



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Net sıfır emisyon hedefine doğru türkiye kara yolu ve demir yolu taşımacılığının enerji modellemesi (2025-2050)

Energy modeling of türkiye road and rail transport towards net zero emissions target (2025-2050)

Yazar(lar) (Author(s)): Onur DÖNMEZÇELİK¹, Emre KOÇAK², H. Hasan ÖRKÜCÜ³

ORCID¹: 0000-0003-0060-4261

ORCID²: 0000-0001-6686-9671

ORCID³: 0000-0002-2888-9580

To cite to this article: Dönmezçelik O., Koçak E. and Örkücü H. H., Net sıfır emisyon hedefine doğru Türkiye kara yolu ve demir yolu taşımacılığının enerji modellemesi (2025-2050)", *Journal of Polytechnic*, 27(3): 931-946, (2024).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Dönmezçelik O., Koçak E. ve Örkücü H. H., "Net sıfır emisyon hedefine doğru türkiye kara yolu ve demir yolu taşımacılığının enerji modellemesi (2025-2050)", *Politeknik Dergisi*, 27(3): 931-946, (2024).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1212520

Net Sıfır Emisyon Hedefine Doğru Türkiye Kara Yolu ve Demir Yolu Taşımacılığının Enerji Modellemesi (2025-2050)

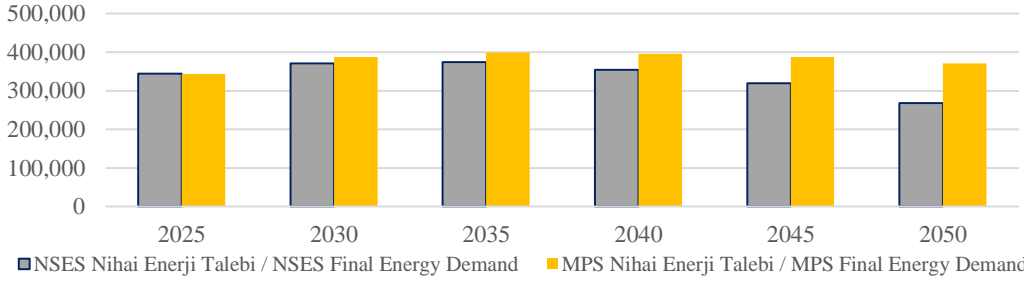
Energy Modeling of Türkiye Road and Rail Transport Towards Net Zero Emissions Target (2025-2050)

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Karayolu ve Demiryolu Taşımacılığının enerji modellemesi amacıyla Türkiye için Enerji Sistem Modeli (EST) kullanılır. / EST model is used for energy modeling of Road and Rail Transport.
- ❖ 2025-2050 yılları arası enerji modeli için çeşitli varsayımlar ve senaryolar hazırlanır. / Various assumptions and scenarios are prepared for the energy model between 2025 and 2050.
- ❖ Senaryolara göre model sonuçları emisyon azaltımı doğrultusunda değerlendirilir. / According to scenarios, model results are evaluated in line with emission reduction.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Net Sıfır Emisyon Senaryosundaki (NSES) nihai enerji talebi, elektrifikasyon nedeniyle Mevcut Politikalar Senaryosuna (MPS) kıyasla azaldı. / The final energy demand in Net Zero Emissions Scenario (NSES) has decreased compared to Current Policies Scenario (MPS) due to electrification.



Şekil. Nihai enerji talebi ve toplam CO₂ emisyonları / **Figure.** Final energy demand and total CO₂ emissions

Amaç (Aim)

Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefi için Ulaştırma sektöründeki emisyonların azaltılması. / Reducing emissions in the transport sector for Turkey's 2053 net zero emission target.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Ulaştırma sektörünün matematiksel problemi, Türkiye için Enerji Sistem Modeli (EST)'nde alt taşıma modları tarafından tüketilmesi gereken nihai enerjinin olup olmadığını hesaplamaktır. / The mathematical problem of the transportation sector is to calculate whether the final energy that must be consumed by the lower modes of transport in the EST.

Özgünlük (Originality)

Bilindiği kadarıyla, net sıfır emisyon hedefine yönelik Türkiye için ulaştırma alanında yapılan ilk modelleme çalışması / As far as is known, the first modeling in the field of transportation for the net zero emission target for Türkiye.

Bulgular (Findings)

MPS'nin karbon emisyonlarının azaltılması üzerindeki etkisinin çok düşük olduğu sonucuna varılmıştır. / It is concluded that the impact of MPS on reducing carbon emissions is very low.

Sonuç (Conclusion)

Politikalar ayrı ayrı değil, eş zamanlı ve kapsamlı bir yaklaşımla uygulanmalıdır. / Policies should be implemented concurrently and with a comprehensive approach rather than separately.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Net Sıfır Emisyon Hedefine Doğru Türkiye Kara Yolu ve Demir Yolu Taşımacılığının Enerji Modellemesi (2025-2050)

Araştırma Makalesi / Research Article

Onur DÖNMEZÇELİK^{1*}, Emre KOÇAK², H. Hasan ÖRKÜ²

¹Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye

¹Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

²Fen Fakültesi, İstatistik Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 30.11.2022 ; Kabul/Accepted : 26.01.2023 ; Erken Görünüm/Early View : 10.02.2023)

ÖZ

Ulaştırma sektöründe emisyonların azaltılması, Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefinin en önemli adımlarından biri olacaktır. Bu hedefin en önemli parçası olacak elektrifikasyonun, özellikle karayolu ulaşım modlarında emisyonların azaltılmasında temel stratejiyi oluşturması beklenmektedir. Diğer birçok sektörden farklı olarak ulaştırma sektörü, maliyet minimizasyonunun yanı sıra davranışsal hareketlerden de etkilenmektedir. Bu nedenle politika yapımcılar ve tüketiciler arasındaki etkileşim çevre ve enerji ekseninde bir sistem analizini zorunlu kılmaktadır. Bu çalışma, Türkiye'nin 2025-2050 döneminde belirlediği net sıfır emisyon hedefi için ulaştırma sektöründeki enerji tüketiminin önemli bir payını oluşturan karayolu ve demiryolu taşımacılığının mevcut ve uygulanabilir politikalar altında nasıl konumlanabileceğine odaklanmaktadır. Bu amaçla tasarlanan Türkiye için Enerji Sistem Modeli (EST) kullanılarak senaryolar oluşturulmuştur. Net sıfır senaryosunda CO₂ standartlarının uygulanması, içten yanmalı motor teknolojilerinde yeni girişlerin yasaklanması, ulaşım tercihlerinin karayolundan demiryoluna kaydırılması gibi politikalar, ulaştırma sektörünün net sıfır emisyon hedefine sağlayacağı katkının önemini ortaya çıkarmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Net sıfır emisyon, emisyon azaltımı, elektrifikasyon, ulaştırma enerji politikaları.

Energy Modeling of Türkiye Road and Rail Transport Towards Net Zero Emissions Target (2025-2050)

ABSTRACT

Reducing emissions in the transportation sector is one of the most important steps of Türkiye's 2053 net zero emission target. The most important part of this target, electrification, is expected to form the basic strategy for reducing emissions, especially in road transport modes. Unlike many other sectors, the transportation sector is affected by behavioral movements as well as cost minimization. Therefore, the interaction between policy makers and consumers necessitates a system analysis on the axis of environment and energy. This study focuses on how road and rail transport, which constitutes a significant share of energy consumption in the transportation sector, can be positioned under current and applicable policies for the net zero emission target determined by Türkiye in the 2025-2050 period. For this purpose, scenarios were created using the Energy System Model for Türkiye (EST) designed for Türkiye. The implementation of policies such as the implementation of CO₂ standards in the net zero scenario, the prohibition of new entries in internal combustion engine technologies, and the shifting of transportation preferences from road to rail, reveals the importance of the contribution of the transportation sector to the net zero emission target.

Keywords: Net zero emission, emission reduction, electrification, transport energy policies.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İklim değişikliği ile mücadele eden ve Türkiye Büyük Millet Meclisi tarafından onaylanan Paris Anlaşması Türkiye'de 10 Kasım 2021 tarihinde yürürlüğe girmiştir [1]. Anlaşma ile bu yüzyılın sonunda küresel sıcaklık artışının 1,5 derece ile sınırlandırılması ve sera gazı emisyonlarının (GHG) küresel düzeyde azalma eğiliminde olması hedeflenmektedir [2]. Anlaşma kapsamında Türkiye'nin ilk adım olarak emisyon azaltım hedeflerini içeren ulusal katkı beyanlarını güncelleyerek Birleşmiş Milletler Sekreterliği'ne sunması

planlanmaktadır. Ardından, Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı tarafından açıklandığı üzere 2053 yılında net sıfır emisyon hedefine yönelik bir yol haritasının oluşturulması beklenmektedir.

İthal enerji girdilerinin Türkiye'deki toplam ithalatın yaklaşık dörtte birini oluşturması ekonomiyi küresel piyasalarda enerji arzı ve fiyatlarındaki dalgalanmalara karşı daha hassas hale getirmektedir [3]. Bu nedenle enerjide dışa bağımlılığı azaltmaya yönelik alternatif politikaların oluşturulması büyüme ve cari işlemler açığı üzerinde olumlu etkiler yaratmaktadır. Bu bağlamda arz tarafında yerli kaynakların daha fazla kullanılması, nükleer enerjinin elektrik üretimine dahil edilmesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretimindeki payının artırılması büyük önem taşımaktadır [4,5]. Talep

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : dcelik.onur@gmail.com

tarafında, elektrikte pik yükü stabil hale getirmek için enerji verimliliği önlemlerinin artırılması, elektrik ve doğalgazda talep tarafı katılım piyasası altyapısının oluşturulması gibi konular ön plana çıkmaktadır [5,6].

Türkiye ulaştırma sektörü, 2000 yılında yaklaşık 12 milyon ton petrol eşdeğeri (TEP) enerji tüketimi ile toplam birincil enerji arzında %15 paya sahipken, 2020 yılında yaklaşık 28 milyon TEP enerji tüketimi ile birincil enerji arzında %20 pay elde etmiştir. 2020 yılı tüketiminin yaklaşık %94'ü karayolunda, %2,5'u havayolunda, %1,5 denizyolunda, %0,75'i demiryolunda ve geri kalanı boru hatlarında tüketilmektedir. Ulaştırma sektöründe tüketilen 28 milyon TEP enerjinin yaklaşık %98'i petrol ürünlerinden kaynaklanmaktadır. Türkiye'nin petrol ürünleri ve petrol ürününe dönüştürülen ham petrol ithalatı incelendiğinde, söz konusu ithalatta ulaştırma sektörünün enerji talebinin payının %70'e yaklaştığı görülmektedir [7].

Dünyadaki birincil enerji kaynaklarının yaklaşık dörtte biri ulaşım sektörü tarafından tüketilmektedir. Özellikle gelişmiş ülkelerde nihai enerji tüketimindeki payı artma eğiliminde olan ulaştırma sektörü, önemli bir sera gazı üreticisi olarak görülmektedir [8]. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) Dünya Enerji Referansı senaryosu, bu sektörün CO₂ emisyonlarının 2030 yılına kadar %50 oranında artacağını öngörmektedir [9]. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) sera gazı envanter verilerine göre, 2016 yılında Türkiye'nin toplam sera gazı CO₂ eşdeğeri olarak 496,1 milyon ton olup, bunun 81,8 milyon tonu ulaşımından kaynaklanan emisyonlardır. Ulaşım ile ilgili emisyonların toplam sera gazı içindeki payı 1990 yılında %12,8 iken, 2016 yılında bu oran %16,5 olarak gerçekleşmiştir. TÜİK 2016 sera gazı envanter verilerine göre; ulaşımından kaynaklanan CO₂ emisyonlarının %92,4'ü karayolundan, %5,2'si hava yolundan, %1,2'si denizyolundan, %0,5'i demiryollarından ve %0,8'i diğer ulaşım modlarından kaynaklanmaktadır [10].

Toplam emisyonların yaklaşık %70'ini oluşturan enerji sektörü, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine yönelik tüm sosyal, ekonomik ve çevresel strateji ve planların temelini oluşturmaktadır [11]. Türkiye'nin sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda ileriye dönük enerji planı, programı ve politikalarının oluşturulması bağlamında hangi kaynağın ne oranda talep edileceğinin öngörülmesi büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle enerji kaynaklarının gelecekteki kullanımının sektörel bazda öngörülmesi önem arz etmektedir. Günümüzde artan nüfus ve dünya ekonomisine paralel olarak enerji ihtiyacı da her geçen gün artmaktadır. Buna paralel olarak kişi başına düşen gelir ve yaşam standartlarındaki artış araç sahipliğini, ulaşım ihtiyacını, ulaşım sektöründen kaynaklanan enerji talebini ve emisyonları hızla artırmaktadır [12]. Bu anlamda ulaştırma sektörünün enerji talebi ve emisyon tahminleri, daha etkin ulaşım sistemleri geliştirmek için gelecek planlamasının ön koşullarıdır [13].

Ulaştırma sektöründeki enerji tüketimi, araç modları arasındaki geçişkenlik, motor teknolojilerindeki

gelişmeler ve yakıt fiyatlandırması gibi birçok faktöre bağlıdır [14]. Bu anlamda bu çalışma net sıfır emisyon hedefine ulaşmada önemli bir girdi olacak elektrifikasyonun, kullanılabilirliğinin en optimum olduğu iki ulaşım modu olan karayolu ve demiryolu taşımacılığına odaklanmaktadır. Geliştirilen model ile gelecekte karayolu ve demiryolu ulaşım sistemlerinde tüketilebilecek enerji miktarının, net sıfır emisyon hedefi kapsamında Avrupa Birliği (AB) trendleri dikkate alınarak oluşturulacak iki senaryo yardımıyla öngörülmesi hedeflenmiştir. Ayrıca bu model ile AB hedeflerinin ve ek önlemlerin uygulanabilirliğine göre Türkiye'nin net sıfır emisyon hedefinde ulaştırma sektörünün katkısının nasıl olabileceğinin gösterilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmada geliştirilen model olan Türkiye Ulaştırma Sektörü Enerji Modeli'nin (TUSEM) yapısı, uluslararası proje ekibi ve Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) bünyesindeki enerji modelleme grubu tarafından hazırlanan ve ETKB kullanımına sunulan Türkiye için Enerji Sistemi Modeli'ne (EST) dayanmaktadır. EST modeli, AB'deki birçok ülke tarafından enerji modellemesinde kullanılan Fiyat Kaynaklı Piyasa Dengesi Sistemi (PRIMES) enerji modeli alt yapısını kullanmaktadır [15].

PRIMES, enerji tüketicilerinin ve enerji tedarik sistemlerinin farklı ekonomik gelişmelere, dış kısıtlamalara ve faktörlere AB enerji sistemine tepkisini simüle etmektedir. Karar verme davranışı ileriye dönük olup mikroekonomik teoriye dayanmaktadır. PRIMES, enerji talebini, arzını ve emisyon azaltma teknolojilerini açıkça temsil etmekte ve bir dizi teknolojiyi içermektedir. Model, çeşitli sektörlerin enerji tüketimini, dönüşümünü ve arzını, ilgili maliyetleri ve piyasa fiyatlarını belirlemektedir. Aşağıdan yukarıya mühendislik modelleme yönleriyle birlikte yukarıdan aşağıya davranışsal modellemenin dinamiklerini yakalamaya çalışan PRIMES, doğrusal olmayan karma tamamlayıcılık yaklaşımını esas almaktadır [16,17].

EST modeli, Genel Cebirsel Modelleme Sistemi'nde (GAMS) geliştirilmiş olup, detaylı enerji sistemi projeksiyonları, enerji talep tahmini ve enerji sektörü planlaması ile ulusal iklim ve enerji politikası kararlarının etki değerlendirmesi için tek bir ülke modeli olarak tasarlanmış olup tam teşekküllü bir enerji talep ve arz modelidir.

Çalışmanın geri kalan kısmı aşağıdaki gibi düzenlenmiştir: Bölüm 2, çalışmada kullanılan modele benzer çalışmaların yer aldığı literatür araştırmasını sunmaktadır. Bölüm 3, modelin teknik olmayan kısa bir açıklamasını, modelde kullanılan verileri ve buna göre gerçekleştirilen kalibrasyonu sunarak modelde kullanılan senaryoların tasarımını gösterir. Bölüm 4 model sonuçlarını sunarken, Bölüm 5 ortaya çıkan sonuçlar için politika etkilerini sunar ve çalışmayı sonuçlandırır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE RESEARCH)

Avrupa Komisyonu, Yeşil Mutabakat paketinin bir parçası olarak belirlediği politika belgesinde 2050 yılına kadar iklim nötrlüğünü taahhüt etmekte ve 2030 yılına kadar %55 sera gazı azaltımı hedefleyerek Avrupa İklim Yasası teklifine ve dolayısıyla ona eşlik eden ayrıntılı etki değerlendirmesine atıfta bulunmaktadır [18]. Etki Değerlendirmesi PRIMES modelini kullanan bir enerji modeli simülasyonu aracılığıyla Avrupa enerji sistemi için gelecek projeksiyonları sağlamaktadır [19].

Avrupa'da yüzyılın ortalarında CO₂ net nötrlüğünü elde etmek amacıyla aranan alternatif yollar için kullanılmış olan PRIMES modelinde yolcu ve yük taşımacılığı ve tüm taşıma modları (karayolu, demiryolu, havacılık, iç seyrüsefer) değerlendirilmiştir. Her ulaşım türü, çeşitli araç teknolojileri ve yakıt seçenekleri ile karakterize edilmiştir. Modelde, LPG, CNG, LNG, çeşitli biyoyakıt karışımlarının yanı sıra elektrik ve hidrojeni içeren alternatif yakıt altyapısını temsil ederken, menzil kaygısı da dahil olmak üzere davranışsal unsurlar da simüle edilmiştir [20].

PRIMES enerji sistemi modeli, 2050'de AB'de sera gazı emisyonlarının %80 oranında azaltıldığı çeşitli senaryoları değerlendirmek için kullanılmıştır [21]. 29 Avrupa ülkesinin yanı sıra Kuzey Afrika ve Orta Doğu'daki ülkeleri içeren LİMES-EU + modeli, 2050 yılına kadar %90'luk bir emisyon azaltımını incelemek için kullanılmıştır [22]. Elesplan-m güç sistemi modeli, 2050 yılına kadar elektrik sektöründeki sera gazı emisyonlarının 1990'a göre %98,4 oranında azaltılacağı kısıtlaması altındaki tüm ENTSO-E üye devletleri için 2050'ye doğru uygun maliyetli yolları incelemek için kullanılmıştır [23]. AB Komisyonu tarafından yaptırılan

bir PRIMES çalışması, 2018 tarihli 2030 AB İklim ve Enerji Paketini incelemiştir [24].

PRIMES enerji modelinin kullanıldığı çalışmada AB28 enerji ve ekonomik sisteminin 2050'ye giden bir karbondan arındırma yolu altında dönüşümü araştırılmakta ve Avrupa'nın dekarbonizasyon yolunun makroekonomik sonuçlarını iki farklı küresel iklim eylemi yörüngesi altında değerlendirilmektedir [25]. Yüzyılın ortasına kadar iklim nötrlüğüne ulaşmak için AB'nin ulaşım sektörünü karbondan arındırmasının gerekmekte olduğu belirtilen çalışmada geçiş seçenekleri olarak elektrifikasyon, biyoyakıtlar, hidrojen ve e-yakıtları (sentetik yakıtlar) değerlendirilmekte ve AB ulaşım sektörünün karbonsuzlaştırılma potansiyeli ortaya çıkarılmaktadır. Bunu yapmak için, PRIMES-TREMOVE ulaşım modeli kullanılmıştır [26].

Türkiye'de son birkaç yılda ulaştırma sektöründe enerji kullanımının önemli derecede artış göstermesi nedeniyle enerji yönetimi ve tahmini çalışmaları hız kazandırıldığı belirtilen çalışmada "Yapay Sinir Ağları" kullanılarak Türkiye'nin ulaştırma enerji talebini tahmin etmek için farklı modeller kurulmuştur [27]. Türk enerji sistemini yansıtabilecek şekilde doğrusal bir optimizasyon modeli olarak tasarlanan Boğaziçi Üniversitesi Enerji Modellemesi Sistemi (BUEMS) ile elektrikli araç kullanımının Türkiye'de elektrik üretimi ve CO₂ emisyonları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir [28].

3. METEDOLOJİ (METHODOLOGY)

3.1. Model Girdileri (Model Input)

Modelde kullanılan değişkenlere ilişkin açıklamalar Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Değişken tanımları (Variable definitions)

Nüfus	Ülkede yaşayan kayıtlı vatandaşların toplam sayısını gösterir.
GSYİH	Belirli bir zamanda ülke sınırları içinde üretilen tüm nihai mal ve hizmetlerin parasal değerini ifade eder.
Araç Stokları	Türkiye'de kara, deniz ve hava yolcu ve yük taşımacılığında kullanılan araç tiplerinin sayısını ifade eder.
Yolcu-km (pkm)	Bir yolcunun bir kilometre mesafeden taşınmasıyla elde edilen trafik ölçüm birimini ifade eder.
Araç-km	Bir motorlu kara taşıtının bir kilometre mesafedeki hareketi ile elde edilen trafik ölçüm birimini ifade eder.
Ton-km (tkm)	Bir ton yükün bir kilometre mesafeye taşınmasıyla elde edilen trafik ölçüm birimini ifade eder.
Özel Enerji Tüketimi	Bir aracın km başına enerji tüketimini ifade eder (kWh/araç-km). Kalibrasyon, 2018 Türkiye Enerji Dengesi Tablosundaki değerlere göre gerçekleştirilir.
Yatırım Maliyeti	Bir araç satın almak için tahakkuk ettirilmesi gereken tek seferlik maliyeti ifade eder.
İşletme ve Bakım Maliyeti	Hizmetten çıkarma sırasındaki hurda fiyatının, bir aracın kullanım ömrü boyunca işletme maliyeti ve onarım bakım maliyetinin toplamından düşülmesiyle elde edilen maliyeti ifade eder.
Kullanım ömrü	Bir araç hurdaya çıkarılmadan önce trafikte geçirilen ortalama süreyi (yıl) ifade eder.
Emisyon Faktörü	Bu, faaliyet verilerinin sera gazına dönüştürülmesini sağlayan katsayıyı ifade eder. Başka bir deyişle, belirli bir kaynağın faaliyet birimleri ve süreçleri tarafından ortalama emisyon oranıdır.
Karbon ve Verimlilik Değeri	Bir aracın km başına tükettiği enerjiyi (kwh/km) ve CO ₂ 'yi (gr CO ₂ /km) ifade eder.
Yatırım Sübvansiyonları	Yeni verimli teknolojilerin sermaye maliyetlerini düşüren katsayıyı ifade eder.
Karbon Fiyatı	Ulaşım modları için emisyon maliyetlerini ifade eder.
İndirim Oranları	Yatırımların yıllık ödeme oranlarını ifade eder.
CO ₂ ve Verimlilik Standartları	Ekipman/teknoloji bileşenlerini tanımlamak için karbon ve verimlilik hedefleri (EURO standartları paradigması)
Yakıt Yasağı	Belirli son kullanımlarda yakıt tüketimi kısıtlanması.
Yaparak Öğrenme Endeksi	Üretim sürecindeki belirsizliklerin ortadan kaldırılması nedeniyle yeni teknolojilerin sermaye maliyetlerinin azaltılmasını temsil eder.
Davranış Değişikliği	Doluluk oranının artırılması ve araç paylaşımı ve toplu taşımaya geçilmesi.
Doluluk Oranı	Bir araçtaki ortalama yolcu/yük sayısını ifade eder.

3.2. Modelin Yapısı (Structure of the Model)

Bu çalışmada, Türkiye’de kara ve demir yollarında faaliyet gösteren yolcu ve yük araçlarının 2018 yılı istatistik verileri üzerinden modelin kalibre edilmesiyle 2025-2050 yılları için enerji modellemesi yapılmıştır. Modelleme çalışmasında kullanılacak veriler Türkiye resmi kurumlarından ve IEA, Avrupa Birliği İstatistik Ofisi (EUSTAT) vb. uluslararası veri tabanları ve raporlarından elde edilmiştir.

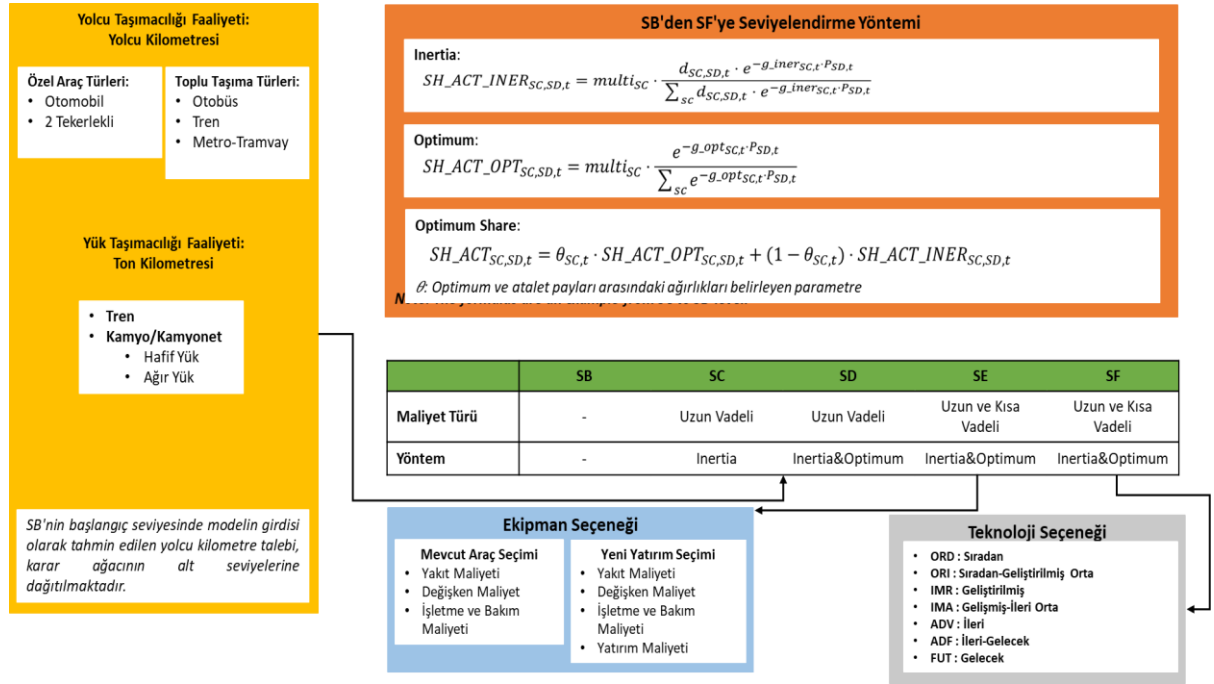
TUSEM, EST modelini temel alarak, enerji tüketicilerinin ulaştırma sektörüne yönelik yolcu ve yük

talebi ihtiyaçlarını, geçmiş alışkanlıklarını ekonomik, sosyal ve politik kısıtlamalarla değerlendirerek simüle etmektedir. Bunun için yolcu ve yük talepleri, iki alt sektör faaliyeti, iki tedarik süreci faaliyeti ve bir teknoloji düzeyinde faaliyet olmak üzere toplam beş seçim seviyesine ayrılmıştır (Çizelge 2). Ayrışma SB düzeyinin aktivite enerjisinden başlayarak, her bir alt sektöre özgü hiyerarşik bir yuvalama ağacı boyunca gerçekleştirilmiştir.

Maliyet minimizasyonunun yanı sıra davranışsal modelleme dinamiklerini yakalamaya çalışan TTSEM

Çizelge 2. EST-TUSEM ağaç diyagramı (EST-TTSEM tree diagram)

	Alt sektör Faaliyeti			Tedarik süreçleri		Teknoloji				
	Sb	Sc	Sd	Se	Sf					
Yolcu	Yolcu Taşımacılığı	Özel Yolcu Taşımacılığı (PSPRV)	Özel Araçlar	Elektrikli Özel Arabalar	Elektrikli Arabalar	Olağan Olağan İyi İyi Geliştirilmiş İleri Gelecek Gelecek				
				H ₂ Özel Araçlar	H ₂ Arabalar					
				ICE Özel Araçlar	Dizel Arabalar					
					Benzinli Arabalar					
					Gazlı Arabalar					
				Plug-In Hibrit Özel Araçlar	Plug-In Hibrit Dizel Otomobiller					
		Plug-In Hibrit Benzinli Otomobiller								
		2 Tekerlekli	Benzinli 2 Tekerlekli	Benzinli 2 Tekerlekli						
			Elektrikli 2 Tekerlekli Araçlar	Elektrikli 2 Tekerlekli Araçlar						
		Toplu Yolcu Taşımacılığı	Metro, Tramvay Rayı	Metro, Tramvay Rayı	Metro-Tramvay Rayı		Elektrikli Metro/Tramvay Rayı			
				Toplu Karayolu Taşımacılığı	Elektrikli Toplu Karayolu Taşımacılığı		Elektrikli Toplu Karayolu Taşımacılığı			
					H ₂ Toplu Karayolu Taşımacılığı		H ₂ Toplu Karayolu Taşımacılığı			
			ICE Toplu Karayolu Taşımacılığı		Dizel Toplu Karayolu Taşımacılığı					
			Raylı Yolcu Taşımacılığı	Yavaş Raylı Yolcu Taşımacılığı	Yavaş Raylı Yolcu Taşımacılığı		Dizel Yavaş Raylı Yolcu Taşımacılığı	Dizel Yavaş Raylı Yolcu Taşımacılığı		
Elektrikli Yavaş Raylı Yolcu Taşımacılığı	Elektrikli Yavaş Raylı Yolcu Taşımacılığı									
H ₂ Raylı Yolcu Taşımacılığı	H ₂ Raylı Yolcu Taşımacılığı									
Hızlı Demiryolu Yolcu Taşımacılığı	Hızlı Demiryolu Yolcu Taşımacılığı	Elektrikli Hızlı Demiryolu Yolcu Taşımacılığı								
Yük	Yük Taşımacılığı	Demiryolu Yük Taşımacılığı	Demiryolu Yük Taşımacılığı	Dizel Raylı Yük Taşımacılığı	Dizel Raylı Yük Taşımacılığı	Olağan Olağan İyi İyi Geliştirilmiş İleri Gelecek Gelecek				
				Elektrikli Raylı Yük Taşımacılığı	Elektrikli Raylı Yük Taşımacılığı					
		Yük Ağır Hizmet Araçları (HDT)	Yük Ağır Hizmet Araçları (HDT)	Yük Ağır Hizmet Araçları (HDT)	Elektrikli Ağır Hizmet Araçları		Elektrikli Ağır Hizmet Araçları			
					H ₂ Ağır Hizmet Araçları		H ₂ Ağır Hizmet Araçları			
					Dizel Ağır Hizmet Araçları		Dizel Ağır Hizmet Araçları			
					Gazlı Ağır Hizmet Araçları		Gazlı Ağır Hizmet Araçları			
					Yük Hafif Hizmet Araçları (LDT)		Yük Hafif Hizmet Araçları (LDT)	Yük Hafif Hizmet Araçları (LDT)	Elektrikli Hafif Hizmet Araçları	Elektrikli Hafif Hizmet Araçları
									H ₂ Hafif Hizmet Araçları	H ₂ Hafif Hizmet Araçları
		Dizel Hafif Hizmet Araçları	Dizel Hafif Hizmet Araçları							
		Benzinli Hafif Hizmet Araçları	Benzinli Hafif Hizmet Araçları							
		Plug-In Hibrit Hafif Hizmet Araçları	Plug-In Hibrit Hafif Hizmet Araçları	Plug-In Hibrit Hafif Hizmet Araçları	Plug-In Hibrit Dizel Hafif Hizmet Araçları		Plug-In Hibrit Dizel Hafif Hizmet Araçları			
					Plug-In Hibrit Benzinli Hafif Hizmet Araçları		Plug-In Hibrit Benzinli Hafif Hizmet Araçları			



Şekil 1. EST modelinde TTSEM ile ilgili faaliyetlerin dağıtım adımları (Distribution steps of activities related to TTSEM in EST model)

doğrusal olmayan karma tamamlayıcılık yaklaşımına dayanmaktadır [17]. TTSEM'in hesaplama sırası aşağıdaki gibidir (Şekil 1).

i) SB seviyesinin aktivite talebi girdi olarak dışsal olarak belirlenir.

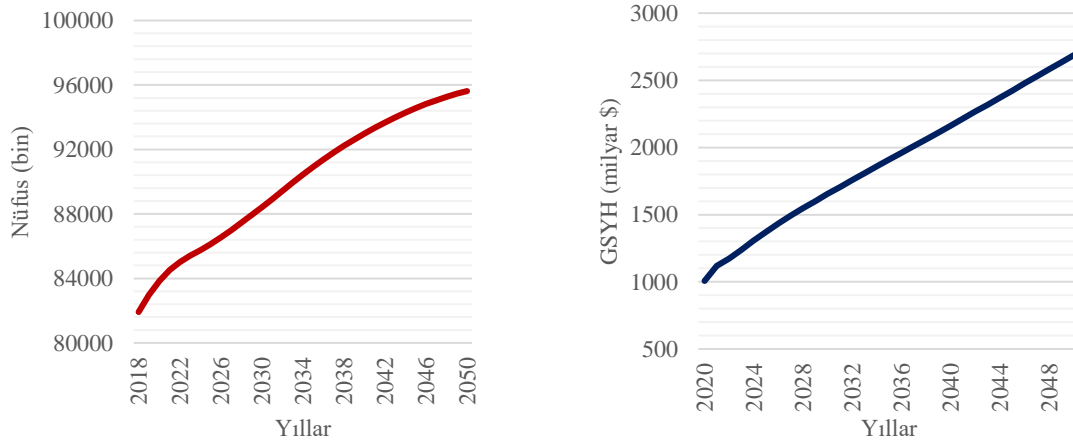
ii) Faaliyet talebi, SB'den SD'ye karar ağacının seviyelerine dışsal olarak tahsis edilir. Bu tahsis genellikle belirli politikalara göre yapılır. Örneğin karayolu yolcu taşımacılığında PKM'de toplu taşıma oranının belirli yıllarda %30'a çıkarılması/azaltılması.

iii) SE'den SF'ye faaliyet talebi, Şekil 1'de açıklandığı gibi hem temel yıl tercihlerine (atalet) hem de maliyet minimizasyon kriterlerine (optimal) göre logit fonksiyonları kullanılarak tanımlanır. Buna göre, fonksiyona eklenen belirleyici değişken maliyettir.

iv) SF düzeyinde model, yine logit fonksiyonlarını kullanarak gerekli yatırımları hem atalet hem de optimum kriterlere göre uzun vadeli maliyetler ve kısa vadeli maliyetler olarak hesaplar. Ayrıca bu seviyede faaliyet talebini karşılamak için ekipman tipi karışımı ve ilgili yakıt karışımı belirlenir

3.3. Veri Analizi ve Faaliyet Projeksiyonları (Data Analysis and Activity Projections)

TÜİK tarafından açıklanan pkm verileri sadece şehirlerarası seyahatleri kapsamaktadır. Hafif yük taşıma araçları da tkm verilerinin kapsamı dışındadır. Bu anlamda ülke içindeki tüm hareketliliği yansıtacak yolcu-ton km için, araç sayısı ve bir aracın yılda kat ettiği ortalama kilometre [29], bazı AB ülkelerinde binek otomobillerin doluluk oranları [30], karayolu yük



Şekil 2. Nüfus değişimi ve ekonomik büyüme (Population change and economic growth)

taşımacılığı modlarındaki kapasite faktörleri [31] analiz edilmiştir. Daha sonra mevcut yolcu-ton km değerleri genelleştirilmiştir. Türkiye'nin nüfus projeksiyonu için TÜİK'in 2018-2080 Nüfus Projeksiyonu Çalışması senaryosu bazı alınarak yıllık bileşik büyüme oranı düşük senaryoda %0,5 kabul edilmiş olup 2018-2050 yılı arası nüfus görünümü Şekil 2'de gösterilmektedir [32]. Ayrıca Türkiye'nin ekonomik büyüme projeksiyonu için ise 2060 yılına kadar olan OECD büyüme senaryosu baz alınarak yıllık bileşik büyüme oranı %2,5 kabul edilmiş olup 2018-2050 yılı arası ekonomik büyüme görünümü Şekil 2'de gösterilmektedir.

Pkm ve tkm verilerinin projeksiyon yılı tahminleri 2000-2018 yılları baz alınarak yapılmış olup, bazı gelişmiş ülkelerin zaman içinde kişi başına düşen km ile kişi başına düşen GSYH arasında doğrusal bir ilişki gösterdiği değerlendirilmiştir. Kişi başına düşen GSYH belli bir seviyeden sonra artsa bile, kişi başına düşen km değerinin sabit olduğu gözlenmiştir (Şekil 3) [33-35].

Literatür araştırması ve regresyon analizi sonucunda, pkm/tkm verilerinin belirli bir ekonomik büyüme düzeyinden sonra durağanlık noktasına yaklaşacağını varsayan lojistik eğri fonksiyonunun en iyi tahmin yöntemi olduğuna karar verilmiştir (Şekil 4) [36]. İlgili durağanlık noktası, nüfus projeksiyonundaki büyüme hızının durağanlaştığı yıllara denk gelmekte olup, ayrıca

bu nokta Şekil 3'te yer alan gelişmiş ülkelerin kişi başına düşen km değerleri ile de paralellik göstermektedir.

3.4. Kalibrasyon (Calibration)

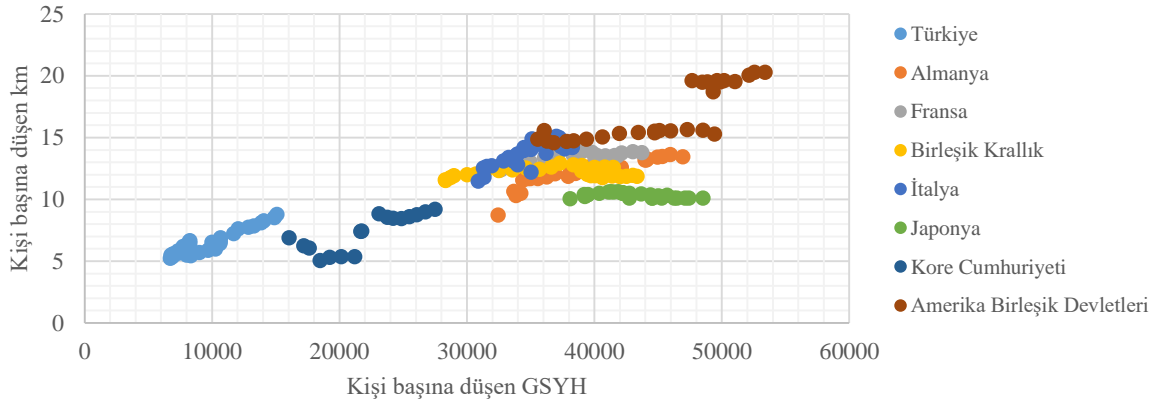
Modelin ana girdisi olan aktivite, pkm-tkm cinsinden belirlenir. Temel yıldaki doluluk oranı ile faaliyet, stok ve kilometreye göre hesaplanan kapasite faktörü için AB ortalamaları arasında tutarlılık sağlanmaya çalışılmıştır [30]. Son olarak model 2018 yılının enerji dengesi tablosuna dayanan model seviyelerine dayalı olarak spesifik enerji tüketimi (SEC) oranları (kWh / km) hesaplanarak kalibre edilmiştir [8]. Kalibrasyon için Eşitlik 1 ve Eşitlik 2'de verilen formüller kullanılmıştır.

$$\text{Aktivite} = \text{Stok} \times \text{Kilometre} \times \text{Doluluk Oranı} \quad (1)$$

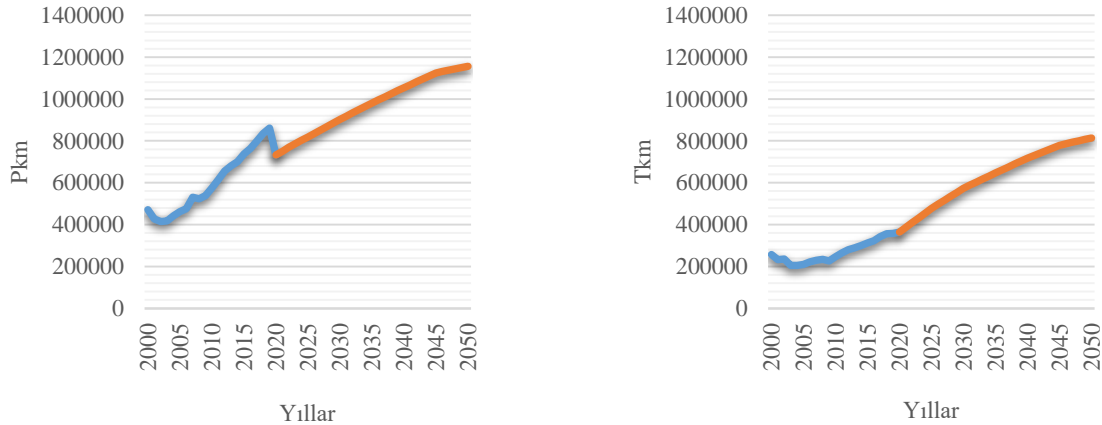
$$\text{SEC oranı} = \text{Nihai Enerji} \times \text{Doluluk oranı} / \text{Etkinlik} \quad (2)$$

3.5. Mevcut Durum, Politikalar ve Senaryo Varsayımları (Current Situation, Policies and Scenario Assumptions)

Türkiye son zamanlarda karayolu ve demiryolu taşımacılığında çeşitli projelerle bu modların pkm'sinde önemli gelişmeler kaydetmiştir. Karayolu taşıtları ve trenler için pkm 2000-2018 yılları arasında büyük ölçekli



Şekil 3. Kişi başına düşen GSYH ile kişi başına düşen km arasındaki ilişki (Relationship between GDPs per capita and km per capita)



Şekil 4. Pkm ve tkm projeksiyonu (Pkm and tkm projection)

yol projeleri ve artan tren kullanımı ile sırasıyla %75 ve %53 artmıştır. Son 20 yılda bölünmüş yolların uzunluğu 6.000 km'den 28.260 km'ye, karayollarının uzunluğu ise 62.000 km'den 68.526 km'ye yükselmiştir. 2035 yılına kadar 13 proje ve ilave 3.726 kilometre otoyolun hayata

geçirilmesi planlanmaktadır. Yüksek hızlı trenler, şu anda faaliyette olan 4 rota ve yapım aşamasında olan 3 rota ile buna katkıda bulunmaktadır. Gelecekte yeni hızlı tren ağına bağlı il sayısının 8'den 52'ye çıkarılması hedeflenmektedir. Elektrifikasyonun artırılması (var olan

Çizelge 3. Türkiye'nin ulaştırma sektörü için bazı politikalar ve hedefler (Some policies and targets for Turkey's transport sector)

<i>Ulusal İklim Değişikliği Eylem Planı 2011-2023 [39]</i>	<i>INDC 2015 [40]</i>
<ul style="list-style-type: none"> ✓ 2023 yılına kadar demiryollarının yük taşımacılığındaki (2009'da %5) payının %15'e, yolcu taşımacılığındaki (2009'da %2) payının %10'a çıkarılması ✓ 2023 yılına kadar karayolunun yük taşımacılığındaki payının %60'ın altına, yolcu taşımacılığındaki payının ise %72'ye düşürülmesi 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Karayolu taşımacılığının payının azaltılması, deniz ve demiryolu taşımacılığının payının artırılması ✓ Alternatif yakıtların ve temiz araçların teşvik edilmesi ✓ Yüksek hızlı demiryolu projelerinin gerçekleştirilmesi ✓ Kentsel raylı sistemlerin artırılması
<i>Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı 2017-2023 [41]</i>	<i>Yeni özel araçlar ve kamyonetler için CO₂ emisyonu performans standartları ve ağır hizmet taşıtları için CO₂ emisyonu performans standartları [42]</i>
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Vergi avantajları da dahil olmak üzere enerji verimli araçların teşvik edilmesi ✓ Alternatif yakıtlar ile yeni teknolojileri karşılaştıran çalışmalar geliştirmek ✓ Deniz ve demiryolu taşımacılığının güçlendirilmesi 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Yönetmelik, 2020, 2025 ve 2030'dan itibaren emisyon hedefleri belirlemekte ve sıfır ve düşük emisyonlu araçların satın alınması için teşvikler sağlamaktadır. Bir araç üreticisinin filoları belirli bir emisyon hedefini aşarsa, üreticinin para cezası ödemesi gerekir. ✓ Türk ihracatı için doğrudan bir zorunluluk yoktur, ancak Türk ihracatının AB talebindeki payını koruyabilmesi için Türkiye'de üretilen araçların bu hedeflere uyması gerekecektir. ✓ Üye devletler, bir otomobilin yakıt verimliliğini ve CO₂ emisyonlarını gösteren bir etiket de dahil olmak üzere tüketicilere ilgili bilgilerin sağlanmasını sağlamalıdır. ✓ Türkiye ihracatı için doğrudan bir gereklilik yoktur, ancak rakiplerine göre nispeten daha az yakıt verimliyse/daha fazla CO₂ yayarlarsa, Türk ihracatına yönelik talep payını azaltabilirler. ✓ Fransa, 2040'ta içten yanmalı motorlu arabaların satışını yasakladı. 2030 yılına kadar ulaşım için %28'lik bir emisyon azaltma hedefi belirleyen Fransız LTS (2015'e kıyasla), ICE ve elektrikli kişisel araçlar [44] dahil olmak üzere yeni arabalar için yakıt performansı hedefleri belirliyor [45]. ✓ Almanya LTS, 2030 yılına kadar taşımacılık için %40-42'lik bir emisyon azaltma hedefi belirliyor (1990'a kıyasla). 2021'de başlatılan ulaşım ve binalar için ulusal ETS, bu hedefi desteklemektedir [46].
<i>Birleşik Krallık Ulaştırma karbonsuzlaştırma planı ve Birleşik Krallık Uzun Vadeli Stratejileri [43]</i>	
<ul style="list-style-type: none"> ✓ 2030'dan itibaren yeni benzinli ve dizel otomobil satışı olmayacak, 2035'ten itibaren daha küçük dizel kamyonların satışı ve 2040'a kadar daha büyük dizel kamyonların satışı yasaklanacak 	
<i>2053 Ulaştırma ve Lojistik Master Planı (2022) [37]</i>	
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Demiryollarında yolcu payının %1,0'dan %6,20'ye, yük taşımacılığının payının ise %5,1'den %21,9'a çıkarılması ✓ Hızlı tren bağlantısı olan il sayısını 52'ye çıkarmak ✓ İhtiyaç duyulan toplam enerjinin %35'ini yenilenebilir enerji kaynaklarından üretmek ✓ Enerji Verimliliği için altyapının oluşturulması 	

Çizelge 4. Sınıflandırılmış kaldıraçlar (Classified leverages)

Verimlilik iyileştirmeleri	Şehirlerarası ve şehir içi ulaşımında toplu taşıma ve demiryolu taşımacılığına geçiş
Elektrikli Araç ve Yakıt Hücresiz Elektrikli Araçlar	Aktif taşımaya doğru modal geçiş
Biyoyakıtlar	Yük taşımacılığı için karayolundan demiryoluna geçiş

Çizelge 5. Senaryolara dayalı politikalar ve hedefler (Scenario-based policies and objectives)

<i>Senaryolar</i>	<i>2055 Politika 1 (Yakıt ve Teknoloji Tabanlı)</i>	<i>2055 Politika 2 (Ulaştırma Türü ve Modları Esaslı)</i>
<i>Net Sıfır Emisyon Sınırlaması (NSES)</i>	İçten Yanmalı Motor Teknolojilerinde yeni girişlerin Kısıtlanması; 2030 (Tren) - 2035 (Özel Araçlar - Hafif Yük Ticari Araçlar) - 2040 (Toplu Taşıma Araçları) - 2045 (Ağır Yük Ticari Araçlar)	Havacılık hariç yolcu taşımacılığında pkm oranı: Özel Araçlar için %50, Otobüs ve Minibüsler için %30, Trenler için %20. Yolcu ve ton km'de gemi taşımacılığının oranının sabit olduğu varsayıldı, Havacılık oranı %4'ten %4,5'e yükseltildi
	İçten Yanmalı Motor teknolojilerinde Biyoyakıt kullanımının 2030'dan itibaren %5'e çıkarılması CO ₂ standartlarının 2030'dan itibaren EU6 ve AB'deki yüzde azaltma hedefleri şeklinde güncellenmesi (2025'e kadar %15, 2030'a kadar %30 azalma)	Yük taşımacılığında araç oranı tkm: Karayolu Taşıtları için %62, Trenler için %30
<i>Mevcut Politikalar Senaryosu (MPS)</i>	Motor teknolojisi kısıtı yok	Mevcut araç modlarının paylarında değişiklik yok
	İçten Yanmalı Motor teknolojilerinde Biyoyakıt kullanımının 2040'dan itibaren %5'e çıkarılması	
	CO ₂ standartları yok 2035 yılına kadar yollardaki elektrikli araç sayısı, toplam araç sayısının %15'i olması	

demiryollarının $\leq 50\%$’si), demiryolu emisyonlarının 2000 yılında 0,7 Mt CO₂’den 2020 yılında 0,3 Mt CO₂’ye düşürülmesine katkıda bulunmuştur [37].

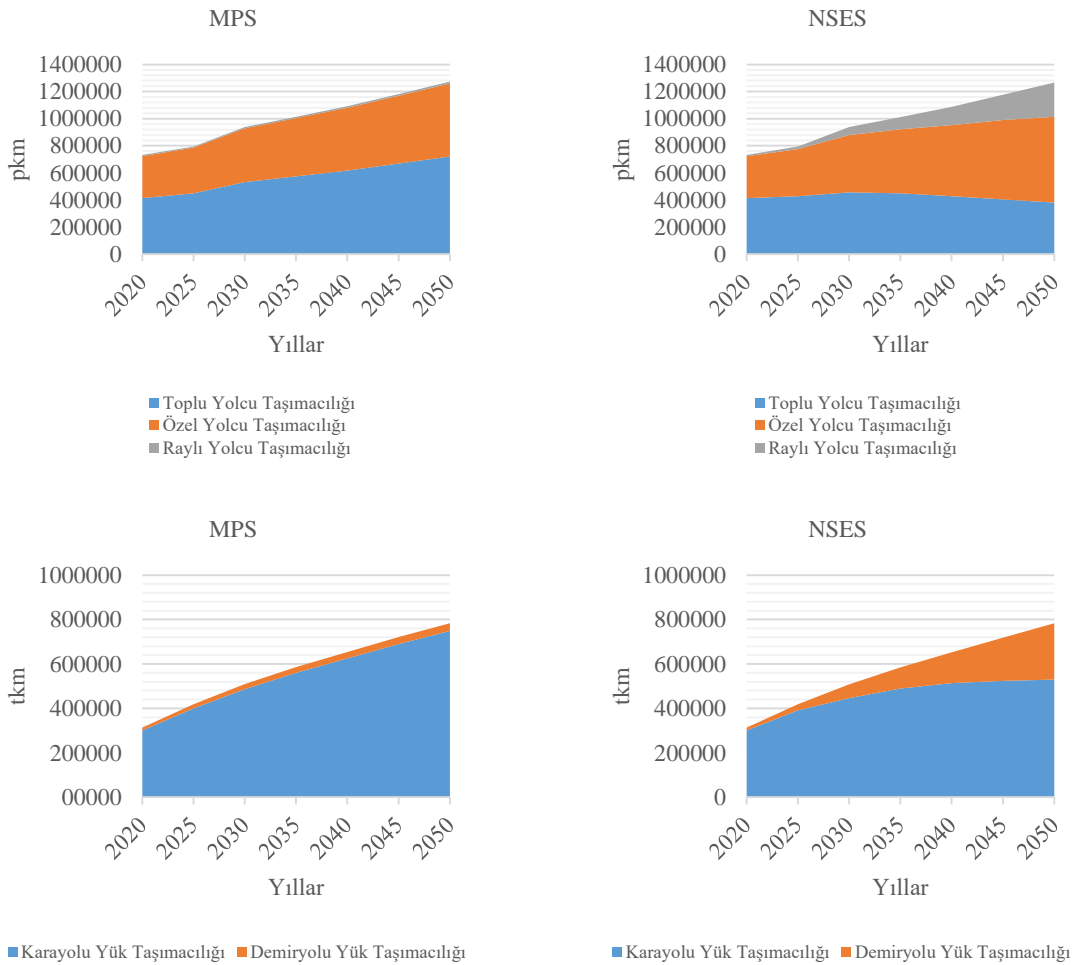
Bu çalışmada, AB ve Türkiye’nin net sıfır hedefi kapsamında belirlenen ve halen hazırlanmakta olan politika eylemleri, senaryo varsayımlarının temelini oluşturmaktadır. Türkiye’de ilgili hedef kapsamında resmi politikalar henüz tam olarak açıklanmamış olsa da açıklanacak yeni politikaların AB politika ekseninden uzaklaşmayacağı değerlendirilmektedir. Türkiye’nin son dönemde ulaştırma sektörü için resmi olarak belirlediği ve çeşitli raporlarda vurguladığı bazı politika ve hedefler Çizelge 3’te verilmiştir. Bu anlamda, ulaştırma sektöründeki emisyon azaltma potansiyelini gerçekleştirmek için sınıflandırılan çeşitli kaldıraçlar ise Çizelge 4’te verilmiştir [38].

Çizelge 5, mevcut politikalar, AB politikaları ve Fit for 55 gibi modelleme sonuçlarını içeren politikalar kapsamında Türkiye koşulları dikkate alınarak oluşturulan Mevcut Politikalar Senaryosu ve Net Sıfır Emisyon Senaryosu Politikalarının varsayımlarını göstermektedir [47].

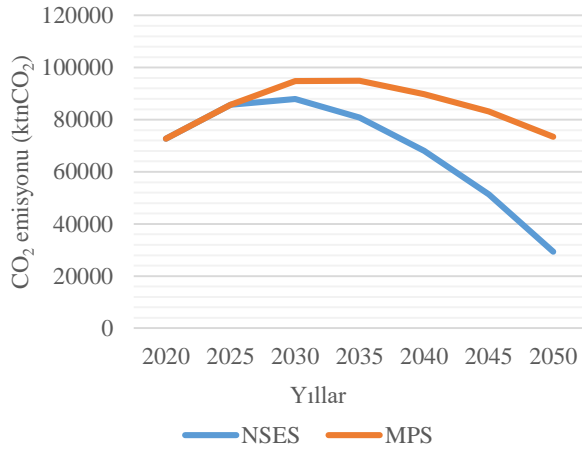
4. SONUÇLAR (RESULTS)

4.1. Yolcu ve Yük Talebi Aktivitelerinin Gelişimi (Development of Passenger and Freight Demand Activities)

TUSEM kapsamında, 2025-2050 döneminde MPS’de yolcu ve yük taşıma modlarının faaliyetlerinin dağılım oranlarında herhangi bir değişiklik öngörülmemiş olup NSES’de ve MPS’de yolcu taşıma modlarının faaliyet değişimi Şekil 5’te gösterilmiştir. Her iki senaryoda da araç sahipliği oranı AB standartlarıyla karşılaştırılmış ve NSES’deki karayolu toplu taşımacılığının payı, gelişmiş ülkelerde olduğu gibi azalan bir eğilim göstermiştir. Bu anlamda yolcu taşımacılığı faaliyetlerinde MPS’de toplu taşıma aktivitesinde artış yaşanırken, NSES’deki diğer taşıma modlarında da önemli artışlar meydana gelmektedir. NSES’deki taşımacılık faaliyetlerindeki artış esas olarak binek araç faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır. NSES senaryosunda, taşıma modları arasındaki aktivite ağırlıklı olarak demiryollarına doğru kaymakta ve karayolu yük taşımacılığı faaliyetleri önemli ölçüde azalmaktadır.



Şekil 5. MPS ve NSES için yolcu ve yük aktiviteleri (Passenger and freight activities for MPS and NSES)



Şekil 6. CO₂ emisyonu (CO₂ emissions)

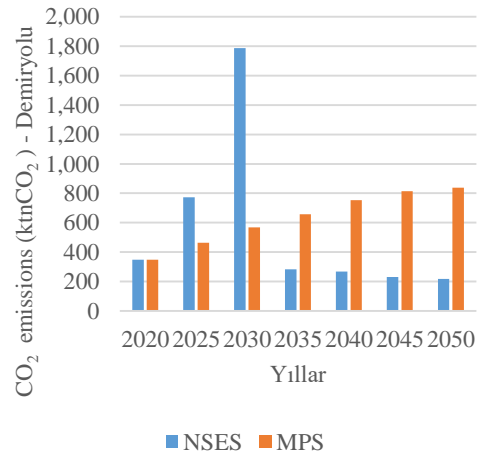
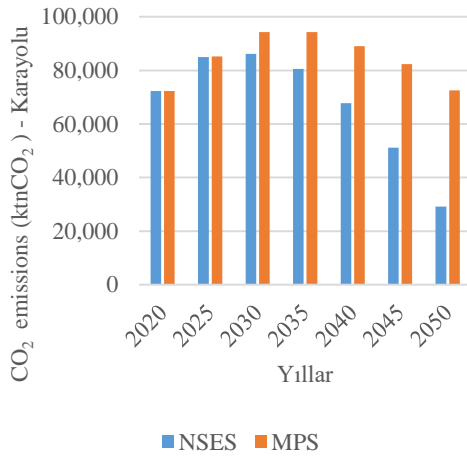
4.2. CO₂ Emisyonu (CO₂ Emissions)

Senaryolar arasındaki CO₂ emisyonları, NSES'deki politika önlemleri ve bunun sonucunda ortaya çıkan elektrifikasyon ile önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Şekil 6'da görüldüğü üzere, MPS'te

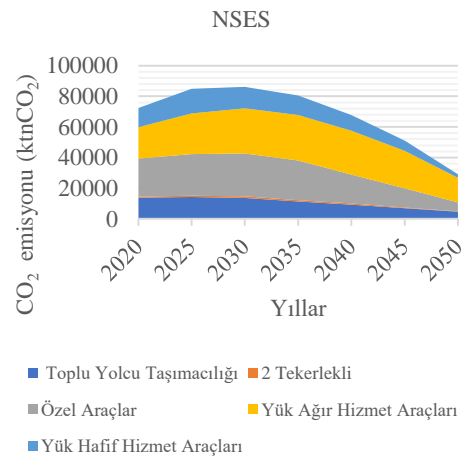
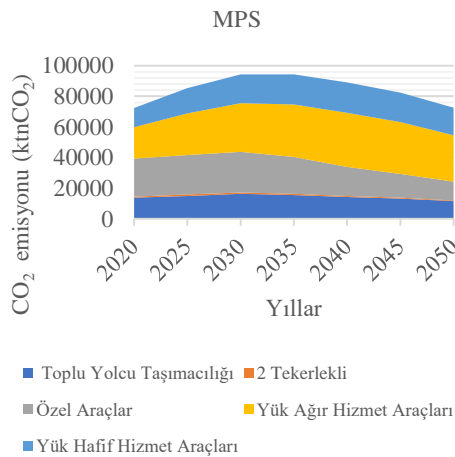
2035 yılında 94 mtn CO₂ ile zirveye ulaşan emisyon miktarı, 2050 yılına kadar yıllık ortalama %1,2 azalarak 73 mtn CO₂ seviyelerine ulaşmaktadır. NSES'de ise 2030 yılında 88 mtn CO₂ seviyelerine yükselen emisyon miktarı, 2050 yılına kadar yılda ortalama %5 oranında azalmakta ve 29 mtn CO₂ seviyelerine düşmektedir. Bu anlamda NSES'de 2020-2050 döneminde toplam CO₂ azaltım oranı %62'dir.

4.2.1. Taşıma Emisyonlarının Türleri ve Modları (Types and Modes of Transport Emissions)

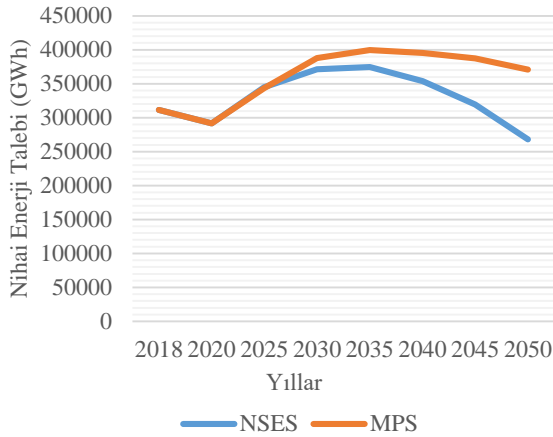
Şekil 7 incelendiğinde, karayolu taşımacılığı ulaştırma emisyonlarındaki toplam emisyonların yaklaşık %93'ünü, hava ve deniz yolu hariç toplam emisyonların ise %99'unu oluşturmaktadır. Projeksiyon dönemi boyunca hava ve deniz yol taşımacılığı etkisi model üzerinde büyük oranda sabit kabul edildiği için kara yolu taşımacılığının toplam emisyonlar içindeki payı MPS senaryosunda 2050'de %89'a, NSES'de ise %77'ye düşmektedir. Bu anlamda NSES'de demiryolu ulaşımının gelişiminin ve payının artırılması, demiryollarının senaryodaki hedef oranlar itibarıyla Türkiye ulaştırma sektöründe yaklaşık olarak %16'lık



Şekil 7. Taşıma türüne göre CO₂ emisyonları (CO₂ emissions by mode of transport)



Şekil 8. Araç tiplerine göre CO₂ emisyonlarındaki değişimler (Changes in CO₂ emissions by vehicle types)



Şekil 9. Senaryolar bazında nihai enerji talebi (Final energy demand by scenarios)

emisyona azaltma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. NSES’de ulaştırma modu emisyonlarında tüm yıllar boyunca emisyon azaltımlarındaki en çarpıcı fark, 21 mt CO₂ ile özel araçlar ve iki tekerlekli araçlardır. Bu modları sırasıyla 16 mt CO₂ ile yük ağır ve yük hafif hizmet araçları ve 10,5 mt

CO₂ ile toplu taşıma yolcu araçları izlemektedir (Şekil 8). Pkm içindeki özel araç oranının yıllar içindeki gelişiminin AB ortalamalarına gelmesi durumunda, bu moddaki elektrifikasyon ile emisyon azaltımı arasındaki ilişkinin daha da güçleneceği değerlendirilmektedir.

4.3. Yakıt Talebi Gelişimi (Fuel Demand Development)

Toplam nihai enerji talebi her iki senaryoda da 2035 yılına kadar artarak zirveye ulaşmakta ve sonraki yıllarda giderek azalmaktadır (Şekil 9). 2030-2055 yılları arasında MPS’te nihai enerji talebindeki yıllık ortalama azalış %0,5 olurken, özellikle emisyon standartlarının etkisi ve içten yanmalı motor teknolojilerinde yeni girişlerin kısıtlanması ile NSES’de nihai enerji talebindeki yıllık ortalama azalış %2,2 olarak gerçekleşmiştir (Şekil 10).

4.3.1. Yakıt ve Elektrifikasyon görünümü (Fuel and Electrification Outlook)

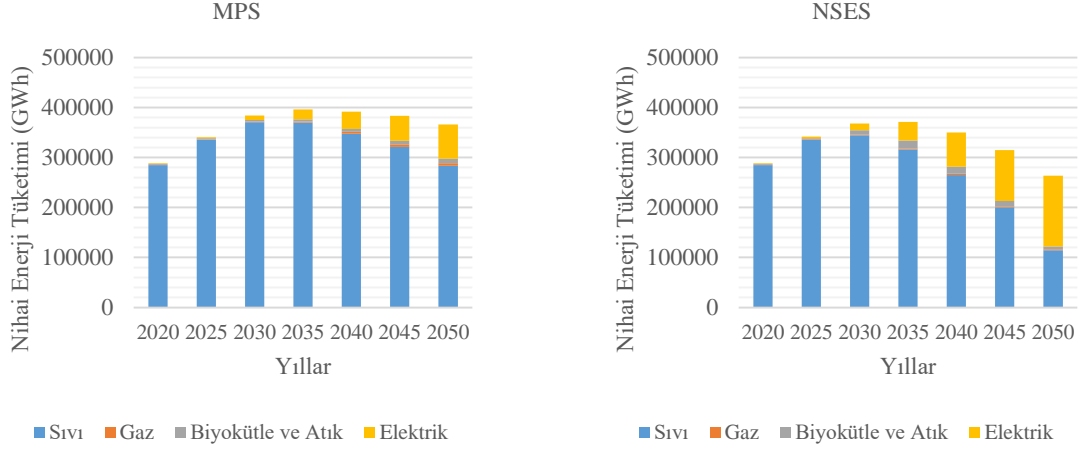
Senaryolar arasındaki enerji tüketimi yakıt bazında analiz edildiğinde sıvı yakıtların nihai enerji tüketimi içindeki



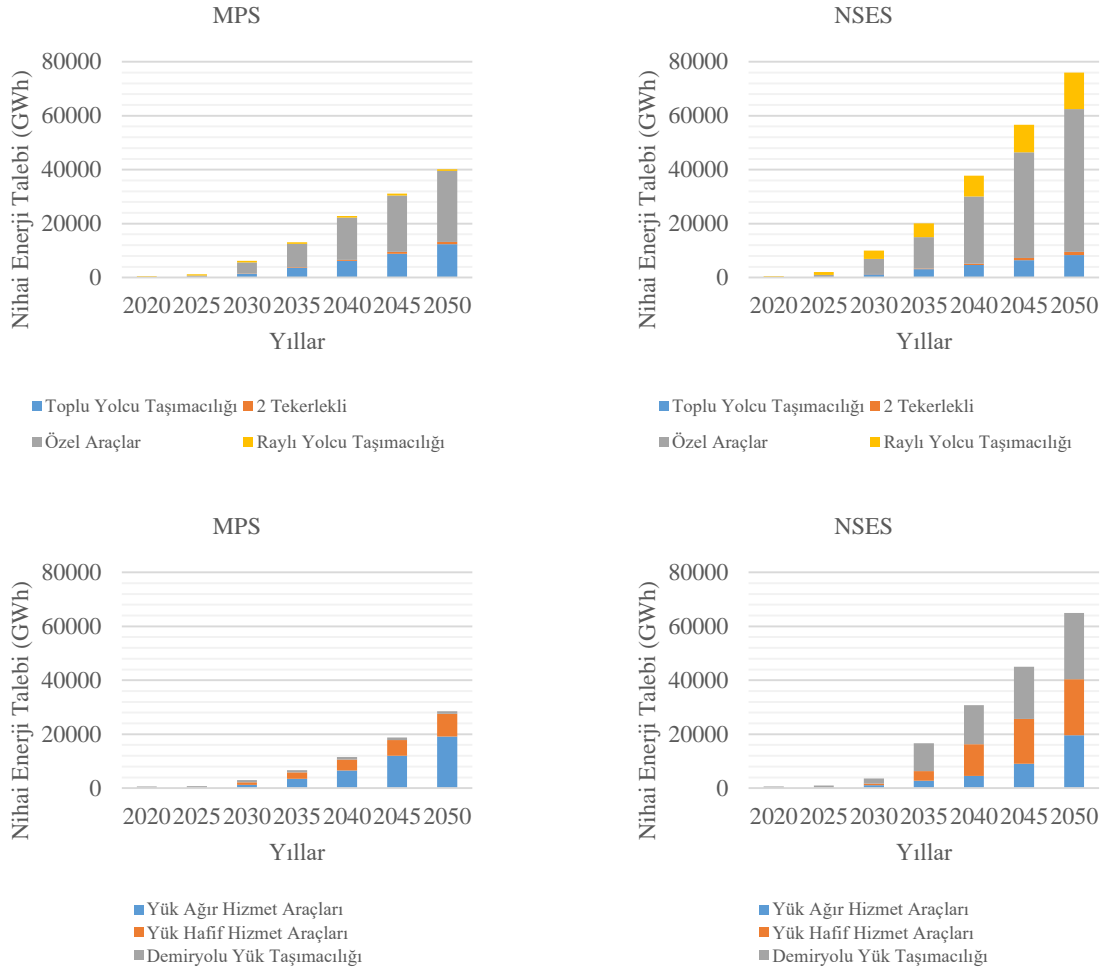
Şekil 10. MPS ve NSES’te ulaşım türünün nihai enerji talebi (Final energy demand of transport mode in MPS and NSES)

payı 2020-2050 döneminde MPS’te yaklaşık %98’den %77’ye düşerken, NSES’de yaklaşık %98’den %43’e düşmektedir. Her iki senaryoda da bu düşüşlerin önemli bir ikamesi olan elektrik enerjisinin projeksiyon yılları

boyunca toplam nihai enerji tüketimi içindeki oranları MPS’te yaklaşık %18’e ve NSES’de yaklaşık %54’e yükselmektedir (Şekil 11). NSES’deki bu elektrik talebi artışı aynı zamanda toplam nihai enerji tüketiminde de



Şekil 11. MPS ve NSES’te yakıt türüne göre nihai enerji tüketimi (Final energy consumption by fuel type in MPS and NSES)



Şekil 12. Yolcu ve yük taşımacılığının elektrik talebi (Electricity demand in passenger and freight transport)

Çizelge 6. Senaryolar Arası Duyarlılık Analizi (Sensitivity analysis results between scenarios)

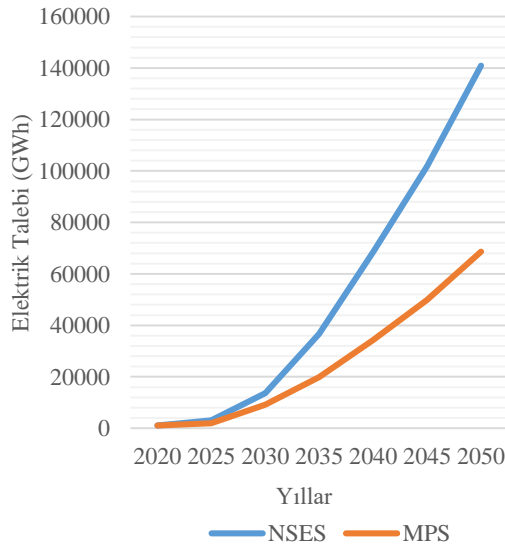
	Senaryolar	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Nihai Enerji Tüketimi (TWh)	MPS_4,5	358,4	435,3	452,5	449,9	442,8	427,6
	MPS_2,5*	343,5	387,6	399,5	395,4	387,4	370,7
	NSES_4,5	362,0	411,5	429,9	408,4	367,3	311,2
	NSES_2,5*	344,8	371,3	374,4	354,1	319,6	268,0
CO ₂ Emisyonları (mton)	MPS_4,5	90,3	107,3	108,3	103,0	96,0	85,7
	MPS_2,5*	85,7	94,9	94,9	89,8	83,1	73,4
	NSES_4,5	90,0	98,6	91,5	77,5	58,5	34,2
	NSES_2,5*	85,7	88,0	80,8	68,0	51,4	29,3

*Mevcut çalışma sonuçları

MPS'na göre yolcu taşımacılığında %15, yük talebinde ise %36 daha az enerji tüketimine neden olmuştur.

Bununla beraber toplamda da 100 TWh daha az enerji tüketimi gerçekleşmiş ve önemli bir verimlilik göstergesi olan enerji yoğunluğu artmıştır.

Şekil 12'de verilen elektrik tüketimi senaryolar bazında taşımacılık türleri bazında incelendiğinde 2050 yılında NSES'de elektrik talebinin yaklaşık %53'ü yolcu taşımacılığında, %47'si yük taşımacılığında gelmektedir. MPS'de bu oranlar sırasıyla %58 ve %42'dir. Senaryolar arasındaki araç modlarının elektrik tüketimi incelendiğinde, 2050 yılında NSES'de yolcu taşımacılığı elektrik talebinin %11'i karayolu toplu taşımacılığında, %18'si demiryolu taşımacılığında ve yaklaşık %70'i ise özel araç ve iki tekerlekli taşımacılıklarından karşılanmaktadır. MPS'te bu oranlar sırasıyla %31, %1,5 ve %67,5'tir. 2050 yılında NSES'de yük taşımacılığı elektrik talebinin ise %37'si demiryolu taşımacılığında, %32'si yük hafif hizmet araçları ve %31'i yük ağır hizmet araçları karşılanmaktadır. MPS'de bu oranlar sırasıyla %3, %30 ve %67'dir.

**Şekil 13.** Ulaştırma sektöründe elektrik talebi (Electricity demand in transport sector)

2050 yılında elektrik talebi MPS'te 69 TWh'ye, NSES'de ise 141 TWh'ye ulaşmıştır (Şekil 13). Bu anlamda net sıfır emisyon hedefleri kapsamında karayolu ve demiryolu taşımacılığında elektrik talebinin bugüne göre en az 140 kat artması, net sıfır emisyon hedefleri

olmasa bile bu talebin bugüne göre en az yaklaşık 70 kat artması beklenebilir

4.4. Duyarlılık Analizi (Sensitivity Analysis)

Geliştirilen modelde yolcu ve ton km aktiviteleri model sonuçları üzerinde doğrudan etkilidir. Bu aktiviteleri elde etmek için kullanılan GSYH, aktivite tahminleri için en önemli girdi konumundadır. Bu anlamda model sonuçlarının, GSYH değişimleri karşısında duyarlılığını göstermek, model sonuçlarına göre belirlenebilecek politikaların etkinliği açısından önemlidir. Buna göre çalışmada GSYH büyümesi için kullanılan %2,5'luk yıllık bileşik büyüme oranının (MPS_2,5, NSES_2,5), Türkiye'nin son 20 yıldaki yıllık bileşik büyüme oranı olan %4,5 (MPS_4,5, NSES_4,5) olarak alınması durumunda elde edilen nihai enerji tüketimi ve CO₂ emisyonları sonuçları senaryolar bazında Çizelge 6'da gösterilmektedir. Bu sonuçlara göre hem nihai enerji tüketimi hem de CO₂ emisyonları bazında MPS'leri ve NSES'ler arasında yaklaşık olarak %14 düzeyinde fark oluşmaktadır.

4.5. Diğer Çalışmalar ile Karşılaştırma (Comparison with Other Studies)

Çalışmada kullanılan EST modeli, AB'deki birçok ülke tarafından enerji modellemesinde kullanılan PRIMES enerji modeli alt yapısını kullanmaktadır. Buna göre önerilen yaklaşımın etkinliğini doğrulamak için PRIMES modelini referans alan çalışmalarda ortaya çıkan sonuçların karşılaştırılması önemlidir. Bu anlamda Avrupa Komisyonu'nun enerji, ulaşım ve iklim eylemi alanlarındaki temel analiz araçlarından biri olan ve politika yapıcıların 2020'de yürürlükte olan politika çerçevesine dayalı olarak uzun vadeli ekonomi, enerji, iklim ve ulaşım görünümünü analiz etmelerine olanak tanıyan AB Referans Senaryosu sonuçları çalışmada karşılaştırma analizi olarak referans alınmıştır [48]. Bu sonuçlara göre bazı gelişmiş AB ülkelerinin 2050 yılındaki karayolu ve demiryolu bazında nihai enerji tüketimleri ile toplam emisyonlarının değişimlerinin, Türkiye sonuçları ile karşılaştırılması Çizelge 7'de yer almaktadır. Buna göre bazı AB ülkelerinin hem nihai enerji tüketimleri hem de CO₂ emisyonları 2020-2025 yıllarında, Türkiye için ise 2030'lu yıllarda en üst seviyeye çıkmaktadır. Türkiye için bu durum NDC'de bildirilen emisyonların maksimum 2030'larda en üst seviyeye çıkacağı taahhüdüyle benzeşmektedir [49]. Bu

Çizelge 7. Türkiye ile bazı AB ülkelerinin karayolu ve demiryolu nihai enerji tüketimleri ile toplam emisyonlarının karşılaştırılması (Comparison of road and rail final energy consumptions and total emissions of Türkiye and some EU countries)

	Ülke	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Üst Değer-2050 Değişimi (%)
Nihai Enerji Tüketimi (TWh)	AB	2.601	2.861	2.636	2.424	2.266	2.141	2.092	26,9%
	Almanya	548	529	481	425	399	368	363	33,7%
	Danimarka	46	43	40	36	33	32	31	32,2%
	İspanya	239	288	259	243	224	217	222	22,9%
	Fransa	384	450	409	366	339	322	312	30,6%
	İtalya	305	378	340	317	287	263	252	33,4%
	Türkiye	-	345	371	374	354	320	268	28,4%
CO ₂ Emisyonları (mton)	AB	638,3	698,5	616,5	547,9	495,6	452,0	430,6	38,4%
	Almanya	132,4	127,7	109,3	92,5	83,9	73,9	71,8	45,8%
	Danimarka	11,4	10,8	9,8	8,7	7,8	7,3	7,0	38,2%
	İspanya	63,0	77,2	66,6	61,5	55,6	52,8	53,3	31,0%
	Fransa	92,7	108,4	95,7	81,1	71,9	65,1	60,3	44,3%
	İtalya	77,1	92,0	78,3	69,9	59,3	51,2	47,0	48,9%
	Türkiye	72,7	85,7	87,9	80,8	68,0	51,3	29,3	66,0%

anlamda ilgili ülkeler ve Türkiye'nin nihai enerji tüketimi ve toplam emisyonunun en üst değeri ile 2020-2050 yılı değişim sonuçları karşılaştırıldığında, nihai enerji tüketimi değişimleri bazında Türkiye'nin ilgili ülkeler ile benzerlik gösterdiği, CO₂ emisyonları değişimleri bazında ise Türkiye'nin ilgili ülkelere azaltım büyüklüğü anlamında farklılaştığı görülmektedir. Bu farklılaşmanın nedeninin, AB Referans Senaryosu varsayımları arasında bu çalışmada kullanılan ve Çizelge 5'te belirtilen 2035 yılından itibaren içten yanmalı motor teknolojilerinde yeni girişlerin kısıtlanması varsayımının kullanılmaması olduğu ve bu durumda elektrikli araçlardan kaynaklı oluşacak emisyon azaltım miktarını etkilediği değerlendirilmiştir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışma, Türkiye'nin 2053 yılına kadar belirlediği net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda ulaştırma sektöründe önemli miktarda enerji tüketimini oluşturan karayolu ve demiryolu taşımacılığı alt sektörlerinin mevcut ve uygulanabilir politikalar çerçevesinde bu hedefe ulaşmak için nasıl konumlandırılabilirliğini göstermeye çalışan bir sistem analizi sunmaktadır. Bu sayede Türkiye için tasarlanan EST modeli kullanılarak TUSEM tasarlanmış, ayrıca MPS ve NSES olmak üzere iki senaryo altında sonuçlar elde edilmiştir. MPS, Türkiye ulaştırma sektörünün son 20 yıldaki gelişimi ve halen uygulanan politikalar referans alınarak tasarlanırken, NSES ise AB'de uygulanan veya uygulanacak politikaların net sıfır emisyon hedefine ulaşmak için adaptasyonunu yansıtacak şekilde Türkiye'nin ilgili hedefe ne ölçüde ulaşılabilirliğini göstermek üzere tasarlanmıştır.

Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefi için mevcut politikalar ve mevcut teknoloji altyapısı varsayımı sonucu olarak MPS'nin karbon emisyonlarının azaltımı kapsamında etkisinin çok düşük bir senaryo olduğu sonucuna varılmıştır. Bu anlamda pkm'nin yaklaşık %95'ini oluşturan karayolu yolcu taşımacılığının yaklaşık %57'sine sahip olan karayolu toplu

taşımacılığının, MPS senaryosu bazında karbonsuzlaştırma hedefleri için istenilen oranda olmasına rağmen ek politikalar ve verimlilik önlemleri olmadan tek başına ilgili hedef için yeterli olmayacağı sonucuna varılmıştır.

NSES'de uygulanan AB emisyon standartları ve içten yanmalı motor teknolojilerinde yeni girişlerinin kısıtlanması gibi politikalar sonucunda karbon emisyonlarından önemli derecede azaltım sağlanmıştır. Ancak uygulanan bu politikaların modelde bütüncül olarak düşünülmesi gerekmekte olup söz konusu politikaların tek başına veya kısmen uygulanmaları karbon emisyonlarının azaltılmasında önemli derecede yavaşlamalara neden olabileceği değerlendirilmektedir. Ancak bu iki politika önlemine rağmen elektrifikasyon geçişinin daha zor olacağı havayolu ve denizyolu taşımacılığının pkm ve tkm içindeki oranlarının sabit kalacağı varsayımı altında, yolcu ve yük taşımacılığında karayolundan demiryoluna istenilen oranlarda geçiş sağlanamaması durumunda ulaştırma sektörünün net sıfır emisyon hedefine katkısının oldukça sınırlı kalabileceği değerlendirilmektedir.

Yukarıda ulaşılan senaryo sonuçları ulaştırma enerji talebinin ve CO₂ emisyonlarının birbirine bağlı ilişkisini göstermekte olup bunun yanında ilgili enerji talebinin hangi kaynaklardan karşılanacağı da önemli bir problemi işaret etmektedir. Bir çok sektörde olduğu gibi ulaştırma sektöründe net sıfır emisyon hedefinin temel girdisini elektrifikasyon oluşturmaktadır. Çalışma bazında bu girdiyi oluşturan elektrikli araçlar, özellikle birçok termik santralden oluşan heterojen enerji santrali portföyüne sahip bazı ülkelerde, ulaştırma sektörü kaynaklı CO₂ emisyonlarını azaltırken toplam CO₂ emisyonlarını önemli ölçüde azaltmaya yardımcı olmayacaktır. Bu anlamda ileride yapılacak çalışmalarda elektrik enerjisi üretim portföy analizinde dahil edileceği sistemsel modelleme çalışmalarının yapılmasına ihtiyaç duyulacaktır. Bunun yanında ulaştırma sektörü çerçevesinde hava ve deniz yolu taşımacılığının elektrifikasyonu diğer taşımacılık modlarına göre hem teknolojilerin gelişim hızı hem de uygulanabilirliği

açısından daha zor olduğundan bu çalışmada temel olarak karayolu ve demiryolu taşımacılığına odaklanılmasından dolayı, teknolojik ve uygulanabilecek politika hedeflerinin gelişmesiyle hava ve deniz yolu taşımacılığı modlarındaki emisyonlarında azaltılmasına yönelik yapılacak modelleme çalışmalarına elektrifikasyonun ve diğer temiz enerji kaynaklarının bu modlara daha anlamlı hedeflerle adapte edilmesi gerekecektir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Onur DÖNMEZÇELİK: Çalışmada kullanılan yöntemlerin belirlenmesi, ele alınan probleme ilişkin verilerin toplanması, çözüm yöntemlerinin uygulanması, sonuçların raporlanması ve makalenin yazımı

Emre KOÇAK: Çalışmada kullanılan yöntemlerin belirlenmesi, sonuçların raporlanması ve makalenin yazımı

H. HASAN ÖRKCÜ: Çalışmada kullanılan yöntemlerin belirlenmesi ve sonuçların raporlanması.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Official Gazette of the Republic of Turkey. International Treaty-Paris Agreement. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2021/10/20211007M1-1.pdf>. Erişim tarihi Kasım 30, 2022.
- [2] Kejun, J., Chenmin, H., Songli, Z., Pianpian, X. and Sha, C., "Transport scenarios for China and the role of electric vehicles under global 2 °C/1.5 °C targets", *Energy Economics*, 103: 105172, (2021).
- [3] Bulut, U. and Muratoglu, G., "Renewable energy in Turkey: Great potential, low but increasing utilization, and an empirical analysis on renewable energy-growth nexus", *Energy Policy*, 123: 240-250, (2018).
- [4] Değer, K., Özkaya, M.G. and Boran, F.E., "Modelling and Analysis of Future Energy Scenarios on the Sustainability Axis", *Politeknik*, 1-1, (2021).
- [5] Yağcı, B.E. and Sözen, A., "Türkiye'nin Enerji Verimliliği Etkinlik Analizi", *Politeknik*, 1-1, (2001).
- [6] Duzgun, B. and Bayindir, R., "Policy Implications for the Dissemination of Smart Grid Implementations from Energy Efficiency Perspective: A case from Turkey", *8th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid)*, Paris-Fransa, 146-151, (2020).
- [7] Minister of Energy and Natural Resources (MENR). National Energy Balance Reports. <https://enerji.gov.tr/eigm-raporlari>. Erişim tarihi Kasım 30, 2022.
- [8] Civelekoglu, G. and Bıyık, Y., "Ulaşım sektöründen kaynaklı karbon ayak izi değişiminin incelenmesi", *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 2 (2): 157-166, (2018).
- [9] IEA. World Energy Outlook 2021, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>. Erişim tarihi Kasım 30, 2022.
- [10] Ministry of Environment Urbanization and Climate Change (MEUCC). Greenhouse Gases Emissions by Transport Types. <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/ulastirma-turune-gore-seragazi-emisyonu-i-85790#:~:text=Tan%C4%B1m%C4%B1%3A%20Ula%C5%9Ft%C4%B1rmdan%20kaynaklanan%20sera%20gaz%C4%B1,ve%20deniz%20ta%C5%9F%C4%B1mac%C4%B1%C4%B1%C4%9F%C4%B1%20dahil%20de%C4%9Fildir>. Erişim tarihi Kasım 30, 2022.
- [11] Özcan, N.A., Bulut, M., Özcan, E.C. and Eren, T., "Enerji Üretim Yatırım Alternatiflerinin Değerlendirilmesinde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin İstatistiksel ve Analitik Olarak Karşılaştırması: Türkiye Örneği", *Politeknik*, 25 (2): 519 - 531, (2022).
- [12] Yin, X., Chen, W., Eom, J., Clarke, L.E., Kim, S.H., Patel, P.L., Yu, S. and Kyle, G.P., "China's transportation energy consumption and CO2 emissions from a global perspective", *Energy Policy*, 82: 233,248, (2015).
- [13] İşcan, S., Ünver, Ü. and Güneş, T., "İstanbul kent içi elektrikli ulaşım sistemlerine yönelik enerji yönetim sistemi: cer tüketim performans takip sistemi öneri ve değerlendirmesi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37 (2): 889-906, (2022).
- [14] Kapustin, N.O. and Grushevenko, D.A., "Long-term electric vehicles outlook and their potential impact on electric grid", *Energy Policy*, 137: 111103, (2020).
- [15] European Union (EU). Instrument For Pre-Accession Assistance (IPA) Energy Sector Technical Assistance Project, The Energy System Model for Turkey (EST). <https://scenarios2013.enerjiProjeleri.eu/Dosyalar/Etkinlikler/Training%203/Day%201%20-%20Introduction%20to%20EST.pdf>. Erişim tarihi Kasım 30, (2022).
- [16] Siskos, P., Zazias, G., Petropoulos, A., Evangelopoulou, S. and Capros, P., "Implications of delaying transport decarbonisation in the EU: A systems analysis using the PRIMES model", *Energy Policy*, 121: 48-60, (2018).
- [17] E3Modelling. Primes Model. <https://e3modelling.com/wp-content/uploads/2018/10/The-PRIMES-MODEL-2018.pdf>. Erişim tarihi Kasım 30, 2022.
- [18] European Commission (EC). Communication COM/2020/562: Stepping up Europe's 2030 climate ambition Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people. https://knowledge4policy.ec.europa.eu/publication/communication-com2020562-stepping-europe%E2%80%99s-2030-climate-ambition-investing-climate_en. Erişim tarihi Kasım 30, 2022.
- [19] Capros, P., Kannavou, M., Evangelopoulou, S., Petropoulos, A., Siskos, P., Tasios, N., Zazias, G. and DeVita, A., "Outlook of the EU energy system up to 2050: The case of scenarios prepared for European

- Commission's "clean energy for all Europeans" package using the PRIMES model", *Energy strategy reviews*, 22: 255-263, (2018).
- [20] Rodrigues, R., Pietzcker, R., Fragkos, P., Price, J., McDowall, W., Siskos, P., Fotiou, T., Luderer, G. and Capros, P., "Narrative-driven alternative roads to achieve mid-century CO2 net neutrality in Europe", *Energy*, 239: 121908, (2022).
- [21] European Union (EU). EU reference scenario 2016, Energy, transport and GHG emissions: trends to 2050. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/aed45f8e-63e3-47fb-9440-a0a14370f243>. Erişim tarihi Kasım 30, 2022.
- [22] Haller, M., Ludig, S. and Bauer, N., "Decarbonization scenarios for the EU and MENA power system: Considering spatial distribution and short term dynamics of renewable generation", *Energy policy*, 47: 282-290, (2012).
- [23] Plessmann, G. and Blechinger, P., "How to meet EU GHG emission reduction targets? A model based decarbonization pathway for Europe's electricity supply system until 2050", *Energy Strategy Reviews*, 15: 19-32, (2017).
- [24] European Commission (EC). Results of the EUCO3232.5 scenario on Member States. https://energy.ec.europa.eu/system/files/2019-06/technical_note_on_the_euco3232_final_14062019_0.pdf. Erişim tarihi Kasım 30, 2022.
- [25] Vrontisi, Z., Fragkiadakis, K., Kannavou, M. and Capros, P., "Energy system transition and macroeconomic impacts of a European decarbonization action towards a below 2 C climate stabilization", *Climatic Change*, 162 (4): 1857-1875, (2020).
- [26] Siskos, P., Tsiropoulos, I., Karkatsoulis, P. and Capros, P., "Long-term transport decarbonization pathways in the European Union: a strategic energy-economy analysis", *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 17 (1): 2101712, (2022).
- [27] Kayacı Çodur, M., "Transportation Energy Demand Modeling with Artificial Neural Networks", *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11 (4): 2706-2715, 2021.
- [28] Canaz, C. "Transport sector energy use, electric vehicle deployment and co2 emissions in Turkey: An evaluation using the Boğazici University Energy Modeling System", *Yüksek lisans*, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2019).
- [29] Turkish Statistical Institute (TURKSTAT). Vehicle-kilometer Statistics. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Tasit-kilometre-Istatistikleri-2020-45784>. Erişim tarihi Kasım 30, 2022.
- [30] Eurostat. Passenger mobility statistics. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Passenger_mobility_statistics. Erişim tarihi Kasım 30, 2022.
- [31] General Directorate of Highways (GDH). Traffic and Transportation Survey. <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteEng/Statistiks/TrafficTransportationSurvey.aspx>. Erişim tarihi Kasım 30, 2022.
- [32] Turkish Statistical Institute (TURKSTAT). Population Projections. 2018-2080. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Nufus-Projeksiyonlari-2018-2080-30567>. Erişim tarihi Kasım 30, 2022.
- [33] OECD. Passenger transport. <https://data.oecd.org/transport/passenger-transport.htm>. Erişim tarihi Kasım 30, 2022.
- [34] World Bank. World development indicators: GDP. <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD>. Erişim tarihi Kasım 30, 2022.
- [35] World Bank. World development indicators: Population. <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>. Erişim tarihi Kasım 3, 2022.
- [36] Butyrkin, A.Y., Kulikova, E.B., Madyar, O.N. and Dmitrieva, E.I., "Models for predicting passenger traffic in rail and air transport", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Novosibirsk - Rusya, 012057, 22-27 Mayıs, (2020).
- [37] Ministry of Transport and Infrastructure (MTI). 2053 Transport and Logistic Master Plan. <https://www.uab.gov.tr/uploads/pages/bakanlik-yayinlari/uab-2053-master-plan.pdf>. Erişim tarihi Kasım 30, 2022.
- [38] Ovaere, M. and Proost, S., "Cost-effective reduction of fossil energy use in the European transport sector: An assessment of the Fit for 55 Package", *Energy Policy*, 168: 113085, (2022).
- [39] Ministry of Environment Urbanization and Climate Change (MEUCC). Climate Change Action Plan 2011-2023. https://webdosya.csb.gov.tr/db/iklim/editordosya/iklim_degisikligi_eylem_plani_EN_2014.pdf. Erişim tarihi Kasım 30, 2022.
- [40] United Nation Climate Change (UNFCCC). Republic of Turkey Intended Nationally Determined Contribution. https://www4.unfccc.int/sites/submissions/INDC/Publiched%20Documents/Turkey/1/The_INDC_of_TURKEY_v.15.19.30.pdf. Erişim tarihi Kasım 30, 2022.
- [41] Minister of Energy and Natural Resources (MENR). National Energy Efficiency Action Plan (NEEAP) 2017-2023. <https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EVCED/tr/EnerjiVerimlili%C4%9Fi/UlusalEnerjiVerimlili%C4%9FiEylemPlan%C4%B1/Belgeler/NEEAP.pdf>. Erişim tarihi Kasım 30, 2022.
- [42] European Commission (EC). CO2 emission performance standards for cars and vans. https://ec.europa.eu/clima/eu-action/transport-emissions/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/co2-emission-performance-standards-cars-and-vans_en#:~:text=In%20the%20years%20from%202020,as%201.67%20vehicles%20in%202021. Erişim tarihi Kasım 30, 2022.
- [43] Brand, C., Anable, J., Ketsopoulou, I. and Watson, J., "Road to zero or road to nowhere? Disrupting transport and energy in a zero carbon world", *Energy Policy*, 139: 111334, (2020).
- [44] Meckling, J. and Nahm, J., "The politics of technology bans: Industrial policy competition and green goals for the auto industry", *Energy Policy*, 126: 470-479, (2019).
- [45] Morfeldt, J., Davidsson Kurland, S. and Johansson, D.J.A., "Carbon footprint impacts of banning cars with internal combustion engines", *Transportation Research*

- Part D: Transport and Environment**, 95: 102807, (2021).
- [46] Böhringer, C., Cantner, U., Costard, J., Kramkowski, L.V., Gatzert, C. and Pietsch, S., “Innovation for the German energy transition - Insights from an expert survey”, *Energy Policy*, 144: 111611, (2020).
- [47] European Commission (EC). Fit for 55. <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>. Erişim tarihi Kasım 30, 2022.
- [48] European Commission (EC). Reference Scenario 2020 (REF2020). https://energy.ec.europa.eu/document/download/1485062e-2d65-47cb-887a-a755edc2ec36_en?filename=ref2020_energy-transport-ghg.xlsx. Erişim tarihi Kasım 30, 2022.
- [49] Ministry of Environment Urbanization and Climate Change (MEUCC). National Contribution Statement. <https://ab.csb.gov.tr/en/minister-murat-kurum-announced-the-update-of-turkiyes-national-contribution-statement-news-279512>. Erişim tarihi Kasım 30, 2022.