

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİR ENTEGRE KATI ATIK DEPOLAMA TESİSİNDE
KARBON AYAK İZİ HESAPLAMASI

Sena SAYIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Sadullah Levent Kuzu

Temmuz, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİR ENTEGRE KATI ATIK DEPOLAMA TESİSİNDE
KARBON AYAK İZİ HESAPLAMASI

Sena SAYIN tarafından hazırlanan tez çalışması 25.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Sadullah Levent KUZU
İstanbul Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Sadullah Levent KUZU, Danışman
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Afşın Yusuf ÇETİNKAYA, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Kübra ALTUNTAŞ, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Sadullah Levent Kuzu sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “Bir Entegre Katı Atık Depolama Tesisinde Karbon Ayak İzi Hesaplaması” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Sena SAYIN

İmza



*Aileme
ve
arkadaşlarıma*

TEŐEKKÜR

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesinde bilgi ve tecrübelerini benim ile paylaşan, bana yol gösteren değerli danışman hocam Prof. Dr. Sadullah Levent KUZU'ya teőekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın hazırlanması için gerekli olan tüm verileri benim ile paylaşan Samsun Avdan Enerji'ye ve bilgilere ulaşmamda yardımcı olan tüm firma çalışanlarına teőekkürlerimi bir borç bilir ve minnetlerimi sunarım.

Lisans, yüksek lisans ders ve tez çalışması süresince tüm zorlu süreçleri beraber atlattığım ve birbirimizi cesaretlendirdiğimiz arkadaşım, meslektaşım Kadir AKGÜN'e teőekkürlerimi sunarım.

Çalışma süresince benden desteklerini esirgemeyen, beni cesaretlendiren ailem ve arkadaşlarıma teőekkürlerimi sunarım.

Sena SAYIN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xiii
1 GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Tezin Kapsamı	2
1.3 Literatür Taraması.....	3
2 KURUMSAL TEMELLER	6
2.1 İklim Değişikliği	6
2.2 Sera Gazları.....	7
2.2.1. Su Buharı	7
2.2.2 Karbondioksit (CO ₂)	7
2.2.3. Metan (CH ₄)	8
2.2.4. Nitröz Oksit (N ₂ O)	9
2.2.5. Ozon (O ₃)	9
2.2.6. Florlu Gazlar	10
2.2.7 Karbon Ayak İzi	10
2.3 Türkiye Sera Gazı Emisyonları.....	11
2.4 BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi	12
2.5 Kyoto Protokolü.....	14
2.6 Paris Anlaşması.....	15
2.7 Entegre Katı Atık Depolama Tesisi	16
2.8 Samsun Büyükşehir Belediyesi Katı Atık Düzenli Depolama Tesisi	17
3 MATERYAL VE METOD	20
3.1 Karbon Ayak İzi Hesabı.....	20
3.1.1 Bireysel Karbon Ayak İzi	20

3.1.2	Kurumsal Karbon Ayak İzi	20
3.1.3	Ürün Karbon Ayak İzi	21
4	ARAŞTIRMA BULGULARI	22
4.1	Depolama Sahası Karbon Ayak İzi Hesaplamaları.....	22
5	SONUÇ	34
	KAYNAKÇA	36
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	40



SİMGE LİSTESİ

°C	Derece Santigrat
H ₂ S	Hidrojen Sülfür
C	Karbon
CO ₂	Karbondioksit
CH ₄	Metan
N ₂ O	Nitröz Oksit
O ₃	Ozon
ton CO ₂ eq	Ton karbondioksit eşdeğeri



KISALTMA LİSTESİ

AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
BM	Birleşmiş Milletler
BMI	Body Mass Index
BMİDÇS	Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
GHG	Sera gazı
GWP	Küresel Isınma Potansiyeli
IPCC	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli
kg	Kilogram
km	Kilometre
kWh	Kilowattsaat
Mt	Milyon ton
NCEI	Ulusal Çevre Bilgi Merkezleri
NOAA	Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi
OECD	Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü
TİER	Kapsam
TUİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UNFCCC	Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. 2023'teki küresel ortalama yüzey sıcaklığının 1991-2020 ortalamasıyla karşılaştırmalı grafiği (NOAA).....	6
Şekil 2. ABD Çevre Koruma Ajansı (2023) ABD Sera Gazı Emisyonları Envanteri (1990-2021).....	8
Şekil 3. Toplam ve kişi başı sera gazı emisyonu, 1990-2021 (TÜİK 2023)	11
Şekil 4. Sektörlere göre sera gazı emisyonları, 2021 (TÜİK 2023)	12
Şekil 5. Gazlara göre sera gazı emisyonları, 2021 (TÜİK 2023)	12
Şekil 6. Samsun Büyükşehir Belediyesi Katı Atık Depolama Sahası	17
Şekil 7. Samsun Avdan Enerji Mekanik Ayrırma Tesisi	18
Şekil 8. Samsun Avdan Enerji Biyometanizasyon Tesisi.....	18
Şekil 9. Kapsam 1,2,3 Emisyonları	21
Şekil 10. 2021 yılı depolama sahası emisyon kaynakları dağılımı.....	27
Şekil 11. 2022 yılı depolama sahası emisyon kaynakları dağılımı.....	27
Şekil 12. 2023 yılı depolama sahası emisyon kaynakları dağılımı.....	28
Şekil 13. Yıllara göre firma emisyon değerleri	33

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. Sektörlere göre sera gazı emisyonları, 1990-2021 (TÜİK 2023)	11
Tablo 2. BMİDÇS EK-I ve EK-II Ülkeleri	13
Tablo 2. BMİDÇS EK-I ve EK-II Ülkeleri (devamı)	14
Tablo 3. Kyoto Protokolü'nde adı geçen sera gazları ve temel kaynakları	15
Tablo 4. CO ₂ 'ye göre GWP değerleri	22
Tablo 5. Kaynaklara göre emisyon faktörleri	22
Tablo 5. Kaynaklara göre emisyon faktörleri (devamı)	23
Tablo 6. Depolama Sahasının 2021,2022 ve 2023 yılına ait tüketim verileri.....	23
Tablo 7. Depolama sahasının emisyon değerleri	26
Tablo 8. Biyometanizasyon Tesisi emisyon değerleri	29
Tablo 9. Genel Yönetim Binasına ait tüketim verileri	30
Tablo 10. Genel yönetim binası emisyon değerleri	31
Tablo 11. Firma emisyon değerleri	32

Bir Entegre Katı Atık Depolama Tesisinde Karbon Ayak İzi Hesaplaması

Sena SAYIN

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Sadullah Levent Kuzu

Amaç: Hızla artan dünya nüfusuna bağlı olarak artan tüketimler ve göçler sonucunda fosil yakıtlara olan ihtiyaç artmaktadır. Fakat fosil yakıtların yakılması, oluşturduğu sera gazları ile iklim değişikliğine sebep olmaktadır. Bu değişikliğin meydana getirdiği olumsuz etkenler arasında hayvan ve bitki türlerinin neslinin tükenmesi, ekosistem dengesinin bozulması, doğal afetlerde artış ve insan sağlığını tehlikeye atan hastalıklar yer almaktadır. Bu nedenle, oluşan sera gazlarının takibini yapmak ve oluşmasını önlemek oldukça önemlidir. Tez kapsamında bir entegre katı atık depolama tesisinden kaynaklanan karbon ayak izinin hesaplanması amaçlanmıştır.

Yöntem: İklim değişikliğine sebebiyet veren en önemli sera gazları karbondioksit (CO_2) ve metandır (CH_4). Bu iki gaz yakıtların ana elementleri olması sebebiyle ısınma, ulaşım gibi temel ihtiyaçların fosil yakıtlardan karşılanması esnasında atmosfere karışmaktadır. Küresel ısınmanın önüne geçmek ve karbon ayak izinin takibini yapmak amacıyla gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda sektörlerin etkisine göre incelendiğinde, sera gazı emisyonlarının %71,3 ile en büyük payı

enerji sektörü oluşturmaktadır. Karbon ayak izi miktarı, ilgili aktivitenin sera gazı emisyon faktörleri ile çarpımı ve sera gazı emisyonlarının toplam miktarının karbondioksit eşdeğeri birimi cinsinden ifade edilmesiyle hesaplanmaktadır.

Bulgular: Bu çalışma içerisinde Samsun ili Katı Atık Düzenli Depolama Sahasında faaliyet gösteren, belediye katı atıkları ile elektrik enerjisi üreten bir entegre tesisin oluşturduğu karbon ayak izi hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalarda firmadan alınan 2023 yılına ait veriler kullanılmıştır. Tier 1 hesaplama yöntemi ile tesisin alt üniteleri olan; çiçek serası, depolama sahası, mekanik ayırma, biyometanizasyon ve kuru fermantasyon, kojenerasyon, desülfürizasyon, çamur kurutma tesisleri ve atık su oluşumu, yakıt tüketimleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda düzenli depolama sahasında atık depolama işlemi için sera gazı emisyonları 2021 yılında 704 ton CO₂ eşdeğeri, 2022 yılında 647 ton CO₂ eşdeğeri ve 2023 yılında 751 ton CO₂ eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. İşletme, çöp gazından elektrik üreterek atıklardan kaynaklanan emisyonları önlemenin yanı sıra 2021 yılında 93.643 CO₂ eşdeğeri, 2022 yılında 57.853 CO₂ eşdeğeri ve 2023 yılında 59.776 CO₂ eşdeğeri emisyonunu önleyerek karbon kredisi elde etmiştir.

Anahtar Kelimeler: Depolama sahası, İklim değişikliği, Karbon ayak izi, Sera gazı emisyonları

Carbon Footprint Calculation in an Integrated Solid Waste Storage Facility

Sena SAYIN

Department of Environmental Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Sadullah Levent KUZU

Purpose: Due to the rapidly increasing world population and migration, the energy demand is increasing each day. The lack of sufficient renewable resources to meet this demand necessitates the use of fossil fuels. However, burning fossil fuels causes climate change through the emission of greenhouse gases. Negative factors caused by this change include extinction of animal and plant species, disruption of ecosystem balance, increase in natural disasters, and diseases that endanger human health. Therefore, it is quite important to monitor and prevent greenhouse gases.

Method: The most important greenhouse gases causing climate change are carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄). Since these two gases are the main elements of fuels, they mix with the atmosphere when basic needs such as heating and transportation are met from fossil fuels. When examined according to the impact of the sectors as a result of the studies carried out to prevent global warming and monitor the carbon footprint, the largest share of greenhouse gas emissions with 71.3% belongs to the energy sector. The carbon footprint value is calculated by expressing the total amount of greenhouse gas emissions in units of carbon dioxide equivalent. Intergovernmental panel on climate change (IPCC) emission factors were used during the calculations along with the activity data.

Findings: In this study, the carbon footprint of an integrated facility that produces electrical energy with municipal solid waste, operating in the Samsun Province Solid Waste Regular Landfill, was calculated. In the calculations, data from the company for 2021, 2022 and 2023 were used. Tier 1 calculation method was used in the study, in the sub-units of the facility; Flower greenhouse, storage area, mechanical separation, biomethanization and dry fermentation, cogeneration,

desulphurization, sludge drying facilities, and wastewater generation were calculated considering fuel consumption. As a result of the calculations, greenhouse gas emissions for waste storage in the regular landfill are calculated as 704 tons of CO₂ equivalent in 2021, 647 tons of CO₂ equivalent in 2022, and 751 tons of CO₂ equivalent in 2023. In addition to preventing emissions from waste by generating electricity from landfill gas, the business also obtained carbon credits by preventing the emissions of 93,643 CO₂ equivalent in 2021, 57,853 CO₂ equivalent in 2022, and 59,776 CO₂ equivalent in 2023.

Keywords: Carbon footprint, Climate change, Greenhouse gas emissions, Landfill



Dünya çok sayıda önemli çevre değişim sürecinden geçmesine rağmen, çevre 10.000 yıldır stabil bir şekilde ilerlemekteydi. Holosen olarak bilinen bu stabil dönem, insan uygarlıklarının ortaya çıkmasına, gelişmesine ve büyümesine neden oldu [1]. Sanayi devriminden bu yana, antropojenik faaliyetler, Dünya sistemini stabil olmayan bir duruma sürükleyerek, atmosferdeki sıcaklığın artması, kar ve buzla kaplı bölgelerin azalması ve deniz seviyesinin artması gibi küresel çevre değişiminin ana sebebi olmaktadır [2, 3]. Bu olaylar, atmosferdeki sera gazı emisyonları ile ilgilidir ve özellikle karbondioksit (CO₂)'in birikmesinden kaynaklanmaktadır [4]. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), iklimin ne kadar değişeceğine ilişkin tahminlerini, ekonomik büyümenin artan enerji kullanımıyla desteklediği ve bunun da sera gazı üretimini artırdığı varsayımına dayandırdı. Bundan dolayı, iklimdeki en fazla değişikliği tahmin eden modeller, ağırlıklı olarak fosil yakıtların desteklediği dünya çapındaki hızlı ekonomik büyüme tahminlerine göre şekilleniyor. Ancak daha gerçekçi büyüme oranları kullanan bazı IPCC modelleri, bu yüzyılın sonuna kadar ortalama sıcaklık artışlarının 2-3 °C olacağını öngörmektedir [5].

Dünyamıza yansıyan güneş ışınlarının belirli bir kısmı atmosfere geri gönderilerek dünyanın sıcaklık dengesi korunmaktadır. Oluşan sera gazları atmosferde bir tabaka oluşturarak ışınların uzaya geri dönmesini engeller bu sebeple atmosferde hapsolan ışınlar sıcaklığın artmasına sebep olur. Bu olaya sera etkisi denmektedir. Artan sıcaklıklar buzulların erimesi, hayvan ve bitki türleri neslinin tükenmesi ve buna bağlı olarak ekosistem dengesinin bozulması, doğal afetlerde artış, insan sağlığına olan olumsuz etkileri vb. birden fazla negatif etkiye sebep olmaktadır [6].

İklim değişikliği, günümüzde büyük önem taşıyan ve bir numaralı endişe kaynağı haline gelmiştir. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), küresel ısınmanın temel olarak karbondioksit (CO₂) ve metandan (CH₄) kaynaklandığını belirtmektedir. Karbondioksit (CO₂) ve metan (CH₄) gazının yanı sıra insanların faaliyetleri sonucu oluşan nitroz oksit (N₂O) ve diğer sera gazları da küresel

ısınmaya yol açmaktadır. Son yıllarda giderek artış gösteren evsel atıklar sera gazlarının temel sebebi haline gelmektedir.

Dünyada iklim değişikliği ile mücadele etmek için ilk olarak 1997 yılında Kyoto Protokolü, 2015 yılında ise Paris Anlaşması imzalandı. Ülkeler karbon ayak izlerini azaltmak amacıyla bazı stratejik planlar yapmışlardır. Bu planlara bir örnek olarak Türkiye'nin hedefi 2020-2030 yılları arasında elektrik üretimi ve yenilenebilir enerji payını arttırarak emisyonlarını %21'e kadar azaltmaktır. Ayrıca Avrupa Yeşil Mutabakatı'na göre, Avrupa Birliği 2030 yılına kadar sera gazı emisyonlarını en az %55 azaltmayı, 2050 yılına kadar ise sıfırlamayı hedeflemektedir [7].

Katı atık düzenli depolama sahaları, oluşan evsel katı atıkların sahalarda minimum alan kullanılarak bertaraf edilmesini hedefler. Bu bertaraf yönteminde yapılan örtü işlemleri ile çöplerin çürümesi esnasında açığa çıkan sera gazlarının atmosfere salınımı engellenir. Çöplerin depolanması esnasında sahaya serilen gaz boruları ile oluşan %55-60 oranında metan (CH₄) gazına sahip çöp gazı toplanarak elektrik üretimi için gaz motorlarına gönderilir. Bu sayede oluşan sera gazını önlemenin yanı sıra, atıktan ürüne geçilir ve karbon kredisi kazanılır [8].

1.1 Tezin Amacı

İnsan faaliyetleri sonucunda oluşan sera gazlarının sebep olduğu iklim değişikliğinin tüm etkileri yine insanların yaşam kalitesini etkilemektedir. Karbon ayak izi kavramı, insan ve firmaların çevreye verdiği etkileri somut olarak göz önüne sermektedir. Karbon ayak izi hesabı, sera gazına sebebiyet veren kaynakların azaltılması ve yok edilmesi için destekleyici bir etkidir. Bu tezin amacı ise bir entegre katı atık düzenli depolama sahasının önlediği ve oluşturduğu emisyonları hesaplamaktır. Operasyonel faaliyetlerde emisyon yükünün hangi alanlarda olduğu hesaplanmış ve bu alanlar için azaltım faaliyet önerileri sunulmuştur.

1.2 Tezin Kapsamı

Sera etkisinin oluşmasının temel sebebi güneş enerjisinin atmosferde bulunan karbondioksit, metan, nitroz oksit ve florlu gazlar gibi başlıca sera gazları ile etkileşime girmesidir. Bu gazların ısıyı yakalama özellikleri bulunduğundan dünyanın sıcaklığının artmasına neden olmaktadır [9].

İnsanların henüz olmadığı çağlarda dünyanın sıcaklığı oldukça yüksekti fakat zamanla atmosferdeki karbonlar yüzeyde toplandı ve yeraltında depolandı. Fosil yakıt olarak adlandırdığımız bu yer altındaki karbon birikimleri sanayi devrimleri sonrasında insanlar tarafından yer yüzüne geri çıkarıldı. Çağın gelişmesi, ulaşım, ısınma ve endüstri ihtiyaçları sonucu bu kaynakların kullanımını günden güne arttı. Kısacası, teknolojik gelişmelerin sonucunda çağlar önce hapsedilmiş sera gazları atmosfere geri salındı [10].

Sera gazlarının her biri farklı potansiyellere sahiptir. Karbon ayak izi hesaplamaların esnasında kullanılmak üzere sera gazları uygun çarpanları ile karbondioksit eşdeğerlerine (CO_{2eq}) çevrilir. Bu çevrimin karbondioksite yapılmasının sebebi ise atmosferde bulunan en büyük sera gazının CO_2 olmasıdır [11].

Atık geri kazanımı, azaltma ve yeniden kullanım teknolojilerinin gelişmesi nedeniyle atıklardan meydana gelen sera gazı emisyonları etkili bir şekilde azaltılabilmektedir. Mevcut teknolojiler arasında çöp gazının geri kazanımı, biyogaz, kompost ve yakma gibi sistemler bulunmaktadır. Hammadde korunumunun sağlanması, fosil yakıt kullanılmaması ve atık ürünün faydalı ürüne dönüştürülerek kullanılması sayesinde sera gazı üretimi önlenmektedir. Atık sektörünün en temel taşı olan katı atık düzenli depolama sahalarında CH_4 gazı toplanılmaktadır. Ticari olarak 1975 yılından itibaren CH_4 'ün geri kazanımı tam ölçekte sağlanmaktadır. Gelişmiş ülkelerde bu kazanım büyük ölçüde uygulanmakta fakat gelişmekte olan ülkelerde emisyon azaltım çalışmaları devam etmektedir [12].

1.3 Literatür Taraması

Saban [13] tarafından yapılan araştırmada Erzincan ili Organize Sanayi Bölgesinde faaliyet gösteren, hammaddesi atık kâğıt olan, tehlikesiz atık toplama ve ayırma lisansına sahip imalat tesisinin 2020, 2021 ve 2022 yıllarına ait karbon ayak izinin hesaplamasını Tier 1 metodu ile gerçekleştirmiştir. Çalışması içerisinde imalat tesisinin atık su, elektrik, doğalgaz ve yakıt tüketim verilerini ele alarak firmanın emisyon değerleri 2020 yılında 2.780 ton CO_{2eq} , 2021 yılında 3.267 ton CO_{2eq} ve 2022 yılında ise 3.087 ton CO_{2eq} olarak hesaplanmıştır. Firmaya emisyon azaltımı

için güneş paneli kurulumu, kapasite arttırımı ve çevre dostu hibrit araç kullanımı önerilmiştir.

Karakaş [14] tarafından yapılan araştırmada Erzurum İleri Biyolojik Atıksu Artıma Tesisinin 2018 ve 2019 yıllarına ait doğrudan ve dolaylı karbon ayak izinin hesaplamalarını gerçekleştirmiştir. Oluşan emisyonların hangi proses ve kaynaklardan oluştuğu değerlendirilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda 2018 yılında doğrudan 11.949 ton CO₂eq, dolaylı 5.287 ton CO₂eq olmak üzere toplamda 17.236 ton CO₂eq karbon emisyon değeri bulunmuştur. 2019 yılında ise doğrudan 55.723 ton CO₂eq, dolaylı 3.906 ton CO₂eq olmak üzere toplamda 59.629 ton CO₂eq karbon emisyon değeri bulunmuştur. Oluşan emisyonların minimizasyonu için çamur kurutma teknolojileri, temiz enerji kaynak kullanımı ve kimyasal madde azaltımı gibi önerilerde bulunulmuştur.

Eslamidoost vd. [15] tarafından yapılan araştırmada Orta Doğu'nun en büyük gaz rafinerisine sahip şirketlerinden birinin karbon ayak izinin hesaplamasının gerçekleştirmiştir. Karbon ayak izi hesaplamaları yapılırken, karbondioksit (CO₂) ve metan (CH₄) emisyonları doğrudan ve dolaylı olarak ele alınmıştır. Çalışma içerisinde alt prosesleri ile incelenen rafinerinin emisyonları 1507,1 Gg CO₂ /yıl ve 0,003 Gg CH₄ /yıl olarak bulunmuştur. Oluşan CO₂ emisyonlarının en büyük kaynağı gaz tatlandırma ünitesinden oluşmaktadır, CH₄ emisyonlarının ise sifıra yakın seviyede olduğu gözlemlenmiştir.

Kiehle vd.'nin gerçekleştirmiş olduğu çalışmada bir yükseköğretim kuruluşu olan Oulu Üniversitesi'nin karbon ayak izi hesaplamıştır [16]. Çalışmanın amacı hesaplamalarda kullanılan temel verilerin yanı sıra kuruluşun personellerinin işe gidip gelmesi, eksik ekipman satın alımları gibi daha dolaylı emisyon faktörlerinin etkilerini incelemek ve en iyi azaltım çözüm önerilerini sunmaktır. 2019 yılında Oulu Üniversitesinin emisyonu 19.072 ton CO₂eq olarak bulunmuştur. Bu değer en büyük payı ise kampüsün ısınmasından kaynaklı olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla enerji tasarrufuna yönelik önerilerde bulunulmuştur.

Cano vd. [17] tarafından yapılan araştırmada Kolombiya Üniversitesi'nin kapsam 1, 2 ve 3 emisyonları ile karbon ayak izinin hesabını gerçekleştirmiştir. 2019 yılında karbon ayak izi yaklaşık olarak 7.250 ton CO₂eq ve kişi başına 0,432 ton CO₂eq olarak hesaplanmıştır. Oluşan emisyonların %2,84'ü kapsam 1, %14'ü kapsam 2

ve yaklaşık %83'ü kapsam 3 emisyonlarına aittir. Sera gazı emisyon kaynaklarına yüzdesel olarak bakıldığında ise %58 ile en büyük pay ulaşımına aittir. Üniversitede oluşan atık suların emisyon yükü ise %17'lik bir dilim ile en büyük ikinci paya sahiptir.



2.1 İklim Değişikliği

İklim değişikliği, belirli bir bölgenin hava sıcaklıkları, koşulları ve düzenlerindeki uzun süreli değişikliği ifade etmektedir. Bu değişikliğe fırtına, sel, volkanik patlamalar vb. doğal afetler etkili olmasının yanı sıra son yüzyıllarda fosil yakıt kullanımı ve insan faktörü ana sebepleridir.

İklim değişikliğine sebebiyet veren en önemli sera gazları karbondioksit (CO₂) ve metan (CH₄)'dır. Karbondioksit (CO₂) ve metan (CH₄) gazı yakıtların ana elementleri olması sebebiyle ısınma, ulaşım gibi temel ihtiyaçların fosil yakıtlardan karşılanması esnasında atmosfere karışmaktadır [18].

2023 yılına ait Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi (NOAA) Ulusal Çevresel Bilgi Merkezleri'nin (NCEI) Küresel İklim Raporu'na göre, her ay bir önceki yedi aydan daha sıcak olarak kayıt edildi. Yılın ikinci yarısındaki aylar (Haziran-Aralık), kaydedilen en sıcak aylar olarak öne çıktı. Özellikle Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında, küresel sıcaklıklar uzun vadeli ortalamaların 1,0°C'den (1,8°F) daha fazla üzerine çıktı. NOAA'nın verilerine göre (Şekil 1), bu sıcaklık artışı, herhangi bir ayda kaydedilen en yüksek sıcaklık değerinin ilk kez bu kadar belirgin şekilde aşıldığını göstermektedir [19].



Şekil 1. 2023'teki küresel ortalama yüzey sıcaklığının 1991-2020 ortalamasıyla karşılaştırmalı grafiği (NOAA)

2.2 Sera Gazları

Hem doğal hem de antropojenik kaynaklardan atmosfere salınan gaz bileşenleri dünyanın yüzeyinden, atmosferin kendisinden ve bulutlardan yayılan elektromagnetik spektrumda spesifik dalga boylarında kızılötesi ışını formundaki ısı enerjisini hapsedmektedir ve sonra yaymaktadır. Atmosferdeki bazı gaz bileşenleri ve kimyasallar sera etkisine katkıda bulunmaktadır [20, 21]. Sera gazı etkisi, yaşam ve suyun olduğu yer olan troposferde meydana gelir [22]. Artan önem sırasına göre en fazla bulunan sera gazı: su buharı, karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), nitroz oksit (N₂O), ve ozondur (O₃) [23].

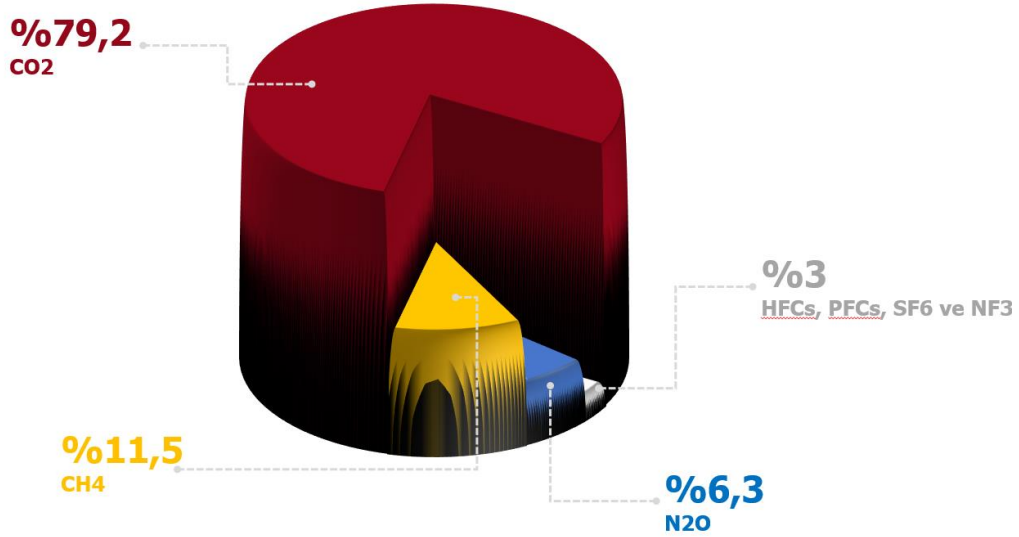
2.2.1. Su Buharı

Su buharı hem buhar hem de bulutlar halinde troposferde bulunmaktadır. Su buharı, atmosferdeki en baskın gazı ve kızılötesi opasitesinin en önemli gaz kaynağıdır [24]. Antropojenik faaliyetler su buharı konsantrasyonlarını doğrudan etkilememektedir [22]. Ancak insan aktiviteleri küresel sıcaklıkları artırmakta ve dolaylı olarak su buharı oluşumunu meydana getirmektedir [25]. Su buharı, gizli bir ısı deposu olarak görev yapar böylece su buharının sıvı suya dönüşümüyle birlikte konvektif süreçlere neden olmaktadır [26]. Su buharının atmosferik yaşam süresi diğer gazlarla karşılaştırılınca daha kısadır [22].

2.2.2 Karbondioksit (CO₂)

CO₂, yaklaşık %80'i ulaşım, elektrik enerjisi üretimi ve sanayi sektörlerinde fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanan sera gazı emisyonlarının birincil nedenidir [27]. Son 10 yıldır artan fosil yakıtların kullanımıyla atmosfere salınan CO₂ miktarı artmakta ve bu durum ekstrem hava olayları (seller, kar fırtınası, fırtınalar), kuraklık, deniz seviyesinin yükselmesini içeren iklim değişikliklerine ve ciddi etkilere neden olmaktadır [28]. CO₂, termal absorpsiyonun %20'sinden sorumludur [29]. Doğal CO₂ kaynakları organik parçalanmayı, okyanus salınım ve solunumunu kapsamaktadır. İnsan faaliyetleri kaynaklı CO₂ emisyonları, fosil yakıtların (kömür, doğal gaz ve petrol), katı atıkların, ağaçlar ve diğer biyolojik materyallerin yanmasıyla, bazı kimyasal reaksiyonların sonucunda (örneğin, çimento üretimi) atmosfere salınır. Bitkiler, biyolojik karbon döngüsünün bir parçası olarak CO₂'yi metabolik faaliyetlerde kullanarak atmosferden uzaklaştırır. CO₂, volkanik patlamalar, bitki solunumu ve hayvanlar ile insanların solunumu gibi doğal

süreçlerin bir sonucu olarak da salınmaktadır. Ancak, insan faaliyetleri, özellikle Sanayi Devrimi'nin başlamasından bu yana, atmosferdeki CO₂ konsantrasyonunu %50 artırdı. Bu artış, fosil yakıtların yanması ve büyük ölçekli ormansızlaşma gibi insan etkinliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, CO₂ konsantrasyonundaki artış, iklim değişikliğinin başlıca nedenlerinden biridir. ABD Çevre Koruma Ajansı'nın 2023'te yayınlamış olduğu rapora göre (Şekil 2) 1990 ve 2021 yılları arasında ABD'nin sera gazı emisyonlarının %79,4'ü CO₂ dir [30, 31]. Atmosferdeki CO₂ konsantrasyonları son iki yüzyılda önemli ölçüde arttı ve 1750'de yaklaşık 270 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ [32] seviyesinden günümüzde 426 ppm üzerindeki konsantrasyonlara yükseldi. [33]



Şekil 2. ABD Çevre Koruma Ajansı (2023) ABD Sera Gazı Emisyonları
Envanteri (1990-2021)

2.2.3. Metan (CH₄)

En basit hidrokarbon olan CH₄, Dünyanın sera etkisinde, atmosferik kimyasında, global karbon döngüsünde ve modern şehirlerin enerji ihtiyaçlarında önemli rol oynamaktadır [34]. CH₄, CO₂'den 27,2 veya 29,8 kez küresel ısınma potansiyeline sahip güçlü bir sera gazıdır ve sanayi öncesi dönemden bu yana yaklaşık 0,5°C küresel ısınmaya neden olmaktadır [35]. Fosil yakıtların üretimi ve taşınması sırasında metan gazı açığa çıkar. Bunun yanı sıra, tarım ve hayvancılık faaliyetleri, arazi kullanımı değişiklikleri ve belediye katı atık düzenli depolama alanlarındaki organik atıkların çürümesi gibi çeşitli insan etkinlikleri de CH₄ emisyonlarına

katkıda bulunur. CH₄, doğal olarak ayrışma süreçleriyle de üretilir, ancak insan faaliyetleri doğal dengenin bozulmasına neden olmuştur. Özellikle, sığır yetiştiriciliği, katı atık düzenli depolama alanları, pirinç tarımı ve geleneksel petrol ve gaz üretimi gibi endüstriyel faaliyetler büyük miktarlarda CH₄ gazının atmosfere salınmasına yol açar. Bu durum, sera etkisi ve iklim değişikliği üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir [36]. 103 ülkenin COP26'da CH₄ emisyonlarını 2030 öncesinde 2020 seviyelerine göre en az %30 oranında azaltmayı amaçlayan Küresel Metan Taahhüdünü imzalamasıyla CH₄ son zamanlarda siyasi tartışmaların ön sıralarına taşınmıştır [37].

2.2.4. Nitröz Oksit (N₂O)

Başta CO₂, CH₄ ve N₂O olmak üzere sera gazlarının (GHG'ler) antropojenik emisyonları, on yılda 0,2 °C'den fazla Dünya'nın yıllık ortalama sıcaklığının hızlı bir şekilde artmasından sorumludur. CO₂ gibi N₂O da (üçüncü en önemli sera gazı) atmosferde uzun bir yarı ömre sahiptir (yaklaşık 120 yıl) ve ısınma potansiyeli 100 yıllık zaman diliminde CO₂'den 273 kat daha fazladır. Nitröz oksit (N₂O) stratosferdeki ozonun tükenmesinin ana nedenidir [38]. Nitröz oksit, tarım, arazi kullanımı ve endüstriyel faaliyetler sırasında atmosfere yayılırken, fosil yakıtların ve katı atıkların yakılması ile atık su arıtma işlemleri sırasında da salınır. Bu gazın kaynakları arasında ticari ve organik gübrelerin geniş çapta kullanımı, fosil yakıtların yanması, nitrik asit üretimi ve biyokütle yakılması da yer alır. Nitröz oksit emisyonları, sera gazları içinde önemli bir paya sahiptir ve iklim değişikliği üzerinde olumsuz etkilere sahiptir [39]. Biyolojik olarak salınan nitröz oksit (N₂O) gazı, küresel ısınma ve ozon tabakasının incilmesiyle ilgili en çok araştırılan maddelerden biridir [40].

2.2.5. Ozon (O₃)

Ozon, esas olarak stratosferde bulunmaktadır fakat çok az miktar troposferde de üretilmektedir. Stratosferik ozon (ozon tabakası), O₂ ve ultraviyole ışınları tarafından kimyasal reaksiyonlarla doğal bir şekilde oluşmaktadır. Ultraviyole ışınları oksijen molekülünü (O₂) parçalar ve iki oksijen atomu (2 O) meydana getirir. Hayli reaktif olan bu atomlardan her biri bir O₃ molekülü oluşturmak için O₂ ile birleşir. Güneşin orta frekans ultraviyole (UV) ışığının (200 – 315 nm dalgaboyu) neredeyse %99'u ozon tabakası tarafından absorbe edilir. Aksi takdirde,

Dünya yüzeyine yakın yaşam formları için zararlı etkisi olurdu. Troposferik ozonun (O_3) çoğunluğu güneş ışığının varlığında NO_x ve CO ile reaksiyona girer. Troposferik O_3 hem bitkiler hem de hayvanlar için zararlıdır. O_3 bazı şekillerde bitkileri etkilemektedir. Bitki yapraklarında bulunan stomatalar, CO_2 ve suyu dokulara difüzyonunda görev yapmaktadır fakat yüksek konsantrasyonlardaki O_3 bitkilerin stomalarının kapanmasına neden olmaktadır. Bu durum fotosentez ve bitki büyümesinin yavaşlamasına neden olur [41].

2.2.6. Florlu Gazlar

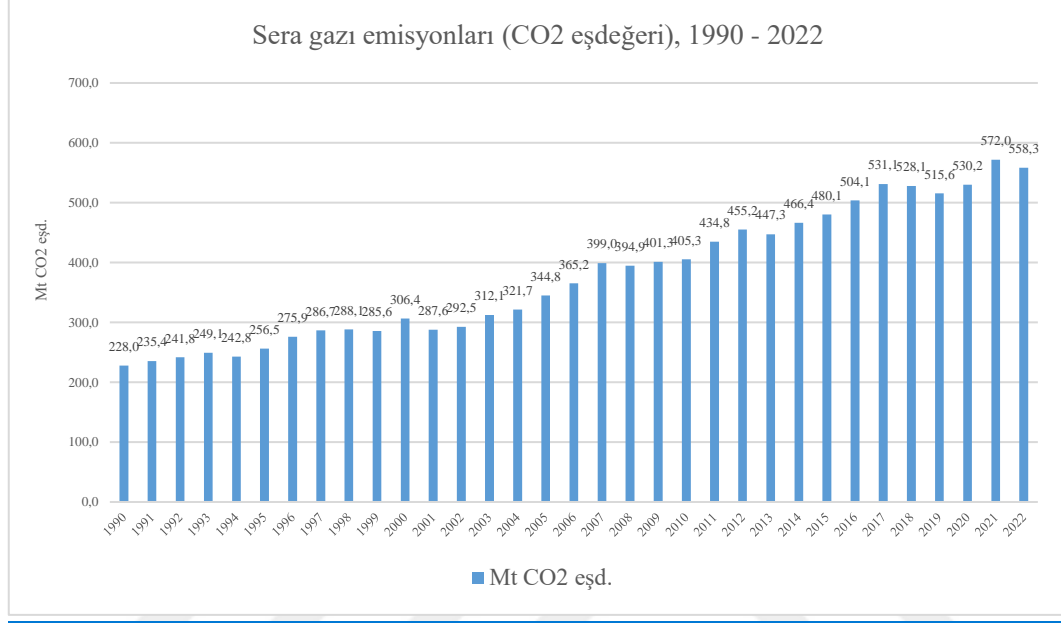
Hidroflorokarbonlar, perflorokarbonlar, kükürt heksaflorür ve nitrojen triflorür gibi sentetik ve güçlü sera gazları, evsel, ticari ve endüstriyel uygulamalardan kaynaklanmaktadır. Özellikle hidroflorokarbonlar, stratosferik ozon tabakasını incelten maddelerin yerine kullanılmakta olup, bunlar florlu gazlar kategorisine girer. Bu gazlar genellikle diğer sera gazlarına göre daha az miktarda yayılır, ancak çok yüksek küresel ısınma potansiyellerine (GWP) sahip oldukları için güçlü sera etkilerine sahiptirler. GWP'leri binler ile onbinler arasında değişmektedir, bu da belirli bir kütlenin CO_2 'den çok daha fazla ısıyı hapsedebileceği anlamına gelir [42].

2.2.7 Karbon Ayak İzi

Karbon ayak izi, bir kişinin, bir kurumun, bir ürünün veya bir etkinliğin sera gazı emisyonlarının miktarını ölçen bir kavramdır. Genellikle CO_2 eşdeğerleri olarak ifade edilir. Bu emisyonlar, doğrudan faaliyetlerden kaynaklanan (örneğin, araç kullanımı veya enerji tüketimi), dolaylı faaliyetlerden kaynaklanan (örneğin, tedarik zinciri veya ürünlerin ambalajlanması) ve yaşam tarzıyla ilişkili diğer etmenlerden kaynaklanabilir [43]. Karbon ayak izi, bir kişinin veya bir organizasyonun çevresel etkisini değerlendirmek ve azaltma çabalarını yönlendirmek için önemli bir araçtır. Bu, enerji verimliliğini artırma, yenilenebilir enerji kullanımını teşvik etme, sera gazı emisyonlarını azaltma ve karbon emisyonlarını telafi etme gibi çeşitli stratejileri geliştirme ve uygulama sürecinde yardımcı olabilir [44].

2.3 Türkiye Sera Gazı Emisyonları

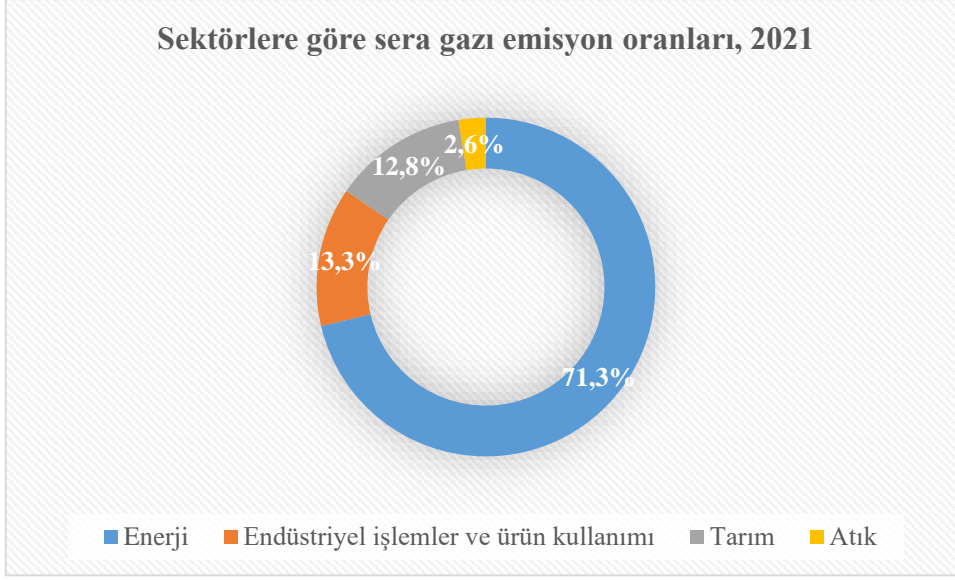
TÜİK verilerine göre 2021 yılında oluşan toplam sera gazı emisyonu 2020 yılına göre %7,7 artış göstererek 564,4 milyon ton CO₂ olarak hesaplanmıştır (Şekil 3). Sektörlerin etkisine göre, sera gazı emisyonlarının %71,3 ile en büyük payı enerji sektörüne aittir. (Tablo1, Şekil 4 ve Şekil 5) (TÜİK 2023) [45].



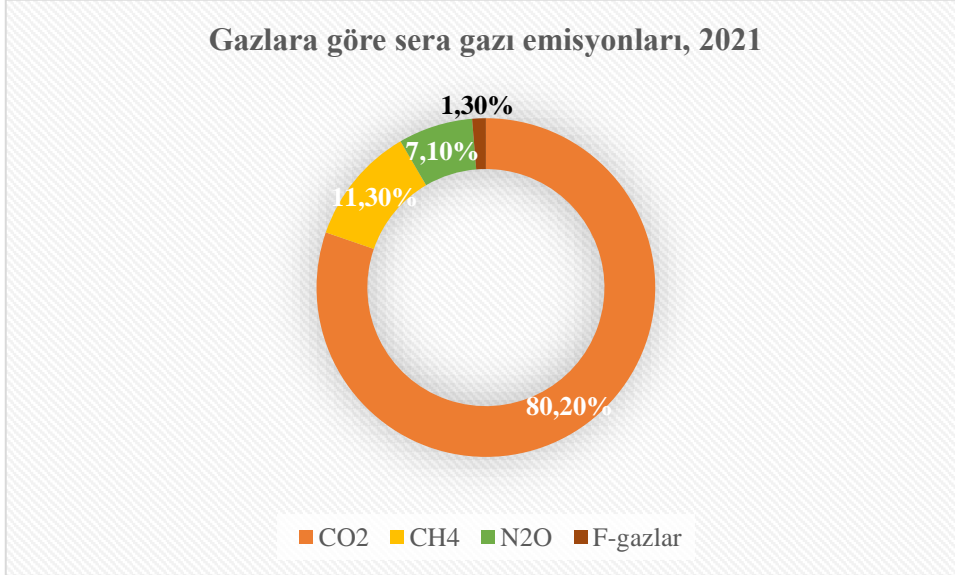
Şekil 3. Toplam ve kişi başı sera gazı emisyonu, 1990-2021 (TÜİK 2023)

Tablo 1. Sektörlere göre sera gazı emisyonları, 1990-2021 (TÜİK 2023)

Yıllar Sektörler	1990	2000	2010	2015	2020	2021	(Milyon ton CO ₂ eşdeğeri)	
							1990-2021 değişim (%)	2020-2021 değişim (%)
Toplam emisyon	219,5	298,9	398,8	475	524	564,4	157,1	7,7
Enerji	139,5	216	287,9	342	366,6	402,5	188,4	9,8
Endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı	22,9	26,2	49,1	59,7	68	75,1	228,7	10,6
Tarım	46,1	42,3	44,4	56,1	73,2	72,1	56,5	-1,5
Atık	11,1	14,3	17,4	17,1	16,3	14,7	32,6	-9,9



Şekil 4. Sektörlere göre sera gazı emisyonları, 2021 (TÜİK 2023)



Şekil 5. Gazlara göre sera gazı emisyonları, 2021 (TÜİK 2023)

2.4 BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC), küresel ısınmaya karşı alınan ilk hükümetlerarası çevre sözleşmesi olarak Birleşmiş Milletler öncülüğünde imzalanmıştır. Sözleşme, insan kaynaklı çevresel kirliliklerin iklim üzerindeki tehlikeli etkilerini kabul ederek sera gazı emisyonlarını azaltmayı ve olumsuz etkilerini en aza indirgeyerek belirli bir seviyede tutmayı hedeflemektedir [46]. Bununla birlikte, yaptırım gücü zayıf olan bu sözleşme, taraf ülkelerin genellikle iyi niyet düzeyinde destek vererek somut

eylemleri zorunlu kılamamaktadır. 1997 yılında imzalanan Kyoto Protokolü ise bu hedefleri daha somut şekilde içermekte ve sera gazı emisyonlarının azaltılması için belirli taahhütleri içermekteydi. Bununla birlikte, Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansı'nda imzaya açılan ve 1994 yılında yürürlüğe giren BM İklim Değişikliği Sözleşmesi (BMİDÇS), uluslararası alanda atılan ilk ve en önemli adım olarak kabul edilmektedir. Bu sözleşme, tarafları sera gazı emisyonlarını azaltmaya, araştırma ve teknoloji alanlarında işbirliği yapmaya ve sera gazı yutaklarını korumaya teşvik etmektedir. Ancak, ülkelerin farklı kalkınma öncelikleri ve koşulları göz önüne alınarak "ortak fakat farklılaştırılmış sorumluluklar ve göreceli kabiliyetler" ilkesine dayanmaktadır. BMİDÇS ülkeleri, Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (OECD) üyesi olan ve geçiş ekonomisi ülkelerini EK-I listesinde, OECD üyesi olan ülkeleri EK-2 listesinde ve bu listelerde yer almayan gelişmekte olan ülkeleri ise pazar ekonomisine geçiş sürecinde olan ülkeler şeklinde kategorize etmiştir (Tablo 1). EK-1 listesinde bulunan ülkelerin sera gazı emisyonlarını azaltma zorunluluğu bulunmaktadır. EK-2 listesinde yer alan ülkelerin ise emisyon azaltımı yanı sıra iklim değişikliği ile mücadele önemlerini destekleme yükümlülüğü vardır. Türkiye, BMİDÇS müzakereleri altında kendine özgü bir konuma sahiptir ve Kyoto Protokolü ve Paris Anlaşması gibi uygulama araçlarıyla bu hedeflere katkıda bulunmaktadır [47].

Tablo 2. BMİDÇS EK-I ve EK-II Ülkeleri [48].

EK-1 Ülkeleri	AB, ABD, Almanya, Avustralya, Avusturya, Belçika, Beyaz Rusya, Bulgaristan, Danimarka, Büyük Britanya ve Kuzey İrlanda Birleşik Krallığı, Çek Cumhuriyeti, Estonya, Finlandiya, Fransa, Hırvatistan, Hollanda, İrlanda, İtalya, İspanya, İsveç, İsviçre, İzlanda, Japonya, Letonya, Litvanya, Kanada, Lüksemburg, Macaristan, Norveç, Portekiz, Romanya, Rusya Federasyonu, Slovakya, Slovenya, Türkiye, Ukrayna, Yeni Zelanda, Yunanistan.
---------------	---

Tablo 2. BMİDÇS EK-I ve EK-II Ülkeleri (devamı) [48].

EK-2 Ülkeleri	Avrupa Topluluğu, ABD, Almanya, Avustralya, Avusturya, Belçika, Danimarka, Finlandiya, Fransa, Hollanda, Büyük Britanya ve Kuzey İrlanda Birleşik Krallığı, İrlanda, İtalya, İspanya, İsveç, İsviçre, İzlanda, Japonya, Kanada, Lüksemburg, Norveç, Portekiz, Yeni Zelanda, Yunanistan
Pazar Ekonomisine Geçiş Sürecinde Olan Ülkeler	Beyaz Rusya, Çek Cumhuriyeti, Bulgaristan, Estonya, Hırvatistan, Letonya, Litvanya, Macaristan, Polonya, Romanya, Rusya Federasyonu, Ukrayna, Slovakya, Slovenya

2.5 Kyoto Protokolü

Kyoto Protokolü, iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir adım olarak kabul edilir. 1997 yılında kabul edilen bu protokol, 2005 yılında yürürlüğe girmiştir ve 192 taraf devlet tarafından imzalanmıştır. Protokol, endüstrileşmiş ülkeleri ve geçiş ekonomilerini belirli emisyon azaltım hedeflerine ulaşmaya zorlayarak Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ni işlevsel hale getirmiştir. Bu protokol, "ortak ama farklılaştırılmış sorumluluk ve ilgili yetenekler" ilkesi çerçevesinde gelişmiş ülkeleri daha ağır yükler altına sokar, çünkü bu ülkelerin atmosfere saldıkları sera gazı emisyonlarının büyük ölçüde onların sorumluluğunda olduğunu kabul eder. Protokolün detaylı uygulama kuralları, 2001 yılında Marakeş'te gerçekleştirilen 7. Taraflar Konferansı'nda kabul edilmiştir ve bu kurallar 2005 yılında Protokol'ün 1. Taraflar Toplantısı'nda onaylanmıştır. Daha sonra, 2012 sonrası uluslararası iklim rejiminin oluşturulması sürecinde 2007 yılında Bali'de gerçekleştirilen 13. Taraflar Konferansı önemli bir dönemeç olmuştur ve bu toplantı sonrası, "Sözleşme" ve "Protokol" başlığı altında, iki yönlü uluslararası iklim değişikliği müzakerelerinin yürütüldüğü bir sürece girilmiştir [49]. Kyoto protokolünde adı geçen sera gazları ve temel kaynakları Tablo 2'de belirtilmiştir.

Tablo 3. Kyoto Protokolü'nde adı geçen sera gazları ve temel kaynakları [50]

Sembol	İsim	CO ₂ eş değeri	Ana Kaynak
CO ₂	Karbondioksit	1	Fosil yakıtların yanması, Orman yangınları, Çimento üretimi
CH ₄	Metan	21	Depolama sahaları, Petrol ve doğalgazın üretim ve dağıtım, Çiftlik hayvanlarının sindirim sistemindeki fermantasyon
N ₂ O	Nitrözoksit	310	N ₂ O fosil yakıtların yanması, Gübreler, Naylon üretimi
HFC _s	Hidroflorokarbonlar	140-11.700	Buzdolabı gazları, Alüminyum eritme, Yarı iletken üretimi,
PFC _s	Perflorokarbonlar	6.500-9.200	Alüminyum üretimi, Yarı iletken üretimi
SF ₆	Kükürtheksaflorür	23.900	Elektrik iletim ve dağıtım sistemleri, Magnezyum Üretimi

2.6 Paris Anlaşması

Paris Anlaşması, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne dayanarak 2015 yılında imzalanan ve 2016'da yürürlüğe giren bir anlaşmadır. BMİDÇS'nin 191 üyesi anlaşmaya taraftırken, beş üye devlet (Eritre, İran, Irak, Libya ve Yemen) henüz onaylamamıştır. Anlaşma, küresel ortalama sıcaklık artışını sanayi öncesi seviyelerden 2 °C (3,6 °F) artış seviyesi ile sınırlamayı hedefler ve hatta 1,5 °C'ye kadar çaba harcanmasını öngörür. Bu hedef, iklim

değişikliğinin risklerini ve etkilerini önemli ölçüde azaltmayı amaçlar. Anlaşma, emisyonların mümkün olan en kısa sürede azaltılmasını ve 21. yüzyılın ikinci yarısına kadar salınan ve tutulan sera gazlarının dengelenmesini hedefler. Tarafların iklim değişikliğinin olumsuz etkilerine uyum sağlama yeteneğini artırarak ve düşük sera gazı emisyonlarına dayalı dayanıklı kalkınma için tutarlı bir finansman akışı sağlayarak bu hedefe ulaşmayı hedefler. Her ülkenin küresel ısınmayı azaltmak için üstlendiği katkıyı belirlemesi, planlaması ve düzenli olarak raporlaması gerekmektedir [51]. Hiçbir mekanizma, bir ülkeyi belirli bir tarihe kadar belirli bir emisyon hedefi koymaya zorlamaz, ancak her hedef önceden belirlenmiş hedeflerin ötesine geçmelidir. Kyoto Protokolü'nden farklı olarak, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler arasındaki ayrım belirgin değildir. Bu nedenle gelişmekte olan ülkeler de emisyon azaltma planları sunmalıdır.

2.7 Entegre Katı Atık Depolama Tesisi

Entegre katı atık depolama tesisi, farklı türdeki katı atıkların toplanması, işlenmesi, geri dönüştürülmesi ve nihai olarak depolanması için kullanılan bir tesistir. Bu tesisler genellikle belediyeler veya özel işletmeler tarafından işletilir ve genellikle bir dizi işlemi içerir.

Bu tesislerde, atıklar genellikle kaynağında ayrıştırılır ve ardından geri dönüşüm için uygun olan malzemeler (cam, metal, plastik vb.) ayrı olarak toplanır. Geri dönüşüm için uygun olmayan veya geri dönüşüme uygun olmayan atıklar genellikle işlenir, sıkıştırılır veya diğer yöntemlerle hacmi azaltılır. Son olarak, atıklar genellikle kontrollü bir şekilde depolanmak üzere bir alanın içine yerleştirilir. Bu alanlar genellikle çevresel olarak korunaklıdır ve atıkların sızmasını önlemek için su geçirmez bir zemin ve yan ve üst kısımları kapsayan özel kaplamalar içerir.

Entegre katı atık depolama tesisleri, atık yönetimi süreçlerinin farklı aşamalarını bir araya getirerek, çevresel etkileri minimize etmeyi ve atıkların güvenli bir şekilde bertaraf edilmesini sağlamayı amaçlar. Bu tesisler aynı zamanda enerji geri kazanımı veya biyogaz üretimi gibi alternatif atık yönetimi yöntemlerini de uygulayabilirler.

2.8 Samsun Büyükşehir Belediyesi Katı Atık Düzenli Depolama Tesisi

Samsun ili İlkadım ilçesi Avdan köyünde yaklaşık 60 dönümlük bir arazide bulunan Samsun Katı Atık Düzenli Depolama Sahası (Şekil 6), Samsun ve civar illerin çöplerinin bertarafını sağlamaktadır. Düzenli depolama yapılarak çöplerden elektrik elde edilmektedir. İşletmesi Samsun Avdan Enerji'ye ait olan depolama sahasının içerisinde alt tesisler de bulunmaktadır.

Firmanın sahip olduğu alt tesisler;

1. Mekanik Ayırma Tesisi
2. Depolama Sahası
3. Biyometanizasyon Tesisi
4. Desülfürizasyon Ünitesi
5. Kojenerasyon Tesisi
6. Çamur Kurutma Tesisi
7. Sera



Şekil 6. Samsun Büyükşehir Belediyesi Katı Atık Depolama Sahası

Sahaya ortalama günde 750 ton atık kabulü yapılmaktadır. Bu atıklar ilk işlem olarak mekanik ayırma tesisinden (Şekil 7) geçerek inorganik maddelerin uzaklaştırılması sağlanmaktadır. Ayrıştırılan inorganik maddeler ilgili lisanslı bertaraf tesislerine gönderilmektedir. Organik maddelerin ise bir kısmı biyometanizasyon tesisine geri kalanı da depolama sahasına aktarılmaktadır.



Şekil 7. Samsun Avdan Enerji Mekanik Ayırma Tesisi

Biyometanizasyon tesisi (Şekil 8) sıvı ve kuru fermantasyon olmak üzere iki aşamalıdır. Kuru fermantasyon prosesinde termofilik ortamda %30 katı madde ile işletme sağlanırken, sıvı fermantasyon tesisinde mezofilik ortamda %8 katı madde ile işletme gerçekleştirilmektedir. Fermantasyon tanklarının sıvılaştırılması için depolama sahasında oluşan sızıntı suyu kullanılarak atık bir ürünün döngüseliği sağlanır.



Şekil 8. Samsun Avdan Enerji Biyometanizasyon Tesisi

Fermantasyon tanklarında ve depolama sahasında oluşan gazın içerisinde bulunan H_2S 'in motorlara ve ekipmanlara vereceği zararı önlemek ve gazı temizlemek için desülfürizasyon kulelerinden geçirilerek gaz saflaştırılır. Daha sonrasında gaz balonunda depolanır.

Çamur kurutma tesisine kabulü yapılan evsel arıtma çamurları %90 ve üzeri olacak şekilde nemi alınarak atık hacminin azalması sağlanmaktadır. Ayrıca oluşan kuru çamurun yakıt olarak kullanımının değerlendirilmesi için firma Ar-Ge çalışmaları yürütmektedir.

Kojenerasyon ünitesinde motorlardan oluşan atık ceket ısıları ile çamur kurutma tesisi, sera tesisi ve genel yönetim binasının ısınması sağlanmaktadır. Atık ısı ile ısınan serada yetiştirilen çiçekler ile belediyelerin park bahçe düzenlemeleri yapılmaktadır.

3.1 Karbon Ayak İzi Hesabı

Karbon ayak izi hesaplamalarında Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) sunmuş olduğu yöntem kullanılır. Bu yöntemdeki emisyon faktörleri 3 farklı Tier (kademe) için mevcuttur. Tier 1 en basit ve temel yöntemdir, Tier 2 ve 3 daha kapsamlı ve detaylı veriler ile hesaplama yapılan yöntemlerdir. Hesaplama yapılacak olan kuruluşun verilerine bağlı olarak uygun Tier yöntemi seçilir [52].

Her bir sera gazının katkısını hesaplamak için, bu gazın belirli bir kütlesinin CO₂'nin aynı kütlesi kadar ısıtma gücüne karşılaştırılarak belirlenen bir parametre olan GWP kullanılır [53]. Bu, farklı gazların etkisini aynı ölçüm birimi olan CO₂ eşdeğeri (CO₂e) ile karşılaştırılabilir hale getirir [54]. Dolayısıyla, sera gazı emisyonlarının hesaplanmasında aşağıdaki formül kullanılır:

$$[\text{Sera gazı miktarı}] \times [\text{İlgili gazın GWP değeri}] = \text{CO}_2\text{e emisyonları} \quad (1.1)$$

Bu formül, sera gazlarının etkilerini anlamak ve karbon ayak izini belirlemek için kullanılır.

Sera gazı emisyonlarını hesaplarırken emisyon kaynakları Kapsam 1, Kapsam 2 ve Kapsam 3 olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 9). Kişi, firma, kurum ve kuruluşlara göre kapsam belirlemesi yapılarak hesaplamalar gerçekleştirilmektedir.

3.1.1 Bireysel Karbon Ayak İzi

Bireylerin günlük yaşamları boyunca doğrudan ve dolaylı olarak yaydıkları sera gazı emisyonlarını içerir. Bu emisyonlar, evdeki enerji tüketimi, araç kullanımı, seyahat etme alışkanlıkları, beslenme alışkanlıkları, tüketilen malların üretimi ve atıkların yönetimi gibi faktörlerden kaynaklanabilir.

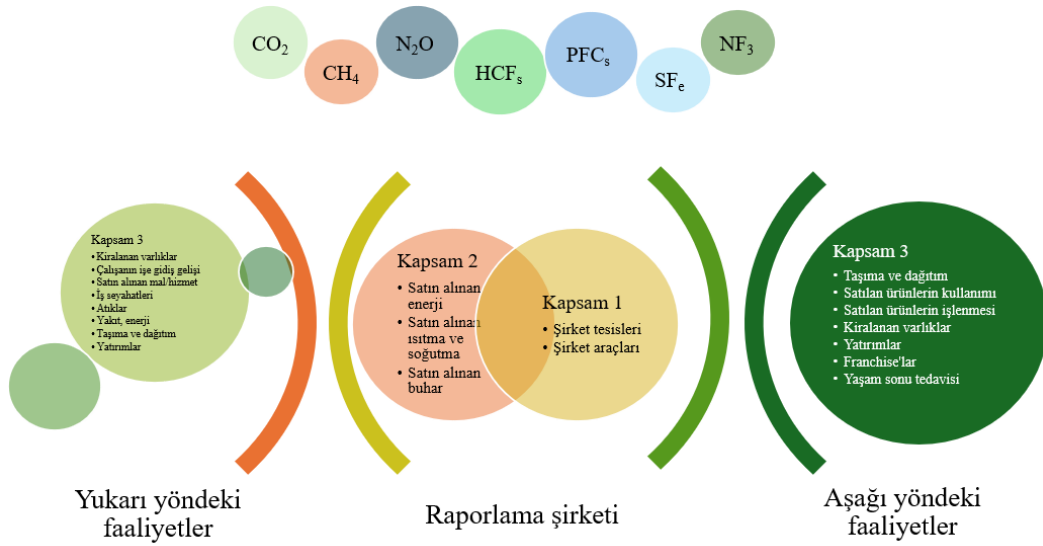
3.1.2 Kurumsal Karbon Ayak İzi

Şirketlerin, kurumların veya işletmelerin faaliyetleri sırasında yaydığı sera gazı emisyonlarını ölçer. Tesislerin enerji tüketimi, ulaşım, üretim süreçleri, tedarik zinciri yönetimi ve atık yönetimi gibi faktörlerden kaynaklanabilir.

3.1.3 Ürün Karbon Ayak İzi

Bir ürünün veya hizmetin yaşam döngüsü boyunca doğrudan ve dolaylı olarak yaydığı sera gazı emisyonlarını içerir. Bu, hammaddelerin çıkarılması, üretim süreci, taşıma, kullanım ve atık yönetimi gibi tüm aşamaları kapsar. Ürün karbon ayak izi, tüketicilere çevresel etkileri hakkında bilgi sağlamak ve çevre dostu seçimler yapmalarına yardımcı olmak için kullanılabilir.

Bu üç tür karbon ayak izi, çevresel etkilerin belirlenmesi ve azaltılması için önemli birer araçtır.



Şekil 9. Kapsam 1,2,3 Emisyonları [55]

4.1 Depolama Sahası Karbon Ayak İzi Hesaplamaları

Tesisten tüm alt tesislerin yakıt, elektrik, su tüketimi ve gaz üretim verileri alınarak (Tablo 5); CO₂'ye göre GWP değerleri (Tablo 3) ve kaynaklara göre IPCC'nin ilgili katsayıları (Tablo 4) kullanılarak Tier 1 yöntemiyle hesaplamalar yapıldı.

Tablo 4. CO₂'ye göre GWP değerleri

Parametre	Emisyon Faktörü (ton CO ₂ eq)
CO ₂	1
CH ₄	27,9
N ₂ O	273

Tablo 5. Kaynaklara göre emisyon faktörleri

Kaynak	Emisyon Faktörü	Birim	Kaynak
Yakıt (Dizel) CH ₄	74100	kg/Tj	IPCC Ch. 3
Yakıt (Dizel) CO ₂	3	kg/Tj	IPCC Ch. 3
Yakıt (Dizel) N ₂ O	0,6	kg/Tj	IPCC Ch. 3
Depogazı CH ₄	54600	kg/Tj	IPCC Ch.2
Depogazı CO ₂	1	kg/Tj	IPCC Ch.2

Tablo 5. Kaynaklara göre emisyon faktörleri (devamı)

Depogazı N₂O	0,1	kg/Tj	IPCC Ch.2
Elektrik Tüketimi	0,479	tonCO₂e/MWh	TC. Enerji. Bk. 2024
Su Tüketimi	0,0014	kgCO₂e/L	Sawant, 2015

Tablo 6. Depolama Sahasının 2021,2022 ve 2023 yılına ait tüketim verileri

Kaynaklar	Birimler	2021	2022	2023
Atık işletme harcanan yakıt	lt	118.018	107.223	105.713
Sahadan çekilen gaz miktarı	m³	26.321.317	16.133.130	16.901.798
Sızıntı suyu taşınması harcanan yakıt	lt	101.506	99.361	109.230
Saha kapama harcanan yakıt	lt	35.952	22.158	57.996
Çakıl Taşıma yakıt	lt	10.102	14.558	9.618

2023 yılı içerisinde iş makinelerinin saha içi atık taşıma, itme, serme ve sıkıştırma işlemleri için harcadığı yakıt miktarı 105.713 lt motorin. 2022 yılında 107.223 lt, 2021 yılında 118.018 lt'dir.

$$105.713 \text{ lt} * 0,83 \text{ kg/lt} * 43 \text{ TJ/Gg} * 1 \text{ Gg}/10^6 \text{ kg} = 3,7728 \text{ Tj}$$

$$3,7728 \text{ Tj} * 74100 \text{ kg/Tj} = 279.571,6 \text{ kg/ CO}_2$$

$$279.571,6 \text{ kg/ CO}_2 * 1 = 279.571,6 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$$

$$3,7728 \text{ Tj} * 3,0 \text{ kg/Tj} = 11,3186 \text{ kg CH}_4$$

$$11,3186 \text{ kg CH}_4 * 27,9 = 316,923 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$$

$$3,7361 \text{ Tj} * 0,6 \text{ kg/Tj} = 2,263 \text{ kg N}_2\text{O}$$

$$2,263 \text{ kg N}_2\text{O} * 273 = 618,000 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$$

$$279.571,6 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} + 316,923 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} + 618,000 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} = 280.506 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} \\ \text{eq} \approx 280 \text{ ton CO}_2 \text{ eq}$$

Düzenli depolama sahası 2023 yılında çekilen gaz miktarı 16.901.798 m³, 2022 yılında 16.133.130 m³, 2021 yılında ise 26.321.317 m³'dür.

$$16.901.798 \text{ m}^3 * 1,3 \text{ kg/m}^3 * 50,4 \text{ Tj/Gg} * 1 \text{ Gg}/10^6 \text{ kg} = 1107,406 \text{ Tj}$$

$$1107,406 \text{ Tj} * 54600 \text{ kg/Tj} = 60.464.357 \text{ kg/ CO}_2$$

$$60.464.357 \text{ kg/ CO}_2 * 1 = 60.464.357 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$$

$$1107,406 \text{ Tj} * 1 \text{ kg/Tj} = 1107,406 \text{ kg CH}_4$$

$$1107,406 \text{ kg CH}_4 * 27,9 = 31.007,36254 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$$

$$1107,406 \text{ Tj} * 0,1 \text{ kg/Tj} = 110,7406 \text{ kg N}_2\text{O}$$

$$110,7406 \text{ kg N}_2\text{O} * 273 = 30.232,17848 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$$

$$60.464.357 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} + 31.007,36254 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} + 30.232,17848 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} \\ = 60.525.596 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} \approx 60.525 \text{ ton CO}_2 \text{ eq}$$

Depolama sahasında 2023 yılında oluşan 99.021 ton sızıntı suyunun deşarj hattına taşınması için 3641 tanker seferi yapılmıştır. Bu seferlerde harcanan yakıt miktarı 109.230 lt motorin. 2022 yılında 99.361 lt, 2021 yılında 101.506 lt motorin sarf edilmiştir.

$$109.230 \text{ lt} * 0,83 \text{ kg/lt} * 43 \text{ TJ/Gg} * 1 \text{ Gg}/10^6 \text{ kg} = 3,8984 \text{ Tj}$$

$$3,8984 \text{ Tj} * 74100 \text{ kg/Tj} = 288.872,8 \text{ kg/ CO}_2$$

$$288.872,8 \text{ kg/ CO}_2 * 1 = 288.872,8 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$$

$$3,8984 \text{ Tj} * 3 \text{ kg/Tj} = 11,6952 \text{ kg CH}_4$$

$$11,6952 \text{ kg CH}_4 * 27,9 = 327,4671 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$$

$$3,8984 \text{ Tj} * 0,6 \text{ kg/Tj} = 2,3390 \text{ kg N}_2\text{O}$$

$$2,3390 \text{ kg N}_2\text{O} * 273 = 638,5609 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$$

$$288.872,8 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} + 327,4671 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} + 638,5609 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} = 289,838 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} \approx 290 \text{ ton CO}_2 \text{ eq}$$

Depolama sahasında 2023 yılında saha ara örtü, çakıl ve kapama işlemleri için çalışan hafriyat kamyonlarının harcamış olduğu yakıt miktarı 57.996 lt motorindir. 2022 yılında 22.158 lt, 2021 yılında 35.952 lt motorindir.

$$57.996 \text{ lt} * 0,83 \text{ kg/lt} * 43 \text{ TJ/Gg} * 1 \text{ Gg}/10^6 \text{ kg} = 2,0698 \text{ Tj}$$

$$2,0698 \text{ Tj} * 74100 \text{ kg/Tj} = 153.377,9 \text{ kg/ CO}_2$$

$$153.377,9 \text{ kg/ CO}_2 * 1 = 153.377,9 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$$

$$2,0698 \text{ Tj} * 3 \text{ kg/Tj} = 6,2096 \text{ kg CH}_4$$

$$6,2096 \text{ kg CH}_4 * 27,9 = 173,8696 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$$

$$2,0698 \text{ Tj} * 0,6 \text{ kg/Tj} = 1,2419 \text{ kg N}_2\text{O}$$

$$1,2419 \text{ kg N}_2\text{O} * 273 = 339,045 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$$

$$153.377,9 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} + 173,8696 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} + 339,045 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} = 153.890 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} \approx 154 \text{ ton CO}_2 \text{ eq}$$

Depolama sahasının örtü malzemesi olan çakılın kaynağından taşınması için 2023 yılında 9.618 lt, 2022 yılında 14.558 lt, 2021 yılında 10.102 lt motorin sarfiyatı olmuştur.

$$9.618 \text{ lt} * 0,83 \text{ kg/lt} * 43 \text{ TJ/Gg} * 1 \text{ Gg}/10^6 \text{ kg} = 0,3432 \text{ Tj}$$

$$0,3432 \text{ Tj} * 74100 \text{ kg/Tj} = 25.436,04 \text{ kg/ CO}_2$$

$$25.436,04 \text{ kg/ CO}_2 * 1 = 25.436,04 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$$

$$0,3432 \text{ Tj} * 3 \text{ kg/Tj} = 1,0297 \text{ kg CH}_4$$

$$1,0297 \text{ kg CH}_4 * 27,9 = 28,8343 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$$

$$0,3432 \text{ Tj} * 0,6 \text{ kg/Tj} = 0,2059 \text{ kg N}_2\text{O}$$

$$0,2059 \text{ kg N}_2\text{O} * 273 = 56,2270 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$$

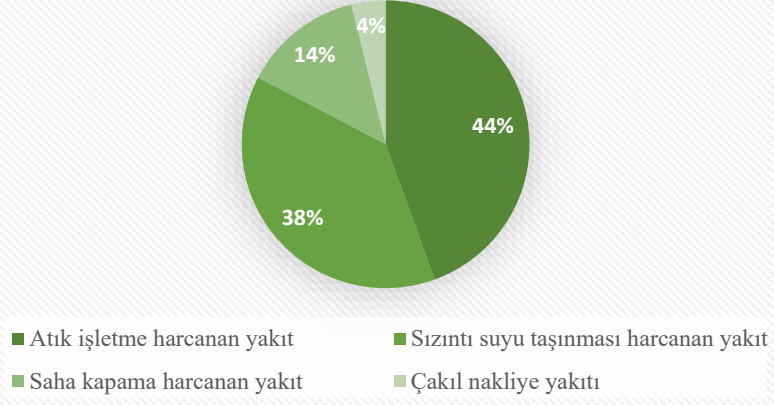
25.436,04 kg CO₂ eq + 28,8343 kg CO₂ eq + 56,2270 kg CO₂ eq = 25.521,1kg CO₂ eq ≈ 26 ton CO₂ eq

Depolama sahasının atık işletme yakıt sarfları, sahadan çekilen gaz miktarları, oluşan sızıntı suyunun taşınması için oluşan yakıt sarfiyatları, sahanın örtü kapama işlemleri için harcanan yakıt ve taşınan çakıl malzemesinin yakıt sarfları ile yapılan hesaplamalar sonucunda oluşan emisyon değerleri Tablo 6’da verilmiştir. Oluşan emisyon yüklerine bakılığında 2021 yılında oluşan emisyonun %44’ü atık işletme yakıtından, %38’i ise sızıntı suyunun taşınmasından oluşmaktadır (Şekil 10). 2022 yılında oluşan emisyonun %44’ü atık işletme yakıtından, %41’i ise sızıntı suyunun taşınmasından oluşmaktadır (Şekil 11). 2023 yılında ise emisyonun %39’luk bir dilim sızıntı suyu taşınımına ait olmak ile birlikte %37’si de atık işletmeden gelmektedir (Şekil 12).

Tablo 7. Depolama sahasının emisyon değerleri

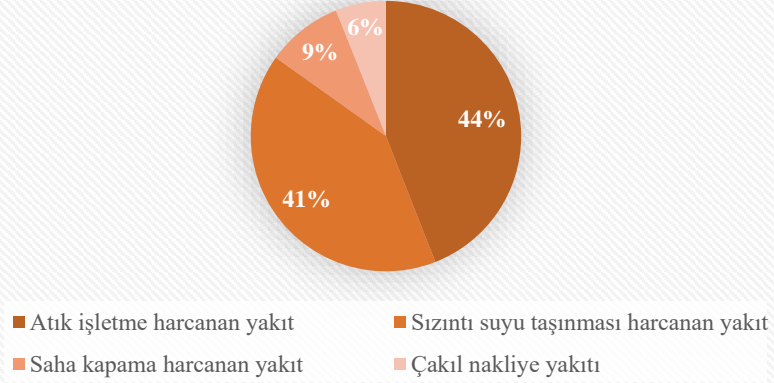
Kaynaklar	Birimler	2021	2022	2023
Atık işletme harcanan yakıt	ton CO ₂ eq	313	285	281
Sahadan çekilen gaz miktarı	ton CO ₂ eq	-94.257	-57.773	-60.526
Sızıntı suyu taşınması harcanan yakıt	ton CO ₂ eq	269	264	290
Saha kapama harcanan yakıt	ton CO ₂ eq	95	59	154
Çakıl nakliye yakıtı	ton CO ₂ eq	27	39	26
TOPLAM	ton CO₂ eq	-93.552	-57.773	-59.776

2021 Yılı Emisyon Kaynakları Dağılımı



Şekil 10. 2021 yılı depolama sahası emisyon kaynakları dağılımı

2022 Yılı Emisyon Kaynakları Dağılımı



Şekil 11. 2022 yılı depolama sahası emisyon kaynakları dağılımı



Şekil 12. 2023 yılı depolama sahası emisyon kaynakları dağılımı

Depolama sahasının incelenen 3 yılda da emisyon yükünün büyük bir çoğunluğunun atık işletme yakıt harcamaları ve sızıntı suyu taşınmasından oluştuğu görülmektedir.

4.2 Biyometanizasyon Tesisi Karbon Ayak İzi Hesabı

Biyometanizasyon tesisinde 2023 yılı içerisinde jeneratörlerin harcamış olduğu yakıt miktarı 491 lt motorin, 2022 yılı içerisinde yakıt sarfiyatı olmamıştır, 2021 yılında ise 739 lt motorin sarfiyatı olmuştur.

$$491 \text{ lt} * 0,83 \text{ kg/lt} * 43 \text{ TJ/Gg} * 1 \text{ Gg}/10^6 \text{ kg} = 0,0175 \text{ Tj}$$

$$0,0175 \text{ Tj} * 74100 \text{ kg/Tj} = 1298,5 \text{ kg/ CO}_2$$

$$1298,5 \text{ kg/ CO}_2 * 1 = 1298,5 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$$

$$0,0175 \text{ Tj} * 3 \text{ kg/Tj} = 0,0525 \text{ kg CH}_4$$

$$0,0525 \text{ kg CH}_4 * 27,9 = 1,4719 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$$

$$0,0175 \text{ Tj} * 0,6 \text{ kg/Tj} = 0,0105 \text{ kg N}_2\text{O}$$

$$0,0683 \text{ kg N}_2\text{O} * 273 = 2,8703 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$$

$$1298,5 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} + 1,4719 \text{ CO}_2 \text{ eq} + 2,8703 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} = 1302,86 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} \approx 1 \text{ ton CO}_2 \text{ eq}$$

Biyometanizasyon tesisinde 2023 yılı içerisinde bakım sebebiyle elektrik üretimi olmamıştır, 2022 yılında 165.940 kWh elektrik, 2021 yılında 193.880 kWh elektrik üretimi olmuştur.

2023; 0 tonCO₂e

2022 : 165.940 kgCO₂e * 0.000479 kgCO₂e/kWh = 79,48 tonCO₂e

2021 : 92,86 tonCO₂e

Biyometanizasyon tesisine ait tüketim verileri sonucu hesaplanan emisyon değerleri Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 8. Biyometanizasyon Tesisi emisyon değerleri

Kaynaklar	Birimler	2021	2022	2023
Jeneratör Yakıt	ton CO₂ eq	2	0	1
Elektrik Üretim	ton CO₂ eq	-93	-80	0
TOPLAM	ton CO₂ eq	-91	-80	1

4.3 Sera Tesisi Karbon Ayak İzi Hesabı

Sera Çiçek Üretim Tesisinde 2023 yılı içerisinde tüketilen elektrik miktarı 7.178,900 kWh, 2022 yılında 13.204,550 kWh, 2021 yılında ise 10.352,87 kWh’tır.

2023; 7.178,900 kWh * 0.000479 ton CO₂e/kWh = 3,43 tonCO₂e

2022 : 6,3249 ton CO₂e

2021 : 4,9590 ton CO₂e

Sera Çiçek Üretim Tesisinde 2023 yılı içerisinde 1.341.744 adet, 2022 yılında 1.393.015 adet çiçek üretilmiştir. 2021 yılı içerisinde tesis devreye alındığından üretim olmamıştır.

Sera elektrik motorların atık ısıları ile ısıtıldığından, atık ısı değerlendirilmiştir.

4.4 Çamur Kurutma Tesisı Karbon Ayak İzi Hesabı

Çamur Kurutma Tesisinde 2023 yılı içerisinde tüketilen elektrik miktarı 24.858,120 kWh, 2022 yılında 1.102.794,480 kWh, 2021 yılında 1.163.262,84 kWh'tır.

2023; $24.858,120 \text{ kWh} * 0.479 \text{ tonCO}_2\text{e/MWh} * 10^{-3} = 11,91 \text{ tonCO}_2\text{e}$

2022 : 528,24 tonCO₂e

2021 : 557,20 tonCO₂e

Çamur Kurutma Tesisinde 2023 yılında 10.882.510 kg, 2022 yılında 14.154.930 kg, 2021 yılında 20.071.220 kg kentsel atıksu arıtma çamuru kurutulurak %90 nem giderimi sağlanmıştır. Böylelikle atık hacmi azaltılmış hatta kurutulan çamurlar biyokömür haline getirilmiştir.

Çamur kurutma tesisi elektrik motorlarının atık ısıları ile çalıştırılarak atık ısının faydalı kullanımı sağlanmıştır.

4.5 Genel Yönetim Binası Karbon Ayak İzi

Genel yönetim binası Çamur Kurutma ve Sera Tesislerinde olduğu gibi atık ısı ile ısınmaktadır. Bu sebeple binanın oluşturmuş olduğu emisyonlar elektrik ve su tüketimi kaynaklıdır.

Tablo 9. Genel Yönetim Binasına ait tüketim verileri

Kaynaklar	Birimler	2021	2022	2023
Su Tüketim	m ³	387,9	316,2	102,3
Elektrik Tüketim	kWh	1420	1520	1680

Genel yönetim binasının 2023 yılında su tüketimi 102,3 m³, 2022 yılında 316,2 m³, 2021 yılında 387,9 m³'tür. (Tablo 8)

2023; $102,3 \text{ m}^3 * 1000 \text{ L/ m}^3 * 0,0014 \text{ kg CO}_2\text{eq/L} * 10^{-3} \text{ kg/ton} = 0,1432 \text{ ton CO}_2\text{/yıl}$

2022; 0,4426 ton CO₂/yıl

2021; 0,5430 ton CO₂/yıl

Genel yönetim binasının 2023 yılında elektrik tüketimi 1680 kWh, 2022 yılında 1520 kWh , 2021 yılında ise 1420kWh'tır. (Tablo 8)

2023; $1680 \text{ kWh} * 0.479 \text{ kgCO}_2\text{e/MWh} * 10^{-3} = 0,80 \text{ tonCO}_2\text{e}$

2022 : 0,72 tonCO₂e

2021 : 0,68 tonCO₂e

Genel yönetim binasının elektrik ve su tüketim verilerine göre oluşan emisyon değerleri Tablo 9'da belirtilmiştir.

Tablo 10. Genel yönetim binası emisyon değerleri

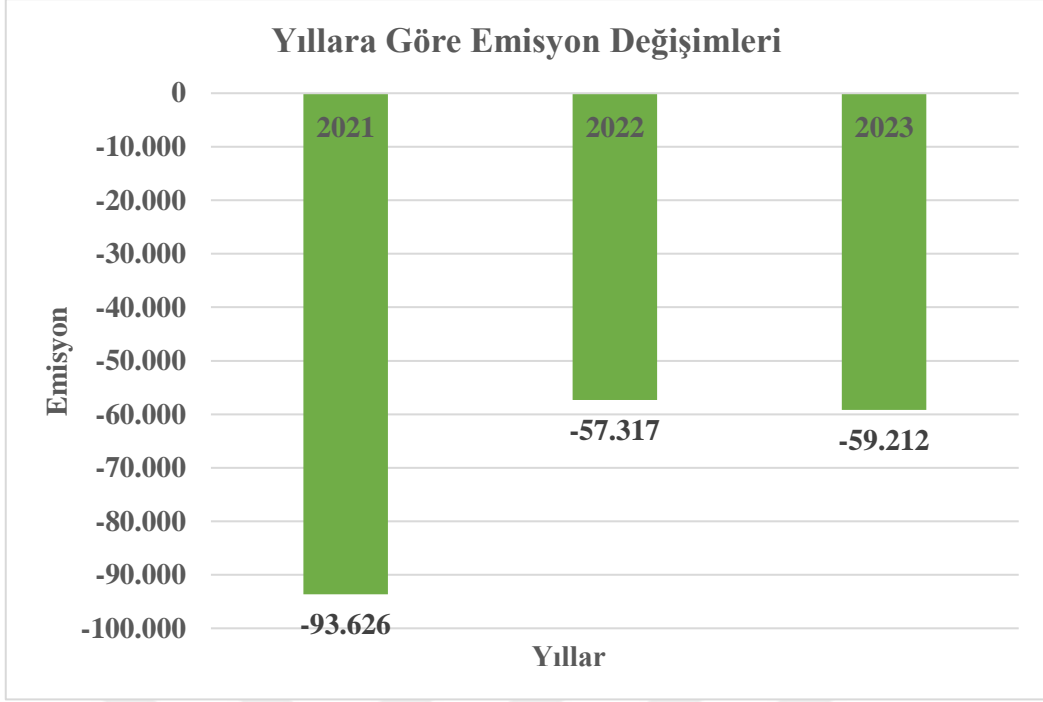
Kaynaklar	Birimler	2021	2022	2023
Su Tüketim	ton CO₂ eq	0,543	0,442	0,143
Elektrik Tüketim	ton CO₂ eq	0,68	0,72	0,80
TOPLAM	ton CO₂ eq	1,223	1.16	0,943

Tesislerin tüketim ve üretim verileri dikkate alınarak yapılan hesaplar sonucunda 2021, 2022 ve 2023 yıllarına ait emisyonların CO₂ eşdeğer miktarları bulunmuştur. (Tablo 10)

Tablo 11. Firma emisyon değerleri

Kaynaklar	Birimler	2021	2022	2023
Depolama Sahası	ton CO₂ eq	-93.552	-57.773	-59.776
Biyometanizasyon Tesisi	ton CO₂ eq	-91	-80	1
Sera Tesisi	ton CO₂ eq	3,430	6,325	4,953
Çamur Kurutma Tesisi	ton CO₂ eq	11,910	528,400	557,200
Genel Yönetim	ton CO₂ eq	1,223	1,160	0,943
TOPLAM	ton CO₂ eq	-93.626	-57.317	-59.212

Yıllara göre oluşan ve kazanılan emisyon değerlerine bakıldığında (Şekil 13) 2021 yılı ile 2022 yılı arasında büyük bir kazanım farkı oluğu görölmektedir fakat 2023 yılında tekrardan kazanım arttırılmıştır.



Şekil 13. Yıllara göre firma emisyon değerleri

Merzifon belediyesinin yayınlamış olduğu 2021 Karbon Ayak İzi raporuna göre, Merzifon sınırları içerisinde bir düzenli depolama tesisi bulunmamaktadır. Oluşan katı atıkların %25'i vahşi depolamaya gönderilmekte ve kalan %75'i ise düzenli depolama için Amasya'ya gönderilmektedir. 2021 yılında Merzifon ilçesinde atık kaynaklı atmosfere salınan sera gazı miktarı 19.125,140 ton CO₂ eş değeridir. [56]

Kırbaş ve Kocakulak tarafından yapılan araştırmada Burdur ilinin tüm ilçelerinin 2020 yılına ait karbon ayak izi hesaplanmıştır. Araştırma içerisinde kapsam 3'te çöp işletme tesislerinin meydana getirdiği emisyon miktarı hesaplanmıştır. Burdur İli Merkez İlçesinde bulunan depolama sahasına yalnızca Merkez ilçeden atık kabulü yapılmaktadır ve yıllık ortalama 51.392 ton atık gelmektedir. Bu veriler doğrultusunda düzenli depolama sahasının oluşturmuş olduğu emisyon miktarı ise 9760 ton CO₂ eş değeridir. [57]

Bu çalışma sonucunda Samsun ilinin 2023 yılı içerisinde sahaya kabul edilen 290.087 ton atık karşılığında 751 ton CO₂ eş değeri emisyon oluşmuştur. Merzifon ilçesi ve Burdur ilinde yapılan çalışmalar ile kıyaslandığında Samsun'un katı atık düzenli depolama işlemi esnasında oluşan emisyonları daha düşük olduğu görülmüştür.

Günden güne artan nüfus, sanayileşme ve modern tüketimlerler sebebiyle fosil yakıtların kullanımı artmaktadır. Bu artış atmosfere daha fazla sera gazı salınımına sebep olmaktadır. Sera gazları oluşturduğu tabaka ile güneş ışınların yansımalarını engelleyerek küresel ısınma ve iklim değişikliğine yol açmaktadır. En önemli sera gazı olan CO₂, fosil yakıtlarının oluşturduğu en büyük emisyon faktörüdür.

Hızlı tüketim, geri dönüşüme olan ilgisizlik, kaynak erişim kolaylığı ve her gün gelişen ürünler sebebiyle kişi başı oluşturulan atık miktarları artış göstermektedir. Bu sebeple atık depolanması için ihtiyaç duyulan alan, geri dönüşüm ve bertaraf tesisleri ihtiyacını artırmaktadır. Bu tesisler atığın ortadan kaldırılmasının yanı sıra faydalı bir ürüne dönüşmesi için prosesler geliştirmektedirler. Atıkları enerjiye, ürüne veya hammaddeye çevirerek yeniden kullanımlarını sağlamaktadırlar.

Bu çalışmada Samsun ilinde bulunan katı atık düzenli depolama tesisi işletmesini gerçekleştiren Samsun Avdan Enerji'den alınan veriler kullanılarak 2021, 2022 ve 2023 yıllarına ait emisyonlar IPCC Tier 1 metodu ile hesaplanmıştır.

2021 yılında atık bertaraf ve elektrik üretimi faaliyetlerini gerçekleştirirken 266.317 lt yakıt sarfiyatı yapılmıştır, depolama sahasından 26.321.317 m³ gaz çekilmiş, 1.175.035 kWh genel elektrik tüketimi, 388 m³ su tüketimi ve biyometanizasyon tesisinde 193.880 kWh elektrik üretimi olmuştur. Tüm bu değerler doğrultusunda IPCC emisyon faktörleri kullanılarak yapılan hesap sonucu -93.626 ton CO₂ eq bulunmuştur.

2022 yılında atık bertaraf ve elektrik üretimi faaliyetlerini gerçekleştirirken 243.300 lt yakıt sarfiyatı yapılmıştır, depolama sahasından 16.133.130 m³ gaz çekilmiş, 1.104.315 kWh genel elektrik tüketimi, 316 m³ su tüketimi ve biyometanizasyon tesisinde 165.940 kwh elektrik üretimi olmuştur. Tüm bu değerler doğrultusunda IPCC emisyon faktörleri kullanılarak yapılan hesap sonucu -57.317 ton CO₂ eq bulunmuştur.

2023 yılında atık bertaraf ve elektrik üretimi faaliyetlerini gerçekleştirirken 283.048 lt yakıt sarfiyatı yapılmıştır, depolama sahasından 16.901.798 m³ gaz çekilmiş,

33.717 kWh genel elektrik tüketimi, 102 m³ su tüketimi olmuştur. Tüm bu değerler doğrultusunda IPCC emisyon katsayıları kullanılarak yapılan hesap sonucu -59.211 ton CO₂ eq bulunmuştur.

Bulunan değerler sonucunda firmanın 2021, 2022 ve 2023 yıllarında atık bertarafı ve elektrik üretimi yaparak kazandırdığı emisyon oluşturduğu emisyonlardan daha fazla çıkmıştır.

Oluşan emisyon değerlerine bakıldığında yakıt sarfiyatının en büyük paya sahip olduğu görülmektedir. Bu sebeple oluşan sızıntı sularının taşınması yerine bir sızıntı suyu arıtma tesisi kurulması bu yakıt sarfiyatının önüne geçecektir. Bir diğer öneri olarak ise şebeke besleme hattının tesis konumuna kadar uzatılması taşınım yapmadan doğrudan deşarjı sağlayacaktır.

- [1] J. Rockström et al., “A safe operating space for humanity,” *Nature*, vol. 461, pp. 472-475, 2009.
- [2] J. C. M. Pires, “Negative emissions technologies: A complementary solution for climate change mitigation,” *Science of the Total Environment*, vol. 672, pp. 502-514, 2019.
- [3] T. P. Dawson, S. T. Jackson, J. I. House, I. C. Prentice, G. M. Mace, 2011. “Beyond predictions: biodiversity conservation in a changing climate,” *Science*, vol. 332, pp. 53–58, 2011.
- [4] M. R. Allen, D. J. Frame, C. Huntingford, C. D. Jones, J. A. Lowe, M. Meinshausen and N. Meinshausen, “Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne,” *Nature*, vol. 458, pp. 1163-1166, 2009.
- [5] T. G. Moore, “Global warming,” *EMBO reports*, vol.9, pp. 41-45, 2008.
- [6] United Nations, “What Is Climate Change?,” United Nations, 2024. <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change> (accessed Jan. 02, 2024).
- [7] A. Kerem, “Investigation of carbon footprint effect of renewable power plants regarding energy production: A case study of a city in Turkey,” *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 72, pp. 294-307, 2022.
- [8] H. Lee, J. Romero and the core writing team, “Climate change 2023 synthesis report summary for policymakers,” 2023.
- [9] N. Mhatre and K. Muley, “Greenhouse Gases and Their Impact on Global Warming,” *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management (IJSREM)*, vol.06, 2022.
- [10] World Health Organization, “Air Pollution,” World Health Organization, 2023. https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1 (accessed Dec. 15, 2023).
- [11] F. Babarinde and M. A. Adio, “A Review of Carbon Capture and Sequestration Technology,” vol. 2, 2020.
- [12] 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. Working Group III (Mitigation),” *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, vol. 26, pp. 11-32, 2008.
- [13] Saban, S. “Atık Kâğıt Geri Dönüşüm Tesisi Karbon Ayak İzinin Değerlendirmesi,” *Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum*, 2023.
- [14] Karakaş, A., “İklim Değişikliğinde Atıksu Arıtma Tesislerinin Etkisi: İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisinde Karbon Ayak İzi,” *Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum*, 2021.

- [15] Z. Eslamidoost, M. Arabzadeh, V. Oskoie and S. Dehghani, "Carbon footprint calculation in one of the largest Gas Refinery Companies in the Middle East," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, pp. 81609-81623, 2022.
- [16] J. Kiehle, M. Kopsakangas-Savolainen, M. Hilli and E. Pongrácz, "Carbon footprint at institutions of higher education: The case of the University of Oulu," *Journal of Environmental Management*, vol. 329, pp. 117056, 2023.
- [17] N. Cano, L. Berrio, E. Carvajal and S. Arango, "Assessing the carbon footprint of a Colombian University Campus using the UNE-ISO 14064-1 and WRI/WBCSD GHG Protocol Corporate Standard," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 30, pp. 3980-3996, 2023.
- [18] United Nations, "Causes and effects of climate change," United Nations, 2023. <https://www.un.org/en/climatechange/science/causes-effects-climate-change> (accessed Jan. 02, 2024).
- [19] R. Lindsey and L. Dahlman, "Climate Change: Global Temperature | NOAA Climate.gov," www.climate.gov, Jan. 18, 2024. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature#:~:text=Highlights> (accessed Feb. 04, 2024).
- [20] J. B. R. Matthews et al., "Annex VII: Glossary "Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," IPCC / Cambridge University Press. pp. 2215–2256, 2011.
- [21] J. S. Levine, "The Early Atmosphere: A New Picture," *Classroom Projects and Curriculum Ideas*, vol. 23, pp. 6-16, 1986.
- [22] R. Cassia, M. Nocioni, N. Correa-Aragunde and L. Lamattina, "Climate Change and the Impact of Greenhouse Gasses: CO₂ and NO, Friends and Foes of Plant Oxidative Stress," *Frontiers in Plant Science*, vol. 9, pp. 273, 2018.
- [23] J. T. Kiehl and K. E. Trenberth, "Earth's annual global mean energy budget," *Bulletin American Meteorological Society*, vol. 78, pp. 197–208, 1997.
- [24] I. M. Held and B. J. Soden, "Water Vapor Feedback and Global Warming," *Annual Review of Energy and the Environment*, vol. 25, pp. 441-475, 2000.
- [25] J. B. Soden, D. L. Jackson, V. Ramaswamy, M. D. Schwarzkopf and X. Huang, "The Radiative Signature of Upper Tropospheric Moistening," *Science*, vol. 310, pp. 841-844, 2005.
- [26] W. Junkermann and J. Hacker, "Unprecedented levels of ultrafine particles, major sources, and the hydrological cycle," *Scientific report*, vol. 12, pp. 7410, 2022.
- [27] M. Mohan, O. N. Demerdash, B. A. Simmons, S. Singh, M. K. Kidder and J. C. Smith, "Physics-Based Machine Learning Models Predict Carbon Dioxide Solubility in Chemically Reactive Deep Eutectic Solvents," *ACS Omega*, vol. 9, pp. 19548-19559, 2024.
- [28] P. Cianconi, S. Betrò and L. Janiri, "The impact of climate change on mental health: a systematic descriptive review," *Frontiers in Psychiatry*, vol. 11, pp. 74, 2020.

- [29] G. A. Schmidt, R. A. Ruedy, R. L. Miller and A. A. Lacis, “Attribution of the present-day total greenhouse effect,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 115, pp. 2010JD014287, 2010.
- [30] M. A. Al-Sharoot, “Freon’s Destroy the Stratosphere,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1223, pp. 012001, 2023.
- [31] United States Environmental Protection Agency, “Overview of Greenhouse Gases,” US EPA, Apr. 11, 2024. <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>
- [32] R. Mittler and E. Blumwald, “Genetic engineering for modern agriculture: challenges and perspectives,” *Annu. Rev. Plant Biol.*, vol. 61, pp. 443–462, 2010.
- [33] Super User, “Monthly CO₂,” CO₂.Earth, Jan. 08, 2020. <https://www.co2.earth/monthly-co2> (accessed Jun. 17, 2024).
- [34] L. V. David, “Emerging Topics in Marine Methane Biogeochemistry,” *Annual Review of Marine Science*, vol. 3, pp. 147-171, 2011.
- [35] H. Yong, G. Allen, J. Mcquilkin, H. Ricketts and J. T. Shaw, “Lessons learned from a UAV survey and methane emissions calculation at a UK landfill,” *Waste management*, vol. 180, pp. 47-54, 2024.
- [36] M. Gillenwater, “Greenhouse Gases And Global Warming Potential Values,” U.S. Environmental Protection Agency, Office of Atmospheric Programs, EPA 430-R-02-003, 2002, pp. 3-17.
- [37] M. Lennan, E. Morgera, “The Glasgow climate conference (COP26),” *The International Journal of Marine and Coastal Law*, vol. 37, pp. 137-151, 2022.
- [38] S. I. Awala, J. H. Gwak, Y. Kim, M. Y. Jung, P. F. Dunfield, M. Wagner and S. K. Rhee, “Nitrous oxide respiration in acidophilic methanotrophs,” *nature communications*, vol. 15, pp. 4226, 2024.
- [39] Myron B. Thompson Academy, “Climate and Water Resource Case Study Chapter 2 - C3. Greenhouse Gases: Nitrous Oxide (N₂O),” Hawaii.edu, 2021. https://www.soest.hawaii.edu/mguidry/Unnamed_Site_2/Chapter%202/Chapter2C3.html (accessed Jun. 19, 2024).
- [40] A. Govednik, K. Eler, R. Mihelič and M. Suhadolc, “Mineral and organic fertilisation influence ammonia oxidisers and denitrifiers and nitrous oxide emissions in a long-term tillage experiment,” *Science of The Total Environment*, vol. 928, pp. 172054, 2024.
- [41] E. L. McAdam, T. J. Brodribb and S. A. M. McAdam, “Does ozone increase ABA levels by non-enzymatic synthesis causing stomata to close?,” *Plant, Cell & Environment*, vol. 40, pp. 741-747, 2017.
- [42] O. US EPA, “Overview of Greenhouse Gases,” [www.epa.gov](https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases#:~:text=In%20general%2C%20fluorinated%20gases%20are), Dec. 23, 2015. <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases#:~:text=In%20general%2C%20fluorinated%20gases%20are> (accessed Feb. 18, 2024).
- [43] K. Mulvaney, “What is a carbon footprint and how to measure yours,” *National Geographic*, Jun. 24, 2022.

- <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/what-is-a-carbon-footprint-how-to-measure-yours> (accessed Feb. 10, 2024).
- [44] Iberdrola, “What is the carbon footprint and why will reducing it help to combat climate change?,” Iberdrola. <https://www.iberdrola.com/sustainability/carbon-footprint> (accessed Feb. 10, 2024).
- [45] TÜİK, “Sera Gazı Emisyon İstatistikleri, 1990-2020,” data.tuik.gov.tr, Mar. 30, 2022. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-İstatistikleri-1990-2020-45862> (accessed Mar. 13, 2024).
- [46] United Nations, “UNFCCC,” Unfccc.int, 2023. <https://unfccc.int/> (accessed Feb. 04, 2024).
- [47] İklim Değişikliği Bakanlığı, “Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi,” iklim.gov.tr, 2022. <https://iklim.gov.tr/bm-iklim-degisikligi-cerceve-sozlesmesi-i-33> (accessed Feb. 20, 2024).
- [48] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi,” enerji.gov.tr, 2022. <https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-bm-iklim-degisikligi-cerceve-sozlesmesi> (accessed Feb. 20, 2024).
- [49] United Nations, “What is the Kyoto Protocol?,” Unfccc.int, 2024. https://unfccc.int/kyoto_protocol?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwx-CyBhAqEiwAeOcTdQxYNGxFrs5d_c3KaxrzajMPe18EOC-QTMjdsmuSATnTbgq2OK5ccBoCnWkQAvD_BwE (accessed Mar. 24, 2024).
- [50] O. Bekiroğlu, “Sürdürülebilir Kalkınmanın Yeni Kuralı: Karbon Ayak İzi,” II. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi, 24-27.11.2011.
- [51] T.C. Dışişleri Bakanlığı, “Paris Anlaşması / T.C. Dışişleri Bakanlığı,” Mfa.gov.tr, 2020. <https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa#:~:text=Anla%C5%9Fma%2C%20insan%20kaynakl%C4%B1%20sera%20gaz%C4%B1> (accessed Jan. 10, 2024).
- [52] A. Garg, K. Kazunari and T. Pulles, “2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories” Intergovernmental Panel on Climate Change, vol. 2, 2006.
- [53] Repsol, <https://www.repsol.com/en/sustainability/sustainability-pillars/climate-change/reducing-carbon-footprint/index.cshtml>, 10.02.2024.
- [54] United Nations Carbon offset platform, <https://offset.climateneutralnow.org/howtooffset>, 10.02.2024.
- [55] Circularise, <https://www.circularise.com/blogs/scope-1-2-3-emissions-explained>, 12.06.2024.
- [56] E. Özil, Merzifon Belediyesi Karbon Ayak İzi Raporu, T.C. Merzifon Belediyesi, pp 16-18, 2021.
- [57] İ. Kırbaş, T. Kocakulak, “Burdur İli Karbon Ayak İzinin Belirlenmesi,” Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 2022.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. S. Sayın and S. L. Kuzu, “Carbon Footprint Calculation in an Integrated Solid Waste Storage Facility”, 3rd International Graduate Research Symposium (IGRS’24), 2024, [Online]. Available: <https://igrs.itu.edu.tr/>

