



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TÜRKİYE'DE TAM ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN DOLAYLI KARBON EMİSYONLARININ ARAŞTIRILMASI

SAİT BEHLÜL BOZTEPE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği

Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Doç. Dr. Abdullah DEMİR

İSTANBUL, 2024



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TÜRKİYE'DE TAM ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN DOLAYLI KARBON EMİSYONLARININ ARAŞTIRILMASI

SAİT BEHLÜL BOZTEPE

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı
Makine Mühendisliği Programı

DANIŞMAN
Doç. Dr. Abdullah DEMİR

İSTANBUL, 2024

ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının başından sonuna kadar, yol gösterici tavsiyeleri, her sıkıştığım da gösterdiği fedakârlık ve çözüm odaklı yaklaşımlarıyla bana rehberlik eden, danışmanlığının yanı sıra ağabeylik de yapan saygıdeğer hocam Doç. Dr. Abdullah Demir'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Destegini her daim hissettiğim, bu çalışmadaki katkısını ve hayatımdaki kıymetini asla unutmayacağım değerli ağabeyim Dr. Ahmet Yıldırım'a da içten teşekkürlerimi iletirim.

Son olarak bu süreçte pes etmeyi düşündüğümde bana cesaret veren, anlayışıyla süreci bana kolay kılan, her daim olduğu gibi bu yolculuğumda da yoldaşım olan kıymetli eşim Bahar Boztepe'ye ve fedakârlığıyla babasına destek olan biricik kızım Zeynep Sare'ye şükranlarımı sunuyor ve bu çalışmayı onlara atfediyorum.

Kasım, 2024

Sait Behlül BOZTEPE

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
SEMBOLLER.....	viii
KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
3. MATERYAL VE METOT	12
3.1. İçten Yanmalı Araç Seçimi ve CO ₂ Emisyon Değerleri.....	13
3.1.1. İçten yanmalı araçların seçimi.....	13
3.1.2. Fabrika/Üretici verileriyle seçilen geleneksel araçların CO ₂ emisyonları	18
3.1.3. Yakıt tüketimine göre seçilen geleneksel araçların CO ₂ emisyonları	19
3.2. BEV Seçimi ve Dolaylı CO ₂ Emisyon Değerleri	21
3.2.1. Elektrikli araçların seçimi	21
3.2.2. Seçilen elektrikli araçların dolaylı CO ₂ emisyon hesabı	24
3.3. Modelleme Senaryoları	30
3.4. Zaman Serisi Analizi ve ARIMA Yöntemi	31
3.4.1. ARIMA yönteminde “d” fark alma derecesi	32
3.5. Çalışmada Yapılan Tüm Kabuller.....	32
4. BULGULAR	34
4.1. CO ₂ Emisyonlarının Karşılaştırılması.....	34
4.2. Elektrik Kaynaklarına Göre BEV’lerin CO ₂ Emisyonları.....	35

4.3. Modelleme Senaryolarının Değerlendirilmesi	36
4.3.1. 2035 Tam elektrikli otomobil sayısı tahmini	36
4.3.2. 2035 Türkiye Ulusal Enerji Planı.....	44
4.3.3. Bulguların değerlendirilmesi.....	46
5. SONUÇ	52
KAYNAKLAR.....	56
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

TÜRKİYE'DE TAM ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN DOLAYLI KARBON EMİSYONLARININ ARAŞTIRILMASI

Hem küresel hem de ulusal çapta etkilerini gün geçtikçe daha da ağır bir biçimde hissettiren iklim değişikliği, gezegenimizin karşı karşıya olduğu en büyük çevresel sorunlardan biridir. Küresel iklim değişikliğinin temel nedeni, sera gazlarından kaynaklanan sera etkisidir ve bu gazlar arasında karbon dioksit (CO₂) önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle elektrik üretiminde fosil yakıtların kullanımı, CO₂'nin ana kaynaklarından biridir. Tam elektrikli araçlar kullanım esnasında doğrudan karbon emisyonu oluşturmamaktadırlar. Ancak ihtiyaç duydukları elektriği üretmek için kullanılan kaynaklar sebebiyle dolaylı emisyonlara sebep olmaktadır. Bu dolaylı emisyonların belirlenmesi bölgesel elektrik üretim kaynaklarına göre farklılıklar göstermektedir. Kömür, içeriğinde bulunan yüksek karbondan dolayı fosil yakıtlar arasında en fazla karbon salınımına sebep olan yakıttır. Düşük karbon emisyonuna sahip olmalarıyla bilinen yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıtlara kıyasla çok daha az emisyonu sebep olmaktadır. Bu sebeple, tam elektrikli araçların dolaylı karbon emisyonlarını azaltabilmek için yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretiminin artırılması gerekmektedir. Tam elektrikli araçlarla konvansiyonel içten yanmalı motorlu araçların karbon emisyon miktarları kıyaslandığında, tam elektrikli araçlar emisyon azaltımında kayda değer katkılar sunmaktadır. Bu çalışmada karayolu ulaşımında otomobil kaynaklı karbon emisyonları, sıvı yakıtlı araçlar ve tam elektrikli araçlar açısından incelenmiş ve Türkiye'nin 2035 yılı enerji planlamalarına göre muhtemel senaryolar belirlenmiştir. Türkiye'nin mevcut elektrik üretim kaynaklarıyla, geleneksel araçlar ve tam elektrikli araçlar karşılaştırılmış, seçilen örnekleme araçlarına göre ortalama %48,1 emisyon azaltımı sağladığı tespit edilmiştir. Yerli otomobil olan TOGG'un, mevcut enerji altyapısıyla beslenmesi durumunda 83,77 g/km dolaylı CO₂ emisyonuna neden olduğu belirlenmiştir. Ayrıca seçilen tam elektrikli araçların CO₂ üretimlerinin, tamamen linyit kaynaklı beslenirlerse geleneksel araçlara göre %36,32, kömür kaynaklı beslenirlerse %18,26 oranlarında artacağı hesaplanmıştır. 2035 Türkiye Ulusal Enerji Plan'ı doğrultusunda tam elektrikli araçlarda normal ve yüksek artış senaryoları ele alınmış ve toplam emisyon miktarında normal senaryoda %12,31, yüksek senaryoda ise %20,95 oranlarında azalma olabileceği görülmüştür. Bu plana alternatif olarak önerilen enerji modelinde ise normal senaryoda %13,92 ve yüksek senaryoda %23,69 emisyon azaltımı sağlanabileceği tespit edilmiştir.

ABSTRACT

RESEARCH ON INDIRECT CARBON EMISSIONS OF BATTERY ELECTRIC VEHICLES IN TURKEY

Climate change is one of the biggest environmental challenges facing our planet, with both global and national impacts becoming more and more severe by the day. The main cause of global climate change is the greenhouse effect caused by greenhouse gases, among which carbon dioxide (CO₂) plays an important role. The use of fossil fuels, especially in electricity generation, is one of the main sources of CO₂. Battery electric vehicles do not directly generate carbon emissions during driving. However, they cause indirect emissions due to the resources used to generate the electricity they need. The determination of these indirect emissions varies according to regional electricity generation sources. Coal is the fuel that causes the highest carbon emissions among fossil fuels due to its high carbon content. Renewable energy sources, which are known to have low carbon emissions, emit much less compared to fossil fuels. Therefore, it is necessary to increase energy production from renewable energy sources in order to reduce the indirect carbon emissions of battery electric vehicles. When the carbon emission amounts of battery electric vehicles and conventional internal combustion engine vehicles are compared, battery electric vehicles make significant contributions to emission reduction. In this study, carbon emissions from automobiles in road transportation are examined in terms of liquid fuel vehicles and battery electric vehicles and possible scenarios are determined according to Turkey's energy planning for 2035. With Turkey's existing electricity generation resources, conventional vehicles and battery electric vehicles are compared and it is found that an average emission reduction of 48.1% is achieved for the selected sample of vehicles. The TOGG, a domestic automobile, was found to cause 83.77 g/km of indirect CO₂ emissions if powered by the existing energy infrastructure. It is also calculated that the CO₂ production of the selected full electric vehicles will increase by 36.32% if they are fully fueled by lignite and 18.26% if they are fully fueled by coal. In line with the 2035 National Energy Plan of Turkey, normal and high increase scenarios for battery electric vehicles were considered and it was seen that the total emission amount could be reduced by 12.31% in the normal scenario and 20.95% in the high scenario. In the energy model proposed as an alternative to this plan, it was determined that 13.92% emission reduction could be achieved in the normal scenario and 23.69% in the high scenario.

SEMBOLLER

km	: Kilometre
kWh	: Kilowatt saat
MWh	: Megawatt saat
MW	: Megawatt
mJ	: Megajoule
l	: Litre
g/km	: Kilometre başına kaç gram
l/100 km	: 100 kilometrede tüketilen litre cinsinden yakıt miktarı
TJ	: Terajoule
kg/TJ	: Terajoule başına kaç kilogram
kg CO₂/MWh	: Megawatt saat başına kaç kilogram karbondioksit
d	: Fark alma derecesi (Differencing)
p	: Otoregresif modelin derecesi (AR)
q	: Hareketli ortalama modelinin derecesi (MA)

KISALTMALAR

CO₂	: Karbondioksit
CH₄	: Metan
N₂O	: Diazot Monoksit
GWP	: Küresel Isınma Potansiyeli (İng. Global Warming Potential)
ICEV	: İçten Yanmalı Motorlu Araç (İng. Internal Combustion Engine Vehicle)
BEV	: Tam Elektrikli Araç (İng. Battery Electric Vehicle)
HEV	: Hibrit Elektrikli Araç (İng. Hybrid Electric Vehicle)
PHEV	: Harici Kaynaktan Şarj Edilebilir Hibrit Araç (İng. Plugin Hybrid Electric Vehicle)
SO₂	: Sülfür Dioksit
GSYİH	: Gayri Safi Yurt İçi Hasıla
RCP	: Temsili Konsantrasyon Yolları (İng. Representative Concentration Pathways)
V2G	: Araçtan Şebekeye (İng. Vehicle To Grid)
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
TEDAŞ	: Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş.
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
EGM	: Emniyet Genel Müdürlüğü
ODMD	: Otomotiv Distribütörleri ve Mobilite Derneği
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
NEDC	: Avrupa Yeni Sürüş Çevrimi (İng. New European Driving Cycle)
WLTP	: Dünya Geneline Uyumlu Hafif Taşıtlar Test Prosedürü (İng. Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure)
NO_x	: Azot Oksit
PM	: Partikül Madde
IPCC	: Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli (İng. Intergovernmental Panel on Climate

Change)

EF : Emisyon Faktörü

İY : İçten Yanmalı

TUEP : Türkiye Ulusal Enerji Planı

ARIMA: Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (İng. Autoregressive Integrated Moving Average)



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1. Trafîğe Kayıtlı BEV Sayısının Yıllara Göre Değişimi	22
Şekil 4.1. 2024 Yılı Trafik Tescile Göre BEV Sayısı Aylara Göre Dağılım Grafiği.....	38
Şekil 4.2. Trafik Tescile Göre BEV Sayısı Yıllara Göre Dağılım Grafiği.....	41
Şekil 4.3 Trafik Tescile Göre Otomobil Sayısı Yıllara Göre Dağılım Grafiği	44
Şekil 4.4. Kaynaklar Bazında Elektrik Üretimi.....	45
Şekil 4.5. Kaynaklar Bazında Elektrik Üretiminin Dağılımı	45
Şekil 4.6. Elektrik Tüketiminde Sektörler (TWh).....	46
Şekil 4.7. Kaynaklara Göre Kurulu Güç	49
Şekil 4.8. Normal ve Yüksek Senaryo için Emisyon Değerleri Grafiği	50
Şekil 4.9. TUEP ve Önerilen Modele göre Emisyon Azaltım Değerleri Grafiği.....	50
Şekil 4.10. Normal ve Yüksek Senaryo için Toplam Emisyon Değerleri Grafiği	51

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1. Türkiye’de Otomobil Marka Dağılımı (2024)	14
Tablo 3.2. Türkiye’de Otomobil Model Dağılımı (2024)	14
Tablo 3.3. Türkiye Trafik Kaydı Yapılan Otomobiller Dağılımı.....	15
Tablo 3.4. Türkiye Yıllara Göre En Çok Satılan İlk 3 Otomobil.....	16
Tablo 3.5. Üretici Verileriyle İçten Yanmalı Araçların Emisyon ve Tüketim Değerleri.....	18
Tablo 3.6. Tier 1 Yöntemiyle İçten Yanmalı Araçların Emisyon Değerleri.....	20
Tablo 3.7. 2023 Yılında Türkiye’de En Çok Satılan BEV Model Sırası	22
Tablo 3.8. 2024 İlk Yarıyılında Türkiye’de En Çok Satılan BEV Model Sırası	22
Tablo 3.9. Seçilen ICEV’lerin ve BEV’lerin Performans ve Fiyat Karşılaştırması.....	24
Tablo 3.10. Seçilen Elektrikli Araçların Batarya-Menzil Değerleri	25
Tablo 3.11. Türkiye’de Elektrik Üretiminin Yıllara Göre Değişimi (MWh ve %)	26
Tablo 3.12. Türkiye’de 2023 Yılı Elektrik Üretiminin Dağılımı (EPDK).....	27
Tablo 3.13. Türkiye’de 2024 İlk Yarıyıl Elektrik Üretiminin Dağılımı (EPIAŞ).....	28
Tablo 3.14. Türkiye’de 2023 Yılı Elektrik Üretiminin Dağılımı (EPIAŞ)	29
Tablo 3.15. Yakıtların Emisyon Yoğunluk Faktörleri	29
Tablo 3.16. BEVlerin Dolaylı Emisyon Değerleri	30
Tablo 4.1. ICEV ve BEV Emisyon Değerlerinin Karşılaştırılması.....	34
Tablo 4.2. Araç Ağırlıkları ve Sürtünme Katsayıları	35
Tablo 4.3. Farklı Senaryolarda BEV’lerin Dolaylı Emisyon Değerleri	36
Tablo 4.4. 2024 Yılı Elektrikli Araç Sayıları Aylık Dağılım.....	37
Tablo 4.5. 2024 Temmuz-Aralık Trafik Tescili Yapılacak BEV Sayısı Tahminleri	38
Tablo 4.6. Trafik Tescile Göre BEV Sayısındaki Yıllık ve Kümülatif Değişimler	39
Tablo 4.7. 2025-2035 Yılları Arası Trafik Tescili Yapılacak BEV Sayıları Tahminleri	40
Tablo 4.8. Türkiye’de Trafiğe Kayıtlı Otomobillerin Yıllara Göre Sayısı	42
Tablo 4.9. 2025-2035 Yılları Arasında Trafik Tescili Yapılacak Otomobil Sayıları Tahminleri	43
Tablo 4.10. Taşıt-Kilometre İstatistikleri	46

1. GİRİŞ

Dünyamızın karşı karşıya olduğu en büyük problemlerden biri küresel ısınma ve iklim değişikliğidir. Küresel ısınma, atmosferde biriken sera gazlarının dünya yüzey sıcaklığını artırması olarak tanımlanabilir. Sanayi devrimiyle birlikte artan fosil kökenli yakıt kullanımı, dünya nüfus artışıyla paralel yeşil alan ve ormanların azalması, ulaşım sektöründeki büyüme küresel ısınmanın hızlanmasına sebep olan temel faktörlerdir. 2024 yılı, bugüne kadar kaydedilen en sıcak yıl olma yolunda ilerlemektedir. 2024 Ocak ayı, 175 yıllık kayıt döneminin en sıcak ocak ayı olmuştur (NOAA National Centers for Environmental Information, 2024). Her geçen yıl bu artış devam etmekte ve yeni en sıcak aylar, yıllar oluşmaktadır. Dünyanın her geçen yıl daha da ısınması sonucu, buzulların erimesi ve deniz seviyesinde yükselme, ekosistemler ve biyolojik çeşitlilik üzerinde olumsuz etkiler, ekonomik kayıplar ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler görülmektedir. Bu durum, önlenmezse dünya üzerindeki insan varlığını tehlikeye atabilecek boyutlara ulaşabilir. Önlemek için atılan adımlardan önce, problemi doğru tanımlamak ve kök nedenlere inmek gerekir.

Küresel ısınmanın oluşmasındaki en büyük etki, insan faaliyetleri sonucunda atmosferdeki sera gazlarının kontrolsüzce artmasıdır. Fosil yakıtların yakılması, ormansızlaşma ve endüstriyel süreçler sonucunda karbondioksit (CO_2); tarım ve hayvancılık, atık yönetimi ve fosil yakıt üretimi sonucunda metan (CH_4); azotlu gübreler, nitrik asit üretimi ve atık su arıtma sonucunda diazot monoksit (N_2O); iklimlendirmede ve yarı iletken üretiminde kullanılan gazlar sonucunda ise florlu gazlar oluşmakta ve atmosfere salınmaktadır. Bu gazlar, atmosferde bulunan ve güneş ışınlarıyla gelen enerjinin bir kısmını tutarak yeryüzünün ısınmasına sebep olan gazlardır. Sera gazları, atmosferdeki yoğunluklarına göre bakıldığında; %76 CO_2 , %16 CH_4 , %6 N_2O ve %2 florlu gazlardan oluşmaktadır (Yüceer, 2019). Hangi gazın küresel ısınmaya etkisinin daha büyük olduğunu tespit etmek için küresel ısınma katsayısına (İng. Global Warming Potential-GWP) bakılmalıdır. GWP, bir sera gazının belirli bir zaman diliminde atmosferde ısı tutma kapasitesinin CO_2 referans alınarak belirlenmesidir. CO_2 , küresel ısınma etki katsayısı bakımından diğer sera gazlarından düşük etkiye sahip olmasına karşın, atmosferdeki yoğunluğu ve geniş etki alanı nedeniyle iklim değişikliğiyle mücadelede öncelikli konuma gelmiştir. Bu çalışma kapsamında da yoğun olarak ulaştırma sektörü ve enerji sektörü kaynaklı karbon emisyonları üzerinde durulacaktır. Emisyonları azaltmaya yönelik uluslararası düzeyde atılan adımların tarihsel gelişimi ve etkilerini kronolojik olarak incelemek, iklim değişikliğiyle mücadelede izlenen stratejilerin anlaşılması açısından önemlidir.

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, 1992'de Rio de Janeiro'da kabul edilmiş ve 1994'te yürürlüğe girmiştir. Bu sözleşme, küresel iklim değişikliğiyle mücadele amacıyla oluşturulan ilk kapsamlı ve bağlayıcı uluslararası çerçeve sözleşmedir. Kyoto Protokolü ve Paris İklim Anlaşması bu çerçeve kapsamında gerçekleşmiştir.

Çerçeve sözleşmeyi takiben Kyoto Protokolü gelmektedir. 1997'de Japonya'nın Kyoto şehrinde imzalanan bu protokol, gelişmiş ülkelerin CO₂ ve diğer sera gazı emisyonlarını azaltma yükümlülüklerini belirler. Protokol, 2005'te yürürlüğe girmiş ve ülkeler 1990 yılı emisyon seviyeleri baz alınarak hedefler belirlenmiştir. Kyoto Protokolü'nün 2020'de sona erecek olması nedeniyle 2015 yılında Paris'te düzenlenen zirvede, Paris İklim Anlaşması kabul edilmiştir. Anlaşma, küresel sıcaklık artışını sanayi devrimi öncesi seviyelere göre 2 °C'nin altında tutmayı ve mümkünse 1,5 °C'ye indirmeyi hedeflemektedir (UNFCCC, 2015). Gelişmiş ülkelere düşük karbonlu dönüşüm için geliştirmekte olan ülkelere finansal destek sağlanması istenmektedir.

Son olarak 2019 yılında Avrupa Komisyonu tarafından başlatılan Avrupa Yeşil Mutabakatı, Avrupa Birliği'nin 2050'ye kadar iklim-nötr bir kıta olmasını hedeflemektedir. Mutabakat, fosil yakıtların kullanımını azaltmayı ve yenilenebilir enerjiye geçişi hızlandırmayı temel almaktadır. Ayrıca, döngüsel ekonomi uygulamaları, geri dönüşüm oranlarının artırılması, biyoçeşitliliğin korunması ve ekosistemlerin onarılması gibi geniş kapsamlı hedefleri de içermektedir. Bu mutabakat iklim değişikliği ile mücadelenin ötesinde, aynı zamanda Avrupa Birliği'nin yeni büyüme stratejisinin bir yol haritasıdır (European Commission, 2024).

Bu adımlar, küresel iklim değişikliğiyle mücadelede önemli ilerlemeler sağlamış ve uluslararası iş birliğinin temelini oluşturmuştur. Bu bağlamda, ülkeler enerji, sanayi, ulaşım, tarım ve diğer sektörlere yönelik politikalarını bu sözleşmelere uygun şekilde şekillendirmekte ve hayata geçirmektedir.

Son 20 yılda küresel ekonomik büyüme ve artan bireysel taşıma talepleri ile bağlantılı olarak dünya üzerindeki araç sayısında neredeyse iki kat artış görülmüştür. Araç teknolojilerindeki gelişmeler, yakıt verimliliğinin artması ve elektrikli araçların yaygınlaşması gibi faktörlere rağmen, artan araç sayısı ile bağlantılı olarak atmosferdeki sera gazlarında artış kaydedilmiştir. Bu süreçte, ulaştırma sektörü kaynaklı karbon emisyonları yaklaşık 1,3 kat artmıştır. 2023 yılı itibarıyla, dünyadaki toplam insan kaynaklı karbon emisyonlarının %24'ü ulaşım sektörü kaynaklıdır (IEA, 2023; Nature, 2023). Bu veriler, ulaşım sektörünün küresel sera gazı emisyonlarına olan etkisinin ve bu sektörde sürdürülebilir çözümlere duyulan ihtiyacın önemini göstermektedir.

Geleneksel içten yanmalı motorlu araçlarda (İng. Internal Combustion Engine Vehicle- ICEV) hareketi sağlayan enerji, petrol bazlı benzin ve dizel gibi sıvı yakıtların yanması sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu araçların kullanımı, doğrudan CO₂ ve diğer zararlı emisyonların oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum günümüzde fosil yakıtlardan kaynaklanan çevresel sorunlar, sürdürülebilir ve temiz enerji çözümlerine yönelik ilgiyi artırmıştır. Hareket için gerekli enerjiyi fosil yakıtlar yerine batarya gibi enerji depolama sistemlerinden elektrikle sağlayan tam elektrikli araçlar (İng. Battery Electric Vehicle- BEV), kullanım esnasında doğrudan karbon salımına sebep olmamaktadırlar. Bu durum, elektrikli araçların çevre dostu ulaşım çözümleri olarak değerlendirilmesini sağlamıştır. BEV'ler, geleneksel ICEV'lere kıyasla egzoz emisyonlarını ortadan kaldırarak hava kirliliğini azaltma potansiyeline sahiptirler. Ancak, elektrikli araçların çevresel etkilerini bütüncül değerlendirebilmek için kullandığı elektriğin üretimi aşamasında fosil yakıt kullanılması sonucunda oluşan emisyonları incelemek gerekir. Kullanım sırasında doğrudan karbon salımı yapmamakla birlikte, elektrikli araçlar dolaylı olarak karbon emisyonlarına yol açmaktadırlar.

2023 yılında, dünyadaki toplam karbon emisyonlarının %24'ü ulaşım sektörü kaynaklı iken, elektrik üretiminden kaynaklanan karbon emisyonları da %35 civarında bir oranla toplam karbon emisyonları içerisinde geniş bir yer tutmaktadır (IEA, 2023). Toplam karbon emisyonlarının %60'a yakınına oluşturan ulaşım ve elektrik üretimi, karbon emisyonunu azaltmak için odaklanılması gereken iki büyük alandır. Ulaştırma sektöründeki emisyonları azaltmaya çalışırken elektrik üretiminden kaynaklanan emisyonları artırmak, toplam emisyon seviyelerinde anlamlı bir düşüş oluşturmaz. Örneğin tamamen kömürden üretilen elektrikle çalışan bir BEV, karbon emisyonları açısından değerlendirildiğinde geleneksel araçlara oldukça yakın emisyon değerleri sergileyebilirken; hibrit elektrikli araçlarla kıyaslandığında dezavantajlı duruma düşebilmektedir. Emisyonların azaltılması için bu iki sektör birlikte ele alınmalı, ulaşımındaki elektrifikasyon, elektrik üretimindeki emisyonların azaltılmasına yönelik stratejilerle desteklenmelidir. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı artırılmalı ve elektrik üretiminde kömür gibi karbon yoğun yakıtlardan uzaklaşılmalıdır.

Bu çalışmada, ülkemizde ulaşımdan kaynaklanan emisyonların azaltılmasında BEV etkisi, ICEV'lerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. BEV'lerin elektrik üretiminden kaynaklanan dolaylı emisyonları ile ICEV'lerin doğrudan neden olduğu emisyonlar, farklı enerji senaryoları çerçevesinde incelenmiştir. Çalışma, enerji karışımlarındaki farklılıkların BEV'lerin toplam karbon ayak izi üzerindeki etkilerini analiz ederek bu araçların çevresel etkilerini kapsamlı bir şekilde ele almıştır. Ayrıca, 2035 yılında BEV'lerin yaygınlaşmasıyla artan enerji talebinin

karşılanabilirliği incelenmiş ve daha düşük emisyon değerlerinin elde edilebileceği bir elektrik üretim modeli önerilmiştir. Bu kapsamda, sürdürülebilir ulaşım çözümlerine yönelik politikaların ve stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlanması amaçlanmıştır.



2. LİTERATÜR TARAMASI

Ulaşım sektörü kaynaklı karbon emisyonları ve elektrikli araçların etkisi üzerine literatürde birçok çalışma yer almaktadır. Bu bölümde konuyu farklı açılardan ele alan çalışmalar incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

BEV'lerin yaşam döngüleri boyunca sebep olduğu karbon emisyonlarını inceleyen çok sayıda çalışma vardır. Çin'de yapılan bir çalışma BEV'lerin ihtiyaç duyduğu birim elektrik başına kömür yakıtlı üretime karşılık gelen karbon eşdeğerinin, Çin'deki geleneksel araçların ürettikleri karbon emisyonlarından düşük olduğunu ancak yine de AB'nin otomobiller için koyduğu emisyon sınırından yüksek olduğunu ortaya koymuştur (Huang ve Ren, 2014). Yine Çin'de yapılan bir başka çalışmada, Macau bölgesinde toplu taşıma için kullanılan tam elektrikli otobüslerin sera gazı emisyonlarına etkisi incelenmiş, yaşam döngüsü analizi sonuçlarına göre tam elektrikli otobüslerin emisyon değerleri geleneksel araçların emisyon değerlerinden yüksek çıkmıştır. Şarj verimliliği ve elektrik şebekesi dağıtım kayıpları dikkate alınmadığı durumda dahi emisyon değerleri daha yüksek tespit edilmiştir. Elektrikli araçların emisyon azaltımındaki potansiyeli üzerine de değinilen çalışmada, elektrik üretim kaynaklarındaki petrol yoğunluğunu azaltıp, doğal gaz ve güneş enerjisi gibi emisyon katsayıları daha düşük kaynakların kullanılmasıyla emisyon azaltımı sağlanabileceği belirtilmiştir (Song ve ark., 2018). Buna çok benzer bir çalışmada Pekin'de başlatılan benzinli taksilerin yerine tam elektrikli taksilerin alması planı incelenmiştir. Hyundai benzinli araçla Midi tam elektrikli aracın çevresel etkileri karşılaştırılmış ve karbon emisyonu açısından Midi araçların daha düşük değerler sunduğu ancak PM_{2.5}, NO_x ve SO_x gibi emisyonların Hyundai araçlara göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. BEV'lerin sebep olduğu emisyonların, daha temiz enerji kullanımının artmasıyla önemli ölçüde azaltılabileceği ortaya konmuştur (Shi ve ark., 2016). Sivil yaşamı etkileyen bu incelemelere paralel olarak Amerikan ordusunda kullanılan taktik olmayan araç filosunun sürdürülebilirliğini artırmak amacıyla yaşam döngüsü analizi yapılmış, farklı bölgelerdeki çeşitli araçların emisyon değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre BEV'lerin ordu içinde kullanılmasının her durumda en iyi seçenek olmadığı ve bazı durumlarda emisyon azaltımı sağlamadığı ortaya konmuştur. Bu çalışmada da enerji karışımlarındaki karbon yoğun kaynakların azaltılmasına vurgu yapılmıştır (Faust ve ark., 2022).

Amerika Birleşik Devletleri, Çin, Almanya, Japonya, Norveç ve Hindistan'ın da aralarında bulunduğu birden çok ülkedeki elektrikli araçların yaşam döngüsü üzerine yapılan çalışma ise elektrikli araçların üretim, kullanım ve bertaraf edilmesi aşamalarındaki emisyon değerleri

üzerine kapsamlı bir inceleme ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, kömür ağırlıklı elektrik üretilen bölgelerde elektrikli araçların yaygınlaşmasına, enerji sektörünün karbonsuzlaşma adımları da eşlik etmelidir (Xia ve ark., 2022). 2010-2020 yılları arasında 15 ülke için karbon emisyonları; BEV'ler, ekonomik büyüme, enerji kullanımı ve kentleşme arasındaki ilişkinin incelendiği çalışma da BEV'lerin karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahip oldukları ve enerji tüketimlerinin etkin bir şekilde yönetilmesi gerektiği vurgulanmış, karar verici ve politika yapıcılar için tavsiyeler sunulmuştur (Das ve ark., 2024).

BEV'ler gelecekte otomotiv pazarına hakim olacak, geçiş sürecinde hibrit ve harici kaynaktan şarj edilebilir hibrit araçlar (İng. Plug-in Hybrid Electric Vehicle - PHEV) önemli rol oynayacaktır (Li ve Song, 2024) Benzinli hibrit elektrikli araç (İng. Hybrid Electric Vehicle - HEV), benzinli PHEV ve BEV ile benzinli araçlar maliyet ve çevresel faydalar açısından karşılaştırıldığında, Çin'in mevcut enerji üretim portföyü altında, HEV'in en uygun maliyetli ve çevre dostu ulaşım aracı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ancak aynı sahip olma maliyeti varsayımıyla karşılaştırılırsa, BEV'ler karbon emisyon azaltımı için daha fazla potansiyel sunmaktadır (Zhang ve Han, 2017). Bir başka çalışmada dört araç tipi için yaşam döngüsü analizi yapılarak, karbon emisyonları tüm süreçler için kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre BEV, enerji karışımında kömür yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerde karbon emisyonunun %37'sini, hidroelektrik enerjinin yoğun olduğu bölgelerde ise %90'ını azaltabildiği belirlenmiştir (Wang ve ark., 2022). Ancak mevcutta elektrik üretiminin fosil yakıt bazlı termik santrallere bağlı olduğu, bunun sonucu olarak BEV'lere plansız şekilde geçişin emisyon tehlikesini sürüş aşamasından enerji üretimi aşamasına kaydıracağına dikkat çekilmiştir (Kurien ve Srivastava, 2020). BEV'lerin çok hızlı şekilde artışı petrolün kömürle değiştirilmesine eşdeğerdir. Bu hız belirli bir düzeyi aşarsa karbon emisyonlarında artışa bile sebebiyet verebilir. Pekin – Tianjin – Hebei bölgesinde yapılan bir çalışmaya göre ulaşımın tamamen elektrifikasyon için temiz enerji üretim oranının 0,314 ve 0,323'e ulaşması gerekmektedir (Zhang ve Han, 2017). Başka bir çalışmada da Çin'deki mevcut enerji karışımı altında, aynı sınıftaki BEV'lerin karbon emisyonunun, İYM'lerden %24 ila %31 daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur (Li ve ark., 2019). Amerika özelinde Ford Transit Van (içten yanmalı) ile Ford E-Transit Van (tam elektrikli) için 150 bin kilometre ömür süresince karbon ayak izi yaşam döngüsü analizi yapılmış, elde edilen sonuçlara göre içten yanmalı geleneksel motorda kilometre başına CO₂ eşdeğeri 469,1 g CO₂-eq/km olurken, BEV'li olanda ise 363,2 g CO₂-eq/km olarak tespit edilmiştir. Bu durum tam elektrikli Van'ın %33 oranında bir azalmaya

sebepe olduğunu göstermektedir. Bu hesaplama Amerika'daki enerji sektörünün ortalama emisyon değerine göre yapılmıştır. Bölgesel olarak farklı enerji dağılım profillerinin sonuçları etkileyeceği ve enerji dağılımındaki yenilenebilir kaynakların kullanım oranının artmasıyla karbon emisyon azaltım oranının da artacağı belirtilmiştir (Farzaneh ve Jung, 2023). Çin'in Xi'an kentinde 2021 yılındaki araç sahipliği temel alınarak 2035 yılına giden yolda bir tahminleme yapılarak, farklı elektrifikasyon trendleri ve farklı elektrik üretim karışımları için 81 ayrı senaryo incelenmiş, hava kirletici ve karbon emisyonları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 2035 yılında elektrikli araçların en az %40 olması gerektiği buna karşın enerji üretiminde termal kaynak (kömür, doğalgaz, petrol gibi fosil yakıtlar) kullanım oranının %10'u geçmemesi gerektiği belirtilmiş ve bu senaryoda dahi sülfür dioksit (SO₂) emisyonlarının artacağı tespit edilmiştir (Duan ve ark., 2023).

BEV'lerin yaygınlaştırılmasının dünya enerji kaynaklarındaki dağılım ve karbon emisyonları üzerindeki etkilerinin analiz edildiği bir çalışmaya göre Asya'nın gelişmekte olan ülkeleri gibi elektrik kaynaklarındaki karbon yoğunluğu yüksek bölgelerde BEV'lerin kilometre başına karbon emisyonları, hibrit araçlarla yaklaşık olarak aynı; BEV'lerin çevresel performansının ise enerjinin karbon emisyon yoğunluğuna bağlı olduğu belirtilmiştir. BEV kullanımı yoluyla emisyonlarda etkili bir azalma sağlanması isteniyorsa, her bölgedeki güç kaynağı karışımının mevcut ve gelecek planları ışığında değerlendirilmesi gerektiğine, ayrıca emisyon açısından temiz olan nükleer enerjinin, karbon emisyonlarını azaltmada önemli bir etkisi olacağına da dikkat çekilmiştir (Komiya ve Fujii, 2014).

Çin'in kömüre dayalı elektrik üretimi yüksek olan Shaanxi bölgesi üzerinde yapılan bir çalışmada, BEV'lerin dolaylı emisyonlarının geleneksel araçların doğrudan emisyonundan fazla olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada 2060'a giden yolda BEV yaygınlığı ve güç üretim yapısına göre değişkenlik gösteren 5 farklı senaryo oluşturulmuş ve sonuçları incelenmiştir. BEV'lerin teşvik edilmesi ve enerji üretim yapısının optimizasyonu ile ulaştırma sektöründeki emisyonların 4,5 milyon tondan 0,1 milyon tona düşeceği öngörülmüştür (Lin ve ark., 2023).

İsviçre, İtalya, Almanya ve Polonya için kısa (%10), orta (%30) ve uzun vadeli (%60) elektrifikasyon oranları ve 2050 karbon sıfır hedefleri doğrultusunda oluşacak emisyon değerleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre karbon emisyon katsayısı yüksek olan ağırlıklı kömüre dayalı elektrik üreten Polonya'da %60 BEV senaryosunda, %13,62 oranında karbon emisyon artışı olacağı; karbon emisyon katsayısı düşük temiz enerji kaynaklarına sahip İsviçre'de ise aynı senaryo için %46,4 oranında azalma olacağı hesaplanmıştır (Ali ve ark., 2024).

Dünyanın farklı yerlerinden 14 bölgenin 7 farklı senaryoda incelendiği bir başka çalışmada, sıvı

yakıtlı araçlarda kısıtlamanın 2035'ten önce olması halinde ulaştırma sektörünün doğrudan emisyonları, iklim değişikliği projeksiyonları için kullanılan dört ana senaryodan biri olan Temsili Konsantrasyon Yolları 2.6 (İng. Representative Concentration Pathways – RCP2.6) azaltım hedefini karşılayabileceği belirlenmiştir. RCP2.6, CO₂ emisyonlarının 2020 yılında zirveye ulaşmasının ardından hızla azalmasını ve 2100 yılında net sıfır emisyonu ulaşılmasını hedefleyen, en katı iklim senaryolarından biridir. Sıvı yakıtlı araçlara yönelik kısıtlamaların yanı sıra, ulaştırma sektöründeki dönüşümün enerji sektörünün karbonsuzlaştırılmasıyla desteklenmesi gerektiği vurgulanmıştır. Aksi takdirde, karbon emisyon hedeflerine ulaşmanın mümkün olamayacağı ifade edilmiştir (Li ve Chen, 2019).

Bilindiği üzere, BEV'ler geleneksel araçlara göre daha yüksek satın alma maliyetlerine sahiptir. Hem karbon emisyonu hem de maliyet açısından konuyu ele aldığımızda, karşımıza marjinal emisyon azaltımı kavramı çıkmaktadır. Bu kavram, belirli bir miktar sera gazı veya karbon emisyonunu azaltmak için gereken ek maliyeti ifade eder. Bu bağlamda, BEV'lerin benzinli araçlara oranla daha yüksek marjinal emisyon azaltım maliyetine sahip olduğu söylenebilir (Guo ve ark., 2023). Bir başka çalışmada ülkelerin veya şirketlerin karbon emisyon limitlerini aşması durumunda, yasal limitin altında kalmak için karbon kredisi satın alabildiği veya kullanmadıkları haklarını satabilecekleri bir karbon ticareti piyasasına dikkat çekilmiş, bu ticaretle BEV'ler için oluşturulmuş bir emisyon modeli birleştirilerek iki seviyeli bir planlama stratejisi önerilmiştir (Li ve ark., 2024).

BEV'lerin sadece kullanım kaynaklı dolaylı emisyonları yoktur. BEV'ler, batarya üretimi ve montajı aşamasında da karbon emisyonuna neden olmaktadır. Çin'de üretilen BEV'ler için lityum-iyon bataryaların, emisyonun ana kaynakları olan katot üretimi ve batarya montaj sürecindeki emisyon değerleri Çin'in ortalama enerji profiliyle ele alındığında batarya montajı aşamasında elektrik kaynaklı emisyon değeri 91,21 kg CO₂-eq/kWh, yine aynı enerji profiliyle batarya kullanım aşamasında ortaya çıkan emisyon değeri 154,1 kg CO₂-eq/kWh olarak belirlenmiştir. Batarya geri dönüşümü için en düşük karbon emisyonuna sahip yöntem hidro-metalurjik yöntem olarak belirlenirken, geri dönüştürülmüş malzemelerden batarya üretiminin hammaddelerle yapılan üretime oranla %51,8 daha düşük olduğu tespit edilmiştir (Chen ve ark., 2022).

BEV'lerin hızlıca sektörü domine etmesi elektrik talebinde artışa sebep olacaktır. Bu durum yıllık veya aylık tüketim açısından değerlendirildiğinde büyük bir problem gibi görülmesine de günün yoğun saatlerinde anlık güç talebini karşılamak güçleşecektir. Bunun için gelişmiş şarj teknolojileri ve akıllı şebeke çözümleri önem kazanmakta ve gereklilik arz etmektedir

(Richardson, 2013). BEV'ler ve PHEV araçların hızla artışının Japonya'daki enerji arzı dağılımı üzerindeki etkisini inceleyen bir çalışmada, BEV'lere geçişle geleneksel araçlar tarafından kullanılan petrolde yaşanan azalmanın, elektrik üretimi için yakıt girdilerinde meydana gelen artıştan düşük olduğu gözlenmiştir. Ancak enerji üretim sektöründeki karbon kısıtlarının olmadığı ve nükleer enerjinin denklemden çıkarıldığı senaryoda BEV'lerin emisyonları hibrit araçlarla yaklaşık olarak aynı olmaktadır. Elde edilen bir diğer sonuç da nükleer enerjinin denklemden çıkartılıp emisyon kısıtlarının uygulanması durumunda enerji fiyatlarında artış yaşanacağıdır (Komiya ve Fujii, 2015). Tüm araçların elektrikli olması halinde enerji talebindeki artış 2019 yılı referans alınır %24,16; 2021 yılı referans alınır %17,74 olmaktadır. Bu hesaplama araç sayıları üzerinden değil, petrol kullanımı üzerinden yapılmıştır. Çalışmanın sonunda da bu artan talebi petrolle sağlamanın emisyonları şehir merkezlerinden dışarıya çıkarmaya yarayacağı vurgulanmıştır (Vrabie, 2022). Çin'in Guangdong eyaletinde yapılan çalışmada 2020 yılı referans alınarak 2035 yılı için iki farklı senaryoda tahminleme yapılmıştır. Temel senaryoya göre elektrik tüketimi 2035 yılında altı kattan fazla artarken, geliştirilen senaryoya göre beş katı aşan miktarlarda artmıştır. Geliştirilen senaryoya karbon zirveye 1 yıl önce ulaşarak 2020 yılına oranla 2035 yılında %8 düşük emisyon değerlerine ulaşabileceğini öngörmüştür (Liu ve ark., 2024).

BEV'lerin şehirdeki hava kalitesi ve halk sağlığı üzerinde olumlu katkıları olduğu bir gerçektir (Hsieh ve ark, 2022). BEV'ler karbon emisyonları azaltımı açısından yüksek potansiyele sahiptir. Fakat yapılan çalışmalar göstermiştir ki fosil yakıtların kullanımı potansiyelin gerçekleşmesinin önündeki en büyük engeldir. Yenilenebilir ve nükleer enerji gibi karbon emisyonları açısından temiz kaynaklarla çalıştırılan araçlarla bu potansiyel gerçekleştirilebilir. Temiz enerji dönüşümüne giden yolda batarya teknolojisinde gelişim ve enerji verimliliğini arttıracak yöntemlerle bu sürecin desteklenmesi faydalı olacaktır. BEV'lerin karbon emisyonlarını azaltmadaki etkinliği, elektrik üretimindeki yenilenebilir enerji payına ve enerji verimliliğine bağlı olarak değişmektedir (Casals ve ark., 2016). Örneğin, Prag'da bir tren istasyonunun yanındaki otoparka kurulacak şarj altyapısına yönelik bir çalışma, trenlerin frenleme sırasında ürettiği enerjinin geri kazanılarak araçların şarj edilmesinde kullanılmasını sağlayan bir model önerilmiştir. Geri kazanımdan elde edilen enerjinin %100 verimlilikle kullanıldığı ve günlük toplam ihtiyaç duyulan otopark enerji tüketiminin %45'ten fazlasını karşılayabileceği tespit edilmiştir. Bu da karbon emisyonuna sebep olmayan bu dönüşümle desteklenmiş enerji gücünün daha temiz olmasına ve emisyon oranlarının %45'ten fazla azalmasını sağlayacaktır. Ayrıca ekonomik olarak da evde şarjla rekabet edebilecek bir

potansiyel de sunmaktadır (Duvoracek ve ark., 2022).

1997 yılında Kempton ve Letendre tarafından “vecihle-to-grid (V2G)” araçtan şebekeye anlamına gelen bir terim kullanılmıştır. Bu yöntem, elektrik talebinin yoğun olduğu zamanlarda aktif olarak kullanılmayan BEV’lerin şebekeyi beslemesi olarak özetlenebilir. Bu ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretilen elektriğin depolanması, yoğun zamanlarda şebekeyi destekleyerek fosil yakıtların kullanımının azalması ve araçta depolanan enerjinin satışıyla sahibine ekonomik gelir sağlaması sayesinde BEV’lerin teşvik edilmesi gibi faydalara sahiptir. Bu yöntem kullanılarak Birleşik Krallık’ta ulaştırma ve enerji sektörünün karbonsuzlaştırılmasının desteklenmesi üzerine yapılan çalışmada üç farklı bina üzerinde simülasyonlar yapılmış ve V2G uygulandığında karbon emisyonunda azalmalar gözlenmiştir (Waldron ve ark., 2022) Bir başka çalışmada şebekenin karbonsuzlaştırılması için bir teşvik yöntemi oluşturulmuş ve bunun sonuçları incelenmiştir. Öncelikli olarak araçlar için makul bir karbon emisyon sorumluluğu belirlenmiş ve karbon emisyon maliyetleri hesaplanmıştır. Daha sonra bununla birlikte yük dağılımını yeniden optimize etmeleri için düşük karbonlu teşvik modeli oluşturulmuş. Önerilen yöntemle güç sistemlerindeki karbon emisyonlarında azalma olduğu gözlenmiştir (Fu ve ark., 2023). Avrupa’da artan BEV’lerin enerji sistemleri üzerindeki etkisini, piyasa fiyatları ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla gerçek zamanlı üretimini dikkate alan bir başka çalışma, farklı şarj stratejilerinin, Fransa ve Almanya’daki piyasa fiyat seviyelerini ve yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam kesintisini düşürdüğünü ortaya koymuştur (Will ve ark., 2024). Bir diğer çalışmada da enerji üretim sektöründeki emisyonları yönetmek için olasılıksal bir karbon ayak izi yönetim stratejisi önerilmiş ve bu sayede karbon yoğunluğunun azaldığı, yenilenebilir enerji verimliliğinde artış olduğu gözlenmiştir (Liu ve ark., 2024).

Türkiye örneğinde yapılan ve BEV’lerin artışının enerji üretim altyapısına oluşturacağı yükün incelendiği çalışmada, BEV’lerin CO₂ emisyonlarını hesaplamak için elektrik üretimindeki marjinal emisyon faktörleri dikkate alınmıştır. Sezonal farklılıklar göstermesine rağmen, BEV’lerin emisyonları, en yüksek emisyonun görüldüğü sezonda ICEV’lerin emisyon değerinin üçte biri, en düşük emisyonun görüldüğü sezonda ise beşte biri kadar olmuştur (Maarouf, 2020). BEV’lerin emisyon azaltım potansiyeli, farklı sürüş profilleri ve iklim koşulları altında değerlendirildiğinde, özellikle şehir içi sürüşlerde anlamlı emisyon azaltımları sağlandığı; ancak soğuk iklim koşullarında BEV’lerin performansının düştüğü ve buna bağlı olarak emisyonların arttığı gözlemlenmiştir (Tetik Kollugil ve ark., 2024).

Sonuç olarak, BEV’lerin karbon emisyonlarını azaltma potansiyeli, enerji üretim süreçlerindeki dönüşümlerle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, BEV’lerin çevresel ve ekonomik faydalarını en

üst düzeye çıkarmak için enerji politikalarının, teknolojik yeniliklerin ve sürdürülebilir ulaşım stratejilerinin bütüncül bir yaklaşımla ele alınması gerekmektedir. BEV'lerin yaygınlaşması, temiz enerji kaynaklarının benimsenmesi ve enerji verimliliğinin artırılması ile küresel karbon emisyonlarının azaltılması ve sürdürülebilir bir geleceğin inşasına önemli katkılar sağlayabilecektir. Bu çalışmada ülkemiz için karayolu ulaşımında kaynaklanan emisyonların azaltılmasında BEV'lerin etkisi ICEV'lerle karşılaştırılmak suretiyle değerlendirilmiştir. BEV'lerin elektrik üretiminden kaynaklanan dolaylı emisyonları ile ICEV'lerin doğrudan neden olduğu emisyonlar, farklı enerji senaryoları çerçevesinde incelenmiştir. Çalışma, enerji karışımlarındaki farklılıkların BEV'lerin karbon ayak izi üzerindeki etkilerini analiz edilerek, bu araçların çevresel etkilerini kapsamlı bir şekilde ele almıştır. Türkiye Ulusal Enerji Planı (TUEP)'na göre 2035 yılı elektrik üretim kaynakları ve BEV'lerin yaygınlaşmasıyla artan enerji talebinin karşılanabilirliği incelenmiş, yapılan tahminlemeye göre emisyon değerleri belirlenerek karşılaştırılmış ve daha düşük emisyon değerlerinin elde edilebileceği bir elektrik üretim modeli önerilmiştir. TUEP enerji profiline alternatif olarak önerilen modele göre emisyon değerleri belirlenerek iki model mukayese edilmiş ve sürdürülebilir ulaşım çözümlerine yönelik politikaların ve stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlanması amaçlanmıştır.

3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada Türkiye’de otomobillerin sürüş anında sebep oldukları CO₂ emisyonları incelenmiş ve BEV’lerin bu emisyonlara etkileri değerlendirilmiştir. İlk olarak, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), Emniyet Genel Müdürlüğü (EGM), Otomotiv Distribütörleri ve Mobilite Derneği (ODMD) ile sektörel danışmanlık şirketleri tarafından sağlanan veriler incelenmiştir. Bu veriler doğrultusunda, Türkiye otomotiv sektöründeki durumu ve eğilimleri yansıtmak amacıyla, en yaygın bulunan modeller ve son yıllarda en çok tercih edilen modeller dikkate alınarak beş araçtan oluşan bir örneklem oluşturulmuştur. Bu araçların sürüş sırasında neden oldukları CO₂ emisyonlarını belirlemek için, üretici firmalar tarafından sağlanan emisyon verileri temel alınmıştır. Bu verilerin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla, yakıt tüketim değerleri üzerinden bağımsız emisyon hesaplamaları yapılmıştır.

İkinci adımda Türkiye’nin tam elektrikli otomobil yolculuğunda gelinen mevcut durum ve son yıllardaki kullanıcı tercihleri incelenmiştir. Seçilen geleneksel araçlarla karşılaştırılmak üzere beş BEV; kullanıcı tercihleri, satın alma maliyet seviyesi, segment ve tasarım benzerlikleri, motor gücü ve tork değerleri açısından incelenerek seçilmiştir. Türkiye’de otomotiv sektörünün geleceğini şekillendirebilecek potansiyele sahip elektrikli araçlardan oluşan örneklem menzili ve tüketim değerleri toplanmıştır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, Türkiye Elektrik İletim A.Ş. ve TÜİK tarafından paylaşılan verilerle, Türkiye’nin elektrik üretim kaynakları incelenmiştir. Seçilen elektrikli araçlar elektrik dağılımıyla beslenirse kilometre başına oluşacak CO₂ emisyon miktarı hesaplanmıştır.

Mevcut duruma göre geleneksel otomobillerden oluşan örneklem ile tam elektrikli otomobillerden oluşan örneklem karşılaştırılmış, CO₂ emisyon azaltım oranı belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında araçların yaşam döngüleri boyunca; hammadde üretimi sırasında, araç üretim ve montaj aşamasında, fabrikadan kullanıcıya transferi ile hurda aşamasında oluşan emisyonlar dikkate alınmamıştır. İlave olarak elektrik üretim santrallerinden şebekeye kadar oluşan iletim ve dağıtım kayıpları da hesaplama dahil edilmemiştir. Türkiye’de 2022 yılında elektrik iletiminde %2, dağıtımında ise bölgesel olarak değişiklik gösterse de 2022 yılı Türkiye geneli %11’lik dağıtım kaybı meydana gelmiştir (Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. [TEDAŞ], 2023). Ayrıca elektrik hatlarında oluşan anlık talep yoğunlukları da incelemeye dahil edilmemiştir. Gerçekleşen yıllık üretim üzerinden genel bir değerlendirme yapılmıştır.

2035 yılında otomotiv sektöründeki dönüşümü tespit etmek için geçmiş veriler kullanılarak zaman serisi analizi, Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (İng. Autoregressive Integrated

Moving Average- ARIMA) yöntemi uygulanmıştır. Bu hesaplamaları yapmak için Minitab Statistical Software 22 uygulaması kullanılmıştır. Kullanım kolaylığı, sonuçları görselleştirmesi ve zaman serisi analizleri için çeşitli fonksiyonel özellikler sunarak hızlı analiz imkânı sağlaması sebebiyle bu uygulama tercih edilmiştir. Uygulama düşük, normal ve yüksek olmak üzere üç farklı senaryo sunmaktadır. Dünya çapında emisyon değerlerini düşürmek için elektrikli araçlara hükümetler tarafından yüksek teşvikler sağlandığından düşük senaryo çok olası görülmemiş ve bu çalışmada normal ve yüksek senaryoya odaklanılmıştır. Öncelikle, iki senaryo için BEV sayıları belirlenmiş, ardından BEV'lerin otomotiv sektöründeki hacmini tespit edebilmek amacıyla toplam otomobil sayıları aynı yöntemle hesaplanmıştır. Türkiye Ulusal Enerji Plan'ı doğrultusunda 2053 net sıfır emisyon hedeflerine giden yolda; 2035 yılı hedeflerine ulaşıldığı durumda, her iki senaryo için de BEV'ler kaynaklı CO₂ emisyon azaltımları hesaplanmıştır. 2035 hedefleri için enerji planına alternatif bir enerji modeli önerilmiş, bu modele göre CO₂ emisyonu azaltımındaki değişim belirlenmiştir.

3.1. İçten Yanmalı Araç Seçimi ve CO₂ Emisyon Değerleri

İlk olarak geleneksel araçların seçimi yapılarak, daha sonra seçilen bu araçların CO₂ emisyon değerleri belirlenmiştir.

3.1.1. İçten yanmalı araçların seçimi

Araç seçimi yapılırken Türkiye'de trafiğe kayıtlı araçların marka ve modelleri ile son yıllarda en çok tercih edilen araçların marka ve modelleri incelenmiştir. Trafiğe kayıtlı araçlar Türkiye'nin mevcut durumunu yansıtırken, son yıllarda en çok tercih edilen araçlar ise Türkiye'nin gelecekteki segment eğilimleri hakkında ipuçları sunmaktadır. Bu nedenle iki kriter de dikkate alınmış ve seçimler bu doğrultuda yapılmıştır.

• Türkiye'de trafiğe kayıtlı araçların marka modellere göre dağılımı

2023 yılı sonu itibarıyla Türkiye'de trafiğe kayıtlı toplam 15.221.134 otomobil bulunmaktadır. Bunların 2.916.140 tanesi Renault, 2.407.798 tanesi ise Fiat markalıdır. Fiat'ı 1,3 milyon ile Volkswagen takip etmektedir (TÜİK, 2024).

ESB Danışmanlık, Türkiye'de en çok bulunan otomobilleri marka ve model kırılımında paylaşmıştır (Tablo 3.1 ve Tablo 3.2). Buna göre en çok bulunan markalar TÜİK verileriyle benzerlik göstermiş, en çok bulunan model sıralamasında ise ilk sırada, 1990'larda yaygın olarak tercih edilen Tofaş markasına ait Doğan, Şahin ve Kartal modelleri yer almıştır. (Şahin, 2024c).

Tablo 3.1. Türkiye’de Otomobil Marka Dağılımı (2024)

En Çok Bulunan Markalar		
Marka	Araç Parkı	Park Payı, %
Renault	2.914.112	19,4
Fiat	2.366.467	15,8
Volkswagen	1.298.836	8,6
Opel	1.008.128	6,7
Hyundai	902.845	6,0
Ford	898.244	6,0
Toyota	857.495	5,7
Peugeot	538.709	3,6
Honda	452.815	3,0
Dacia	437.815	2,9
Mercedes	431.048	2,9
Bmw	356.150	2,4
Skoda	349.364	2,3
Nissan	321.530	2,1
Citroen	311.433	2,1

Tablo 3.2. Türkiye’de Otomobil Model Dağılımı (2024)

En Çok Bulunan Modeller				
Marka	Model	Model Parkı	Marka Parkı, %	Pazar Payı, %
Fiat-Tofaş	Doğan-Şahin-Kartal	820.962	34,7	5,5
Toyota	Corolla	628.137	73,3	4,2
Renault	R12 -Toros	553.164	19,0	3,7
Renault	Megane	538.121	18,5	3,6
Renault	Clio	535.718	18,4	3,6
Fiat-Tofaş	Egea	510.676	21,6	3,4
Opel	Astra	448.849	44,5	3,0
Ford	Focus	398.781	44,4	2,7
Renault	Symbol	381.708	13,1	2,5
Renault	R9- Broadway	351.183	12,1	2,3
Volkswagen	Passat	329.921	25,4	2,2
Hyundai	Accent	329.731	36,5	2,2
Honda	Civic	313.415	69,2	2,1
Volkswagen	Polo	304.064	23,4	2,0
Opel	Corsa	267.504	26,5	1,8

- Türkiye’de son yıllarda en çok tercih edilen araçların marka modellere göre sıralanması

TÜİK verilerine göre 2004-2023 yılları arasında trafiğe kaydı yapılan otomobil marka

sıralamasına göre Renault ilk sırada yer alırken, ikinci sırada Volkswagen, üçüncü sırada ise Fiat yer aldı. İlk 10'un yer aldığı liste Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Türkiye Trafik Kaydı Yapılan Otomobiller Dağılımı

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
	Renault	Volkswagen	Fiat	Hyundai	Opel	Ford	Toyota	Peugeot	Dacia	Honda
2004	78.706	31.880	37.400	35.355	46.514	41.555	27.318	24.440	3.290	19.566
2005	67.881	28.894	32.721	39.180	35.434	39.302	26.163	20.965	6.842	16.166
2006	62.536	28.104	32.439	33.106	28.479	40.111	28.587	18.305	7.455	17.349
2007	56.323	25.802	31.869	25.208	25.391	28.702	27.783	12.738	3.798	20.135
2008	52.150	22.459	29.403	28.254	25.724	28.155	24.884	12.448	4.807	21.241
2009	50.379	25.000	27.036	49.276	21.077	29.969	22.732	11.999	5.269	15.344
2010	72.094	38.831	40.284	51.457	36.189	49.327	34.753	17.594	12.001	15.299
2011	93.964	54.022	58.288	44.956	51.334	61.001	37.746	16.440	17.817	15.123
2012	74.123	66.962	47.642	42.057	49.970	47.976	31.896	13.550	26.501	15.084
2013	93.715	89.001	49.991	47.164	54.531	54.066	35.243	21.558	28.847	15.017
2014	85.581	84.058	38.296	42.569	40.892	41.345	33.420	18.090	26.670	13.234
2015	101.210	111.955	47.197	51.274	48.463	48.930	49.239	22.643	37.623	16.745
2016	102.829	100.877	50.664	47.996	53.194	42.006	46.353	24.041	40.723	19.518
2017	118.907	91.330	61.305	50.060	45.646	40.211	41.401	27.639	41.236	27.313
2018	83.540	56.107	40.560	35.595	23.723	26.222	31.931	28.273	29.246	27.834
2019	59.839	39.555	52.030	23.054	15.309	15.723	22.961	22.283	14.898	20.939
2020	96.913	52.386	89.888	26.369	28.990	27.208	36.449	34.763	27.125	21.609
2021	78.701	57.906	81.456	39.169	24.254	18.171	46.901	33.481	28.762	29.102
2022	80.267	48.529	86.594	40.515	26.291	11.527	37.724	22.335	35.491	21.878
2023	116.838	69.858	127.312	51.993	60.737	30.083	43.710	56.112	39.776	18.507
Toplam	1.626.496	1.123.516	1.062.375	804.607	742.142	721.590	687.194	459.697	438.177	387.003

Bütün araçlar değerlendirildiğinde Volkswagen, Fiat'ın arkasında sıralamada üçüncü sırada yer alırken, son 20 yıl incelendiğinde Fiat'ın önüne geçmektedir.

Bestsellingcarblog internet sayfasında paylaşılan bilgilere göre, Türkiye'de son 20 yılda en çok tercih edilen araç markaları şöyle sıralanmıştır (Bestselling Cars Blog, 2024):

- 2004-2006 yılları arası Renault Megane,
- 2007, 2008, 2010 ve 2011'de Renault Symbol,
- 2012-2013 yıllarında Fiat Linea,
- 2014'te Renault Fluence,
- 2016 yılından bu yana Fiat Egea

2014 yılında Fluence, 2015 yılında Corolla çok az bir farkla Linea'yı geçerek birinci olmuştur. Bu olmasaydı 4 yıl Linea, 9 yıl da Egea hakimiyetiyle Fiat, Türkiye'nin son 13 yılında birinciliği başkar bir markaya kaptırmamış olacaktı.

Buradaki verilerle son 19 yılda en çok satılan ilk üç araç ve satış adetleri ise Tablo 3.4'te

verilmiştir. Tabloda sadece ilgili yıllarda ilk üçe giren araçların satış rakamlarına yer verilmiştir. Tabloda koyu yeşil ile renklendirilenler ilgili yıl içerisinde birinci sırada, sarı renkle belirtilenler ikinci sırada ve renksiz olanlar da üçüncü sırada yer alan otomobilleri belirtmektedir.

Tablo 3.4. Türkiye Yıllara Göre En Çok Satılan İlk 3 Otomobil

	Egea sedan	Clio	Megane	Corolla	Fluence	Linea	Symbol	Accent Era	Egea cross	Astra	Civic	Fiesta
2006		21.566	22.013	13.368								
2007			21.874	16.781			23.220					
2008			16.208				17.849	17.438				
2009			17.052				23.989	32.968				
2010					24.838		28.667	27.386				
2011					30.287	33.762	37.478					
2012					26.818	33.351						20.942
2013					24.153	37.537	27.988					
2014				23.464	32.252	32.239						
2015				35.237	33.865	35.040						
2016	38.260			33.225						32.274		
2017	42.990	31.265	39.272									
2018	34.087		29.381								23.799	
2019	57.161	28.844	23.211									
2020	79.556	46.192	39.917									
2021	49.698	36.438		41.343								
2022	68.779	41.607		30.948								
2023	80.768	58.581							41.030			
2024	29.148	24.609	21.683									
	480.447	289.102	230.611	194.366	172.213	171.929	159.191	77.792	41.030	32.274	23.799	20.942

Ülkemizde son 19 yılda toplam 10.591.858 otomobil satılmıştır. Tablo 3.4'teki rakamlara göre satılan tüm otomobillerin %4,54'ünü 2015 yılında piyasaya sürülen ve o yıldan itibaren de listede ilk sırada yer alan **Fiat Egea Sedan** modeli oluşturmaktadır (Goodcarbadcar, 2024).

Gerçekleştirilen incelemenin Türkiye'deki genel otomobil sektörünü doğru yansıtan bir sonuç verebilmesi için bu bilgiler ışığında 5 araçlık bir örneklem oluşturulmuştur. Bu örneklemdeki araçları ve seçilme nedenlerini şu şekilde sıralayabiliriz:

Fiat Egea Sedan: Fiat, Türkiye'de en çok tercih edilen ikinci marka olup, bu markanın motor teknolojisinin örneklemimizde yer alması gerekmektedir. 2016 yılından bu yana en çok satan model olması, Türkiye'de son 19 yılda satılan tüm otomobiller arasında yaklaşık %5'lik bir pay elde etmesi ve 2023 Ocak–2024 Haziran döneminde Türkiye'de satılan araçların %7,68'ini oluşturması nedenleriyle, Fiat markasından Egea Sedan modeli seçilmiş ve bu modelin 1.4 Fire 95 HP paketi tercih edilmiştir (Şahin, 2024a, 2024d).

Renault Clio Hatchback: Renault, Türkiye’de en çok bulunan otomobil markası olup, farklı modelleriyle her zaman üst sıralarda yer almıştır. Bu nedenle çalışmada, Renault teknolojisine de yer verilmesi gerekmektedir. Kompakt hatchback segmentinde yüksek talep gören, 2022, 2023 ve 2024 yıllarının ilk yarısında en çok satılan ikinci model olması ve 2023 Ocak–2024 Haziran döneminde Türkiye’de satılan araçların %5,82’sini oluşturması nedenleriyle, Renault markasından Clio Hatchback modeli seçilmiş ve bu modelin 1.0 TCe X-Tronic 90 HP paketi tercih edilmiştir (Şahin, 2024a, 2024d).

Toyota Corolla: Toyota, Türkiye’de marka otomobil yoğunluğu açısından yedinci sırada yer almakla birlikte, hibrit ve hidrojen yakıtlı araç teknolojileri konusunda güçlü bir altyapıya sahiptir. Otomobiller, üretildikleri ülkenin kültürel özelliklerini de yansıttığı için Japon kültürü ve Toyota’nın teknoloji yaklaşımı örnekleme de yer almalıdır. Son 19 yılda en çok satılan modeller arasında Renault Megane’dan sonra dördüncü sırada yer alması ve 2023 Ocak–2024 Haziran döneminde Türkiye’de satılan araçların %3,28’ini oluşturması nedenleriyle, Toyota markasından Corolla modeli seçilmiş ve bu modelin 1.5 Benzinli Multidrive S paketi tercih edilmiştir (Şahin, 2024a, 2024d).

Volkswagen Tiguan: Volkswagen, Türkiye otomobil piyasasında en çok tercih edilen üçüncü marka konumundadır. SUV modeller arasında Dacia Duster maliyet avantajıyla öne çıkmış olsa da Tiguan uzun yıllardır tercih edilen bir C segment SUV modelidir. Çalışmada içten yanmalı SUV otomobilleri ve Volkswagen markasını temsilen, Tiguan modeli seçilmiş ve 1.5 eTSI 150 PS DSG paketi tercih edilmiştir.

BMW 5 Serisi: BMW, 2023 Ocak- 2024 Haziran döneminde Türkiye’de satılan E segment araçların %26,22’sini oluşturarak Mercedes’ten sonra bu alanda en çok araç satan marka olmuştur. Bu dönemde en çok satılan model ise %18,33 ile BMW 5 Serisi olmuştur. Ayrıca, aynı modelin elektrikli versiyonu da bulunması, motor gücü ve satın alma maliyetinin diğer seçilen araçlara göre yüksek olması nedeniyle, son olarak BMW markasından 5 Serisi seçilmiş ve bu serinin 520i sedan paketi tercih edilmiştir (Şahin, 2024b, 2024e).

Seçilen araçlar, Türkiye’de 2023 Ocak – 2024 Haziran ayları arasında satılan otomobillerin %18,26’sını oluşturmaktadır (ESB Danışmanlık, 2024). Örneklem içerisinde iki adet C segmenti sedan, bir B segmenti hatchback, bir C segmenti SUV ve bir E segmenti sedan olmak üzere; Fransız, İtalyan, Japon ve Alman üretimi araçlar yer almaktadır. Bu çeşitlilik, farklı marka ve kültürlerin teknolojilerini, Türkiye’deki kullanıcı tercihleri ile birleştirerek otomobil piyasasını şekillendirecek bir örneklem oluşturma amacını güdülmüştür.

3.1.2. Fabrika/Üretici verileriyle seçilen geleneksel araçların CO₂ emisyonları

Otomobillerin karbon emisyon değerleri, uluslararası kabul gören standartlara göre akredite kurumlar tarafından yapılan testler, otomobil üreticileri tarafından yapılan çeşitli testler ve hesaplama yöntemleri kullanılarak belirlenmektedir. Değerler, kullanıcı el kitapları, model katalogları ve web sitelerinde ilan edilmektedir. Kullanılan iki yaygın test yöntemi; Avrupa Yeni Sürüş Çevrim (İng. New European Driving Cycle- NEDC) ve Dünya Geneline Uyumlu Hafif Araç Test Prosedürü (İng. Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure- WLTP).

NEDC, 1997’de standartlaştırılmış, 11,03 km uzunluğunda, düşük hız ve motor yüküyle ideal koşullarda emisyonları ölçmek için kullanılan 20 dakika süren bir test prosedürüdür. WLTP ise 2017’den itibaren devreye alınmış, 23,27 km uzunluğunda, gerçek yol koşullarına daha yakın, daha dinamik hız profilleri sunar. WLTP, daha yüksek ortalama hız, daha kısa durağan süreler ve çeşitli hız koşulları ile NEDC’ye kıyasla daha gerçekçi yakıt tüketimi ve emisyon sonuçları sağlamayı hedefler (Karamangil ve Tekin, 2022).

Bu bilgiler ışığında seçilen modeller için markaların paylaştığı CO₂ emisyon değerleri ve yakıt tüketimleri incelenmiş, aşağıdaki Tablo 3.5’te detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 3.5. Üretici Verileriyle İçten Yanmalı Araçların Emisyon ve Tüketim Değerleri

	WLTP CO₂ Emisyonu, g/km	WLTP Yakıt Tüketimi, l/100 km
Fiat Egea Sedan 1.4 FIRE 95 HP	145-150	6,4-6,5
Renault Clio 1.0 TCe x-tronic 90 HP	136-143	6-6,3
Toyota Corolla 1.5 Benzinli Multidrive S	138-143	6,1-6,3
Volkswagen Tiguan 1.5 eTSI 150 PS DSG	153	6,7
BMW 520i Sedan	160	7

Araç yakıt türü olarak benzinli araçlar incelenmiştir. Çünkü dizel araçların hem CO₂ emisyon değerleri hem de ortalama tüketim değerleri benzine göre genelde daha düşüktür. Dizel yakıtlı araçların kilometre başına daha düşük CO₂ emisyonlarına sahip olmalarına rağmen, benzinli araçlara göre çevresel açıdan daha tehlikeli olmalarının temel sebepleri, Azot Oksit (NO_x) ve

partikül madde (PM) emisyonlarının daha yüksek olmasıdır. Bu emisyonlar solunum yolu hastalıklarına ve diğer sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Bu nedenle, dizel araçlar çevresel ve sağlık açısından daha zararlı kabul edilebilir (Reşitoğlu, 2015). Bu nedenden ötürü de bir çok araç üreticisi dizel yakıtlı araç üretimlerine ya son vermekte ya da azaltmaktadır. Toyota 2019 yılında Corolla modelinde, Renault da 2020 yılında Clio modelinde dizel motorlu üretimleri durdurmuşlardır. Seçilen diğer araçların dizel versiyonları olmasına rağmen sadece CO₂ emisyonları açısından inceleneceği için bu çalışmada benzinli versiyonları incelenmiştir.

3.1.3. Yakıt tüketimine göre seçilen geleneksel araçların CO₂ emisyonları

Araçların kullanım esnasında yaptığı CO₂ emisyonlarını hesaplamak için birçok yöntem bulunmaktadır. Bunlar arasında en yaygın kullanılanlar doğrudan ölçüm, motor gücü ve yakıt tüketimi verilerinden hesaplama yöntemleridir. Doğrudan ölçüm yöntemi, araç egzozundan çıkan gazların ölçümü esasına dayanmaktadır ve en doğru sonucu vermektedir ancak ölçüm işlemi zaman alıcı ve pahalı olduğundan, daha pratik olan motor gücü ve yakıt tüketimi yöntemleri tercih edilmektedir.

Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli (İng. Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC), sera gazı emisyonlarını yakıt tipi ve tüketim miktarına göre hesaplamak üzere Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 metodolojilerini paylaşmıştır. Kısaca Tier 1 yaklaşımında standart emisyon faktörleri, Tier 2'de ulusal verilerden elde edilen emisyon faktörleri ve Tier 3'te ise model bazlı emisyon faktörleri kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlarda kabaca Tier seviyesi arttıkça hesaplama hassasiyeti de artmaktadır denilebilir (Köse ve Acaroğlu, 2020).

Tier 1 yöntemi, genellikle yeterli verinin olmadığı durumlarda başvurulacak bir yöntem olup, akaryakıt tipine bağlı IPCC kılavuzunda açıklanan emisyon faktörleriyle tüketilen yakıt miktarı kullanılarak emisyon değerlerinin hesaplanmasıdır.

$$\sum \text{Emisyon} = \sum [\text{Yakıt (ab)} \times \text{EF (ab)}] \quad (1)$$

Emisyon : kg cinsinden emisyon miktarı

Yakıt : Enerji değeri cinsinden yakıt tüketimi (TJ),

EF : Emisyon faktörü (kg/TJ),

a : Yakıt tipi (benzin, dizel, LPG),

b : Sektör faaliyeti (karayolu, denizyolu, havayolu vb.)'dir.

Tier 2 yönetimi, Tier 1'e benzerliği bulunmasına rağmen emisyon faktörleri ve parametrelerin

ülkeye özgü olmasıyla bölgesel olarak daha doğru sonuçlara ulaşmayı sağlar. Hesaplama için kullanılan formül aynıdır. Emisyon faktörü bölgesel olarak değişkenlik göstermektedir.

Tier 3 yönetimi, daha karmaşık modeller içerir ve daha çok veri gerektirir. Yakıt tüketimi ve emisyon faktörünün tesise özgü hesaplanması gerekir.

Özetle Tier 1’de daha genel, Tier 2’de ulusal çapta, Tier 3’te ise testin yapılacağı daha dar bir alan için emisyon katsayısı belirlenir. Bu sebeple Tier sayısı arttıkça daha çok ortam koşulları değerlendirildiği için gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilir. Tier 1 için emisyon faktörü, IPCC 2006 Yönergesi Table 2.2 Default Emission Factors for Stationary Combustion in the Energy Industries’de benzin için varsayılan emisyon değeri olarak belirtilen 69.300 kg/TJ olarak alınmıştır.

1 litre benzinin yanması sonucu oluşan enerjiyi belirlemek için enerji yoğunluğu ile litreyi çarpmak gerekir. Benzinin ortalama enerji yoğunluğu 32-34 MJ/l civarındadır. Bu hesaplama için 33 kJ/l alınmıştır (Bureau of Transportation Statistics, 2024).

Tablo 3.5’te ortalama yakıt tüketimleri belirtilmiş olan araçlar için aşağıda verilen örnek hesaplama göre her bir araç için hesaplanmış CO₂ emisyon değerleri Tablo 3.6’da verilmiştir.

$$\text{CO}_2 \text{ Emisyonu}_{\text{Fiat Egea Sedan}} = 33 \text{ kJ/l} \times (6,4 \text{ l/100km}) \times 10^{-2} \times (69.300 \text{ kg/TJ}) \times 10^{-3} = 146,36 \text{ g/km}$$

Tablo 3.6. Tier 1 Yöntemiyle İçten Yanmalı Araçların Emisyon Değerleri

	WLTP CO₂ Emisyonu, g/km	WLTP Yakıt Tüketimi, l/100 km	Tier 1, g/km
Fiat Egea Sedan 1.4 FIRE 95 HP	145-150	6,4-6,5	146,36-148,65
Renault Clio 1.0 tce x-tronic 90 HP	136-143	6-6,3	137,21-144,07
Toyota Corolla 1.5 Benzinli Multidrive S	138-143	6,1-6,3	139,5-144,07
VW Tiguan 1.5 eTSI 150 PS DSG	153	6,7	153,22
BMW 520i Sedan	160	7	160,08

Ülkemize özgü bir Tier 2 emisyon katsayısının bulunmaması ve Tier 2 ile Tier 3 seviyelerinde daha detaylı çalışmaların gerekliliği nedeniyle, bu çalışma kapsamında yalnızca Tier 1 seviyesine göre emisyon hesaplamaları yapılmıştır. Fakat Çanakkale örneği alınarak yapılan Tier 1 ve Tier 2 hesaplamaları sonuçlarına bakıldığında Tier 2 ile elde edilen sonuçların Tier 1 ile elde edilen sonuçlardan yaklaşık %2 daha düşük olduğu görülmüştür (Yalılı Kılıç, Dönmez

& Adalı, 2021).

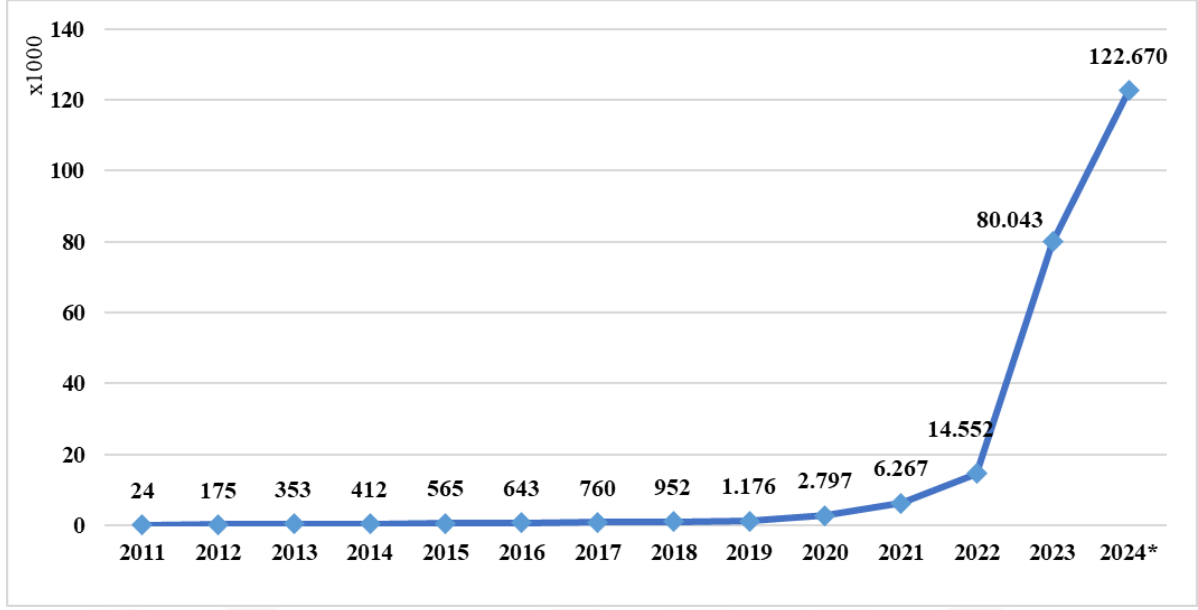
Sonuçlar göstermiştir ki firmalar tarafından WLTP yöntemiyle belirlenen emisyon değerleri, Tier 1 yöntemiyle hesaplanan değerlerle benzerlik göstermektedir.

3.2. BEV Seçimi ve Dolaylı CO₂ Emisyon Değerleri

Tam elektrik araç seçimi yapılırken Türkiye’de elektrikli araçların mevcut durumu ve son yıllarda en çok tercih edilen BEV’ler incelenmiştir. Türkiye’nin otomotiv sektörünün elektrifikasyonunu sağlayacak, geleceğin resmini verebilecek bir örneklem oluşturmak hedeflenmiştir. Seçilen geleneksel araçların yerini alacak bu araçların fiyat, performans ve tasarım gibi kriterler açısından seçilen araçlara benzerlik göstermesine dikkat edilmiştir. Daha sonra seçilen araçlar için üretici firmalar tarafından paylaşılan menzil ve tüketim değerleri incelenmiştir. Türkiye’nin mevcut elektrik üretim kaynaklarının dağılımları belirlenmiştir. Bu dağılıma göre elektrik üretilirse seçilen BEV’lerin sürüş esnasında kilometre başına oluşturacakları dolaylı CO₂ emisyonları hesaplanmıştır.

3.2.1. Elektrikli araçların seçimi

Türkiye’de BEV sahipliği aslında 2011 yılına dayansa da 2020 yılından sonra özellikle de yerli otomobil TOGG markasının piyasaya girdiği 2023 yılından sonra hızla artmaya başladı. TÜİK verilerine göre 2011 yılında trafiğe kayıtlı 24 tane BEV bulunurken, 2024 yılı temmuz ayına gelindiğinde bu rakam 122.670 adete ulaştı (TÜİK, 2024). Elektrikli araçlar hala toplam otomobil piyasasının %1’ini bile oluşturamasa da son 3 yılda 8-9 kat artışla yükseliş eğilimine girmiştir (Şekil 3.2).



*2024 yılı haziran sonu rakamlarıdır.

Şekil 3.1. Trafîğe Kayıtlı BEV Sayısının Yıllara Göre Değişimi

Bu artışın büyük bir bölümü TOGG ile sağlanıyor olsa da TOGG'un piyasaya girdiği yıl, dünyada elektrikli araç dendiğinde akla gelen ilk isimlerden olan Tesla, Türkiye'de satışlarına başladı. 2023 yılı ve 2024 Ocak-Haziran satış rakamları Tablo 3.7 ve Tablo 3.8'de verilmiştir.

Tablo 3.7. 2023 Yılında Türkiye'de En Çok Satılan BEV Model Dağılımı

2023 En Çok Satılan BEV'ler			
Marka	Model	Satış, Adet	Pay, %
TOGG	T10X V2	19.583	29,9
Tesla	Model Y	12.150	18,5
Renault	Megane E-Tech	2.892	4,4
MG	MG4	2.842	4,3
Skywell	ET5	2.541	3,9
Opel	Corsa	1.777	2,7
Dacia	Spring	1.757	2,7
Mercedes	EQB	1.483	2,3
Volvo	XC40	1.481	2,3
MG	ZS EV	1.322	2
Citroen	C4X	1.063	1,6
Mercedes	EQE	1.028	1,6
Citroen	C4	986	1,5
BYD	Atto 3	853	1,3
BMW	X1	838	1,3

Tablo 3.8. 2024 İlk Yarıyılında Türkiye'de En Çok Satılan BEV Model Dağılımı

2024 Ocak-Haziran En Çok Satılan BEV'ler			
Marka	Model	Satış, Adet	Pay, %
TOGG	T10X V2	13.021	36,5
Tesla	Model Y	3.082	8,6
KG Mobility	Torres	2.522	7,1
BMW	5 Serisi	1.509	4,2
BMW	X1	1.377	3,9
Mercedes	EQB	1.109	3,1
BYD	Atto 3	970	2,7
MG	MG4	965	2,7
Volvo	XC40	802	2,3
Hyundai	Ioniq 6	718	2
Hyundai	Ioniq 5	674	1,9
Citroen	C4	603	1,7
Renault	Megane E-Tech	590	1,7
Jeep	Avenger	586	1,6
Mini	Countryman	583	1,6

Bu tablolara göre Türkiye’de 2024 Haziran sonu itibariyle kullanılan her 4 elektrikli otomobilden biri TOGG’dur (%26,58). İkinci sırada %12,42 ile Tesla yer almaktadır.

Bu bilgilerden faydalanılarak bu çalışma kapsamında incelenen BEV’ler ve seçilme gerekçeleri aşağıda verilmiştir:

TOGG T10X V2: Türkiye’nin elektrikli otomobil dönüşümünde öncü olabilecek, mevcutta dört elektrikli araçtan biri olan, Türkiye’nin yerli otomobili TOGG T10X V2 seçilmiştir. 218 HP (160 kW) güce, 350 Nm torka ve 1.863.000- 1.923.000 TL (54.157 \$- 55.901 \$) satın alma maliyetine sahip olan TOGG; 150 HP (110 kW) güce, 250 Nm torka ve 2.248.090-2.839.090 TL (65.351 \$- 82.532 \$) satın alma maliyetine sahip olan Volkswagen Tiguan’e hem segment ve tasarım olarak benzerliğe sahip olması hem de fiyat avantajı sunmasıyla benzer klasmandaki otomobillerin tam elektrikli alternatifi konumundadır.

Tesla Model Y: Türkiye’de elektrikli araç piyasasında ikinci sırada yer alan dünya devi Tesla, Türkiye’ye özel uygun fiyatlı bir Model Y duyurdu. Bu sayede haziran ayında 2.670 araç satarak ve Ocak-Haziran döneminde ise 3082 adetlik satışla listede ikinci sırada yer aldı. Tesla, Türkiye’ye özel araç çıkartarak Türkiye’nin BEV dönüşümünde aktör olmayı hedeflemiştir. Bu sebeple seçilen ikinci araç Tesla Model Y olmuştur. 204 HP (150 kW) güce, 350 Nm torka ve 1.866.000- 2.819.342 TL (54.244 \$- 81.958 \$) satın alma maliyetine sahip olan bu araç, 125 HP (192 kW) güce, 153 Nm torka ve 1.390.000- 1.911.000 TL (40.407 \$- 55.552 \$) satın alma maliyetine sahip olan Toyota Corolla ile benzer satın alma maliyetlerine sahip olmasıyla klasmandaki otomobillerin elektrikli alternatifi olabilir.

Renault Megane E-Tech: Renault, Türkiye’de en çok araca sahip otomobil markası olup elektrikli araç piyasasında da yeni bir oyuncu değildir. 2011’de ZOE ve Kangoo Z.E. gibi tamamen elektrikli modellerini tanıtmıştır. 2023 Ocak- 2024 Haziran döneminde toplam 3.482 adet Megane E-Tech satılmıştır. Bu satış değerleri BEV pazarının yaklaşık %3’üne denk gelmektedir. Bu yüzden Renault Megane E-Tech modeli, markanın elektrikli dönüşümdeki CO₂ emisyon katkısını incelemek amacıyla ve Clio gibi hatchback yapıda olması nedeniyle seçilmiştir.

BYD Atto 3: Dördüncü model olarak yakın zamanda Türkiye’de fabrika kurma kararı alan Çin’li dünya devi, daha önce Tesla’yı geçmeyi başaran, Türkiye pazarında da varlığını artırmayı hedefleyen BYD markasına seçilmiştir. Türkiye’de mevcutta satılan tek modeli olan Atto 3, 2023 Ocak- 2024 Haziran döneminde 1.808 adet satılarak %2’lik pay elde etmiştir. BYD özellikle batarya teknolojisinde gelişmiş özellikler sunan bir markadır. 1.590.000 TL (46.221

\$) fiyatla seçilen elektrikli otomobiller arasında en düşük satın alma maliyetine sahiptir.

BMW i5: Örneklemin son otomobili de geleneksel araçlarda da seçilen BMW 5 serisinin elektrikli versiyonu olan i5 xDrive40 paketidir. 394 HP (290 kW) güce, 590 Nm torka ve 5.401.349- 5.863.190 TL (157.016 \$- 170.442 \$) satın alma maliyetine sahip olan bu araç, 190 HP (140 kW) güce, 310 Nm torka ve 5.026.325- 5.710.549 TL (146.114 \$- 166.004 \$) satın alma maliyetine sahip olan BMW 520i sedan ile benzer satın alma maliyetlerine sahip olmasıyla klasmandaki otomobillerin elektrikli alternatifi olabilir.

Seçilen araçlar BEV'ler, Türkiye'de 2023 Ocak – 2024 Haziran ayları arasında satılan tam elektrikli otomobillerin %54,51'ini oluşturmaktadır (ESB Danışmanlık, 2024). Tablo 3.9'da seçilen ICEV'ler ve BEV'lerin performans ve fiyat karşılaştırmaları verilmiştir.

Tablo 3.9. Seçilen ICEV'lerin ve BEV'lerin Performans ve Fiyat Karşılaştırması

	Tork, Nm	Güç, HP	Fiyat, Bin TL	Fiyat, \$ (\$ = 34,4 TL)	Fiyat, \$ (\$ = 34,4 TL)	Fiyat, Bin TL	Güç, HP	Tork, Nm	
Fiat Egea Sedan 1.4 FIRE 95 HP	127	95	989,9-1.194,9	28.776-34.735	46.221	1.590	204	310	BYD Atto 3
Renault Clio 1.0 TCe x-tronic 90 HP	142	90	1.095,5-1.303	31.845-37.878	47.703-51.991	1.641-1.788,5	220	300	Renault Megane E-Tech
Toyota Corolla 1.5 Benzinli Multidrive S	153	125	1.390-1.911	40.407-55.552	54.244-81.958	1.866,2-2.819,3	204	350	Tesla Model Y A. Çekiş
Volkswagen Tiguan 1.5 eTSI 150 PS DSG	250	150	2.248,1-2.839,1	65.351-82.532	54.157-55.901	1.863-1.923	218	350	TOGG T10X V2
BMW 520i Sedan	310	190	5.026,3-5.710,6	146.114-166.004	157.016-170.442	5.401,4-5.863,2	394	590	BMW i5 xDrive40

Sonuç olarak örneklem içerisinde bir C segmenti hatchback, üç C segmenti SUV ve bir E segmenti sedan olmak üzere; Türk, Fransız, Çin, Amerikan ve Alman üretimi araçlar yer almaktadır. Bu çeşitlilik ile farklı marka ve kültürlerin teknolojilerini, Türkiye'deki kullanıcı tercihleri ile birleştirerek otomobil piyasasında dönüşümü sağlayacak bir örneklem oluşturmak amaçlanmıştır.

3.2.2. Seçilen elektrikli araçların dolaylı CO₂ emisyon hesabı

Öncelikle seçilen araçların üreticiler tarafından paylaşılan enerji tüketim değerleri, 100 kilometre mesafe için ihtiyaç duyulan kWh enerji miktarları toplanmıştır. Ayrıca menzil ve

batarya değerleri de ikincil bir hesaplama yöntemi olarak ele alınmıştır. Daha sonra Türkiye'nin elektrik üretimi için kullanılan enerji dağılımları belirlenmiş, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından belirlenen emisyon yoğunluk faktörleri kullanılarak, ilk aşamada belirlenen enerji tüketim değerleriyle birleştirilmiş, kilometre başına dolaylı olarak sebep olunan CO₂ emisyon değerleri belirlenmiştir.

- **Seçilen elektrikli araçların enerji tüketim değerleri**

Üreticiler tarafından ilan edilen enerji tüketim değerleri (Tablo 3.10'un en sağındaki renkli bölüm) ve WLTP standardına göre paylaşılan menzil ve batarya kapasiteleri üzerinden hesaplanan enerji tüketim değerleri Tablo 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.10. Seçilen Elektrikli Araçların Batarya-Menzil Değerleri

	Batarya, kWh	Menzil, km	Enerji Tüketimi¹, kWh/100 km	Enerji Tüketimi, kWh/100 km
BYD Atto 3	60,48	420-565	10,7-14,40	15,6
Renault Megane E-Tech	60	450	13,33	16,1
Tesla Model Y	57,5	455	12,64	15,7
TOGG T10X V2	88,5	523	16,83	19,1
BMW i5 xDrive40	81,2	463-538	15,09-17,54	17,2-20,0

¹ Batarya/Menzil değerlerinden elde edilmiştir. Menzil değeri, kritik değeri bulmak için en düşük değer alınmıştır.

Görüldüğü üzere, üreticiler tarafından sağlanan enerji tüketim değerleri, batarya ve menzile göre yapılan hesaplamalardan daha yüksek çıkmaktadır. Tüketim miktarının artması, emisyon değerlerinin yükselmesine yol açacağından, en yüksek potansiyel emisyon değerini belirlemek amacıyla, sonraki hesaplamalarda üretici kaynaklı enerji tüketim değerleri esas alınmıştır.

- **Türkiye'nin elektrik üretim kaynaklarının dağılımı**

TÜİK tarafından paylaşılan enerji üretimi (MWh) raporuna göre Türkiye'de 2013-2020 yılları arasında elektrik üretiminin kaynaklara göre yüzde dağılımı Tablo 3.11'de verilmiştir.

Tablo 3.11. Türkiye’de Elektrik Üretimine Yıllara Göre Değişimi (MWh ve %)

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
MWh								
Doğalgaz	105.116.347	120.576.031	99.218.701	89.227.062	110.489.981	92.482.817	57.288.201	70.931.333
%	44	48	38	33	37	30	19	23
Hidroelektrik								
Enerji	59.420.468	40.644.700	67.145.827	67.230.883	58.218.462	59.938.426	88.822.776	78.094.369
	25	16	26	25	20	20	29	25
Kömür ve								
Kömür	63.786.076	76.262.682	76.165.607	92.273.098	97.476.295	113.248.625	112.894.124	105.812.004
Türevleri	27	30	29	34	33	37	37	34
Sıvı Yakıtlar								
	1.738.826	2.145.289	2.223.940	1.926.327	1.199.878	329.116	336.003	322.660
	1	1	1	1	0	0	0	0
Yenilenebilir								
Enerji ve Atıklar	10.092.236	12.334.115	17.029.229	23.750.379	29.892.907	38.802.902	44.556.456	51.542.726
	4	5	7	9	10	13	15	17
Toplam	240.153.953	251.962.817	261.783.304	274.407.749	297.277.523	304.801.885	303.897.560	306.703.092

Tablo 3.11’de görüldüğü üzere 2013 yılından 2020 yılına kadar yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminde kayda değer bir artış olmuştur. Bununla birlikte ithalatı azaltmak için doğalgaz ve sıvı yakıtların kullanımı azalmış, buna paralel olarak yerli kaynaklardan kömür kullanımında da bir artış görülmüştür.

Türkiye Elektrik İletim A.Ş. tarafından paylaşılan 2022 verilerine göre Türkiye’de üretilen 328.380.000 MWh elektiriğin, %60,49’u termal ve %39,51’i yenilenebilir kaynaklardan üretilmektedir. Termal kaynakların dağılımı da %20,88 taşkömürü, ithal kömür ve asfaltit, %13,75 linyit, %22,86’sı doğalgaz olarak karşımıza çıkmaktadır.

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu tarafından hazırlanan “Elektrik Piyasası 2023 Yılı Piyasa Gelişim Raporu”nda yer alan 2023 yılı sonu itibariyle kaynak bazında kurulu güç ve üretim değerleri Tablo 3.12’de verilmiştir.

Tablo 3.12. EPDK - Türkiye’de 2023 Yılı Elektrik Üretiminin Dağılımı

Kaynak Türü	Toplam Kurulu Güç, MW	Oran, %	Toplam Üretim, MWh	Oran, %
Hidrolik	31.962,06	29,23	63.854.222,03	19,66
Rüzgâr	11.806,50	10,8	34.069.727,56	10,49
Güneş	13.998,25	12,8	18.606.600,61	5,73
Biyokütle	2.080,40	1,9	9.706.500,32	2,99
Jeotermal	1.691,34	1,55	10.997.593,06	3,39
Yenilenebilir	61.538,54	56,28	137.234.643,58	42,25
Doğal Gaz	25.728,79	23,53	68.562.811,54	21,11
İthal Kömür	10.373,80	9,49	72.123.040,56	22,21
Linyit	10.193,96	9,32	40.929.632,45	12,6
Taş Kömürü	840,77	0,77	3.650.625,09	1,12
Asfaltit	405,00	0,37	1.588.317,06	0,49
Fuel Oil	260,13	0,24	702.473,79	0,22
Nafta	4,74	0	0,00	0
Lng	1,95	0	0,00	0
Motorin	1,04	0	2.307,18	0
Termik	47.810,18	43,72	187.559.207,68	57,75
Toplam	109.348,72	100	324.793.851,25	100

2022 verileriyle karşılaştırıldığında doğalgaz ve linyit kullanımında azalma, kömür kullanımında artış olmuştur.

EPIAŞ tarafından sağlanan Şeffaflık Platformu Gerçek Zamanlı Üretim raporuna göre ise 2024’ün ilk yarıyılı için değerler Tablo 3.13’deki gibidir.

Tablo 3.13. Türkiye’de 2024 İlk Yarıyıl Elektrik Üretimini Dağılımı (EPİAŞ)

Yakıt	Üretilen Enerji, MWh	Oran, %
Barajlı	33.133.694,76	21,73
İthal Kömür	32.330.071,03	21,21
Doğal Gaz	21.898.545,51	14,36
Linyit	19.526.386,79	12,81
Rüzgâr	17.599.179,82	11,54
Akarsu	12.256.856,52	8,04
Jeotermal	5.133.872,50	3,37
Biyokütle	4.326.914,25	2,84
Güneş	2.440.441,15	1,60
Taş Kömür	2.211.848,07	1,45
Uluslararası	480.558,01	0,32
Asfaltit Kömür	399.963,28	0,26
Fuel Oil	362.550,51	0,24
Atık Isı	359.781,22	0,24
Toplam	152.460.663,42	100

2024 yarıyıl verilerine göre ilerlemek doğru bir sonuç vermeyecektir çünkü yılın belli bir dönemini ele almak bütünü yansıtmayacaktır. Örneğin ilk yarıyıl yaz dönemini içermediği için güneş enerjisiyle üretilen enerji miktarı 2023 yılına göre düşük, yağışların bol olduğu bir dönem olduğu için de baraj kaynaklı elektrik üretimi bu projeksiyona göre 2023 yılına göre yüksek çıkacaktır. Bu sebeple tam bir yıl döngüsü üzerinden ilerlenmesi daha sağlıklı olacaktır. Bu sebeple 2023 yılı verileri kullanılmıştır.

EPİAŞ'ın 2023 verileri ise Tablo 3.14.'te görülmektedir.

Tablo 3.14. EPİAŞ - Türkiye’de 2023 Yılı Elektrik Üretiminin Dağılımı

Yakıt	Üretilen Enerji, MWh	Oran, %
İthal Kömür	71.868.784,33	23,24
Doğal Gaz	66.376.911,67	21,46
Barajlı	44.170.473,76	14,28
Linyit	40.564.588,56	13,11
Rüzgâr	33.719.410,55	10,90
Akarsu	19.492.304,60	6,30
Jeotermal	10.113.742,43	3,27
Biyokütle	8.122.170,22	2,63
Taş Kömür	4.151.224,04	1,34
Uluslararası	3.919.851,74	1,27
Güneş	3.852.408,74	1,25
Asfaltit Kömür	1.588.317,06	0,51
Fuel Oil	700.941,98	0,23
Atık Isı	667.466,64	0,22
Toplam	309.308.596,32	

Türkiye’nin enerji üretim kaynaklarının dağılımlarıyla yoğunluk faktörlerini çarpmak suretiyle 1 kWh elektrik için ne kadar CO₂ emisyonu salındığını hesaplanır. Yakıt türlerine göre yoğunluk faktörleri Tablo 3.15’te verilmiştir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024).

Tablo 3.15. Yakıtların Emisyon Yoğunluk Faktörleri

Yakıt	Yoğunluk Faktörü, kg CO ₂ /MWh
Doğalgaz	374
Taş Kömürü	994
Linyit	1152
İthal Kömür	806
Asfaltit	953
Fuel Oil	785
Motorin	581

Enerji üretimi kaynaklı emisyon = Doğalgazdan üretilen enerji kaynaklı emisyon + Taş kömüründen üretilen enerji kaynaklı emisyon + Linyitten üretilen enerji kaynaklı emisyon +

İthal kömürden üretilen enerji kaynaklı emisyon + Asfaltitten üretilen enerji kaynaklı emisyon + Fuel oilden üretilen enerji kaynaklı emisyon + Motorinden üretilen enerji kaynaklı emisyon

1 kWh enerji üretimi kaynaklı emisyon = (Doğalgaz Oranı x Doğalgaz Yoğunluk Faktörü) + (Taş Kömürü Oranı x Taş Kömürü Yoğunluk Faktörü) + (Linyit Oranı x Linyit Yoğunluk Faktörü + (İthal Kömür Oranı x İthal Kömür Yoğunluk Faktörü) + (Asfaltit Oranı x Asfaltit Yoğunluk Faktörü) + (Fuel Oil oranı x Fuel Oil Yoğunluk Faktörü)

1 kWh enerji üretimi kaynaklı emisyon = (%21,46 x 0,374) + (%1,34 x 0,994) + (%13,11 x 1,152) + (%23,24 x 0,806) + (%0,51 x 0,953) + (%0,23 x 0,785)

1 kWh enerji için = **438,58 g CO₂/kWh**

Bu değerle seçtiğimiz tam elektrikli otomobillerin enerji tüketim değerlerini çarparak kilometrede ne kadar CO₂ emisyonu salındığı belirlenmiş, Tablo 3.16’da verilmiştir.

Tablo 3.16. BEVlerin Dolaylı Emisyon Değerleri

	Enerji Tüketimi kWh/100 km	CO ₂ emisyonu g/km
BYD Atto 3	15,6	68,42
Renault Megane E-Tech	16,1	70,61
Tesla Model Y	15,7	68,86
TOGG T10X V2	19,1	83,77
BMW i5 xDrive40	20,0- 17,2	75,44-87,72

3.3. Modelleme Senaryoları

Türkiye Ulusal Enerji Planı (TUEP) doğrultusunda 2053 net sıfır emisyon hedefine ulaşmak için 2035 yılı hedefleri, otomotiv sektöründeki tam elektrikli dönüşüm çerçevesinde değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, geçmiş yıllara ait elektrikli araç satış verileri kullanılarak 2035 yılı için tam elektrikli otomobil sayısının tahmini yapılmıştır. Zaman serisi analizi kapsamında ARIMA yöntemi uygulanarak 2024 yılı sonu ve 2035 yılına ilişkin öngörüler oluşturulmuştur.

Ayrıca, TUEP’in hedefleri doğrultusunda enerji sektöründe yenilenebilir kaynakların artırıldığı bir model önerilmiş ve bu model üzerinden iki farklı elektrikli dönüşüm senaryosu ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirilerek, yenilenebilir enerji oranındaki artışın CO₂ emisyonlarına etkisi açısından incelenmiştir.

3.4. Zaman Serisi Analizi ve ARIMA Yöntemi

2035 yılında otomotiv sektöründeki dönüşümü tespit etmek için geçmiş veriler kullanılarak zaman serisi analizi, Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (İng. Autoregressive Integrated Moving Average; ARIMA) yöntemi ile yapılmıştır. Zaman serisi analizi, belirli bir dönem boyunca ardışık olarak kaydedilen veri noktalarının analiz edilmesini ve bu sayede gelecekteki değerlerin tahmin edilmesini sağlayan ileri düzeyde bir istatistiksel yöntemdir. Ekonomi, finans ve mühendislik gibi alanlarda yaygın olarak kullanılan bu analiz, zaman içinde meydana gelen trendler, mevsimsel etkiler ve ardışık veriler arasındaki korelasyonları keşfetmek açısından önemli bir rol oynar (Hyndman ve Athanasopoulos, 2018).

Bu bağlamda, ARIMA modeli, zaman serisi verilerindeki yapısal bileşenleri dikkate alarak tahmin yapmayı mümkün kılan etkili bir tekniktir. ARIMA üç ana bileşenden oluşur: Otoregresif (AR), Farklılaştırma (I) ve Hareketli Ortalama (MA). Otoregresif (AR) bileşeni, zaman serisinin önceki değerlerinin, güncel değerler üzerinde nasıl bir etkisi olduğunu belirler ve ardışık veri noktaları arasındaki bağımlılığı ifade eder. Farklılaştırma (I) bileşeni, serinin durağan hâle getirilmesini sağlamak amacıyla trend veya mevsimsellik gibi etkileri ortadan kaldırmak için seriyi bir veya daha fazla kez farklılaştırır. Hareketli Ortalama (MA) bileşeni ise önceki hatalardan yola çıkarak güncel değerlerin nasıl tahmin edilebileceğini açıklar. Genel olarak ARIMA modeli, özellikle trend ve mevsimsel dalgalanmalar içermeyen durağan zaman serilerinde oldukça etkili tahmin sonuçları sunar. Ancak durağan olmayan verilerde de fark alma işlemi sayesinde başarılı bir şekilde uygulanabilir, bu da ARIMA'yı geniş bir veri seti yelpazesinde öngörü yapmak için uygun hale getirir (Makridakis ve ark., 1998).

Bu hesaplamaları yapmak için Minitab Statistical Software 22 uygulaması kullanılmıştır. Minitab, istatistiksel analiz ve veri görselleştirmesi için yaygın olarak kullanılan bir yazılımdır. Zaman serisi analizi ve ARIMA modeli gibi karmaşık istatistiksel yöntemleri uygulamak için oldukça güçlü araçlar sunar. Kullanım kolaylığı, sonuçları görselleştirmesi ve zaman serisi analizleri için çeşitli fonksiyonel özellikler sunarak hızlı analiz imkânı sağlaması sebebiyle bu uygulama tercih edilmiştir.

Uygulama düşük, normal ve yüksek olmak üzere üç farklı senaryo sunmaktadır. Dünya çapında emisyon değerlerini düşürmek için BEV'lere hükümetler tarafından yüksek teşvikler sağlandığından düşük senaryo çok olası görülmemiş ve bu çalışmada normal ve yüksek senaryoya odaklanılmıştır. Öncelikle iki senaryoya göre BEV sayıları tahminlenmiştir. Daha sonra BEV'lerin otomotiv sektöründeki hacmini tespit etmek için toplam otomobil sayıları aynı

yöntem kullanılarak belirlenmiştir. TUEP doğrultusunda 2053 net sıfır emisyon hedeflerine giden yolda 2035 yılı hedeflerine ulaşıldığı durumda her iki senaryo için de BEV’ler kaynaklı CO₂ emisyon azaltımları hesaplanmıştır. 2035 hedefleri için enerji planına alternatif bir enerji modeli önerilmiş, bu modele göre CO₂ emisyonu azaltımındaki değişim belirlenmiştir.

3.4.1. ARIMA yönteminde “d” fark alma derecesi

ARIMA modelindeki d, fark alma derecesi (differencing order), zaman serisinin durağanlık durumuna bağlı olarak belirlenir. Zaman serisi durağan değilse, yani veri setinde bir trend varsa, d değeri seriyi durağan hale getirecek kadar fark alma işlemi (differencing) yapacak şekilde seçilir. d, bu fark alma işlemlerinin sayısını belirtir (Hyndman ve Athanasopoulos, 2018).

d = 0: Veri zaten durağandır, yani trend göstermemektedir.

d = 1: Veride doğrusal bir trend varsa, bir kez fark alınarak durağan hale getirilebilir.

d = 2: Veride karmaşık bir trend varsa, iki kez fark alındığında durağan hale gelebilir.

3.5. Çalışmada Yapılan Tüm Kabuller

Bu çalışmada yapılan kabuller kısaca aşağıdaki gibidir:

- ICEV’li araçlar, TUİK, ODMD ve sektörel danışmanlık şirketleri verilerine göre Türkiye otomotiv sektörünü örnekleyebilmesi için en çok bulunan ve tercih edilen marka ve modeller dikkate alınarak seçilmiştir. Bu analize göre, Fiat Egea sedan, Renault Clio hatchback, Toyota Corolla, Volkswagen Tiguan ve BMW 5 serisi olmak üzere beş araç seçilmiştir.
- Çevresel etkileri sebebiyle otomotiv sektöründe dizel üretimini sınırlandırılması sebebiyle benzinli araçlar tercih edilmiştir.
- Üretici tarafından paylaşılan WLTP CO₂ emisyon değerleri elde edilmiş, Tier 1 yöntemiyle yakıt tüketimine göre emisyon değeri hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. WLTP CO₂ emisyon değerleri doğru kabul edilmiş ve hesaplamalar buna göre yapılmıştır.
- Tier 1 için emisyon faktörü 69.300 kg/TJ alınmıştır.
- Benzinin ortalama enerji yoğunluğu 33 MJ/l alınmıştır.
- Türkiye özelinde Tier 2 ve Tier 3 için emisyon faktörleri bilinmediği için ve bu çalışmada sadece Tier 1’e göre hesaplama yapılmıştır.
- BEV araçlar, fiyat, performans ve tasarım gibi kriterleriyle seçilen ICEV’lerle benzerlik taşıması hedeflenmiştir. TUİK, ODMD ve sektörel danışmanlık şirketlerinden elde edilen

verilere dayanarak, Türkiye’de en yaygın bulunan ve son yıllarda en çok tercih edilen marka ve modeller dikkate alınmıştır. Yapılan analiz sonucunda, BYD Atto 3, Renault Megane E-Tech, Tesla Model Y, TOGG T10X ve BMW i5 xDrive40 olmak üzere beş araç seçilmiştir.

- Seçilen BEV’lerin enerji tüketim değerleri, üretici firmalar tarafından doğrudan paylaşılan enerji tüketimi ve batarya-menzil değerleriyle hesaplanarak karşılaştırılmıştır.
- Türkiye’nin elektrik üretim kaynaklarına ilişkin veriler, TÜİK, TEİAŞ, EPDK, EPIAŞ ve ETKB tarafından paylaşılan bilgiler doğrultusunda incelenmiştir. Enerji kaynaklarının dağılımını doğru bir şekilde analiz edebilmek amacıyla, tam bir yılın verilerini içermesi için 2023 yılı seçilmiştir.
- 1 kWh başına salınan CO₂ emisyon miktarını belirlemek için enerji kaynaklarının karbon emisyon yoğunluk faktörleri; doğalgaz için 374 kg CO₂/MWh, taş kömürü için 994 kg CO₂/MWh, linyit için 1152 kg CO₂/MWh, ithal kömür için 806 kg CO₂/MWh, asfaltit için 953 kg CO₂/MWh, fuel oil için 785 kg CO₂/MWh, motorin için 581 kg CO₂/MWh alınmıştır (ETKB, 2024).
- 2035 yılına dair hesaplamalar yapılırken de enerji üretim süreçlerindeki emisyon yoğunluk faktörlerinin değişmediği varsayılmıştır.
- Elektrik hatlarında oluşacak anlık talep yoğunlukları dahil edilmemiştir.
- Araçların yaşam döngüleri boyunca oluşturdukları –hammadde üretimi sırasında, araç üretim ve montaj, fabrikadan kullanıcıya transferi ve hurda aşamasında– emisyonlar incelenmemiştir.
- Elektrik üretimi aşamasında oluşan %2 oranındaki ve %11’lik bölgesel olarak değişiklik gösterebilen elektrik iletim ve dağıtım kayıpları hesaplamalara dahil edilmemiştir (TEDAŞ, 2023).
- Araçların kullanım aşamasındaki emisyon değerleri incelendiği için, gelecek tahmini yapılırken araç satış dönemleri yerine trafik tescil dönemleri dikkate alınmıştır.
- Modellemede veri seti için doğrusal bir trend kabulü yapılmıştır (d=1).
- 2020 ve 2023 yıllarında BEV sayılarında çok ciddi artışlar olmuştur. Giderek hızlanan bir trend olduğu için d değeri bu seri için 2 olarak seçilmiştir.
- ARIMA yönteminde, varsayılan güven aralığı olan %95 güven aralığı seçilmiştir.

4. BULGULAR

4.1. CO₂ Emisyonlarının Karşılaştırılması

Seçilen geleneksel araçlar ile BEV'ler için hesaplanan CO₂ emisyonları ve azaltım oranları Tablo 4.1.'de verilmiştir.

Tablo 4.1. ICEV ve BEV Emisyon Değerlerinin Karşılaştırılması

	CO ₂ emisyonu, g/km	BEV'lerin CO ₂ emisyonu, g/km	Azaltım oranı, %	
Fiat Egea Sedan	145	68,42	52,81	BYD Atto 3
Renault Clio	135	70,61	47,70	Renault Megane E-Tech
Toyota Corolla	138	68,86	50,10	Tesla Model Y
Volkswagen Tiguan	153	83,77	45,25	TOGG T10X V2
BMW 520i Sedan	160	87,72	45,18	BMW i5 xDrive40
Ortalama	146,2	75,88	48,10	Ortalama

Burada Fiat Egea ile BYD Atto 3, Renault Clio ile Renault Megane E-Tech, Toyota Corolla ile Tesla Model Y arkadan çekişli, Volkswagen Tiguan ile TOGG T10X V2 ve BMW 520i sedan ile BMW i5 xDrive40 karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlara göre seçilen BEV'ler, Türkiye'nin 2023 yılı elektrik üretim kaynaklarına göre %45-50 arasında ve örneklem ortalaması da %48,1 oranında CO₂ emisyonu azaltımı sağlamaktadır.

Elektrikli araçların enerji tüketimini etkileyen başlıca faktörler; araç kütlesi, aerodinamik direnç, batarya teknolojisi ve sürüş koşullarıdır. Aracın kütlesinin artışı enerji tüketimini yükseltirken, aerodinamik yapı yüksek hızlarda enerji verimliliğini artırmaktadır. Batarya teknolojisi ise enerji yoğunluğunu iyileştirerek menzili uzatmaktadır. Ayrıca, hızlı ivmelenme gibi sürüş davranışları da tüketimi ciddi ölçüde artırabilmektedir (Sweeting ve ark., 2011). TOGG T10X'teki tüketim değerinin bu kadar yüksek olmasının en büyük sebebi aracın kütlesidir. Tablo 4.3'te seçilen araçlar için aracın kütlesi ve hava sürtünme katsayıları verilmiştir.

Tablo 4.2. Araç Ağırlıkları ve Sürtünme Katsayıları

	Aracın Kütlesi, kg	Rüzgâr Katsayısı, Cd	Direnç
BYD Atto 3	1750	0,29	
Renault Megane E-Tech	1633	0,29	
Tesla Model Y	1909	0,23	
TOGG T10X V2	2126	0,29	
BMW i5 xDrive40	2355	0,23	

TOGG T10X, özellikle batarya kapasitesinin etkisiyle diğer araçlara kıyasla daha yüksek bir kütleye sahiptir. Ayrıca, geleneksel bir araç tasarımına sahip olması, direnç katsayısını artırmaktadır. Bununla birlikte, TOGG, ilk aracını üreten yeni bir marka olarak, batarya teknolojisinde gerçekleştireceği yenilikler ve enerji verimini artırmaya yönelik yazılımsal ve donanımsal geliştirmelerle, mevcut enerji tüketim verimliliğini zamanla iyileştirmeyi hedeflemektedir.

Zaman içerisinde batarya teknolojisindeki gelişimler tüm elektrikli araçlar için tüketim değerlerini düşürecek böylece dolaylı emisyon değerleri azalmaya devam edecektir. Fakat sorunun temeli dolaylı emisyonların sebebi olan elektrik üretiminin yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmesi konusudur. Bu konuda yapılacak çalışmalar sıfır emisyon hedeflerine ulaşmayı kolaylaştırabilir.

4.2. Elektrik Kaynaklarına Göre BEV’lerin CO₂ Emisyonları

Elektrikli araçların emisyon değerleri, kullanılan elektrik kaynağına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Doğalgaz, yüksek enerji verimliliği ve kimyasal yapısı nedeniyle yanma sırasında daha düşük CO₂ emisyonu üretirken; kömür, linyit ve asfaltit gibi fosil yakıtlar ise içerdikleri yüksek karbon oranı sebebiyle daha fazla CO₂ emisyonuna yol açmaktadır. Bu nedenle, karbon yoğunluğu yüksek fosil yakıtlarla üretilen elektrikle çalışan elektrikli araçlar, CO₂ emisyonu açısından ICEV’lere kıyasla beklenenin aksine emisyon azaltımı yerine artışa neden olabilir.

Elektriğin üretildiği kaynağa göre oluşan emisyon değerleri Tablo 4.3’de görülmektedir.

Tablo 4.3. Farklı Senaryolarda BEV’lerin Dolaylı Emisyon Değerleri

	CO ₂ Emisyonları (g/km)						
	Türkiye Ortalaması	%100 Doğalgaz	%100 Taş Kömürü	%100 Linyit	%100 İthal Kömür	%100 Asfaltit	%100 Fuel Oil
BYD Atto 3	68,42	58,34	155,91	179,71	125,74	148,67	122,46
Renault Megane E-Tech	70,61	60,21	160,90	185,47	129,77	153,43	126,39
Tesla Model Y	68,86	58,72	156,91	180,86	126,54	149,62	123,25
TOGG T10X V2	83,77	71,43	190,89	220,03	153,95	182,02	149,94
BMW i5 xDrive40	87,72	74,80	199,88	230,40	161,20	190,60	157,00
Ortalama Değişim, %	-48,10	-55,75	+18,26	+36,32	-4,62	+12,77	-7,11

Görüldüğü üzere taş kömürü, linyit ve asfaltit kaynaklı elektrik üretimi, emisyon artışına sebep olmaktadır. Bu tablo göstermiştir ki BEV’ler her durum ve koşulda emisyon azaltımı sağlamamaktadır.

4.3. Modelleme Senaryolarının Değerlendirilmesi

Bu kısımda, TUEP doğrultusunda 2053 net sıfır emisyon hedefine yönelik olarak 2035 yılı hedefleri, otomotiv sektöründeki tam elektrikli dönüşüm çerçevesinde ele alınmıştır. Sektörde normal ve yüksek elektrikli dönüşüm senaryolarında ortaya çıkacak tablo analiz edilmiştir. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarının payının artırıldığı geliştirilmiş bir enerji modeli önerilerek, bu modele göre iki senaryo uygulanmış, elde edilen sonuçlar değerlendirilerek karşılaştırılmıştır. Son olarak, bu hedefe ulaşmak için atılabilecek adımlara ilişkin öneriler sunulmuştur.

4.3.1. 2035 Tam elektrikli otomobil sayısı tahmini

2035 yılında tam elektrikli otomobillerin sayısını tahminlemek için geçmiş veriler kullanılarak zaman serisi analizi, ARIMA yöntemi uygulanmıştır. 2011- 2024 Haziran ayı arasında satılan elektrikli araç sayıları Şekil 3.2’de verilmişti. 2024 yılı bütün bir yıl verisini barındırmadığı için öncelikle 2024 yılı sonu itibariyle elektrikli otomobil sayısı tahmini yapılmış ve 2024 yılı aylara göre elektrikli araç sayıları kullanılarak ARIMA yöntemi uygulanmıştır. Tablo 4.5’te TÜİK ve ODMD tarafından sağlanan 2024 yılı ilk altı aya ait BEV sayıları verilmiştir (ODMD, 2024a, 2024b, 2024c, 2024d, 2024e, 2024f; TÜİK, 2024a, 2024b, 2024c, 2024d, 2024e, 2024f).

Tablo 4.4. 2024 Yılı Elektrikli Araç Sayıları Aylık Dağılım

	TÜİK	ODMD
Ocak	7.904	3.973
Şubat	5.054	5.799
Mart	6.777	6.784
Nisan	5.846	6.546
Mayıs	8.558	7.968
Haziran	8.523	8.335
Toplam	42.662	39.405

Buradaki farklılıkların sebebi TÜİK trafik tescil dönemine göre, ODMD ise araç satış dönemine göre raporlamaktadır. 2023 Aralık ayında satışı yapılan fakat trafik tescil işlemleri 2024 Ocak ayında yapılan araçlar sebebiyle ocak ayında böyle bir fark oluşmaktadır. Bu çalışma kapsamında araçların kullanımıyla oluşan emisyon değerleri hesaplandığından, satıldığı değil kullanıma başlandığı, trafik kaydı yapılan araç sayılarını kullanmak daha doğru olacaktır. Bu sebeple çalışmada TÜİK tarafından paylaşılan verilerden hareket edilmiştir.

Zaman serisi analizi ARIMA yöntemini uygulamak için Minitab uygulaması kullanılmış ve uygulamada yer alan en iyi ARIMA modeliyle tahminleme (Forecast with Best ARIMA Model) özelliğiyle ilgili hesaplar yapılmıştır.

Çalışmanın veri seti için doğrusal bir trend olduğu için d fonksiyonu 1, otoregresif modelin derecesi (autoregressive order) p ve hareketli ortalama modelinin derecesi (moving average order) q için 0-5 aralığı olacak şekilde seçimler yapıldı. Uygulama bu aralıktaki tüm p ve q değerleri için modeli deneyeceği ve en uygun modeli seçeceği için böyle belirlenmiştir. Tahmin sayısı (number of forecasts) bölümüne de yılın diğer 6 ayı tahminlemek istendiği için 6 olarak giriş yapıldı. Bu veriler ışığında uygulama, en uygun modeli d=1, p=0, q=3 olduğunda bulmuştur.

Model Seçimi (Model Selection)

Model (d = 1)	LogLikelihood	AICc	AIC	BIC
p = 0; q = 3*	-44,2423	38,485	98,485	96,5319
p = 1; q = 2	-44,7398	39,480	99,480	97,5267
p = 1; q = 3	-44,8656	39,731	99,731	97,7785
p = 0; q = 4	-44,9583	39,917	99,917	97,9638
p = 3; q = 1	-45,3108	40,622	100,622	98,6688
p = 2; q = 2	-45,7669	41,534	101,534	99,5809
p = 0; q = 0	-45,0599	100,120	94,120	93,3387

p = 0; q = 1	-44,1788	118,358	94,358	93,1860
p = 1; q = 0	-46,0490	122,098	98,098	96,9263

*En düşük AICc'a sahip en iyi model. En iyi modeli için çıktılar aşağıdadır.

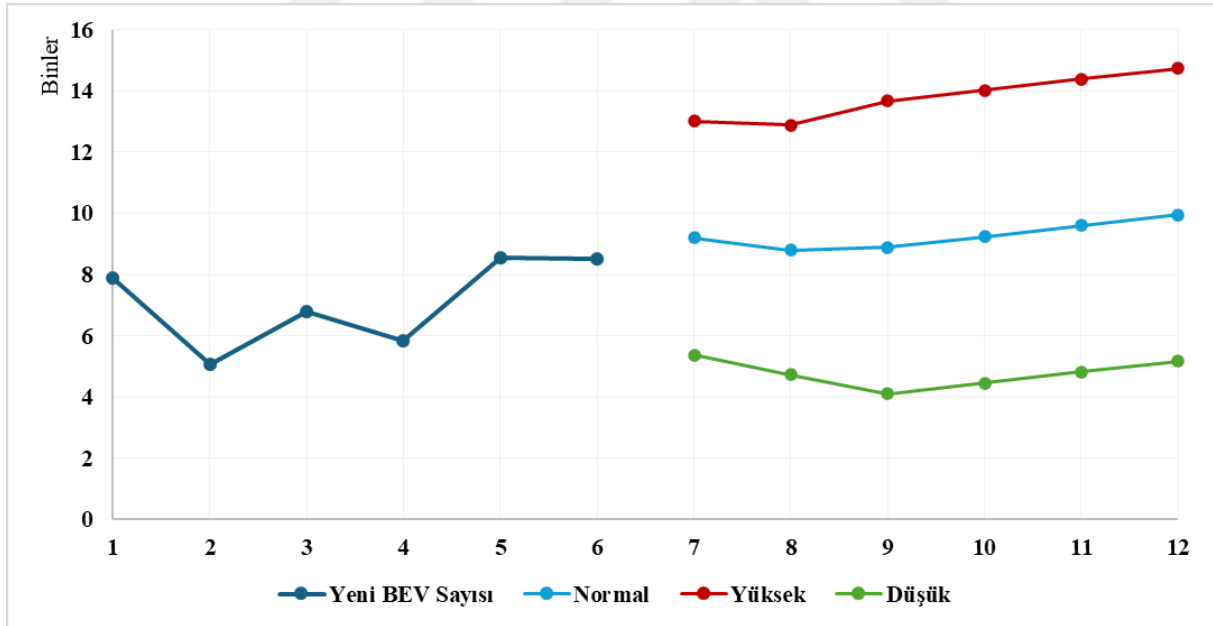
Model Özeti (Model Summary)

DF	SS	MS	MSD	AICc	AIC	BIC
1	3799252	3799252	759850	38,4847	98,4847	96,5319

Buna göre yılın diğer ayları için yapılan tahmin değerleri, Tablo 4.6'da yer almaktadır.

Tablo 4.5. 2024 Temmuz-Aralık Trafik Tescili Yapılacak BEV Sayısı Tahminleri

Dönem	Normal	SE Tahmini	95% Güven Aralığı	
			Düşük	Yüksek
Temmuz	9.201,24	1.949,17	5.380,10	13.022,40
Ağustos	8.800,14	2.079,65	4.723,21	12.877,10
Eylül	8.883,95	2.438,75	4.103,04	13.664,90
Ekim	9.241,74	2.438,89	4.460,55	14.022,90
Kasım	9.599,53	2.439,03	4.818,06	14.381,00
Aralık	9.957,31	2.439,18	5.175,56	14.739,10



*Y eksenini ayları ifade etmektedir.

Şekil 4.1. 2024 Yılı Trafik Tescile Göre BEV Sayısı Aylara Göre Dağılım Grafiği

Bu sonuçlara göre normal senaryoda 2024 yılı sonunda 98.343 elektrikli araç olurken, yüksek senaryoda 125.367 elektrikli araç olması öngörülmektedir. 2024 yılı elektrikli araç sayısı için normal senaryo sonucu dikkate alınmıştır.

2035 yılı elektrikli araç sayısı tahminlenirken, yine benzer bir süreç işletilmiştir. 2011 yılından

2024 yılı tahminiyle birlikte yıl sonu dikkate alınmıştır. 2024 yılı sonuna kadar toplam 187.531 elektrikli araç trafiğe katılacağı öngörülmüştür. Yıllara göre dağılımı Tablo 4.7’de verilmiştir (TÜİK, 2024).

Tablo 4.6. Trafik Tescile Göre BEV Sayısındaki Yıllık ve Kümülatif Değişimler

	Kümülatif Toplam BEV Sayısı, Adet	Yıllık BEV Sayısı, Adet
2011	24	24
2012	175	151
2013	353	178
2014	412	59
2015	565	153
2016	643	78
2017	760	117
2018	952	192
2019	1.176	224
2020	2.797	1.621
2021	6.267	3.470
2022	14.552	8.285
2023	80.043	65.491
2024	178.386	98.343

Tablo 4.7 incelendiğinde özellikle 2020 ve 2023 yıllarında çok ciddi artışlar gözlenmiştir. Giderek hızlanan bir trend olduğu için d değeri bu seri için 2 olarak seçilmiştir. Burada da p ve q için 0-5 aralığı olacak şekilde seçim yapılmıştır. Tahmin sayısı bölümüne de 2035 yılına kadar olan 11 yıl tahminlemek istendiği için 11 olarak giriş yapılmıştır. Bu veriler ışığında uygulama, en uygun modeli $d=2$, $p=1$, $q=0$ olduğunda bulmuştur.

Model Seçimi

Model (d = 2)	LogLikelihood	AICc	AIC	BIC
$p = 1; q = 0^*$	-132,947	271,227	269,894	270,864
$p = 0; q = 1$	-132,964	271,262	269,929	270,899
$p = 1; q = 1$	-133,021	275,043	272,043	273,498
$p = 0; q = 2$	-133,852	276,704	273,704	275,159
$p = 1; q = 2$	-133,370	280,454	274,740	276,680
$p = 0; q = 3$	-133,625	280,964	275,249	277,189
$p = 2; q = 1$	-134,163	282,041	276,327	278,266
$p = 3; q = 0$	-136,147	286,009	280,295	282,235
$p = 2; q = 2$	-134,142	288,285	278,285	280,709

p = 1; q = 3	-134,365	288,730	278,730	281,155
p = 0; q = 4	-135,084	290,168	280,168	282,592
p = 2; q = 3	-134,334	297,468	280,668	283,578
p = 0; q = 5	-135,008	298,815	282,015	284,925
p = 4; q = 1	-137,126	303,053	286,253	289,162
p = 5; q = 0	-137,608	304,016	287,216	290,126
p = 3; q = 3	-134,124	310,248	282,248	285,642
p = 1; q = 5	-138,837	319,673	291,673	295,067
p = 5; q = 1	-140,043	322,085	294,085	297,480
p = 4; q = 2	-141,604	325,208	297,208	300,603
p = 4; q = 3	-136,247	336,494	288,494	292,374
p = 3; q = 4	-142,036	348,073	300,073	303,952
p = 5; q = 2	-142,617	349,235	301,235	305,114
p = 4; q = 5	-138,875	517,750	297,750	302,599

**En düşük AICc'a sahip en iyi model. En iyi modeli için çıktılar aşağıdadır.*

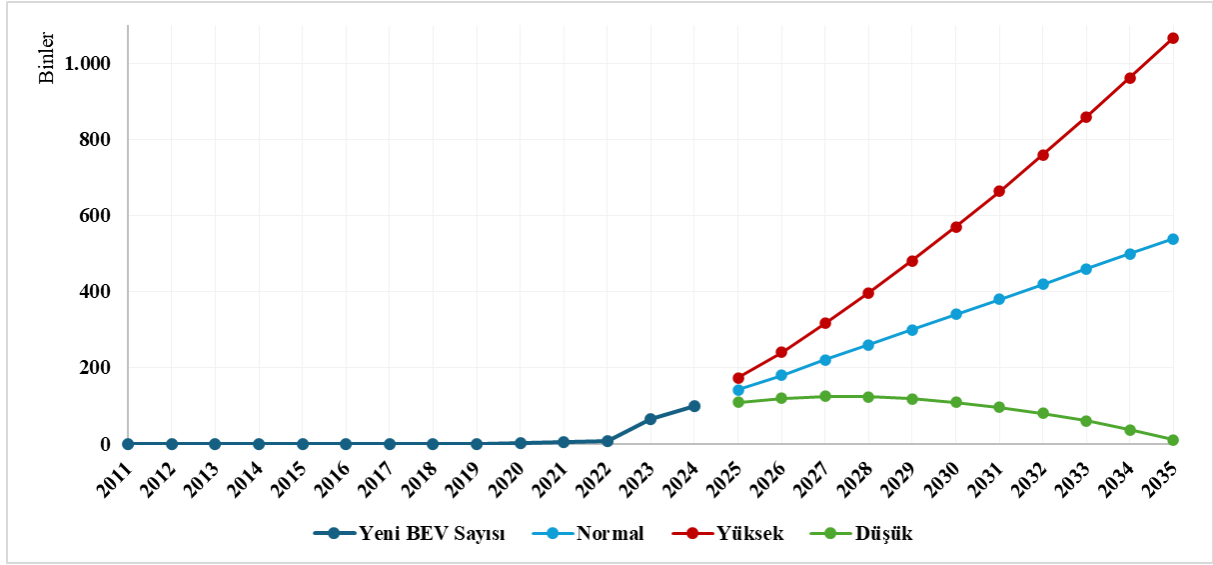
Model Özeti

DF	SS	MS	MSD	AICc	AIC	BIC
11	2894781068	263161915	241231756	271,227	269,894	270,864

Bu modele göre 2025 yılından 2035 yılı sonuna kadar BEV sayıları için tahminleme değerleri Tablo 4.8'de verilmiştir.

Tablo 4.7. 2025-2035 Yılları Arası Trafik Tescili Yapılacak BEV Sayıları Tahminleri

			95% Güven Aralığı	
Dönem	Normal	SE Tahmin	Düşük	Yüksek
2025	141.081	16.222	109.279	172.883
2026	179.806	30.526	119.962	239.650
2027	220.161	48.875	124.346	315.975
2028	259.853	69.488	123.629	396.077
2029	299.815	92.504	118.471	481.158
2030	339.667	117.558	109.206	570.128
2031	379.564	144.547	96.195	662.933
2032	419.442	173.321	79.665	759.219
2033	459.328	203.782	59.835	858.821
2034	499.211	235.840	36.872	961.550
2035	539.095	269.419	10.928	1.067.262



Şekil 4.2. Trafik Tescile Göre BEV Sayısı Yıllara Göre Dağılım Grafiği

Bu sonuçlara göre normal senaryoda 2035 yılında 539.095 elektrikli otomobil trafiğe katılacağı tespit edilmiştir. Ayrıca aynı zamanda toplam tam elektrikli otomobil sayısının ise 3.915.409 olacağı hesaplanmıştır. Yüksek senaryoda ise 1.067.262 tam elektrikli otomobil trafiğe katılırken, toplam elektrikli otomobil sayısının 6.664.042 olacağı tahmin edilmiştir. Bu sonuçlara göre 2024 Haziran sonu itibariyle bulunan 122.670 elektrikli otomobilin; normal senaryoya göre 8,7 katına, yüksek senaryoya göre 54,33 katına çıkacağı hesaplanmıştır.

Bulunan sonuçları karşılaştırmak gerekirse Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından Nisan 2024'te yayınlanan Elektrikli Araç ve Şarj Altyapısı Projeksiyonu raporuna göre 2035 yılında düşük senaryoda 1.779.488, orta senaryoda 3.307.577 ve yüksek senaryoda 4.214.273 elektrikli araç olması öngörülmüştür. Buradaki sonuçlarla karşılaştırıldığında, özellikle normal senaryo sonuçlarının oldukça yakınlık gösterdiği tespit edilmiştir.

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından yayınlanan Türkiye için Elektrikli Araç Şarj Altyapısı raporunda ise 2030 yılı tahmini ortaya konmuştur. Buna göre düşük senaryoda 880 bin, orta senaryoda 1,6 milyon ve yüksek senaryoda ise 2,5 milyon elektrikli araç stoğu olacağı öngörülmüştür. Bu çalışmanın modelindeki 2030 tahminleri de normal senaryoda 1.618.769 ve yüksek senaryoda 2.354.257 olmaktadır. Her iki çalışmanın tahminleri de birbirine yakın değerlerde gerçekleşmiştir.

Elektrikli araçların, otomotiv sektöründe sağladığı CO₂ emisyon azaltımını belirlemek için 2035 yılındaki toplam otomobil sayısının tahmin edilmesi gerekmektedir. Bunun için TÜİK tarafından 2004-2023 yılları arası trafiğe kayıtlı toplam otomobil sayıları kullanılmıştır.

Tablo 4.8. Türkiye’de Trafiğe Kayıtlı Otomobillerin Yıllara Göre Sayısı

Yıl	Kümülatif Otomobil Toplamı	Yıl	Kümülatif Otomobil Toplamı
2004	5.400.440	2014	9.857.915
2005	5.772.745	2015	10.589.337
2006	6.140.992	2016	11.317.998
2007	6.472.156	2017	12.035.978
2008	6.796.624	2018	12.398.190
2009	7.093.964	2019	12.503.049
2010	7.544.862	2020	13.099.041
2011	8.113.111	2021	13.706.065
2012	8.648.875	2022	14.269.352
2013	9.283.923	2023	15.221.134

2019 yılındaki durağanlık dışında lineer bir artıştan söz etmek mümkündür. 19 yıl boyunca %3-7 arası bir artış gözlenmiştir. Lineer bir trend gözlemlendiği için d değeri 1 alınmıştır. Burada da p ve q için 0-5 aralığı olacak şekilde seçim yapılmıştır. Tahmin sayısı bölümüne de 2035 yılına kadar olan 11 yıl tahminlemek istendiği için 11 olarak giriş yapılmıştır. Bu veriler ışığında uygulama en uygun modeli $d=1$, $p=0$, $q=0$ olduğunda bulmuştur.

Model Seçimi

Model (d = 1)	LogLikelihood	AICc	AIC	BIC
$p = 0; q = 0^*$	-258,348	521,447	520,697	522,585
$p = 1; q = 0$	-261,590	527,929	527,179	529,068
$p = 3; q = 1$	-255,664	530,327	523,327	528,994
$p = 4; q = 1$	-255,928	536,037	525,856	532,467
$p = 0; q = 4$	-261,397	537,410	532,794	537,516
$p = 0; q = 3$	-263,583	538,024	535,167	538,945
$p = 3; q = 2$	-259,954	538,907	531,907	537,574
$p = 0; q = 2$	-265,824	539,248	537,648	540,481
$p = 1; q = 4$	-260,174	539,347	532,347	538,014
$p = 3; q = 3$	-257,934	540,049	529,867	536,479
$p = 4; q = 2$	-254,976	540,352	525,952	533,508
$p = 2; q = 4$	-258,908	541,998	531,816	538,427
$p = 0; q = 5$	-261,580	542,161	535,161	540,828
$p = 0; q = 1$	-268,930	542,611	541,861	543,750

p = 3; q = 5	-254,754	557,008	529,508	538,953
p = 4; q = 4	-255,282	558,064	530,564	540,008
p = 5; q = 3	-265,235	568,470	548,470	556,970
p = 4; q = 5	-255,216	570,147	532,433	542,821
p = 5; q = 4	-267,124	581,748	554,248	563,693

**En düşük AICc'a sahip en iyi model. En iyi modeli için çıktılar aşağıdadır.*

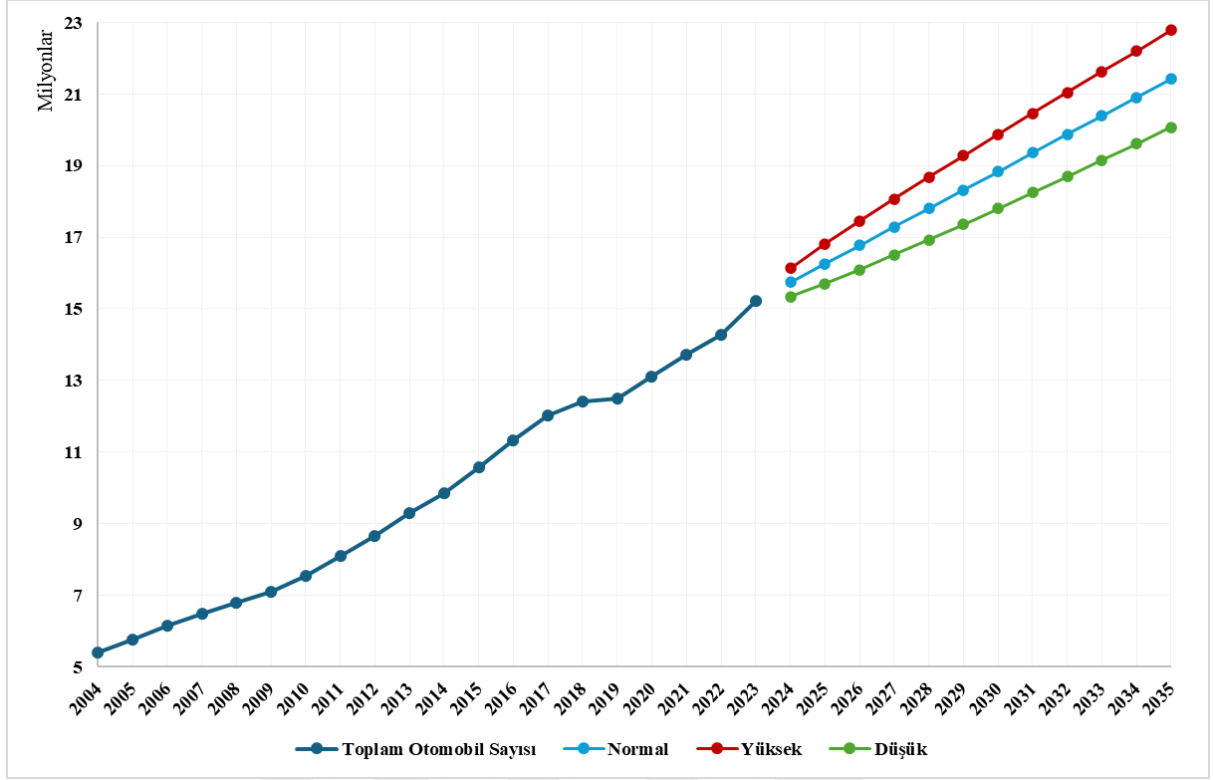
Model Özeti

DF	SS	MS	MSD	AICc	AIC	BIC
17	6,78074E+11	3,98867E+10	3,56881E+10	521,447	520,697	522,585

Buna göre yapılan tahminler tablo 4.10'daki gibi gerçekleşmiştir.

Tablo 4.9. 2025-2035 Yılları Arasında Trafik Tescili Yapılacak Otomobil Sayıları Tahminleri

			95% Güven Aralığı	
Dönem	Normal	SE Tahmin	Düşük	Yüksek
2024	15.738.013	199.717	15.346.489	16.129.536
2025	16.254.891	282.442	15.701.194	16.808.589
2026	16.771.770	345.919	16.093.631	17.449.908
2027	17.288.649	399.433	16.505.602	18.071.695
2028	17.805.527	446.580	16.930.054	18.681.000
2029	18.322.406	489.204	17.363.373	19.281.438
2030	18.839.284	528.400	17.803.411	19.875.158
2031	19.356.163	564.884	18.248.768	20.463.558
2032	19.873.042	599.150	18.698.471	21.047.612
2033	20.389.920	631.559	19.151.815	21.628.026
2034	20.906.799	662.385	19.608.263	22.205.335
2035	21.423.678	691.839	20.067.401	22.779.954



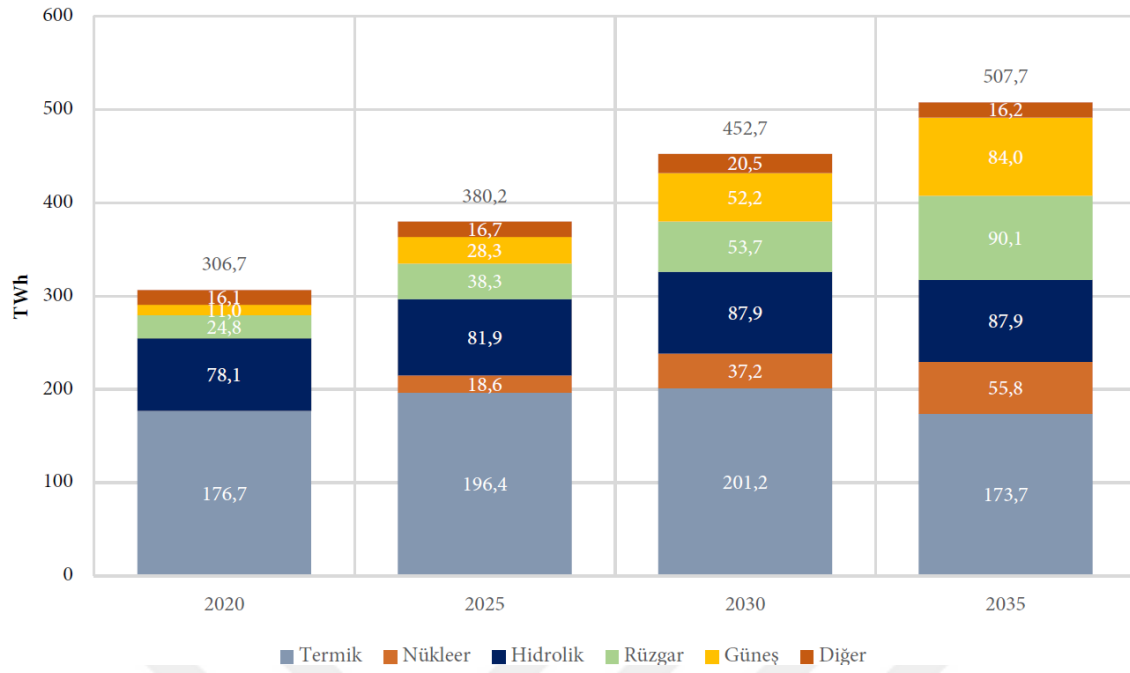
Şekil 4.3 Trafik Tescile Göre Otomobil Sayısı Yıllara Göre Dağılım Grafiği

Bu sonuçlara göre normal senaryoda 2035 yılında trafiğe kayıtlı toplam otomobil sayısı 21.423.678 olmaktadır. Buna göre BEV sayısında normal artış öngörüsüne dayalı senaryoya göre toplam otomobillerin %18,28'i, yüksek artış senaryosuna göre %31,11'i tam elektrikli olacaktır. Haziran 2024 itibariyle bu oran %0,78 seviyesinde olan (TÜİK, 2024) BEV'ler, 2035 yılında sırasıyla 23,43 ve 39,88 katına çıkacağı tespit edilmiştir.

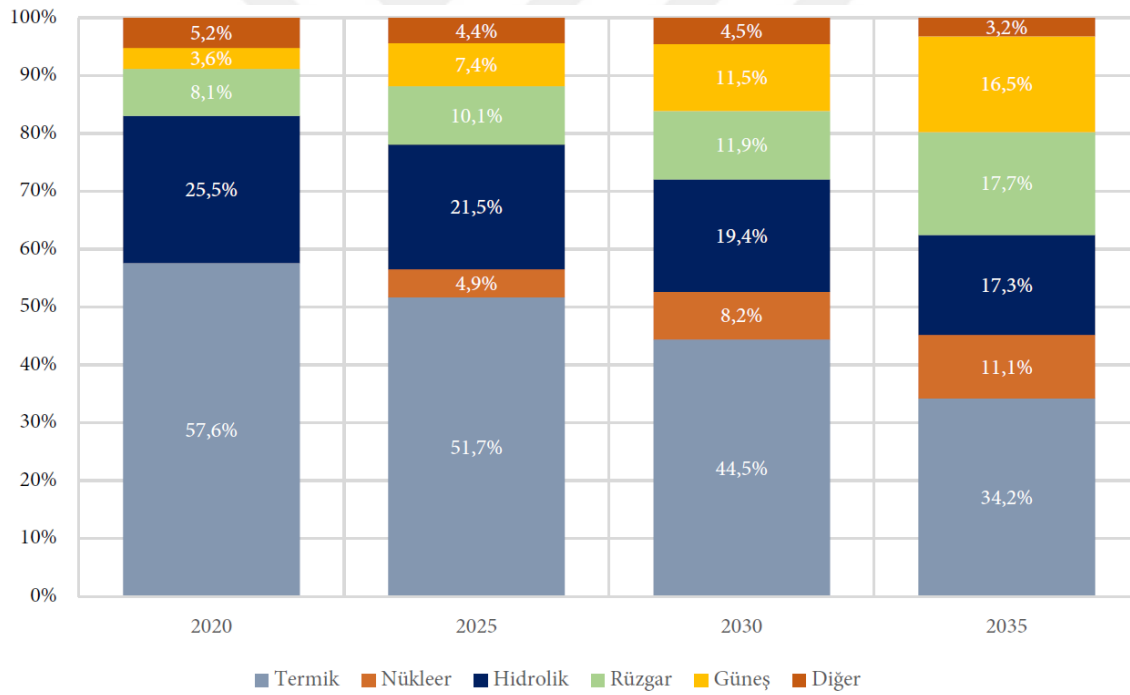
4.3.2. 2035 Türkiye Ulusal Enerji Planı

TUEP, 2035'e kadar enerji sektöründe arz güvenliğini sağlarken 2053 Net Sıfır Emisyon Hedefi doğrultusunda dönüşüm için yol haritası sunmaktadır. Raporda, nüfus, ekonomik büyüme ve yakıt fiyatları gibi göstergeler temel alınarak sektörel enerji talep tahminleri yapılmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payının %54,8'e çıkması ve elektrik kurulu gücünün 189,7 GW'a ulaşması hedeflenmektedir. Yenilenebilir kaynakların artan rolü doğrultusunda batarya depolama, elektrolizör ve talep yönetimi gibi esneklik sağlayıcı teknolojilere yatırım planlanmaktadır. Fosil yakıtların payı azalırken, yenilenebilir ve nükleer enerjinin önemi vurgulanmakta, verimlilik artışıyla enerji yoğunluğunun %35 oranında azaltılması hedeflenmektedir (ETKP, 2023).

Rapora göre 2035 yılında elektrik üretiminin 507,7 TWh olması hedeflenmektedir (Şekil 4.4).

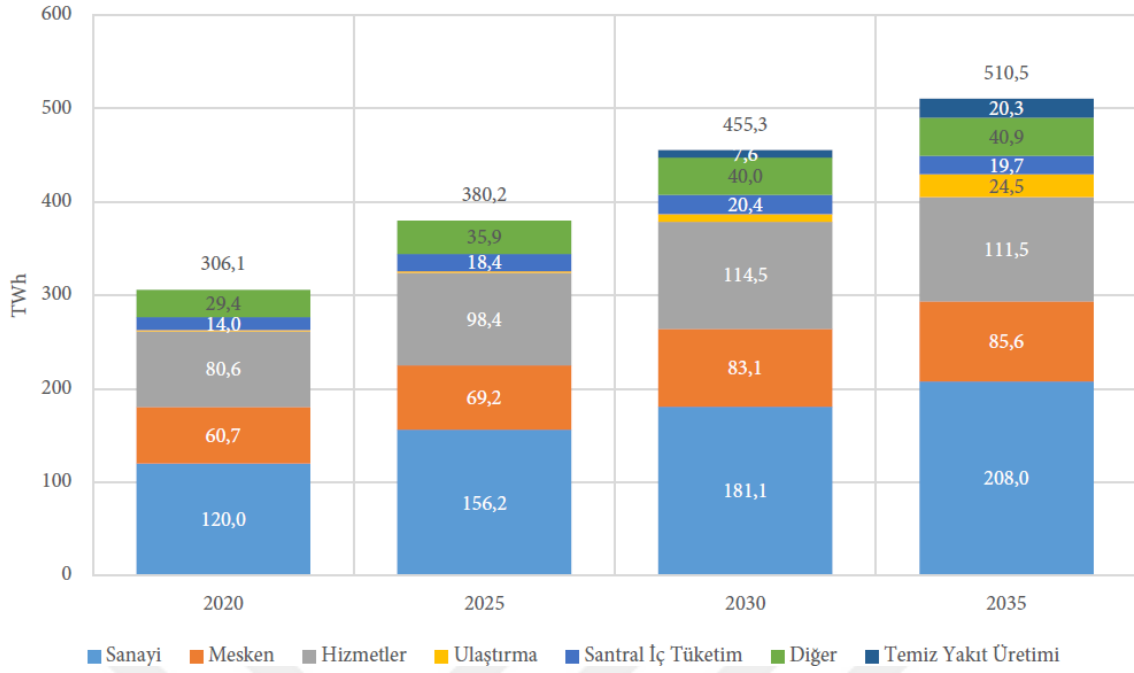


Şekil 4.4. Kaynaklar Bazında Elektrik Üretimi



Şekil 4.5. Kaynaklar Bazında Elektrik Üretiminin Dağılımı

Ayrıca elektrik tüketiminin sektörel dağılımının da Şekil 4.6'daki gibi olacağı öngörülmüştür.



Şekil 4.6. Elektrik Tüketiminde Sektörler (TWh)

4.3.3. Bulguların değerlendirilmesi

Bulguların değerlendirilmesi iki aşamada yapılabilir:

- 2035 yılındaki BEV’lerin yıllık enerji ihtiyacını karşılayacak enerji üretimi planlanıyor mu?
- 2035 yılındaki elektrik üretim kaynakları açısından ele alındığında öngörülen tam elektrikli otomobiller, CO₂ emisyonunu ne kadar azaltır?
- **2035 yılındaki BEV’lerin yıllık enerji ihtiyacını karşılayacak enerji üretimi planlanıyor mu?**

Bunun için 2035 yılında BEV’lerin oluşacak yıllık ihtiyaç duydukları enerjiyi hesaplamak gerekir. İlk olarak Türkiye’de otomobillerin yılda ortalama kaç km kat ettiği tespit edilmelidir. Buradan elektrikli araçlar için ne kadar enerji ihtiyacı oluşacağı bulunabilir. Bunun için TÜİK tarafından paylaşılan “Taşıt-kilometre İstatistikleri” raporundan faydalanılmıştır. Paylaşılan en son raporda otomobillerle ilgili kısım Tablo 4.11’de verilmiştir. En son rapor 2022 yılı için paylaşılmıştır (TÜİK, 2022).

Tablo 4.10. Taşıt-Kilometre İstatistikleri

	Otomobil Sayısı	Toplam km (milyon)	Otomobil Başına Yıllık Ortalama km
2021	13.706.065	178.832	13.048
2022	14.269.352	191.416	13.415

Burada görüldüğü üzere 2022 yılında yılda 14 milyon otomobil ortalama 13 bin km yol kat etmiştir. Modele göre normal senaryoda 3,9 milyon, yüksek senaryoda 6,6 milyon araç olacaktır. Seçilen örneklemedeki elektrikli araçların 100 km başına ortalama enerji ihtiyaçları 17,3 kWh olarak bulunmuştu. Buna veriler ışığında normal senaryo için yıllık 8,84 TWh, yüksek senaryo için 15,04 TWh enerji ihtiyacı oluşacaktır. TUEP'e göre 2035 yılında ulaştırma sektörü için 24,5 TWh enerji tüketimi öngörülmüştür. Ancak raporda yer almadığı için değinilememiş olsa da bu enerjinin ulaşım sektöründeki dağılımı da önemli bir konudur. Bu değer bu çalışmada hesaplanan değerlerin üstünde kaldığı için enerji ihtiyacı açısından yıllık bazda bakıldığında bir yetersizlik olmayacağı söylenebilir. Ayrıca puant güç talebi denilen, elektrik sisteminde en yüksek elektrik talebinin olduğu anlık güç miktarı, anlık talep zirvelerini karşılayacak kurulu gücün varlığı da irdelenmelidir. Bu ayrı bir çalışma konusu olacağı için bu çalışma kapsamında incelenmemiştir.

- ***2035 yılındaki elektrik üretim kaynakları açısından ele alındığında öngörülen tam elektrikli otomobiller, CO₂ emisyonunu ne kadar azaltır?***

Tablo 3.14'te verilen yoğunluk faktörleri kullanılarak 2035 yılında 1 kW enerji üretmek için ne kadar CO₂ salınımı yapılacağını hesaplanmalıdır. 2035 elektrik üretim kaynak dağılımında termik kaynakların kırılımı detaylandırılmamıştır. Bu sebeple yoğunluk faktörlerinin ortalaması alınarak, termik santraller için 806 kg CO₂/MWh ortalama yoğunluk faktörü belirlenmiştir. 2035 yılında termik santrallerin %34,2'ye düşeceği öngörülmüştür. Nükleer enerji, hidrolik enerji, rüzgâr enerjisi ve güneş enerjisi yoğunluk faktörleri çok düşük seviyelerde oldukları için ihmal edilmiştir.

Buna göre 2035 yılında 1 kWh enerji için **275,8 g CO₂** salınacaktır. Bu değer 2023 yılı elektrik üretim kaynaklarının dağılımıyla bulunmuş olan **438,58 g CO₂/kWh** değerinin %37 düşürülmesi anlamına gelmektedir. 2035 yılında normal senaryoda 3.915.409 BEV'lerin yıllık kullanımda ortalama emisyon değerleri 2.437,59 kilo ton olacaktır. Bu araçlar yerine geleneksel araçlar olsaydı seçilen modelin ortalama emisyon değeri olan 146,2 g/km değerinden hareketle 7.469,1 kilo ton CO₂ salınacağı hesaplanmıştır. Bu durumda 2035 yılında normal senaryoya göre geleneksel içten yanmalı motora sahip araçlar yerine elektrikli araçların tercih edilmesiyle **5.031,51 kilo ton** yani **%67,36** oranında CO₂ emisyonu azaltımı sağlanmış olacaktır.

2035 yılı yüksek senaryo için aynı hesaplamaları yapıldığında 6,6 milyon BEV, yıllık ortalama 4.148,79 kilo ton dolaylı emisyonu ve bu araçlar yerine geleneksel araç tercih edilmiş olsaydı, 12.712,44 kilo ton CO₂ emisyonuna sebep olacaktı. Bu senaryoya göre de doğaya salınan

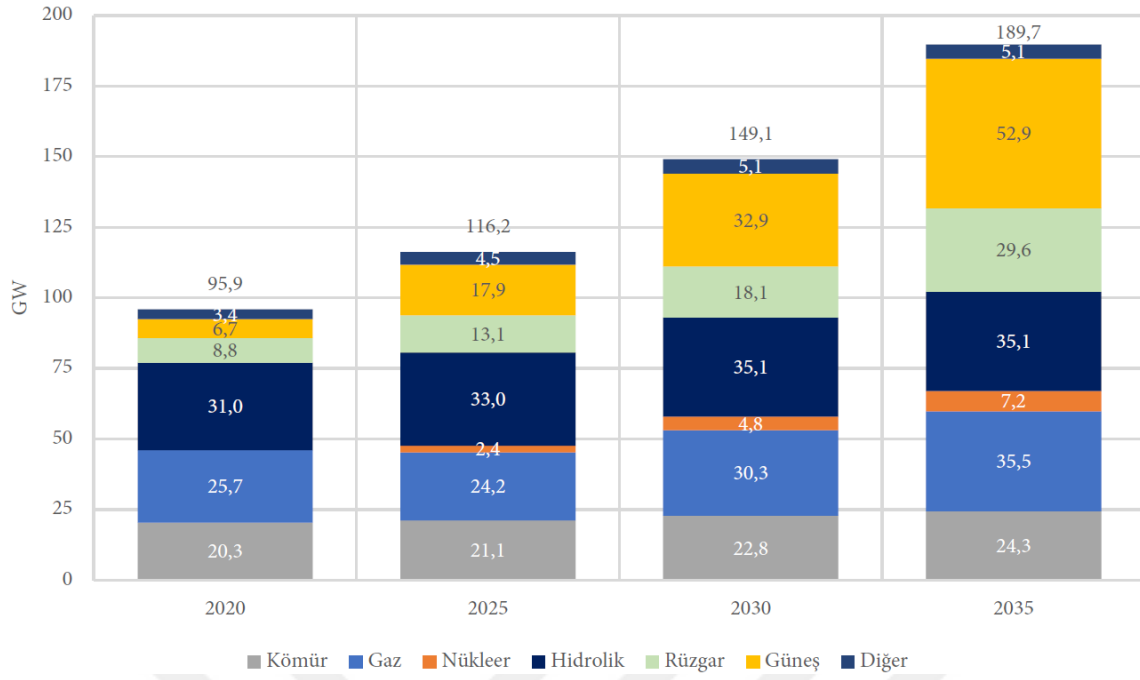
8.563,65 kilo ton CO₂ emisyonu engellenmiş olacaktır. Sadece araç sayısında değişiklik olduğu için emisyon azaltım oranında bir değişiklik oluşmamaktadır.

2035 yılında toplam araç sayısını 21.423.678 olarak tespit edilmişti. Bu araçların tamamı geleneksel olsaydı 40.868,19 kilo ton CO₂ emisyonu oluşacaktı. Normal senaryoda 35.836,68 kilo ton, yüksek senaryoda ise 32.304,54 kilo ton emisyon oluşacağı hesaplanmıştır. Böylece normal senaryoya göre %12,31, yüksek senaryoda ise %20,95 oranında CO₂ emisyonu azaltımı sağlanmış olur.

TUEP raporuna göre 2020 yılında %42,4 olan yenilebilir enerji kaynaklarının payının 2035 yılında %65,8'e, 2053 yılında %69,1'e; rüzgar ve güneş enerjisi payının ise %11,7'den önce %34,2'ye 2053'te de %61,4'e çıkarılması hedeflenmektedir. Burada hidroelektrik santrallerin payı, maksimum kurulu güç potansiyeline yaklaşmış olmaları ve artan elektrik üretimi sebebiyle giderek azalmaktadır (ETKP, 2023).

2023 rüzgar ve güneş enerjisi verileri ile hedeflenen değerler karşılaştırıldığında rüzgar enerjisinde başarılı adımlar atılmış ve 2025 hedeflerine neredeyse yaklaşılmıştır. Fakat güneş enerjisinde hedeflenen üretim seviyesi ise henüz istenilen seviyede değildir.

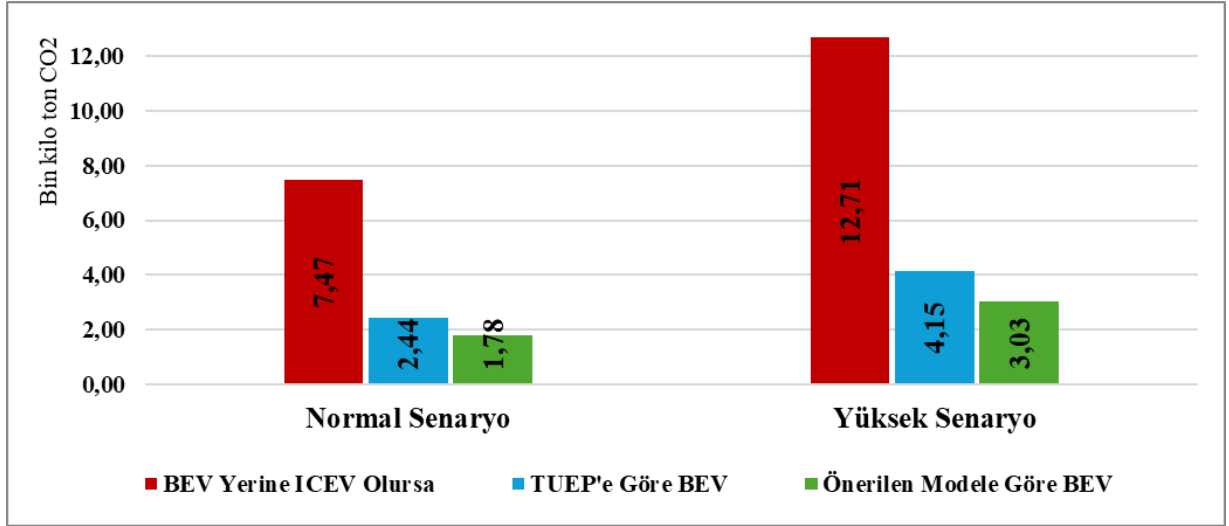
Şekil 4.7'de görüldüğü üzere 2025 yılında güneş enerjisi için 17,9 GW kurulu güç hedeflenirken, Tablo 3.11'de paylaşıldığı gibi 13,99 GW kurulu güce ulaşılmıştır. Rüzgâr enerjisi için 13,1 GW kurulu güç hedeflenirken, 11,8 GW kurulu güce erişilmiştir. Buna karşın 2025 yılında güneş enerjisi kaynaklı 28,3 TWh elektrik hedeflenirken, 2023 yılında 18,6 TWh üretilmiştir. Rüzgâr enerjisi kaynaklı 38,3 TWh hedeflenirken, 2023 yılında 34,1 TWh üretim gerçekleşmiştir. Rüzgârda kurulu güçle paralel üretim artışı görülürken, güneş enerjisi için aynı durum söz konusu olmamaktadır. Bu sebeple rüzgâr enerjisine yapılan yatırımı arttırarak 2035 yılı için hedeflenen %17,7'lik payı, termik santrallerden %9,2 pay alarak %26,9'a çıkartmak önerilmiştir. İyileştirilmiş bu enerji planı ile 2035 emisyon değerleri hesaplanmıştır.



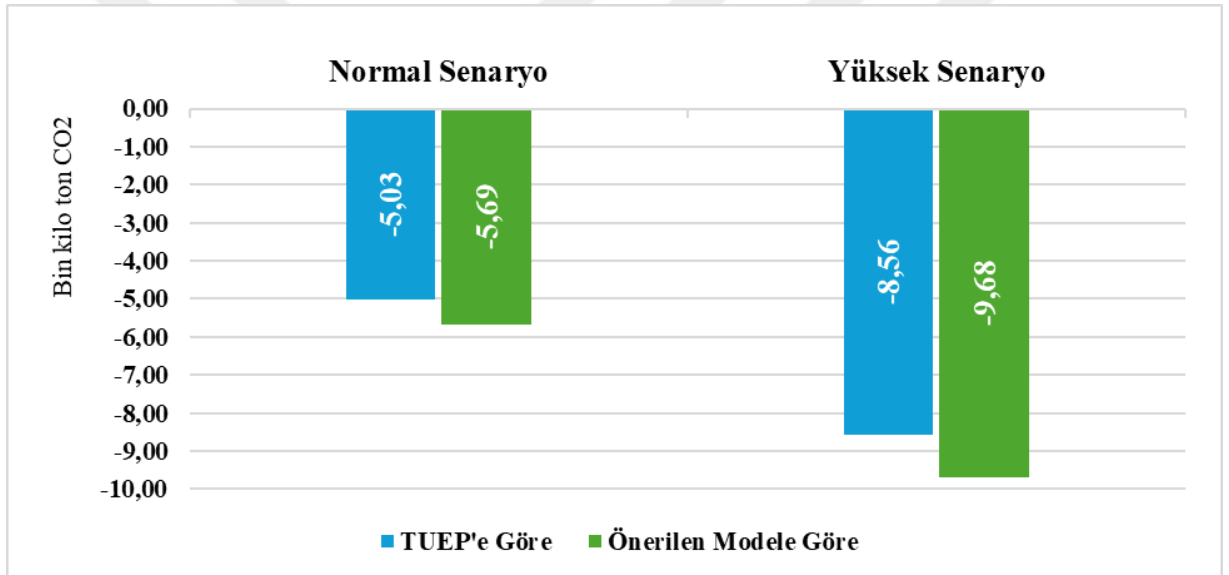
Şekil 4.7. Kaynaklara Göre Kurulu Güç

Bu durumda 2035 yılında 1 kWh enerji için **201,5 g CO₂** salınacaktır. Bu değer 2023 yılı elektrik üretim kaynaklarının dağılımıyla hesaplanan **438,58 g CO₂/kWh** değerinin %54 azalması anlamına gelmektedir. 2035 yılında normal senaryoda 3.915.409 BEV olacaktır. Bu araçların yıllık kullanımda ortalama emisyon değerleri 1.780,9 kilo ton; TUEP'deki dağılıma göre bu miktar 2.437,59 kilo ton olacaktır. Böylece CO₂ emisyonunda %26 azalma sağlanacaktır. Önerilen plana göre 2035 yılında normal senaryoya göre geleneksel içten yanmalı motora sahip araçlar yerine BEV'lerin tercih edilmesiyle **5.688,19 kilo ton** yani **%76,15 CO₂ emisyonu** azaltımı sağlanmış olacaktır.

2035 yılı yüksek senaryo için aynı hesaplamalar yapıldığında 6,6 milyon BEV, yıllık ortalama 3.031,12 kilo ton dolaylı emisyonu; TUEP'deki dağılıma göre bu miktar 4.148,79 kilo ton olacaktır. Böylece doğaya salınan CO₂ 1.117,67 kilo ton azaltılmış olacaktır. Bu araçlar yerine geleneksel araç tercih edilmiş olsaydı, 12.712,44 kilo ton CO₂ emisyonu oluşacak ve doğaya salınan ilave **9.681,33 kilo ton CO₂ emisyonu** engellenmemiş olacaktır. Şekil 4.8'de iki senaryo üç koşula göre emisyon değerlerindeki, Şekil 4.9'da TUEP ve önerilen modele göre emisyon azaltım miktarlarındaki değişim verilmiştir.

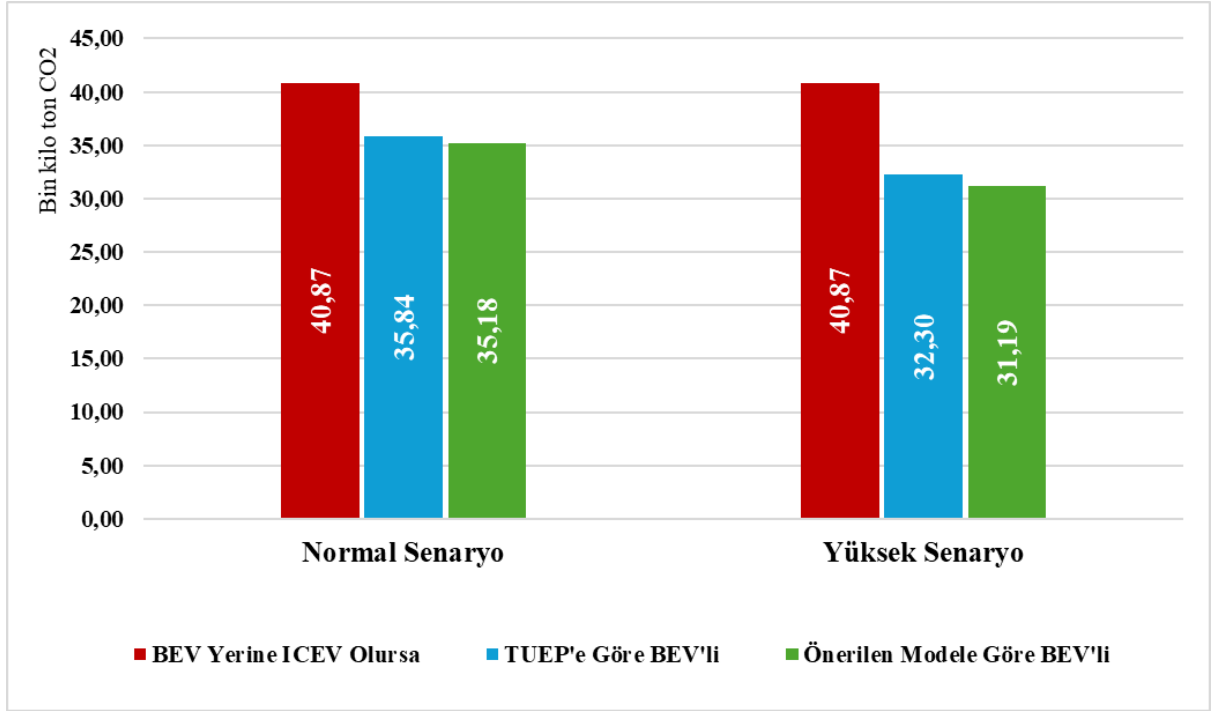


Şekil 4.8. Normal ve Yüksek Senaryo için Emisyon Değerleri Grafiği



Şekil 4.9. TUEP ve Önerilen Modele göre Emisyon Azaltım Değerleri Grafiği

2035 yılında toplam araç sayısı 21.423.678 olarak tespit edilmişti. Bu araçlar geleneksel olsaydı 40.868,19 kilo ton CO₂ emisyonu oluşacaktı. Normal senaryoda 35.179,99 kilo ton, yüksek senaryoda ise 31.186,86 kilo ton emisyon olacağı hesaplanmıştır. Böylece bu çalışmadaki normal senaryoya göre %13,92, yüksek senaryoya göre %23,69 CO₂ emisyonu azaltımı sağlanmış olur. Şekil 4.9'da iki senaryo için TUEP ve önerilen enerji modeline göre toplam emisyon değerlerinde yaşanacak değişim yer almaktadır.



Şekil 4.10. Normal ve Yüksek Senaryo için Toplam Emisyon Değerleri Grafiği

Önerilen elektrik üretim paylarına göre rüzgar enerjisinde %9,2'lik bir artışla iki enerji modeli arasındaki emisyon miktarında %26 azalma, geleneksel araçlara göre %76,15 azalma, genel toplamda da %1,87 oranında CO₂ emisyon azaltımı sağlandığı tespit edilmiştir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada Türkiye'deki otomobiller incelenmiş, en çok bulunan ve tercih edilenler arasından bir örneklem oluşturulmuş ve bu örneklemdaki araçların CO₂ emisyonları belirlenmiştir. Bu araçlarla karşılaştırmak üzere Türkiye'de en çok tercih edilen ve Türkiye otomotiv sektöründe elektrik dönüşümünü sağlayacak otomobillerden motor gücü, segment, satın alma maliyeti gibi kriterler göz önünde tutularak örneklem alınmıştır. Bu araçların kilometrede ihtiyaç duydukları elektrik güçleri tespit edilmiştir. Türkiye'de elektrik üretimi için kullanılan kaynaklar ve karbon emisyon yoğunlukları belirlenmiş, bu altyapıyla seçilen BEV'ler beslendiği durumda oluşacak dolaylı emisyon değerleri belirlenmiştir. Her iki örneklem için belirlenen emisyon değerleri karşılaştırılmış ve elektrikli araçlara geçişle yaşanabilecek emisyon yükü değişimleri üzerine değerlendirmeler yapılmıştır. Seçilen örneklemde göre, Türkiye'nin 2023 yılı elektrik üretim kaynakları dikkate alındığında, BEV'lerin %48,1 oranında CO₂ emisyonu azaltımı sağladığı tespit edilmiştir. Türkiye'nin yerli otomobili TOGG'un 83,77 g/km, mukayese edilen Volkswagen Tiguan'ın ise 153 g/km emisyon değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Ancak, BEV'lerin tamamen linyit kullanılan elektrik santrallerinden şarj edilmesi durumunda %36,32, taş kömürü kullanılan santrallerden şarj edilmesi halinde ise %18,26 oranında daha fazla CO₂ emisyonuna neden olacağı hesaplanmıştır.

2035 yılında tam elektrikli araç (BEV) ve otomobil satış değerleri sayısal analiz ARIMA yöntemiyle, normal ve yüksek olmak üzere iki farklı senaryo incelenmiştir. TUEP'e göre 2035 yılı elektrik üretim kaynakları incelenmiş, yapılan tahminlemeye göre emisyon değerleri belirlenerek karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte TUEP enerji profiline alternatif olarak bir model önerilmiş, bu modele göre emisyon değerleri belirlenerek iki model karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda çalışmadan çıkarılabilecek bazı sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Normal senaryoda 2035 yılında 539.095 tam elektrikli otomobil trafiğe çıkacağı tespit edilmiştir. Ayrıca aynı zamanda toplam elektrikli otomobil sayısının ise 3.915.409 olacağı hesaplanmıştır. Yüksek senaryoda ise 1.067.262 elektrikli otomobil trafiğe katılırken, toplam elektrikli otomobil sayısının 6.664.042 olacağı tahmin edilmiştir. Bu sonuçlara göre 2024 Haziran sonu itibariyle bulunan 122.670 elektrikli otomobilin; normal senaryoya göre 8,7 katına, yüksek senaryoya göre 54,33 katına çıkması öngörülmüştür.
- Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından Nisan 2024'te yayınlanan Elektrikli Araç ve Şarj Altyapısı Projeksiyonu raporuna göre 2035 yılında düşük senaryoda 1.779.488,

orta senaryoda 3.307.577 ve yüksek senaryoda 4.214.273 elektrikli araç olması öngörülmüştür. Bu çalışma ile karşılaştırıldığında, özellikle normal senaryo (3,9 milyon araç) sonuçlarının oldukça yakınlık gösterdiği tespit edilmiştir.

- Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından yayınlanan Türkiye için Elektrikli Araç Şarj Altyapısı raporunda 2030 yılı tahmini ortaya konmuştur. Buna göre düşük senaryoda 880 bin, orta senaryoda 1,6 milyon ve yüksek senaryoda ise 2,5 milyon elektrikli araç stoğu olacağı öngörülmüştür. Bu çalışmanın modelindeki 2030 tahminleri de normal senaryoda 1.618.769 ve yüksek senaryoda 2.354.257 olmaktadır. Her iki çalışmanın tahminleri de birbirine yakın değerlerde gerçekleşmiştir.
- Bu çalışmadaki normal senaryoda 2035 yılında trafiğe kayıtlı toplam otomobil sayısı 21.423.678'dir. Buna göre BEV sayısında normal artış öngörüsüne dayalı senaryoya göre toplam otomobillerin %18,28'i, yüksek senaryoya göre %31,11'i tam elektrikli olacaktır. Haziran 2024 itibarıyla %0,78 seviyesinde olan BEV dağılımı 2035 yılında sırasıyla 23,43 ve 39,88 katına çıkacağı tespit edilmiştir.
- 2035 yılında toplam araç sayısı 21.423.678 olarak tespit edilmiştir. Bu araçların tamamı geleneksel olsaydı 40.868,19 kilo ton CO₂ emisyonu oluşacaktır. Normal senaryoda 35.836,68 kilo ton, yüksek senaryoda ise 32.304,54 kilo ton emisyon oluşacağı hesaplanmıştır. Böylece normal senaryoya göre %12,31, yüksek senaryoda ise %20,95 CO₂ emisyonu azaltımı sağlanmış olur.
- Modele göre normal senaryoda 3,9 milyon, yüksek senaryoda 6,6 milyon BEV olacağı hesaplanmıştır. Seçilen örneklemdaki BEV'lerin 100 km başına ortalama enerji ihtiyaçları 17,3 kWh olarak bulunmuştur. Bu veriler ışığında normal senaryo için yıllık 8,84 TWh, yüksek senaryo için 15,04 TWh enerji ihtiyacı oluşacaktır.
- 2035 yılı yüksek senaryo için TUEP enerji modeline göre hesaplama yapıldığında 6,6 milyon elektrikli araç, yıllık ortalama 4.148,79 kilo ton dolaylı CO₂ emisyonuna ve bu araçlar yerine geleneksel araç tercih edilmiş olsaydı, 12.712,44 kilo ton CO₂ emisyonuna sebep olacaktır. Bu senaryoya göre de doğaya salınan 8.563,65 kilo ton CO₂ emisyonu engellenmiş olacaktır.
- 2035 yılı yüksek senaryo için önerilen enerji modeline göre aynı hesaplamalar yapıldığında 6,6 milyon BEV, yıllık ortalama 3.031,12 kilo ton dolaylı emisyonu meydana gelecektir. Böylece doğaya salınan CO₂ 1.117,67 kilo ton azaltılmış olacaktır. Bu araçlar yerine geleneksel araç tercih edilmiş olsaydı, 12.712,44 kilo ton CO₂ emisyonu oluşacak ve doğaya salınan ilave 9.681,33 kilo ton CO₂ emisyonu engellenmemiş olacaktır.
- 2035 yılında 1 kWh enerji için 275,8 g CO₂ salınacağı hesaplanmıştır. Bu değer 2023 yılı

elektrik üretim kaynaklarının dağılımıyla bulunmuş olunan 438,58 g CO₂/kWh değerinin %37 düşürülmesi anlamına gelmektedir. 2035 yılında normal senaryoda 3.915.409 BEV'lerin yıllık kullanımda ortalama emisyon değerleri 2.437,59 kilo ton olacaktır. Bu araçlar yerine geleneksel araçlar olsaydı seçilen örneklemin ortalama emisyon değeri olan 146,2 g/km değerinden hareketle 7.469,1 kilo ton CO₂ salımı hesaplanmıştır. Bu durumda 2035 yılında normal senaryoya göre geleneksel içten yanmalı motora sahip araçlar yerine elektrikli araçların tercih edilmesiyle 5.031,51 kilo ton yani %67,36 CO₂ emisyonu azaltımı sağlanmış olacaktır.

- 2035 yılında toplam araç sayısı 21.423.678 olarak tespit edilmişti. Bu araçlar geleneksel olsaydı 40.868,19 kilo ton CO₂ emisyonu oluşacaktı. Önerilen enerji modeline göre normal senaryoda 35.179,99 kilo ton, yüksek senaryoda ise 31.186,86 kilo ton emisyon olacağı hesaplanmıştır. Böylece bu çalışmadaki normal senaryoya göre %13,92, yüksek senaryoya göre %23,69 CO₂ emisyonu azaltımı sağlanmış olur.
- Kömür ve linyit kaynaklı elektrik üretimi CO₂ emisyonu açısından BEV'leri olumsuz etkilemektedir. Linyit kaynaklı elektrik üretimiyle şarj edilen BEV'ler geleneksel araçlara göre %36,32, kömür kullanılarak üretilen elektrikle şarj edilen araçlar ise %18,26 daha fazla CO₂ emisyonuna sebep olmaktadır. Bu bağlamda kömür bazlı elektrik üretimini azaltmak ve bu azalan oran yerine yenilenebilir enerji kaynaklarını ikame etmek gerekmektedir. Fakat yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretmek için bazı koşulların oluşması gerekmektedir. Örneğin güneşten elektrik üretmek için güneşe, rüzgârdan elektrik üretmek için ise rüzgâra ihtiyaç vardır. Bu sebeple koşullardan çok da etkilenmeyecek fakat emisyon değerleri açısından da avantajlı bir alternatif olan nükleer enerji değerlendirilebilir. Türkiye'nin halihazırda bu anlamda bazı girişimleri ve çalışmaları mevcuttur. Akkuyu Nükleer Güç Santrali tam kapasiteyle çalışmaya başladığında 35 milyar kWh, Sinop Nükleer Güç Santrali ise 34 milyar kWh elektrik üreterek, Türkiye'nin 2023 yılında ihtiyaç duyduğu elektriğin %10'unu karşılama potansiyeline sahiptir. Bu durum, Türkiye'nin elektrik üretiminde ithal kömür kullanımını azaltma potansiyeline işaret etmektedir. Bu durum, ithal kömür maliyetlerini düşürmenin yanı sıra emisyon değerlerini azaltma potansiyeline de sahiptir.
- TUEP doğrultusunda 2035 hedefleri incelenmiş, buna göre 2035 yılı elektrik üretim kaynaklarıyla CO₂ emisyon tahminlemeleri yapılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki 2035 yılında BEV'ler 2024 yılındaki elektrikli araçlara göre %37, geleneksel araçlara göre %67,36 daha az CO₂ emisyonu üreteceği belirlenmiştir. Buradan hareketle 2035 yılı için geliştirilmiş bir enerji planı önerilmiştir. Bu plana göre emisyon değerlerinde TUEP'e göre

%26, geleneksel araçlara göre %76,15 emisyon azaltımı olacağı tespit edilmiştir. Bu çalışmada elektrik iletimi ve dağıtım kaynaklı kayıplar hesaba katılmamıştır. TEİAŞ raporlarına göre Türkiye’de %2 iletim kayıpları ve %11 dağıtım kayıpları gerçekleşmektedir. Yani yaklaşık olarak %13’lük bir kayıp payı da eklenebilir. Bir diğer husus ise, 2035 hedefleri yıllık ortalama enerji talebi üzerinden değerlendirilmesidir.

Bu çalışmanın devamı niteliğinde aşağıdaki çalışmalar yapılabilir:

- BEV’lerin hızla artmasının elektrik talebindeki ani yük talebi üzerindeki etkisi incelenebilir ve bu talebi karşılamak için yeni bir elektrik üretim tesisinin en uygun kaynak türüne karar verilmesi analiz edilebilir. Bu doğrultuda, maliyet, inşa süresi ve karbon emisyonu açısından en ideal enerji kaynağının belirlenmesi de çalışmanın yaygın etkisini arttırabilir.
- Türkiye Ulusal Enerji Planına göre 2035 yılında ulaştırma sektörü için 24,5 TWh enerji tüketimi öngörülmüştür. Bu hedefe yönelik olarak diğer ulaşım türlerindeki yeşil dönüşüm çalışmalarının sağlıklı yürütülmesi ve tahminlemenin hassasiyetine yönelik olarak bütünleşik bir ulaşım enerji tüketimi ve emisyon yükü hesaplaması yapılabilir.
- 2025 yılında güneş enerjisi kaynaklı 28,3 TWh elektrik hedeflenirken, 2023 yılında 18,6 TWh üretilmiştir. Rüzgâr enerjisi kaynaklı 38,3 TWh hedeflenirken, 2023 yılında 34,1 TWh üretim gerçekleştirilmiştir. Rüzgârda kurulu güçle paralel üretim artışı görülürken, güneş enerjisi için aynı durum söz konusu olmamıştır. Bu bağlamda hem ulaşım sektöründe hem de diğer sektörlerde yeşil dönüşümde güneş enerjisinden daha efektif yararlanabilme üzerine çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

Ali, Q., Di Silvestre, M.L., Lombardi, P.A., Sanseverino, E.R., Zizzo, G. (2024). Electrifying the road to net-zero: Implications of electric vehicles and carbon emission coefficient factors in european power systems. *Sustainability*, 16(12), Article 5084. <http://dx.doi.org/10.3390/su16125084>

Bestselling Cars Blog. (2024) Türkiye 1993-2023: Historical data now available. *Bestselling Cars Blog*. <https://bestsellingcarsblog.com/2014/01/turkey-1993-2013-historical-data-now-available/>

Bureau of Transportation Statistics. (2024). Energy consumption by mode of transportation. *U.S. Department of Transportation*. <https://www.bts.gov/content/energy-consumption-mode-transportation-0>

Casals, L. C., Martinez-Laserna, E., García, B. A., 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, Q.W., Lai, X., Gu, H.H., Tang, X.P., Gao, F.R., Han, X.B., Zheng, Y.J. (2022). Investigating carbon footprint and carbon reduction potential using a cradle-to-cradle LCA approach on lithium-ion batteries for electric vehicles in China. *Journal of Cleaner Production*, 369, Article 133342. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133342>

Das, P.K., Bhat, M.Y., Gupta, S., Gaine, J.A. (2024). Decarbonising transportation: empirical insights into electric vehicles, carbon emissions and energy consumption. *International Journal Of Energy Sector Management*, 18(6), 2059-2085. <http://dx.doi.org/10.1108/IJESM-09-2023-0008>

Duan, S.Y., Qiu, Z.W., Liu, Z., Liu, L. (2023). Impact assessment of vehicle electrification pathways on emissions of CO₂ and air pollution in Xi'an, China. *Science Of The Total Environment*, 893, Article 164856. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164856>

Dvoracek, L., Horák, M., Knápek, J. (2022). Simulation of electric vehicle charging points based on efficient use of chargers and using recuperated braking energy from trains. *Energies*, 15 (2), Article 571. <http://dx.doi.org/10.3390/en15020571>

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK). (2023). Elektrik Piyasası 2023 Yılı Piyasa Gelişim Raporu.

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK). (2024). Elektrikli araç ve şarj altyapısı projeksiyonu- Nisan 2024.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2016). Türkiye'nin nükleer santral projeleri: Soru-cevap. <https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/NUPGM/tr/Belgeler/49020-nukleer1.pdf>

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2022). Türkiye ulusal enerji planı. https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/Türkiye_Ulusal_Enerji_Planı.pdf

EPIAŞ (Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.). Şeffaflık Platformu. <https://seffaflik.epias.com.tr/home>

European Commission. (2024). Delivering the European Green Deal. Retrieved November 16, 2024, from https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en

Farzaneh, F., Jung, S.M. (2023). Lifecycle carbon footprint comparison between internal combustion engine versus electric transit vehicle: A case study in the US. *Journal Of Cleaner Production*, 390, Article 136111. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136111>

Faust, M., Ortman, Z., Chambers, A., Fitzpatrick, M., Gibson, J., Norris, F., Williams, M., Johantges, A.D., Kim, J., Riser, B., McCoy, B., Davidson, F.T. (2022). Lifecycle analysis to improve the sustainability of the United States army's non-tactical vehicle fleet. *Proceedings Of Asme 2022 International Mechanical Engineering Congress And Exposition, Imece2022, VOL 6: Energy*. <https://doi.org/10.1115/IMECE2022-96142>

Fu, H.Z., Zhao, Y., Chen, Q.C., Ban, M.F., Qian, X.Y., Sun, W.Y., Liu, Y., Xu, H. (2023). Low-carbon incentive guidance strategy for electric vehicle agents based on carbon emission flow. *World Electric Vehicle Journal*, 14 (12), Article 327. <http://dx.doi.org/10.3390/wevj14120327>

GoodCarBadCar. (2024). Turkey Car Sales Data. *GoodCarBadCar*. <https://www.goodcarbadcar.net/turkey-car-sales-data>

Guo, X.P., Sun, Y., Ren, D.F. (2023). Life cycle carbon emission and cost-effectiveness analysis of electric vehicles in China. *Energy for Sustainable Development*, 72, 1-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2022.11.008>

Günkaya, Z., Özdemir, A., Özkan, A., & Banar, M. (2016). Environmental performance of electricity generation based on resources: A life cycle assessment case study in Turkey. *Sustainability*, 8(11), 1097. <https://doi.org/10.3390/su8111097>

- Hsieh, I.Y.L., Chossière, G.P., Gençer, E., Chen, H., Barrett, S., Green, W.H. (2022). An integrated assessment of emissions, air quality, and public health impacts of China's transition to electric vehicles. *Environmental Science & Technology*, 56(11), 6836-6846. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.1c06148>
- Huang, S.J., Ren, Y.L. (2014). Indirect Carbon Emission Measurement of Electric Vehicle in China. *Mechanical Engineering, Materials Science And Civil Engineering II*, 470, 772-776. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.470.772>
- Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: Principles and practice* (2nd ed.). OTexts. <https://otexts.com/fpp2/>
- Tetik Kollugil, E., Sarica, K., & Topcu, Y. I. (2024). Electric vehicles as an emission mitigation option: Expectations and reality. *Clean Technologies and Environmental Policy*. <https://doi.org/10.1007/s10098-024-02873-4>
- Karamangil, M. İ., & Tekin, M., (2022). Comparison of fuel consumption and recoverable energy according to NEDC and WLTP cycles of a vehicle. *CT&F- Ciencia, Tecnología & Futuro*, 12(2), 31-38. <https://doi.org/10.29047/01225383.628>
- Komiyama, R., Fujii, Y. (2014). Analysis of energy saving and environmental characteristics of electric vehicles in regionally disaggregated world energy model. *Electrical Engineering in Japan*, 186(4), 20-36. <http://dx.doi.org/10.1002/eej.22373>
- Komiyama, R., Fujii, Y. (2015). Assessment of energy saving and CO₂ mitigation potential of electric vehicles and plug-in hybrid vehicles under Japan's power generation mix. *Electrical Engineering in Japan*, 192(1), 1-12. <http://dx.doi.org/10.1002/eej.22546>
- Köse, H., Acaroğlu, M. (2020). Cynara cardunculus'dan üretilen biyodizel ve karışımlarının içten yanmalı motorların yanma karakteristikleri ve emisyonları üzerine etkilerinin incelenmesi. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 7(3), 1275–1292. <https://doi.org/10.31202/ecjse.716902>
- Kurien, C., Srivastava, A.K. (2020). Impact of electric vehicles on indirect carbon emissions and the role of engine posttreatment emission control strategies. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 16(2), 234-244. <http://dx.doi.org/10.1002/ieam.4206>
- Li, D.Y., Chen, W.Y. (2019). Prospective influences of the substitution of electric vehicles for liquid vehicles: TIMES modeling of the global energy system. *Innovative Solutions For Energy Transitions*, 158, 3782-3787. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.876>

- Li, L., Yang, D.C., Liu, Z.H., Ji, X.Q., Tomin, N. (2024). Optimal scheduling of regional integrated energy system considering the integration of electric vehicles and the life cycle assessment method. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 60(1), 986-995. <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2023.3285200>
- Li, X.Y., Song, Y.Y. (2024). Industrial ripples: Automotive electrification sends through carbon emissions. *Energy Policy*, 187, Article 114045. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114045>
- Li, Y.M., Ha, N.N., Li, T.T. (2019). Research on carbon emissions of electric vehicles throughout the life cycle assessment taking into vehicle weight and grid mix composition. *Energies*, 12(19), Article 3612. <http://dx.doi.org/10.3390/en12193612>
- Lin, Z.W., Wang, P., Ren, S.Y., Zhao, D.Q. (2023). Economic and environmental impacts of EVs promotion under the 2060 carbon neutrality target- A CGE based study in Shaanxi Province of China. *Applied Energy*, 332, Article 120501. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120501>
- Liu, G.Z., Tao, Y.C., Ge, Z.H., Qiu, J., Wen, F.S., Lai, S.Y. (2024). Data-driven carbon footprint management of electric vehicles and emission abatement in electricity networks. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 15(1), 95-108. <http://dx.doi.org/10.1109/TSTE.2023.3274813>
- Liu, J.J., Luo, Y.P., Zhu, Q.R., Li, Y.X., Luo, Y.T. (2024). Research on carbon emission characteristics and mitigation pathways in the vehicle fuel cycle: a case study of guangdong province. *Atmosphere*, 15(1), Article 3. <http://dx.doi.org/10.3390/atmos15010003>
- Maarouf, M. S. (2020). Estimating The Carbon Emissions Caused By Electric Vehicle Use İn Turkey Using Marginal Emission Factors. Yüksek Lisans Tezi, Sabancı Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 51-53.
- Makridakis, S., Wheelwright, S. C., & Hyndman, R. J. (1998). *Forecasting: Methods and Applications* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- NOAA National Centers for Environmental Information. (2024). January 2024 global climate report. <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202401>
- Otomotiv Distribütörleri ve Mobilite Derneği (ODMD). (2024a). Makroekonomik değerlendirme- Haziran 2024. <https://www.odmd.org.tr/folders/2837/categorialldocs/4734/Makroekonomik%20Değerlendirme%20-%20Haziran%202024.pdf>

Otomotiv Distribütörleri ve Mobilite Derneği (ODMD). (2024b). Makroekonomik değerlendirme- Mayıs 2024.
<https://www.odmd.org.tr/folders/2837/categorial1docs/4701/Makroekonomik%20Değerlendirme%20Mayıs%202024.pdf>

Otomotiv Distribütörleri ve Mobilite Derneği (ODMD). (2024c). Makroekonomik değerlendirme- Nisan 2024.
<https://www.odmd.org.tr/folders/2837/categorial1docs/4669/Makroekonomik%20Değerlendirme%20-%20Nisan%202024.pdf>

Otomotiv Distribütörleri ve Mobilite Derneği (ODMD). (2024d). Makroekonomik değerlendirme- Mart 2024.
<https://www.odmd.org.tr/folders/2837/categorial1docs/4651/Makroekonomik%20Değerlendirme%20-%20Mart%202024.pdf>

Otomotiv Distribütörleri ve Mobilite Derneği (ODMD). (2024e). Makroekonomik değerlendirme- Şubat 2024.
<https://www.odmd.org.tr/folders/2837/categorial1docs/4626/Makroekonomik%20Değerlendirme%20-%20Şubat%202024.pdf>

Otomotiv Distribütörleri ve Mobilite Derneği (ODMD). (2024f). Makroekonomik değerlendirme- Ocak 2024.
<https://www.odmd.org.tr/folders/2837/categorial1docs/4614/Makroekonomik%20Değerlendirme%20Ocak%202024.pdf>

PCC. (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, Volume 2: Energy, Chapter 2: Stationary combustion. *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Retrieved from <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>

Reşitoğlu, İ.A., Altinişik, K., Keskin, A. (2015). The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17, 15–27. <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0793-9>

Richardson, D.B. (2013). Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, impacts, and renewable energy integration. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 19, 247-254. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.042>

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2024). Türkiye için elektrikli araç şarj altyapısı. <https://sarjdestek.sanayi.gov.tr/turkiye-icin-elektrikli-arac-sarj-altyapisi>

Shi, X.Q., Wang, X., Yang, J.X., Sun, Z.X. (2016). Electric vehicle transformation in Beijing and the comparative eco-environmental impacts: A case study of electric and gasoline powered taxis. *Journal of Cleaner Production*, 137, 449-460. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.096>

Song, Q., Wang, Z., Wu, Y., Li, J., Yu, D., Duan, H., & Yuan, W. (2018). Could urban electric public bus really reduce the GHG emissions: A case study in Macau? *Journal of Cleaner Production*, 172, 2133-2142.

Sweeting, W. J., Hutchinson, A. R., & Savage, S. D. (2011). Factors affecting electric vehicle energy consumption. *International Journal of Sustainable Engineering*, 4(3), 192-201. <https://doi.org/10.1080/19397038.2011.592956>

Şahin, E. (2024a, Ocak 4). *İşte 2023'te Otomotivin ZİRVESİ* [Tweet]. X. https://x.com/erolsahin_ebs/status/1743165626170953762

Şahin, E. (2024b, Ocak 4). *2023 yılı Ocak-Aralık dönemi için, E-F segmenti ile Segment-Gövde tipi tabloları* [Tweet]. X. https://x.com/erolsahin_ebs/status/1743165632550437000

Şahin, E. (2024c, Mart 24). *En çok hangi markanın hangi modeli yollarımızda* [Tweet]. X. https://x.com/erolsahin_ebs/status/1771845312576971124

Şahin, E. (2024d, Temmuz 4). *2024 İlk 6 Ay'da Otomobilin ZİRVESİ* [Tweet]. X. https://x.com/erolsahin_ebs/status/1808763242673774788

Şahin, E. (2024e, Temmuz 4). *2024 yılı Ocak-Aralık dönemi için, E-F segmenti ile Segment-Gövde tipi tabloları* [Tweet]. X. https://x.com/erolsahin_ebs/status/1808763253817815174

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı (EVÇED). (2024). Türkiye Elektrik Üretimi ve Elektrik Tüketim Noktası Emisyon Faktörleri Bilgi Formu (Doküman No ETKB-EVÇED-FRM-042 Rev.01). https://enerji.gov.tr//Media/Dizin/EVCED/tr/ÇevreVeİklim/İklimDeğişikliği/EmisyonFaktörleri/TEUVETN_Emisyon_Faktörleri_Bilgi_Formu.pdf

Türkiye İstatistik Kurumu. (2024a, Temmuz 25). Motorlu Kara Taşıtları, Haziran 2024. TÜİK. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Haziran-2024-53458>

Türkiye İstatistik Kurumu. (2024b, Haziran 26). Motorlu Kara Taşıtları, Mayıs 2024. TÜİK. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Mayis-2024-53457>

Türkiye İstatistik Kurumu. (2024c, Mayıs 21). Motorlu Kara Taşıtları, Nisan 2024. TÜİK.

- <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Nisan-2024-53456>
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2024d, Nisan 25). Motorlu Kara Taşıtları, Mart 2024. TÜİK. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Mart-2024-53455>
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2024e, Mart 20). Motorlu Kara Taşıtları, Şubat 2024. TÜİK. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Subat-2024-53454>
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2024f, Şubat 20). Motorlu Kara Taşıtları, Ocak 2024. TÜİK. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Ocak-2024-53453>
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2024). Enerji İstatistikleri Veritabanı. <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=89&locale=tr> (2024)
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2015). The Paris Agreement. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
- Vrabie, C. (2022). Electric vehicles optimism versus the energy market reality. *Sustainability*, 14(9), Article 5388. <http://dx.doi.org/10.3390/su14095388>
- Waldron, J., Rodrigues, L., Gillott, M., Naylor, S., Shipman, R. (2022). The Role of electric vehicle charging technologies in the decarbonisation of the energy grid. *Energies*, 15(7), Article 2447. <http://dx.doi.org/10.3390/en15072447>
- Wang, R.J., Song, Y.Y., Xu, H.L., Li, Y., Liu, J. (2022). Life cycle assessment of energy consumption and CO₂ emission from HEV, PHEV and BEV for China in the past, present and future. *Energies*, 15(18), Article 6853. <http://dx.doi.org/10.3390/en15186853>
- Will, C., Zimmermann, F., Ensslen, A., Fraunholz, C., Jochem, P., Keles, D. (2024). Can electric vehicle charging be carbon neutral? Uniting smart charging and renewables. *Applied Energy*, 371, Article 123549. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123549>
- Xia, X.N., Li, P.W., Xia, Z.G., Wu, R., Cheng, Y. (2022). Life cycle carbon footprint of electric vehicles in different countries: A review. *Separation and Purification Technology*, 301, Article 122063. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122063>
- Yalılı Kılıç, M., Dönmez, T., Adalı, S. (2021). Karayolu ulaşımında yakıt tüketimine bağlı karbon ayak izi değişimi: Çanakkale örneği. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(3), 943-955. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.848016>
- Yılan, G., Kadirgan, M.A., Çiftçioğlu, G.A. (2020). Analysis of electricity generation options for sustainable energy decision making: The case of Turkey. *Renewable Energy*, 146, 519–529.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.164>

Yüceer, H. (2019). Küresel ısınma ve sera gazları: Ekolojik etkiler ve çözüm önerileri. Artvin Çoruh Üniversitesi Uluslararası Artvin Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 67-78. <https://dacd.artvin.edu.tr/tr/download/article-file/1514955>

Zhang, Y.P., Han, Q.L. (2017). Development of electric vehicles for China's power generation portfolio: A regional economic and environmental analysis. *Journal of Cleaner Production*, 162, 71-85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.024>



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı Sait Behlül BOZTEPE
Uyruğu T.C.

Eğitim Bilgileri

Lisans

Üniversite İstanbul Teknik Üniversitesi
Fakülte Makina Fakültesi
Bölüm Makine Mühendisliği

Mesleki Deneyim

2018-.... Türk Hava Yolları- Mühendis