

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TÜRKİYE’NİN 2030 SERA GAZI EMİSYON HEDEFLERİ BAĞLAMINDA
MDAM VE LSTM MODELLERİ İLE TAHMİN, ETKİ ANALİZİ VE COVID-19
SÜRECİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gizem GÖKTAŞ BALKIR

**Bilişim Uygulamaları Anabilim Dalı
Bilgi ve Haberleşme Mühendisliği Programı**

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Nisa Özge ÖNAL TUĞRUL

HAZİRAN 2025

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TÜRKİYE’NİN 2030 SERA GAZI EMİSYON HEDEFLERİ BAĞLAMINDA
MDAM VE LSTM MODELLERİ İLE TAHMİN, ETKİ ANALİZİ VE COVID-19
SÜRECİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gizem GÖKTAŞ BALKIR

(708171010)

Bilişim Uygulamaları Anabilim Dalı

Bilgi ve Haberleşme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Nisa Özge ÖNAL TUĞRUL

HAZİRAN 2025

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**PREDICTION, IMPACT FACTOR ANALYSIS, AND EXAMINATION OF THE
COVID-19 PERIOD USING MDAM AND LSTM MODELS IN THE CONTEXT
OF TÜRKİYE’S GREENHOUSE GAS EMISSIONS TARGETS**

M.Sc. THESIS

Gizem GÖKTAŞ BALKIR

(708171010)

Applied Informatics Department

Information and Communications Engineering

Thesis Advisor: Assistant Professor, Ph.D. Nisa Özge ÖNAL TUĞRUL

JUNE 2025

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 708171010 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Gizem GÖKTAŞ BALKIR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “TÜRKİYE’NİN 2030 SERA GAZI EMİSYON HEDEFLERİ BAĞLAMINDA MDAM VE LSTM MODELLERİ İLE TAHMİN, ETKİ ANALİZİ VE COVID-19 SÜRECİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Nisa Özge ÖNAL TUĞRUL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Kamil KARAÇUHA**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Erdem BİLGİLİ
Piri Reis Üniversitesi

Teslim Tarihi : 28 Mayıs 2025

Savunma Tarihi : 23 Haziran 2025

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında bilgi birikimi, rehberliği ve her aşamadaki desteğiyle bana yol gösteren değerli tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Nisa Özge ÖNAL TUĞRUL'a ve fikir ve yönlendirmeleriyle çalışmama değer katan Prof. Dr. Ertuğrul KARAÇUHA'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmam süresince olumlu iletişimleri ve işbirliğine açık yaklaşımlarıyla katkı sağlayan İstanbul Teknik Üniversitesi Bilişim Enstitüsü'nün tüm mensuplarına teşekkür ederim.

Son olarak ise, bana her zaman güvenen, yanımda olan ve bu süreçte bana fırsat yaratarak en büyük desteği sağlayan değerli anne ve babama, sevgili eşime ve canım oğluma teşekkür ederim.

Mayıs 2025

Gizem GÖKTAŞ BALKIR
(Endüstri Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Anlam ve Önemi	2
1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı	4
1.3 Literatür Araştırması	5
2. YÖNTEM.....	23
2.1 Çoklu Derin Değerlendirme Metodolojisi (MDAM)	23
2.1.1 Çok fonksiyon girdili modelleme sistemi	24
2.1.2 Çok fonksiyon girdili etki faktörü analizi	26
2.1.3 Çok fonksiyon girdili öngörü.....	27
2.2 Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM).....	28
2.2.1 LSTM'nin çalışma mekanizması	30
2.2.1.1 Girdi (Net input).....	30
2.2.1.2 Unutma kapısı (Forget gate).....	30
2.2.1.3 Giriş kapısı (Input gate)	31
2.2.1.4 Hücre durumu / bellek (Cell)	31
2.2.1.5 Çıkış kapısı (Output gate)	31
2.2.2 Etki faktörü analizi ve öngörü.....	31
3. UYGULAMA VE SONUÇLAR.....	33
3.1 Modelleme İçin Seçilen Veri Seti ve Anlamı.....	33
3.2 MDAM Sonuçları.....	34
3.2.1 MDAM model sonuçları	34
3.2.2 MDAM etki faktörü analizi sonuçları	35
3.2.3 MDAM COVID etkisi sonuçları	36
3.3 LSTM Sonuçları	37
3.3.1 LSTM model sonuçları	37
3.3.2 LSTM etki faktörü analizi sonuçları	38
3.3.3 LSTM COVID etkisi analizi sonuçları	39
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	41
5. GELECEK ÇALIŞMALAR.....	45
KAYNAKLAR	51
EKLER.....	55
ÖZGEÇMİŞ.....	61

KISALTMALAR

CCS	: Carbon Capture and Storage – Karbon Yakalama ve Depolama
CO₂	: Carbon Dioxide
DAM	: Deep Assessment Methodology - Derin Değerlendirme Metodolojisi
GHG	: Greenhouse Gas – Sera gazı Emisyonu
GSYİH	: Gayrisafi Yurt İçi Hasıla
HDI	: İnsani Gelişmişlik Endeksi - Human Development Index
LSTM	: Long Short-Term Memory – Uzun Kısa Süreli Bellek
M-DAM	: Multi Deep Assesment Methodology – Çoklu Derin Değerlendirme Metodolojisi
MAPE	: Mean Absolute Percentage Error – Ortalama Yüzdesel Mutlak Hata
NDC	: Nationally Determined Contribution – Ulusal Katkı Beyanı
TEİAŞ	: Türkiye Enerji İletim Anonim Şirketi
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu

SEMBOLLER

Gg : Gigagram
Mt : Milyon Ton
MW : Megawatt



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Sera gazının MDAM ve LSTM model sonuçları tablosu.....	42
Çizelge 4.2 : MDAM ile 2017 ve 2018 yılları için MDAM ile tahmin sonuçları.	44
Çizelge A.1 : TÜİK ve Enerji Bakanlığı veri seti.....	55
Çizelge A.2 : MDAM model sonuçları (1993-2022).....	56
Çizelge A.3 : MDAM model gelecek tahminleri.	56
Çizelge A.4 : MDAM COVID etkileri dışı model sonuçları (1993-2018).....	57
Çizelge A.5 : MDAM COVID etkileri dışı gelecek tahminleri.....	57
Çizelge A.6 : LSTM model sonuçları (1993-2018).....	58
Çizelge A.7 : LSTM model gelecek tahminleri.....	58
Çizelge A.8 : LSTM COVID etkileri dışı model sonuçları.	59
Çizelge A.9 : LSTM COVID etkileri dışı model gelecek tahminleri.	59

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Sektörlere göre 2022 yılı sera gazı emisyonu dağılımı [10].	3
Şekil 2.1 : Çoklu giriş derin değerlendirme (M-DAM) çalışma mantığı[24]	24
Şekil 2.2 : Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) mimarisi.	30
Şekil 3.1 : Kullanılan veri setinin grafik gösterimi.....	34
Şekil 3.2 : Sera gazı emisyonunun MDAM ile modelleme ve tahmin sonuçları	35
Şekil 3.3 : MDAM etki faktörü analizi sonuç grafiği.	36
Şekil 3.4 : MDAM COVID etkisi haricinde modelleme ve tahmin sonuçları.....	37
Şekil 3.5 : LSTM ile sera gazı modelleme ve tahmin sonuçları.....	38
Şekil 3.6 : LSTM modeli ile etki faktörü analizi sonuç grafiği	39
Şekil 3.7 : LSTM modeli COVID etkisi haricinde modelleme ve tahmin sonuçları.	40
Şekil 4.1 : Türkiye’de termik santrallerin toplam enerji üretimindeki payı [10].....	43
Şekil 5.1 : G20 ülkeleri yıllara göre sera gazı emisyonları [17].	46
Şekil 5.2 : Sera gazı emisyon ülke dağılımları [17].	47
Şekil 5.3 : Gayri safi yurt içi hasıla ülke dağılımları [34].	48
Şekil 5.4 : Gelir dağılımına göre ülkelerin sera gazı emisyon oranları [17].	48

TÜRKİYE’NİN 2030 SERA GAZI EMİSYON HEDEFLERİ BAĞLAMINDA MDAM VE LSTM MODELLERİ İLE TAHMİN, ETKİ ANALİZİ VE COVID-19 SÜRECİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Sera gazı (GHG) emisyonları, küresel ısınma ve iklim değişikliğinin temel sebeplerindendir [7, 16]. Türkiye, Paris Anlaşması kapsamında 2030’a kadar emisyonlarını %41 azaltmayı ve 2038’i zirve yılı ilan ederek 2053’te net sıfır emisyon hedefine ulaşmayı taahhüt etmiştir [26]. Bu hedeflere ulaşmada etkili tahmin araçları kritik önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, Türkiye’nin 1993–2022 dönemine ait TÜİK sera gazı emisyon verileri ve TEİAŞ enerji verileri analize konu olmuş, derin öğrenme tabanlı bir zaman serisi modeli olan Uzun Kısa Dönemli Bellek (Long Short-Term Memory - LSTM) ile Kesirli Kalkülüs - Caputo türevlerini temel alan Çoklu Derin Değerlendirme Metodolojisi (Multi Deep Assessment Model - MDAM) karşılaştırmalı olarak kullanılmıştır. LSTM zaman serisi örüntülerini güçlü şekilde yakalarken, MDAM kesirli türev altyapısı ile uzun vadeli bağımlılıkları daha iyi modellemektedir [36, 31].

Model başarıları ortalama yüzdesel mutlak hata (Mean Absolute Percentage Error – MAPE) ile ölçülmüş, MDAM %1,64, LSTM %2,69 hata oranı ile sonuçlanmıştır. 2030 yılı için MDAM tahmini 721,86 Mt, LSTM tahmini 709,49 Mt’dir. Türkiye’nin 2030 hedefi olan 695 Mt seviyesinin üstünde kalan bu tahminler, mevcut politikaların güçlendirilmesi ve yenilenebilir kaynakların payının belirgin biçimde artırılması gerektiğine işaret etmektedir [26].

Ayrıca, çalışmada yapılan etki faktörü analizleri sayesinde emisyonları etkileyen temel değişkenlerin büyüklükleri ve yönleri de ortaya konmuştur. MDAM modelinde enerji talebi 69,08 birimlik, fosil yakıtla elektrik üretimi ise 31,24 birimlik artış yönlü etki göstermiştir. Buna karşılık, yenilenebilir kaynaklı elektrik üretimi -44,68 birim ile emisyonları azaltıcı yönde bir katkı sunmuştur. LSTM modelinde ise bu etkiler daha da belirginleşmiştir, enerji talebi 122,49, fosil üretim 173,51 gibi yüksek pozitif etki katsayılarına sahipken, yenilenebilir üretimin etkisi yalnızca 4,21 birim düzeyinde kalmıştır. Bu bulgular, özellikle fosil yakıtlardan uzaklaşılması ve yenilenebilir enerjinin sistematik olarak yaygınlaştırılmasının emisyon azaltımı açısından ne denli kritik olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu analizlere ek olarak çalışmada COVID-19 etkisini analiz etmek amacıyla 1993–2018 verileriyle pandemi senaryosu dışı modeller oluşturulmuş; 2019’a kadar olan verilerle modeller kurulduğunda 2030 için MDAM 798,14 Mt, LSTM 778,28 Mt öngörmüştür. Bu durum, pandemideki ekonomik ve toplumsal durgunluğun emisyonları azalttığını göstermektedir.

Sonuçlar, MDAM'ın LSTM gibi güçlü bir algoritmaya kıyasla daha başarılı tahmin sunduğunu ortaya koymuş olsa da iki modelin de başarılarının yüksek olduğu görülmüştür. Türkiye emisyon zirvesi ve net sıfır hedeflerine ulaşması için yenilenebilir enerji yatırımları, düşük karbonlu teknolojiler ve karbon yakalama sistemlerine öncelik verilmelidir [30, 7].

Her iki model de, senaryo analizleriyle birlikte politika yapıcılara stratejik bir yol haritası sunmakta; veri temelli karar alma süreçlerinin gelişmesine katkı sağlamaktadır. Böylece iklim hedeflerine yönelik risk analizleri ve eylem planları daha sağlam temellere oturtulabilmektedir.



PREDICTION, IMPACT FACTOR ANALYSIS, AND EXAMINATION OF THE COVID-19 PERIOD USING MDAM AND LSTM MODELS IN THE CONTEXT OF TÜRKİYE’S GREENHOUSE GAS EMISSIONS TARGETS

SUMMARY

Greenhouse gas (GHG) emissions, caused by the release of gases that trap heat in the atmosphere, are one of the main environmental problems directly contributing to global warming. Gases such as carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), nitrous oxide (N₂O), and fluorinated gases enter the atmosphere either naturally or through human activities, disrupting the Earth’s energy balance and amplifying the greenhouse effect [7, 16]. As global temperatures rise, the world is facing an accelerating climate crisis that brings about severe consequences including biodiversity loss, more frequent and intense extreme weather events, agricultural decline, water scarcity, and coastal flooding [16, 33]. These developments directly threaten the long-term sustainability of ecosystems, economies, and societies.

The World Economic Forum’s Global Risks Report 2025 ranks the increase in GHG emissions, ecosystem degradation, and climate-related disasters among the most critical and long-term threats to global stability [35]. Particularly, younger generations are increasingly concerned about the environmental risks that will shape their futures, reinforcing the need to integrate climate considerations into policy decisions, not only from an environmental perspective but also for intergenerational justice [35]. Thus, climate strategies must be designed to respond not only to today’s economic and political realities but also to the fundamental needs of future generations [5].

In this context, the accurate modeling and forecasting of GHG emissions has become a key element of evidence-based climate governance. Reducing GHG emissions is central to climate action, and many countries have adopted international frameworks to guide their efforts. One of the most prominent frameworks is the Paris Agreement, adopted at COP21 in 2015 and entering into force in 2016. Its primary goal is to limit global warming to well below 2°C above pre-industrial levels, ideally to 1.5°C [5].

Türkiye ratified the Paris Agreement in 2021 and initially committed to a 21% reduction in emissions by 2030 through its Intended Nationally Determined Contribution (INDC) [25]. However, due to rising energy demand, rapid industrialization, and urbanization, this target was later revised. In 2023, Türkiye updated its national commitment by pledging a 41% reduction in emissions by 2030 (695 Mt), declared 2038 as its national peak year, and set a long-term net zero goal for 2053 [26]. The updated strategy includes actions in key sectors such as energy, industry, transport, agriculture, and waste management. Achieving these objectives

requires robust, data-driven tools that can track progress, anticipate trends, and inform strategic planning.

This study contributes to this effort by exploring advanced time series models for forecasting Türkiye's GHG emissions. Specifically, it compares the performance of a deep learning-based Long Short-Term Memory (LSTM) model with the Multi Deep Assessment Model (MDAM), a novel approach based on Caputo fractional derivatives. While LSTM is well-known for its ability to capture complex temporal dynamics in sequential data, MDAM offers the ability to model long-term memory and fractional relationships between variables by extending classical differential operators [36, 31].

The analysis was conducted using data from the Turkish Statistical Institute (TÜİK) on GHG emissions from 1993 to 2022, and supplementary energy data from TEİAŞ including fossil-based electricity generation, renewable energy generation, and domestic electricity demand. Both models were trained on this dataset to generate GHG emission forecasts for 2030 and to estimate the influence of contributing factors. In addition, the models were used to simulate a counterfactual scenario without the COVID-19 pandemic by excluding post-2018 data.

The models were optimized for best performance using the Mean Absolute Percentage Error (MAPE) metric. According to the results, MDAM achieved superior accuracy with a MAPE of 1.64%, while LSTM followed with a MAPE of 2.69%. In terms of forecasts, MDAM projected 721.86 Mt for 2030 and LSTM projected 709.49 Mt. Since Türkiye's 2030 goal is to reduce emissions to 695 Mt, both projections exceed this target, highlighting the need for enhanced and sustained policy efforts [26]. In particular, increasing the share of renewable energy in the national electricity mix emerges as a critical area for intervention.

One of the most important findings of this research is the quantifiable effect of the COVID-19 pandemic. Under the pandemic-excluded scenario, the models forecasted much higher emissions for 2030: 798.14 Mt for MDAM and 778.28 Mt for LSTM. These figures indicate that the pandemic-induced reductions in industrial output and transportation activity had a notable temporary suppressive effect on emissions. The results imply that structural changes in energy use, production systems, and mobility could lead to lasting emissions reductions if implemented as part of long-term climate strategies.

Another important contribution of this study is the factor impact analysis performed through both models. The results show that fossil-based electricity generation and domestic electricity demand are the main drivers increasing emissions. In MDAM, domestic demand had an influence coefficient of 69.08, and fossil fuel generation 31.24, while renewable energy contributed a negative coefficient of -44.68, indicating a mitigating effect. In contrast, LSTM produced even sharper results: domestic demand showed an effect of 122.49 and fossil generation 173.51, while renewable energy had a minimal effect of only 4.21. These findings strongly suggest the need to reduce dependence on fossil fuels and expand the role of renewables in meeting Türkiye's energy needs.

Overall, the MDAM model demonstrated superior accuracy and interpretability compared to LSTM, although both models provided reliable results. Their outputs offer a strategic roadmap for policymakers and serve as robust decision-support tools, especially when used in scenario-based planning. These models not only improve the

understanding of past emission dynamics but also help forecast Türkiye’s likelihood of reaching its near- and long-term climate targets.

In conclusion, this study demonstrates the critical role of advanced modeling techniques in climate governance. It provides empirical support for the use of fractional calculus-based models in environmental forecasting and highlights how combining these methods with machine learning can enrich future research and practice. With the right policies and investments—particularly in renewable energy, low-carbon technologies, and carbon capture and storage—Türkiye can move toward a low-carbon economy, contribute to global climate goals, and ensure long-term environmental and economic resilience [30, 7].



1. GİRİŞ

İklim değışikliğı, Sanayi Devrimi'nden bu yana dünyanın karşı karşıya olduğı en ciddi çevresel sorunlardan biri haline gelmiştir. Bu olgu yalnızca sıcaklıkların artışıyla sınırlı olmayıp; küresel ekosistemler, tarım, ekonomi ve insan sağlığı üzerinde yıkıcı etkiler doğuran karmaşık ve çok boyutlu bir süreçtir. Küresel ortalama sıcaklıkların yükselmesi, aşırı hava olaylarının sıklığında artış, biyoçeşitlilik kaybı, tarımsal üretkenlikte düşüş, su kaynaklarının azalması ve kıyı bölgelerinde sel risklerinin artması gibi ciddi sonuçlar doğurmaktadır [16]. Tüm bu etkiler, toplumların ve ekonomilerin sürdürülebilirliğini doğrudan tehdit etmektedir [33].

Dünya Ekonomik Forumu'nun (WEF) 2025 Küresel Riskler Raporu da çevresel risklerin giderek daha fazla önem kazandığını ortaya koymakta ve iklim değışikliğini küresel ekonomi ile toplumsal yapılar üzerinde uzun vadeli bir tehdit olarak tanımlamaktadır [35]. Özellikle 18-30 yaş grubu, çevresel felaketlerin geleceğı yönelik etkileri konusunda en yüksek endişeye sahip toplumsal kesim olarak öne çıkmakta; ancak iklim krizi, yalnızca belirli yaş gruplarını değil, tüm toplumu ve gelecek kuşakların yaşam koşullarını doğrudan ilgilendiren bir sorun olarak değerlendirilmektedir [35].

Bu bağlamda, iklim politikalarının yalnızca güncel ekonomik ve siyasal önceliklere değil, aynı zamanda gelecek nesillerin yaşamsal ihtiyaçlarına da yanıt verecek şekilde tasarlanması gereklidir [5]. Bu hedefin gerçekleştirilmesinde en kritik unsurlardan biri, sera gazı emisyonlarının azaltılmasıdır. Karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), diazot monoksit (N₂O) ve florlu gazlar gibi bileşenlerden oluşan sera gazları; başta enerji üretimi olmak üzere tarım, sanayi ve atık yönetimi gibi sektörlerden kaynaklanmakta ve küresel iklim değışikliğinin başlıca nedenlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bu emisyonlar, artan sıcaklıklar, ekstrem hava olayları ve ekosistem tahribatı yoluyla çevresel sürdürülebilirliği ciddi biçimde tehdit etmektedir.

Bu küresel sorunla mücadele etmek amacıyla devletler, emisyon azaltımına yönelik çeşitli politika ve stratejiler geliştirmekte; bu sayede hem iklim değişikliğinin etkilerini azaltmayı hem de ekonomik istikrarı koruyarak yaşanabilir bir gelecek inşa etmeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda önemli bir uluslararası çerçeve sunan Paris Anlaşması, küresel sıcaklık artışını sanayi öncesi döneme göre 2°C'nin altında tutmayı ve mümkünse 1,5°C ile sınırlandırmayı hedeflemektedir. 2015 yılında Paris'te düzenlenen 21. Taraflar Konferansı'nda (COP21) kabul edilen bu anlaşma, 2016 yılında yürürlüğe girmiş ve 190'dan fazla ülke tarafından onaylanmıştır [5]. Taraf ülkelerden, küresel emisyon azaltımına katkıda bulunacak şekilde kendi ulusal hedeflerini belirlemeleri beklenmektedir.

Türkiye, 2021 yılında Paris Anlaşması'nı onaylayarak taraf olmuş ve ilk olarak 2030 yılına kadar emisyonlarını %21 oranında azaltmayı hedefleyen bir Ulusal Katkı Beyanı (INDC) sunmuştur [25]. Ancak artan enerji talebi, sanayileşme ve kentleşme gibi etkenlerin bu hedefi yetersiz kılabilceği öngörülerek, Türkiye 2023 yılında taahhüdünü güncellemiş; 2030 yılına kadar emisyon azaltım hedefini %41'e yükseltmiş (695 Mt) ve 2038 yılını ulusal emisyonlar için zirve yılı olarak belirlemiştir [26].

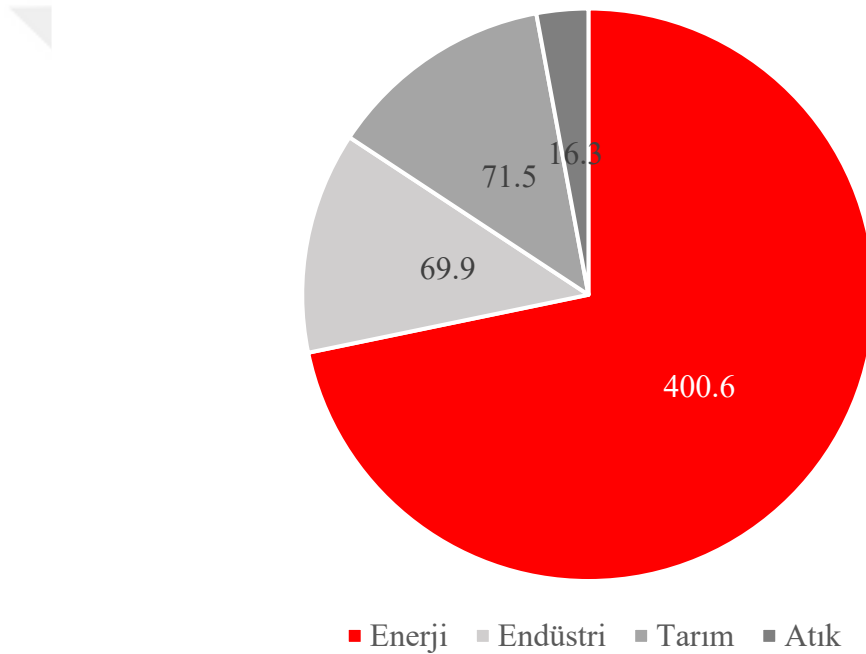
1.1 Tezin Anlam ve Önemi

Türkiye'nin iklim hedeflerine ulaşma sürecinde, fosil yakıtlara olan yüksek bağımlılığı ve yenilenebilir enerji yatırımlarının henüz yeterli seviyeye ulaşamaması önemli zorluklar oluşturmaktadır [33]. Bu durum, Türkiye'nin emisyonlarını azaltma taahhütlerinin gerçekleştirilmesi açısından emisyonlarının yapısının ve etki faktörlerinin anlaşılması politika yapımcılar için temel oluşturmakta, doğru ve etkili iklim stratejilerinin geliştirilmesi bakımından yol gösterici olmaktadır.

Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC metodolojisine göre sera gazı emisyonları dört ana bileşenden oluşmaktadır: Karbondioksit (CO₂), Metan (CH₄), Azot Oksit (N₂O) ve Florlu Gazlar (F-Gazlar). Toplam emisyonların yaklaşık %86,6'sını oluşturan CO₂, enerji üretimi, sanayi faaliyetleri ve arazi kullanımı değişikliklerinden kaynaklanmakta olup, bu gazın %85'lik bölümü enerji sektöründen kaynaklanmaktadır. Metan emisyonları ise başta tarım olmak üzere (%60,5), enerji (%19,9) ve atık-sanayi (%19,6) kaynaklıdır. 1990 yılına kıyasla CH₄ salınımında %31,6 oranında artış gözlenmiştir. Azot Oksit emisyonlarının %77,9'u tarım

faaliyetlerinden, özellikle gübreleme ve hayvansal atık yönetiminden kaynaklanmakta olup, bu gazın salımı 1990’a göre %54,6 oranında artış göstermiştir. Florlu gazlar ise soğutucu sistemler, köpük üretimi ve ağır sanayi süreçlerinden kaynaklanan endüstriyel bileşenlerdir.

Emisyonların sektörel dağılımında ise enerji sektörü Şekil 1.1’de de görüldüğü gibi %71,8’lik oranla en baskın kaynak konumundadır. Bunu sırasıyla tarım (%12,8), sanayi ve üretim süreçleri (%12,5) ve atık yönetimi sektörü (%2,9) izlemektedir. Bu durum, Türkiye’nin emisyon azaltım stratejilerinde özellikle enerji dönüşümüne ve düşük karbonlu teknolojilere yönelimin ne denli elzem olduğunu ortaya koymaktadır [10].



Şekil 1.1 : Sektörlere göre 2022 yılı sera gazı emisyonu dağılımı [10].

Enerji sektörünün yapı taşları ise, enerji ve ısı üretimi, ulaştırma, sanayi ve hane halkı ve diğer sektörlerde yakıt kullanımı gibi başlıklardan oluşmaktadır.

Tüm bu bilgiler ışığında, sera gazı emisyonlarının bilimsel olarak modellenmesi ve gelecekteki eğilimlerinin öngörülmesi, sürdürülebilir kalkınma ve iklim politikaları açısından temel teşkil etmektedir. Dünya Ekonomik Forumu’nun 2025 Küresel Riskler Raporu’nda da vurgulandığı üzere, çevresel tehditler artık uzun vadeli değil, acil ve sistemik riskler kategorisinde değerlendirilmekte; özellikle genç nesiller, bu kriz karşısında yüksek farkındalık sergileyen bir kitle olarak öne çıkmaktadır [35]. Ancak

bu farkındalığın, yalnızca sosyal sorumluluk düzeyinde değil, karar alma mekanizmalarına bilimsel veriyle entegre şekilde yansımaları gerekmektedir.

1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın temel amacı, Türkiye'nin sera gazı emisyonlarını tahmin etmek amacıyla Caputo kesirli türevi temelli Çoklu Derin Değerlendirme Modeli (Multi Deep Assessment Model - MDAM) ve derin öğrenme tabanlı bir zaman serisi modeli olan Uzun Kısa Dönemli Bellek (Long Short Term Memory - LSTM) modellerini uygulamak ve bu iki yöntemin tahmin başarımını karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir. Çalışma kapsamında geliştirilecek projeksiyonlar, yalnızca teknik doğruluk açısından değil, aynı zamanda iklim politikalarının geleceğe dönük şekillendirilmesinde sağlayabileceği stratejik katkı açısından da önem arz etmektedir.

Bu tezde 2030 yılına kadar olan tahminlere odaklanılması tesadüfi değildir. Türkiye, Paris Anlaşması kapsamında 2030 yılına kadar sera gazı emisyonlarını mevcut artış eğilimine kıyasla %41 oranında azaltmayı (695 Mt) ve 2053'te sıfır emisyonu ulaşmayı taahhüt etmiştir. Bu bağlamda, tahmin modellerinin 2030 yılına yönelik çıktıları, Türkiye'nin ulusal katkı beyanında (NDC) belirttiği hedeflere ne ölçüde yaklaşılabileceğini değerlendirmek için bir zemin sunmaktadır. Aynı zamanda bu çalışma, sera gazı emisyonlarının dinamik doğasını dikkate alan bilimsel modellemelerin, politika üretim süreçlerine nasıl entegre edilebileceğini göstermek açısından da önemli bir katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Tezde, geleneksel tahmin yöntemlerinin ötesine geçerek, zaman serilerinde uzun vadeli bağımlılıkları modelleme yeteneğine sahip olan Caputo kesirli türevi temelli MDAM ile zaman serisi analizlerinde etkili derin öğrenme yöntemlerinden biri olan LSTM karşılaştırılması yapılmaktadır. Bu kapsamda yalnızca modellerin doğruluk düzeyleri değil, aynı zamanda sera gazı emisyonuna etki edebilecek faktörlerin etki büyüklükleri de değerlendirmeye alınmıştır. Özellikle COVID-19 pandemisi gibi olağandışı dönemlerin tahmin çıktıları üzerindeki etkisi incelenmiş; pandemi öncesi ve sonrası veri kümeleriyle tasarlanan modellerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu

analiz, sanayi ve ulaşımda karşılaşılan duraksama dönemlerinin emisyon tahminlerine nasıl yansıdığını ortaya koymak açısından anlamlı bir çerçeve sunmaktadır.

Ayrıca, bu tezde yalnızca modelleme araçları değil, bu araçların uygulanabilirliği konusunda da disiplinler arası örneklerden yararlanılmıştır. Caputo kesirli türevi ile ekonomik büyüme ve ulaşım verilerinin modellenmesi, enerji yük tahmini, dijital erişim düzeyi gibi farklı alanlarda yapılan çalışmalardan edinilen deneyimler, sera gazı emisyonlarının modellenmesinde referans olarak alınmıştır. Bu örneklerden hareketle, kesirli kalkülüs temelli modellerin zaman serisi analizlerinde sunduğu doğruluk avantajı, bu tezdeki uygulama ile Türkiye özelinde sınanacaktır.

Sonuç olarak bu çalışma, MDAM olarak tanımlanmış Caputo türevli kesirli kalkülüsün çevresel veri modellemelerinde kullanılabilirliğini ortaya koymayı ve LSTM modeli ile karşılaştırmalı analiz üzerinden yeni bir bilimsel perspektif sunmayı amaçlamaktadır. Tahmin edilen sera gazı emisyon değerlerinin, Türkiye'nin 2030 ve 2053 hedeflerine ulaşma potansiyelini değerlendirmede karar vericilere katkı sağlaması hedeflenmektedir.

1.3 Literatür Araştırması

İklim değişikliği ve çevresel riskler, günümüzde yalnızca çevre politikalarının değil, aynı zamanda ekonomik ve toplumsal yapıların da merkezinde yer alan çok boyutlu sorun alanları haline gelmiştir. Dünya Ekonomik Forumu'nun (WEF) 2025 Küresel Riskler Raporu, çevresel tehditlerin küresel düzeyde orta ve uzun vadeli risklerin başında geldiğini belirtmekte; sera gazı emisyonlarındaki artış, aşırı hava olaylarının sıklığı ve ekosistemlerin bozulması gibi gelişmelerin özellikle genç nüfus tarafından yüksek düzeyde kaygıyla karşılandığını ortaya koymaktadır [35].

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen literatür incelemesi, yalnızca sera gazı emisyonlarının modellenmesine ilişkin yöntemsel yaklaşımları ele almakla sınırlı kalmamakta; aynı zamanda iklim değişikliği, emisyon kaynakları, ulusal katkı beyanları (NDC'ler), Paris Anlaşması hedefleri ve emisyonların sektörel dağılımı gibi tematik alanlarda yapılan analiz, değerlendirme ve politika odaklı yorum çalışmalarına da yer vermektedir. Böylece, hem teknik modelleme uygulamalarına, hem de iklim değişikliğine ilişkin güncel bilimsel tartışmalara bütüncül bir bakış sunulmaktadır.

İlerleyen bölümlerde, bu kapsamda değerlendirilen literatür çalışmaları tematik başlıklar altında ele alınarak, ulaşılan bilgi birikimi ortaya konulacaktır.

Dünya Ekonomik Forumu'nun (WEF) İklim Değişikliği ve Çevresel Riskler Üzerine yayınladığı 2025 Küresel Riskler Raporu, çevresel risklerin son yıllarda artan önemine dikkat çekmektedir. Son 20 yılda çevresel riskler, WEF raporlarında en büyük uzun vadeli endişe kaynağı olarak öne çıkmıştır. 2025-2027 dönemi için yapılan tahminlerde aşırı hava olayları, çevresel sistemlerdeki kritik değişiklikler ve biyoçeşitlilik kaybı gibi faktörlerin küresel ekonomiyi ve toplumsal yapıları tehdit edeceği belirtilmiştir.

2024-2025 döneminde dünya çapında birçok sel, kuraklık, sıcak hava dalgası ve yangın gözlemlenmiştir. Rapora göre, sera gazı emisyonlarındaki artış, küresel ısınmayı daha da hızlandırarak bu tür olayları daha sık ve yıkıcı hale getirmektedir. Özellikle genç nesiller (18-30 yaş grubu), çevresel felaketlerin uzun vadeli etkileri konusunda en büyük endişeyi taşıyan gruptur.

Önümüzdeki 10 yıl içinde biyoçeşitliliğin daha fazla azalması ve ekosistemlerin geri dönüşü olmayan noktalara ulaşması beklenmektedir. Biyoçeşitlilik kaybı ve ekosistem çöküşü, 2035 yılına kadar gerçekleşmesi beklenen en büyük ikinci çevresel risk olarak değerlendirilmiştir. Gençler ve kamu sektörü, bu riske özel sektör ve daha yaşlı kuşaklardan daha fazla önem vermektedir.

Küresel riskler arasında karbon salınımının kontrol edilememesi ve Paris İklim Anlaşması hedeflerinin tutturulamaması önemli bir tehdit olarak görülmektedir. Türkiye'nin de dahil olduğu birçok ülke, 2030 ve 2050 hedefleri doğrultusunda karbon azaltım stratejilerini güncellemeye devam etmektedir. Ancak rapor, bu taahhütlerin büyük ölçüde yetersiz kaldığını göstermektedir. Paris Anlaşması'nın 1.5°C hedefini gerçekleştirmek için emisyonların hızla düşürülmesi gerektiği belirtilmektedir.

18-30 yaş grubundaki bireyler, kirlilik ve iklim değişikliğinin etkileri konusunda en yüksek farkındalığa sahiptir. Özel sektör ve hükümetler, bu grupların taleplerini göz ardı ederse, uzun vadeli politik kararlar daha büyük toplumsal gerilimlere yol açabilir.

Ekonomik belirsizlikler ve jeopolitik gerilimler, iklim politikalarının öncelik sırasını değiştirme riski taşımaktadır. Karbon vergileri, temiz enerjiye geçiş politikaları ve küresel iş birlikleri, artan ticaret savaşları ve ekonomik gerilimler nedeniyle sekteye

uğrayabilir. Özellikle gelişmekte olan ülkeler, iklim değişikliğiyle mücadele için finansal destek konusunda zorluklar yaşamaktadır.

WEF 2025 Global Riskler Raporu, iklim değişikliğinin artık uzun vadeli bir tehdit değil, acil bir kriz olduğunu vurgulamaktadır. Sera gazı emisyonlarının azaltılması, aşırı hava olaylarıyla mücadele ve ekosistemlerin korunması için hızlı ve etkili önlemler alınmadığı takdirde, küresel ekonomik ve toplumsal istikrarın ciddi şekilde bozulacağı öngörülmektedir [35].

Paris Anlaşması, 2015 yılında Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) kapsamında kabul edilen ve 2016 yılında yürürlüğe giren küresel bir iklim anlaşmasıdır. Anlaşmanın temel hedefi, küresel ortalama sıcaklık artışını sanayi öncesi seviyelere kıyasla mümkün olduğunda 2°C'nin altında tutmak ve 1,5°C ile sınırlamak için çaba göstermektir.

Anlaşma, ülkelerin sera gazı emisyonlarını azaltma, iklim değişikliğine uyum sağlama ve bu çabaları desteklemek için finansal akışları yönlendirme taahhütlerini içermektedir. Her ülke, ulusal katkı beyanları (Nationally Determined Contributions - NDC) aracılığıyla kendi emisyon azaltım hedeflerini belirler ve bu hedefleri düzenli olarak günceller. Paris Anlaşması, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler arasında "ortak fakat farklılaştırılmış sorumluluklar ve göreceli kabiliyetler" ilkesine dayanır.

Aynı zamanda Paris Anlaşması, iklim değişikliğiyle mücadelede küresel iş birliğini teşvik ederken, sürdürülebilir kalkınma ve yoksulluğun azaltılması hedeflerini de desteklemektedir [5].

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanan Türkiye'nin sera gazı envanteri, 1990-2022 yılları arasındaki emisyon trendlerini analiz eden kapsamlı bir ulusal rapordur. Bu belge, Türkiye'nin sera gazı emisyonlarının bileşenlerini ve ana kaynaklarını detaylandırmaktadır [7].

İklim Değişikliğine Uyum Stratejisi ve Eylem Planı'na göre Türkiye'de sera gazı emisyonlarının en büyük kaynağı enerji sektörüdür. 2018 yılı itibarıyla toplam emisyonların yaklaşık %73'ü fosil yakıt tüketiminden kaynaklanmaktadır. Kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtların yakılması, özellikle karbon emisyonlarının büyük kısmını oluşturmaktadır. Bu tablo, Türkiye'nin iklim değişikliğiyle mücadelesinde enerji dönüşümünü hızlandırmasının bir zorunluluk olduğunu ortaya koymaktadır.

Türkiye, 2053 Net Sıfır Karbon Hedefi doğrultusunda, enerji sisteminde yenilenebilir kaynaklara yönelmeyi öncelikli bir strateji olarak belirlemiş durumdadır. Bu kapsamda yenilenebilir enerji kaynaklarının artırılması, enerji verimliliği politikalarının güçlendirilmesi ve düşük karbonlu üretim teknolojilerine yatırım yapılması temel hedefler arasında yer almaktadır.

Özellikle rüzgâr, güneş ve hidroelektrik santrallerinin teşvik edilmesi, sanayide daha düşük karbon salımı sağlayacak üretim modellerine geçiş yapılması, Türkiye'nin sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik eylem planının temel bileşenleri arasındadır.

Geldiğimiz noktada, 2023 itibarıyla Türkiye'nin enerji üretiminde yenilenebilir enerjinin payı %52 seviyesine ulaşmıştır. Ancak bu yeterli olmamakta; bu oranın 2030'a kadar daha da artırılması hedeflenmektedir. Bu kapsamda Türkiye güneş, rüzgâr ve hidroelektrik santralleri için teşvikleri artırmayı, yeni yatırımları hızlandırmayı, kömüre dayalı enerji üretimini kademeli olarak azaltmayı, fosil yakıtlardan yenilenebilir enerjiye geçiş sürecini desteklemeyi öncelikli politikalar olarak belirlemiş durumdadır.

Türkiye'nin karbon nötr bir geleceğe ulaşabilmesi için fosil yakıtlardan çıkış sürecini hızlandırması, yenilenebilir enerji yatırımlarını kararlılıkla sürdürmesi ve enerji verimliliği konusunda kapsamlı politikalar geliştirmesi büyük önem taşımaktadır [7].

Türkiye, iklim değişikliğiyle mücadelede ilk olarak sunduğu Ulusal Katkı Beyanı'nda (INDC), 2030 yılına kadar mevcut gidişatına kıyasla %21 emisyon azaltımı hedeflemiştir. Ancak, artan enerji talebi ve ekonomik büyüme doğrultusunda bu hedefin gerçekleştirilmesi için yenilenebilir enerjiye daha fazla yatırım yapılması, enerji verimliliği politikalarının güçlendirilmesi ve düşük karbon teknolojilerine geçişin hızlandırılması gerekliliği vurgulanmıştır.

Bu kapsamda, güneş ve rüzgar enerjisinin artırılması, hidroelektrik potansiyelin tam kapasiteyle kullanılması, sanayi, ulaştırma, tarım, atık yönetimi ve orman rehabilitasyonu gibi sektörlerde çeşitli stratejilerin uygulanması önemli adımlar olarak belirlenmiştir [25].

Daha sonra Türkiye 2023 yılında Ulusal Katkı Beyanı'nı güncelleyerek, 2030 yılı için emisyon azaltım hedefini %41 olarak revize etmiştir. Bu yeni hedefle birlikte, 2038 yılı, Türkiye'nin emisyonlarının zirve yapacağı yıl (peak year) olarak belirlenmiştir. Türkiye'nin Paris Anlaşması kapsamındaki net sıfır emisyon hedefini destekleyecek

yeni bir yol haritası oluşturulmuştur. Enerji, sanayi, tarım, ulaştırma ve atık yönetimi gibi kritik sektörlerde karbon azaltım stratejileri geliştirilmiştir.

Güncellenmiş NDC kapsamında yenilenebilir enerji yatırımlarının artırılması, enerji verimliliğinin güçlendirilmesi, karbon fiyatlandırma mekanizmalarının uygulanması, sanayi ve ulaştırma sektörlerinde düşük karbon teknolojilerine geçiş öne çıkan politikalarlardır.

Bu gelişmeler, Türkiye'nin karbon bütçesine uygun emisyon azaltım politikaları belirleyerek, 2053 net sıfır hedefini gerçekleştirme sürecinde önemli bir aşama kaydettiğini göstermektedir [25, 26].

şahin ve ekibinin hazırladığı Türkiye'nin Karbonsuzlaşma Yol Haritası: 2050'de Net Sıfır raporu, Türkiye'nin Paris Anlaşması kapsamında belirlediğı net sıfır emisyon hedeflerine ulaşabilmesi için atılması gereken adımları ele almaktadır. Rapor, farklı emisyon senaryolarını karşılaştırarak, fosil yakıtlardan çıkış, yenilenebilir enerjiye geçiş ve enerji verimliliğinin artırılması gibi temel stratejileri değerlendirmektedir.

Çalışmada, iki farklı senaryo incelenmektedir. Baz senaryoda Türkiye'nin mevcut politikalarını sürdürmesi halinde, sera gazı emisyonlarının 2050 yılında 700 Mt CO₂ seviyesine ulaşacağı öngörülmektedir. Net Sıfır Senaryosu: Türkiye, iddialı karbon azaltım politikaları uygularsa, 2050 yılına kadar emisyonların 130 Mt CO₂ seviyesine kadar düşürülebileceğı hesaplanmaktadır.

Rapora göre, Türkiye'nin 2050 yılında net sıfır emisyonu ulaşabilmesi için şu adımları hayata geçirmesi gerekir:

- Enerji sektöründe kömür kullanımının 2035 yılına kadar tamamen sonlandırılması,
- Ulaşımda fosil yakıt tüketiminin azaltılması ve elektrikli araçların yaygınlaştırılması,
- Sanayide karbon yakalama ve depolama (CCS) gibi düşük karbon teknolojilerine geçiş yapılması,
- Enerji verimliliğı politikalarının güçlendirilmesi,
- Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik yatırımların artırılması.

Rapor, Türkiye'nin karbon bütçesine uygun hareket etmesi ve Paris Anlaşması'ndaki taahhütlerine uyum sağlaması için güncellenmiş ve daha iddialı bir Ulusal Katkı Beyanı (NDC) belirlemesi gerektiğini de vurgulamaktadır [30].

Üstün, çalışmasında Türkiye'nin emisyon azaltım stratejisini ele almaktadır. Bu çalışmadaki tespitlere göre Türkiye, Paris Anlaşması kapsamında sunduğu Ulusal Katkı Beyanı'nda (NDC), mutlak emisyon azaltımı yerine, belirli bir senaryoya kıyasla emisyon artış hızını yavaşlatmayı hedefleyen "artıştan azaltım" stratejisini benimsemiştir. Bu stratejiye göre, emisyonların tamamen düşürülmesi yerine, mevcut projeksiyonlara göre daha düşük seviyede tutulması taahhüt edilmektedir.

Ancak bu yaklaşım, mevcut emisyon seviyelerinin gerçekten düşürülmesini değil, artış hızının yavaşlatılmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, Türkiye'nin Paris Anlaşması kapsamındaki taahhütleri, doğrudan net emisyon azaltımına odaklanan ülkelerle kıyaslandığında daha sınırlı kalmaktadır.

Üstün'ün çalışmasında, Türkiye'nin emisyon azaltım stratejisinin daha iddialı hale getirilmesi gerektiği ve mutlak emisyon azaltımına yönelik net bir yol haritası oluşturulması gerektiği vurgulanmaktadır. Çalışmada öne çıkan bazı öneriler şunlardır:

- Türkiye'nin emisyonlarını gerçekten azaltabilmesi için mutlak emisyon azaltım taahhüdü vermesi gerekmektedir.
- Enerji sektöründe kömür ve fosil yakıt kullanımına yönelik net bir çıkış planı oluşturulmalı ve yenilenebilir enerjiye geçiş hızlandırılmalıdır.
- Daha iddialı bir NDC sunulması, Türkiye'nin uluslararası finansal kaynaklara erişimini kolaylaştırabilir ve ekonomik fırsatlar yaratabilir.

Bu bağlamda çalışma, Türkiye'nin mevcut Ulusal Katkı Beyanı'nın (NDC) küresel iklim hedefleriyle tam uyumlu olmadığını ve daha güçlü emisyon azaltım politikalarına ihtiyaç duyduğunu vurgulamaktadır [33].

Aykaç Özen yaptığı çalışma, COVID-19 salgını sırasında uygulanan kısıtlamaların ve yavaşlamanın sera gazı emisyonlarını nasıl etkilediğini anlamayı amaçlamaktadır. Araştırma, Samsun ilinde ısınma için doğalgaz tüketimi ve karayolu ulaşımındaki değişimlere odaklanmaktadır.

Çalışmada, 2019-2020 (salgın öncesi) ve 2020-2021 (salgın dönemi) yılları karşılaştırılarak sera gazı emisyonlarının nasıl değiştiği analiz edilmiştir. Kullanılan yöntem, IPCC Tier-1 metodolojisine dayanmakta yani, doğalgaz ve yakıt tüketim miktarları, uluslararası standart emisyon faktörleriyle çarpılarak CO₂, CH₄ ve N₂O emisyon tahminleri yapılmıştır.

Sonuçlar oldukça çarpıcıdır:

- COVID-19 kısıtlamaları nedeniyle enerji tüketiminde önemli bir azalma yaşanmış, bu da toplam sera gazı emisyonlarında 17,3 Gg'lık bir düşüşe yol açmıştır.
- Isınma amaçlı doğalgaz kullanımındaki azalma sayesinde 8,16 Gg CO₂ eşdeğer emisyon önlenmiştir.
- Karayolu ulaşımındaki azalma ise 9,14 Gg CO₂ eşdeğer emisyon düşüşü sağlamıştır.

Çalışma, ulaşım ve ısınma gibi enerji yoğun sektörlerde yapılan değişikliklerin kısa vadede bile sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermektedir. Ancak, salgın kısıtlamalarının kaldırılmasıyla emisyonların yeniden artılabileceği ve sürdürülebilir enerji politikalarının hayata geçirilmesinin gerekliliği vurgulanmıştır.

Bu araştırma, karantina gibi ani değişimlerin karbon ayak izi üzerindeki etkisini ortaya koyarak, düşük karbonlu ulaşım ve enerji verimliliği politikalarının uzun vadeli olarak benimsenmesi gerektiğini hatırlatan önemli bir çalışmadır [3].

Deng ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma, COVID-19 sonrası G20 ülkelerindeki fosil yakıt kaynaklı CO₂ emisyonlarını tahmin etmek amacıyla makine öğrenmesi tabanlı bir yaklaşım geliştirmektedir. Çalışma, post-pandemi dönemde ülkelerin yeşil toparlanma stratejilerinin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini değerlendirerek, Paris Anlaşması'nın 1.5°C hedefine ne kadar yaklaşıldığını analiz etmektedir.

Makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak yapılan tahminler, post-pandemi döneminde fosil yakıt bazlı CO₂ emisyonlarının 2030 yılında, pandemi öncesi projeksiyonlara kıyasla %10,1 ila %17,7 daha düşük olacağını göstermektedir[8].

Ayaz tarafından yapılan bir çalışma, makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak Türkiye'nin gelecek yıllardaki CO₂ emisyonlarını tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Çalışmada, zaman serisi analizine dayalı olarak Otokorelasyon Entegre Hareketli

Ortalama (Autoregressive Integrated Moving Average – ARIMA) ve LSTM modelleri kullanılmış ve farklı metodolojilerin tahmin doğrulukları karşılaştırılmıştır. Global Carbon Atlas 2024 verileri kullanılarak Türkiye'nin 1865-2023 yılları arasındaki CO₂ emisyon verileri analiz edilmiş ve 2040 yılına kadar emisyon tahminleri oluşturulmuştur.

Çalışmada kullanılan metodoloji:

- ARIMA modeli (Otokorelasyon Entegre Hareketli Ortalama), geçmiş verilerdeki trendleri analiz ederek gelecekteki emisyon miktarlarını tahmin etmek için kullanılmıştır.
- LSTM, zaman serisi verilerinde uzun vadeli bağımlılıkları öğrenme yeteneği sayesinde daha karmaşık emisyon eğilimlerini öngörmek için uygulanmıştır.
- Modellerin doğruluğu, RMSE, MAE, MSE ve R² performans metrikleri ile değerlendirilmiştir.
- ARIMA modeli, %94,3 R² skoru ile en başarılı tahmin modelini sunarken, LSTM modeli %90,4 R² skoru ile ikinci sırada yer almıştır.

Sonuçlara göre:

- 2040 yılı itibarıyla kişi başına düşen karbon emisyonlarının 5.077 tCO₂ seviyesinde olacağı tahmin edilmiştir.
- ARIMA modeli, özellikle doğrusal trendlerde yüksek başarı gösterirken, LSTM modeli daha karmaşık veri desenlerini öğrenme konusunda etkili bulunmuştur.
- Çalışma, CO₂ emisyonlarının gelecekteki eğilimlerini tahmin etmede makine öğrenmesi yöntemlerinin güçlü araçlar sunduğunu ve karar vericilere sürdürülebilir iklim politikaları belirleme konusunda rehberlik edebileceğini göstermektedir.

Bu çalışma, Türkiye'nin karbon emisyonlarının gelecekte nasıl şekilleneceğini anlamak ve çevresel sürdürülebilirlik politikalarına bilimsel bir temel sağlamak açısından önemli bir kaynaktır [2].

Doğanlar ve arkadaşları tarafından 2021 yılında gerçekleştirilen çalışma, Türkiye'de ekonomik büyüme, finansal gelişme ve enerji tüketiminin uzun vadede CO₂

emisyonları üzerindeki etkisini analiz etmektedir. Çalışma, 1965-2018 yılları arasındaki yıllık zaman serisi verilerini kullanarak RALS-EG (Residual Augmented Least Squares - Engle & Granger) eşbütünleşme testi ve Bootstrap nedensellik analizi gibi gelişmiş ekonometrik yöntemlerle değişkenler arasındaki uzun vadeli ilişkileri incelemiştir.

Elde edilen sonuçlara göre:

- Ekonomik büyüme, CO₂ emisyonlarını azaltıcı bir etki gösterirken, enerji tüketimi ve finansal gelişme CO₂ emisyonlarını artırmaktadır.
- Türkiye’de enerji tüketimi, çevresel kirliliğin en önemli belirleyicisi olarak öne çıkmaktadır.

Çalışmada aşağıdaki sonuçlara varılmıştır;

- Finansal gelişme, ekonomik büyüme ve enerji tüketimi üzerinde tek yönlü nedensellik ilişkisine sahiptir ve bu durum, finansal genişlemenin çevresel etkileri artırabileceğini göstermektedir.
- Sonuçlar, Türkiye’nin çevresel kalitesini artırmak için yenilenebilir enerji yatırımlarına ağırlık vermesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Çalışmada, dinamik en küçük kareler (Dynamic Ordinary Least Squares - DOLS) yöntemi kullanılarak tahmin edilen uzun vadeli katsayılar, enerji tüketiminin CO₂ emisyonları üzerinde en güçlü etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, ekonomik büyümenin çevresel bozulmaya doğrudan katkıda bulunmadığı ve sürdürülebilir kalkınma politikalarının bu etkiyi olumlu yönde değiştirebileceği belirtilmiştir.

Bu çalışma, Türkiye’nin ekonomik ve finansal yapısının çevresel etkilerini değerlendirerek, sürdürülebilir büyüme politikalarına ışık tutan önemli bir kaynak niteliğindedir [9].

Yurtkuran tarafından yapılan çalışma, Türkiye’de tarım, yenilenebilir enerji üretimi ve küreselleşmenin CO₂ emisyonları üzerindeki etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, 1970-2017 yılları arasındaki veriler kullanılarak Gregory-Hansen eşbütünleşme testi ve Bootstrap ARDL modeli uygulanmıştır. Ayrıca, tam düzeltilmiş en küçük kareler (FMOLS) ve dinamik en küçük kareler

(DOLS) uzun dönem tahminleyicileri kullanılarak değişkenler arasındaki uzun dönem ilişkiler analiz edilmiştir.

Çalışmanın temel bulguları şunlardır:

- Tarım, yenilenebilir enerji üretimi ve ekonomik küreselleşmenin çevresel kirliliği artırdığı tespit edilmiştir.
- Uzun dönem tahminleyicilerine göre, tarım ve yenilenebilir enerji üretimi CO₂ emisyonlarını artıran iki ana faktördür.
- Küreselleşmenin ekonomik boyutu da çevresel kirlilik üzerinde pozitif etki göstermiştir.
- 2001 ekonomik krizi, ekonomik büyümenin yavaşlamasına neden olarak CO₂ emisyonlarını geçici olarak düşürmüştür.
- Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artmasının CO₂ emisyonlarını azaltmadığı, aksine hidroelektrik enerji üretiminin çevresel zararlar doğurabileceği öne sürülmüştür.

Çalışmada politik, sosyal ve ekonomik küreselleşme endeksleri (KOF Index) bağımsız değişken olarak kullanılmış ve küreselleşmenin çevresel etkileri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Sonuç olarak, Türkiye’nin çevresel sürdürülebilirliği artırmak için yenilenebilir enerji politikalarını daha etkin hale getirmesi, tarım sektöründe karbon ayak izini azaltacak uygulamalar benimsemesi ve ekonomik büyümeyi çevre dostu hale getirecek düzenlemeler yapması gerektiği vurgulanmıştır.

Bu çalışma, tarım, yenilenebilir enerji üretimi ve küreselleşmenin çevresel etkilerini değerlendiren ve Türkiye için sürdürülebilir çevre politikaları geliştirme sürecine katkı sağlayan önemli bir kaynak niteliğindedir [37].

Karaaslan ve Çamkaya tarafından yapılan çalışma, Türkiye’de ekonomik büyüme, sağlık harcamaları, yenilenebilir ve yenilenemez enerji tüketimi ile CO₂ emisyonları arasındaki kısa ve uzun vadeli ilişkileri analiz etmektedir. 1980-2016 yılları arasındaki yıllık veriler kullanılarak Otoregresif Dağıtılmış Gecikmeler (ARDL) yöntemi ve Toda-Yamamoto nedensellik testi uygulanmıştır.

Çalışmanın temel bulguları:

- Ekonomik büyüme (GSYH) ve yenilenemez enerji tüketimi (NREC), CO₂ emisyonlarını artırırken, sağlık harcamaları (HE) ve yenilenebilir enerji tüketimi (REC) uzun vadede CO₂ emisyonlarını azaltıcı etkiye sahiptir.
- Kısa vadede ise yalnızca GSYH ve REC, CO₂ emisyonları ile pozitif yönlü bir ilişki sergilemiştir.
- Toda-Yamamoto nedensellik testi sonuçları, GSYH, HE, REC ve NREC'den CO₂ emisyonlarına tek yönlü bir nedensellik ilişkisi olduğunu ortaya koymuştur.
- Ekonomik büyüme ile CO₂ emisyonları arasında uzun vadede doğrudan bir ilişki bulunmuş ve Türkiye'nin çevresel sürdürülebilirlik politikalarını güçlendirmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Çalışmada çevresel sürdürülebilirlik açısından ekonomik büyüme ve enerji tüketiminin dengelenmesi gerektiği ifade edilmekte ve yenilenebilir enerji yatırımlarının artırılmasının yanı sıra sağlık sektöründe enerji verimliliğine yönelik politikaların teşvik edilmesi önerilmektedir. Türkiye'nin karbon emisyonlarını azaltması için fosil yakıt bağımlılığını azaltarak, sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelmesi gerektiği belirtilmiştir.

Bu çalışma, Türkiye'de enerji tüketimi, sağlık harcamaları ve ekonomik büyümenin çevresel etkilerini değerlendiren önemli bir kaynak niteliğindedir [18].

Xie ve ekibinin 2021 yılında yaptığı çalışmada karbon emisyonlarını tahmin etmek için geleneksel yöntemlerden daha başarılı olan yeni bir model önerilmiştir. Kesirli türev içeren gri Bernoulli modeli (CCFNGBM) adını verdikleri bu model, enerji tüketimine bağlı CO₂ emisyonlarını tahmin ederken yüksek doğruluk göstermektedir.

Araştırmada, Grey Wolf Optimizer (GWO) algoritması kullanılarak modelin parametreleri optimize edilmiş ve Çin'in 2023 yılına kadar olan emisyonları tahmin edilmiştir. Bu yeni model, geleneksel tahmin tekniklerinden (ARIMA, Yapay Sinir Ağları (ANN), Destek Vektör Makineleri (SVM) ve Gri Model (GM)) daha düşük hata oranına sahip olmuştur.

Öne çıkan bulgulara göre, kesirli kalkülüs tabanlı yaklaşımlar, zaman serisi analizlerinde oldukça güçlü tahminleme araçları sunabilir. Çalışma, karbon

emisyollarını daha iyi modellemek ve enerji politikalarına bilimsel destek sağlamak isteyen karar vericiler için önemli bir kaynak niteliğindedir [36].

Kevser Şimşek tarafından yapılan bir doktora tezi çalışması, kesirli kalkülüs ve derin değerlendirme metodolojisini kullanarak havacılık verilerinin modellenmesi, etki faktörlerinin analizi ve gelecek verileri tahminleme üzerine odaklanmaktadır. Çalışmada, havayolu taşımacılığı verileri, kesirli türev kavramı ve çok değişkenli analiz yaklaşımlarıyla değerlendirilerek modelleme sürecinde yeni bir yöntem geliştirilmiştir.

Tezde, hava yolcu sayısı, hava kargo taşımacılığı, uçuş sayısı, varış noktaları, uluslararası yolcular ve uçuş verileri gibi birçok değişkenin tahmin edilmesi amacıyla türevli çok fonksiyon girdili modelleme (MDAM with Derivative) kullanılmıştır. Bu modelleme yöntemi, geleneksel modellere kıyasla kesirli kalkülüsün bellek etkisi özelliğinden faydalanarak daha düşük hata oranlarıyla geleceğe yönelik tahminler sunmaktadır.

Çalışmada kullanılan metodoloji:

- Kesirli kalkülüs kullanılarak geliştirilmiş matematiksel modelleme yaklaşımları uygulanmıştır.
- Caputo kesirli türevi temel alınarak havacılık faktörleri için yeni bir öngörü modeli oluşturulmuştur.
- MDAM-wd ile geleneksel MDAM yöntemi karşılaştırılmıştır.
- 2011-2019 yılları arasındaki veriler kullanılarak, farklı ülkelerin havacılık performansları modellenmiş ve etki faktörleri analiz edilmiştir.

Çalışmanın temel bulguları:

- Geleneksel türevsiz modellere kıyasla, kesirli türev kullanan modelin hata oranının daha düşük olduğu belirlenmiştir.
- En öngörülebilir ülke İngiltere olarak belirlenirken, Türkiye'nin uluslararası yolcu tahminlerinde hata oranının daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Havacılık sektöründe kullanılan veri analiz yöntemleri arasında kesirli kalkülüs tabanlı yaklaşımların daha iyi performans sergilediği tespit edilmiştir.

Bu çalışma, kesirli kalkülüsün havacılık ve ulaşım sektöründe veri analizi ve tahminleme süreçlerinde nasıl etkin bir şekilde kullanılabileceğini gösteren önemli bir akademik katkı sunmaktadır [31].

Şeyma Beşir tarafından yapılan çalışma, kesirli kalkülüs ile G-8 ülkeleri ve Türkiye'nin ekonomik verileri kullanılarak Gayrisafi Yurt İçi Hasıla (GSYİH) büyüme oranlarının iki değişkenli fonksiyon olarak modellenmesini amaçlamaktadır. Tezde, ekonomik büyümenin temel belirleyicileri olan ihracat, ithalat, doğrudan yabancı yatırımlar, enflasyon ve işsizlik oranı gibi ekonomik faktörler kullanılarak kesirli diferansiyel modelleme yapılmıştır.

Bu çalışmada, kesirli kalkülüs teorisinin bellek etkisi ve yerel olmayan süreçleri modelleme yeteneği sayesinde ekonomik büyüme tahminlerinde daha düşük hata oranları elde edilmiştir. Özellikle Caputo kesirli türevi ve en küçük kareler yöntemi kullanılarak oluşturulan modelleme yaklaşımı, geleneksel polinom tabanlı yöntemlere kıyasla daha başarılı tahmin sonuçları sağlamıştır.

Çalışmada kesirli türev kullanılarak ekonomik büyüme tahmin modeli geliştirilmiştir. 1998-2022 yılları arasındaki G-8 ülkeleri ve Türkiye'nin ekonomik büyüme verileri kullanılmıştır. Gayrisafi Yurt İçi Hasıla (GSYİH) büyüme oranı, ekonomik faktörler ile ikili kombinasyonları şeklinde modellenmiştir (örneğin, ihracat-enflasyon, ithalat-doğrudan yabancı yatırım vb.). Modelin başarımı, Ortalama Yüzdesel Mutlak Hata (MAPE) metriği ile değerlendirilmiştir. Kesirli kalkülüs tabanlı modelleme, özellikle ithalat ve ihracat değişkenleriyle en yüksek doğruluk seviyesine ulaşmıştır.

Çalışmada genel olarak tüm ülkeler için yüksek modelleme başarısı elde edilmiştir. En düşük modelleme hatası, Japonya'nın ihracat-enflasyon değişkenleri için %0.0000010252 MAPE değeri ile hesaplanmıştır. En yüksek modelleme hatası, Rusya'nın enflasyon-işsizlik oranı değişkenleri için %0.36727 olarak belirlenmiştir. İşsizlik oranı ve enflasyon gibi değişkenlerin modelleme başarısı görece düşük olurken, ithalat ve ihracat faktörleri daha yüksek doğruluk göstermiştir.

Bu çalışma, kesirli kalkülüsün ekonomik veri modellemesinde nasıl etkin bir şekilde kullanılabileceğini ve geleneksel yöntemlere kıyasla daha düşük hata oranları ile daha isabetli tahminler yapabileceğini gösteren önemli bir akademik katkı sunmaktadır [4].

Önal tarafından yapılan çalışma, çocukların fiziksel gelişimini (boy, kilo ve vücut kitle indeksi) modellemek için kesirli kalkülüs tabanlı bir matematiksel yaklaşım

sunmaktadır. Araştırmacılar, 0-18 yaş aralığındaki çocukların Türkiye’deki büyüme yüzdelik dilimlerini kullanarak sürekli bir eğri oluşturmuş ve kesirli türevlerin bu modellemedeki üstünlüğünü göstermiştir.

Kesirli türevlerin geçmiş bilgiyi içeren doğası nedeniyle, çocukların büyüme süreçlerinin modellenmesinde daha başarılı olduğu bulunmuştur. Çalışmada, Riemann-Liouville kesirli türev operatörü kullanılmış ve elde edilen model, polinomsal ve doğrusal modellerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, kesirli modelin hata oranını (MAPE) düşürdüğünü ve daha güvenilir tahminler sunduğunu göstermiştir. Modelin, çocukların gelecekteki büyüme eğilimlerini öngörmeye etkili olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışma, sağlık bilimleri ve biyomedikal modelleme açısından kesirli kalkülüsün güçlü bir araç olduğunu vurgulamakta ve kesirli türevlerin biyolojik sistemlerin modellenmesinde giderek daha fazla kullanıldığını göstermektedir [22].

Şimşek ve arkadaşları tarafında yapılan çalışma, hava taşımacılığı verilerini modellemek ve tahmin etmek için Kesirli Kalkülüs (Fractional Calculus), MDAM kullanılarak yeni bir yaklaşım önermektedir. Araştırma kapsamında 2011-2019 yılları arasında dünyanın en yoğun havaalanlarına sahip sekiz ülkenin hava taşımacılığı verileri analiz edilmiştir.

Günümüzde hava taşımacılığı, küresel ekonominin en kritik bileşenlerinden biri olarak görülmektedir. Her gün yaklaşık 12 milyon yolcu ve 18 milyar dolar değerinde mal hava yoluyla taşınmaktadır. Gelecek 20 yıl içinde hava trafiğinin iki katına çıkması beklenmektedir, ancak bu büyüme, sistemin kapasitesini zorlayacak ve yönetim sürecinde zorluklar yaratacaktır. Hava taşımacılığı verileri tahmin edilmesi zor bir süreçtir, çünkü ekonomik krizler, pandemiler ve diğer dışsal faktörler nedeniyle veriler büyük dalgalanmalar gösterebilmektedir.

Çalışmada, hava taşımacılığı verilerini modellemek için kesirli türev denklemleri kullanılmıştır. Kesirli türevler, geçmiş verilerin bugüne olan etkisini içeren hafıza özelliğine sahiptir ve bu nedenle zaman serisi modellemede klasik yöntemlere kıyasla daha iyi performans göstermektedir. Matematiksel modelleme sürecinde en küçük kareler yöntemi ve Laplace dönüşümü kullanılarak, değişkenlerin türev dereceleri optimize edilmiştir. Bu yöntem, geleneksel yöntemlere göre daha düşük hata oranları sağlayarak hava taşımacılığı verilerini daha başarılı şekilde modellemiştir.

Çalışmada 8 ülkenin hava taşımacılığı verileri incelenmiştir ve MDAM ve MDAM-wd (MDAM with derivative) olmak üzere iki farklı modelleme yöntemi kullanılmıştır. MDAM-wd yöntemi, geleneksel MDAM yöntemine kıyasla daha düşük hata oranları sağlamıştır. 2019 yılı tahmin sonuçlarına göre, yapılan 72 tahminin %90'ı %10'un altında hata payına sahip olmuştur. En düşük hata oranı İngiltere'nin uluslararası uçuş verilerinde (%0.02) bulunmuştur. İngiltere, Almanya ve ABD gibi ülkeler için de başarılı tahmin sonuçları elde edilirken, Hindistan ve Türkiye için modelin hata payı daha yüksek olmuştur. Bu çalışma, kesirli diferansiyel denklemler ve derin öğrenme yöntemlerinin hava taşımacılığı planlamasında nasıl daha etkin kullanılabileceğini göstermektedir.

Bu bulgular, hava taşımacılığı sistemlerinin daha verimli yönetilebilmesi ve gelecekteki taleplerin doğru tahmin edilebilmesi için kesirli kalkülüs tabanlı modelleme yöntemlerinin güçlü bir araç olabileceğini göstermektedir [32].

Önal Tuğrul tarafından yürütülen doktora araştırmasında, kesirli kalkülüsün hafıza özelliği ve esnek türev tanımı sayesinde ekonomik verilerin daha isabetli şekilde modellenebileceği öne sürülmüş ve bu doğrultuda iki yeni matematiksel yaklaşım geliştirilmiştir: Tek fonksiyon girdili Derin Değerlendirme Yaklaşımı (DAM) ve Çok Fonksiyon Girdili Derin Değerlendirme Yaklaşımı (MDAM). Her iki model de MATLAB ortamında kodlanarak, 1960–2019 yılları arasındaki uluslararası ekonomik veriler üzerinde uygulanmıştır.

DAM modeli, kişi başına GSYİH verileri kullanılarak Amerika, Brezilya, Çin, Hindistan, İtalya, İspanya, İngiltere, Japonya, Türkiye ve Avrupa Birliği için test edilmiştir. En düşük modelleme hatası %0.81 ile Amerika'da, en yüksek hata ise %7.26 ile Brezilya'da gözlenmiştir. Test aşamasında ise en düşük hata %0.056 (İspanya), en yüksek hata %0.91 (İngiltere) olarak hesaplanmıştır.

MDAM modeli ile, G-8 ülkeleri ve Türkiye'nin 2000–2019 dönemine ait ekonomik göstergeleri (cari denge, ihracat, büyüme oranı, tasarruf, yatırım, ithalat, enflasyon, faiz, işsizlik) ile modelleme, öngörü ve etki faktörü analizleri gerçekleştirmiştir. 81 farklı faktör için yapılan modellemede en yüksek hata %0.0003112 ile Fransa'nın enflasyon verisinde gözlemlenmiştir. 162 öngörü sonucunda, tahmin hatasının %10'un altında kaldığı oran %75.4'tür.

Etki faktörü analizleri, ülkelere göre farklı değişkenlerin birbirleri üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Örneğin, Türkiye'de ithalat ihracatı zayıf negatif etkilerken, pek çok ülkede bu ilişki pozitif yöndedir. Çalışma, çok girişli sistemin kesirli türevlerle daha da zenginleştirilerek ileri düzey ekonomik modellemeler yapılabileceğini önermektedir [23].

Önal ve arkadaşları tarafından yürütülen bir başka çalışma, Caputo kesirli türevini ve MDAM kullanarak ekonomik verilerin modellenmesi ve tahmin edilmesi için yeni bir matematiksel yöntem önermektedir. Araştırmada 2000-2019 yılları arasındaki G-8 ülkeleri ve Türkiye'nin ekonomik göstergeleri analiz edilerek, mevcut tahmin yöntemleriyle kıyaslama yapılmıştır.

Kesirli türevlerin bellek etkisi (memory effect) nedeniyle, geçmiş verilerin bugüne olan etkisini içermesi ekonomik süreçleri modellemede avantaj sağlamaktır. Caputo kesirli türevleri, ekonomik büyüme, enflasyon, istihdam, ihracat ve ithalat gibi makroekonomik göstergelerin tahmininde kullanılmıştır. Matematiksel modelleme sürecinde, Laplace dönüşümü ve en küçük kareler yöntemi (LSM) ile türev dereceleri optimize edilmiştir. Çalışmada G-8 ülkeleri ve Türkiye'nin 2000-2019 dönemi verileri kullanılmıştır.

Çalışmada MDAM yöntemi, Çoklu Doğrusal Regresyon (Multi Linear Regression) MLR) ve LSTM sinir ağlarıyla kıyaslanmıştır. MDAM, tahminlerin %75.04'ünü %10 hata oranının altında yaparak geleneksel yöntemlere kıyasla daha başarılı bulunmuştur.

Caputo kesirli türevi bazlı modelleme, geleneksel ekonometrik yöntemlere kıyasla daha düşük hata oranları sağlamaktadır. Özellikle değişken ekonomik ortamlarda (COVID-19 sonrası ekonomik belirsizlikler gibi), kesirli diferansiyel denklemlerle modelleme daha doğru sonuçlar verebilmektedir. LSTM ve MLR yöntemleriyle karşılaştırıldığında, MDAM farklı ekonomik faktörler arasında daha güçlü ilişkiler kurarak çok yönlü bir modelleme yapısı sunmaktadır.

Bu çalışma, kesirli kalkülüs ile ekonomik büyüme tahmini, enflasyon analizi ve finansal piyasa modellemelerinde yeni bir perspektif sunarak literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır [24].

Aksoy ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma, kısa vadeli enerji yük tahmini için makine öğrenmesi ve kesirli kalkülüs tabanlı modelleme yaklaşımlarını

karşılaştırmaktadır. Enerji yük tahmini, enerji arz-talep dengesinin sağlanması, sistem güvenliğunun artırılması ve enerji maliyetlerinin azaltılması açısından kritik bir öneme sahiptir.

Çalışmada, derin öğrenme ve makine öğrenimi yöntemleri kullanılarak 1 saat ve 1 gün sonrası için enerji tüketimi tahmini yapılmıştır. Zaman serisindeki düzensizlikleri ortadan kaldırmak ve enerji tüketiminin dinamiklerini daha iyi anlamak için kesirli kalkülüs ile enerji yük verileri matematiksel olarak modellenmiştir.

NARXNet modeli, 1 saat öncesi tahminlerde en düşük hata oranına sahip olmuştur. Light Gradient Boosting (LGBM), 1 gün öncesi tahminlerde en yüksek doğruluğa ulaşmıştır. Kesirli Kalkülüs bazlı DAM modeli, kesirli türev kullanımı sayesinde zaman serisinin hafızasını koruyarak daha yüksek doğruluk oranı elde etmiştir. Kesirli Model-3, veri setini en düşük hata oranı ile modellemiştir.

Kesirli Kalkülüs ile yapılan modellemeler, enerji yük tahmininde geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek doğruluk sağlamaktadır. DAM modeli ve Kesirli Model-3, enerji tüketiminde belirsizlikleri ortadan kaldırarak tahminlerin doğruluğunu artırmaktadır. Özellikle değişken hava koşullarının olduğu dönemlerde, kesirli diferansiyel denklemler içeren modeller daha başarılı olmuştur. Bu çalışma, enerji şebekesi yönetiminde kesirli kalkülüs ve makine öğrenmesi tabanlı yöntemlerin kullanımına dair önemli katkılar sunmaktadır [1].

Ergün ve arkadaşlarının çalışması, internet erişim oranlarının kesirli kalkülüs ile modellenmesini ve İnsani Gelişmişlik Endeksi ile olan ilişkisini analiz etmektedir. İnternet erişimi, çağdaş toplumların temel gereksinimlerinden biri haline gelmiş olup, dijital uçurumun ülkeler arasındaki ekonomik ve sosyal eşitsizliklere nasıl katkıda bulunduğunu anlamak için önemli bir gösterge olarak kabul edilmektedir.

Çalışmada, Fransa, Almanya, İtalya, Meksika, İspanya, Türkiye ve Birleşik Krallık dahil olmak üzere yedi ülkenin 2005-2018 yılları arasındaki internet erişim oranları incelenmiştir. Kesirli kalkülüs temelli iki farklı model (Fractional Model-1 ve Fractional Model-3) kullanılarak internet erişimi zaman serisi olarak modellenmiş ve geleneksel Polinom Modeli ile karşılaştırılmıştır.

Sonuçlara göre, Fractional Model-3, Fractional Model-1 ve Polinom Modeli'nden daha başarılı tahminler üretmiştir. Modelleme sonuçları analiz edildikten sonra, Pearson korelasyonu kullanılarak internet erişim oranları ile İnsani Gelişmişlik

Endeksi (Human Development Index - HDI) arasındaki ilişki hesaplanmıştır. Tüm yıllar için internet erişimi ve HDI arasında güçlü pozitif bir korelasyon bulunmuştur.

Ayrıca, Meksika ve Türkiye gibi ülkelerde internet erişiminin HDI'ye göre daha düşük seviyede olduğu görülmektedir. Bu çalışma, dijital uçurumun ülkeler arasındaki sosyo-ekonomik farklara nasıl katkıda bulunduğunu ve internet erişiminin HDI üzerindeki etkisini anlamak için önemli bir veri sunmaktadır. Bu çalışma, kesirli diferansiyel denklemlerin dijital erişim verileri üzerindeki modelleme gücünü göstererek, sosyal kalkınma ve teknolojik ilerleme arasındaki ilişkiyi bilimsel olarak analiz etmektedir [11].



2. YÖNTEM

2.1 Çoklu Derin Değerlendirme Metodolojisi (MDAM)

Kesirli analiz (fractional calculus) düşüncesi ilk olarak L'Hôpital'ın Leibniz'e yönelttiği “türev işlemi yalnızca tamsayı derecelerle sınırlı mıdır, yoksa kesirli mertebelere de genişletilebilir mi?” sorusuyla ortaya çıkmıştır. Bu fikir, ilerleyen yüzyıllarda birçok önemli matematikçinin ilgisini çekmiş ve bu alandaki kuramsal altyapının oluşmasına katkı sağlamıştır. Leibniz, Euler, Abel, Fourier, Laplace, Riemann, Liouville, Weierstrass, Letnikov, Riesz, Littlewood, Lévy ve Caputo gibi pek çok öncü isim, kesirli analiz kavramının evriminde belirleyici rol oynamıştır [6, 12-15, 19-21, 27, 28].

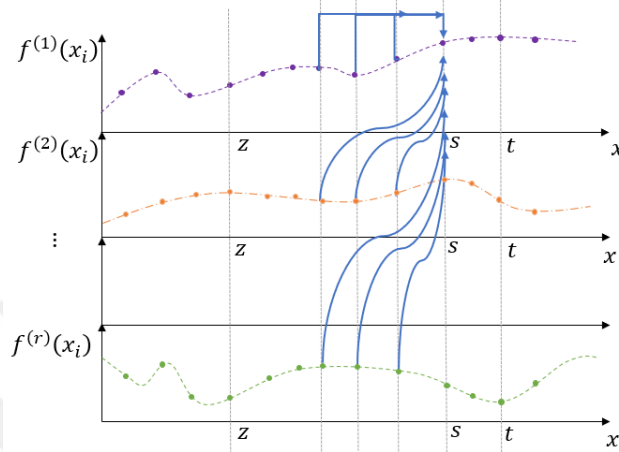
Literatürde yer alan önceki çalışmalar, kesirli türev kavramının zaman serisi modellemelerinde oldukça etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Bu tür modeller, özellikle uzun dönemli bağımlılık (memory effect) içeren sistemlerde yüksek öngörü başarısı sağlamaktadır. Kesirli kalkülüsün sunduğu matematiksel esneklik, hem teorik düzeyde hem de uygulamalı araştırmalarda güçlü avantajlar yaratmaktadır. Özellikle Caputo kesirli türevi ile geliştirilen yaklaşımların, geçmiş verilerin etkisini hesaplamalara dahil edebilmesi, çevresel veri serilerinin doğru ve güvenilir biçimde tahmin edilmesini mümkün kılmaktadır [23, 31]. Bu tez çalışmasında çoklu derin değerlendirme modeli kullanılmıştır.

Çoklu derin değerlendirme metodolojisi (M-DAM) yaklaşımının temel hedefi, bir zaman serisini yalnızca kendi geçmiş verileriyle değil, aynı zamanda onunla ilişkili diğer değişkenlerin geçmiş değerleriyle birlikte modellemektir.

Model yapısında yer alan yönlü oklar, belirli bir zaman noktasında $f_1(x_i)$ değerinin yalnızca kendi geçmiş verilerinden değil, aynı zamanda ilgili diğer fonksiyonların geçmişteki davranışlarından da etkilendiğini göstermektedir. Bu yaklaşım, bir değişkenin mevcut değerinin tahmininde, onun zaman içerisindeki dinamiklerinin yanı sıra ilişkili değişkenlerle olan zaman gecikmeli etkilerinin de hesaba katılması

gerektiği varsayımına dayanır. Böylece, karmaşık sistemlerin daha gerçekçi ve tutarlı biçimde modellenmesi sağlanmaktadır.

Şekil 2.1’deki temsil üzerinden, her bir fonksiyonun geçmiş veri noktaları kullanılarak nasıl modellendiği örneklenmiştir; bu duruma ilişkin matematiksel ifade denklem (2.1) ile verilmiştir.



Şekil 2.1 : Çoklu giriş derin değerlendirme (M-DAM) çalışma mantığı[24]

Örneğin burada burada $f^{(1)}(x_i)$ sera gazı emisyon verisi, $f^{(2)}(x_i)$ yenilenemez kaynaklarla üretilen enerji miktarı, $f^{(3)}(x_i)$ yenilenebilir kaynaklardan üretilen enerji miktarı ve $f^{(4)}(x_i)$ enerji talebi olarak modellenmiş, böylece tüm geçmiş veri değerlerinin sera gazı emisyon değerleri üzerindeki etkileri de dikkate alınabilmektedir. Burada geçmiş veri sayısı sabit değildir ve çalışmanın ihtiyaçlarına göre artırılabilir ya da azaltılabilir. İlgili matematiksel modelleme süreçleri, izleyen bölümde ayrıntılı biçimde ele alınacaktır [24].

$$\begin{aligned}
 f^{(1)}(x_s) = & \alpha_1^{(1)} f^{(1)}(x-1) + \alpha_2^{(1)} f^{(1)}(x-2) + \alpha_3^{(1)} f^{(1)}(x-3) \\
 & + \alpha_1^{(2)} f^{(2)}(x-1) + \alpha_2^{(2)} f^{(2)}(x-2) + \alpha_3^{(2)} f^{(2)}(x-3) \\
 & + \dots + \\
 & \alpha_1^{(r)} f^{(r)}(x-1) + \alpha_2^{(r)} f^{(r)}(x-2) + \alpha_3^{(r)} f^{(r)}(x-3)
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

2.1.1 Çok fonksiyon girdili modelleme sistemi

Bu başıkta, çoklu fonksiyonlu derin değerlendirme (M-DAM) modelinin matematiksel altyapısı anlatılmıştır. Çok fonksiyon girdili modelleme sisteminde [24], herhangi bir

faktöre katkısının olabileceği düşünülen diğer faktörler de modellemeye eklenir. Modellecek m 'nci faktör (2.2) deki gibi ifade edilir.

$$f^{(m)}(x) = \sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^r \alpha_k^{(j)} f^{(j)}(x - k) \quad (2.2)$$

Burada m girdi faktörlerimizden hangisini modellemek istiyorsak o faktörü ifade eder. Diğer faktörlerin katkısı göz önüne alınarak formül oluşturulur. Burada $f^{(j)}(x - k)$ fonksiyonun önceki değerlerinin belli sayıda toplamının $a_n^{(j)}$ katsayıları ile ağırlıklandırılmış hali (2.3)'te gösterilmiştir.

$$f^{(j)}(x - k) = \sum_{n=0}^M a_n^{(j)} (x - k)^{n\alpha_j} \quad (2.3)$$

Bu durumda (2.2) eşitliği aşağıdaki gibi (2.4) ile ifade edilir.

$$f^{(m)}(x) = \sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^r \sum_{n=0}^M \alpha_k^{(j)} a_n^{(j)} (x - k)^{n\alpha_j} \quad (2.4)$$

Bu esnada kesirli türev mertebesi ν ile ifade edilir. (2.4)'teki kısmı türevli diferansiyel denklemin çözümü için Laplace dönüşümünden faydalananarak denklemi cebirsel denkleme çevireceğiz. Denklemi çözerken Caputo türevinin Laplace dönüşümü özelliklerinden faydalanılmıştır [23]. $F^{(m)}(s)$; $f^{(m)}(x)$ in Laplace dönüşümüdür.

$$\frac{\partial^\nu f^{(m)}(x)}{\partial x^\nu} \triangleq \sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^r \sum_{n=1}^M \alpha_k^{(j)} a_n^{(j)} n\alpha_j (x - k)^{n\alpha_j-1} \quad (2.5)$$

$$F^{(m)}(s) = \frac{f^{(m)}(0)}{s} + \sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^r \sum_{n=1}^M a_{kn}^{(j)} \Gamma(n\alpha_j + 1) \frac{e^{-ks}}{s^{n\alpha_j+\nu}} \quad (2.6)$$

yazılır. Burada $a_{kn}^{(j)} = \alpha_k^{(j)} a_n^{(j)}$ dir. (2.6) eşitliğinin ters Laplace dönüşümü alınınca;

$$f^{(m)}(x) \cong f^{(m)}(0) + \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^l \sum_{n=1}^M a_{kn}^{(j)} C_{kn}^{(j)}(x) \quad (2.7)$$

$$C_{kn}^{(j)}(x) = \frac{\Gamma(n\alpha_j + 1)}{\Gamma(n\alpha_j + \nu)} (x - k)^{n\alpha_j + \nu - 1}$$

elde edilir. Herhangi bir faktörün modellenmesine (2.7) denklemi aracılığıyla en küçük kareler metodu kullanılarak $a_{kn}^{(j)}$ katsayılarının hesaplanmasıyla ulaşılır. En önemli nokta nokta kesir derecesi olan ν 'nün 0 ve 1 aralığında değişmesi ve modelleme hatasının en iyi değerini veren optimum ν değerinin bulunmasıdır. Böylece en optimum hata oranını veren $a_{kn}^{(j)}$ katsayıları ve ν değeri bulunur.

$$\left(\epsilon_T^{(m)}\right)^2 = \sum_{i=z}^t \left(\epsilon_i^{(m)}\right)^2 = \sum_{i=z}^t \left[\left(P_i^{(m)} - f^{(m)}(x_i)\right)^2\right] \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial \left(\epsilon_T^{(m)}\right)^2}{\partial f^{(m)}(0)} = 0 \text{ ve } \frac{\partial \left(\epsilon_T^{(m)}\right)^2}{\partial a_{pw}^{(s)}} = 0, \quad s = 1, 2, \dots, r, \quad p = 1, 2, \dots, l, \quad w = 1, 2, \dots, M \quad (2.9)$$

(2.8) ve (2.9) eşitliği dikkate alınarak buradan $(1 + r * l * M)$ adet denkleme ulaşılır. Hatanın en az olduğu ν ve $a_{kn}^{(j)}$ değerleri bulunarak modelleme işlemi gerçekleştirilir [24].

2.1.2 Çok fonksiyon girdili etki faktörü analizi

Faktör analizi için aranan katsayılar $\alpha_k^{(j)}$ değerleridir. Denklemden geçen $a_n^{(j)}$ ve α_j (kesirli türev derecesi) katsayıları bulunur. Bilinmeyenler (2.5)'teki $\alpha_k^{(j)}$ değerleridir. (2.5) denklemi

$$f^{(m)}(x) = \sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^r \sum_{n=1}^M \alpha_k^{(j)} E_{njk}(x) \quad (2.10)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, $E_{njk}(x)$ ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$E_{njk}(x) = a_n^{(j)} (x - k)^{n\alpha_j}$$

En küçük kareler metodu kullanılarak $\alpha_k^{(j)}$ katsayıları bulunabilir. Daha önce uygulanan yaklaşım $\alpha_k^{(j)}$ lere göre uygulanır. Burada, her bir faktör (j) ile temsil edilir ve geçmişe yönelik değeri (k) ile temsil edilmektedir. Böylece modellenecek faktöre

etki eden faktörlerin etki değerlerine ulaşılabilir. Daha önce bulunan denklemler ve (2.10) göz önünde bulundurularak (2.11) ve (2.12) denklemleri yazılır.

$$\left(\epsilon_T^{(m)}\right)^2 = \sum_{i=z}^t \left(\epsilon_i^{(m)}\right)^2 = \sum_{i=z}^t \left[\left(P_i^{(m)} - f^{(m)}(x_i)\right)^2 \right] \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial \left(\epsilon_T^{(m)}\right)^2}{\partial \alpha_y^{(s)}} = 0, \quad s = 1, 2, \dots, r; \quad y = 1, 2, \dots, l \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial \left(\epsilon_T^{(m)}\right)^2}{\partial \alpha_y^{(s)}} = 0 = \sum_{i=z}^t \left(P_i^{(m)} - \sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^r \sum_{n=1}^M \alpha_k^{(j)} a_n^{(j)} (x - k)^{n\alpha_j} \right)^2 \quad (2.13)$$

(2.12) – (2.13) ifadesinden $(r * l)$ tane denklem grubu elde edilir ve $\alpha_k^{(j)}$ etki katsayısı değerlerine ulaşılır [24].

2.1.3 Çok fonksiyon girdili öngörü

Modellenen herhangi bir faktör $(m = 1, 2, \dots, r)$ istenilen bir zaman ve geçmişine yönelik değerleriyle aşağıdaki gibi ifade edilir,

$$\begin{aligned} f^{(m)}(x) &= \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^l \beta_k^{(j)} f^{(j)}(x - k) \\ f^{(m)}(x - 1) &= \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^l \beta_k^{(j)} f^{(j)}(x - (k + 1)) \\ &\vdots \\ f^{(m)}(x - l) &= \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^l \beta_k^{(j)} f^{(j)}(x - (k + l)) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Burada, $x > 2l$ dır.

$$\left(\epsilon_T^{(m)}\right)^2 = \sum_{i=z}^t \left(\epsilon_i^{(m)}\right)^2 \quad (2.15)$$

$$= \sum_{i=z}^t \left[f^{(m)}(x-i) - \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^l \beta_k^{(j)} f^{(j)}(x-(k+i)) \right]^2$$

$$\frac{\partial \left(\epsilon_T^{(m)}\right)^2}{\partial \beta_y^{(s)}} = 0, \quad s = 1, 2, \dots, r; \quad y = 1, 2, \dots, l \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial \left(\epsilon_T^{(m)}\right)^2}{\partial \beta_y^{(s)}} = 0 = \sum_{i=z}^t \left[f^{(m)}(x-i) - \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^l \beta_k^{(j)} f^{(j)}(x-(k+i)) \right] f^{(s)}(x-(y+i)) \quad (2.17)$$

(2.17) denklemini (2.18)'deki gibi yazılır.

$$\sum_{i=z}^t f^{(m)}(x-i) f^{(s)}(x-(y+i)) = \sum_{i=z}^t \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^l \beta_k^{(j)} f^{(j)}(x-(k+i)) f^{(s)}(x-(y+i)) \quad (2.18)$$

(2.16) ve (2.17) denklemlerinden $(l * r)$ kadar denklem elde edilir. Bu denklemlerden daha önceki süreç devam ettirilerek elde edilen eşitlikler dönüştürülür, matris çözümü ile $\beta_k^{(j)}$ değerleri bulur, hangi faktörün gelecek değerinin öngörülmesi isteniyorsa (2.14) denklem takımının birincisinden yararlanılarak öngörü yapılabilir [24].

2.2 Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM)

Derin öğrenme temelli modellerden biri olan Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short Term Memory - LSTM), özellikle zaman serilerindeki uzun vadeli bağımlılıkları öğrenme kapasitesiyle öne çıkmaktadır. Bu bölümde, LSTM mimarisinin temel yapısı ve işleyişi ele alınacaktır.

Hochreiter ve Schmidhuber tarafından yapılan bir çalışma, yinelenen sinir ağlarının (Recurrent Neural Network - RNN) uzun vadeli bağımlılıkları öğrenme konusundaki sınırlamalarını aşmak için LSTM mimarisini tanıtmaktadır. Geleneksel RNN'lerin geri yayılım (backpropagation) sırasında kaybolan veya patlayan gradyan sorunlarını

çözemediği gösterilmiş ve bu problemlerin üstesinden gelmek için LSTM'nin kapı mekanizmalarına dayalı yeni bir yaklaşım sunduğu vurgulanmıştır.

Çalışmada kullanılan metodolojide zaman serisi verilerinde uzun vadeli bağımlılıkları yakalayabilmek için LSTM hücreleri geliştirilmiştir. LSTM, bellek hücreleri (memory cells) ve üç temel kapı mekanizması (giriş kapısı, unutma kapısı ve çıkış kapısı) içererek, bilginin uzun süreler boyunca korunmasını ve gerektiğinde güncellenmesini sağlamaktadır. Kapı mekanizmaları, gradyan akışını kontrol ederek kaybolan gradyan sorununu önlemekte ve uzun sekanslarda öğrenmeyi kolaylaştırmaktadır.

LSTM, geleneksel RNN'lerden farklı olarak, uzun zaman dilimlerindeki bağımlılıkları koruyabilmektedir. Yapay veri kümelerinde gerçekleştirilen deneyler, LSTM'nin diğer yinelenen ağlardan daha başarılı ve hızlı öğrenebildiğini göstermiştir. LSTM'nin konuşma işleme, el yazısı tanıma ve zaman serisi tahmini gibi birçok farklı alanda uygulanabilir olduğu ortaya konmuştur. LSTM, özellikle kaybolan gradyan problemine duyarlı olan klasik RNN yöntemlerine kıyasla büyük ölçüde iyileştirilmiş bir öğrenme performansı sergilemiştir. Bu çalışma, derin öğrenmede zaman serisi analizinin temel taşlarından biri olan LSTM mimarisinin teorik ve deneysel temelini atan önemli bir kaynak niteliğindedir [15].

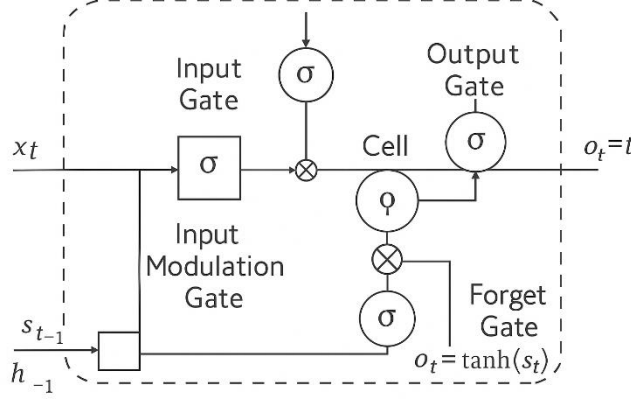
LSTM modeli bugün, zaman serisi tahmini, doğal dil işleme (NLP), ses tanıma ve biyomedikal veri analizi gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [2].

Literatürde yer alan çalışmalar;

- Zaman Serisi Tahmini: GSYİH, enflasyon, döviz kurları gibi ekonomik göstergelerin tahmininde kullanılır [2].
- Doğal Dil İşleme (NLP): Makine çevirisi, metin özetleme ve duygu analizi gibi alanlarda kullanılır [15].
- Biyomedikal Veri Analizi: EEG ve EKG verilerinin analizinde kullanılarak nörolojik hastalıkların tespitine yardımcı olur [15].
- İklim ve Çevresel Modeller: Sera gazı emisyonlarının tahmini ve iklim değişikliği analizinde kullanılmıştır [8].

2.2.1 LSTM'nin çalışma mekanizması

LSTM'nin temel farkı, kapı mekanizmaları kullanarak bilgi akışını kontrol edebilmesidir. Bir LSTM hücresi Şekil 2.2'de gösterilen temel bileşenlerden oluşur [15]:



Şekil 2.2 : Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) mimarisi.

2.2.1.1 Girdi (Net input)

LSTM hücresine her zaman adımında iki temel veri girer: o anki giriş vektörü ve bir önceki zaman adımından gelen gizli durum. Bu iki bilgi birleştirilerek hücredeki tüm kapıların (forget, input, output) hesaplamalarına temel oluşturur. LSTM'nin zaman içinde bağlamı korumasını sağlayan temel bileşenler bu ikili girdi üzerinden işlem görür. 1'e yakınsa bilgi alınır, 0'a yakınsa bilgi göz ardı edilir [15].

$$i_t = \sigma(x_t U^i + s_{t-1} W^i) \quad (3.1)$$

2.2.1.2 Unutma kapısı (Forget gate)

Forget gate (unutma kapısı), hücredeki uzun vadeli hafıza değerinin hangi kısmının unutulması gerektiğine karar verir. Bu kapı, sigmoid aktivasyon fonksiyonu ile çalışır ve 0 ile 1 arasında değerler üretir; bu değerler önceki hücre durumu üzerinde bir çarpan etkisi yapar. Eğer çıkış 1'e yakınsa bilgi korunur, 0'a yakınsa bilgi unutulur – böylece LSTM gereksiz verileri hafızadan eleyebilir [15].

$$f_t = \sigma(x_t U^f + s_{t-1} W^f) \quad (3.2)$$

2.2.1.3 Giriş kapısı (Input gate)

Input gate, yeni gelen bilgilerin hücreye ne ölçüde dahil edileceğini kontrol eder. Bu kapı iki ayrı bileşenden oluşur: ilki, yeni bilginin hangi kısmının önemli olduğuna karar verir ve ikincisi, aday hücre durumu ile gelen verinin içeriğini tanımlar. Bu iki bileşen çarpılarak hücreye eklenecek olan yeni bilgi oluşturulur [15].

$$g_t = \tanh(x_t U^g + s_{t-1} W^g) \quad (3.4)$$

2.2.1.4 Hücre durumu / bellek (Cell)

Cell (hücre durumu), LSTM'in hafızasını temsil eder ve uzun vadeli bilgiyi tutan temel yapıdır. Hücre durumu iki temel bileşenin toplamı ile güncellenir: ilki unutma kapısının önceki hücre değerini ne kadar taşıyacağını belirlediği kısım, ikincisi giriş kapısının yeni gelen bilgiyi ne kadar dahil edeceğini belirlediği kısım. Bu iki etkileşim sayesinde LSTM, önceki bilgileri koruyabilirken aynı zamanda yeni bilgileri entegre edebilir [15].

$$c_t = c_{t-1} \circ f + g \circ i \quad (3.5)$$

2.2.1.5 Çıkış kapısı (Output gate)

Output gate, hücrenin o anki çıktısının ne olacağını belirler. Önce çıkış kapısı o_t değeri sigmoid fonksiyonu ile hesaplanır ve ardından hücre durumu, tanh aktivasyonu ile dönüştürülerek o_t çarpılır. Bu işlem sonucunda hem kısa vadeli çıkarım yapılır hem de bilgi bir sonraki LSTM hücresine aktarılır, yani hem çıktı üretilir hem de ağıın belleği güncel tutulur [15].

$$o_t = \sigma(x_t U^o + s_{t-1} W^o) \quad (3.3)$$

$$s_t = \tanh(c_t) \circ o \quad (3.6)$$

2.2.2 Etki faktörü analizi ve öngörü

LSTM mimarisi, yalnızca zamana bağlı verilerdeki örüntüleri öğrenmekle kalmayıp, aynı zamanda modele entegre edilen çoklu değişkenlerin hedef değişken üzerindeki etkilerini de dolaylı olarak yakalayabilmektedir. Bu etkilerin yönü ve şiddetinin daha

açık biçimde ortaya konulabilmesi amacıyla, model eğitimi sonrasında doğrusal regresyon temelli bir faktör analizi gerçekleştirilir. Bu analiz kapsamında, modele dâhil edilen her bir bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerindeki etkisi ayrı ayrı incelenir ve bu etkiler, katsayı büyüklükleriyle birlikte pozitif ya da negatif yönlü olarak değerlendirilir. Öte yandan, LSTM'in ardışık veri işleme yeteneği sayesinde model, yalnızca geçmiş verilerle sınırlı kalmaksızın geleceğe dönük öngörüler de sunabilmektedir.

Model eğitildikten sonra tüm tarihsel veri üzerinde geçmiş bağımlı değişken tahminleri üretilir, tahminlerin performansı Mean Absolute Percentage Error (MAPE) metriğiyle ölçülerek optimize edilir. Gelecek yıllara yönelik tahminleme süreci, son bilinen veri uzunluğundaki dizi kullanılarak başlatılır; her bir yıllık tahmin, bir sonraki yıl için girdiye dönüştürülerek gelecek yıllar için zincirleme bir öngörü mekanizması kurulur.

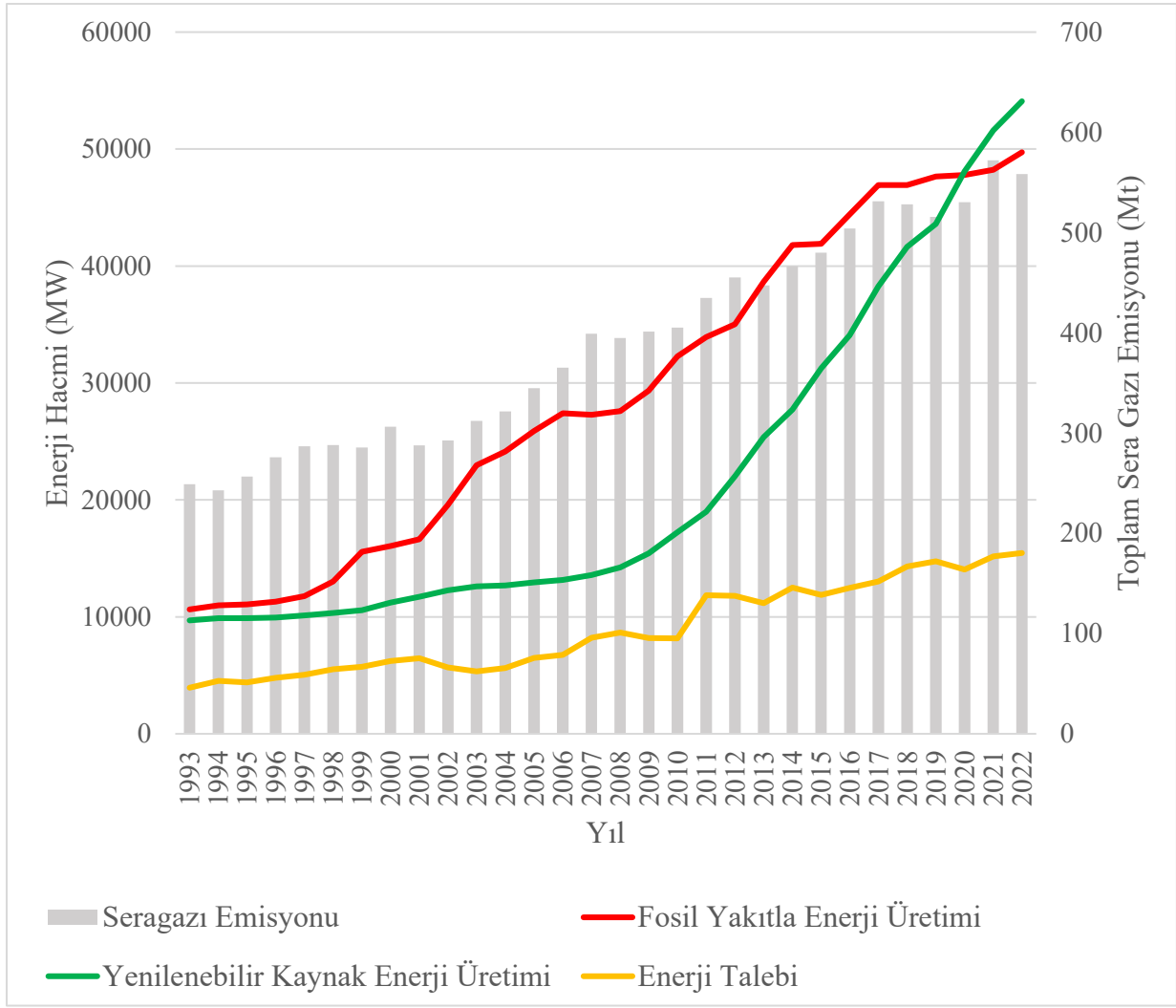
LSTM modeline giriş olarak verilen bağımsız değişkenler faktör olarak doğrudan kullanılır. Faktörler, farklı ölçeklerde olabileceği için normalize edilir ve çoklu doğrusal regresyon modeli ile kurulur. Regresyon katsayıları hesaplanır, bu katsayıların işaretleri ve büyüklükleri kullanılarak her faktörün bağımlı değişken üzerindeki etkisi pozitif ya da negatif yönlü olarak değerlendirilir [15].

3. UYGULAMA VE SONUÇLAR

3.1 Modelleme İçin Seçilen Veri Seti ve Anlamı

Türkiye'nin sera gazı emisyonlarını daha doğru modelleyebilmek ve bu emisyonların enerji üretimi ve enerjiye yönelik iç taleple olan ilişkisini ortaya koyabilmek için kullanılan veri seti, ülkenin enerji üretim yapısındaki dönüşüm ve sera gazı emisyon eğilimlerini uzun vadeli bir perspektifle analiz etmeye olanak tanımaktadır. Bu kapsamda, 1993–2022 dönemine ait sera gazı emisyon verileri, enerji üretiminin kaynak bazlı dağılımı (fosil yakıt ve yenilenebilir), enerji talebi miktarları ve üretim hacimleri bir arada değerlendirilmiştir. Veri seti Ek-1'de sunulmuştur.

Veri setini temel alarak oluşturulan Şekil 3.1 incelendiğinde, özellikle 2005 sonrası hem enerji iç talebinde (iç ihtiyaç) hem de üretimde hızlı bir artış olduğu göze çarpmaktadır. Bu artışa paralel olarak fosil yakıt kaynaklı üretim de belirgin şekilde yükselmiş, ancak 2015'lerden itibaren yenilenebilir kaynakların (jeotermal, rüzgar, güneş ve hidroelektrik) üretimdeki payında güçlü bir ivmelenme gözlemlenmiştir. Bu durum, Türkiye'nin enerji arzında daha sürdürülebilir kaynaklara yöneldiğini göstermektedir. Yenilenebilir enerji üretimindeki bu artışa rağmen sera gazı emisyonları 2018'e kadar yükselmeye devam etmiş, sonrasında ise yatay ve kısmen düşüş eğilimi göstermiştir. Bu eğilimde 2020 yılında yaşanan COVID-19 pandemisinin etkisi dikkat çekicidir; pandemi nedeniyle sanayi ve ulaşım gibi enerji yoğun sektörlerde yaşanan yavaşlama, emisyonların geçici olarak düşmesine neden olmuştur. Ancak izleyen yıllarda emisyonların tekrar yükselme eğilimine girmesi, sürdürülebilir enerji geçişinin hızlandırılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Türkiye'nin hem artan enerji talebini karşılamak hem de iklim hedeflerine yaklaşmak için yenilenebilir kaynaklara yaptığı yatırımlar bu süreçte kritik rol oynamaktadır. Bu grafik, COVID-19'un yarattığı geçici etki dışında, emisyonların ancak yapısal enerji dönüşümleriyle uzun vadede azaltılabileceğini ortaya koymaktadır.



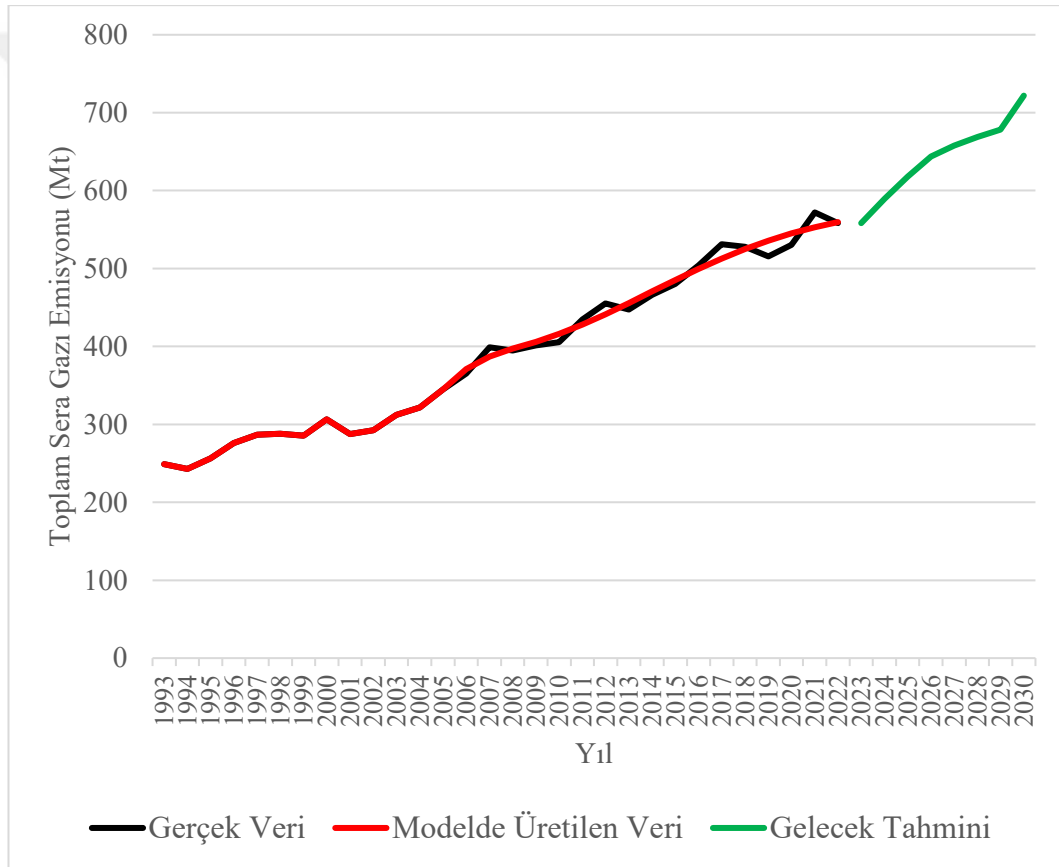
Şekil 3.1 : Kullanılan veri setinin grafik gösterimi.

3.2 MDAM Sonuçları

3.2.1 MDAM model sonuçları

Bu çalışmada, Türkiye'nin 1993–2022 dönemi sera gazı emisyon verileri, MDAM kullanılarak modellenmiş ve emisyonların geleceğe dönük projeksiyonları oluşturulmuştur. Modelde bağımlı değişken olarak sera gazı emisyon verisi alınırken, bağımsız değişkenler olarak enerji talebi, yenilenebilir enerji üretimi ve fosil yakıt kaynaklı enerji üretimi verileri kullanılmıştır. Modelleme sürecinde geçmiş veri etkisini temsil eden bellek uzunluğu (l) 10 olarak belirlenmiş, bu değer ve diğer tüm diğer parametreler veri setinin büyüklüğüne göre yapılan en düşük hata oranına göre optimize edilerek elde edilmiştir. Modelin doğruluğu, MAPE metriğiyle %1.6438 olarak hesaplanmış; bu da modelin oldukça düşük bir hata oranıyla çalıştığını

göstermektedir. Kesirli kalkülüs temelli MDAM yaklaşımında belirlenen optimal Niu değeri (kesir derecesi) ise 0.89 olup, bu değer emisyonların geçmiş eğilimlerden güçlü biçimde etkilendiğini ve yüksek düzeyde hafıza etkisi taşıdığını ortaya koymaktadır. Bu model aracılığıyla Şekil 3.2’de gösterildiği gibi 2030 yılı için yapılan tahmin 721.869 Mt CO₂ eşdeğeri olarak bulunmuştur. Bu değer, Türkiye’nin Paris Anlaşması çerçevesinde taahhüt ettiği 2030 yılına kadar 695 Mt seviyesine düşürülmesi hedefiyle karşılaştırıldığında, mevcut politikaların güçlendirilerek sürdürülmesi gerektiği değerlendirilmektedir. Elde edilen bulgular, sera gazı emisyonlarını azaltmak için daha kararlı ve yapısal politika adımlarına ihtiyaç duyulduğuna işaret etmektedir.



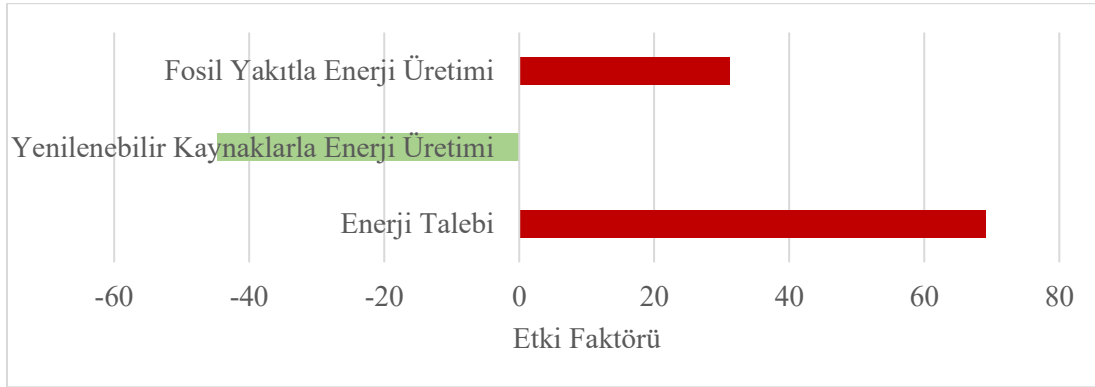
Şekil 3.2 : Sera gazı emisyonunun MDAM ile modelleme ve tahmin sonuçları

3.2.2 MDAM etki faktörü analizi sonuçları

Sera gazı emisyonunun belirleyicilerini daha derinlemesine anlayabilmek amacıyla yapılan etki faktörü analizinde, üç temel değişkenin sera gazı emisyonu üzerindeki etkisi hesaplanmıştır. Şekil 3.3’te de sunulan sonuçlara göre, enerji talebi sera gazı emisyonu üzerinde en yüksek pozitif etkiye sahiptir (69.0755). Bu da artan enerji

talebinin emisyonları doğrudan yukarı çektiğini ortaya koymaktadır. Fosil yakıt kaynaklı üretim de emisyonları artırıcı yönde etki göstermekte olup, etki değeri 31.2377 olarak hesaplanmıştır. Bu durum, fosil yakıt temelli enerji üretiminin Türkiye'nin karbon salımı üzerindeki doğrudan etkisini teyit etmektedir.

Öte yandan, yenilenebilir enerji üretimi sera gazı emisyonu üzerinde negatif bir etkiye sahiptir (-44.68), yani bu kaynakların artırılması emisyonları azaltıcı rol oynamaktadır. Bu bulgular, enerjide dönüşüm stratejilerinin önemini vurgularken; özellikle talep yönetimi, enerji verimliliği ve yenilenebilir kaynaklara geçişin emisyon azaltım hedeflerine ulaşmada kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

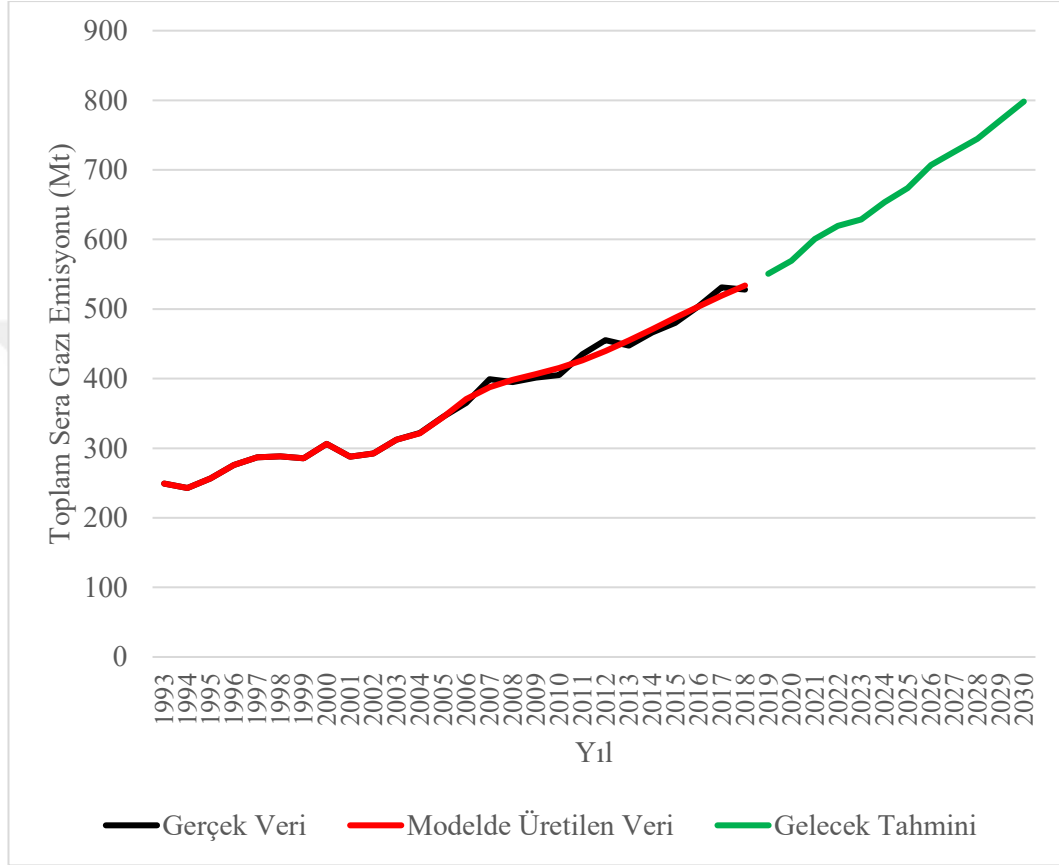


Şekil 3.3 : MDAM etki faktörü analizi sonuç grafiği

3.2.3 MDAM COVID etkisi sonuçları

COVID-19 pandemisinin sera gazı emisyonları üzerindeki etkisini analiz edebilmek amacıyla modelleme süreci, pandemi öncesini kapsayan 1993–2018 veri aralığıyla yeniden yürütülmüştür. Bu analizde, önceki modelde olduğu gibi referans geçmiş bellek uzunluğu (l) 10 olarak belirlenmiş, ancak bu kez daha dar bir dönemle çalışılmıştır. Kurulan modelin performans değerlendirmesinde MAPE değeri %1.3627 olarak hesaplanırken, kesirli türev derecesi (Niu) 0.94 olarak bulunmuştur; bu değer, sistemin geçmişe olan bağımlılığının oldukça güçlü olduğunu ve zaman serisinde kısa vadeli dalgalanmalar yerine daha derin geçmiş eğilimlerinin belirleyici olduğunu göstermektedir. Bu modelle yapılan ileri tahminlerde, Şekil 3.4'te de gösterildiği üzere, 2030 yılına ait sera gazı emisyonu değeri 798.1417 Mt CO₂ eşdeğeri olarak öngörülmüştür. Bu değer, pandemi döneminde gözlenen sanayi üretimi ve ulaşım gibi yüksek emisyon kaynaklarında yaşanan yavaşlamaların olmaması durumunda

Türkiye'nin karbon emisyonlarının çok daha yüksek seviyelere çıkabileceğini göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, COVID-19 krizi yalnızca bir sağlık krizi değil, aynı zamanda kısa vadeli olarak emisyon azaltımı üzerinde geçici fakat ölçülebilir bir etki yaratmıştır. Bu bulgu, olağan dışı küresel gelişmelerin emisyon projeksiyonları üzerinde nasıl belirleyici olabileceğini gözler önüne sermektedir.



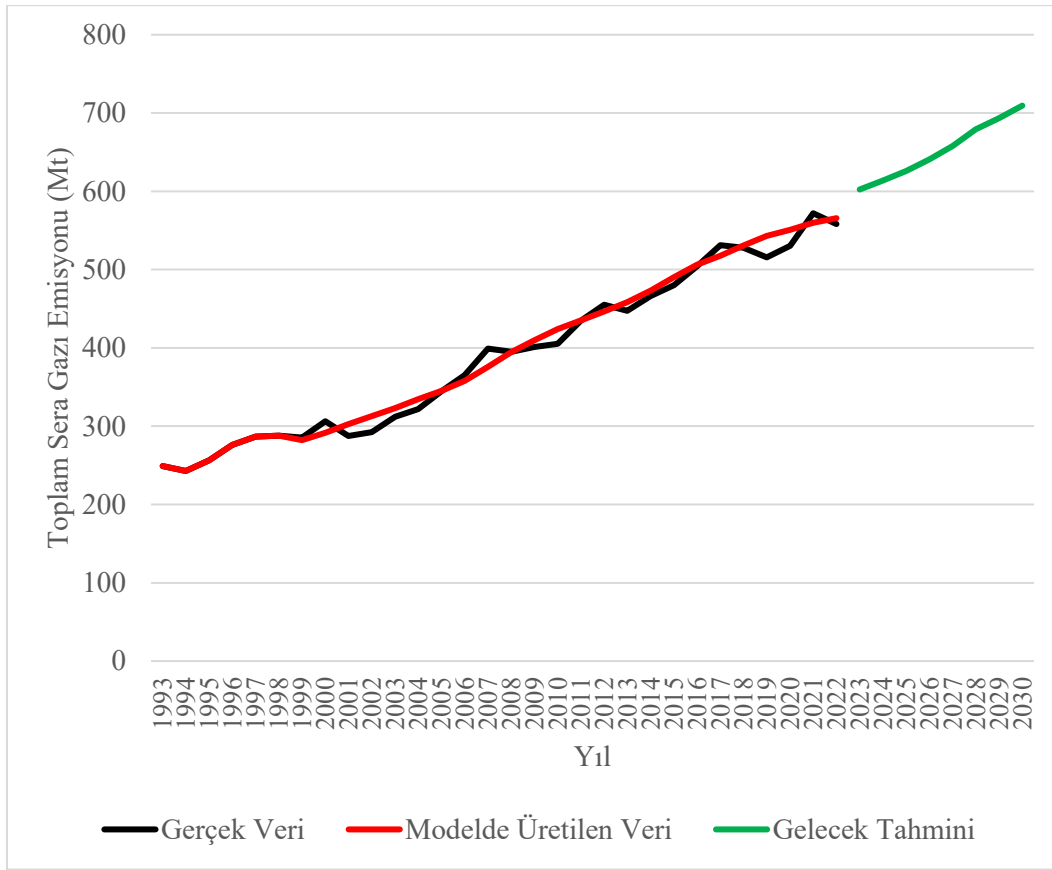
Şekil 3.4 : MDAM COVID etkisi haricinde modelleme ve tahmin sonuçları

3.3 LSTM Sonuçları

3.3.1 LSTM model sonuçları

MDAM yöntemiyle yapılan analizlerin ardından, aynı veri seti kullanılarak LSTM mimarisiyle de modelleme gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, 1993–2022 yılları arasındaki sera gazı emisyonu verileri ve ilişkili faktörler (fosil yakıtle enerji üretimi, yenilenebilir kaynakla üretim ve enerji talebi) ile oluşturulan LSTM modeli, zaman serisi analizinde yaygın olarak kullanılan ve en düşük hata oranını üreten zaman adımı (timesteps) değeri olarak 5 ile eğitilmiştir. Modelde aktivasyon fonksiyonu olarak ELU (Exponential Linear Unit) seçilmiş, öğrenme oranı ise 0.001 olarak

belirlenmiştir. Tüm parametreler veri setinin büyüklüğüne ve hesaplanan en düşük hata oranına göre optimize edilerek elde edilmiştir. Modelin başarımlarını değerlendirmesi sonucunda MAPE (Ortalama Mutlak Yüzde Hata) değeri %2,69 olarak hesaplanmıştır. Bu hata oranı, LSTM modelinin makul bir doğrulukla çalıştığını, ancak MDAM modeline kıyasla daha düşük hassasiyet sunduğunu göstermektedir. Öte yandan, Şekil 3.5'te gösterildiği üzere, modelin 2030 yılı için yaptığı tahmin 709.49 Mt seviyesindedir. Bu değer, Türkiye'nin Paris Anlaşması kapsamında belirlediği 695 Mt emisyon hedefinin üzerinde kalmaktadır. Dolayısıyla, LSTM ile yapılan bu analiz de Türkiye'nin mevcut iklim politikalarının güçlendirilerek sürdürülmesinin 2030 hedeflerine ulaşması için gerekli olduğunu ortaya koymaktadır.

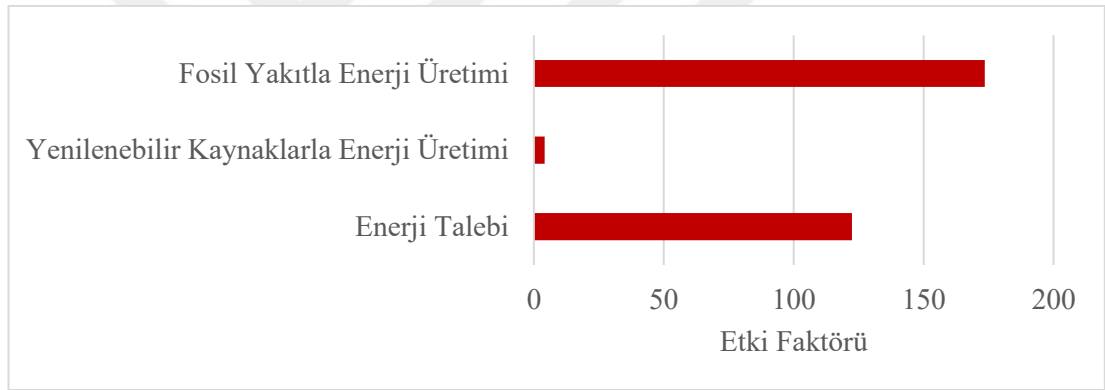


Şekil 3.5 : LSTM ile sera gazı modelleme ve tahmin sonuçları

3.3.2 LSTM etki faktörü analizi sonuçları

LSTM modeli ile yapılan analizde, sera gazı emisyonları üzerinde etkili olan faktörlerin ağırlıkları da incelenmiş ve önemli bulgular elde edilmiştir. Model çıktısına göre, enerji talebi ve fosil yakıtla enerji üretimi, emisyonlar üzerinde belirleyici iki ana unsur olarak öne çıkmaktadır. Şekil 3.6'da sunulan sonuçlara göre, enerji ihtiyacı

faktörünün ağırlığı 122.49, fosil yakıtla enerji üretiminin ise 173.51 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, enerjiye olan genel talebin artmasının yanı sıra, bu talebin özellikle fosil yakıt temelli üretimle karşılanmasının emisyonları ciddi şekilde artırdığını ortaya koymaktadır. Buna karşılık, yenilenebilir kaynaklardan yapılan üretimin etkisi yalnızca 4.21 olarak ölçülmüş ve diğer iki faktörle karşılaştırıldığında oldukça düşük kalmıştır. Bu bulgu, yenilenebilir enerjinin toplam sistemdeki payının artırılmasının emisyonları azaltma potansiyeline sahip olsa da, mevcut durumda bu etkinin henüz sınırlı düzeyde olduğunu göstermektedir. Başka bir ifadeyle, Türkiye'nin emisyon azaltımında gerçek bir fark yaratabilmesi için enerji talebinin daha verimli yönetilmesi ve fosil yakıt kaynaklı üretimin ciddi şekilde azaltılması gerekmektedir, yenilenebilir kaynakların etkisini artırmak için ise üretim hacmi ve sistem içindeki oranı daha da büyütülmelidir.

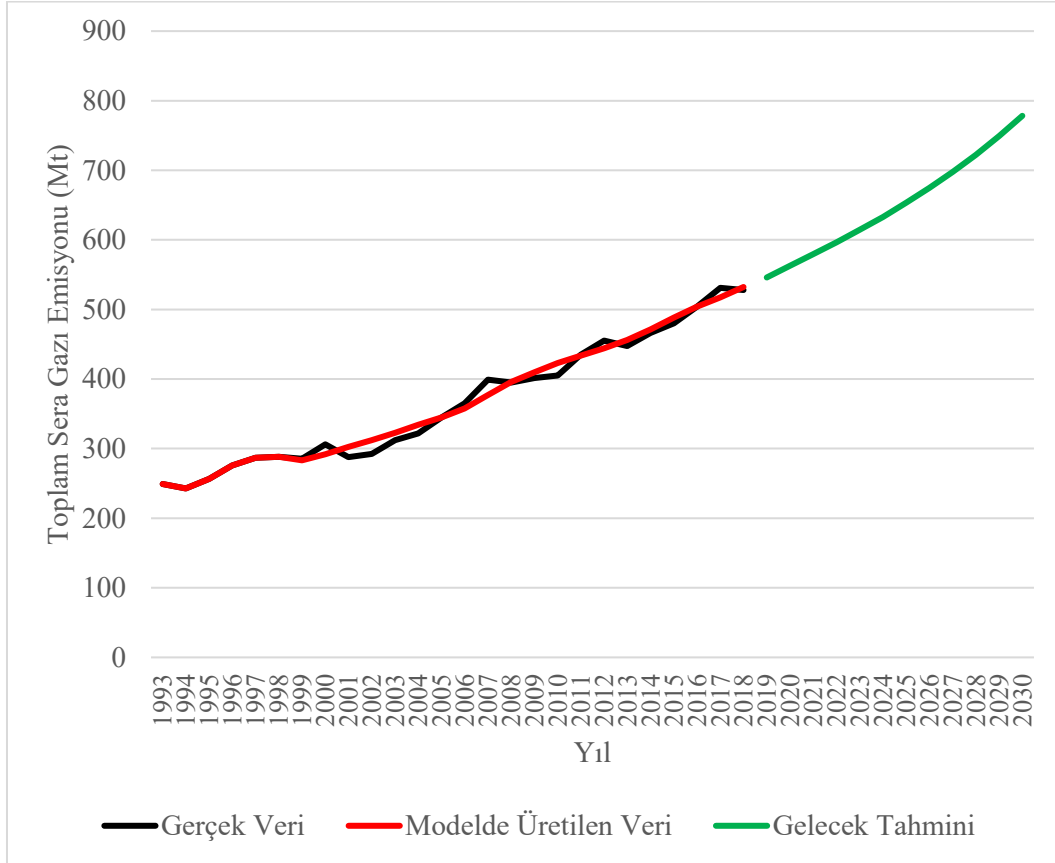


Şekil 3.6 : LSTM modeli ile etki faktörü analizi sonuç grafiği

3.3.3 LSTM COVID etkisi analizi sonuçları

COVID-19 pandemisinin sera gazı emisyonları üzerindeki etkisini daha iyi anlayabilmek amacıyla, LSTM modeli 1993-2018 dönemine ait verilerle ve bir önceki modeldeki zaman adımı ve öğrenme oranı değerleriyle yeniden eğitilmiştir. Bu analizle pandemi dönemi ve sonrasında yaşanan ekonomik yavaşlamaların modelden dışlanması sağlanarak, "COVID yaşanmasaydı" senaryosu oluşturulmuştur. Modelleme hata oranı oldukça düşük olup, MAPE değeri %2.50 olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.7'de de gösterildiği üzere, 2030 yılına yönelik öngörülen sera gazı emisyon değeri ise 778.28 Mt olarak bulunmuştur. Bu sonuç, Türkiye'nin Paris Anlaşması kapsamında belirlediği 695 Mt hedefinden yaklaşık 83 Mt daha yüksek bir değere

işaret etmektedir. Bu fark, pandemi döneminde yaşanan sanayi üretimi ve ulaşım faaliyetlerindeki düşüşlerin emisyonlar üzerinde önemli bir frenleyici etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, COVID sonrası dönemde yeniden canlanan ekonomik faaliyetlerin sürdürülebilirlik ilkeleriyle uyumlu şekilde yönetilmemesi halinde, Türkiye'nin karbon azaltım hedeflerinden sapması kaçınılmaz olabilir. Bu analiz, hem pandeminin kısa vadeli çevresel etkilerini hem de uzun vadede nasıl bir fırsat penceresi sunduğunu ortaya koyması açısından dikkat çekicidir.



Şekil 3.7 : LSTM modeli COVID etkisi haricinde modelleme ve tahmin sonuçları

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, Türkiye'nin sera gazı emisyonlarının bilimsel yöntemlerle modellenmesi, emisyonu etki eden faktörlerin nicel olarak analiz edilmesi ve geleceğe yönelik projeksiyonların üretilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen modeller aracılığıyla, hem geçmiş verilerdeki dinamiklerin detaylı biçimde anlaşılması hem de Türkiye'nin 2030 yılına kadar olan emisyon hedeflerine ulaşma potansiyelinin değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

Bu kapsamda, iki temel modelleme yaklaşımı karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır: Kesirli Kalkülüs temelli MDAM ve derin öğrenme modeli LSTM. MDAM modeli, Caputo kesirli türevi sayesinde zaman serilerindeki bellek etkisini hesaba katarak değişkenler arası ilişkileri güçlü bir şekilde temsil edebilmiş; ayrıca her iki model de yüksek doğrulukla zaman serisinin geleceğini tahmin etme becerisi göstermiştir [2, 15, 24, 31]. Her iki modelin de kodlanarak uygulanması, bu çalışmayı aynı zamanda uygulamalı bir yazılım geliştirme çerçevesine de taşımıştır. Kesirli türev modelleri karar vericiler için yorumlanabilirlik açısından avantaj sağlarken, LSTM modeli ise karmaşık örüntüleri otomatik olarak öğrenebilme yeteneğiyle veri odaklı tahminlerde güçlü bir araç haline gelmiştir.

MDAM model çıktıları artan bir sera gazı emisyonu eğilimi ortaya koymuştur. Modelin hata oranı %1.64 (MAPE) düzeyinde oldukça düşük bulunmuş ve niu değeri 0.89 olarak hesaplanmıştır. Bu niu değeri, geçmiş verilere olan güçlü bağı ve sistemin bellek etkisini temsil etmektedir. Bu da Caputo türevinin çevresel modelleme için uygunluğunu doğrulamaktadır [36]. MDAM modelinde, 1993–2022 dönemi baz alınarak yapılan analizde 2030 yılı için tahmini sera gazı emisyon değeri 721.87 Mt olarak hesaplanmıştır. Bu değer, Türkiye'nin Paris Anlaşması kapsamında revize ettiği 2030 yılı için 695 Mt'lik hedefin üzerine çıkmaktadır [26]. Ayrıca, COVID-19 pandemisinin etkilerini dışlamak amacıyla model yalnızca 1993–2018 dönemi verisiyle yeniden çalıştırıldığında, 2030 tahmini değer 798.14 Mt seviyesine yükseldiği görülmüştür. Bu durum, pandemi nedeniyle yaşanan ekonomik ve

endüstriyel yavaşlamanın, emisyonları geçici olarak baskıladığını ve COVID döneminin doğal bir deney olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır [3, 8].

Öte yandan LSTM’de 1993–2022 verileriyle kurulan modelde üretilen tahmin, 2030 yılı için 709.49 Mt emisyon seviyesini göstermiştir. Bu değer de 695 Mt’lik hedefin üzerindedir ve MDAM modeline yakın bir eğilim sergilemektedir. LSTM modelinde hata oranı %2.69 MAPE olarak hesaplanmış ve performansı tatmin edici bulunmuştur [2]. COVID etkisini dışlamak için 1993–2018 verisiyle oluşturulan LSTM modelinde ise 2030 projeksiyonu 778.28 Mt olarak tahmin edilmiştir. Bu sonuç, MDAM modeli ile tutarlılık göstermekte ve pandemi etkisinin azaltıcı rolünü tekrar teyit etmektedir.

MDAM ve LSTM ile yapılan etki faktörü analizleri, iç talep ve fosil üretimin sera gazı emisyonları üzerinde güçlü artırıcı etkilerini açıkça ortaya koymuştur. MDAM modelinde iç talep 69.08, fosil üretim 31.24 etki değeriyle pozitif katkı sağlarken; yenilenebilir üretim -44.68 ile emisyon azaltıcı yönde etkide bulunmuştur. LSTM modelinde ise bu iki temel faktörün etkileri daha da belirginleşmiş, iç talep 122.49 ve fosil üretim 173.51 ağırlıkla öne çıkmıştır. Buna karşın yenilenebilir üretimin etkisi yalnızca 4.21 olarak ölçülmüştür. Bu bulgular, fosil yakıta dayalı üretimin azaltılması ve yenilenebilir kaynakların sisteme daha güçlü entegre edilmesi gerektiğini göstermektedir.

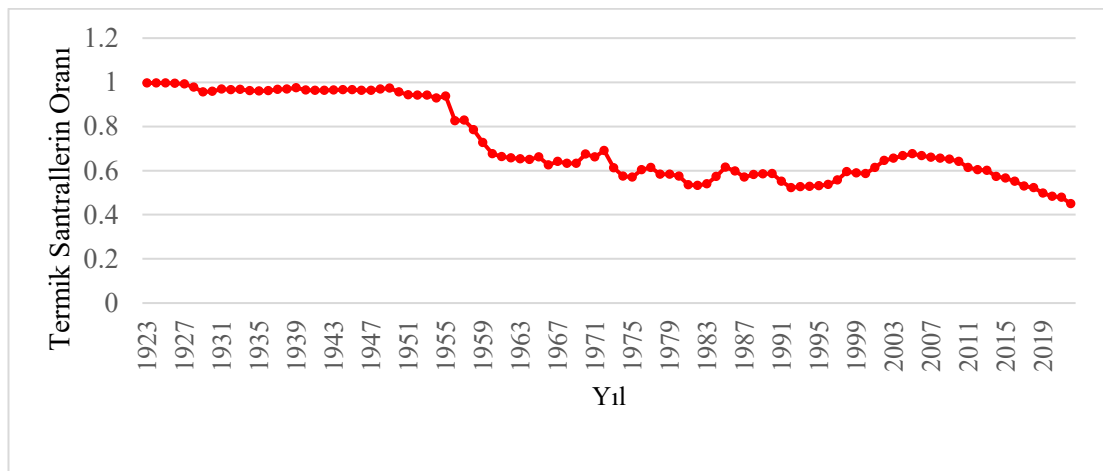
Genel olarak, her iki modelleme yaklaşımının gelecek tahminleri de Çizelge 4.1’de gösterildiği gibidir ve Türkiye’nin 2030 hedeflerine ulaşması için mevcut politikalarını güçlendirme ihtiyacına dikkat çekmektedir. MDAM modelinin yorumlanabilirlik avantajı politika yapıcılar için yön gösterici olurken; her iki model de yüksek doğruluğu ile gelecek öngörülerinde güvenilir bir araç olarak kullanılabilir.

Çizelge 4.1 : Sera gazının MDAM ve LSTM model sonuçları tablosu

Modelleme ve Tahmin Sonuçları	Modelleme MAPE (%)	2030 Model Tahminleri	COVID Etkisinin Dışlandığı 2030 Model Tahminleri	Türkiye’nin 2030 Hedef Beyanı
MDAM	%1.64	721.87 Mt	798.14 Mt	695 Mt
LSTM	%2.69	709.49 Mt	778.28 Mt	

Ayrıca bu çalışmada hem MDAM hem de LSTM modelinin analiz sonuçları, yenilenebilir enerji kaynaklarının sera gazı emisyonları üzerindeki etkisinin beklenildiği ölçüde negatif yönde belirginleşmediğini ortaya koymuştur. Bu durum, mevcut yenilenebilir enerji yatırımlarının emisyon azaltımı üzerinde henüz güçlü bir yapısal dönüşüm etkisi oluşturamadığını düşündürmektedir. Dolayısıyla, emisyonları etkili biçimde azaltabilmek için yenilenebilir enerjiye yapılan yatırımların daha kararlı ve geniş çaplı şekilde artırılması gerektiği açıktır.

Bu bulgu, Şekil 4.1’de yer alan uzun dönemli tarihsel grafikte de örtüşmektedir. 1929’dan 2022’ye kadar Türkiye’de termik santrallerin toplam enerji üretimindeki payı incelendiğinde, özellikle 1950’li yıllardan sonra belirgin bir azalma gözlenmekte, 2000’li yılların ortalarından itibaren ise bu düşüş yeniden hız kazanmaktadır. Bu tablo, Türkiye’nin enerji üretiminde çeşitlenmeye yöneldiğini ve özellikle hidroelektrik, rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının devreye girmesiyle birlikte enerji arz yapısında çevreci ve sürdürülebilir bir dönüşüm sürecinin başladığını göstermektedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın “yerli ve yenilenebilir enerji odaklı büyüme” politikasıyla da uyumlu olan bu eğilim, fosil yakıtla enerji üretim oranının azalmasıyla birlikte Türkiye’nin karbon emisyonlarını azaltma ve sürdürülebilir enerji sistemine geçiş hedeflerine ulaşması açısından stratejik bir öneme sahiptir. Ancak bu çalışma göstermiştir ki, yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş oranları henüz artan enerji talebi ve fosil yakıt ile enerji üretimindeki artan trendler karşısında yeterli seviyede olamamakta, sera gazı emisyonlarının salınımını negatif yönde etkileyecek oranlara ulaşamamaktadır.



Şekil 4.1 : Türkiye’de termik santrallerin toplam enerji üretimindeki payı [10].

Ayrıca daha düşük hata oranına ulaşan MDAM modeli için, 2016 yılına kadar yeniden bir model kurulmuş COVID dönemi gibi baskılayıcı bir etki altında kalmadığı bilinen 2017 ve 2018 yılları için gelecek tahminlemesi yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.2’de sunulmuştur. Bu sonuçlar kapsamında ortalama hata oranı %2.1 MAPE olarak hesaplanmıştır. Bu da modelin gelecek tahminlerinin de güvenilirliğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.2 : MDAM ile 2017 ve 2018 yılları için MDAM ile tahmin sonuçları.

Tahmin Sonuçları	Gerçek Değer	Tahminlenen Değer
2017	531.10 Mt	520.56 Mt
2018	528.08 Mt	540.34 Mt

Sonuç olarak bu tez:

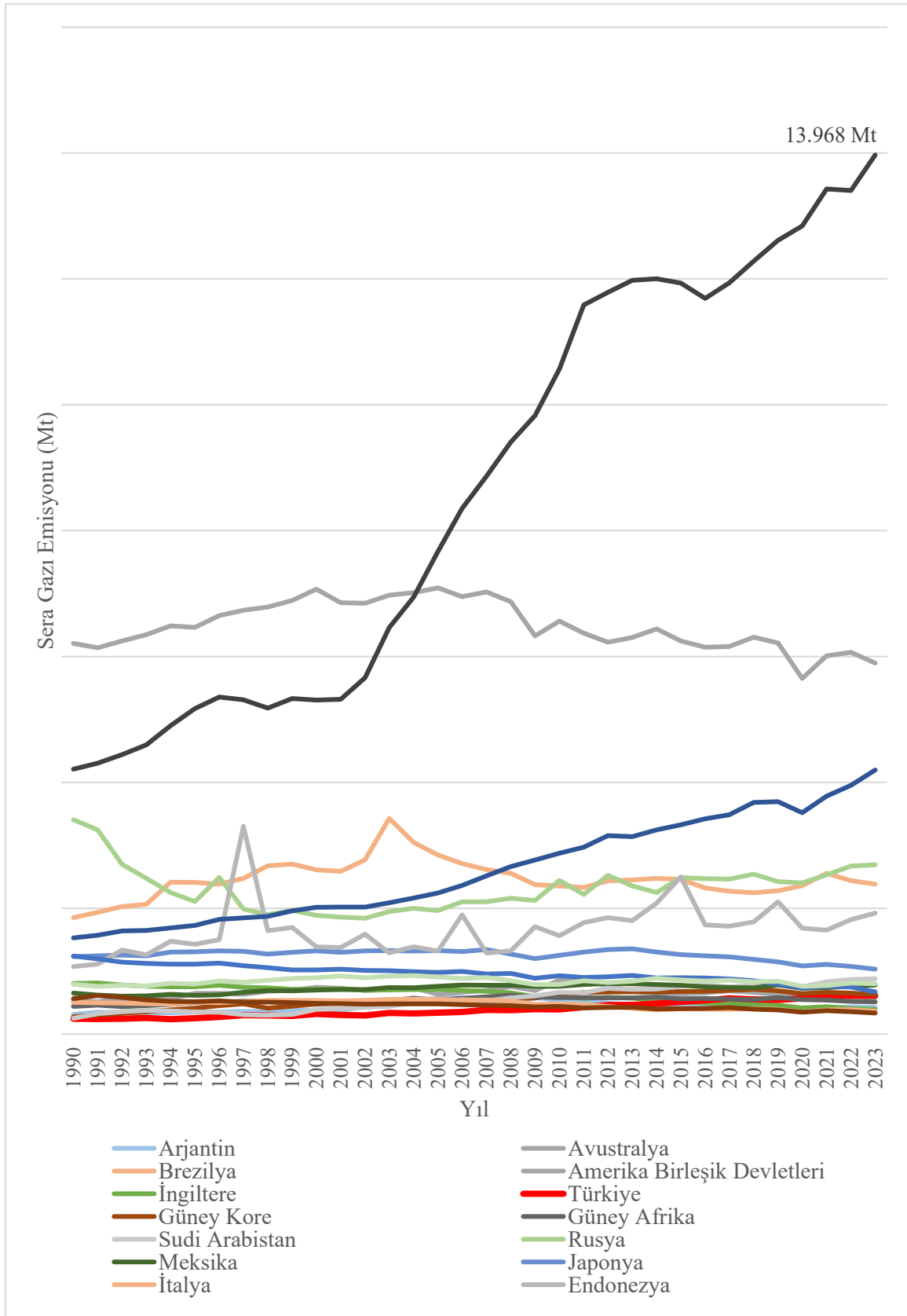
- Caputo kesirli türevi derin değerlendirme modeli MDAM ve uzun kısa dönemli bellek derin öğrenme yaklaşımı LSTM’i kıyaslayarak literatüre iki farklı modelleme alternatifi sunmuştur.
- Türkiye’nin 2030 sera gazı emisyon hedefi olan 695 Mt’ye yeni politikalar eklemekten ulaşılmamasının zor olacağına dair somut bulgular üretmiştir [26].
- Yenilenebilir enerji üretiminin henüz emisyon baskılayıcı güce ulaşmadığını ve desteklenmesi gerektiğini vurgulamıştır [7].
- COVID-19 gibi dışsal şokların emisyonları geçici olarak azalttığını, ancak kalıcı çözümün yapısal enerji dönüşümünden geçtiğini ortaya koymuştur,
- Ve daha şeffaf, matematiksel temelli ve stratejik karar destek sistemlerinin önemini vurgulamıştır.

Bu çalışma, yalnızca teknik analizler sunmakla kalmamış; aynı zamanda çevresel strateji üretimi ve karbon nötr hedeflere ulaşılması adına veri temelli öneriler geliştirmiştir. Gelecekte, sektörel ayrıştırmalı analizlerin yapılması, bölgesel sera gazı tahmin modellerinin geliştirilmesi, ekonomik gelişmişlik etkilerinin değerlendirilmesi ve faktörlerin alternatif veri kaynakları ile zenginleştirilmesi yönünde ilerlenebilir. Böylelikle, politika yapıcılar, karar destek sistemleri ve bilim insanları için daha kapsamlı, güvenilir ve stratejik araçlar geliştirilebilir.

5. GELECEK ÇALIŞMALAR

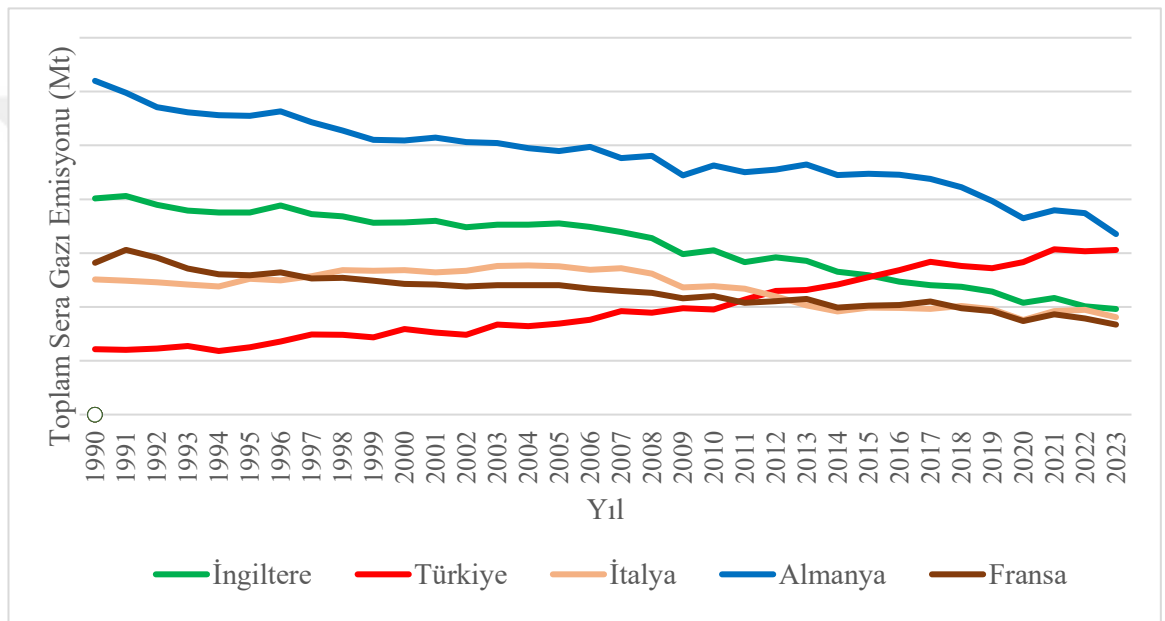
Bu çalışmada Türkiye'nin sera gazı emisyonlarını etkileyen faktörler detaylı olarak modellenmiş ve hem LSTM hem de MDAM gibi ileri düzey tahmin yöntemleri kullanılarak önemli çıktılar elde edilmiştir. Elde edilen bulguların daha geniş bir bağlamda değerlendirilebilmesi, hem gelecekteki politika tasarımları hem de model önerilerinin geçerliliğinin sınanması açısından önem arz etmektedir. Bu nedenle, çalışmanın son bölümünde Türkiye'nin emisyon eğilimleri, G20 ülkeleri ve benzer sosya-ekonomik düzeydeki ülkelerle karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Bu karşılaştırma, Türkiye'nin mevcut konumunu daha iyi anlamayı, uzun vadeli stratejiler geliştirmede dışsal örneklerden yararlanmayı ve emisyon azaltımında hangi aşamada olduğunu belirlemeyi amaçlamaktadır.

Şekil 5.1'de yer alan G20 ülkeleri arasında Türkiye'nin sera gazı emisyonlarında son otuz yıllık dönemde belirgin bir artış eğilimi sergilediği görülmektedir. 1990'lı yıllarda görece düşük seviyelerde seyreden emisyonlar, 2000'li yılların ortasından itibaren ivme kazanmış ve özellikle 2010 sonrası dönemde istikrarlı bir artış trendine girmiştir. Bu artış, Türkiye'nin sanayileşme, kentleşme ve enerji talebindeki artışla doğrudan ilişkilidir. Türkiye, Çin ve Hindistan gibi gelişmekte olan ülkelerle benzer şekilde yükselen bir emisyon profili sergilerken, bu ülkelerden ayrıştığı nokta, emisyon düzeyinin henüz bu ülkeler kadar yüksek olmamasıdır. Bununla birlikte, Türkiye'nin Paris Anlaşması çerçevesinde 2038 yılına kadar emisyonlarını zirveye taşıyıp sonrasında azaltma taahhüdü göz önüne alındığında, mevcut artış eğilimi kritik bir dönemeçte olduğuna işaret etmektedir. Bu bağlamda, Türkiye'nin karbon yoğun üretim yapısından çıkış yaparak, yenilenebilir enerji yatırımlarını artırması ve düşük karbonlu teknolojilere geçişi hızlandırması, uzun vadeli iklim hedeflerine ulaşabilmesi açısından büyük önem arz etmektedir.



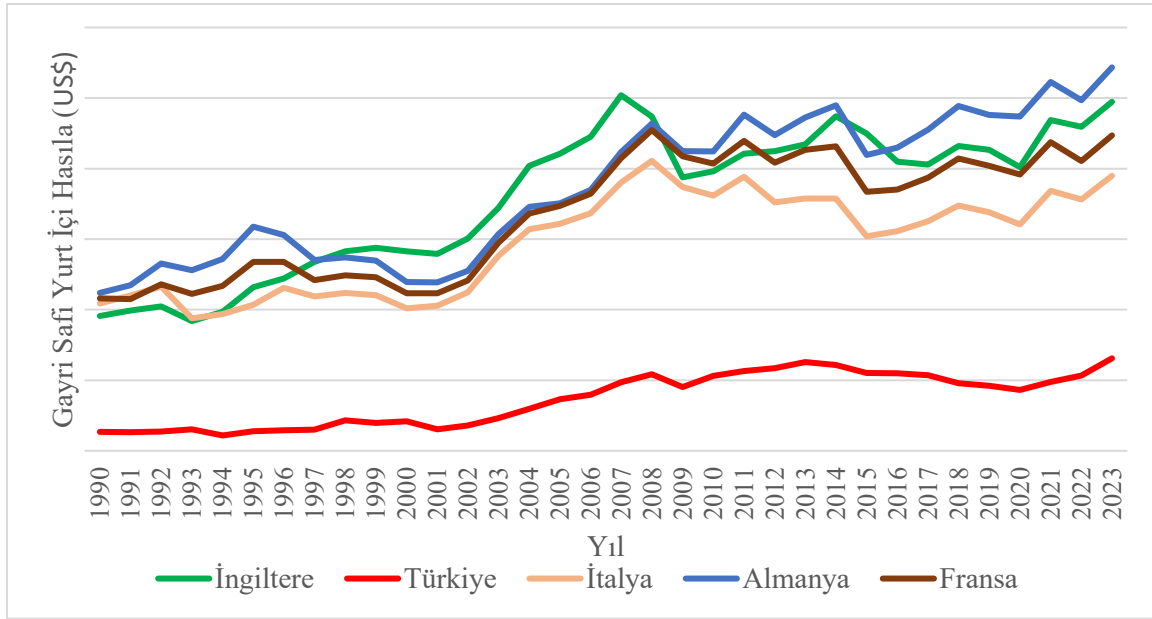
Şekil 5.1 : G20 ülkeleri yıllara göre sera gazı emisyonları [17].

Şekil 5.2’de ise bir önceki verilere Türkiye’nin yakın coğrafyasında bulunan ülkeler özelinde tekrar bakılmaktadır. Türkiye’nin sera gazı emisyonlarındaki artış eğiliminin, Avrupa’nın önde gelen sanayileşmiş ülkeleri olan İngiltere, Almanya, Fransa ve İtalya ile belirgin bir tezat oluşturduğu ortaya koyulmaktadır. Avrupa ülkeleri, 1990’dan bu yana sera gazı emisyonlarını istikrarlı bir şekilde azaltırken; Türkiye, aynı dönemde artan sanayileşme, nüfus büyümesi ve enerji talebine paralel olarak emisyonlarını ciddi şekilde artırmıştır. Bu durumdan hareketle şu hipotez önerilebilir: “Ekonomik gelişimin belli bir aşamasına kadar sera gazı emisyonları artarken, belirli bir refah ve teknoloji seviyesine ulaşıldığında emisyonlar azalabilir.”



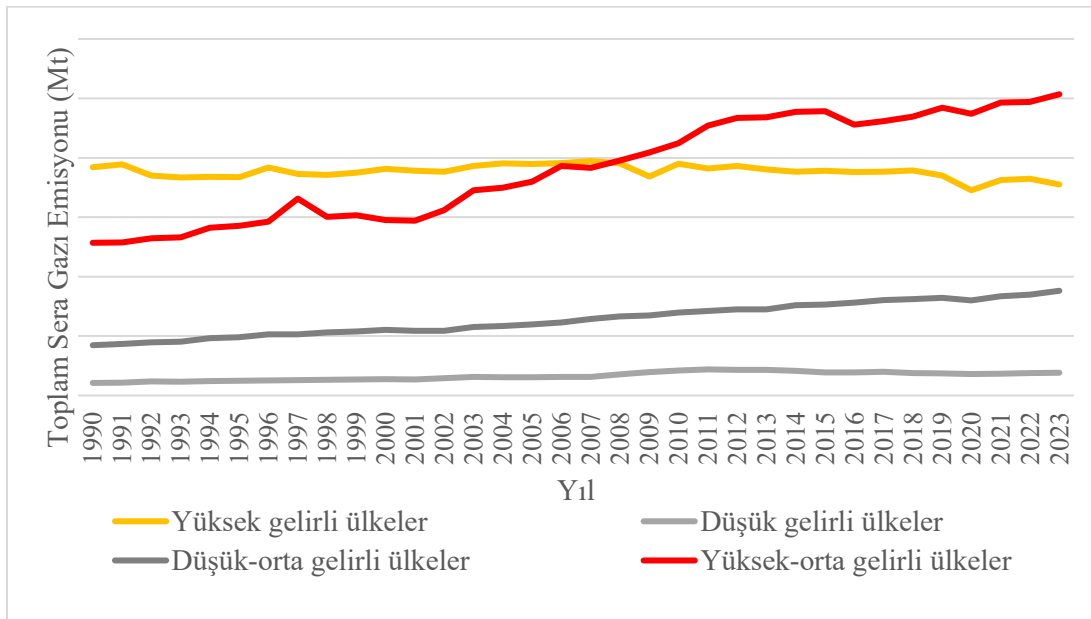
Şekil 5.2 : Sera gazı emisyon ülke dağılımları [17].

Şekil 5.3’te gösterilen gayrisafi yurt içi hasıla dağılımları da bu hipotezi destekler niteliktedir. Türkiye’nin artan eğrisel yapısı, henüz ‘zirve’ noktasına ulaşmadığını ve karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik yapısal dönüşümlerin yeterince hayata geçirilmediğini göstermektedir. Bu tablo, Türkiye’nin önümüzdeki yıllarda karbon yoğun ekonomik faaliyetlerden uzaklaşarak Avrupa ülkelerinin izlediği düşük karbonlu kalkınma patikasına geçiş yapma gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 5.3 : Gayri safi yurt içi hasıla ülke dağılımları [34].

Bu hipotezi doğrulamak üzere, Şekil 5.4'te yer alan veriler incelenmiştir. Görüldüğü üzere, ülkeler gelir gruplarına göre sınıflandırıldığında sera gazı emisyonlarının farklı seyirler izlediği dikkat çekmektedir. Düşük gelirli ülkelerde sera gazı emisyonları oldukça düşük seviyededir. Bu durum, bu ülkelerde sanayileşmenin sınırlı olması, enerji üretim ve tüketiminin düşük olması ve genel ekonomik faaliyetin daha az enerji yoğun olmasıyla açıklanabilir. Ancak bu düşük emisyon seviyesinin çevresel politikaların başarısından çok, ekonomik kapasitenin sınırlılığına işaret ettiği tahmin edilmektedir.



Şekil 5.4 : Gelir dağılımına göre ülkelerin sera gazı emisyon oranları [17].

Orta gelir grubundaki ülkelerde (özellikle üst-orta gelirli ülkelerde) emisyon seviyeleri belirgin şekilde artmaktadır. Bu artış, sanayileşme, kentleşme ve ekonomik büyümenin hızlanmasıyla ilişkilidir. Bu ülkelerde enerjiye olan talep artarken, enerji üretim süreçleri çoğunlukla fosil yakıtlara dayanmaktadır. Bu da karbon emisyonlarının ciddi biçimde yükselmesine neden olmaktadır. Bu eğilim, çevresel etkilerin ekonomik büyümenin erken aşamalarında göz ardı edildiği klasik kalkınma modelleriyle örtüşmektedir.

Buna karşılık, yüksek gelirli ülkelerde sera gazı emisyonlarının sabit bir düzeyde seyretmesi hatta bazı dönemlerde düşüş göstermesi, çevresel yatırımlar, enerji verimliliği politikaları, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim ve karbon fiyatlandırma gibi mekanizmaların etkili bir biçimde devreye alınmış olmasına işaret etmektedir.

Bu gözlem, literatürde sıkça referans verilen Environmental Kuznets Curve (EKC) hipotezini destekler niteliktedir. EKC hipotezine göre, çevresel bozulma ile kişi başına düşen gelir arasındaki ilişki ters-U şeklinde bir eğriyle ifade edilir. Yani gelir düzeyi arttıkça çevresel etkiler başlangıçta artar; ancak belli bir gelir seviyesinin aşılmasından sonra bu etkiler azalmaya başlar [29]. Bu bağlamda, grafikteki gözlemler EKC'nin geçerliliğini ülke grupları düzeyinde ortaya koymaktadır. Düşük gelirli ülkeler eğrinin başlangıç noktasını temsil ederken, orta gelirli ülkeler yükselen eğride; yüksek gelirli ülkeler ise eğrinin azalan kısmında konumlanmaktadır.

Bu analiz, sera gazı emisyonlarının sadece ekonomik büyümeyle değil, aynı zamanda çevre politikalarının uygulanma düzeyiyle de doğrudan ilişkili olduğunu tahmin etmektedir. Dolayısıyla, sürdürülebilir kalkınma politikalarının özellikle orta gelirli ülkelerde çevresel yatırımlarla desteklenmesi kritik önemde olup, bu ilişkinin matematiksel ve analitik modellerle araştırılması faydalı görülmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Aksoy, E., Önal Tuğrul, N. Ö., Karaçuha, K., Yazıcı, İ., & Beyca, O. F. (2024). Comparative electrical load prediction with machine learning and fractional calculus applications. *15th National Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ELECO64362.2024.10847110>
- [2] Ayaz, İ. (2024). Forecasting CO₂ emissions with machine learning methods: Türkiye example and future trends. *Malatya Turgut Özal University Journal of Engineering and Natural Sciences*, 5(2), 82–87. <https://doi.org/10.46572/naturengs.1595329>
- [3] Aykaç Özen, H. (2022). COVID-19 salgını dönemindeki kısıtlamaların sera gazı salınımına etkisi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(1), 39–47. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2187561>
- [4] Beşir, Ş. (2024). Kesirli Kalkülüs ile G-8 Ülkeleri ve Türkiye'nin Ekonomik Verileri Kullanılarak Gayrisafi Yurt İçi Hasıla Büyüme Oranlarının İki Değişkenli Fonksiyon Olarak Modellenmesi (Yüksek Lisans Tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, İSTANBUL
- [5] Birleşmiş Milletler. (2015). *Paris Anlaşması*. İklim Değişikliği Başkanlığı. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
- [6] Caputo, M. (1967). Linear model of dissipation whose q is almost frequency independent II. *Geophysical Journal International*, 13, 529–539.
- [7] Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2024). *İklim Değişikliğine Uyum Stratejisi ve Eylem Planı (2024–2030)*. <https://iklim.gov.tr/db/turkce/icerikler/files/Iklim%20Degisikligine%20Uyum%20Stratejisi%20ve%20Eylem%20Plan%C4%B1.pdf>
- [8] Deng, S., Deng, X., Chen, H., & Qin, Z. (2024). Estimating fossil CO₂ emissions from COVID-19 post-pandemic recovery in G20: A machine learning approach. *Journal of Cleaner Production*, 442, 140875. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140875>
- [9] Doğanlar, M., Mike, F., Kızılkaya, O., & Karlılar, S. (2021). Testing the long-run effects of economic growth, financial development and energy consumption on CO₂ emissions in Turkey: New evidence from RALS cointegration test. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 32554–32563. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12661-y>
- [10] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2024). *Türkiye Ulusal Sera Gazı Envanteri (1990–2022)*. <https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-ulusal-sera-gazi-emisyon-envanteri>

- [11] **Ergün, E., İbisoğlu, E., Önal Tuğrul, N. Ö., Karaçuha, K., Helvacı, M., & Karaçuha, E.** (2024). Modeling internet access at home by fractional calculus and a correlation analysis with human development index. *TWMS Journal of Applied and Engineering Mathematics*, 14(2), 446–459.
- [12] **Euler, L.** (1738). De progressionibus transcendentibus, sev quarum termini generales algebraice dari nequent. *Commentarii Academiae Scientiarum Imperialis Scientiarum Petropolitanae*, 5, 55.
- [13] **Fourier, J. B. J.** (1822). *Théorie Analytique de la Chaleur*, in Oeuvres de Fourier. Paris (Firmin Didot), 1, 508.
- [14] **Grünwald, A.** (1867). Über “begrenzte” Derivationen und deren Anwendung. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik*, 12, 441–480.
- [15] **Hochreiter, S., & Schmidhuber, J.** (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735–1780. https://www.researchgate.net/publication/13853244_Long_Short-Term_Memory
- [16] **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).** (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- [17] **Jones, A., Ritchie, H., Roser, M., & Our World in Data.** (2024). *Total GHG emissions*. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/grapher/total-ghg-emissions>
- [18] **Karaaslan, A., & Çamkaya, S.** (2022). The relationship between CO₂ emissions, economic growth, health expenditure, and renewable and non-renewable energy consumption: Empirical evidence from Turkey. *Renewable Energy*, 190, 457–466. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.139>
- [19] **Leibniz, G. W.** (1697). Letter from Hanover, Germany, to J. Wallis. *Leibnizen Mathematische Schriften*, Vol. 4, p. 25. Olms Verlag., Hildesheim.
- [20] **Letnikov, A.** (1868). Theory of differentiation with an arbitrary index. *Matematicheskii Sbornik*, 3, 1–68.
- [21] **Liouville, J.** (1832). Mémoire sur quelque Question de Géométrie et de Mécanique, et sur un genre de calcul pour résoudre ces questions. *Journal de l'École Polytechnique*, 13, 1–69.
- [22] **Önal, N. Ö., Karaçuha, K., Erdinç, G. H., Karaçuha, B. B., & Karaçuha, E.** (2019). A mathematical approach with fractional calculus for the modelling of children's physical development. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2019, Article ID 3081264. <https://doi.org/10.1155/2019/3081264>
- [23] **Önal Tuğrul, N. Ö.** (2022). Kesirli kalkülüs ve derin değerlendirme yaklaşımı ile G-8 ülkeleri ve Türkiye için ekonomik verilerin modellenmesi, etki faktörlerinin analizi ve öngörü çalışması. (Yüksek Lisans Tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, İSTANBUL.
- [24] **Önal Tuğrul, N. Ö., Karaçuha, K., Ergün, E., Tabatadze, V., & Karaçuha, E.** (2024). A novel modeling and prediction approach using Caputo derivative: An economical review via multi-deep assessment

- methodology. *AIMS Mathematics*, 9(9), 23512–23543.
<https://doi.org/10.3934/math.20241143>
- [25] **Republic of Turkey.** (2022). *Intended Nationally Determined Contribution (INDC)*. UNFCCC. https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/The_INDC_of_TURKEY_v.15.19.30.pdf
- [26] **Republic of Türkiye.** (2023). *Updated first Nationally Determined Contribution (NDC)*. UNFCCC. https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2023-04/T%C3%9CRK%C4%B0YE_UPDATED%201st%20NDC_EN.pdf
- [27] **Riemann, B.** (1876). Versuch einer allgemeinen Auffassung der Integration und Differentiation. *Gesammelte Werke*, 62.
- [28] **Ross, B.** (1975). A brief history and exposition of the fundamental theory of fractional calculus. In B. Ross (Ed.), *Fractional Calculus and Its Applications, Lect. Notes Math.*, 1–36. Berlin: Springer-Verlag Heidelberg.
- [29] **ScienceDirect.** (2024). Environmental Kuznets Curve. <https://www.sciencedirect.com/topics/>
- [30] **Şahin, Ü., Tör, O. B., Kat, B., Teimourzadeh, S., Demirkol, K., Künar, A., Voyvoda, E., & Yeldan, E.** (2022). Türkiye'nin Karbonsuzlaşma Yol Haritası: 2050'de Net Sıfır. *İstanbul Politikalar Merkezi, Sabancı Üniversitesi*. <https://birbucukderece.com/assent/pdf/>.
- [31] **Şimşek, K.** (2024). Kesirli Kalkülüs ve Derin Değerlendirme Yaklaşımı ile Havacılık Verilerinin Modellenmesi, Etki Faktörlerinin Analizi ve Öngörü Çalışması [Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi].
- [32] **Şimşek, K., Önal Tuğrul, N. Ö., Çam, İ., Karaçuha, K., Tabatadze, V., & Karaçuha, E.** (2024). A novel method for modeling and predicting transportation data via multi-deep assessment methodology and fractional calculus. *Transport and Telecommunication*, 25(2), 136–149. <https://doi.org/10.2478/ttj-2024-0010>
- [33] **Üstün, A.** (2023). Türkiye'nin yeni ulusal katkı beyanı: Atalet mi atılım mı? *Kent Araştırmaları Dergisi*, 15(41), 437–463. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/3372499>
- [34] **World Bank.** (2024). *GDP per capita*. World Development Indicators. <https://databank.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD/1ff4a498/Popular-Indicators>
- [35] **World Economic Forum.** (2025). *Global Risks Report 2025*. <https://www.weforum.org/reports/global-risks-report-2025>
- [36] **Xie, W., Wu, W.-Z., Liu, C., Zhang, T., & Dong, Z.** (2021). Forecasting fuel combustion-related CO₂ emissions by a novel continuous fractional nonlinear grey Bernoulli model with grey wolf optimizer. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 38128–38144. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12736-w>
- [37] **Yurtkuran, S.** (2021). The effect of agriculture, renewable energy production, and globalization on CO₂ emissions in Turkey: A bootstrap ARDL approach. *Renewable Energy*, 171, 1236–1245. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.009>



EKLER

EK A Kullanılan veri seti ve model sonuçları

Çizelge A.1 : TÜİK ve Enerji Bakanlığı veri seti.

Yıl	GHG (Mt)	Fosil (MW)	Yenilenebilir (MW)	Enerji Talebi (MW)
1993	249.1	10638.4	9699.2	3943.1
1994	242.8	10977.7	9882.1	4539.1
1995	256.5	11074	9880.3	4388.8
1996	275.9	11297.1	9952.3	4777.3
1997	286.7	11771.8	10120.1	5050.2
1998	288.1	13021.3	10332.7	5523.2
1999	285.6	15555.9	10563.4	5738.0
2000	306.4	16052.5	11211.6	6224.0
2001	287.6	16623.1	11709.3	6472.6
2002	292.5	19568.5	12277.3	5672.7
2003	312.1	22974.4	12612.6	5332.2
2004	321.7	24144.7	12679.3	5632.6
2005	344.8	25902.3	12941.2	6487.1
2006	365.2	27420.2	13144.6	6756.7
2007	399	27271.6	13564.1	8218.4
2008	394.9	27595	14222.2	8656.1
2009	401.3	29339.1	15422.1	8193.6
2010	405.3	32278.5	17245.6	8161.6
2011	434.8	33931.1	18980.0	11837.4
2012	455.2	35027.2	22032.2	11789.5
2013	447.3	38648	25359.5	11177.0
2014	466.4	41801.8	27718.0	12513.9
2015	480.1	41903	31243.7	11883.8
2016	504.1	44411.6	34085.8	12471.0
2017	531.1	46926.3	38273.7	13020.0
2018	528.1	46908.6	41642.2	14299.7
2019	515.6	47663	43604.0	14761.8
2020	530.2	47793.7	48096.9	14039.0
2021	572	48228.3	51591.4	15183.1
2022	558.3	49724.8	54084.4	15461.8

Çizelge A.2 : MDAM model sonuçları (1993-2022)

Yıl	Gerçek Veri (Mt)	Model Değerleri
1993	249.1	249.1
1994	242.8	242.8
1995	256.5	256.5
1996	275.9	275.9
1997	286.7	286.7
1998	288.1	288.1
1999	285.6	285.6
2000	306.4	306.4
2001	287.6	287.6
2002	292.5	292.5
2003	312.1	312.119
2004	321.7	321.467
2005	344.8	344.575
2006	365.2	371.033
2007	399	386.951
2008	394.9	397.056
2009	401.3	406.021
2010	405.3	416.118
2011	434.8	427.969
2012	455.2	441.366
2013	447.3	455.782
2014	466.4	470.625
2015	480.1	485.358
2016	504.1	499.536
2017	531.1	512.821
2018	528.1	524.963
2019	515.6	535.794
2020	530.2	545.207
2021	572	553.147
2022	558.3	559.594

Çizelge A.3 : MDAM model gelecek tahminleri.

Yıl	Tahmin Edilen Değer
2023	558.257
2024	589.711
2025	617.959
2026	643.779
2027	657.806
2028	668.826
2029	678.215
2030	721.869

Çizelge A.4 : MDAM COVID etkileri dışı model sonuçları (1993-2018).

Yıl	Gerçek Veri (Mt)	Model Değerleri
1993	249.1	249.1
1994	242.8	242.8
1995	256.5	256.5
1996	275.9	275.9
1997	286.7	286.7
1998	288.1	288.1
1999	285.6	285.6
2000	306.4	306.4
2001	287.6	287.6
2002	292.5	292.5
2003	312.1	312.118
2004	321.7	321.504
2005	344.8	344.503
2006	365.2	370.55
2007	399	387.585
2008	394.9	398.031
2009	401.3	406.323
2010	405.3	415.368
2011	434.8	426.414
2012	455.2	439.631
2013	447.3	454.615
2014	466.4	470.727
2015	480.1	487.285
2016	504.1	503.656
2017	531.1	519.302
2018	528.1	533.789

Çizelge A.5 : MDAM COVID etkileri dışı gelecek tahminleri.

Yıl	Tahmin Edilen Değer
2019	550.6385
2020	569.4098
2021	600.607
2022	619.5227
2023	628.5821
2024	653.7638
2025	673.9623
2026	706.9837
2027	725.6774
2028	744.6136
2029	771.2071
2030	798.1417

Çizelge A.6 : LSTM model sonuçları (1993-2018).

Yıl	Gerçek Veri (Mt)	Model Değerleri
1993	249.1	249.1
1994	242.8	242.8
1995	256.5	256.5
1996	275.9	275.9
1997	286.7	286.7
1998	288.1	288.1
1999	285.6	282.3129
2000	306.4	291.4111
2001	287.6	302.5384
2002	292.5	312.7264
2003	312.1	323.1211
2004	321.7	334.5254
2005	344.8	345.3609
2006	365.2	357.8485
2007	399	375.9298
2008	394.9	394.7159
2009	401.3	409.7184
2010	405.3	424.0337
2011	434.8	435.1622
2012	455.2	446.5866
2013	447.3	458.3618
2014	466.4	473.2656
2015	480.1	490.1964
2016	504.1	506.0895
2017	531.1	517.6714
2018	528.1	530.6372
2019	515.6	543.1351
2020	530.2	550.9775
2021	572	559.6788
2022	558.3	565.7051

Çizelge A.7 : LSTM model gelecek tahminleri.

Yıl	Tahmin Edilen Değer
2023	2602.35175
2024	613.81086
2025	626.03123
2026	640.77562
2027	658.03705
2028	679.15788
2029	693.51519
2030	709.49139

Çizelge A.8 : LSTM COVID etkileri dışı model sonuçları.

Yıl	Gerçek Veri (Mt)	Fitting Değeri
1993	249.1	249.1
1994	242.8	242.8
1995	256.5	256.5
1996	275.9	275.9
1997	286.7	286.7
1998	288.1	288.1
1999	285.6	283.3341
2000	306.4	291.912
2001	287.6	302.3545
2002	292.5	312.3604
2003	312.1	322.7742
2004	321.7	334.2728
2005	344.8	344.9497
2006	365.2	357.954
2007	399	376.9342
2008	394.9	395.7069
2009	401.3	409.8728
2010	405.3	423.248
2011	434.8	433.7292
2012	455.2	444.2702
2013	447.3	456.1936
2014	466.4	471.5779
2015	480.1	488.4818
2016	504.1	503.8634
2017	531.1	517.271
2018	528.1	532.2745

Çizelge A.9 : LSTM COVID etkileri dışı model gelecek tahminleri.

Yıl	Tahmin Edilen Değer
2019	545.947239
2020	562.92451
2021	579.47941
2022	596.271344
2023	614.20751
2024	633.009144
2025	653.482629
2026	674.827427
2027	697.619108
2028	722.293275
2029	749.044341
2030	778.284675



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Gizem GÖKTAŞ BALKIR

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Endüstri Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- 2014'ten bu yana aktif olarak özel sektörde teknoloji profesyoneli olarak çalışmaktadır.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR

- **Göktaş Balkır G., Önal Tuğrul N. Ö., 2025.** Comparing Fractional Calculus And LSTM For Greenhouse Gas Emission Forecasting: Insights For Policy And Strategy. 4th International Graduate Research Symposium | IGRS'25, May 12-14, 2025 İstanbul, Türkiye.