

Greenhouse Gas Emission Estimation and Risk Assessment for Sectors

İkra Rumeysa Aksu ^a, Göker Kurudere ^b, Ayşe Nur Altın ^c, Onur Derse ^{d,1}

^a Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Tarsus University, Mersin, Türkiye
ORCID ID: 0009-0006-7581-1504

^b Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Tarsus University, Mersin, Türkiye
ORCID ID: 0009-0009-8851-5060

^c Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Tarsus University, Mersin, Türkiye
ORCID ID: 0009-0000-0272-1037

^d Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Tarsus University, Mersin, Türkiye
ORCID ID: 0000-0002-4528-1999

Abstract

Today, rapid population growth, industrialization, and energy consumption cause a serious increase in global greenhouse gas (GHG) emissions. This increase poses significant threats to environmental sustainability, human health, and ecosystem balance. This study aims to examine Türkiye's greenhouse gas emissions for the period 1990–2021 based on energy, industrial processes and product use (IPPU), agriculture, and waste sectors; to make forward-looking estimates for CO₂, CH₄, and N₂O gases, and to analyze the risks associated with these emissions. In the study, emission estimates were made using Exponential Smoothing and ARIMA models from time series analysis methods. ARIMA (1,1,1) model provided more accurate forecasts with low error rates, and it was observed that the highest increase was in CO₂ emissions, and it was determined that especially the energy sector made the main contribution to this increase. Regular increases were also detected in CH₄ and N₂O gases. Following the estimation results, risk factors for the environmental and social impacts of greenhouse gases were defined. Risk factors were determined by literature review and expert opinions; Health problems caused by CO₂, ecosystem damage, and risks such as access to drinking water have been identified as priority threats. The impact of N₂O on the ozone layer and the consequences of CH₄ on agriculture and livestock are also prominent findings. As a result, it is seen that sectoral greenhouse gas emissions in Türkiye will continue to increase with the current trend, and especially the energy and agriculture sectors play leading roles in this increase. This situation reveals the need for urgent interventions in terms of greenhouse gas control and climate policies at the national level. The study is an important guide for policymakers, environmental planners, and academic researchers in terms of both emission estimation and risk analysis.

Keywords: “Greenhouse gas emissions, ARIMA method, exponential smoothing method, risk analysis.”

1. Giriş

Sanayi Devrimi'nden bu yana fosil yakıtların kullanımının hızlanması ve ormanların hızla tahribatı, sera gazlarında önemli bir artışa neden olmaktadır [1] ve sera gazlarının çevreye salınımı, dünya çapındaki çevresel değişimin arkasındaki ana nedendir [2]. Sera gazları karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), azotdioksit (N₂O) ve daha farklı gazlardan oluşur [3]. Sera gazı emisyonları, insan sağlığı, ekolojik denge ve biyo çeşitlilik üzerinde korkunç sonuçları olacağından, bu ciddi bir endişe kaynağıdır [4]. AB-28 ülkeleri 2014 yılında CO₂ emisyonlarını 1990'a kıyasla %25,7 oranında azaltmayı başarmış ve AB-28 ülkelerinin 2030 yılına kadar CO₂ emisyonlarında %40'lık bir azalma elde etmesi için çalışmalara devam etmektedir [5]. Sera gazı emisyonlarındaki (CO₂, CH₄ ve N₂O) artışın küresel ısınmaya neden olan en önemli faktör olduğu ve doğal kaynakların üç gazın (CO₂, CH₄ ve N₂O) toplam emisyonlarının sırasıyla yaklaşık %96'sını, %46'sını ve %64'ünü oluşturduğu bilinmektedir. İnsanların uygulamaları sonucunda CO₂ akışları, CH₄ ve N₂O ile birlikte karbon döngüsünün doğal dengesini bozar ve yapay bir gezegeni ısıtan küresel sıcaklıkların zorlamasına neden olur. Ayrıca, doğal kaynaklardan gelen ısınmanın neden olduğu sera gazı emisyonları, sürekli bir sıcaklık artışına ve bunun sonucunda ortaya çıkan birçok çevresel soruna neden olmaktadır ve olacaktır [6].

Bu çalışmanın temel argümanı, Türkiye'nin farklı sektörlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının istatistiksel yöntemlerle tahmin edilmesinin, bu emisyonların çevresel etkilerini öngörme ve azaltma stratejilerinin belirlenmesinde kritik rol oynadığıdır. Bu çerçevede çalışmanın temel amacı, hem sektörel bazlı sera gazı emisyon tahminlerini bilimsel yöntemlerle yapmak hem de bu tahminlere dayalı olarak oluşabilecek riskleri belirleyip önerilerde bulunmaktadır. Böylece karar alıcılara emisyon azaltımı konusunda uygulanabilir stratejiler sunulması hedeflenmektedir. Bu çalışma kapsamında ilk olarak sera gazı

¹ Corresponding Author
E-mail Address: onurderse@tarsus.edu.tr

emisyonlarının sektör (enerji bölümü, endüstriyel işlemler ve ürün harcanan sektör, tarım sektörü ve atık sektörü) bazlı olarak incelenmesi amaçlanmaktadır. Çalışmada Üstel Düzeltme yöntemi ve ARIMA metodu kullanılarak sera gazı emisyonlarının (CO_2 , CH_4 ve N_2O) tahmini gerçekleştirilecek olup tahmin sonuçlarındaki değerlerinin incelenmesi ve detaylandırılması ile risklerin belirlenmesi ve önerilerde bulunmaktadır. Bu yönüyle çalışma, hem emisyonların gelecekteki eğilimini ortaya koyan bir öngörü çalışması hem de çevresel ve toplumsal risklere karşı alınabilecek önlemleri değerlendiren bütüncül bir çerçeveye sunmaktadır.

Çalışmanın ilk kısmında amaca yer verilmiş olup ikinci kısımda literatür taraması genişçe gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın üçüncü kısmında kullanılacak olan yöntemler tanıtılmıştır ve devam eden kısımlarda uygulamaya ve önerilere yer verilmiştir. Çalışmanın son kısmında ise sonuçlar ve tartışma sunulmuştur.

2. Literatür Taraması

Çalışmada literatür üç başlık altında incelenmiştir. İlk kısımda sektörel incelemeye, ikinci kısımda sera gazı emisyonları ile ilgili yapılan tahminleme çalışmalarına, üçüncü kısımda sera gazı emisyonları ile ilgili gerçekleştirilen risk çalışmalarına yer verilmiştir.

2.1. Sektörel Bazda İnceleme

Sera gazı emisyonu enerji, sanayi, finans, ekonomi, tarım, hayvancılık, ulaşım ve madencilik gibi birçok farklı sektörle ilgilidir. Enerji sektöründeki sera gazı ve hava kirleticilerin kaynaklarının büyük ölçüde aynı olduğu göz önüne alındığında, enerji üretiminin karbondan arındırılması, enerji verimliliğindeki iyileştirmeler ve enerji yapısının değiştirilmesi de dahil olmak üzere temiz enerji teknolojileri portföyündeki yeniliklerin altının çizilmesi gerekmektedir. 1990-2011 yılları aralığında gerçekleştirilen enerji verimliliği ile ilgili çalışmalar, evrensel ölçekte 4 milyar ton petrol eşdeğeri (TEP) tutum ederek öncelikli enerji tüketiminde %32'lik bir azalma sağlamış ve 9,6 milyar ton CO_2 emisyonunun açığa çıkmasını engellemiştir [7]. Erdoğan [8] çalışmasında, son yıllarda fosil yakıtlar yerine geri dönüştürülebilir kaynakların kullanımındaki artış ve enerji sürekliliği çalışmalarının sera gazı emisyonlarındaki artış seviyesinin azalmasında ciddi bir katkı sağladığını belirtmiştir. Sanayide sera gazlarının denetimde tutulması, düşürülmesi ve korunması amacıyla çalışmalar yapılmaktadır. Davarcıoğlu ve Lelik [9] çalışması, eko-verimlilik başlıca yöntemlerden biri olmak üzere, yüksek verimli üretim teknolojilerinin ve tekniklerin kullanımıyla, aynı üretim miktarını elde etmek için az doğal kaynak, enerji harcanması ve daha az atık üretimiyle ilgili bir prensibe dayandığını belirtmektedir. Alper ve Anbar [10] çalışmasında, iklim değişikliğinin, direkt veya başka yollardan etkileyeceği birimlerden birinin de finansal hizmetler sektörü olduğunu belirtmektedir. Romero ve Gramkow [11] çalışmasında, ekonomik karmaşıklık, sera gazı emisyon yoğunluğunun azaltılmasına katkıda bulunur. Ekonomik kalkınma, aynı anda üretim aygıtının modernizasyonuna ve iklim değişikliğinin ve bununla ilgili risklerin hafifletilmesine yol açan yapısal değişikliklere dayanması gerektiği belirtilmektedir. Tarım ve hayvancılık sektörü incelendiğinde, toprağın üç temel sera gazının (CO_2 , CH_4 ve N_2O) kaynağı olduğu söylenebilir. Toprak erozyonunu önlemeye yardımcı olan koruma uygulamaları ile karbon tüketimi dengelenebilir. Mahsul ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde azot yönetilebilir ve N_2O emisyonunu azaltabilir ve su kalitesi üzerindeki olumsuz etkileri önlenir. Şahin ve Önder [12] çalışmasında, atıkların arıtılması açısından düzenli depolama alanında gözlenen yüksek düzeydeki azalma, Avrupa Komisyonunun ortaya koymuş olduğu Atık Çerçeve Direktifi ve Düzenli Depolama Direktifinin ortak bir sonucu olduğunu ve Atık Çerçeve Direktifinin atık önleme ve yönetimi, mevzuat ve politikada öncelik sırası olarak hizmet eden bir atık hiyerarşisi belirlemektedir. İlgili sıralamaya göre listede en son atık bertarafı yer almaktadır. Düzenli Depolama Direktifinin hedefi; atıkların depolanmasının çevre için negatif sonuçlarını ve insan sağlığına yönelik risklerini mümkün olduğunca önlemek veya azaltmaktır. Ahsan ve ark. [13] çalışmasında, ulaşım sektörünün toplam CO_2 emisyonlarının %22'sini oluşturan devasa bir karbon ayak izine sahip olduğunu belirtmektedir. Bu bağlamda, karayolu taşımacılığı, taşımacılık sektöründeki toplam emisyonların en büyük kısmına katkıda bulunmaktadır. En temiz ulaşım şekli olan demiryolu, toplam emisyonların %1'inden biraz daha fazlasına sebep olur.

2.2. Tahminleme Çalışmaları

Gaz emisyonlarının ekonomik yönlerinin ve sonuçlarının incelenmesi, özellikle mevcut artış trendinde hacmi açısından çok önemlidir. Bu nedenle, hava kirliliği emisyonlarının tahmini, benimsenen politikalara doğru yön verebilir. Bu nedenle, gaz emisyonlarının incelenmesi ve tahmin edilmesi gereklidir [14]. Sera gazı emisyonları ile tahminleme çalışması yapan birçok çalışma [15 – 16] bulunmaktadır. Sera gazı emisyonları ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, Köne ve Buke [1] çalışmasında, enerji ile ilgili CO_2 emisyonlarının tahminine yönelik modelleme için trend analizi yaklaşımını kullanmaktadır. Lotfalipour ve ark. [14] çalışmasında, Gri Sistem ve ARIMA yöntemine dayalı CO_2 emisyonlarının tahmini ve iki yöntemin RMSE, MAE ve MAPE metrikleri ile karşılaştırılmasını ele almaktadır. Khan ve ark. [17] çalışmasında, Doğu Asya ve Pasifik, Doğu Avrupa ve Orta Asya, Latin Amerika ve Karayipler'den oluşan farklı ülke grupları için enerji harcanması ve sera gazı emisyonu arasındaki uzun süreli ilişkiyi incelemektedir. Akcan ve ark. [18] çalışmasında Türkiye'deki sera gazı emisyonları enerji sektörü, endüstriyel süreçler sektörü, tarım sektörü ve atık sektörüne göre incelemiştir. Daha sonra sektörler bazında sera gazı emisyonlarını tahmin etmek için Zaman Serisi Analizi modelleri kullanılmıştır. Modellerin performansları ortalama hata,

ortalama mutlak hata ve ortalama karekök hata kullanılarak test edilmektedir. Sonuçlar, tahmin modellerinin farklı sektörler için ulusal sera gazı emisyonlarını makul bir hata içinde tahmin etmek için iyi bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Dritsaki [5] çalışmasında, AB-28'deki CO₂ emisyonlarını tahmin etmek için optimum modeli araştırmayı amaçlamaktadır. Bu amaca ulaşmak için lineer ARIMA modeli ve ARCH modelinin koşullu varyansı ile birlikte bir otoregresif entegre hareketli ortalama (ARIMA) (1,1,1) - otoregresif koşullu değişen varyans (ARCH) (1) modeli kullanılmıştır. Çalışmada son olarak, ARIMA(1,1,1) - ARCH(1) modelini tahmin etmek için hem dinamik hem de statik bir süreç uygulanmıştır. Tahmin sonuçları, statik prosedürün dinamik olana kıyasla daha iyi bir tahmin sağladığını ortaya koymaktadır. Rahman ve ark. [19] çalışmasında, fosil yakıt enerji tüketimi eğiliminin analizini ve üstel düzeltme yöntemi kullanılarak tahmin edilen enerji tüketimini, tahmini ve öngörülen sera gazı emisyonlarının çalışmasını ve sera gazı emisyonlarını etkileyen faktörleri sunmaktadır. Ning ve ark. [20] çalışmasında, 1997'den 2017'ye kadar ki verileri ele alarak dört il için karbon emisyonlarının tahminini ARIMA (p, d, q) modeli ile gerçekleştirmektedir. Model, verileri tahmin etmek ve önümüzdeki üç yıldaki karbon emisyonlarına yönelik eğilimlerini analiz etmek için kullanılmaktadır. Kour [4] çalışmasında, Güney Afrika'nın 1980'den 2016'ya kadar olan verilerini 2015- 2027 dönemi için CO₂ emisyonlarını tahmin etmek ve ARIMA modeli geliştirmek için kullanılmaktadır. ARIMA modelinin kullanılmasıyla, Güney Afrika'da karbon dioksit emisyonlarının önümüzdeki on yıl içinde sabit bir oranda artacağı tahmin edilmektedir.

2.3. Risk Temelli Çalışmalar

Çevre politikası gelişimi ve yüksek enerji piyasası dalgalanmaları göz önüne alındığında, enerji kullanımının ve sera gazı emisyonlarının azaltılması, enerji yoğun tarım firmalarının karlılığını artırabilir ve düzenleyici ve piyasa risklerine maruz kalmasını azaltabilir [17]. Yapılan araştırmalar, ülkelerin enerjide geri dönüşüme ve enerji kullanımının azaltılmasına öncelik vermesi durumunda, sera gazı emisyonlarından kaynaklanan birçok risk faktörünün azalacağını ve özellikle ekonomide olumlu geri dönüşler alabileceklerini göstermektedir. Dünyanın karşı karşıya olduğu en önemli zorluklardan biri düşük karbon ekonomisine doğru ilerlerken ekonomik büyümeyi desteklemek için artan enerji talebini karşılamaktır. Ayrıca, ekonominin, çevresel ve sosyal sonuçlar arasında dengeyi sağlamak için önlemler alınmadığı takdirde, uzun vadeli sürdürülebilir kalkınmanın tehlikeye girebileceğine dair artan bir endişe vardır [21]. CO₂, CH₄ ve N₂O gazlarının risk durumlarının ve önceliklendirilmesinin yapıldığı çok fazla çalışma olmamakla beraber Smith ve Haigler [22] çalışmasında, sera gazı emisyonlarının olumsuz etkileyeceği alanlardan biri olan sağlıkta risklerin olduğunu öngörmektedir. Çalışmada, enerji sektörü incelenmiş olup başlıca sağlık tehditleri, hava kirliliği, mesleki tehlikeler ve ara sıra meydana gelen büyük ölçekli kaza risklerine değinilmektedir. Verdonck ve ark. [23] çalışmasında, yakın (2031–2050) ve uzak (2081–2100) gelecekte Belçika için kentsel genişleme ve sera gazı emisyon senaryolarının etkisi 100 m mekânsal çözünürlükte değerlendirilmektedir. Plastik yaşam döngüsünden kaynaklanan sera gazı emisyonları, ekolojik çevreyi ciddi şekilde tehdit ettiği ve okyanustaki mikro plastiklerin deniz karbon döngüsü üzerindeki etkisini artırdığı ifade edilmektedir. Akcan [24] çalışmasında Çok Kriterli Karar Verme yöntemleri ile sera gazı emisyon kaynaklarının risk önceliğini belirlemek için altı sera gazı kaynağı ve üç sera gazı (CO₂, CH₄ ve N₂O) için 25 yıllık veriler dikkate alarak bir inceleme gerçekleştirmiştir. Bunun yanında ultra geliştirilmiş gıdaların tüketiminin azaltılması çevresel sürdürülebilirliği artırma açısından fayda sağlayabilir. Bu gıdaların tüketiminin azaltılması sağlık ve çevrenin korunması için önemlidir [25]. Kırmızı et tüketiminin azaltılması beslenmeden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azalmasına yol açacak ve ölüm, koroner kalp hastalığı ve tip 2 diyabet riskini azaltacaktır [26].

3. Materyal ve Metot

Çalışmada kullanılması planlanan veriler materyal bölümünde, kullanılması planlanan yöntemler ise metot bölümünde sunulmaktadır. Ele alınması planlanan yöntemler tahminleme için Üstel Düzeltme Yöntemi ve ARIMA yöntemidir.

3.1. Materyal

Çalışmada 1990 – 2020 yılları arasındaki sektör bazlı verilerin kullanılması planlanmaktadır. Ele alınan sektörler enerji sektörü, endüstriyel işler ve ürün tüketim sektörü (IPPU), tarım sektörü ve atık sektörüdür. Tablo 1'de bu dört sektörün CO₂ eşdeğer toplam değerleri ve genel toplam CO₂ eşdeğer değerleri belirtilmektedir. Bu veriler TUIK ((Turkish Statistical Institute), Turkish Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2020, National Inventory Report for submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change) [27]'den sağlanmaktadır.

Tablo 2'de enerji sektörü, endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı sektörü (IPPU), tarım sektörü ve atık sektörü için CO₂, CH₄, N₂O emisyon miktarları belirtilmektedir. Bu veriler TUIK ((Turkish Statistical Institute), Turkish Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2020, National Inventory Report for submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change) [27]'den sağlanmaktadır.

Tablo 1. Sektör bazlı toplam sera gazı emiyonları miktarı, 1990 – 2020 [27]

Yıl	Enerji	IPPU	Tarım	Atık	Toplam (Mt CO ₂ eş.)
1990	139.6	23.0	46.1	11.1	219.7
1991	144.0	24.9	46.9	11.3	227.1
1992	150.3	24.5	47.0	11.5	233.3
1993	156.8	24.7	47.4	11.8	240.6
1994	153.3	24.3	44.9	12.0	234.6
1995	166.3	25.9	44.1	12.3	248.6
1996	184.0	26.3	44.8	12.7	267.7
1997	196.1	27.1	42.5	13.2	278.9
1998	195.8	27.5	43.7	13.5	280.4
1999	193.8	25.9	44.3	13.9	277.9
2000	216.0	26.3	42.3	14.3	299.0
2001	199.2	25.9	39.9	14.8	279.8
2002	205.9	26.9	37.6	15.2	285.7
2003	220.4	28.3	40.6	15.6	304.9
2004	226.3	30.8	41.3	16.1	314.5
2005	244.4	33.7	42.4	16.4	337.0
2006	260.5	36.7	43.9	16.8	358.0
2007	291.5	39.3	43.4	17.1	391.3
2008	288.3	41.1	41.3	17.2	387.9
2009	292.9	43.0	42.0	17.2	395.1
2010	287.8	49.0	44.4	17.4	398.7
2011	309.9	53.9	46.9	17.8	428.5
2012	321.6	56.2	52.7	17.6	448.0
2013	308.3	59.2	55.9	16.7	440.0
2014	326.8	59.9	56.2	16.5	459.4
2015	342.0	59.2	56.1	17.1	474.5
2016	361.7	63.5	58.9	16.7	500.8
2017	382.4	66.4	63.3	16.3	528.3
2018	374.1	68.0	65.3	16.6	524.0
2019	365.4	58.6	68.0	16.1	508.1
2020	367.6	66.8	73.2	16.4	523.9

Tablo 2. Emisyon kaynaklı seragazı emisyon miktarları, 1990 – 2020 [27]

Emisyon Kaynakları	1990	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020
CO ₂	151	229	264	316	384	405	430	422	401	413
Toplam (kt)	665	858	769	036	330	305	220	569	720	433
Enerji	129	204	232	271	330	347	369	360	350	353
	891	494	907	645	815	273	365	850	127	038
IPPU	21	24	31	43	52	56	59	60	50	58
	287	726	237	735	704	734	404	461	302	735
Tarım	460	617	613	645	811	1	1	1	1	1
						295	450	257	288	657
Atık	27	21	12	11	1.1	1.8	1.5	1.2	2.4	3.6
CH ₄	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
Toplam (kt)	699	746	806	064	111	222	271	414	525	560
Enerji	310	360	337	490	295	419	355	382	469	434
IPPU	0.3	0.4	0.4	0.4	0.6	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6
Tarım	1	878	882	951	1	1	1	1	1	1
	005				214	219	353	456	503	560
Atık	384	507	587	623	601	584	563	575	553	565
N ₂ O										
Toplam (kt)	84	83	85	92	108	115	119	119	124	136
Enerji	6.5	8.5	10.5	13.3	12.7	13.3	14.0	12.6	12.0	12.4
IPPU	3.6	2.8	2.4	5.5	4.9	4.1	4.2	6.1	6.8	6.7
Tarım	69	66	66	67	84	91	94	93	98	109
Atık	4.9	5.5	5.8	6.3	7.1	7.1	7.3	7.4	7.5	7.6

Tablo 3’de gazlara göre sera gazı emisyon miktarları belirtilmektedir. Bu veriler TUIK [27]’den sağlanmaktadır.

Tablo 3. Gazlara göre sera gazı emisyon miktarları, 1990 – 2021 [27]

Yıl	Toplam	CO2	CH4	N2O
1990	219,5	151,6	42,5	25,0
1991	226,8	158,1	43,4	24,7
1992	233,1	164,1	43,3	25,3
1993	240,8	171,1	43,1	26,0
1994	234,4	167,6	42,8	23,6
1995	248,2	181,4	42,6	23,9
1996	267,6	199,6	43,0	24,5
1997	278,8	212,1	42,2	24,1
1998	280,3	212,1	42,4	25,3
1999	277,8	207,9	43,8	25,6
2000	298,9	229,9	43,7	24,8
2001	279,7	213,6	42,9	22,6
2002	285,6	221,2	41,0	22,6
2003	304,8	236,8	43,0	24,0
2004	314,4	244,8	43,5	24,8
2005	337,6	264,9	45,2	26,0
2006	358,0	282,4	46,6	27,2
2007	391,7	313,7	49,1	26,8
2008	388,5	310,6	50,2	25,4
2009	395,2	316,4	49,9	26,6
2010	398,8	316,2	51,6	27,4
2011	428,6	342,1	54,2	28,5
2012	448,2	356,1	57,8	29,7
2013	440,2	347,3	56,7	31,5
2014	459,5	364,0	58,5	31,7
2015	475,0	384,9	52,8	32,3
2016	501,1	406,0	55,6	34,3
2017	528,6	430,9	56,8	35,4
2018	523,1	422,1	60,4	35,5
2019	508,7	402,7	63,2	37,0
2020	524,0	412,9	63,9	40,5
2021	564,4	452,7	64,0	40,3

3.2. Metot

3.2.1. Üstel Düzeltme Yöntemi

Zaman serisi analiz modelleri, daha önce verileri gözlemlemek ve gelecekteki verileri istatistiksel modeller aracılığıyla tahmin etmek için kullanılan modellerdir. En yaygın olarak kullanılan zaman serisi modellerinden birisi üstel düzeltme yöntemidir. Üstel düzeltme yöntemi Eşitlik 1 ile gösterilir. α düzeltme katsayısını ve t gözlem zamanını temsil eder. F_t , t . zamandaki tahmin değerini A_t ise t . zamandaki gerçek değeri temsil eder. F_{t+1} ise bir sonraki zamandaki tahmini değeri temsil eder [18].

$$F_{t+1} = \alpha A_t + (1 - \alpha)F_t \quad (1)$$

3.2.2. ARIMA Yöntemi

ARIMA modeli, diğer ekonometrik yöntemlere göre daha doğru tahminler verdiği düşünüldüğü için bu çalışma için uygun bulunmuştur [28]. ARIMA modelleri, regresyon modellerinden farklı olarak, zaman serilerinin gecikmeli veya geçmiş değerleri ve stokastik hata terimleri ile açıklanmasına olanak sağlar [29]. ARIMA, bir zaman serisini tahmin etmek için en genel model sınıfıdır. ARIMA modeli $ARIMA(p, d, q)$ ile temsil edilen üç parametrelili bir modeldir. Bu parametreler p , d ve q 'dur [30]. p parametresi AR bileşeninin sırasıdır, d parametresi durağanlık için fark alma derecesidir ve q parametresi ise MA bileşeninin sırasıdır [14].

Tahminleme modellerinde tahmin doğruluğunu hesaplamak için, tahmin edilen sonuçlar üç farklı istatistiksel yöntemle değerlendirilebilir: Ortalama Mutlak Hata (MAE), Kök Ortalama Karesel Hata (RMSE) ve Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (MAPE). Bu istatistiksel hesaplamalar sırasıyla Eşitlik 2, Eşitlik 3 ve Eşitlik 4'teki gibidir.

$$\text{Ortalama Mutlak Hata (MAE)} \quad MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - y'_i| \quad (2)$$

$$\text{Kök Ortalama Karesel Hata (RMSE)} \quad RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2} \quad (3)$$

$$\text{Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE)} \quad MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - y'_i}{y_i} \right| \quad (4)$$

3.2.3. Risk Analizi

Risk analizi kısmında risklerin belirlenmesi ve değerlendirilmesi gerçekleştirilmektedir. İncelenen riskleri CO₂, N₂O ve CH₄ kaynaklı olarak ele alınmaktadır ve öneriler sunulmaktadır.

4. Uygulama

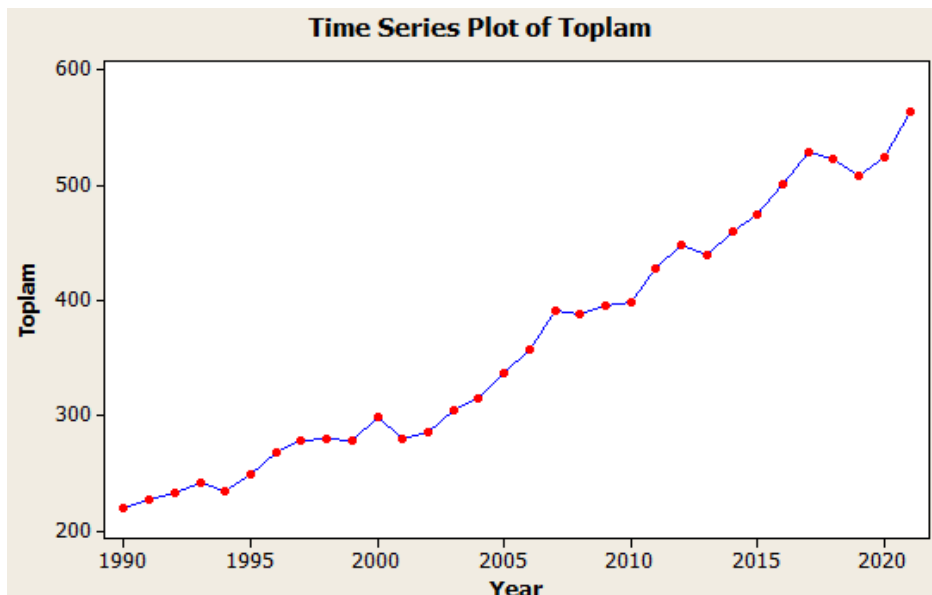
4.1. Tahminleme İçin Uygulama

Üstel düzeltme yöntemini kullanarak CO₂, CH₄, N₂O değerlerini ayrı ayrı hesaplandığında Tablo 5 elde edilmektedir.

Tablo 5. Sera gazı emisyonlarının tahminlemesi

CO ₂ için hesaplamalar	CH ₄ için hesaplamalar	N ₂ O için hesaplamalar
F2021=413.4×(1+0.029)≈424.8	F2021=64.00×(1+0.0142)≈64.90	F2021=40.5×(1+0.097)≈44.44
F2022=424.8×(1+0.029)≈436.8	F2022=64.90×(1+0.0142)≈65.81	F2022=44.44×(1+0.097)≈48.75
F2023=436.8×(1+0.029)≈449.4	F2023=65.81×(1+0.0142)≈66.75	F2023=48.75×(1+0.097)≈53.42
F2024=449.4×(1+0.029)≈462.7	F2024=66.75×(1+0.0142)≈67.72	F2024=53.42×(1+0.097)≈58.49
F2025=462.7×(1+0.029)≈476.8	F2025=67.72×(1+0.0142)≈68.72	F2025=58.49×(1+0.097)≈63.99
F2026=476.8×(1+0.029)≈491.8	F2026=68.72×(1+0.0142)≈69.75	F2026=63.99×(1+0.097)≈69

Ele alınan 1990 – 2021 verileri ile ARIMA metodu uygulandığında öncelikle zaman serisi grafiği oluşturulmuştur ve Şekil 1 elde edilmiştir. Şekilde artan bir ivme göze çarptığı için durağanlık testi uygulanmaktadır.



Şekil 1. Zaman Serisi Grafiği

Farkı alınmış olan seri ACF ve PACF grafikleri incelendiğinde en uygun serinin ARIMA (1,1,1) olduğu görülmektedir. Elde sonuçların Tablo 5’de özeti verilmektedir.

Tablo 5. Üstel düzeltme ve ARIMA yöntemi sonuçları

Yıl	Toplam(Mt, CO ₂ eş.)	
	Üstel ile tahminleme sonuçları	ARIMA ile tahminleme sonuçları
2022	558.9	571,265
2023	554.0	579,233
2024	549.6	588,021
2025	545.6	591,42
2026	542.0	607,272

Üstel düzeltme yöntemi ve ARIMA (1,1,1) yöntemleri için model performans metrikleri Tablo 6’da görüldüğü gibidir. Üstel düzeltme yöntemi, geçmiş verilere oldukça iyi uyum sağlamış ve daha düşük hata değerleri (MAE, RMSE, MAPE) ile yüksek bir açıklama gücü ($R^2 = 0.97$) göstermiştir. ARIMA modeli, daha düşük uyum göstermiştir ($R^2 = 0.85$), ancak bu fark modeli genel olarak kötü yapmaz. Kısa vadeli düz seyirli verilerde SES işe yarayabilir, ancak uzun vadeli tahmin ve genellenebilirlik açısından ARIMA modeli daha güvenilirdir.

Tablo 6. Model performans metrikleri

Yöntem	MAE	RMSE	MAPE (%)	R ²
Üstel Düzeltme Yöntemi	14,98	17,55	3,91	0,9724
ARIMA Yöntemi	18,91	41,38	6,42	0,8467

4.2. Risk Analizi İçin Uygulama

Bu başlık altında risklerin belirlenmesi sunulmaktadır.

Bu kısımda risklerin incelenmesi gerçekleştirilmektedir. İncelenen riskleri CO₂, N₂O ve CH₄ kaynaklı olarak ele alınmaktadır ve daha sonra kapsayıcı riskler elde edilmektedir. Literatür taraması ve uzman görüşü ile oluşturulmaktadır.

CO₂ Kaynaklı Risk Faktörleri

- Sağlık sorunlarının artması [31]
- İçme suyuna erişim [31]
- Sıcaklık artışları
- Ekosistemin bozulmasına bağlı olarak oluşabilecek salgın hastalıklar [31]
- Okyanusların asitlenmesi gibi ekolojik sorunlar [32]
- Sağlık harcamalarının artması [32]
- Biyolojik çeşitliliğin azalması
- Aşırı yağışlar sonucu bitki böceklenmesi, bitki hastalıkları [33]
- Aşırı sıcaklar sonucu kuraklık, bitki verimliliğinin azalması [33]
- Deniz seviyesinin yükselmesi, birçok kıyı şehirlerin sular altında kalması [34]
- Hava durumunun bozulması uğraması

N₂O Kaynaklı Risk Faktörleri

- N₂O’nun gübreleşmiş topraklarda ve zenginleştirilmiş sulardaki verimliliği azaltması [35]
- N₂O emisyonlarının biyoyakıtların genel sera gazı dengesini bozması [36]
- Gübre yönetiminin N₂O’ dengesini bozması
- Oksijen kıtlığı ile karşı karşıya kalan bakterilerin N₂O dan oksijen üretilip atmosferik seviyeleri sınırlandırması [37]
- N₂O stratosferik ozon tahribatına yol açması [38]
- Fosil yakıt içeren yakıtların yakılması durumunda havaya N₂O salınımı olması [39]

CH₄ Kaynaklı Risk Faktörleri

- Hayvancılık etkinlikleri sonucu ortaya çıkan antropojenik sera gazları atmosfere negatif yönde etki ederek iklimi küresel olarak değiştirmesi [40]

- Çiftlik hayvanlarının verimlerinde düşüş, çevre şartlarına zıt uyum sağlamada zorluk ve bu koşullarla alakalı olarak hayvanların refah seviyelerinin düşmesi ile karşı karşıya kalırız [40]
- Tarım ve turizm sektörleri ise iklim değişikliğinin fiziksel etkilerinden olumsuz etkilenmesi [10].
- Sigorta kapsamındaki zararların çok yüksek maliyetlere ulaşabilmesi ve sigorta şirketlerini ve reasürans şirketlerini mali açıdan zor durumda bırakılma olasılığı [10].
- Deniz seviyesi yükselmesi, sıcaklık, buzulların erimesi, sel ve taşkın arıtma tesislerinde olumsuz değişikliklere sebep olmaktadır [41].
- Ekolojik dengeyi tehdit etmesi [42].
- Kömür kökenli CH₄ üretimi; hava kirliliği, gürültü, yeryüzünde oluşacak bozulmalar (çökme vb.), CH₄ ile üretilen atık sular gibi çevresel sorunlara sebep olur [43].

5. Öneriler

Bu kısımda incelenen risklerin CO₂, N₂O ve CH₄ kaynaklı olarak önlemleri incelenmekte ve ele alınmaktadır.

CO₂ Gazının Azaltılmasına Yönelik Öneriler

Dumrul [44] çalışmasında, ASEAN-5 ülkelerinin çoğunda CO₂ emisyonunu düşürmeye yönelik politikaların (çevresel atıkların azaltılması, fosil yakıtlarla alakalı enerji tasarrufunun oluşturulması, enerji verimliliğinin yükseltilmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının fazlaştırılması gibi) sağlık ile ilgili yararlar olabileceğini söylemiştir. Örnek olarak, yapılması planlanan yenilenebilir enerji mevduatları, ekonomik büyümeyi olumlu olarak etkileyebilmekle beraber, CO₂ emisyonunun azaltılmasına yol açarak sağlık üzerindeki negatif etkinin düşürülmesine yardımcı olabileceği vurgulanmaktadır. Son zamanlarda FAO, IWMI ve ICID (Birleşmiş Milletler Tarım ve Gıda Teşkilatı, Uluslararası Su Yönetimi Enstitüsü, Uluslararası Sulama ve Drenaj Komisyonu) gibi uluslararası kuruluşlar suyun hiçbir bir damlasının bile israf etmeden etkili kullanılmasının önemini altını çizmiştir ve “her damla suya karşılık daha fazla ürün” ilkesini dikkate almışlardır. Sulamada etkin su kullanımının sağlanması için;

- Fazla su kullanımının önüne geçilmesi,
- İklim değişikliklerinin bitkinin gelişmesine, su harcamasına karşı aksiyonlarının araştırılması,
- Su kalitesinin seviyesini yukarı çıkarmak ve korunması, inceleme ve ele alınması,
- Sulama ile alakalı kurum ve organizasyonlar için ayrılmış iklim senaryoları için su yönetim rehberlerinin yaratılması, sulamanın çevresel etkilerinin izlenmesi ve değerlendirilmesi,
- Basınçlı sulama yöntemlerine göre sulama düzenlerinin yapılması,
- Alternatif su kaynaklarının (atık suların tekrar geri kazanılması, yüzey sularının suyun az olduğu yerlere yönlendirilmesi, su tasarrufu sağlayan sulama metodu ve tekniklerinin iyileştirilmesi, atık sulardan ve drenaj sularından faydalanma olanakları) geliştirilmesi,
- Su dağıtım kayıplarının minimuma indirilmesi için açık sistemleri gözden çıkararak kapalı borulu sistemlerin daha fazla kullanılması,
- Büyüklük esasına göre bir fiyatlandırma modeli (bitki-alan yerine, su miktarı) yaratılması,
- Kurumların birbiri ile paralel hareket edip, çiftçilerin su tasarrufuyla alakalı bilgilendirilmesi,
- Su kaynaklarının etkili bir şekilde korunması ve kullanılması konusunda detaylı bir su yasasının oluşturulması, gerekmektedir [45].

CO₂ gazının azaltılmasına yönelik diğer öneriler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Ulaşımda fosil yakıt harcayan araçlar yerine daha çevreci hibrid ya da elektrikli sistemle çalışan araçların tercih edilmesi, oldukça yüksek oranda toplu taşıma araçlarıyla seyahat, araç kullanımına bağlı karbon emisyonunu azaltacaktır. İş yerine ulaşımında kişisel araç kullanımı yerine toplu taşıma kullanımı, ulaşım sektörünün sebep olduğu emisyonu önemli derecede azaltacaktır [46].
- CO₂ tutma ve depolama emisyon azaltmak için uygulanabilir. CO₂ tutulup depoya taşınır. Amaç, gazı atmosferden uzak tutmaktır. Bu tekniklerden birinde CO₂'nin hacmi düşürülür. Jeolojik uygulamalarla okyanusa taşınır. Burada minerallerde veya endüstriyel işlemlerde kullanılır [47].
- Aydınlatma, ısıtma, ulaşım ve diğer mekanik ve elektronik cihaz ve sistemlerin zamanında bakımlarının yapılması da sera gazı emisyonunun artmasında engel olacaktır. Bunun dışında aktif olarak kullanılmayan elektrikli ve elektrik ile çalışan cihazların kapalı tutulması, sürekli kullanımda olmayan elektrik tüketimlerinde sistemin sensörlü ya da otomatik mekanizmalarla desteklenmesi elektriğe dayalı karbon emisyonunda da gerekli tasarrufu sağlayacaktır. Elektrik ihtiyacını sağlaması amacıyla güneş enerjisi panelleri, rüzgâr enerjisi panelleri gibi yenilenebilir enerji sistemlerinin kurularak elektrik enerjisi sistemine dahil edilmesi elektriğe bağlı karbon emisyonunu azaltacaktır [46].

- Ekonomik uygulamalarda ağaç dikme alınması gereken önlemlerdendir. Fabrikalarda özel alg üretimi de ilgi çekmektedir. Algler CO₂ emisyonlarının tutulmasında dikkat çekmektedir [48].
- Belirtilen bütün öneriler karbon emisyonunun azaltılmasının gerçekleşmesi amacıyla yapılması gereken aktivitelerdir. Bahsedilen önlemler sera gazı emisyonunu belli ölçüde azaltsa da yetersiz kalabilir. Alternatif önlemler karbon yutakları kurmak, karbonu ihraç etmek ya da son yıllarda gündeme hızla yerleşen karbon rezervuarlarına hapsedmek şeklinde ortaya çıkmaktadır [46].
- Yakıt tüketiminde emisyon azaltıcı faktörler dikkate alınmalıdır. Yenilenebilir olmayan yakıtlar olabildiğince kullanılmamalıdır. Bunun için motor ile egzoz tipi değiştirilmelidir [49].
- Kimyasal gübre yerine fermente gübre tercih edilmelidir. İçeriğinde kompost, biyoçar vb. organik malzemeler bulunmaktadır. Bu sayede toprak da daha verimli hale gelir [50].
- Sürdürülebilir tarım daha çok yaygınlaştırılabilir. Su kirliliğini azaltmak, toprağın üretkenliğini korumak hedeflenir. Tarımsal biyoçeşitlilik de gözetilir. Ek olarak ekonomik sürdürülebilirlik sağlanması da hedeflenebilir [50].

N₂O Gazının Azaltılmasına Yönelik Öneriler

- Küresel ısınmayı önleyebilmek için enerji, sanayi, ulaşım ve tarım sektörlerinde, başta fosil yakıt kullanımının azaltılması yoluyla, gerekli politika değişikliklerine gidilerek sera gazı üretimi sınırlandırılabilir [51].
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının daha çok kullanılabilir. Enerji sektöründe bunun üzerine faaliyetlerde bulunulabilir [51].
- Ormanlar koruma altına alınabilir [51]. Bilinçli tarımsal uygulamalar arttırılabilir. Gübreleme ve ilaçlama gibi çalışmalar örnek verilebilir [51].
- Önemli yaptırımlardan biri olan vergiler, emisyonun düşürülmesi için uygulanabilir [51].
- Gemi emisyonlarının düşürülmesine yönelik ileriye dönük çözüm olabilmesi için, gemilerde geniş çapta kullanılan fosil yakıtlara seçenек enerji kaynağı olarak ilerleyen teknoloji ile beraber daha az zarar verici etkisi olan LNG, LPG, güneş enerjisi, elektrik ve hidrojen ile çalışan gemi makineleri ilerletilmelidir. Ortaya konan bu makinelerin başta gemi inşa sanayinde teşvik edilmesi ve geliştirilmesi güçlü devletler katkısıyla da destek verilmelidir [52].
- Sera gazları emisyonlarının düşürülmesi için alınacak bazı önlemlerden biri yerin altındaki zenginliklere yönelmektir. Sürdürülebilir bir gelecek için Türkiye'nin yeraltı kaynakları olan toryum, uranyum, asfaltit, ham petrol, doğalgaz gibi fosil yakıt rezervleri ile birlikte biyokütle, hidrolik, rüzgar ve güneş enerjisi gibi alternatifler kullanılmalıdır. Bu kaynaklar çevresel etkilerin azaltılmasına ve enerji güvenliğinin artmasında önemli rol oynayacaktır [47].
- 2019 yılı Eylül ayında Türkiye'nin Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne sunmuş olduğu 7. Ulusal Bildirimde, sera gazı emisyonu azaltma politikalarına yönelik karayolu taşımacılığı çerçevesinde planlanmış ulusal katkıları aşağıdaki şekilde kararlaştırılmıştır;
- Ulaşım ve mal lojistiğinde karayolu kullanımını düşürerek, alternatif yollarla taşınmasıyla birlikte taşıma modları arasında dengeli bir şekilde kullanılması,
- Fazla alternatifli ulaşım ve lojistiğin fazlalaştırılması
- Sürdürülebilir yöntemleri (yeşil lojistik) kentsel lojistik kapsamında hayata geçirmek,
- Düşük emisyonlu araçlar ve alternatif yakıt kaynaklarının desteklenmesi,
- Ulusal Akıllı Ulaşım Sistemleri Strateji Belgesi (2014-2023) ve Eylem Planı (2014-2016) ile fosil yakıt tüketimini ve karayolu taşımacılığından kaynaklanan emisyonları azaltmayı amaçlamaktadır,
- Eskimiş araçların kullanımının sonlandırılmasıdır [53].
- Karayolu kaynaklı çevresel etkilerin azaltılması için emisyon düşürücü önlemler dışında en önemli çalışmalardan biri de alt yapı çalışmalarıdır. Bunun yanı sıra emisyonun hacmi yönünden taşıma şekillerinin tutumlu olacak şekilde uygulanması ve kombine taşımacılığın fazlalaştırılması kaçınılmazdır. Bu maksatla imkan oldukça tren ile sağlanacak olan lojistiğin çoğaltılması temin edecek elektrikli alt yapı ve duble demiryolları çalışmaların gerçekleştirilmesi önemlidir [53].

CH₄ Gazının Azaltılmasına Yönelik Öneriler

- Çiftlik hayvanlarının verimlerini artırmak ve aynı sayıda ürünü yapabilmek için daha az hayvan ve/veya daha az yaşama süresi olan hayvanlar yetiştirilmelidir. Azaltma durumu, sera gazı emisyonlarını azaltımının yanı sıra kârı artırabilir. Sera gazı emisyonlarının düşürülmesiyle hayvan refahını dengeleyen bir strateji olarak, beslenme gereksinimlerini karşılamak için kapalı yetiştirme sistemleri ile açık alana etkileşimi birleştiren karma sistemlerin uygulanması önemlidir [40].
- Enerji sektöründe dışa bağımlılığı azaltacak, yenilenebilir enerji kaynaklarının kendi kendini yenileme özelliğinden ödün vermeyecek şekilde sürdürülebilir kullanımını destekleyecek devlet politikaları geliştirilmelidir. Enerji tüketimini etkileyen diğer ilişkili sektörlerdeki enerji kullanım oranlarını azaltacak şekilde güneş, rüzgâr, termal enerji, hidroenerji ve biyogaz gibi çevre dostu yenilenebilir enerji türlerinin kullanımı desteklenmelidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretiminin sağlandığı tesislerin teşvik edileceği uygun vergilendirme ve maliyetlerin belirlenmesi ile çevreye daha duyarlı şekilde enerji üretimi sağlanmalıdır. Özellikle sanayi üretiminde yerli hammadde kullanımı ile sektörler bazında yerli üretimin teşvik edilmesi sağlanmalı, dışa bağımlılık ve

hammadde-nihai ürün üretim, depolama, ulaştırma süreçlerindeki emisyon üretimleri en aza indirilmelidir. Ulaşım sektöründe hem kentsel ulaşım da hem de yük taşımacılığında özellikle fosil yakıt kullanımına dayalı emisyon üretiminin en yoğun yaşandığı karayolu odaklı ulaşım anlayışı, demiryolu ve su yolu odaklı şekilde geliştirilmelidir [12].

- Emisyonların geneli arazi kullanımı değişikliğinden ya da ineklerden kaynaklanan CH₄ emisyonları gübre yönetimi ve gübre kullanımı gibi çiftlik düzeyindeki emisyonlardan kaynaklanır. Tümüyle kesmediğiniz sürece, daha az et ve süt ürünleri harcamak, karbon ayak izinin üzerinde yerel olarak yemek yemekten daha büyük bir etki sağlar [54].
- Hayvancılıkta CH₄ üretimini düşürmek için kullanılabilecek yöntemlerden biri, besin katkı maddelerinin seçilmesidir. Hayvanların neden olduğu CH₄ gazı üretiminin başka bir faktörü olan hayvan dışkıları, öncelikli olarak biyogazın ortaya çıkması için oldukça elverişli hammaddeler olarak kabul edilmektedir. Avrupa Birliği üye ülkeleri önderliğinde dünya genelinde pek çok ülke, hayvanların dışkılarından anaerobik arıtma yöntemiyle biyogaz üretimi bakımından başarı elde etmiştir [55].
- Tarımsal uygulamalarda sera gazının ortaya çıkmasına sebep olan bir başka olumsuzluk da anız yakma olayı ise üreticilerin bilgilendirilmesi ve anayasaya uygun şekilde çözülebilecek olumsuzluklar çevresinde bulunur. Geçerli yasal düzenlemelerin uygulanmasını sağlamak ve üreticileri bu konuda bilgilendirmek, anız yakmanın neden olduğu sera gazı emisyonunu azaltmak için alınabilecek önlemler arasında sayılabilir [55].
- CH₄ gazı, elektrik ve ısı enerjisi üretimi için mühim bir kaynaktır. CH₄ gazının enerji üretirken kullanılmasının diğer faydası, fosil kaynakların kullanımıyla salınan gazların da azaltılmasını sağlamasıdır [42].
- Toprakların ideal ve etkin kullanılarak, organik karbon meydana gelmesinin ve tutulmasının artırılması; bazı problemlerin ortadan kalkması için faydalı olabilir [51].
- Tarım sektörü kaynaklı sera gazı emisyonlarını azaltmak için kimyasal gübre kullanımının kontrol edilmesi, kırsal üreticilerin bilgilendirilmesi ve cezaların uygulanması gerekmektedir. Hayvancılıkta daha üretken yem bitkileri kullanarak enterik fermentasyonu düzenlemek, CH₄ emisyonlarını düşürme amaçlı bir yöntem olarak tavsiye edilmektedir [56].
- Emisyonların havanın kalite düzeyinde yaratabileceği negatif sonuçların en aza indirmeyi amaçlayan teknolojik süreçler yaratılabilir [57].
- Uçaklar iklim için ciddi bir tehlike oluşturmaktadır. Bunun sebebi LTO, seyir kademeleri olarak değerlendirilebilir. Bunun önüne geçebilmek için teknolojik stratejilerin geliştirilmesi gerekmektedir. Emisyonların hava kalitesine etkileri önceden değerlendirilerek göz önünde bulundurulmalıdır. Deneysel çalışmalarla doğru olarak hesaplanabilir. Böylece emisyon miktarlarının tahmini daha verimli sonuç verecektir [57].

Ayrıca, atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan sera gazı emisyonları ağırlıklı olarak karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve diazot monoksit (N₂O) formunda ortaya çıkar. Bu emisyonların azaltılmasına yönelik inovatif arıtma teknikleri, her üç gazı da doğrudan veya dolaylı yoldan hedef alabilecek potansiyele sahiptir. Mikroalgal sistemler, atmosferden veya proses kaynaklı salınan CO₂'yi fotosentez yoluyla organik karbon formuna dönüştürerek doğrudan CO₂ emisyonlarını azaltabilir. Bu sistemler aynı zamanda dış kaynaklı enerji ihtiyacını azaltarak, dolaylı CO₂ salımını da düşürür. Ayrıca, elde edilen alg biyokütlesi enerji üretiminde kullanılabilir, bu da fosil yakıt bağımlılığını azaltarak CO₂ kaynaklı toplam karbon ayak izini küçültür. Metan emisyonları genellikle anaerobik süreçlerden ve çamur çürütücülerden kaynaklanır. Nitrite bağımlı anaerobik metan oksidasyonu (n-DAMO) gibi gelişmiş biyolojik süreçler, bu metanı enerjiye dönüştürmeden önce arıtım sürecinde oksitleyerek atmosfere karışmasını önleyebilir. Böylece, doğrudan CH₄ salımı önemli ölçüde azaltılmış olur. Bu, hem çevresel riskleri düşürür hem de metanın enerji kaynağı olarak değerlendirilmesini mümkün kılar. N₂O genellikle azot giderimi sırasında, özellikle dengesiz ya da verimsiz nitrifikasyon-denitrifikasyon süreçlerinden kaynaklanır. Mikroalgal sistemler ve n-DAMO gibi stabil biyolojik süreçler, azot giderimini daha kontrollü bir şekilde gerçekleştirerek N₂O oluşumunu sınırlar. Ayrıca biyokömür uygulamaları, mikrobiyal ortamı dengeleyerek ve azot dönüşüm reaksiyonlarını stabilize ederek N₂O salımını dolaylı olarak azaltabilir. Sonuç olarak, mikroalg sistemleri, n-DAMO süreçleri ve biyokömür uygulamaları; CO₂, CH₄ ve N₂O'nun salımını aynı anda azaltabilecek potansiyele sahiptir. Bu sistemlerin arıtma tesislerinde yaygınlaştırılması, yalnızca çevresel etkilerin azaltılması açısından değil, aynı zamanda enerji verimliliği, proses optimizasyonu ve sürdürülebilir işletme modelleri geliştirilmesi bakımından da stratejik öneme sahiptir [41]. Gülhan ve ark. [58] çalışmasında CO₂, CH₄ ve N₂O için tahminleme gerçekleştirmiş ve gelişen arıtma teknolojilerinin net emisyonu azalttığını ancak aynı zamanda kaçak olarak salınan CH₄ emisyonunu artırdığı sonucuna varmakta ve nitrifikasyon ve denitrifikasyon verimini etkileyen oranının ve azot giderim veriminin artmasıyla N₂O emisyonunun azalacağı tespit etmektedir. Bir başka öneri olarak, Yapıcıoğlu ve Demir [59] çalışmalarında, atıksu arıtma tesislerinin olumsuz çevresel etkilerini azaltmak amacıyla çevresel performansı belirleyen yeni bir gösterge olan Yeşil Endeks geliştirilmiştir. CO₂ ve N₂O emisyon değerlerinin Yeşil Endeksi, belediye atıksu arıtma tesisine göre sırasıyla 1,13 ve 1,36 değerleriyle daha düşük bulunmuştur.

6. Tartışma ve Sonuçlar

Küresel ısınmanın temel nedeni, enerji gereksinimlerinin sağlanabilmesi için fosil yakıtlı kaynakların sürekli olarak kullanılmasıyla doğal dengenin bozulmasıdır ve küresel ısınma canlıların yaşam için en önemli çevresel sorundur. Atmosfer içerisinde bulunan doğal sera gazlarının yoğunluğunu artırmaktadır. CO₂ gazının doğal konsantrasyonunda artış, sera gazı emisyonlarının %80'in üzerindeki payıyla, doğal dengiyi bozan bir durumu işaret etmektedir. Bu durum, atmosferdeki CO₂ ve

diğer sera gazlarının payının kontrol altına alınmasının, küresel ısınma ve iklim değişikliği açısından büyük önem taşıdığını vurgulamaktadır. IPCC'nin 2007 senesinde yazılan Dördüncü Değerlendirme Raporu, dünya genelinde sıcaklıkların yükseldiğini ve buzulların eridiğini açıkça ortaya koymuştur. Ayrıca, 1959'dan bu yana atmosferdeki CO₂ seviyelerinin sürekli arttığı gözlemlenmektedir. CO₂ düzeylerindeki bu artışla birlikte, dünya genelinde sıcaklık artışları yaşanmaktadır. Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından 2007 yılında yayımlanan Dördüncü Değerlendirme Raporu'na göre, küresel ısınma sonucu Dünyanın yarısında buzulların azaldığı ve denizlerin sıcaklıklarının fazlaştığı gözlenmiştir. IPCC'nin Üçüncü Değerlendirme Raporu (TAR) ise hiçbir teknoloji seçeneğinin tek başına stabilizasyon sağlamak için gerekli emisyon indirimlerinin tümünü gerçekleştiremeyeceğini, ancak yine de önlem amaçlı tedbirlerin alınması gerektiğini belirtmektedir. Küresel ısınmaya yol açan CO₂ emisyonunu kontrol altına almak için Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi ve Kyoto Protokolü'nde değerlendirilen çevre tutumlarına istinaden, Dünya genelinde çevresel iş birliğinin sağlanması ve toplanan karbon vergisi gelirleriyle temiz teknoloji gelişiminin teşvik edilmesi gerekmektedir. Bu üç bileşenin eşzamanlı olarak uygulanması durumunda, birbirini tamamlayarak küresel ısınmanın önlenmesine yönelik etkili bir politika oluşturulabileceği ve risklerin en aza indirilebileceği ifade edilmektedir.

Çalışmada sera gazı emisyonları enerji, endüstriyel işlemler ve ürünlerden fayda sağlama, tarım ve atık sektörleri kapsamında incelenmekte olup gelecek dönemlerde oluşabilecek sera gazı emisyonu miktarı tahminlenmektedir. Çalışmada 1990 – 2021 yılları arasındaki sektör bazlı verileri Zaman Serisi Analizi yöntemlerinden Üstel Düzeltme Yöntemi ve ARIMA yönetimi kullanılarak tahminlemesi yapılmaktadır ve günümüzde oluşan risklerin CO₂, CH₄ ve N₂O artışlarıyla daha da artacağı görülmektedir. Çalışmada toplam CO₂, CH₄ ve N₂O emisyon değerlerinin ayrı ayrı değerlendirilmesi ve bunlara bağlı ortaya çıkabilecek risk durumlarının incelenmesi ve önerilerin oluşturulması gerçekleştirilmektedir. Çalışmadan elde edilen temel sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Türkiye'nin sera gazı emisyonları 1990–2021 yılları arasında artış eğilimi göstermektedir ve bu eğilim, her iki tahminleme modeliyle tahmin edilmektedir.
- CO₂ emisyonları özellikle enerji sektöründen kaynaklı olarak en yüksek paya sahiptir ve çevresel risk açısından önceliklidir.
- CH₄ ve N₂O emisyonları ise tarım ve atık sektörleriyle ilişkilidir ve özellikle tarımsal uygulamalarla doğrudan ilişkilidir.
- Yapılan risk değerlendirme, CO₂'nin sağlık ve çevre üzerindeki etkilerinin daha yüksek öncelikli olduğunu göstermektedir.

Çalışma sera gazı emisyonlarının incelenmesi ve sonucunda risk durumlarına göre ele alınarak ilerideki çalışmalar ve uygulayıcılar için yararlı olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 1919B012221351 numaralı 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir.

Referanslar

- [1] Ç. Köne and T. Büke, "Forecasting of CO₂ emissions from fuel combustion using trend analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 9, pp. 2906–2915, 2010.
- [2] Gowrisankar et al., "Greenhouse gas emissions: A rapid submerge of the world," *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, vol. 32, no. 6, p. 061104, 2022.
- [3] D. P. Singh and N. S. Maurya, "A comparative study of the various methodologies for estimation of greenhouse gas emission from wastewater treatment systems," *Oriental Journal of Chemistry*, vol. 32, no. 3, p. 1373, 2016.
- [4] M. Kour, "Modelling and forecasting of carbon-dioxide emissions in South Africa by using ARIMA model," *International Journal of Environmental Science and Technology*, pp. 1–8, 2022.
- [5] M. Dritsaki, "Forecasting European Union CO₂ emissions using autoregressive integrated moving average-autoregressive conditional heteroscedasticity models," *670216917*, pp. 411–423, 2020.
- [6] U. Mander, K. Sohar, J. Tournebize, and J. Parn, "Risk analysis of global warming-induced greenhouse gas emissions from natural sources," *International Journal of Safety and Security Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 181–192, 2016.
- [7] Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, *Enerji Raporu 2013*, Ankara, 2013.
- [8] S. Erdoğan, "Enerji, çevre ve sera gazları," *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, vol. 10, no. 1, pp. 277–303, 2020.
- [9] B. Davarçioğlu and A. Lelik, "Sanayide iklim değişikliğine uyum ve eko-verimlilik (temiz üretim) programı: Örnek uygulamalar," *Mesleki Bilimler Dergisi (MBD)*, vol. 6, no. 2, pp. 94–105, 2017.
- [10] D. Alper and A. Anbar, "İklim değişikliğinin finansal hizmet sektörüne etkileri," *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, vol. 7, no. 23, pp. 223–253, 2008.
- [11] J. P. Romero and C. Gramkow, "Economic complexity and greenhouse gas emissions," *World Development*, vol. 139, p. 105317, 2021.

- [12] G. Şahin and H. G. Önder, "Atık yönetimi, sera gazı emisyonları ve Türkiye: Avrupa Yeşil Mutabakatı çerçevesinde bir değerlendirme," *Akademik Sosyal Araştırmalar Dergisi*, pp. 194–216, 2021.
- [13] N. Ahsan, K. Hewage, F. Razi, S. A. Hussain, and R. Sadiq, "A critical review of sustainable rail technologies based on environmental, economic, social, and technical perspectives to achieve net zero emissions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 185, p. 113621, 2023.
- [14] M. R. Lotfalipour, M. A. Falahi, and M. Bastam, "Prediction of CO₂ emissions in Iran using grey and ARIMA models," *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 3, no. 3, pp. 229–237, 2013.
- [15] M. Sun, Y. Yuan, J. Zhang, R. Wang, and Y. Wang, "Greenhouse gas emissions estimation and ways to mitigate emissions in the Yellow River Delta High-efficient Eco-economic Zone, China," *Journal of Cleaner Production*, vol. 81, pp. 89–102, 2014.
- [16] M. E. Javanmard and S. F. Ghaderi, "A hybrid model with applying machine learning algorithms and optimization model to forecast greenhouse gas emissions with energy market data," *Sustainable Cities and Society*, vol. 82, p. 103886, 2022.
- [17] M. A. Khan, M. Z. Khan, K. Zaman, and L. Naz, "Global estimates of energy consumption and greenhouse gas emissions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 336–344, 2014.
- [18] S. Akcan, Y. Kuvvetli, and H. Kocyigit, "Time series analysis models for estimation of greenhouse gas emitted by different sectors in Turkey," *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, vol. 24, no. 2, pp. 522–533, 2018.
- [19] S. M. Rahman, A. N. Khondaker, M. A. Hasan, and I. Reza, "Greenhouse gas emissions from road transportation in Saudi Arabia—a challenging frontier," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 812–821, 2017.
- [20] L. Ning, L. Pei, and F. Li, "Forecast of China's carbon emissions based on ARIMA method," *Discrete Dynamics in Nature and Society*, vol. 2021, 2021.
- [21] K. Kaygusuz, "Energy and environmental issues relating to greenhouse gas emissions for sustainable development in Turkey," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 1, pp. 253–270, 2009.
- [22] K. R. Smith and E. Haigler, "Co-benefits of climate mitigation and health protection in energy systems: Scoping methods," *Annual Review of Public Health*, vol. 29, pp. 11–25, 2008.
- [23] M. L. Verdonck, M. Demuzere, H. Hooyberghs, F. Priem, and F. Van Coillie, "Heat risk assessment for the Brussels capital region under different urban planning and greenhouse gas emission scenarios," *Journal of Environmental Management*, vol. 249, p. 109210, 2019.
- [24] S. Akcan, "A hybrid approach to identify the risk priority of sources of greenhouse gases," *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, vol. 26, no. 1, pp. 17–25, 2020.
- [25] S. García et al., "Ultra-processed foods consumption as a promoting factor of greenhouse gas emissions, water, energy, and land use: A longitudinal assessment," *Science of the Total Environment*, vol. 891, p. 164417, 2023.
- [26] C. A. González et al., "Greenhouse gases emissions from the diet and risk of death and chronic diseases in the EPIC-Spain cohort," *European Journal of Public Health*, vol. 31, no. 1, pp. 130–135, 2021.
- [27] Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), "Resmi İstatistikler ve Veri Portalı," [Online]. Available: <https://www.tuik.gov.tr/>. [Accessed: 24-Kasım-2024].
- [28] T. Nyoni and W. G. Bonga, "Prediction of CO₂ emissions in India using ARIMA models," *DRJ-Journal of Economics & Finance*, vol. 4, no. 2, pp. 1–10, 2019.
- [29] Rahman and M. M. Hasan, "Modeling and forecasting of carbon dioxide emissions in Bangladesh using Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) models," *Open Journal of Statistics*, vol. 7, no. 4, pp. 560–566, 2017.
- [30] O. Derse, "CO₂ capture, utilization, and storage (CCUS) storage site selection using DEMATEL-based Grey Relational Analysis and evaluation of carbon emissions with the ARIMA method," *Environmental Science and Pollution Research*, pp. 1–12, 2022.
- [31] K. Remoundou and P. Koundouri, "Environmental effects on public health: An economic perspective," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 6, no. 8, pp. 2160–2178, 2009.
- [32] C. Erden and F. Turan Koyuncu, "Kalkınma ve çevresel sağlık riskleri: Türkiye için ekonometrik bir analiz," *Aksaray Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, vol. 6, no. 2, pp. 9–23, 2014.
- [33] N. H. Bayraç and E. Doğan, "Türkiye'de iklim değişikliğinin tarım sektörü üzerine etkileri," *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi*, vol. 11, no. 1, pp. 23–48, Apr. 2016.
- [34] Y. S. Gökten, E. Koçak, and K. Gökten, "Antroposen krizini aşmak: CO₂ emisyonunu etkileyen değişkenler üzerine bir panel veri analizi," *Kafkas Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, vol. 13, no. 26, pp. 1013–1035, 2022.
- [35] U. Skiba et al., "UK emissions of the greenhouse gas nitrous oxide," *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 367, no. 1593, pp. 1175–1185, 2012.
- [36] E. M. Smeets, L. F. Bouwman, E. Stehfest, D. P. Van Vuuren, and A. Postuma, "Contribution of N₂O to the greenhouse gas balance of first-generation biofuels," *Global Change Biology*, vol. 15, no. 1, pp. 1–23, 2009.
- [37] D. Richardson, H. Felgate, N. Watmough, A. Thomson, and E. Baggs, "Mitigating release of the potent greenhouse gas N₂O from the nitrogen cycle—could enzymic regulation hold the key?" *Trends in Biotechnology*, vol. 27, no. 7, pp. 388–397, 2009.
- [38] S. J. Del Grosso, T. Wirth, S. M. Ogle, and W. J. Parton, "Tarımsal azot oksit emisyonlarının tahmin edilmesi," *EOS, İşlemler Amerikan Jeofizik Birliği*, vol. 89, no. 51, p. 529, 2008.
- [39] J. Bogner et al., "Mitigation of global greenhouse gas emissions from waste: Conclusions and strategies from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report," *Waste Management & Research*, vol. 26, no. 1, pp. 11–32, 2008.

- [40] B. Akça and S. O. Yetişgin, “Hayvansal üretim sistemlerinde sera gazı emisyonlarının etkisini hafifletmeye yönelik öneriler,” *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, vol. 11, no. 5, pp. 987–993, 2023.
- [41] P. Yapıcıoğlu and Ö. Demir, “Atıksu arıtma tesisleri için iklim değişikliğine ve sera etkisine genel bir bakış,” *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, vol. 22, no. 3, pp. 235–250, 2017.
- [42] S. Ö. Çabuk, “Küresel ısınmaya yol açan sera gazı emisyonlarındaki artış ile mücadelede iktisadi araçların rolünün değerlendirilmesi: Enerji sektörü örneği,” 2011.
- [43] İ. Karakurt, G. Aydın, and S. Kaya, “Kömür kökenli metan üretiminden kaynaklanan çevresel problemler,” *Maden İşletmelerinde İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu*, pp. 133–140, 2015.
- [44] Y. Dumrul, “Sağlık harcamaları ve çevre kirliliği: ASEAN-5 ülkeleri üzerine bir panel veri analizi,” *IBAD Sosyal Bilimler Dergisi*, pp. 396–407, 2019.
- [45] B. Çakmak and Z. Gökalp, “İklim değişikliği ve etkin su kullanımı,” *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, no. 1, pp. 87–95, 2011.
- [46] Üreden and S. Özden, “Kurumsal karbon ayak izi nasıl hesaplanır: Teorik bir çalışma,” *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi*, vol. 4, no. 2, pp. 98–108, 2018.
- [47] E. Ü. Deveci, “Termik santrallerin MRV sistemi sera gazı emisyon hesabı ve emisyonların iyileştirilmesi,” *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 22, no. 4, pp. 199–214, 2019.
- [48] S. Çalışkan Eleren and B. Öner, “Sürdürülebilir ve çevre dostu biyoyakıt hammaddesi: Mikroalgler,” *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 25, no. 3, pp. 304–319, 2019.
- [49] N. Akgerman and İ. Topçu, “Binek otomobillerde CO₂ emisyon miktarının azaltılmasına yönelik stratejilerin değerlendirilmesi,” *İTÜDERGİSİ/d*, vol. 10, no. 2, 2011.
- [50] E. Gödekmerdan, B. Baştabak, and H. Sarptaş, “Sınırdaki karbon düzenleme mekanizması ve Türkiye’de tarımın geleceği: Fermente gübre, kompost ve biyoçar perspektifi,” *Yeşil Ekonomi: Araştırmacılar Konferansı Tam Bildiri Metinleri Kitapçığı*, pp. 7–19.
- [51] K. Korkmaz, “Küresel ısınma ve tarımsal uygulamalara etkisi,” *Alatarım Dergisi*, vol. 6, no. 2, pp. 43–49, 2007.
- [52] Ö. Aygül and S. Baştuğ, “Deniz taşımacılığı kaynaklı hava kirliliği ve insan sağlığına etkisi,” *Journal of Maritime Transport and Logistics*, vol. 1, no. 1, pp. 26–40, 2020.
- [53] O. Dündar and A. Kolay, “Karayolu yük ve yolcu taşımacılığının çevresel sürdürülebilirlik bakımından değerlendirilmesi ve Konya ili sera gazı emisyonunun hesaplanması,” *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, vol. 14, no. 1, pp. 317–334, 2021.
- [54] M. Türker, A. Berk, and H. Öztürk, “Tarım ürünlerinin karbon ayak izinin azaltılması,” *Proceedings of the 4th International Sustainable Development Congress*, pp. 481–491.
- [55] G. Şahin and A. O. Avcıoğlu, “Tarımsal üretimde sera gazları ve karbon ayak izi,” *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, vol. 12, no. 3, pp. 157–162, 2016.
- [56] D. H. Kalonya, “İklim değişikliği azaltım ve uyum süreçlerinde mera alanlarının önemi,” *Çevre Şehir ve İklim Dergisi*, vol. 1, no. 1, pp. 128–157, 2022.
- [57] N. Babaoğlu and K. Özgünoğlu, “Kahramanmaraş havalimanı için uçaklardan kaynaklanan emisyonların belirlenmesi,” *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 20, no. 3, pp. 24–30, 2017.
- [58] H. Gülhan, H. Özgün, M. E. Erşahin, R. K. Dereli and İ. Öztürk, “İstanbul’daki biyolojik atıksu arıtma tesislerinin sera gazı emisyonunun modelleme metodu ile tahmini,” *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 30, no. 1, pp. 59–67, 2018.
- [59] P. Yapıcıoğlu and Ö. Demir, “Environmental performances of the wastewater treatment plants: Green Index,” *International Journal of Global Warming*, vol. 21, no. 1, pp. 1–19, 2020.