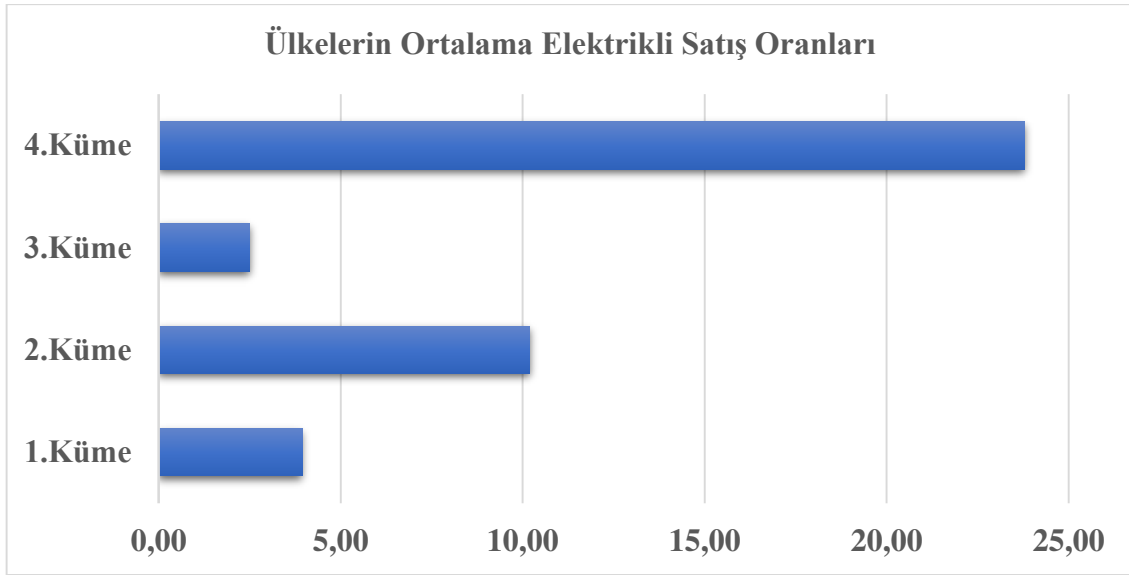
Tablo 25'e göre ülkelerin dörtlü kümelenmesinde 1.küme, yüksek üretim ve yüksek karbon yoğunluğuna sahip ülkelerden oluşmaktadır. Bu ülkeler, ekonomik

büyüklikleri büyük ama enerji dönüşümünde daha geridelerdir. 2. küme, düşük karbonlu, sürdürülebilirlik odaklı gruptur. Enerji dönüşümünü başarıyla uygulayan ülkeler bu gruptadır. 3.küme, enerji dönüşümü devam eden geçiş ekonomilerinden oluşur. 4.küme, yüksek gelirli ve düşük karbon yoğunluklu ülkelerden oluşmaktadır. Bu grupta, hem ekonomik refah çok yüksek hem de enerji üretimi büyük ölçüde yenilenebilir kaynaklardan sağlanmaktadır.

Özetle;

- **Küme 1:** Büyük ekonomiler ama fosil bağımlı, karbon yoğun ülkeler
- **Küme 2:** Avrupa merkezli, düşük karbonlu, enerji verimliliğine adapte olmuş ülkeler
- **Küme 3:** Geçiş sürecinde, orta karbon yoğunluğuna sahip karma profilli ülkeler
- **Küme 4:** Çok yüksek gelirli ve aynı zamanda düşük karbon yoğunluğu olan sürdürülebilir enerjiye adapte olabilen ülkeler.

Şekil 37’de ülkelerin ortalama elektrikli satış oranları, dörtlü kümelemeye göre yatay çubuklarla gösterilmiştir. 1. küme, yaklaşık %4 oranla düşük ama 3. kümeye oranla nispeten biraz daha yüksek oranlara sahiptir. 2. Küme, yaklaşık %10 civarındadır ve orta-üst düzey bir benimsemeyi temsil etmektedir. 3. küme, yaklaşık %2–3 ile en düşük ortalama satış oranına sahiptir. 4. küme, yaklaşık %24 ile açık ara en yüksek ortalama EA satış oranına sahiptir. Bu grup, EA dönüşümünde lider ülkelerden oluşmaktadır. Genel olarak, 4. küme ile diğer kümeler arasındaki fark çok belirgin gerçekleşmiştir. Bu, küresel EA pazarının oldukça dengesiz geliştiğini, belirli ülkelerin politika, altyapı ve teşvikler açısından çok daha ileri olduğunu göstermektedir. 2. küme makul bir geçiş sürecindedir. 1. ve 3. kümeler ise EA’lara adaptasyon konusunda henüz başlangıç aşamasındadır. Bu tablo, EA satış oranlarının ülkeler arası politika, ekonomik imkan ve tüketici eğilimlerindeki farklılıklardan büyük ölçüde etkilendiğini ortaya koymaktadır. Genel anlamda, sürdürülebilir enerji profiline uyum sağlayabilen ülkeler EA adaptasyonunda da iyi konumdadır.



Şekil 37. Kümelerin elektrikli araç satış oranları (dörtlü küme)

Tablo 26'daki veriler 2021–2024 yılları arasında yakıt türlerine göre araç sayısını, bu araçların tahmini sayılarını ve tahmini CO₂ emisyonlarını göstermektedir. Benzinli araç sayısı 2021'de 373.406 iken 2023'te 644.205 ile zirve yapmış, 2024'te 591.823'e gerilemiştir. Belirlenen dönemdeki tahmini toplam araç sayısı 428.126'dır. Tahmini CO₂ emisyonu ise 762.734,44 tondur. En yüksek CO₂ salımı benzinli araçlarda görülmektedir. Dizel araçların 2021'de 110.525 olan sayısı 2024'te 96.055'e gerilemiştir. Dizel araçlar için tahmini toplam araç sayısı 61.750'dir. Tahmini CO₂ emisyonu ise 110.377,79 tondur. Dizel araç sayısı düşüş eğilimindedir, ancak hâlâ yüksek emisyon yaratmaktadır. 2021'de 25.583 olan LPG'li araç sayısı hızla düşerek 2024'te 5.950'ye inmiştir. Tahmini toplam araç sayısı 2401'dir. Tahmini CO₂ emisyonu, 3.982,24 tondur. LPG'li araçların sayısı oldukça azalış eğiliminde olduğundan toplam içindeki payı oldukça azalmış ve toplam emisyon içindeki etkisi düşmüştür. 2021'de 49.493 olan hibrit araç sayısı, 2024'te 181.198'e çıkmıştır. Tahmini toplam araç sayısı 434.847, tahmini CO₂ emisyonu 499.858,78 tondur. Hibrit araçlar hızla artmaktadır. Hibrit araçların tam elektrikli araçlara göre çevresel etkisi daha fazladır. EA'lar, 2021'de yalnızca 2.846 iken 2024'te 105.315'e yükselmiştir. Belirlenen döneme göre tahmini toplam araç sayısı 147.554, tahmini CO₂ emisyonu, 60.313,66 tondur. Piyasada en hızlı büyüyen segment elektrikli araçlardır. Emisyonları benzin/dizel/hibritten çok daha düşüktür. Benzinli araçlar hem sayı hem de emisyon bakımından en yüksek paya sahiptir. Piyasada dizel ve LPG araç rakamları gerilerken hibrit ve elektrikli araçlar hızla artmaktadır. EA'ların emisyonları çok daha düşük olduğundan, filoda elektrikli araç payının artması CO₂ emisyonlarının düşürülmesi açısından oldukça kritiktir. Hibrit araçlar elektrikliye geçişte önemli bir basamak olsa da,

emisyonları hâlâ kayda değer düzeydedir. EA'lar kullanım sırasında egzozdan sıfır emisyon üretir, bu da şehir içi hava kirliliğini ve karbon salımlarını azaltır. Ancak araçların şarj edilmesi için kullanılan elektriğin hangi kaynaktan üretildiği çevresel etkinin boyutunu belirler. Eğer elektrik kömür, doğalgaz gibi fosil yakıtlardan elde edilirse EA'ların dolaylı CO₂ emisyonu yüksek olur ve çevresel avantajı azalır. Buna karşılık, elektrik üretiminde güneş, rüzgâr, hidroelektrik veya biyokütle gibi yenilenebilir kaynakların payı arttıkça EA'ların toplam karbon ayak izi ciddi biçimde düşmektedir. Yenilenebilir enerjiyle şarj edilen EA'lar, hem sıfıra yakın emisyonlu ulaşım sağlar hem de ülkelerin enerji ithalat bağımlılığını azaltmaktadır. Ayrıca, şebekede yenilenebilir kaynakların yaygınlaşması EA'ların enerji depolama ve talep yönetimi açısından da katkı sunmasını mümkün kılmaktadır. Özetle, EA'ların çevresel faydası, kullanılan elektriğin kaynağıyla doğrudan ilişkilidir. Yenilenebilir enerjiyle beslendiklerinde, ulaşım sektörünün karbonsuzlaşmasında en etkili çözümlerden biri haline gelirler.

Tablo 26.

Yakıt Türlerine Göre Tahmin Edilen Yıllık Araç Sayısı ve CO₂ Miktarları

Yakıt Türü	Toplam Tahmin				Toplam Tahmin	
	2021	2022	2023	2024	Edilen Araç Sayısı	Edilen CO ₂ Emisyonu (ton)
Benzin	373.406	413.050	644.205	591.823	428.126	762.734,44
Dizel	110.525	103.275	132.707	96.055	61.750	110.377,79
LPG	25.583	8.309	10.599	5.950	2.401	3.982,24
Hibrit	49.493	60.293	107.651	181.198	434.847	499.858,78
Elektrik	2.846	7.733	72.179	105.315	147.554	60.313,66

Enerji ve elektrik sektörü, endüstriyel üretim ve günlük yaşamın hemen her alanının elektriğe bağımlı olması nedeniyle dünya ekonomisi açısından kritik bir öneme sahiptir. Küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %40'ı bu sektörden kaynaklanırken ulaştırma sektörü %24 ile ikinci sırada yer almaktadır. İklim değişikliğinin önlenememesi durumunda, ekonomik maliyetler küresel GSYİH'nin %20'sine ulaşabilir; ancak etkili önlemler alınırsa bu oran %1 civarında tutulabilir. Sera gazı emisyonlarının yol açtığı iklim değişikliği, artık ciddi ve somut sonuçlar doğurabilen bir tehdit olarak kabul edilmektedir. Endüstrilerin ve politikaların stratejik planlamalarında bu gerçeği dikkate alması gerekmektedir. Bu nedenle çevre dostu ve sürdürülebilir planlamalar zorunludur.

Ulaştırma sektörü halen büyük ölçüde petrol temelli enerjiye dayanmaktadır. Bu durum, iklim değişikliği, büyük şehirlerde hava kirliliği, yükselen petrol fiyatları, üretici ülkelerdeki istikrarsızlık ve petrolün jeopolitik bir araç olarak kullanılması gibi çevresel, ekonomik ve politik sorunları beraberinde getirmektedir.

Güvenli enerji sistemlerinin, her zaman mevcut talebi karşılayacak kapasiteye sahip olması ve beklenmedik durumlar için yeterli rezerv bulundurulması gerekir. Teknolojik ilerlemeler ve geleneksel yakıtların sürdürülebilirliği ile çevresel etkilerine dair artan kaygılar, yenilenebilir enerji kaynaklarından temiz ve sürdürülebilir üretim yapılmasını daha da cazip hâle getirmiştir.

Ulaştırma sektörü, yoğun petrol kullanımı ve yüksek sera gazı emisyonları açısından birçok ülke için öncelikli bir sorun alanıdır. Bu nedenle ülkeler, artan enerji ihtiyacını karşılayabilecek ve sürdürülebilir ulaşım çözümlerini destekleyebilecek ileri teknolojileri teşvik etmektedir. Hibrit ve tam elektrikli araçlar, petrol tüketimini ve sera gazı salımlarını azaltmanın yanı sıra yerel hava kalitesini iyileştirme açısından en umut verici çözümler arasında yer almaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması, EA'ların benimsenmesini destekleyen en önemli faktörlerden biridir. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve biyokütle gibi temiz enerji kaynaklarından üretilen elektrik, EA'ların kullanımını çevresel açıdan sürdürülebilir kılmaktadır. Bu sayede hem fosil yakıt tüketimi azalmakta hem de karbon emisyonları önemli ölçüde düşmektedir. EA'ların kullanımının artması, enerji sistemlerinde esneklik ve şebeke yönetimi açısından yeni fırsatlar yaratırken yenilenebilir enerji yatırımlarını da teşvik etmektedir. Böylece ulaşım sektörü, enerji üretimiyle doğrudan ilişkilendirilen CO₂ emisyonlarını azaltarak daha sürdürülebilir bir yapıya kavuşmaktadır. Özellikle şehir içi ulaşımında EA'lar ve yenilenebilir enerji entegrasyonu, hava kalitesini iyileştirme ve iklim değişikliğiyle mücadelede kritik bir rol oynamaktadır. Sağladığı çevresel ve ekonomik avantajlar nedeniyle, son yıllarda elektrikli ve yeni nesil araçlara olan talep dünya genelinde artış göstermektedir. Bu çalışmada, Türkiye'nin de dahil olduğu OECD üyesi 37 ülke, ekonomik göstergeler, elektrik enerjisi üretim ve kullanım faaliyetleri, bu faaliyetlerin çevresel etkileri ile yenilenebilir enerji kaynaklarına adaptasyon açısından hangi seviyede olduğu değerlendirilmiştir. Performans açısından birbirine yakın ülkelerin değerleri incelenmiş ve Türkiye'nin bu alanlarda OECD ülkeleri arasında hangi konumda olduğu, hangi noktalara odaklanması gerektiği değerlendirilmiştir. Performans bakımından birbirine yakın ülkelerin, yeni nesil enerji kaynaklarının teşvikleri ve modern enerji araçlarını kullanma potansiyeli açısından nasıl

bir seviyede olduğu ve Türkiye'nin bu adaptasyon sürecinde hangi noktada olduğu analiz edilmiştir. Çalışmada ayrıca Türkiye'de geçmişte ve günümüzde kullanılan motorlu kara taşıtlarının yakıt türlerine göre dağılımı ve gelecek dönemde Türkiye'de ulaşım sektöründe araç sayılarının yakıt türlerine göre ne yönde değişeceği analiz edilmiş ve değerlendirilmiştir. Bu tahminden elde edilen sonuçlara göre ülkemizde gelecekte farklı yakıt türlerindeki araçlardan kaynaklanacak CO₂ emisyonları hesaplanmış ve yorumlanmıştır. Tüm bu analizlerle yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının önemi ortaya konmuştur.

Çalışmanın analizleri güncel verilerle ve çalışmada kullanılan yöntemlerden farklı yöntemlerle yinelenerek daha iyi sonuçlar ve çıkarımlar yapılabilir. Tüm bu yönleriyle bu araştırmanın literatüre ışık tutacağı umulmaktadır.



KAYNAKÇA

- Abdel-Basset, M., Gamal, A., Hezam, I. M., & Sallam, K. M. (2024). Sustainability assessment of optimal location of electric vehicle charge stations: a conceptual framework for green energy into smart cities. *Environment, Development and Sustainability*, 26(5), 11475–11513. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03373-z>
- Agrawal, M., & Rajapatel, M. S. (2020). Global perspective on electric vehicle 2020. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 9(1).
- Ali, Z., & Ayaz, M. A. (2024, 21-23 October). *Optimizing Pakistan's power grid: a study on EV charging infrastructure potential*. Proceedings of the 2024 International Conference on Sustainable Energy: Energy Transition and Net-Zero Climate Future, ICUE 2024 Kongresi'nde sunulmuş bildiri. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ICUE63019.2024.10795628>
- Al-Ogaili, A. S., Tengku Hashim, T. J., Rahmat, N. A., Ramasamy, A. K., Marsadek, M. B., Faisal, M., & Hannan, M. A. (2019). Review on scheduling, clustering, and forecasting strategies for controlling electric vehicle charging: Challenges and recommendations. *IEEE Access*, 7, 128353–128371. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2939595>
- Aloqaily, M., Otoum, S., Ridhawi, I. Al, & Jararweh, Y. (2019). An intrusion detection system for connected vehicles in smart cities. *Ad Hoc Networks*, 90, 101842 <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2019.02.001>
- Alwadiya, Q. (2024). Big data analytics in sustainability of tourism. Yüksek lisans tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul.
- Anvekar, S. V., Gurav, P. S., & Oza, K. S. (2025). Sales forecasting prediction using machine learning. *International Journal of Electrical Electronics and Computer Systems*, 14(1). <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>
- Arias, M. B., & Bae, S. (2016). Electric vehicle charging demand forecasting model based on big data technologies. *Applied Energy*, 183, 327–339. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.080>
- Aungkulanon, P., Atthirawong, W., & Luangpaiboon, P. (2023). Fuzzy analytical hierarchy process for strategic decision making in electric vehicle adoption. *Sustainability (Switzerland)*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/su15087003>

- Axsen, J., Bailey, J., & Castro, M. A. (2015). Preference and lifestyle heterogeneity among potential plug-in electric vehicle buyers. *Energy Economics*, 50, 190–201. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.05.003>
- Axsen, J., Mountain, D. C., & Jaccard, M. (2009). Combining stated and revealed choice research to simulate the neighbor effect: the case of hybrid-electric vehicles. *Resource and Energy Economics*, 31(3), 221–238. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2009.02.001>
- Aytekin, A. (2022). Energy, environment, and sustainability: a multi-criteria evaluation of countries. *Strategic Planning for Energy and the Environment*, 41(3), 281–316. <https://doi.org/10.13052/spee1048-5236.4133>
- Baran, R., & Legey, L. F. L. (2013). The introduction of electric vehicles in Brazil: Impacts on oil and electricity consumption. *Technological Forecasting and Social Change*, 80(5), 907–917. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.10.024>
- Becker, T. A., Sidhu, I., & Tenderich, B. (2009). *Electric vehicles in the United States A new model with forecasts to 2030*, University of California, Berkeley.
- Berckmans, G., Messagie, M., Smekens, J., Omar, N., Vanhaverbeke, L., & Mierlo, J. Van. (2017). Cost projection of state of the art lithium-ion batteries for electric vehicles up to 2030. *Energies*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/en10091314>
- Bitencourt, L., Abud, T., Santos, R., & Borba, B. (2021). Bass diffusion model adaptation considering public policies to improve electric vehicle sales—a Brazilian case study. *Energies*, 14(17). <https://doi.org/10.3390/en14175435>
- Block, D., Harrison, J., & Brooker, P. (2015). *Electric vehicle sales for 2014 and future projections* (Electric Vehicle Transportation Center Report)
- Boyacı, B., Zografos, K. G., & Geroliminis, N. (2017). An integrated optimization-simulation framework for vehicle and personnel relocations of electric carsharing systems with reservations. *Transportation Research Part B: Methodological*, 95, 214–237. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.10.007>
- Braz da Silva, M., & Moura, F. (2016). Electric vehicle diffusion in the Portuguese automobile market. *International Journal of Sustainable Transportation*, 10(2), 49–64. <https://doi.org/10.1080/15568318.2013.853851>
- Brown, M. (2013). Catching the PHEVer: simulating electric vehicle diffusion with an agent-based mixed logit model of vehicle choice. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 16(2).

- Brown, T., Schlachtberger, D., Kies, A., Schramm, S., & Greiner, M. (2018). Synergies of sector coupling and transmission reinforcement in a cost-optimised, highly renewable European energy system. *Energy*, 160
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.222>
- Burchart-Korol, D., Jursova, S., Folęga, P., Korol, J., Pustejovska, P., & Blaut, A. (2018). Environmental life cycle assessment of electric vehicles in Poland and the Czech Republic. *Journal of Cleaner Production*, 202, 476–487.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.145>
- Canals Casals, L., Martinez-Laserna, E., Amante García, B., & Nieto, N. (2016). Sustainability analysis of the electric vehicle use in Europe for CO₂ emissions reduction. *Journal of Cleaner Production*, 127, 425–437.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.120>
- Chen, Qifang, Wang, F., Hodge, B. M., Zhang, J., Li, Z., Shafie-Khah, M., & Catalao, J. P. S. (2017). Dynamic price vector formation model-based automatic demand response strategy for PV-Assisted EV charging stations. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(6), 2903–2915. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2693121>
- Chen, Qifu, Hong, Z., Chen, X., & You, X. (2024). *Forecasting new energy vehicle sales using improved BP neural network and SARIMA models*. International Conference on Computer Science and Blockchain Kongresi'nde sunulmuş bildiri (s.36–40). Institute of Electrical and Electronics Engineers.
<https://doi.org/10.1109/CCSB63463.2024.10735635>
- Chen, Y., Jha, S., Raut, A., Zhang, W. & Liang, H. (2020). Performance characteristics of lubricants in electric and hybrid vehicles: a review of current and future needs. *Front. Mech. Eng.* 6:571464. doi: 10.3389/fmech.2020.571464
- Contreras, J., Espínola, R., Nogales, F. J., & Conejo, A. J. (2003). ARIMA models to predict next-day electricity prices. *IEEE Transactions on Power Systems*, 18(3), 1014–1020. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2002.804943>
- Crozier, C., Apostolopoulou, D., & McCulloch, M. (2018). *Clustering of usage profiles for electric vehicle behaviour analysis*. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe Kongresi'nde sunulmuş bildiri (s.1–6).
- De Cauwer, C., Van Mierlo, J., & Coosemans, T. (2015). Energy consumption prediction for electric vehicles based on real-world data. *Energies*, 8(8), 8573–8593.
<https://doi.org/10.3390/en8088573>

- De Quevedo, P. M., Munoz-Delgado, G., & Contreras, J. (2019). Impact of electric vehicles on the expansion planning of distribution systems considering renewable energy, storage, and charging stations. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(1), 794–804. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2752303>
- de Souza, L. L. P., Lora, E. E. S., Palacio, J. C. E., Rocha, M. H., Renó, M. L. G., & Venturini, O. J. (2018). Comparative environmental life cycle assessment of conventional vehicles with different fuel options, plug-in hybrid and electric vehicles for a sustainable transportation system in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 203, 444–468. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.236>
- Demirtaş, M., Yılmaz, E., Ünal, C., Küçükpehlivan, T., Ağaçsapan, B., & Aksoy, T. (2021). Elektrikli araçlar ve şarj istasyonlarının konumlandırılması. *GSI Journals Serie C: Advancements in Information Sciences and Technologies (AIST)*, 4(1), 11-32.
- Diakoulaki, D., Mavrotas, G., & Papayannakis, L. (1995). Determining objective weights in multiple criteria problems: the CRITIC method. *Computers Ops Res*, 22, 763-770.
- Dincer, I., & Rosen, M. A. (1998). A worldwide perspective on energy, environment and sustainable development. *International Journal of Energy Research*, 22(15), 1305–1321.
- Ding, S., & Li, R. (2021). Forecasting the sales and stock of electric vehicles using a novel self-adaptive optimized grey model. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 100. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.104148>
- Dugo, V., Gálvez-Ruiz, D., & Díaz-Cuevas, P. (2025). The sustainable energy development dilemma in European countries: a time-series cluster analysis. *Energy, Sustainability and Society*, 15(1). <https://doi.org/10.1186/s13705-025-00536-w>
- Dunn, J. B., Gaines, L., Kelly, J. C., James, C., & Gallagher, K. G. (2015). The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction. *Energy and Environmental Science*, 8(1), 158–168. <https://doi.org/10.1039/c4ee03029j>
- Elghanam, E., Ndiaye, M., Hassan, M. S., & Osman, A. H. (2023). Location selection for wireless electric vehicle charging lanes using an integrated TOPSIS and binary goal programming method: A UAE case study. *IEEE Access*, 11, 94521–94535. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3308524>

- Elomiya, A., Křupka, J., Jovčić, S., Simic, V., Švadlenka, L., & Pamucar, D. (2024). A hybrid suitability mapping model integrating GIS, machine learning, and multi-criteria decision analytics for optimizing service quality of electric vehicle charging stations. *Sustainable Cities and Society*, 106. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105397>
- Esteves, J., Alonso-Martínez, D., & De Haro, G. (2021). Profiling Spanish prospective buyers of electric vehicles based on demographics. *Sustainability*, 13(16). <https://doi.org/10.3390/su13169223>
- Faria, R., Marques, P., Moura, P., Freire, F., Delgado, J., & De Almeida, A. T. (2013). Impact of the electricity mix and use profile in the life-cycle assessment of electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 271–287. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.063>
- Fattah, J., Ezzine, L., Aman, Z., El Moussami, H., & Lachhab, A. (2018). Forecasting of demand using ARIMA model. *International Journal of Engineering Business Management*, 10. <https://doi.org/10.1177/1847979018808673>
- Fiori, C., Ahn, K., & Rakha, H. A. (2016). Power-based electric vehicle energy consumption model: model development and validation. *Applied Energy*, 168, 257–268. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.097>
- García-Villalobos, J., Zamora, I., San Martín, J. I., Asensio, F. J., & Aperribay, V. (2014). Plug-in electric vehicles in electric distribution networks: A review of smart charging approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 717–731. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.040>
- Gerssen-Gondelach, S. J., & Faaij, A. P. C. (2012). Performance of batteries for electric vehicles on short and longer term. *Journal of Power Sources*, 212, 111–129. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.03.085>
- Ghose, D., Pradhan, S., Tamuli, P., & Shabbiruddin. (2023). Optimal material for solar electric vehicle application using an integrated Fuzzy-COPRAS model. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 45(2), 3859–3878. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1668879>
- Gnann, T., Plötz, P., Kühn, A., & Wietschel, M. (2015). Modelling market diffusion of electric vehicles with real world driving data - German market and policy options. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 77, 95–112. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.001>

- Goeke, D., & Schneider, M. (2015). Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles. *European Journal of Operational Research*, 245(1), 81–99.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.01.049>
- Gönül, Ö., Duman, A. C., & Güler, Ö. (2021). Electric vehicles and charging infrastructure in Turkey: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110913>
- Grunditz, E. A., & Thiringer, T. (2016). Performance analysis of current BEVs based on a comprehensive review of specifications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2(3), 270–289. <https://doi.org/10.1109/TTE.2016.2571783>
- Gryparis, E., Papadopoulos, P., Leligou, H. C., & Psomopoulos, C. S. (2020). Electricity demand and carbon emission in power generation under high penetration of electric vehicles. A European Union perspective. *Energy Reports*, 6, 475–486.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.09.025>
- Güler, A., & Polatgıl, M. (2024). Investigation of The effect of expert's opinions on multi-criteria decision making techniques in electric vehicle selection. *European Transport - Trasporti Europei*, (99). <https://doi.org/10.48295/ET.2024.99.3>
- Hagman, J., Ritzén, S., Stier, J. J., & Susilo, Y. (2016). Total cost of ownership and its potential implications for battery electric vehicle diffusion. *Research in Transportation Business and Management*, 18, 11–17.
<https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2016.01.003>
- Hao, H., Qiao, Q., Liu, Z., & Zhao, F. (2017). Impact of recycling on energy consumption and greenhouse gas emissions from electric vehicle production: The China 2025 case. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 114–125.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.005>
- Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., & Strømman, A. H. (2013). Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, 17(1), 53–64.
<https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>
- Heidrich, O., Hill, G. A., Neaimeh, M., Huebner, Y., Blythe, P. T., & Dawson, R. J. (2017). How do cities support electric vehicles and what difference does it make? *Technological Forecasting and Social Change*, 123, 17–23.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.05.026>
- Higgins, A., Paevere, P., Gardner, J., & Quezada, G. (2012). Combining choice modelling and multi-criteria analysis for technology diffusion: An application to the uptake

- of electric vehicles. *Technological Forecasting and Social Change*, 79(8), 1399–1412. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.04.008>
- Hofmann, J., Guan, D., Chalvatzis, K., & Huo, H. (2016). Assessment of electrical vehicles as a successful driver for reducing CO₂ emissions in China. *Applied Energy*, 184, 995–1003. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.042>
- Holmberg, K., & Erdemir, A. (2019). The impact of tribology on energy use and CO₂ emission globally and in combustion engine and electric cars. *Tribology International*, 135, 389–396. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.03.024>
- Hu, X., Li, S. E., & Yang, Y. (2016). Advanced machine learning approach for lithium-ion battery state estimation in electric vehicles. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2(2), 140–149. <https://doi.org/10.1109/TTE.2015.2512237>
- Huang, X., & Ge, J. (2019). Electric vehicle development in Beijing: an analysis of consumer purchase intention. *Journal of Cleaner Production*, 216, 361–372. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.231>
- ICCT (July 2025). *Life Cycle Greenhouse Gas Emissions From Passenger Cars in the European Union*
- IEA (March 2025). *Global Energy Review 2025*.
- İmece, S. (2019). Demand forecasting with individual and combined models in pharmaceutical industry. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
- Jahangir, H., Gougheri, S. S., Vatandoust, B., Golkar, M. A., Ahmadian, A., & Hajizadeh, A. (2020). Plug-in electric vehicle behavior modeling in energy market: A novel deep learning-based approach with clustering technique. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(6), 4738–4748. <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.2998072>
- Jang, S., & Choi, J. Y. (2021). Which consumer attributes will act crucial roles for the fast market adoption of electric vehicles?: estimation on the asymmetrical & heterogeneous consumer preferences on the EVs. *Energy Policy*, 156. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112469>
- Kayhan, S. (2019). Sürekli üretim sistemleri için talep tahmini ve karar destek sistemi geliştirilmesi: kimya sektöründe örnek bir uygulama. Yüksek lisans tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana

- Kapustin, N. O., & Grushevenko, D. A. (2020). Long-term electric vehicles outlook and their potential impact on electric grid. *Energy Policy*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111103>
- Kıganda, C. (2023). Forecasting the spread of COVID-19 using deep learning and big data analytics methods. Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara
- Kieckhäfer, K., Wachter, K., & Spengler, T. S. (2017). Analyzing manufacturers' impact on green products' market diffusion – the case of electric vehicles. *Journal of Cleaner Production*, 162, S11–S25. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.021>
- Kim, M. K., Oh, J., Park, J. H., & Joo, C. (2018). Perceived value and adoption intention for electric vehicles in Korea: moderating effects of environmental traits and government supports. *Energy*, 159, 799–809. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.064>
- Koirala, K., Tamang, M., & Shabbiruddin. (2022). Planning and establishment of battery swapping station - a support for faster electric vehicle adoption. *Journal of Energy Storage*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104351>
- Kotsialos, A., Papageorgiou, M., & Poulimenos, A. (2005). Holt-winters and neural-network methods for medium-term sales forecasting. *IFAC Proceedings Volumes*, 38(1), 133-138.
- Kristoffersen, T. K., Capión, K., & Meibom, P. (2011). Optimal charging of electric drive vehicles in a market environment. *Applied Energy*, 88(5), 1940–1948. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.015>
- Kucukvar, M., Onat, N. C., Kutty, A. A., Adella, G. M., Bulak, M. E., Ansari, F., & Kumbaroglu, G. (2022). Environmental efficiency of electric vehicles in Europe under various electricity production mix scenarios. *Journal of Cleaner Production*, 335. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130291>
- Kuo, R. J., Wang, H. S., Hu, T. L., & Chou, S. H. (2005). Application of ant K-means on clustering analysis. *Computers and Mathematics with Applications*, 50(10–12), 1709–1724. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2005.05.009>
- Kusuma, I., Ruliyanta, Kusumoputro, R. A. S., & Iswadi, A. (2025). Electric vehicle review: BEV, PHEV, HEV, or FCEV? *Jurnal Konversi Energi Dan Manufaktur*, 70–83. <https://doi.org/10.21009/jkem.10.1.8>
- Kutty, A. A., Al-Jondob, R., Abdella, G. M., & El-Mekkawy, T. (2021). A frontier based eco-efficiency assessment of electric vehicles: the case of European Union

- countries using mixed and renewable sources of energy*. First Central American and Caribbean International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Kongresi'nde sunulmuş bildiri.
- Lee, J. H., Hardman, S. J., & Tal, G. (2019). Who is buying electric vehicles in California? Characterising early adopter heterogeneity and forecasting market diffusion. *Energy Research and Social Science*, 55, 218–226.
<https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.05.011>
- Li, C., Liao, Y., Zou, L., Diao, R., Sun, R., & Xie, H. (2022). *Short-term forecasting of EV charging load using Prophet-BiLSTM*. IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific, ITEC Asia-Pacific Kongresi'nde sunulmuş bildiri. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
<https://doi.org/10.1109/ITECAsia-Pacific56316.2022.9942039>
- Li, X., Zhang, Q., Peng, Z., Wang, A., & Wang, W. (2019). A data-driven two-level clustering model for driving pattern analysis of electric vehicles and a case study. *Journal of Cleaner Production*, 206, 827–837.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.184>
- Liang, X., Zhang, S., Wu, Y., Xing, J., He, X., Zhang, K. M., Hao, J. (2019). Air quality and health benefits from fleet electrification in China. *Nature Sustainability*, 2(10), 962–971. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0398-8>
- Lip, N. M., Jumery, N. S., Termizi, F. A. A., Mulyadi, N. A., Anuar, N., & Ithnin, H. (2020). Forecasting international tourist arrivals in Malaysia using SARIMA and Holt-Winters model. *Journal of Tourism, Hospitality and Environment Management*, 5(18), 41–51.
<https://doi.org/10.35631/jthem.518004>
- Liu, L., Liu, S., Wu, L., Zhu, J., & Shang, G. (2022). Forecasting the development trend of new energy vehicles in China by an optimized fractional discrete grey power model. *Journal of Cleaner Production*, 372.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133708>
- Long, S., & Liu, Q. (2021). *Research on new energy vehicle sales forecast and product optimization based on data mining*. 2nd International Conference on Electronics, Communications and Information Technology, CECIT Kongresi'nde sunulmuş bildiri (s.1019–1024).
<https://doi.org/10.1109/CECIT53797.2021.00181>

- Lund, H., & Kempton, W. (2008). Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G. *Energy Policy*, 36(9), 3578–3587.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.06.007>
- Lv, C., Xing, Y., Lu, C., Liu, Y., Guo, H., Gao, H., & Cao, D. (2018). Hybrid-learning-based classification and quantitative inference of driver braking intensity of an electrified vehicle. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(7), 5718–5729. <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2808359>
- Lv, H., Song, C., Zhang, N., Wang, D., & Qi, C. (2022). Energy Management Strategy of Mild Hybrid Electric Vehicle Considering Motor Power Compensation. *Machines*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/machines10110986>
- Momoh, O. D., & Omoigui, M. O. (2009). *An overview of hybrid electric vehicle technology*. IEEE Vehicle Power and Propulsion Kongresi'nde sunulmuş bildiri.
- Mukherjee, S. C., & Ryan, L. (2020). Factors influencing early battery electric vehicle adoption in Ireland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 118. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109504>
- Muratori, M. (2018). Impact of uncoordinated plug-in electric vehicle charging on residential power demand. *Nature Energy*, 3(3), 193–201.
<https://doi.org/10.1038/s41560-017-0074-z>
- Neshat, N., Kaya, M., & Ghaboulia Zare, S. (2023). Exploratory policy analysis for electric vehicle adoption in European countries: A multi-agent-based modelling approach. *Journal of Cleaner Production*, 414.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137401>
- Noel, L., Zarazua de Rubens, G., Kester, J., & Sovacool, B. K. (2020). Understanding the socio-technical nexus of Nordic electric vehicle (EV) barriers: A qualitative discussion of range, price, charging and knowledge. *Energy Policy*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111292>
- Okada, T., Tamaki, T., & Managi, S. (2019). Effect of environmental awareness on purchase intention and satisfaction pertaining to electric vehicles in Japan. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 67, 503–513.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.01.012>
- Orbach, Y., & Fruchter, G. E. (2011). Forecasting sales and product evolution: The case of the hybrid/electric car. *Technological Forecasting and Social Change*, 78(7), 1210–1226. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2011.03.018>

- Organ, A., & Yalçın, E. (2016). Performance evaluation of research assistants by COPRAS method. *European Scientific Journal (August SPECIAL edition)*.
- Oyedeji, M. O., Aldhaifallah, M., Rezk, H., & Mohamed, A. A. A. (2023). Computational models for forecasting electric vehicle energy demand. *International Journal of Energy Research*, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/1934188>
- Özkan, Dr. Y. (2008). Veri Madenciliği Yöntemleri, Papatya Yayıncılık Eğitim, 1. Baskı, İstanbul.
- Özmen, O. (2024). Simplex Projection ve SARIMA yöntemleri kullanılarak 25.güneş leke çevriminin tahmin edilmesi. Yüksek lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya
- Pamucar, D., Žižović, M., & Đuričić, D. (2022). Modification of the CRITIC method using fuzzy rough numbers. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 5(2), 362–371. <https://doi.org/10.31181/dmame0316102022p>
- Parlak, F. (2023). The forecast performances of the classical time series model and machine learning algorithms on BIST-50 prive index using exogenous variables Yüksek lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara
- Peng, Z., Yu, Z., Wang, H., & Yang, S. (2015). Research on industrialization of electric vehicles with its demand forecast using exponential smoothing method. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 8(2), 365–382. <https://doi.org/10.3926/jiem.1287>
- Pergamalis, C., Tsampasis, E., Dedes, I. C., & Elias, C. (2024). *Hydrogen fuel cell electrical vehicles (FCEV) - battery electric vehicles (BEV) - comparison and future challenges*. 13th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO Kongresi'nde sunulmuş bildiri. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/MECO62516.2024.10577907>
- Phillis, A., Grigoroudis, E., & Kouikoglou, V. S. (2020). Assessing national energy sustainability using multiple criteria decision analysis. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 18–35. <https://doi.org/10.1080/13504509.2020.1780646>
- Poullikkas, A. (2015). Sustainable options for electric vehicle technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1277–1287. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.016>

- Pradhan, P., Shabbiruddin, & Pradhan, S. (2022). Selection of electric vehicle using integrated Fuzzy-MCDM approach with analysis on challenges faced in hilly terrain. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 44(2), 2651–2673. <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2056665>
- Prematunga, R. K. (2012). Correlational analysis. *Australian Critical Care*, 25(3), 195–199. <https://doi.org/10.1016/j.aucc.2012.02.003>
- Priessner, A., Sposato, R., & Hampl, N. (2018). Predictors of electric vehicle adoption: An analysis of potential electric vehicle drivers in Austria. *Energy Policy*, 122, 701–714. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.07.058>
- Requia, W. J., Adams, M. D., Arain, A., Koutrakis, P., & Ferguson, M. (2017). Carbon dioxide emissions of plug-in hybrid electric vehicles: A life-cycle analysis in eight Canadian cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1390–1396. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.105>
- Rietmann, N., Hügler, B., & Lieven, T. (2020). Forecasting the trajectory of electric vehicle sales and the consequences for worldwide CO₂ emissions. *Journal of Cleaner Production*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121038>
- Saber, A. Y., & Venayagamoorthy, G. K. (2009). *One million plug-in electric vehicles on the road by 2015*. 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems Kongresi'nde sunulmuş bildiri.
- Saleh Al-Hafid, M., & Hussein Al-maamary, G. (2012). Short term electrical load forecasting using holt-winters method. *AL-Rafdain Engineering Journal*, 20(6).
- Sanguesa, J. A., Torres-Sanz, V., Garrido, P., Martinez, F. J., & Marquez-Barja, J. M. (2021, March 1). A review on electric vehicles: technologies and challenges. *Smart Cities*, 4, 372–404. <https://doi.org/10.3390/smartcities4010022>
- Sarac, M.S.; Erturk, M.A (2025). Forecasting the number of electric vehicles in Turkey towards 2030:SARIMA approach. *Energies*, 18, 4808. <https://doi.org/10.3390/en18184808>
- Sarışen, M. (2024). Predictive modeling for order quantities in the automotive industry: a statistical an machine learning approach. Yüksek lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara
- Scharf, M., Heide, L., Grahle, A., Syré, A. M., & Göhlich, D. (2020). Environmental impact of subsidy concepts for stimulating car sales in Germany. *Sustainability*, 12(23), 1–27. <https://doi.org/10.3390/su122310037>

- Shepherd, S., Bonsall, P., & Harrison, G. (2012). Factors affecting future demand for electric vehicles: A model based study. *Transport Policy*, 20, 62–74.
<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.12.006>
- Simav, O., & Ustabaş, A. (2017). *Otomotiv endüstrisindeki muhtemel dönüşümün ekonomik boyutu: Türkiye örneği*. International Conference on Eurasian Economies Kongresi'nde sunulmuş bildiri.
- Singh, A., Singh, L., Kumar Pundir, A., & Saini, A. (2021). Mild hybrid technology in automotive: a review. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 8(4), 4405-4410.
- Situ, L. (2009). *Electric vehicle development: the past, present & future*. International Conference on Power Electronics Systems and Applications Kongresi'nde sunulmuş bildiri.
- Sonar, H. C., & Kulkarni, S. D. (2021). An integrated AHP-MABAC approach for electric vehicle selection. *Research in Transportation Business and Management*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2021.100665>
- Soni Madhulatha, T. (2012). An overview on clustering methods. *IOSR Journal of Engineering* 2(4), 719–725.
- Subramanian, K., Othman, M., Sokkalingam, R., Thangarasu, G., & Kayalvizhi, S. (2020). An integrated model for forecasting Indian automobile. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 10(6), 2593–2598. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.10.6.8475>
- Sueyoshi, T., Mo, F., & Wang, D. D. (2022). Sustainable development of countries all over the world and the impact of renewable energy. *Renewable Energy*, 184, 320–331. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.11.015>
- Tabrizi, A., Yousefi, H., Abdoos, M., & Ghasempour, R. (2025). Evaluating renewable energy adoption in G7 countries: a TOPSIS-based multi-criteria decision analysis. *Discover Energy*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s43937-025-00064-w>
- Tamayao, M. A. M., Michalek, J. J., Hendrickson, C., & Azevedo, I. M. L. (2015). Regional variability and uncertainty of electric vehicle life cycle CO₂ emissions across the United States. *Environmental Science and Technology*, 49(14), 8844–8855. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00815>
- Tang, B. jun, Wu, X. feng, & Zhang, X. (2013). Modeling the CO₂ emissions and energy saved from new energy vehicles based on the logistic-curve. *Energy Policy*, 57, 30–35. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.06.021>

- Taylor, S. J., & Letham, B. (2018). Forecasting at scale. *The American Statistician*, 72, 37–45. <https://doi.org/10.1080/00031305.2017.1380080>
- Teixeira, A. C. R., & Sodré, J. R. (2018). Impacts of replacement of engine powered vehicles by electric vehicles on energy consumption and CO₂ emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 59, 375–384. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.01.004>
- Tian, Z. peng, Liang, H. ming, Nie, R. xin, Wang, X. kang, & Wang, J. qiang. (2023). Data-driven multi-criteria decision support method for electric vehicle selection. *Computers and Industrial Engineering*, 177. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109061>
- Tören, M., & Mollahasanoğlu, H. (2022). Investigation of electric motors in electric and hybrid vehicles and estimation of changes in CO₂ emissions: a sample of Türkiye. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 9(3), 1082–1097. <https://doi.org/10.31202/ecjse.1107454>
- Troldborg, M., Heslop, S., & Hough, R. L. (2014). Assessing the sustainability of renewable energy technologies using multi-criteria analysis: Suitability of approach for national-scale assessments and associated uncertainties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 1173–1184. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.160>
- Van Vliet, O., Brouwer, A. S., Kuramochi, T., Van Den Broek, M., & Faaij, A. (2011). Energy use, cost and CO₂ emissions of electric cars. *Journal of Power Sources*, 196(4), 2298–2310. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.09.119>
- Veikkolainen, J.-E. (2024). Comparison of predictive models for time series forecasting. Lisans tezi, Tampere University.
- Venkata Ramana, K. N. S., Krishankumar, R., Trzin, M. S., Amritha, P. P., & Pamucar, D. (2022). An integrated variance-COPRAS approach with nonlinear fuzzy data for ranking barriers affecting sustainable operations. *Sustainability (Switzerland)*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/su14031093>
- Veysi, S., Moshfeghi, M., Sadrfaridpour, A., & Emamy, P. (2025). electric vehicle sales forecast for the UK: integrating machine learning, time series models, and global trends. *Algorithms*, 18(7). <https://doi.org/10.3390/a18070430>
- Vijayakumar, S. R., & Suresh, P. (2023). Sales demand forecasting in car industry using seagull optimization based holt winter and quantile regression neural network. *Wireless Personal Communications*, 133(1), 49–72.

<https://doi.org/10.1007/s11277-023-10742-4>

- Wang, Shuai, Wei, F., Li, H., Wang, Z., & Wei, P. (2022). Comparison of SARIMA model and Holt-Winters model in predicting the incidence of Sjögren's syndrome. *International Journal of Rheumatic Diseases*, 25(11), 1263–1269. <https://doi.org/10.1111/1756-185X.14417>
- Wang, Shuoyao, Yu, J., & Okubo, K. (2020). Estimation of end-of-life hybrid vehicle number in Japan considering secondhand vehicle exportation. *Waste Management*, 104, 198–206. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.022>
- Wang, W., Xi, J., Chong, A., & Li, L. (2017). Driving style classification using a semisupervised support vector machine. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 47(5), 650–660. <https://doi.org/10.1109/THMS.2017.2736948>
- Wang, Y., & Guo, Y. (2020). Forecasting method of stock market volatility in time series data based on mixed model of ARIMA and XGBoost. *China Communications*, 17(3), 205–221.
- Waraich, R. A., Galus, M. D., Dobler, C., Balmer, M., Andersson, G., & Axhausen, K. W. (2013). Plug-in hybrid electric vehicles and smart grids: investigations based on a microsimulation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 28, 74–86. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.10.011>
- Warpe, V. S., Buchkul, S. D., Chobe, P., & Pardeshi, D. B. (2024). *EV sales price forecasting using machine learning*. 2nd International Conference on Sustainable Computing and Smart Systems, ICSCSS 2024 Kongresi'nde sunulmuş bildiri (s.818–823). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ICSCSS60660.2024.10625450>
- Williams, J. H., Jones, R. A., Haley, B., Kwok, G., Hargreaves, J., Farbes, J., & Torn, M. S. (2021). Carbon-neutral pathways for the United States. *AGU Advances*, 2(1). <https://doi.org/10.1029/2020av000284>
- Włodarczyk, B., Firoiu, D., Ionescu, G. H., Ghiocel, F., Szturo, M., & Markowski, L. (2021). Assessing the sustainable development and renewable energy sources relationship in eu countries. *Energies*, 14(8), 2323. <https://doi.org/10.3390/en14082323>
- Wu, X., Freese, D., Cabrera, A., & Kitch, W. A. (2015). Electric vehicles' energy consumption measurement and estimation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 34, 52–67. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.10.007>

- Yu, R., Wang, X., Xu, X., & Zhang, Z. (2024). Research on forecasting sales of pure electric vehicles in China based on the seasonal autoregressive integrated moving average–gray relational analysis–support vector regression model. *Systems*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/systems12110486>
- Zhang, C., Yang, F., Ke, X., Liu, Z., & Yuan, C. (2019). Predictive modeling of energy consumption and greenhouse gas emissions from autonomous electric vehicle operations. *Applied Energy*, 254. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113597>
- Zhang, Y., Zhong, M., Geng, N., & Jiang, Y. (2017). Forecasting electric vehicles sales with univariate and multivariate time series models: The case of China. *PLoS ONE*, 12(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176729>
- Zhou, H., Dang, Y., Yang, Y., Wang, J., & Yang, S. (2023). An optimized nonlinear time-varying grey Bernoulli model and its application in forecasting the stock and sales of electric vehicles. *Energy*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125871>
- Zhou, Y., Wang, M., Hao, H., Johnson, L., Wang, H., & Hao, H. (2015). Plug-in electric vehicle market penetration and incentives: a global review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 20(5), 777–795. <https://doi.org/10.1007/s11027-014-9611-2>
- Zhu, Z., & Du, H. (2018). Forecasting the number of electric vehicles: a case of Beijing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 170(4). Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/170/4/042037>
- <https://data-explorer.oecd.org/?lc=en> (erişim tarihi: 20.04.2025)
- <https://ourworldindata.org/data> (erişim tarihi: 10.05.2025)
- <https://www.imf.org/en/Data> (erişim tarihi: 20.05.2025)
- https://www.odmd.org.tr/web_2837_1/neuralnetwork.aspx?type=35 (erişim tarihi: 15.06.2025)
- <https://www.tuik.gov.tr/> (erişim tarihi: 01.07.2025)