KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NİŞASTA SEKTÖRÜNDE DOĞRUDAN SERA GAZI EMİSYONLARININ BELİRLENMESİ VE AZALTILMASI İÇİN GELİŞTİRİLEN YÖNTEMLER

AYŞENUR FARIMAZ

KOCAELİ 2026

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NİŞASTA SEKTÖRÜNDE DOĞRUDAN SERA GAZI EMİSYONLARININ BELİRLENMESİ VE AZALTILMASI İÇİN GELİŞTİRİLEN YÖNTEMLER

AYŞENUR FARIMAZ

Prof. Dr. Sevil VELİ
Danışman, Kocaeli Üniversitesi .....
Doç. Dr. Şenay ÇETİN DOĞRUPARMAK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi .....
Doç. Dr. Mahnaz GÜMRÜKÇÜOĞLU YİĞİT
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 19.01.2026

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmasında,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

[X] Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

[ ] Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler ..... tarafından ..... no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

…….

Ayşenur FARIMAZ

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki makale, kitap, tebliğ, lisans, patent gibi çalışmalarda kullanımı, danışmanımın isim hakkı saklı kalmak koşuluyla ve her iki tarafın bilgisi dâhilinde bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan ***"Lisanüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge"*** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

……..

Ayşenur FARIMAZ

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Sanayi sektörü, enerji tüketimi ve üretim süreçleri nedeniyle sera gazı emisyonlarının önemli kaynaklarından biridir. Türkiye'de mısırın işlenmesiyle elde edilen mısır nişastası ve nişasta bazlı şekerler, farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılan önemli sanayi ara ürünleri arasında yer almaktadır. Söz konusu üretim süreçlerinde bazı aşamalarda yüksek miktarda ısı enerjisine ihtiyaç duyulmakta olup, bu enerji genellikle doğalgaz ve kömür yakıtlı kazanlar aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu durum, üretim süreçlerinde doğrudan sera gazı emisyonlarının oluşmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada, nişasta endüstrisinde faaliyet gösteren bir firmanın sera gazı emisyonlarının belirlenmesi ve azaltılmasına yönelik yöntemlerin ortaya konulması amaçlanmaktadır. Çalışmada 2024 yılı temel yıl olarak kabul edilmiştir. Öncelikle firmaya saha ziyareti gerçekleştirilerek emisyona sebep olabilecek kaynaklar belirlenmiş, ardından hesaplamalar için gerekli bilgi, belge ve veriler incelenmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda hesaplamalar, ISO 14064-1 standardı kapsamında gerçekleştirilmiş ve firmanın toplam doğrudan sera gazı emisyon miktarı karbondioksit eşdeğeri (CO_2e) cinsinden ifade edilmiştir.

İlk olarak çalışmama yön veren ve bu yolda desteğini hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Sevil VELİ ve Doç. Dr. Şenay Çetin DOĞRUPARMAK'a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen eşim Muhammet FARIMAZ'a, her zaman arkamda olduğunu hissettiğim, annem Münevver GEÇİLİ'ye babam Ali Mehmet GEÇİLİ'ye ve ağabeyim Musa GEÇİLİ'ye sonsuz teşekkür ediyorum.

Son olarak yüksek lisans çalışmalarımda desteğini sunan Karbon Yönetimi Direktörü Birol ASLAN'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Ocak-2026 Ayşenur FARIMAZ

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ 2
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
ŞEKİLLER DİZİNİ vi
TABLOLAR DİZİNİ vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ viii
ÖZET x
ABSTRACT xi
1. GİRİŞ 1
1.1. Tezin Amacı ve Önemi 2
2. NİŞASTA SEKTÖRÜNDE DOĞRUDAN SERA GAZI EMİSYONLARININ BELİRLENMESİ VE AZALTILMASI 5
2.1. Nişasta Sektörüne Genel Bakış 5
2.1.1. Küresel ve Türkiye'deki Nişasta Endüstrisi 6
2.1.2. Nişasta Üretim Süreci 8
2.2. Sera Gazı Emisyonları 9
2.2.1. Sera Gazı Emisyonlarının Kaynak ve Etkileri 11
2.2.2. Sera Gazları ve İklim Değişikliği 13
2.2.3. Endüstriyel Kaynaklı Doğrudan Emisyonlar 15
2.2.4. Nişasta Sektöründe Başlıca Emisyon Kaynakları 17
2.3. Emisyonların Belirlenmesi 19
2.3.1. Emisyon Envanteri Oluşturma Yöntemleri 21
2.3.2. IPCC Kılavuzları ve Hesaplama Yöntemleri 22
2.3.3. Ölçüm Teknolojileri ve Veri Toplama 24
2.4. Emisyon Azaltımı İçin Geliştirilen Yöntemler 26
2.4.1. Enerji Verimliliği Uygulamaları 28
2.4.2. Yakıt Dönüşümleri ve Temiz Enerji Kullanımı 30
2.4.3. Karbon Yakalama ve Depolama (CCS) 31
2.4.4. Süreç İyileştirmeleri ve Modernizasyon 33
2.4.5. Atık Yönetimi ve Biyogaz Sistemleri 35
2.4.6. ISO 14064-1 Standardı Kapsamında Nişasta Sektöründe Emisyon Hesaplama Yaklaşımı 36
2.5. Mevzuat, Politikalar ve Teşvikler 38
2.5.1. Türkiye'deki Yasal Düzenlemeler 40
2.5.2. AB Yeşil Mutabakatı ve Etkileri 41
2.6. Ekonomik ve Çevresel Etkiler 43
2.6.1. Maliyet–Fayda Analizi 44
2.6.2. Emisyon Azaltımının Çevresel Kazanımları 46
2.6.3. Sektörel Rekabetçilik ve Sürdürülebilirlik 47
3. YÖNTEM 50
3.1. Seçilen bir Nişasta Fabrikasında Proses İncelemesi 50
3.1.1. Mısır Nişastası ve Nişasta Bazlı Şeker Üretimi Faaliyeti 50
3.1.2. Milhouse Ünitesi Nişasta Üretim Prosesi 51
3.1.2.1. Masarasyon 52
3.1.2.2. Kırma 52

3.1.2.3. Ayırma 53
3.1.3. Rafineri Ünitesi, Fruktoz, Glikoz ve İnvert Şeker Üretimi 54
3.1.3.1. Nişasta Sütünün Glikoz ve İzoglikoz Şurubuna Dönüştürülmesi..... 54
3.2. Seçilen bir Nişasta fabrikasında Doğrudan Sera gazı Emisyonlarının Hesabı 55
3.2.1. Hesaplama Yaklaşımı ve Kapsam 55
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 66
4.1 Doğalgaz Emisyon Hesaplamaları 66
4.2. Kömür Emisyon Hesaplamaları 67
4.3. Jeneratör Emisyon Hesaplamaları 67
4.4. LPG Tüpleri için Emisyon Hesaplama 68
4.5. Mobil Yanma Emisyonlarından Kepçe için Emisyon Hesabı 68
4.6. Mobil Yanma Emisyonlarından Forklift için Emisyon Hesabı 68
4.7. Mobil Yanma Emisyonlarından Araç Emisyonlarının Emisyon Hesabı 68
4.8. Doğrudan Sızma Kaçaklardan Kaynaklanan Emisyonlar 69
4.8.1. Klima Kaçakları İçin Emisyon Hesaplamaları 69
4.8.2. Chiller Kaçakları İçin Emisyon Hesaplamaları 69
4.8.3. Buzdolabı Kaçakları İçin Emisyon Hesaplamaları 69
4.8.4. Kompresör Kaçakları İçin Emisyon Hesaplamaları 69
4.8.5. CO_2 Yangın Tüpleri için Kaçak Emisyon Hesaplamaları 71
4.8.6. Doğrudan Sera Gazı Emisyon Sonuçları 71
4.9. Doğrudan Sera Gazı Emisyonları Azaltımı için Geliştirilmiş Yöntemler 75
5. SONUÇLAR 84
KAYNAKLAR 87
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 99
ÖZGEÇMİŞ 100

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. ISO 14064-1 Standardına Göre Sera Gazı Emisyon Kaynakları 12
Şekil 2.2. ISO 14064-1 Standardına Göre Sera Gazı Emisyonlarının Belirlenmesi 39
Şekil 3.1. Millhouse Ünitesi İş Akım Şeması 51
Şekil 3.2. ISO 14064-1 Standardına Göre Sera Gazı Emisyon Kategorileri 56
Şekil 3.3. 1990-2022 yılları arasındaki LULUCF sektöründeki net uzaklaştırma eğilimleri 59
Şekil 3.4. ISO 14064-1 Standartına Göre Hesaplama Metodolojileri 60
Şekil 4.1. Sera Gazı Miktarları Yüzdelik Gösterim 73
Şekil 4.2. Sera Gazı Miktarları Yüzdelik Gösterim 73
Şekil 4.3. Sera Gazı Miktarları Yüzdelik Gösterim 74
Şekil 4.4. CCUS Sürecinin Adımları 76
Şekil 4.5. Yanma Sonrası Karbon Yakalama Diyagramı 78
Şekil 4.6. Oksi-yakıt Yakalama Yöntemi 78
Şekil 4.7. CO_2 Taşıma 79
Şekil 4.8. CO_2 Kullanım Alanları 80

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Kapsam emisyon kaynağı 61
Tablo 3.2. Faaliyet verileri 61
Tablo 3.3. Küresel ısınma potansiyelleri (Kip) 62
Tablo 3.4. Kapsam 1 emisyon faktörleri(EF) 62
Tablo 3.5. Doğalgaz emisyon hesaplama değerleri 63
Tablo 3.6. Kömür emisyon hesaplama değerleri 63
Tablo 3.7. Nkd motorin değerleri 63
Tablo 3.8. Jeneratör bilgileri 63
Tablo 3.9. Lpg için NKD değerleri 64
Tablo 3.10. Motorin için NKD ve yoğunluk değerleri 64
Tablo 3.11. Motorin için NKD ve yoğunluk değerleri 64
Tablo 3.12. Motorin için NKD ve yoğunluk değerleri 64
Tablo 3.13. Benzin için NKD ve yoğunluk değerleri 65
Tablo 4.1. Gaz için NKD ve yoğunluk değerleri 69
Tablo 4.2. Chiller kaçakları için NKD ve yoğunluk değerleri 69
Tablo 4.3. Buzdolabı kaçakları için NKD ve yoğunluk değerleri 70
Tablo 4.4. Kompresör kaçakları için NKD ve yoğunluk değerleri 70
Tablo 4.5. Yangın tüpleri kaçakları için NKD ve yoğunluk değerleri 71
Tablo 4.6. Kaçaklardan kaynaklanan emiyon miktarları 71
Tablo 4.7. Toplam sera gazı emisyon miktarları 72
Tablo 4.8. Sera gazı emisyonu azaltmak için kullanılabilecek yöntemler 75

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

e : Eşdeğer
Gg : Gigagram
h : Hour, (saat)
kg : Kilogram
L : Litre
m^3 : Metreküp
Sm^3 : Standart Metreküp
tj : Telajul
t : Ton

Kısaltmalar

AAF : Avrupa Nişasta Sektörü Birliği
ARIMA : Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama
CBAM : Carbon Border Adjustment Mechanism (Sınırda Karbon Düzenleme Mekanizması)
CCUS : Carbon Capture, Utilization and Storage (Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama)
CCS : Carbon Capture and Storage (Karbon Yakalama ve Depolama)
CEMS : Continuous Emission Monitoring System (Sürekli Emisyon İzleme Sistemi)
CH_4 : Metan
CF_4 : Tetraflorometan
C_2F_6 : Heksafloropropan
CO_2 : Karbondioksit
ÇŞİDB : Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı
EBRD : European Bank for Reconstruction and Development (Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası)
EF : Emisyon Faktörü
EFDB : Emisyon Faktörü Veri Tabanı
EOR : Enhanced Oil Recovery (Geliştirilmiş Petrol Geri Kazanımı)
EU ETS : European Union Emissions Trading System (Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi)
GHG : Greenhouse Gas (Sera Gazı Emisyonu)
GIS : Geographic Information System (Coğrafi Bilgi Sistemleri)
GWP : Global Warming Potential (Küresel Isınma Potansiyeli)
HFC : Hydrofluorocarbon (Hidroflorokarbon Gazları)
ISO : International Organization for Standardization (Uluslararası Standardizasyon Örgütü)
IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change (Hükûmetlerarası İklim Değişikliği Paneli)
KYKD : Karbon Yakalama Kullanma ve Depolama
LULUCF : Land Use, Land-Use Change and Forestry (Arazi Kullanımı, Arazi Kullanım Değişikliği ve Ormancılık)
MRV : Measurement, Reporting, Verification (İzleme, Raporlama, Doğrulama)

NEP : Northern Endurance Partnership
NKD : Net Kalorifik Değer
N_2O : Azot Oksit
NZT : Net Zero Teesside
OQGN : Ulusal CO_2 Taşıma Ağı
PFC : Perfluorocarbon (Perflorokarbonlar)
SGE : Sera Gazı Emisyonu
TENMAK : Türkiye Enerji, Nükleer ve Maden Araştırma Kurumu
TÜİK : Türkiye İstatistik Kurumu
UNFCCC : United Nations Framework Convention on Climate Change (Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi)
QA/QC : Quality Assurance / Quality Control (Kalite Güvence / Kalite Kontrol)

NİŞASTA SEKTÖRÜNDE DOĞRUDAN SERA GAZI EMİSYONLARININ BELİRLENMESİ VE AZALTILMASI İÇİN GELİŞTİRİLEN YÖNTEMLER

ÖZET

Son yılların en popüler gündem maddelerinden biri olan iklim değişikliği ve küresel ısınma, dünyadaki yaşamı tehdit eden en büyük unsurlardan biridir. Bu sebeple iklim değişikliğine ve küresel ısınmaya sebep olan sera gazı emisyonlarının belirlenmesi ve azaltılması için önleme çalışmalarının yapılması ihtiyacı doğmuştur. Mısır nişastası ve nişasta bazlı şekerler şu anda Türkiye'de mısırın işlenmesinden elde edilen iki önemli 'sanayi ara maddesi' olarak kullanılmaktadır. Mısır nişastası; oluklu mukavva, kağıt, tekstil, gıda (çorba, lokum, unlu mamuller), tutkal ve yapıştırıcı gibi sanayilerde kullanılır. Nişasta bazlı şekerler ise; şekerlemeler ve şekerli maddeler, unlu mamuller, baklava, helva, dondurma, reçel, alkollü ve alkolsüz içecekler ve sakız sanayilerinde kullanılmaktadır. Nişasta üretiminde oluşan yan ürünler gluten, mısır özü ve mısır kepeği de yem ve yağ sanayiinde kullanılmaktadır. Bu ürünler üretilirken prosesin bazı aşamalarında ısı enerjisi ihtiyacı doğmaktadır. Bu sebeple endüstride doğalgaz ve kömür yakıtlı kazanlar kullanılmaktadır. Dolasıyla doğrudan sera gazı emisyonlarına sebep olacak birçok faktör bu sektörde yer almaktadır.

Bu çalışma nişasta endüstrisinde faaliyet gösteren bir firmanın sera gazı emisyonlarının belirlenmesi ve azaltılmasına yönelik önlemlerin değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Temel yıl 2024 yılı baz alınarak gerçekleştirilen çalışmada, doğrudan sera gazı emisyonları hesaplanmıştır. Emisyona neden olan kaynaklar yerinde yapılan incelemelerle belirlenmiş, ardından firmadan temin edilen veriler kullanılarak ISO 14064-1 standardı kapsamında hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalar sonucunda işletmenin toplam doğrudan sera gazı emisyonu 58.893,18 ton CO_2 eşdeğeri olarak bulunmuştur. Elde edilen bulgular doğrultusunda, işletmenin doğrudan sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik çeşitli önlemler tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Emisyon, Nişasta, Sera Gazı.

METHODS DEVELOPED TO DETERMINE AND REDUCE DIRECT GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN THE STARCH INDUSTRY

ABSTRACT

Climate change and global warming, one of the most popular topics of discussion in recent years, is one of the biggest threats to life on Earth. Therefore, there is a need to identify and reduce greenhouse gas emissions that cause climate change and global warming, and to carry out preventative measures. Corn starch and starch-based sugars are currently two important industrial intermediates obtained from corn processing in Turkey. Corn starch is used in industries such as corrugated cardboard, paper, textiles, food (soup, Turkish delight, baked goods), glue, and adhesives. Starch-based sugars are used in confectionery and sugary products, baked goods, baklava, halva, ice cream, jam, alcoholic and non-alcoholic beverages, and chewing gum industries. By-products of starch production, such as gluten, corn germ, and corn bran, are also used in the feed and oil industries. The production of these products requires heat energy at certain stages of the process. Therefore, natural gas and coal-fired boilers are used in the industry. Consequently, many factors that directly cause greenhouse gas emissions are present in this sector. This study aims to determine the greenhouse gas emissions of a company operating in the starch industry and to evaluate measures to reduce them. Using 2024 as the base year, the study calculated direct greenhouse gas emissions. Emission sources were identified through on-site inspections, and then calculations were performed according to the ISO 14064-1 standard using data obtained from the company. As a result of the calculations, the company's total direct greenhouse gas emissions were found to be 58,893.18 tons of CO_2 equivalent. Based on these findings, various measures to reduce the company's direct greenhouse gas emissions are discussed.

Keywords: Emission, Starch, Greenhouse Gas.

1. GİRİŞ

Küresel iklim değişikliği, yalnızca çevresel boyutlarıyla değil; aynı zamanda ekonomik, sosyal ve sektörel etkileriyle 21. yüzyılın en kritik krizlerinden biri hâline gelmiştir. Bu küresel sorunun en önemli tetikleyicisi ise sera gazı emisyonlarıdır. Özellikle karbondioksit (CO_2), metan (CH_4) ve azot oksit (N_2O) gibi gazların fosil yakıt tüketimi, sanayi, tarım ve ulaşım gibi insan faaliyetlerinden kaynaklı olarak atmosfere salınması, iklim dengesini bozmakta; ekosistem sağlığını, gıda güvenliğini ve ekonomik sürdürülebilirliği tehdit etmektedir (IPCC, 2005; Rahman ve diğ., 2017). Sektörel bazda sera gazı emisyonlarının belirlenmesi ve azaltılması, hem iklim politikalarının etkili yürütülebilmesi hem de sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin başarılabilmesi açısından kritik önem taşımaktadır. Türkiye'de tarım ve gıda sektörüyle entegre çalışan nişasta endüstrisi, üretim süreçlerinde yoğun enerji kullanımı, fosil yakıt bağımlılığı ve kimyasal girdi gereksinimi nedeniyle doğrudan emisyon kaynakları arasında yer almaktadır (Çalışkan ve diğ., 2020). Nişasta ve şeker bitkileri, özellikle mısır ve patates gibi ürünlerden elde edilmekte; bu üretim süreçlerinde kullanılan gübreler, sulama sistemleri, mekanizasyon ve taşıma faaliyetleri ise başlıca karbon salımı kaynaklarını oluşturmaktadır (Çalışkan ve diğ., 2015; Günel ve diğ., 2010).

Dünyada ve Türkiye'de nişasta üretimi, yalnızca gıda ve yem sanayiine değil; aynı zamanda biyoyakıt, tekstil, kağıt, biyoplastik ve ilaç sektörlerine de ham madde temin eden stratejik bir alan konumundadır (AB Biofuels Annual, 2021). Özellikle Avrupa Birliği'nin iklim odaklı tarım ve enerji politikaları, biyoyakıt üretiminde nişasta içerikli bitkilere olan talebi artırmakta; ancak bu talep aynı zamanda gıda güvencesi, arazi kullanımı ve çevresel etkiler açısından da yeni tartışmaları beraberinde getirmektedir (Hasan ve Oláh, 2022; Harsányi ve diğ., 2021). Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde ise üretim maliyetlerinin yüksekliği, teknolojik altyapı eksiklikleri ve yetersiz planlama gibi sorunlar nedeniyle hem dışa bağımlılık artmakta hem de çevresel etkiler kontrolsüz kalmaktadır (Çalışkan ve diğ., 2010). Bu kapsamda, nişasta sektörünün sera gazı emisyonları açısından mevcut durumunun ortaya konulması ve emisyon azaltımına yönelik uygulanabilir stratejilerin belirlenmesi, hem ulusal emisyon envanteri kalitesinin artırılması hem de sektörel dönüşüm planlarının şekillenmesi açısından gereklidir. Emisyon kaynaklarının belirlenmesi ve ölçülmesi, IPCC'nin önerdiği metodolojiler

çerçevesinde yapılmakta; modelleme teknikleri, izleme sistemleri ve yaşam döngüsü analizleri gibi çeşitli araçlarla desteklenmektedir (IPCC, 2019; Bang ve Khue, 2019; Alfredsson ve diğ., 2013). Türkiye'de bu alandaki düzenlemeler, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından 2023 yılında yayınlanan "Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi Tebliği" gibi yasal çerçevelerle kurumsallaştırılmış ve enerji yoğun sektörlerde MRV (izleme, raporlama, doğrulama) sistemleri zorunlu hâle getirilmiştir (Deveci, 2019).

1.1. Tezin Amacı ve Önemi

İklim değişikliği, günümüzde yalnızca çevresel değil, aynı zamanda ekonomik ve sosyal düzeyde de etkilerini hissettiren küresel bir kriz hâline gelmiştir. Artan sera gazı emisyonları, özellikle karbondioksit (CO_2), metan (CH_4) ve azot oksit (N_2O) gibi gazların atmosferdeki birikimiyle doğrudan bağlantılıdır ve bu durum küresel ısınmanın başlıca sebebidir. Sanayi devriminden itibaren insan faaliyetlerinin neden olduğu bu salımlar, iklim sistemini bozar nitelikte bir seviyeye ulaşmıştır. Dünya çapında sıcaklık ortalamalarının yükselmesi, kuraklık, sel, orman yangınları ve buzulların erimesi gibi geri döndürülemez çevresel sorunları da beraberinde getirmiştir. Bu kapsamda, iklim krizinin ana tetikleyicisi olan sera gazı salımlarının belirlenmesi, izlenmesi ve azaltılması artık yalnızca bir çevresel zorunluluk değil; aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirlik ve uluslararası sorumluluk çerçevesinde değerlendirilmesi gereken bir zorunluluk hâline gelmiştir. Bu noktada Kyoto Protokolü (1997) ve Paris Anlaşması (2015) gibi uluslararası sözleşmeler, devletleri sera gazı salımlarını kontrol altına almak ve azaltmak için bağlayıcı yükümlülüklere yönlendirmiştir. Bu anlaşmaların en temel amacı, sera gazı emisyonlarını azaltarak küresel sıcaklık artışını 1.5–2°C ile sınırlamak ve karbon nötr bir gelecek inşa etmektir. Ülkelerin ulusal sera gazı emisyonlarını sektörel bazda hesaplayarak raporlamaları, emisyon envanteri oluşturulması ve bu doğrultuda azaltım stratejileri geliştirmeleri, hem anlaşmaların yükümlülüklerini yerine getirme hem de küresel iklim krizine karşı ortak mücadele verme açısından büyük önem taşımaktadır.

Sanayi, enerji, ulaşım ve tarım gibi yüksek emisyonlu sektörler içerisinde, nişasta sektörü, hem tarımsal üretime hem de sanayiye doğrudan bağlı yapısıyla dikkat çeken bir alandır. Mısır nişastası ve nişasta bazlı şekerler gibi ürünler, başta gıda olmak üzere birçok sektörde yaygın olarak kullanılmakta; üretim süreçleri ise ciddi miktarda enerji ve su

tüketimi gerektirmektedir. Bu süreçlerde özellikle doğalgaz ve kömür gibi fosil yakıtların kullanılması, doğrudan sera gazı emisyonlarına yol açmaktadır. Aynı zamanda proses sırasında ortaya çıkan yan ürünlerin işlenmesi, taşıma faaliyetleri ve kullanılan ekipmanların enerji verimliliği düzeyi gibi faktörler de sektörün çevresel etkisini artırmaktadır. Nişasta sektöründe sera gazı salımının doğru şekilde hesaplanması, emisyon kaynağı olan proses ve yanma emisyonlarının ISO 14064-1 standardı kapsamında değerlendirilmesiyle mümkündür. Bu standarda göre kuruluş seviyesinde sera gazı envanteri hazırlanarak emisyonlar karbondioksit eşdeğeri cinsinden hesaplanmakta; doğrudan ve dolaylı emisyon kategorileri altında sınıflandırılmaktadır. Özellikle Kategori 1: Doğrudan Emisyonlar, bu çalışmanın temel odağıdır ve sektörde kullanılan kömürlü kazan sistemleri gibi enerji kaynaklarının doğrudan etkilerini kapsar. Emisyon kaynaklarının net bir biçimde ortaya konması, bu kaynaklara yönelik önleme ve iyileştirme stratejilerinin geliştirilmesinin ön koşuludur. Ayrıca, nişasta endüstrisinde yapılacak karbon ayak izi hesaplamaları, yalnızca çevresel değil; aynı zamanda ekonomik ve yönetsel faydalar da sağlamaktadır. Karbon yönetimi, üretim süreçlerinin çevresel verimliliğini artırmak, enerji maliyetlerini azaltmak, uluslararası pazarlarda rekabet gücünü korumak ve sürdürülebilirlik raporlamaları çerçevesinde kurumsal sorumluluklarını yerine getirmek isteyen firmalar için artık stratejik bir zorunluluktur. Sektörel düzeyde yapılacak emisyon analizleri, daha temiz üretim teknolojilerine geçişi kolaylaştırmakta; aynı zamanda enerji verimliliği yatırımlarını teşvik etmektedir.

Bu çalışmanın temel amacı, nişasta endüstrisinde faaliyet gösteren bir firmanın doğrudan sera gazı emisyonlarının belirlenmesini ve emisyonların azaltılmasına yönelik yaklaşımların değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Temel yıl olarak 2024 yılı esas alınmış ve işletmenin doğrudan sera gazı emisyonları hesaplanmıştır. Emisyona neden olan kaynaklar yerinde yapılan incelemelerle belirlenmiş, gerekli bilgi, belge ve veriler işletmeden temin edilmiştir. Bu veriler kullanılarak ISO 14064-1 standardı kapsamında hesaplamalar gerçekleştirilmiş ve işletmenin toplam doğrudan sera gazı emisyonu karbondioksit eşdeğeri (CO_2 e) cinsinden ifade edilmiştir. Hesaplama sonuçları doğrultusunda mevcut durum ortaya konulmuş ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik uygulanabilir önleme ve iyileştirme seçenekleri değerlendirilmiştir.

Hesaplamalar ISO 14064-1 standardına uygun biçimde yürütülmüş olup, veri kaynağı olarak fabrika içi kayıtlar, yakıt analizleri, hammadde tüketim verileri, tedarikçi raporları ve resmi kurum dokümantasyonları kullanılmıştır. Emisyon hesaplama yöntemi olarak hesap temelli (calculation-based) metodoloji tercih edilecek ve IPCC 2006 Kılavuzu, Emisyon Faktörü Veri Tabanı (EFDB), T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayımlanan referans dokümanlar kullanılmıştır. Çalışma yalnızca mevcut emisyonların belirlenmesini değil, aynı zamanda emisyon azaltımı için geliştirilebilecek stratejilerin değerlendirilmesini de kapsamaktadır. Bu kapsamda enerji verimliliği uygulamaları, karbon yakalama teknolojileri, yakıt dönüşümleri, yenilenebilir enerji entegrasyonu ve proses modernizasyonları gibi yöntemler değerlendirilmiştir.

2. NİŞASTA SEKTÖRÜNDE DOĞRUDAN SERA GAZI EMİSYONLARININ BELİRLENMESİ VE AZALTILMASI

2.1. Nişasta Sektörüne Genel Bakış

Nişasta sektörü, gıda sanayiinden biyoyakıt üretimine kadar birçok endüstriyel alanda temel ham madde sağlayan stratejik bir sektördür. Tarımsal üretimle doğrudan bağlantılı olan bu sektör, hem yerli ekonomik yapının sürdürülebilirliği hem de sanayi politikalarının şekillenmesinde kritik rol oynamaktadır. Türkiye'de nişasta üretimi genellikle mısır, buğday ve patates gibi nişasta içerikli bitkilere dayalı olarak gerçekleşmekte ve özellikle mısır temelli üretim yoğunluk kazanmaktadır (Günel ve diğ., 2010). Türkiye'de nişasta ve şeker bitkileri üretimi, hem iklimsel hem de yapısal faktörlerden etkilenmektedir. Nişasta üretimi; üretim alanlarının verimliliği, girdi maliyetleri, işleme teknolojileri ve pazar yapısı gibi değişkenlerden doğrudan etkilenmektedir. Son yıllarda üretim desenlerinde meydana gelen değişimler, küresel piyasa dalgalanmaları ve girdi maliyetlerindeki artışlar, sektörün sürdürülebilirliğini tehdit eden unsurlar arasında yer almaktadır. Türkiye Ziraat Mühendisliği Kongreleri'nde sunulan çalışmalarda da sektörün yapısal sorunlarına dikkat çekilmiş ve verimliliğin artırılması için yeni üretim tekniklerinin benimsenmesi gerektiği vurgulanmıştır (Çalışkan ve diğ., 2020).

Nişasta sektörü sadece tarımsal üretimle sınırlı kalmayıp, sanayi entegrasyonu açısından da oldukça önemli bir işlev görmektedir. Gıda sanayii başta olmak üzere, tekstil, kağıt, ilaç ve kozmetik gibi sektörlerde yoğun olarak kullanılan nişasta türevleri, dışa bağımlılığı azaltmak açısından stratejik öneme sahiptir. Ancak Türkiye'nin mevcut işleme kapasitesi, artan talebi karşılamakta yetersiz kalmakta; bu da ithalata bağımlılığı artırmaktadır. Bu durum, hem ekonomik açıdan kırılganlık yaratmakta hem de tarımsal sanayi entegrasyonunun zayıf kaldığını göstermektedir (Çalışkan ve diğ., 2022). Nişasta bazlı ürünlerin kullanım alanı yalnızca gıda ile sınırlı değildir. Son yıllarda biyoyakıt üretiminde nişasta içerikli ürünlerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Avrupa Birliği ülkelerinde mısır ve buğday gibi nişasta kaynağı bitkiler, birincil biyoyakıt hammaddesi olarak değerlendirilmekte; böylece enerji üretiminde sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlanmaktadır. Ancak bu yaklaşım, gıda güvenliği ve tarım arazilerinin kullanımı gibi sosyal ve çevresel açılardan tartışmalara da yol açmaktadır (Hasan ve Oláh, 2022).

Türkiye'nin nişasta sektörü açısından karşı karşıya olduğu en büyük sorunlardan biri de üretim maliyetlerinin yüksekliğidir. Gübre, enerji ve tohum gibi girdilerin fiyatlarındaki artış, çiftçilerin üretimden uzaklaşmasına neden olmakta ve bu da sektörde arz-talep dengesizliğine yol açmaktadır. Destekleme politikalarının yetersizliği ve sanayi ile üretici arasındaki dengesiz fiyatlama sistemi, sektörde uzun vadeli planlama yapılmasını zorlaştırmaktadır (Çalışkan ve diğ., 2020).

Türkiye'de nişasta sektörü tarımsal üretim, sanayi entegrasyonu, enerji dönüşümü ve gıda güvenliği gibi birçok alanla doğrudan ilişkili, çok boyutlu bir yapı arz etmektedir. Bu sektörün sürdürülebilirliğini sağlamak için üretim altyapısının modernize edilmesi, işleme tesislerinin kapasitesinin artırılması, üretici desteklerinin artırılması ve dışa bağımlılığı azaltacak politikaların hayata geçirilmesi gerekmektedir. Nişasta sektörü, doğru planlama ve bilimsel temelli yaklaşımlarla yalnızca ekonomik değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da Türkiye'nin kalkınma hedeflerine katkı sağlayabilecek potansiyele sahiptir.

2.1.1. Küresel ve Türkiye'deki Nişasta Endüstrisi

Nişasta endüstrisi, dünya genelinde gıda, ilaç, tekstil, kağıt, biyoplastik ve biyoyakıt sektörlerinin temel hammadde tedarikçisi olarak stratejik bir rol oynamaktadır. Özellikle tarımsal kökenli doğal kaynaklara dayalı olması, bu sektörü hem sürdürülebilirlik hem de iklim değişikliğiyle mücadele açısından kilit konuma getirmektedir. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde nişasta üretimi, tarım politikaları, enerji güvenliği ve endüstriyel büyüme hedefleriyle doğrudan bağlantılı olarak şekillenmektedir (Halimatussadiah ve diğ., 2021). Küresel ölçekte, başta mısır, patates, buğday ve maniok olmak üzere birçok nişasta kaynağı bitki, yoğun işlenerek sanayiye entegre edilmektedir. Avrupa Birliği, Amerika Birleşik Devletleri, Çin ve Brezilya, dünya nişasta üretiminin ve tüketiminin başlıca aktörleridir.

Avrupa'da nişasta sektörü, çevre dostu ürünlerin geliştirilmesi, biyoyakıt üretimi ve tarımsal karbon emisyonlarının azaltımı gibi alanlarda yoğun Ar-Ge yatırımlarıyla desteklenmektedir (AB Biofuels Annual, 2021; Harsányi ve diğ., 2021). COVID-19 salgını döneminde küresel tarım piyasalarında yaşanan kırılganlıklar, nişasta sektörünü de doğrudan etkilemiştir. Küresel tedarik zincirinde yaşanan aksamalar, girdi

maliyetlerinin artması ve lojistik sorunlar, nişasta bazlı ürünlerin hem üretimini hem de ihracatını sekteye uğratmıştır. Buna rağmen sektördeki toparlanma hızı, nişasta ürünlerinin çok yönlü kullanım alanlarına olan talebin sürekliliği sayesinde hızlı gerçekleşmiştir (Elleby ve diğ., 2020).

Türkiye özelinde ise nişasta sektörü, başta mısır ve patates olmak üzere yerli tarımsal üretime dayanmaktadır. Ancak sektördeki büyüme, iklimsel riskler, üretim maliyetlerindeki artış, işleme altyapısının yetersizliği ve dışa bağımlılık gibi yapısal sorunlarla karşı karşıyadır. Türkiye Ziraat Mühendisliği Kongrelerinde sunulan çalışmalar, sektörde verimlilik sorunlarının yanı sıra üretici-tüketici arasındaki fiyat dengesizliklerine ve sürdürülebilir tarım politikalarına duyulan ihtiyaca dikkat çekmektedir (Çalışkan ve diğ., 2015; Çalışkan ve diğ., 2020). Patates gibi nişasta oranı yüksek bitkiler, hem iç tüketim hem de endüstriyel kullanım açısından önemli potansiyele sahiptir. Türkiye'de patates sektörünün tarihsel gelişimi ve mevcut yapısı değerlendirildiğinde, üretimde yaşanan dalgalanmaların hem çiftçi gelirini hem de sanayiye yönelik hammadde arzını etkilediği görülmektedir. Bu durum, planlı üretim modeline geçilmesi ve nişasta sanayiinin arz-talep dengesiyle entegre edilmesi ihtiyacını doğurmaktadır (Çalışkan, ve diğ., 2010).

Ülke genelinde nişasta ve şeker bitkileri üretimi, bölgesel olarak farklılık göstermekte; özellikle İç Anadolu, Karadeniz ve Güneydoğu Anadolu bölgeleri öne çıkmaktadır. Ancak tarımsal üretimde görülen belirsizlikler, kuraklık riskleri ve yüksek girdi maliyetleri, bu ürünlerin ekim alanlarının daralmasına yol açmaktadır. Türkiye'de mısır üretiminin biyoyakıt ve nişasta üretimi için yeterli seviyeye getirilememesi, ithalat bağımlılığı yaratmakta ve bu durum hem döviz açığına hem de dış kaynaklı fiyat dalgalanmalarına neden olmaktadır (Günel ve diğ., 2010). Ayrıca, Avrupa Birliği'nin tarım ve enerji politikaları çerçevesinde şekillenen biyoyakıt talebi, Türkiye için hem bir fırsat hem de bir risk unsuru taşımaktadır. Yerli üretimin artırılması durumunda Türkiye, hem iç pazar talebini karşılayabilir hem de ihracat kapasitesini geliştirebilir. Ancak üretim planlaması yapılmaksızın gerçekleştirilen arz artışları, gıda güvenliğini ve çevresel sürdürülebilirliği tehdit edebilmektedir (Hasan ve Oláh, 2022). Küresel ve Türkiye kapsamında nişasta sektörü, tarım-sanayi entegrasyonu açısından kritik bir rol oynamaktadır. Küresel ölçekte gelişen çevreci politikalar, biyoyakıt uygulamaları ve

sürdürülebilir tarım projeleri, nişasta sektörüne stratejik bir derinlik kazandırmıştır. Türkiye'nin bu dinamik içinde yerini güçlendirebilmesi, ancak yapısal reformlar, üretici destekleri, teknoloji yatırımları ve iklim dostu üretim modellerinin entegrasyonu ile mümkün olacaktır.

2.1.2. Nişasta Üretim Süreci

Nişasta üretim süreci, nişasta içeriği yüksek olan tarım ürünlerinden (başta mısır, patates, buğday ve manyok) nişastanın ayrıştırılması ve saflaştırılması ile başlayan çok aşamalı bir endüstriyel işlemler bütünüdür. Bu süreç, kullanılan ham maddeye, uygulanacak teknolojiye ve hedeflenen ürün formuna göre değişiklik göstermekle birlikte; temel olarak ön hazırlık, ayırma, saflaştırma, kurutma ve paketleme aşamalarından oluşur. Üretim zinciri boyunca uygulanan işlemler, hem nişastanın kalitesini hem de enerji ve su tüketimini doğrudan etkiler. Ham madde hazırlığı üretim sürecinin ilk aşamasıdır. Bu aşamada, kullanılan bitkisel ürünler fiziksel olarak temizlenir, taş, toprak, sap, çöp gibi yabancı maddelerden arındırılır. Ardından boyut küçültme (parçalama, kırma) işlemleriyle nişasta taşıyan hücrelerin yapısı bozulur. Patates ve manyok gibi yumru bitkilerde bu işlem daha yoğun mekanik müdahale gerektirirken, tahıllarda (özellikle mısırda) ıslatma işlemi ön plandadır. Mısır nişastası üretiminde ıslatma işlemi, çekirdeğin protein ve nişasta bileşenlerini birbirinden ayırmayı kolaylaştırmak amacıyla 30-50 saat süreyle 50–60 °C'de gerçekleştirilir (Çalışkan ve diğ., 2020).

Islatılan tahıllar daha sonra öğütme (grinding) işlemine tabi tutulur. Bu aşamada, nişasta granülleri içeren hücreler parçalanır ve nişastanın serbest hale gelmesi sağlanır. Öğütme işlemi genellikle ıslak ortamda gerçekleştirilir ve farklı partikül boyutları oluşturularak nişasta-protein-lif karışımının ayrılmasına zemin hazırlanır. Bu karışım daha sonra santrifüjleme, elek ve dekantör sistemleri gibi fiziksel ayırma teknikleri ile ayrıştırılır. Nişasta burada diğer bileşenlerden – özellikle glüten, lif ve yağ gibi fraksiyonlardan – ayrılır. Ayırma ve saflaştırma aşamasında, nişasta sıvısı tekrar tekrar dekantasyon ve yıkama işlemlerine tabi tutulur. Bu süreçte, nişasta süspansiyonu içerisindeki yabancı partiküller, renkli bileşenler, protein kalıntıları ve mikroorganizmalar uzaklaştırılır. Bu aşamanın amacı, nişastanın saflığını artırmak ve rafine edilmiş formda kullanıma hazır hale getirmektir. Kaliteye yönelik bu işlemler, özellikle gıda ve ilaç sektöründe kullanılacak nişasta için kritik öneme sahiptir (Çalışkan ve diğ., 2022).

Kurutma işlemi, elde edilen nişasta süspansiyonunun nem oranının düşürülmesini kapsar. Vakum altında yapılan bu işlemde, nişasta granüllerinin zarar görmeden kurutulması hedeflenir. Kurutulan nişasta, ince toz veya granül formuna dönüştürülür ve nem oranı %12–14 seviyelerine indirilir. Kurutma işleminin etkinliği, ürünün raf ömrü, taşınabilirliği ve nihai kullanım alanları açısından belirleyicidir. Endüstride yaygın olarak sıcak hava kurutucuları ve sprey-dryer sistemleri kullanılır. Son aşama olan depolama ve paketleme, ürünün nihai formda tüketiciye ya da başka endüstriyel süreçlere sevki için hazırlanmasını kapsar. Bu aşamada nişasta, kullanım amacına göre toz, granül veya modifiye edilmiş yapıda paketlenir. Depolama koşulları, nişastanın mikrobiyal bozulma riskini azaltmak ve fiziksel yapısını korumak için kontrollü sıcaklık ve nem ortamlarında sağlanır (Günel ve diğ., 2010).

Modern nişasta üretim süreçlerinde, enerji ve su verimliliği yüksek sistemler kullanılmakta, aynı zamanda üretim sırasında ortaya çıkan yan ürünler (protein, lif, mısır yağı gibi) değerlendirilerek ekonomik katma değer yaratılmaktadır. Örneğin; mısırdan nişasta üretimi sırasında açığa çıkan gluten proteini yem sanayinde, lif ise biyogaz tesislerinde veya biyoplastik üretiminde kullanılabilir. Bu durum, sektörde döngüsel ekonomi prensiplerinin de uygulandığını göstermektedir. Nişasta üretimi oldukça kompleks ve entegre bir endüstriyel süreçtir. Ham madde tedarikinden ürün kalitesine kadar olan zincir, sadece tarımsal altyapı ile değil; aynı zamanda işleme teknolojisinin modernizasyonu, kalite kontrol mekanizmaları ve sürdürülebilirlik kriterleriyle de şekillenmektedir. Gelişen teknoloji ve artan taleple birlikte nişasta üretim süreçleri, daha çevre dostu, verimli ve yüksek kaliteli ürün elde etmeye yönelik olarak evrilmektedir.

2.2. Sera Gazı Emisyonları

Küresel iklim değişikliğinin temel sebeplerinden biri olan sera gazı emisyonları, sanayi, enerji, tarım, ulaşım ve yerleşim gibi insan faaliyetlerinin doğal çevre üzerindeki baskısının somut bir göstergesidir. Özellikle karbondioksit (CO_2), metan (CH_4) ve azot oksit (N_2O) gibi gazların atmosferdeki yoğunluğu, küresel sıcaklık artışının doğrudan belirleyicilerindendir. Bu kapsamda ulaştırma sektörü, karbonsuzlaştırma süreçlerinin önemli bir ayağını oluşturmaktadır. Ahsan ve arkadaşlarının yaptığı bütüncül bir değerlendirmeye göre, demiryolu taşımacılığı gibi alternatif ve sürdürülebilir ulaşım teknolojilerinin yaygınlaştırılması, hem enerji verimliliğini artırmakta hem de sera gazı

salımlarını azaltmada yüksek potansiyele sahiptir. Çalışmada sürdürülebilir demiryolu sistemleri, çevresel, ekonomik, sosyal ve teknik perspektiflerden değerlendirilmiş; düşük karbon salımı, sürdürülebilir kentleşme ile birleştiğinde, net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmada stratejik bir rol üstlenmektedir (Ahsan ve diğ., 2023).

Kentleşme ve arazi kullanım biçimleri de sera gazı emisyonlarının mekânsal dağılımını ve yoğunluğunu belirleyen önemli faktörlerdendir. Özellikle şehirleşmenin yoğunlaştığı bölgelerde, ısı adası etkisi enerji tüketimini artırarak dolaylı olarak emisyonları tetiklemektedir. Verdonck ve çalışma arkadaşları, Brüksel Başkent Bölgesi'nde farklı kentsel planlama senaryoları altında sera gazı emisyonlarının nasıl değişim gösterdiğini analiz etmiş ve sonuç olarak, yapı yoğunluğunun, yeşil alanların dağılımının ve ulaşım altyapısının emisyon düzeyleri üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, düşük emisyonlu şehir modellerinin uzun vadeli iklim direnci açısından kritik rol oynadığı vurgulanmıştır (Verdonck ve diğ., 2019). Tarım sektörü özelinde incelendiğinde, sera gazı emisyonları açısından en dikkat çekici unsur azot bazlı gübre kullanımıdır. Özellikle N_2O salımları, hem yüksek küresel ısınma potansiyeline sahip olması hem de atmosfere olan etkisinin uzun vadeli kalıcılığı nedeniyle büyük önem arz etmektedir. Smeets ve meslektaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ilk nesil biyoyakıtların üretiminde kullanılan tarımsal girdilerin, özellikle gübrelerin, N_2O salımını ciddi biçimde artırdığı ve bu durumun biyoyakıtların iklim dostu olma iddiasını sorgulanabilir hale getirdiği belirtilmiştir. N_2O'nun sera gazı dengesine katkısının, üretim sürecindeki tüm enerji girdileri ve arazi kullanımı ile birlikte değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır (Smeets ve diğ., 2009).

N_2O salımı konusunda çözüm arayışları özellikle biyolojik süreçlerin kontrol altına alınması yönünde yoğunlaşmaktadır. Richardson ve arkadaşlarının çalışmasında, azot döngüsünde görev alan mikrobiyal süreçlerin düzenlenmesinin, özellikle denitrifikasyon sürecinin enzimatik kontrolüyle N_2O salımını azaltabileceği ileri sürülmüştür. Bu çalışma, tarım ve atık yönetimi sistemlerinde mikrobiyolojik müdahalelerin çevresel etkileri azaltmada ne kadar etkili olabileceğini göstermektedir. Aynı zamanda, biyoteknolojik ilerlemelerin sera gazı emisyonlarının kontrolünde stratejik rol oynayabileceği ifade edilmektedir (Richardson ve diğ., 2009). Bu bütünsel değerlendirmeler, sera gazı emisyonlarının sadece enerji üretimiyle sınırlı olmadığını,

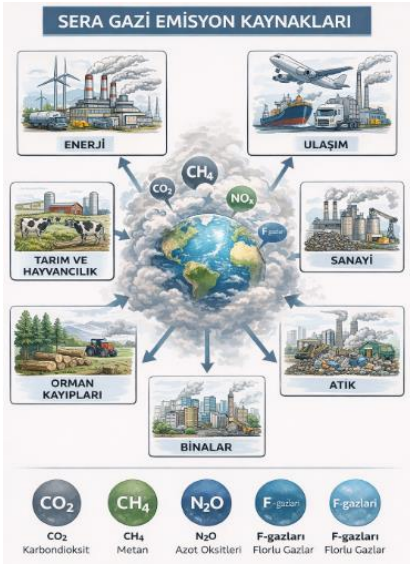
kentleşmeden ulaşıma, tarımdan altyapı teknolojilerine kadar geniş bir alanı etkilediğini ortaya koymaktadır. Sektörler arası geçişkenliği olan bu sorunun çözümü, yalnızca teknik değil; aynı zamanda sosyal, yönetsel ve ekonomik dönüşüm gerektirmektedir. Dolayısıyla, emisyon azaltımı stratejileri geliştirirken disiplinler arası yaklaşım şarttır ve her sektörün özel yapısal koşulları dikkate alınmalıdır.

2.2.1. Sera Gazı Emisyonlarının Kaynak ve Etkileri

Sera gazı emisyonları, farklı sektörlerden kaynaklanan karmaşık bir problem olarak yalnızca çevresel değil; aynı zamanda ekonomik, sosyal ve sağlık boyutlarıyla da ele alınması gereken çok yönlü bir sorundur. Bu emisyonların başlıca kaynakları enerji üretimi, ulaştırma, sanayi, tarım, atık yönetimi ve hatta beslenme alışkanlıkları gibi geniş kapsamlı alanlardır. Her bir sektörün farklı dinamikleri ve emisyon karakteristikleri, etkili bir emisyon azaltımı stratejisi geliştirmek için kaynaklara dair detaylı bilgi gerektirmektedir. Atık su arıtma sistemleri gibi altyapı faaliyetleri, çoğu zaman ihmal edilse de önemli ölçüde sera gazı üretmektedir. İstanbul'daki biyolojik atıksu arıtma tesislerini temel alan bir çalışmada, bu tür tesislerin CO_2, CH_4 ve N_2O gibi sera gazlarını saldığı ve bu salımların tesislerin teknik tasarımı, işletme koşulları ve kullanılan arıtma teknolojilerine bağlı olarak değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Gülhan ve arkadaşlarının geliştirdiği modelleme metoduna göre, biyolojik arıtma sürecindeki mikrobiyal faaliyetler özellikle N_2O emisyonlarının temel kaynağıdır. Bu durum, altyapı sistemlerinin sürdürülebilirlik çerçevesinde yeniden değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Gülhan ve diğ., 2018).

Sektörel düzeyde yapılan kapsamlı emisyon tahminleri ise, emisyonların yalnızca teknik kaynaklarla sınırlı kalmadığını, aynı zamanda risk yönetimi bakış açısıyla da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Aksu ve meslektaşları tarafından yapılan güncel bir araştırmada, enerji, ulaşım, atık, tarım ve sanayi gibi beş ana sektörün sera gazı emisyon düzeyleri modelleme ile tahmin edilmiş; bu tahminlere bağlı olarak sektörel bazda risk analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, enerji sektörünün en yüksek risk puanına sahip olduğu, tarım ve atık sektörlerinin ise ikinci derecede kritik emisyon kaynakları olarak öne çıktığı belirlenmiştir. Bu bulgular, her bir sektöre özel emisyon azaltım stratejileri geliştirilmesinin zorunlu olduğunu ortaya koymaktadır (Aksu ve diğ., 2025). Sera gazı emisyonlarının etkileri sadece çevreyle sınırlı değildir; halk sağlığı

üzerindeki doğrudan ve dolaylı etkileri de ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Dumrul'un ASEAN-5 ülkeleri üzerine gerçekleştirdiği panel veri analizine göre, çevresel kirlenme düzeyi ile sağlık harcamaları arasında anlamlı ve pozitif bir ilişki bulunmaktadır. Özellikle hava kalitesindeki bozulmanın, solunum yolu hastalıklarında artışa yol açtığı ve bu durumun da sağlık sistemine ciddi mali yükler bindirdiği tespit edilmiştir. Bu kapsamda sera gazı emisyonları yalnızca ekolojik değil, aynı zamanda sosyoekonomik bir problem olarak değerlendirilmelidir (Dumrul, 2019). Son yıllarda dikkat çeken bir başka kaynak ise gıda sistemidir. Beslenme biçimlerinin çevresel ayak izi üzerindeki etkileri giderek daha fazla önem kazanmaktadır. García ve arkadaşlarının yaptığı longitudinal analiz, ultra işlenmiş gıdaların yalnızca insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratmakla kalmadığını, aynı zamanda üretim süreçleri boyunca sera gazı salımlarını, su ve enerji tüketimini, arazi kullanımını da ciddi ölçüde artırdığını göstermiştir. Çalışmada, daha az işlenmiş, yerel ve bitki bazlı diyetlerin benimsenmesinin hem bireysel hem de toplumsal düzeyde çevresel sürdürülebilirliği destekleyebileceği önerilmektedir (García ve diğ., 2023). Sera gazı emisyonlarının kaynakları oldukça çeşitlidir Şekil 2.1'de verilmiştir. Bu çeşitlilik, emisyonların etkilerinin de çok boyutlu olmasına neden olmaktadır. Teknik altyapılardan beslenme alışkanlıklarına kadar uzanan bu geniş spektrum, sera gazı ile mücadelenin yalnızca çevreci değil; aynı zamanda sistemik, disiplinler arası ve yönetişim odaklı bir anlayışla yürütülmesi gerektiğini göstermektedir.



Şekil 2. 1. ISO 14064-1 Standardına Göre Sera Gazı Emisyon Kaynakları

2.2.2. Sera Gazları ve İklim Değişikliği

İklim değişikliği, günümüzün en acil çevresel sorunlarından biri olarak dünya genelinde ekolojik dengenin bozulmasına, tarımsal verimliliğin düşmesine, doğal afetlerin sıklığında artışa ve toplumların sosyoekonomik yapısında kırılganlıklara neden olmaktadır. Bu dönüşümün başlıca itici gücü ise sera gazı emisyonlarıdır. Karbondioksit (CO_2), metan (CH_4), azot oksit (N_2O) ve florlu gazlar gibi sera gazları, güneşten gelen ısının atmosferde tutulmasına neden olarak küresel sıcaklık artışının temelini oluşturur. Sanayi devriminden bu yana artan fosil yakıt kullanımı, ormansızlaşma, tarımsal faaliyetler ve kentleşme gibi insan etkinlikleri, atmosferdeki sera gazı birikimini dramatik ölçüde artırmış; bu da dünyanın ekosisteminde geri döndürülemez etkiler yaratmaya başlamıştır (Gowrisankar ve diğ., 2022). Tarımsal üretim sistemleri sera gazı salımlarının en büyük kaynaklarından biri olup, özellikle metan ve azot oksit gibi yüksek küresel ısınma potansiyeline sahip gazların kaynağıdır. Hayvancılık faaliyetlerinde hayvan dışkısı yönetimi, yem üretimi ve enerji tüketimi gibi süreçler doğrudan emisyonlara neden olmaktadır. Akça ve Yetişgin'in (2023) çalışmasında, hayvansal üretim sistemlerindeki emisyon kaynakları analiz edilerek, bu sistemlerde uygulanabilecek emisyon azaltım stratejilerine dair kapsamlı öneriler sunulmuştur. Özellikle yem katkı maddeleri, dışkı yönetimi ve enerji verimli barınak sistemleri gibi müdahale alanlarının, emisyonları azaltmakla kalmayıp üretici maliyetlerini de düşürebileceği vurgulanmaktadır. Bu kapsamda, sürdürülebilir hayvancılık uygulamaları yalnızca çevreyi değil, aynı zamanda sektörel verimliliği de doğrudan etkilemektedir (Akça ve Yetişgin, 2023).

Türkiye özelinde yapılan araştırmalar, sınırda karbon düzenleme mekanizması gibi yeni çevresel politikaların tarımsal üretim üzerinde nasıl etkiler yaratabileceğini ortaya koymaktadır. Gödekmerdan ve arkadaşları (2023), özellikle kompost, fermente gübre ve biyoçar gibi alternatif tarımsal girdilerin kullanımının, karbon salımını önemli ölçüde azaltabileceğini ifade etmişlerdir. Bu girdiler hem toprağın organik madde yapısını iyileştirmekte hem de sera gazı salımını minimize etmektedir. Ayrıca Avrupa Birliği'nin sınırda karbon düzenlemesi uygulaması gibi dış ticareti etkileyen politikalar, Türkiye'deki tarımsal ihracat için emisyon performansının daha da kritik hale geldiğini göstermektedir (Gödekmerdan ve diğ., 2023). Sera gazı emisyonlarının iklim değişikliği üzerindeki etkisini ortaya koymak adına, özellikle ekonomik ve enerjipolitik

değişkenlerle yapılan tahmin ve modelleme çalışmaları büyük önem taşımaktadır. Javanmard ve Ghaderi (2022), makine öğrenmesi algoritmaları ve optimizasyon modellerini birleştirerek enerji piyasası verilerine dayalı bir sera gazı tahmin sistemi geliştirmiştir. Bu model, yalnızca mevcut emisyonları değil, aynı zamanda gelecekteki eğilimleri de öngörmekte ve bu öngörüler doğrultusunda karar destek mekanizmaları üretmektedir. Bu tür yapay zekâ tabanlı sistemler, iklim politikalarının oluşturulmasında yeni nesil yaklaşımların temelini oluşturmaktadır (Javanmard ve Ghaderi, 2022).

ARIMA modelleme yöntemleri sera gazı emisyonlarının gelecekteki seyri hakkında fikir veren önemli istatistiksel araçlardır. Kour (2022), Güney Afrika'da CO_2 emisyonlarının ARIMA yöntemiyle modellenmesini gerçekleştirmiş ve bu modelin yüksek doğrulukla emisyon tahmininde bulunabildiğini ortaya koymuştur. Bu çalışmada, emisyonların ekonomik büyüme, nüfus artışı ve enerji tüketimi gibi değişkenlerle güçlü korelasyon içinde olduğu vurgulanmıştır. Bu bulgu, iklim değişikliği ile mücadelede ekonomik planlamanın da ne kadar kritik olduğunu ortaya koymaktadır (Kour, 2022). Türkiye kapsamında Derse (2022), karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS) teknolojileri üzerine yaptığı çalışmada, hem ARIMA analizini hem de çok kriterli karar verme tekniklerinden DEMATEL ve Gri İlişki Analizi'ni kullanarak karbon depolama alanlarının seçiminde yeni bir yöntem önermiştir. Bu çalışma, yalnızca emisyonları tahmin etmekle kalmayıp, aynı zamanda teknolojik çözüm yollarını da bilimsel temellere oturtmaktadır (Derse, 2022).

Türkiye'de CO_2 emisyonlarını etkileyen faktörlerin belirlenmesine yönelik yapılan panel veri analizleri de iklim politikalarının yönünü belirlemede önemli veri sağlamaktadır. Gökten ve arkadaşlarının (2022) Antroposen krizi kapsamında yaptığı analiz, ekonomik büyüme, enerji ithalatı, sanayi üretimi ve kentleşme oranı gibi değişkenlerin CO_2 emisyonları üzerinde belirleyici olduğunu göstermiştir. Bu sonuç, gelişmekte olan ülkelerde ekonomik büyümenin çevresel maliyetleri ile sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin çatıştığı bir noktaya işaret etmektedir (Gökten ve diğ., 2022). İklim değişikliğine uyum ve emisyon azaltımı kapsamında mera alanlarının korunması da ayrı bir önem taşımaktadır. Kalonya'nın (2022) çalışmasına göre, meraların karbon tutma kapasitesi doğal bir yutak görevi görerek hem CO_2 emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlamakta hem de iklim değişikliğine uyum süreçlerinde ekosistem hizmetlerini

desteklemektedir. Ancak mera alanlarının tarım ve sanayi faaliyetleri nedeniyle daralması, bu doğal yutak kapasitesinin azalmasına ve dolayısıyla iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir aracın kaybedilmesine neden olmaktadır (Kalonya, 2022). Sera gazlarının yalnızca atmosferdeki fiziksel yoğunluklarıyla değil, aynı zamanda tarım politikalarından teknolojiye, enerji piyasalarından uluslararası ticaret mekanizmalarına kadar pek çok alandaki dönüşümlerle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. İklim değişikliği ile mücadelede etkili olunabilmesi için; bilimsel verilerle desteklenen, sektörel gerçeklikleri gözeten ve ileri teknolojiyle entegre edilmiş bütünsel yaklaşımlar şarttır. Bu kapsamda sera gazı emisyonlarının yalnızca azaltılması değil, aynı zamanda etkilerinin doğru okunması ve stratejik önlemlerle yönlendirilmesi iklim politikalarının başarısı için vazgeçilmezdir.

2.2.3. Endüstriyel Kaynaklı Doğrudan Emisyonlar

Endüstriyel faaliyetler, sera gazı emisyonlarının en büyük doğrudan kaynaklarından biri olarak, küresel iklim krizinde merkezi bir rol oynamaktadır. Sanayi sektöründe kullanılan fosil yakıtlar, enerji yoğun üretim süreçleri, çimento, demir-çelik, kimya, tekstil ve inşaat gibi yüksek emisyonlu alanlar, doğrudan karbondioksit (CO_2), metan (CH_4) ve azot oksit (N_2O) salımına neden olmaktadır. Bu süreçler yalnızca üretimden kaynaklı değil; aynı zamanda tedarik zinciri, taşıma, atık yönetimi ve enerji üretimi gibi dolaylı etkiler yoluyla da emisyon üretmektedir. Bu kapsamda, endüstriyel emisyonların hem miktar hem de neden-sonuç ilişkileri bakımından detaylı biçimde incelenmesi, iklim politikalarının doğru yönlendirilmesi açısından kritik bir gereklilik hâline gelmiştir. Gelişmekte olan ülkelerde endüstriyel emisyonların tahmin edilmesi, ekonomik büyüme politikaları ile çevresel sürdürülebilirlik hedeflerinin uyumlu hâle getirilmesinde temel bir araçtır. Ning, Pei ve Li (2021), Çin'in karbon emisyonlarını ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) modeli ile tahmin ederek, geleceğe yönelik projeksiyonlar oluşturmuş ve bu tahminlerin sanayi politikaları üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Çalışma, özellikle enerji tüketimindeki yapısal değişimlerin, üretim teknolojilerinin modernizasyonunun ve bölgesel karbon kontrol politikalarının, emisyonlar üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymuştur (Ning ve diğ., 2021). Bu tür zaman serisi analizleri, yalnızca eğilimleri belirlemekle kalmayıp, aynı zamanda risk ve fırsat alanlarının erken saptanmasını da mümkün kılmaktadır.

Emisyonların endüstriyel yapılarla olan ilişkisi yalnızca üretim kapasitesiyle değil, aynı zamanda ekonomik karmaşıklık seviyesiyle de yakından ilişkilidir. Romero ve Gramkow (2021), ekonomik karmaşıklık teorisi çerçevesinde yürüttükleri çalışmada, daha sofistike ve ileri teknolojiye dayalı üretim sistemlerine sahip ülkelerin genellikle daha düşük emisyon yoğunluğuna sahip olduklarını belirtmişlerdir. Bu bulgu, çevre dostu teknolojilere dayalı sanayileşmenin iklim değişikliğiyle mücadelede yapısal bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Ekonomik karmaşıklık, yalnızca ekonomik büyüme değil, aynı zamanda sürdürülebilir üretim kapasitesinin de bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir (Romero ve Gramkow, 2021). Atık yönetimi sistemleri de endüstriyel kaynaklı emisyonların önemli bir bileşenidir. Türkiye özelinde yürütülen bir çalışmada, atıkların bertaraf edilme biçiminin sera gazı emisyonlarına etkisi analiz edilmiş ve Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında değerlendirilmiştir. Şahin ve Önder (2021), özellikle geri dönüşüm, kompostlama ve enerji geri kazanımı gibi modern atık işleme tekniklerinin, geleneksel depolama yöntemlerine göre çok daha düşük emisyon yarattığını belirtmişlerdir. Ayrıca, Türkiye'nin dış ticaret ilişkilerinin sürdürülebilirliğini koruyabilmesi için atık politikalarını Avrupa standartlarına uygun şekilde dönüştürmesi gerektiği vurgulanmıştır (Şahin ve Önder, 2021). Bu yaklaşım, sanayide döngüsel ekonomiye geçişin hem çevresel hem de ekonomik açıdan zorunlu olduğunu göstermektedir.

Endüstriyel üretimin dışında, ulaşım faaliyetlerinin de doğrudan sera gazı üretiminde önemli bir payı bulunmaktadır. Karayolu taşımacılığı, hem yük hem de yolcu taşımacılığı açısından enerji yoğun bir sektördür ve büyük ölçüde fosil yakıt tüketimine dayanmaktadır. Dündar ve Kolay (2021), Konya ili özelinde gerçekleştirdikleri çalışmada, karayolu taşımacılığının toplam sera gazı emisyonları içindeki payını hesaplamış ve sürdürülebilir taşımacılık modellerine geçişin önemini vurgulamışlardır. Elektrikli araç kullanımı, toplu taşıma yatırımları ve lojistik sistemlerin optimizasyonu gibi önlemlerin emisyon azaltımında etkili olabileceği belirtilmiştir. Özellikle taşımacılığın sanayi ve ticaretle olan doğrudan bağlantısı göz önüne alındığında, ulaştırma sektörü ile sanayi sektörü arasında kurulan bu ilişki, toplam emisyon azaltım hedeflerinin başarısı açısından kritik bir konudur (Dündar ve Kolay, 2021).

İşlenmiş gıda endüstrisi gibi sektörler ise çoğu zaman göz ardı edilse de karbon ayak izinde büyük rol oynamaktadır. González ve arkadaşları (2021), İspanya'daki EPIC kohort çalışmasında, diyet kaynaklı sera gazı salımlarını analiz etmiş ve özellikle yüksek oranda işlenmiş gıda tüketiminin karbon emisyonlarını artırdığını tespit etmiştir. Tarımsal üretim, işleme, paketleme, taşıma ve depolama süreçlerinde yoğun enerji ve kaynak tüketimi, bu sektörün çevresel etkisini katbekat artırmaktadır. Bu sonuçlar, sanayi kaynaklı emisyonların yalnızca ağır sanayiye değil; gıda ve tüketim sektörlerine kadar yayıldığını göstermektedir (González ve diğ., 2021). Endüstriyel kaynaklı doğrudan sera gazı emisyonları yalnızca enerji üretimi veya ağır sanayi faaliyetleriyle sınırlı değildir. Bu emisyonlar, atık yönetimi, taşımacılık, gıda üretimi ve tüketimi gibi geniş sektörleri de kapsamaktadır. Bu nedenle, sanayiye yönelik emisyon azaltım politikalarının yalnızca enerji verimliliği üzerine değil; üretim teknolojileri, tedarik zinciri yönetimi, lojistik altyapı ve ürün yaşam döngüsü gibi çok boyutlu süreçleri kapsayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Sürdürülebilir bir ekonomik sistemin inşasında, düşük karbonlu üretim modelleri, yeşil lojistik çözümler ve döngüsel ekonomi anlayışı bir arada düşünülmelidir.

2.2.4. Nişasta Sektöründe Başlıca Emisyon Kaynakları

Nişasta ve şeker bitkileri sektörü, hem tarımsal üretim hem de sanayi bazında önemli düzeyde sera gazı emisyonuna neden olan bir üretim alanıdır. Özellikle bu sektör, üretim zincirinin farklı aşamalarında (toprak işleme, gübreleme, sulama, hasat, taşıma ve işleme süreçlerinde) yoğun enerji kullanımı ve kimyasal girdi gereksinimi nedeniyle çevresel etkiler bakımından öne çıkmaktadır. Emisyonların büyük kısmı, fosil yakıtlara dayalı mekanize tarım uygulamalarından, azot bazlı gübrelerin kullanımından ve enerji yoğun işleme süreçlerinden kaynaklanmaktadır. Türkiye'de nişasta ve şeker bitkileri üretimi üzerine yapılan uzun dönemli analizler, bu alanın hem üretim deseni hem de çevresel performans açısından önemli dönüşümler geçirdiğini göstermektedir. Özellikle nişasta bazlı ürünlerde (patates, mısır vb.) üretim süreçleri yüksek miktarda su, enerji ve kimyasal girdi kullanımı gerektirmektedir. Çalışkan ve arkadaşlarının farklı kongrelerde sundukları bildiriler, nişasta bitkilerinde üretim deseni ve teknik uygulamalardaki değişimlerin çevresel etki boyutunu doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır (Çalışkan ve diğ., 2015; Çalışkan ve diğ., 2020). Özellikle, verimi artırmak adına artan gübre ve pestisit kullanımı,

sadece tarımsal kaynaklı CO_2 değil, aynı zamanda CH_4 ve N_2O gibi sera gazlarının da atmosfere salınmasına neden olmaktadır.

Sektördeki sürdürülebilirlik tartışmaları da bu emisyon kaynaklarının azaltılmasıyla doğrudan ilişkilidir. 2025 yılında gerçekleştirilen Türkiye Ziraat Mühendisliği X. Teknik Kongresi'nde, mevcut durumun değerlendirilmesinin yanında sektörde karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik öneriler sunulmuştur. Bu öneriler arasında düşük emisyonlu üretim tekniklerinin benimsenmesi, organik gübre kullanımı, su tasarruflu sulama sistemlerine geçiş ve enerji verimliliği yüksek işleme teknolojileri öne çıkmaktadır (Çalışkan ve diğ., 2025). Bu öneriler, nişasta ve şeker bitkileri sektörünün hem verimlilik hem de çevresel etki açısından daha dengeli bir üretim modeline yönelmesi gerektiğini göstermektedir. Sektöre dair tarihsel bir perspektif sunan çalışmalar da emisyonların yapısal nedenlerini ortaya koymaktadır. Örneğin, Türkiye'nin patates üretimindeki yapısal sorunlara odaklanan çalışmasında, Çalışkan ve meslektaşları (2010), mekanizasyon, pazarlama yapısı, depolama altyapısı ve lojistik gibi unsurların sadece ekonomik değil, aynı zamanda çevresel etkileri olduğunu belirtmiştir. Yetersiz planlama ve yanlış uygulamalar, emisyonları artırmakta; özellikle soğuk zincir sistemlerinin yetersizliği, yüksek enerji tüketimine ve dolayısıyla dolaylı emisyonlara neden olmaktadır (Çalışkan ve diğ., 2010).

Geniş ölçekli üretim alanları, monokültür uygulamaları ve yüksek kimyasal girdi kullanımı gibi faktörlerin sektörde çevresel baskıyı artırdığı, önceki yıllarda yapılan kongre çalışmalarında da vurgulanmıştır. Özellikle geleneksel üretim deseninin sürdürülemezliği ve doğal kaynaklar üzerindeki baskısı, emisyon kaynaklarının sistematik şekilde yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır (Günel ve diğ., 2010). Bu noktada alternatif tarım sistemlerinin (örneğin entegre üretim, agroekolojik yaklaşımlar) yaygınlaştırılması, hem üretici refahını hem de çevreyi koruma açısından stratejik önem taşımaktadır. Nişasta ve şeker bitkileri üretiminde sera gazı emisyonları çok boyutlu nedenlere dayanmaktadır. Tarımsal üretimden sanayiye uzanan bu zincirde her aşama, karbon salımını doğrudan ya da dolaylı biçimde etkileyen unsurlar içermektedir. Bu kapsamda, üretim tekniklerinin modernize edilmesi, enerji ve su verimliliğinin artırılması, alternatif gübre sistemlerinin teşvik edilmesi ve tedarik zincirinin düşük karbonlu yapılarla entegre edilmesi gerekmektedir. Sektördeki bu

dönüşüm, sadece iklim politikaları açısından değil; aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirlik ve kırsal kalkınma kapsamında da temel bir zorunluluktur.

2.3. Emisyonların Belirlenmesi

Sera gazı emisyonlarının doğru ve sistematik biçimde belirlenmesi, iklim değişikliğiyle mücadele kapsamında alınacak önlemlerin başarısı için vazgeçilmezdir. Emisyon ölçüm, raporlama ve doğrulama sistemleri (MRV) sayesinde hem ulusal hem de sektörel düzeyde karbon ayak izi izlenebilir hale gelmekte, enerji üretimi gibi yüksek emisyonlu sektörlerde çevresel etkiler somut verilerle ortaya konulabilmektedir. Özellikle termik santraller gibi büyük ölçekli fosil yakıt kullanıcısı tesislerde, sera gazı salımlarının ölçülmesi yalnızca çevresel değil, aynı zamanda stratejik bir enerji yönetimi aracı hâline gelmiştir. Bu kapsamda Deveci (2019), termik santrallerde MRV sistemine dayalı sera gazı emisyon hesaplama süreçlerini detaylı biçimde incelemiş ve mevcut sistemlerde karşılaşılan zorluklara dair çözümler önermiştir. Çalışmada, özellikle ölçüm tekniklerinin standartlaştırılması, referans değerlerin tutarlılığı ve verilerin doğruluğunun sistematik denetime tabi tutulmasının önemine değinilmiştir. Ayrıca emisyonları azaltmak için santral içi enerji verimliliği uygulamaları, kazan teknolojilerinin modernizasyonu ve yakıt kalitesinin artırılması gibi iyileştirme önerileri sunulmuştur (Deveci, 2019). Bu sistemin etkili işletilmesi, yalnızca çevresel sürdürülebilirliği sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda enerji üretiminde maliyet-etkinlik ve yasal uyum gibi açılardan da avantaj sağlamaktadır.

Ölçüm sistemlerinin teknik arka planına dair bir diğer önemli yaklaşım, yaşam döngüsü değerlendirmesidir. Taşkın'ın (2018) yüksek lisans tezinde, linyit yakıtlı pilot bir termik santral için baca gazı emisyonlarının azaltım senaryoları yaşam döngüsü perspektifinden analiz edilmiştir. Bu çalışma, yakma teknolojisi, yakıt türü, filtre sistemleri ve atık yönetimi gibi süreçlerin bütünsel biçimde ele alınması gerektiğini göstermiştir. Özellikle baca gazı içerisindeki SO_2, NO_x ve partikül madde gibi bileşenlerin sera gazı etkisinin yanında insan sağlığı üzerindeki etkilerine de dikkat çekilmiştir. Çalışmada öne çıkan sonuç, yalnızca kısa vadeli salım değerlerinin değil, tüm üretim döngüsünün çevresel etkileriyle değerlendirilmesi gerektiği yönündedir (Taşkın, 2018). Enerji üretim teknolojilerinin çevresel etkilerini karşılaştırmalı olarak ele alan çalışmalar da, emisyon belirleme süreçlerinin karar destek sistemlerinde nasıl kullanılabileceğine ışık tutmaktadır. Goncaloğlu, Ertürk ve Erdal (2000), termik santraller ile nükleer santralleri

çevresel etki açısından karşılaştırdıkları çalışmalarında, özellikle CO_2 ve SO_2 gibi emisyonların yoğunluğu bakımından ciddi farklara işaret etmişlerdir. Nükleer santrallerin sera gazı salımı açısından daha avantajlı görünse de, atık yönetimi ve radyasyon riski gibi farklı çevresel parametrelerin dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir. Bu durum, enerji teknolojilerinin seçiminde yalnızca emisyon miktarına değil, tüm çevresel risk bileşenlerine bakılması gerektiğini göstermektedir (Goncaloğlu ve diğ., 2000).

Enerji kullanımının çevresel etkileri, yalnızca üretim aşamasında değil; tüketim ve kaynak türüne göre de değişiklik göstermektedir. Selici, Utlu ve İlten tarafından hazırlanan çalışmada, enerji tüketiminde fosil yakıt yoğunluğunun çevresel etkiler üzerindeki doğrudan etkisi vurgulanmakta, enerji politikalarının sürdürülebilir gelişmeye hizmet edecek şekilde dönüştürülmesi gerektiği ifade edilmektedir. Bu kapsamda yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması ve enerji verimliliğine dayalı dönüşüm politikalarının emisyonları azaltmada stratejik öneme sahip olduğu belirtilmektedir (Selici ve diğ., n.d.). Türkiye'deki genel enerji görünümü de emisyon belirleme sürecini doğrudan etkileyen yapısal veriler sunmaktadır. Koç ve arkadaşlarının çalışması, Türkiye'de enerji üretiminin hâlâ büyük oranda fosil yakıtlara dayalı olduğunu ve bu durumun emisyon yükünü sürekli kıldığını ortaya koymuştur. Çalışmada, Türkiye'nin enerji portföyü içinde linyit, taşkömürü ve petrokok gibi karbon yoğun kaynakların önemli yer tuttuğu belirtilmiş; bu da MRV sistemleriyle yapılacak izlemelerin gerekliliğini bir kez daha gözler önüne sermiştir (Koç ve diğ., 2018).

Bununla bağlantılı olarak, fosil yakıtların farklı türlerinin yanma performansı ve oluşturduğu emisyon miktarları da teknik düzeyde detaylı biçimde incelenmiştir. Topal, Durmaz ve Atımtay (2018), petrokok ve linyit gibi iki farklı fosil yakıt karışımının dolaşımlı akışkan yatakta yakılması sürecinde oluşan emisyonları karşılaştırmalı olarak analiz etmişlerdir. Bu çalışma, emisyon türlerinin yalnızca kullanılan yakıta değil, aynı zamanda yanma teknolojisine de bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Ayrıca, CFB (Circulating Fluidized Bed) teknolojilerinin özellikle NO_x ve CO emisyonlarının azaltılmasında etkili olduğu vurgulanmıştır (Topal ve diğ., 2018). Tüm bu veriler ışığında, sera gazı emisyonlarının belirlenmesi yalnızca nicel ölçümle sınırlı kalmamalı; kullanılan yakıt türü, yanma teknolojisi, tesis ölçeği, filtreleme sistemleri ve üretim verimliliği gibi çok boyutlu teknik faktörler ile birlikte değerlendirilmelidir. MRV

sistemleri bu çok katmanlı yapının izlenmesinde en temel araç olmakla birlikte, ölçüm verilerinin yaşam döngüsü perspektifinden, karşılaştırmalı teknoloji analizleriyle, enerji portföyü kapsamında ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda değerlendirilmesi, karar vericilere daha güçlü bir stratejik altyapı sunacaktır.

2.3.1. Emisyon Envanteri Oluşturma Yöntemleri

Emisyon envanteri oluşturma süreci, sera gazı salımlarının bilimsel temellere dayalı olarak hesaplanmasını, sınıflandırılmasını ve raporlanmasını içeren çok aşamalı bir yöntemsel yaklaşımdır. Bu süreç, atmosferdeki emisyonların hangi kaynaklardan, hangi oranlarda ve hangi zaman aralıklarında ortaya çıktığını sayısal olarak belirlemeye olanak tanır. Doğru bir emisyon envanteri, yalnızca iklim politikalarının değil, aynı zamanda enerji planlaması, hava kalitesi yönetimi ve karbon ticareti gibi çok sayıda stratejik alanın temelini oluşturur (Bang ve Khue, 2019). Envanter oluşturma yöntemleri genel olarak üç ana yaklaşım çerçevesinde şekillenir: doğrudan ölçüm, emisyon faktörü kullanımı ve modelleme tabanlı hesaplamalar. Doğrudan ölçüm yönteminde, sabit kaynaklardan salınan gazlar sürekli izleme sistemleri (CEMS) aracılığıyla gerçek zamanlı olarak ölçülür. Bu yöntem, en yüksek doğruluk düzeyine sahip olmakla birlikte maliyet, teknik altyapı ve bakım gerekliliği açısından zorluklar barındırır. Buna karşın emisyon faktörlerine dayalı yöntemler, belirli bir faaliyet düzeyi (örneğin yakıt tüketimi, üretim hacmi) ile standartlaştırılmış emisyon katsayılarını çarparak tahmini değerler sunar. Bu yaklaşım, daha geniş ölçekli envanterler için ekonomik ve pratik bir çözüm olsa da, bölgesel koşulları dikkate almaması nedeniyle belirsizlik içerir (Bang ve Khue, 2019; Li ve diğ., 2019).

Hareketli kaynaklar (örneğin deniz taşımacılığı, karayolu araçları) için ise konumsal veri tabanlı modelleme yöntemleri öne çıkar. Bu tür uygulamalarda araç tipleri, yakıt türleri, hız profilleri ve sefer sıklığı gibi parametreler modele entegre edilerek tahmini emisyon hesaplamaları yapılır. Özellikle gemi emisyonlarında AIS (Automatic Identification System) verileri ile motor performans katsayıları birleştirilerek çok değişkenli analizler yapılabilmektedir. Bu yöntemler, hareketli kaynakların düzensiz ve geniş alanlı doğası nedeniyle klasik sabit kaynak hesaplamalarından farklı olarak coğrafi bilgi sistemleri (GIS) ile entegre çalışmaktadır (Li ve diğ., 2019). Yeraltı karbon depolama gibi gelişmiş uygulamalarda ise emisyonların yalnızca yüzeyden atmosfere salınımı değil, aynı

zamanda jeolojik ortamlarda kimyasal dönüşüm süreçleri de izlenmektedir. Bu tip projelerde, yer altı sıvılarının kimyasal bileşimi, mineral doygunluk seviyeleri ve gaz-sıvı etkileşimleri analiz edilerek karbonun yer altında ne ölçüde tutulduğu belirlenir. Emisyon envanteri bu durumda yalnızca salım odaklı değil, aynı zamanda depolama ve geri dönüşüm süreçlerini de kapsayan çok boyutlu bir değerlendirme halini alır (Alfredsson ve diğ., 2013; Snæbjörnsdóttir ve diğ., 2017).

Günümüzde yaygınlaşan bir diğer yaklaşım, yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) destekli emisyon envanteridir. Bu yöntemde bir ürünün ya da hizmetin tüm üretim, kullanım ve bertaraf aşamaları boyunca neden olduğu doğrudan ve dolaylı emisyonlar analiz edilir. Böylece yalnızca üretim değil, hammadde temini, lojistik, enerji kullanımı ve atık süreçleri gibi zincirin tamamı dikkate alınarak kapsamlı bir karbon ayak izi elde edilir. Bu yöntem özellikle üretim sektörleri, ulaşım ve enerji gibi entegre sistemlerde toplam çevresel yükün anlaşılması açısından önem taşır (Bang ve Khue, 2019). Emisyon envanteri oluşturmanın en kritik yönlerinden biri de veri güvenilirliği ve zamansal çözünürlüktür. Veri kaynağının türü, güncelliği, ölçüm frekansı ve kapsamı envanterin doğruluğunu doğrudan etkiler. Eksik veya düzensiz veri kullanımı, ulusal ve bölgesel sera gazı raporlamalarında ciddi sapmalara yol açabilir. Bu nedenle günümüzde emisyon envanterleri yalnızca teknik hesaplama değil, aynı zamanda sürekli izleme, doğrulama ve kalite kontrol sistemleriyle desteklenmektedir (Li ve diğ., 2019).

Sonuç olarak, emisyon envanteri oluşturma yöntemleri, çevre yönetiminin şeffaf, bilimsel ve hesap verebilir bir şekilde yürütülmesini sağlayan stratejik araçlardır. Gerek doğrudan ölçüm gerekse modelleme temelli yaklaşımlar, politika geliştiricilere, sanayi temsilcilerine ve araştırmacılara iklim değişikliği ile mücadelede gerekli veri altyapısını sunar. Bu süreçte, teknolojik gelişmelerin izlenmesi ve metodolojik çeşitliliğin sağlanması, emisyonların doğru ve bütüncül biçimde yönetilebilmesinin anahtarıdır (Alfredsson ve diğ., 2013; Snæbjörnsdóttir ve diğ., 2017; Li ve diğ., 2019; Bang ve Khue, 2019).

2.3.2. IPCC Kılavuzları ve Hesaplama Yöntemleri

İklim değişikliği ile mücadelede sera gazı emisyonlarının doğru biçimde izlenebilmesi ve raporlanabilmesi için ülkelerin ortak metodolojiler çerçevesinde hareket etmesi

gerekmektedir (Coşkun ve Doğan, 2021). Bu kapsamda, Hükûmetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), tüm dünyada kabul gören sera gazı envanteri hesaplama sistematiğini sunan temel kurumsal yapı olarak öne çıkmaktadır. IPCC'nin yayımladığı teknik kılavuzlar, ülkelerin ulusal sera gazı envanterlerini oluştururken kullanabilecekleri bilimsel tabanlı metodolojileri standartlaştırmakta ve karşılaştırılabilir hale getirmektedir (Kurnuç ve diğ., 2022). IPCC Kılavuzları (Guidelines), emisyonların kaynağına göre sınıflandırılması, hesaplanması ve raporlanması için üç temel yöntem düzeyi sunar. Bu yöntemler, Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 olarak adlandırılır ve veri detayına ve ülkenin kapasitesine göre farklı karmaşıklık düzeylerini temsil eder.

Tier 1 yöntemi, IPCC tarafından sağlanan varsayımsal emisyon faktörleri ve temel faaliyet verileri kullanılarak yapılan en basit hesaplama yöntemidir. Bu yöntem, sınırlı veri altyapısına sahip ülkeler için başlangıç noktası olarak işlev görür. Tier 2 yöntemi, ülkeye özgü emisyon faktörlerinin ve daha ayrıntılı faaliyet verilerinin kullanıldığı orta düzey bir hesaplama modelidir. Tier 3 yöntemi ise yüksek çözünürlüklü, dinamik modellemelerle çalışan ve sürekli izleme sistemleriyle entegre çalışan gelişmiş emisyon hesaplama yaklaşımıdır. Bu yöntem genellikle gelişmiş ülkelerin emisyon envanteri sistemlerinde tercih edilmektedir (IPCC, 2019).

Kılavuzlar aynı zamanda emisyon kaynaklarını beş ana kategori altında toplamaktadır: enerji, endüstriyel prosesler ve ürün kullanımı (IPPU), tarım, arazi kullanımı değişikliği ve ormancılık (LULUCF), atık yönetimi ve diğer kaynaklar. Her kategori için detaylı alt sınıflamalar tanımlanmış ve her bir sınıflama için önerilen hesaplama yöntemleri, emisyon faktörleri ve varsayımlar açıklanmıştır (Çağlar, 2021). Örneğin, enerji kategorisinde fosil yakıt yanması, elektrik üretimi ve ulaşım gibi alt başlıklar bulunurken, tarım kategorisinde gübre kullanımı, pirinç yetiştiriciliği ve enterik fermantasyon gibi detaylı kaynaklar ele alınmaktadır (Dağlıoğlu, 2021). IPCC kılavuzları yalnızca teknik hesaplama yöntemlerini sunmakla kalmaz, aynı zamanda emisyon verilerinin belirsizlik analizlerini, doğrulama süreçlerini ve kalite güvence uygulamalarını da içerir. Özellikle emisyon hesaplamalarında kullanılan faktörlerin ve faaliyet verilerinin belirsizlik seviyeleri, raporların güvenilirliğini doğrudan etkiler. Bu nedenle kılavuzlar, ülkelerin belirsizlik tahminlerini nasıl yapmaları gerektiğini, hangi istatistiksel yöntemleri kullanmaları gerektiğini ve hangi durumlarda yerel veri üretiminin zorunlu olduğunu

açıkça tanımlamaktadır. Böylelikle sadece sayısal doğruluk değil, metodolojik şeffaflık da sağlanmış olur (Argun ve diğ., 2019).

IPCC kılavuzlarının zaman içinde revize edilmesi ve gelişen bilimsel bilgiye dayalı olarak güncellenmesidir. 1996, 2006 ve en son 2019 Refinement güncellemeleriyle birlikte, hem emisyon faktörleri hem de hesaplama yaklaşımları daha hassas, bölgesel ve sektörel ayrımlara duyarlı hale getirilmiştir. Bu süreç, ülkelerin gelişen teknoloji ve veri toplama kapasitesine paralel olarak daha gelişmiş ve kapsamlı envanterler hazırlamalarını teşvik etmektedir. 2019 Güncellemesi, özellikle gelişmekte olan ülkelerdeki uygulamalarda, tarımsal faaliyetler, enerji verimliliği ve arazi kullanımı gibi başlıklarda veri kalitesini artırma yönünde yeni yönlendirmeler sunmaktadır (Robinson ve diğ., 2020).

IPCC sisteminin en güçlü yönlerinden biri, şeffaf ve karşılaştırılabilir veri üretimini mümkün kılmasıdır. Tüm ülkeler, IPCC kılavuzları çerçevesinde hazırladıkları envanterleri Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) kapsamında raporlamakla yükümlüdür. Bu raporlar sayesinde küresel emisyon eğilimleri izlenebilmekte ve iklim anlaşmaları çerçevesinde ilerleme değerlendirilebilmektedir. Bu kapsamda, IPCC kılavuzları yalnızca teknik bir referans değil, aynı zamanda küresel iklim yönetişiminin temel taşıdır (Adenle ve Alshuwaikhat, 2017). IPCC kılavuzları ve hesaplama yöntemleri, sera gazı emisyonlarının yönetilmesi, azaltılması ve uluslararası düzeyde raporlanması açısından bilimsel temellere dayalı, kapsayıcı ve evrensel geçerliliğe sahip bir sistem sunar. Bu sistemin doğru anlaşılması ve uygulanması, sadece çevresel sürdürülebilirliğe değil, aynı zamanda şeffaf, güvenilir ve bilim temelli karar alma süreçlerine de hizmet eder. Ülkelerin iklim taahhütlerini yerine getirmesi, bu kılavuzlar çerçevesinde oluşturulmuş güvenilir envanterler ile mümkün hale gelmektedir (Filimonau ve diğ., 2021).

2.3.3. Ölçüm Teknolojileri ve Veri Toplama

Sera gazı emisyonlarının yönetilebilir hale gelmesi için ön koşul, bu emisyonların doğru, kesintisiz ve güvenilir şekilde ölçülebilmesidir (Çerçi, 2020). Ölçüm teknolojileri ve veri toplama sistemleri, çevresel izlemenin temelini oluşturmakla kalmaz; aynı zamanda iklim taahhütlerinin performans değerlendirmesini, sektör bazlı emisyon kontrolünü ve politika

geliştirmeye yönelik bilgi üretimini mümkün kılar. Bu nedenle, ölçüm teknolojilerinin gelişmişliği ve verinin toplanma biçimi, iklim değişikliğiyle mücadelede temel stratejik unsurlardan biridir (Kulsuwan ve diğ., 2019). Ölçüm sistemleri temel olarak iki ana kategoriye ayrılır: doğrudan ölçüm sistemleri ve dolaylı tahmin yöntemlerine dayalı veri toplama sistemleri. Doğrudan ölçüm sistemleri, genellikle sabit emisyon kaynaklarında kullanılan sürekli izleme sistemlerini (Continuous Emission Monitoring Systems – CEMS) içerir. Bu sistemler, baca gazlarından çıkan karbondioksit (CO_2), metan (CH_4), azot oksit (N_2O), kükürt dioksit (SO_2) ve diğer zararlı bileşenleri gerçek zamanlı olarak ölçerek dijital veri çıkışı sağlar (Schmitz ve diğ., 2004). Bu cihazlar hem emisyon miktarını hem de gazların kimyasal bileşimini analiz edebilen sensörlerle donatılmıştır. CEMS teknolojisi sayesinde veriler anlık olarak izlenebilir, kayıt altına alınabilir ve uzaktan erişimle kontrol edilebilir (Yaka ve diğ., 2015).

Bu teknolojilere ek olarak, taşınabilir analiz cihazları da mobil kaynaklarda (örneğin araçlar, küçük işletmeler veya saha bazlı tarımsal faaliyetler) kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Bu cihazlar, anlık ölçümler yapmak ve kısa süreli gözlemler için oldukça kullanışlıdır. Bununla birlikte, verinin sürekli izlenmesi gereken durumlarda, sabit sistemlerin sunduğu bütüncül izleme kapasitesi daha avantajlıdır (Valls-Val ve Bovea, 2021). Dolaylı veri toplama yöntemleri ise genellikle emisyon faktörleri, yakıt tüketimi verileri ve faaliyet düzeyi gibi istatistiksel girdilere dayanır. Doğrudan ölçümün teknik veya ekonomik olarak mümkün olmadığı durumlarda tercih edilir (Sippel ve diğ., 2018). Örneğin sanayide tüketilen kömür, doğal gaz veya petrokok miktarına dayalı olarak IPCC'nin belirlediği emisyon katsayıları kullanılarak tahmini emisyon değerleri elde edilir. Düşük maliyetli olması nedeniyle yaygın kullanılsa da, veri belirsizliği ve genelleme riski taşır. Bu yüzden yüksek çözünürlüklü karar süreçlerinde doğrudan ölçüm sistemlerinin tercih edilmesi önerilmektedir (Yañez ve diğ., 2020).

Yeni nesil ölçüm teknolojileri arasında uzaktan algılama (remote sensing) sistemleri, uydu temelli veri toplama ve İHA (drone) destekli ölçümler ön plana çıkmaktadır. Bu yöntemler özellikle büyük ölçekli tarım arazileri, sanayi kümeleri veya ormanlık alanlardaki karbon stok değişimlerinin izlenmesinde kullanılmaktadır (Kumaş ve diğ., 2019). Uydu sistemleri, atmosferdeki gaz yoğunluğunu algılayan spektral sensörlerle çalışır ve geniş alanlarda yaygın salım izleme imkânı sunar. Bu veriler, coğrafi bilgi

sistemleri (GIS) ve uzamsal analiz yazılımları ile entegre edilerek emisyon haritaları oluşturulabilir. Bu tür mekânsal veri analizleri, emisyonların bölgesel dağılımını ve değişim eğilimlerini ortaya koymada oldukça etkilidir (Eleren ve Öner, 2019). Veri kalitesi, bu ölçüm ve toplama sürecinin en kritik parametresidir. Ölçüm sıklığı, sensör doğruluğu, kalibrasyon periyotları ve veri doğrulama protokolleri, nihai envanterlerin güvenilirliğini doğrudan etkiler. Bu nedenle, emisyon ölçümlerinde kullanılan cihazların uluslararası akreditasyona sahip olması ve standartlara uygun şekilde kalibre edilmesi büyük önem taşır. Ayrıca verilerin toplanmasından sonra doğrulama ve kalite güvence (QA/QC) süreçlerinin uygulanması, sonuçların bilimsel geçerliliğini ve politika üretimindeki gücünü artırır (Çalışkan ve diğ., 2025).

Veri entegrasyonu da emisyon yönetiminin dijital altyapısını oluşturan temel bileşenlerden biridir (Atabey, 2013). Farklı ölçüm noktalarından gelen verilerin merkezi bir platformda toplanması, analiz edilmesi ve raporlanması, özellikle çok sektörlü sistemlerde yönetim kolaylığı sağlar (Turanlı, 2015). Bu amaçla geliştirilen yazılımlar, ölçüm sistemlerinden alınan verileri otomatik olarak analiz eden, trend raporları oluşturan ve politika simülasyonları gerçekleştirebilen yapılar içerebilir (Kurnuç ve diğ., 2022). Ölçüm teknolojileri ve veri toplama sistemleri, yalnızca bir izleme aracı değil; aynı zamanda karar destek sistemi olarak çalışmaktadır. Bu sistemler sayesinde emisyonlar sadece geçmişte olup bitenler olarak değil, aynı zamanda geleceğe yönelik risk analizleri ve stratejik planlamalar için de bir temel veri katmanı haline gelmektedir. Teknolojik gelişmelerin yakından izlenmesi, ülkelerin ve kurumların iklim politikalarını daha güçlü, şeffaf ve veri temelli bir zemine oturtmasını mümkün kılmaktadır (Dağlıoğlu, 2021).

2.4. Emisyon Azaltımı İçin Geliştirilen Yöntemler

Sera gazı emisyonlarının artışıyla birlikte küresel ölçekte başlatılan iklim mücadelesinin temel stratejilerinden biri, emisyon azaltımıdır. Bu amaçla geliştirilen yöntemler; enerji üretimi, sanayi, ulaşım, tarım ve atık gibi başlıca kaynak sektörlerde teknik, yapısal ve yönetsel düzeylerde uygulanmaktadır. Emisyonların azaltılmasına yönelik stratejiler; karbon yakalama ve depolama teknolojileri, yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş, enerji verimliliği uygulamaları ve yasal düzenlemeler olmak üzere farklı araçlarla yürütülmektedir (IPCC, 2005). Karbon yakalama ve depolama sistemleri (CCS), fosil

yakıt kullanan santrallerden çıkan karbondioksitin atmosfere salınmadan önce ayrıştırılması ve yer altına depolanmasını temel alır.

Bu teknoloji, termik santraller gibi büyük emisyon kaynakları için geliştirilen en önemli teknik azaltım yöntemlerinden biridir. IPCC tarafından hazırlanan özel rapora göre, karbon yakalama sistemleri; ön yakalama, yanma sırasında yakalama ve son yakalama olmak üzere üç teknikle uygulanabilir. Yakalanan CO_2'nin yer altı rezervuarlarında jeolojik olarak uzun süreli depolanmasıyla atmosferdeki sera gazı yoğunluğu azaltılabilmektedir (IPCC, 2005). Türkiye'de kurulu ve planlanan termik santral projeleri dikkate alındığında, karbon emisyonlarının büyük bölümü bu tesislerden kaynaklanmaktadır. Enerji Atlası (2019) verilerine göre, Türkiye genelinde kömür temelli enerji üretimi hem mevcut enerji portföyünün önemli bir parçasını oluşturmaktadır hem de emisyonlar açısından kritik risk barındırmaktadır. Bu nedenle termik santrallerin dönüşümü ya da bu santrallere entegre karbon yakalama teknolojilerinin yaygınlaştırılması, ülkenin emisyon azaltım stratejilerinde merkezi bir rol oynamaktadır (URL-5).

Yalnızca teknolojik çözümler değil, aynı zamanda düzenleyici mekanizmalar da emisyonların azaltılmasında belirleyicidir. Türkiye'de sera gazı emisyonlarının izlenmesi, raporlanması ve doğrulanması süreci, ilgili mevzuatlarla düzenlenmiştir. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 2015 yılında yayımlanan "Sera Gazı Emisyon Raporlarının Doğrulanması ve Doğrulayıcı Kuruluşların Yetkilendirilmesi Tebliği", şirketlerin emisyon raporlarını belirli bir formatta sunmalarını ve bu verilerin bağımsız kuruluşlar tarafından doğrulanmasını zorunlu kılmıştır. Bu uygulama, yalnızca şeffaflığı artırmakla kalmaz; aynı zamanda yüksek emisyon yapan kuruluşların sorumluluk üstlenmesini sağlayarak dolaylı olarak azaltımı teşvik eder. Enerji üretiminde emisyon azaltımı için bir diğer önemli yöntem ise yenilenebilir enerji kaynaklarının teşviki ve kullanımının yaygınlaştırılmasıdır. Güneş, rüzgar, hidroelektrik ve jeotermal kaynaklar, hem karbon salımı yapmadan enerji üretebilme kapasitesine sahip hem de uzun vadeli sürdürülebilirlik sunmaktadır.

Enerji Atlası (2019) verilerine göre, Türkiye'nin mevcut enerji haritası bu alanda potansiyel barındırmakla birlikte, fosil yakıt bağımlılığı nedeniyle bu geçişin hızlandırılması gerektiği anlaşılmaktadır. Tüm bu yöntemlerin başarılı olabilmesi için

hem teknik altyapının geliştirilmesi hem de kurumsal kapasitenin güçlendirilmesi gerekmektedir (URL-5). Karbon vergisi, sınırda karbon düzenlemeleri ve karbon ticaret sistemleri gibi piyasa temelli mekanizmalar da azaltım yöntemlerini destekleyen araçlar arasında yer almaktadır. Bu yaklaşımlar, kirletenin mali yük üstlenmesi prensibi doğrultusunda, ekonomik aktörleri daha az karbon salımı yapan teknolojilere geçmeye yönlendirmektedir. Emisyon azaltımına yönelik yöntemler yalnızca teknoloji ile sınırlı değildir; yönetim, mevzuat, ekonomik teşvikler ve kamu bilinci gibi çok boyutlu araçlarla desteklenmelidir. Bu stratejilerin etkili biçimde uygulanabilmesi, bütüncül bir iklim politikası anlayışının benimsenmesiyle mümkün olacaktır.

2.4.1. Enerji Verimliliği Uygulamaları

Enerji verimliliği, sera gazı emisyonlarını azaltmak için geliştirilen en etkili ve ekonomik yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Özellikle enerji üretimi ve tüketimi süreçlerinde yapılan teknik iyileştirmeler sayesinde daha az enerjiyle aynı çıktı elde edilebilmekte, böylece fosil yakıt tüketimi azalmakta ve emisyonlar doğrudan düşürülmektedir. Bu yaklaşım hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirliğe hizmet eden stratejik bir araç niteliğindedir (IPCC, 2019). Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi tarafından yayınlanan Enerji Raporuna (2013) göre termik santraller gibi enerji yoğun tesislerde uygulanan verimlilik artırıcı önlemler, emisyon azaltımı açısından oldukça kritik rol oynamaktadır. Bu tür tesislerde kullanılan kazan teknolojileri, buhar çevrim verimliliği, atık ısı geri kazanımı, baca gazı ısısının değerlendirilmesi ve proses otomasyonu gibi faktörler, doğrudan enerji verimliliği ile ilişkilidir. Bu unsurların geliştirilmesi sayesinde birim enerji başına düşen karbon emisyonu önemli ölçüde azaltılabilmektedir (Deveci, 2019).

Linyit gibi düşük kaliteli fosil yakıtların kullanıldığı enerji üretim sistemlerinde, baca gazı arıtımı ve enerji geri kazanımı ile verimlilik artırılabilir. Özellikle dolaşımlı akışkan yatak teknolojileri, yanma verimini artırırken aynı zamanda NO_x ve SO_2 gibi zararlı gazların salımını azaltmaktadır. Bu sistemlerde gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları, yakıtın daha etkin kullanılmasına olanak sağlayarak hem maliyetleri düşürmekte hem de emisyonları kontrol altına almaktadır (Topal ve diğ., ; Taşkın, 2018). Enerji verimliliği yalnızca teknik ekipman değişimiyle sınırlı olmayıp, aynı zamanda sistematik bir yönetim anlayışını da beraberinde gerektirir. Bu doğrultuda enerji yönetim sistemlerinin

kurulması, çalışan eğitimi, düzenli izleme ve denetim mekanizmaları gibi süreçler enerji verimliliğini kurumsallaştıran unsurlar olarak öne çıkar. Enerji performans izleme sistemleri sayesinde tüketim kalıpları analiz edilebilir, yüksek tüketim noktaları belirlenebilir ve hedef odaklı iyileştirme planları oluşturulabilir (Selici ve diğ., n.d.).

Türkiye'nin mevcut enerji görünümüne bakıldığında, enerji verimliliği uygulamalarının genel politika ve mevzuat çerçevesinde ele alındığı görülmektedir. Özellikle son yıllarda artan enerji talebi ve karbon salımlarına paralel olarak, enerji verimliliğine yönelik teşvik mekanizmaları ve yasal düzenlemeler önem kazanmıştır. Bu kapsamda, enerji yoğun sektörlerde enerji etütleri zorunlu hale getirilmiş, endüstriyel işletmelerin verimlilik artırıcı projelere yönlendirilmesi sağlanmıştır (Koç ve diğ., 2018). Verimlilik artırıcı uygulamalar yalnızca enerji üretiminde değil, aynı zamanda iletim ve dağıtım sistemlerinde de önemli avantajlar sağlamaktadır. İletim hatlarında kayıp oranlarının azaltılması, trafoların modernize edilmesi, reaktif güç yönetimi gibi teknik müdahaleler sayesinde sistem verimliliği artırılmakta, dolaylı yoldan emisyonlar düşürülmektedir. Aynı zamanda binalarda yalıtım uygulamaları, verimli aydınlatma sistemleri ve akıllı enerji kontrol teknolojileri gibi son kullanıcı düzeyindeki verimlilik uygulamaları da karbon ayak izinin azaltılmasına katkı sunmaktadır (IPCC, 2019).

Karbon azaltım politikalarının bir parçası olarak enerji verimliliği, sadece teknoloji değil aynı zamanda yönetim, planlama ve denetim süreçlerinin koordinasyonunu da gerektirir. Bu noktada sera gazı izleme ve raporlama sistemleri (MRV), verimlilik önlemlerinin çevresel etkisinin ölçülmesini sağlayan temel yapılardan biridir. MRV sistemleri sayesinde enerji verimliliği uygulamalarının sera gazı emisyonlarına etkisi somut verilerle izlenebilmekte, böylece karar vericiler için etkili bir geri bildirim mekanizması oluşturulmaktadır (Deveci, 2019). Ek olarak, fosil yakıtla çalışan santrallerin çevresel etkileriyle ilgili yapılan karşılaştırmalı çalışmalar da, enerji verimliliğinin yalnızca emisyonlarla sınırlı olmadığını, aynı zamanda hava kalitesi, su kullanımı ve atık üretimi gibi diğer çevresel parametreler üzerinde de belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Bu tür analizler, enerji sistemlerinin bütüncül çevresel değerlendirmesine olanak tanımakta ve sürdürülebilir enerji politikalarının temellerini oluşturmaktadır (Goncaloğlu ve diğ., 2000). Enerji verimliliği, sera gazı emisyonlarının azaltılmasında en etkili, uygulanabilir ve sürdürülebilir yöntemlerin başında gelmektedir. Bu yaklaşım, teknolojik gelişmelerle

desteklendiği takdirde hem ulusal ölçekte emisyon yükünü azaltmakta hem de enerji ithalatına olan bağımlılığı düşürerek ekonomik fayda sağlamaktadır. Dolayısıyla enerji verimliliği, iklim değişikliği ile mücadelede stratejik bir kaldıraç niteliğindedir.

2.4.2. Yakıt Dönüşümleri ve Temiz Enerji Kullanımı

Küresel ölçekte sera gazı emisyonlarının başlıca kaynağını oluşturan enerji sektörü, aynı zamanda karbon azaltımı açısından en büyük potansiyele sahip alandır. Fosil yakıt temelli enerji sistemlerinden yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarına geçiş, yalnızca çevresel sürdürülebilirlik açısından değil, enerji güvenliği ve ekonomik istikrar açısından da stratejik öneme sahiptir. Bu kapsamda yakıt dönüşümü, yani yüksek karbon içeriğine sahip kaynaklardan daha düşük karbonlu veya karbon nötr kaynaklara geçiş, emisyon azaltımında etkili ve uygulanabilir yöntemlerden biridir (Erdoğan, 2020). Yakıt dönüşümleri genellikle kömür gibi karbon yoğun kaynaklardan doğalgaz, biyokütle veya hidrojen gibi daha düşük karbon içerikli yakıtlara geçiş şeklinde gerçekleşmektedir. Bu geçişin teknik altyapısı, yakma teknolojilerinin uyumlaştırılması, enerji iletim sistemlerinin modernize edilmesi ve entegre dönüşüm planlarının hayata geçirilmesini içerir. Doğalgaz gibi fosil kaynaklar kısa vadeli bir "geçiş yakıtı" işlevi görürken, uzun vadeli hedefler arasında tamamen yenilenebilir enerjiye dayalı üretim sistemlerinin kurulması bulunmaktadır (Dritsaki, 2020).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, sadece emisyonları azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda iklim direncini ve çevresel bütünlüğü de desteklemektedir. Güneş ve rüzgar enerjisi başta olmak üzere jeotermal, hidroelektrik ve biyokütle gibi alternatif kaynaklar, sıfır veya çok düşük karbon salımıyla enerji üretimini mümkün kılmaktadır. Bu kaynakların yaygınlaştırılması, aynı zamanda ithal fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmakta ve ulusal enerji arz güvenliğini güçlendirmektedir (Akcan, 2020). Sanayi, ulaşım, tarım ve atık sektörlerinde gerçekleştirilen yakıt dönüşümleri de toplam emisyon azaltımına önemli katkı sağlamaktadır. Örneğin, tarım sektöründe dizel motorlarla çalışan sistemlerin biyoyakıtlarla uyumlu hale getirilmesi, tarım makinelerinde elektrikli alternatiflerin kullanımı ve enerji girdilerinin karbon yoğunluğunun düşürülmesi bu kapsamdaki uygulamalardır (Türker ve diğ., 2020).

Ulaşım sektöründe ise deniz taşımacılığı gibi yüksek emisyonlu faaliyetlerde LNG (sıvılaştırılmış doğalgaz) gibi alternatif yakıtların tercih edilmesi, hem hava kalitesi hem de iklim açısından olumlu sonuçlar doğurmaktadır (Aygül ve Baştuğ, 2020). Enerji dönüşümünün yalnızca kaynağa yönelik olmadığı, aynı zamanda enerji kullanım süreçlerinin çevresel etkilerinin de göz önüne alındığı unutulmamalıdır. Bu nedenle temiz enerji kullanımının değerlendirilmesi, yaşam döngüsü yaklaşımıyla yapılmalı; üretimden tüketime kadar olan tüm aşamalar dikkate alınmalıdır. Bu kapsamda, atıksu arıtma tesisleri gibi yüksek enerji tüketimli altyapı sistemlerinde kullanılan enerji kaynaklarının türü, tesisin çevresel performansını doğrudan etkilemektedir. Yenilenebilir enerji kullanan arıtma sistemleri, geleneksel sistemlere kıyasla çok daha düşük karbon ayak izi üretmektedir (Yapıcıoğlu ve Demir, 2020).

Yakıt dönüşümlerinin başarılı olabilmesi için yalnızca teknolojik altyapı değil; aynı zamanda düzenleyici çerçeve, finansman olanakları, kamu bilinci ve sektörler arası koordinasyon da kritik rol oynamaktadır. Bu geçiş süreci, kamu-özel sektör iş birlikleri, teşvik mekanizmaları, karbon vergisi uygulamaları ve stratejik enerji planlaması ile desteklenmelidir. Ayrıca dönüşüm sürecinde enerji adaleti ilkesi gözetilmeli, düşük gelirli grupların enerjiye erişimi risk altına alınmamalıdır (Erdoğan, 2020). Yakıt dönüşümleri ve temiz enerji kullanımı, iklim değişikliği ile mücadelede yalnızca teknik bir seçenek değil; aynı zamanda yapısal bir dönüşümün merkezinde yer alan stratejik bir gerekliliktir. Bu dönüşüm, ekonomik, çevresel ve toplumsal faydalarıyla birlikte değerlendirilerek uzun vadeli sürdürülebilirlik hedefleriyle bütünleştirilmelidir.

2.4.3. Karbon Yakalama ve Depolama (CCS)

Karbon yakalama ve depolama (Carbon Capture and Storage – CCS), atmosferdeki karbondioksit yoğunluğunun azaltılması için geliştirilen en ileri düzey teknolojilerden biridir. Bu yöntem, fosil yakıt temelli enerji üretimi ve endüstriyel prosesler sonucu oluşan CO_2'nin atmosfere salınmadan önce yakalanması, sıkıştırılması ve yer altı jeolojik formasyonlara enjekte edilerek uzun vadeli olarak depolanması esasına dayanır. Bu teknik, karbon salımlarının kaynağında müdahale edilmesini sağladığı için yüksek emisyonlu sektörlerde etkili bir azaltım aracıdır (Robinson ve diğ., 2020). CCS teknolojisi üç temel aşamadan oluşur: yakalama (capture), taşıma (transport) ve depolama (storage). Yakalama aşamasında, baca gazlarından ayrıştırılan CO_2, fiziksel veya kimyasal

yöntemlerle saflaştırılır. Bu işlem için en yaygın kullanılan yöntem, amin bazlı kimyasal çözeltiler aracılığıyla CO_2'nin absorbe edilmesidir. Ardından sıkıştırılan gaz, boru hattı veya tanker sistemleriyle uygun jeolojik formasyonlara taşınır. Depolama aşamasında ise karbondioksit, derin tuzlu akiferler, boş petrol ve gaz rezervuarları ya da bazaltik kayaçlar gibi doğal yer altı oluşumlarına enjekte edilerek güvenli biçimde saklanır (Adenle ve Alshuwaikhat, 2017).

Yüksek emisyonlu üniversite kampüsleri, büyük sanayi tesisleri ve şehir ölçekli sistemlerde karbon ayak izi ölçüm çalışmalarının yaygınlaşmasıyla, CCS'nin uygulanabilirliği daha görünür hâle gelmiştir. Kurumsal karbon ayak izi çalışmaları, hangi alanlarda emisyon yoğunluğunun daha fazla olduğunu ve bu emisyonlara hangi müdahale araçlarının uygulanabileceğini belirlemek için önemlidir. Bu kapsamda CCS teknolojisinin, yalnızca enerji üretimi değil; kampüs yapıları, tekstil gibi sanayi kolları ve kentsel yerleşimlerde de karbon azaltımı için potansiyel taşıdığı görülmektedir (Kurnuç ve diğ., 2022; Coşkun ve Doğan, 2021). IPCC Tier 1 ve DEFRA gibi hesaplama metodolojileriyle yapılan karbon ayak izi çalışmalarında, enerji tüketimi, ısınma sistemleri, ulaşım ve malzeme tüketimi kaynaklı salımların belirlenmesi sağlanmakta, bu veriler CCS gibi ileri teknolojilere yönelik kararların bilimsel dayanağını oluşturmaktadır (Çerçi, 2020; Kurnuç ve diğ., 2022). Özellikle üniversite kampüslerinde yapılan mekânsal emisyon haritalamaları, hangi bölümlerde CCS sistemlerinin kurulmasının daha etkili olacağını modellemeye imkân tanımaktadır (Adenle ve Alshuwaikhat, 2017).

Kentsel ölçekte yapılan karbon ayak izi analizleri de CCS teknolojisinin uygulanabileceği potansiyel alanların belirlenmesine katkı sunmaktadır. Konya/Selçuklu örneğinde olduğu gibi yerleşim bölgelerinde yapılan kapsamlı veri analizleri, hem tüketim kaynaklı emisyonları hem de arazi kullanım desenlerini ortaya koymakta; bu sayede karbon yakalama altyapılarının entegre edilebileceği noktalara dair ipuçları sunmaktadır (Argun, ve diğ., 2019). Enerji verimliliği çalışmaları ve mimari sürdürülebilirlik projeleri de CCS ile entegre biçimde değerlendirilebilir. Özellikle eğitim yapılarında enerji etkin tasarımlar ve karbon yönetimi stratejileri, bina bazlı karbon salımlarını düşürürken kalan emisyonların CCS ile telafi edilmesini sağlayabilir. Aydınlatma, havalandırma, ısıtma ve soğutma sistemlerinin düşük karbonlu hale getirilmesi, CCS altyapısının daha az yük altında çalışmasını sağlar ve sistemin verimliliğini artırır (Çağlar, 2021).

CCS teknolojilerinin etkinliği sadece teknik yeterlilikle değil, aynı zamanda maliyet, sosyal kabul, yasal düzenlemeler ve altyapı uygunluğu gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu nedenle uygulanabilirliğin artırılması için finansman modelleri, politika teşvikleri ve kamu farkındalığı gibi unsurların eş zamanlı geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca karbon vergisi, emisyon ticaret sistemleri ve yeşil sertifikasyon programları gibi piyasa temelli mekanizmalar, CCS teknolojisinin yaygınlaşmasını destekleyici araçlar olarak önem taşımaktadır (Erdoğan, 2020). Karbon yakalama ve depolama (CCS), yüksek emisyonlu faaliyetlerin karbonsuzlaştırılması için geliştirilmiş yenilikçi ve ileri düzey bir teknolojidir. Bu sistem, karbon ayak izi yüksek olan alanlarda doğrudan ve etkili bir azaltım imkânı sunmakta; aynı zamanda düşük emisyonlu geleceğe geçişte kritik bir rol oynamaktadır. CCS'nin sadece enerji üretiminde değil, şehirleşme, endüstri ve kurumsal yapılar gibi çok farklı alanlarda uygulanabilir olması, bu teknolojiyi iklim değişikliği ile mücadelede stratejik bir araç haline getirmektedir.

2.4.4. Süreç İyileştirmeleri ve Modernizasyon

Sera gazı emisyonlarının azaltılması yalnızca yeni teknolojilerin geliştirilmesiyle değil, aynı zamanda mevcut sistemlerin optimize edilmesi ve modernizasyon süreçlerinin etkin biçimde uygulanmasıyla da mümkündür. Süreç iyileştirmeleri, enerji üretiminden ulaşıma, sanayiden atık yönetimine kadar geniş bir yelpazede; sistem performansını artırmak, kayıpları azaltmak ve karbon yoğunluğunu düşürmek amacıyla yapılan teknik ve yapısal müdahaleleri kapsar (Bang ve Khue, 2019). İyileştirme süreçlerinin ilk adımı, mevcut faaliyetlerin ve altyapının detaylı biçimde analiz edilmesidir. Bu analiz, genellikle karbon ayak izi hesaplamaları ve emisyon envanterlerinin oluşturulmasıyla başlar. Böylece hangi faaliyetlerin ne kadar sera gazı salımı yaptığı belirlenerek müdahale noktaları ortaya konur. Bu çerçevede özellikle büyük ölçekli kurumlar, üniversiteler ve şehir yönetimleri karbon ayak izi ölçümleri yaparak operasyonlarını daha sürdürülebilir hale getirmeye çalışmaktadır (Turanlı, 2015).

Enerji üretimi, modernizasyon ihtiyacının en belirgin olduğu alanlardan biridir. Fosil yakıtla çalışan santrallerde yanma veriminin artırılması, atık ısı geri kazanım sistemlerinin kurulması, baca gazı temizleme ünitelerinin modernize edilmesi gibi teknik iyileştirmeler sayesinde, mevcut tesislerin emisyon profili önemli ölçüde iyileştirilebilmektedir. Bu tür modernizasyonlar, tesislerin tümüyle devreden

çıkarılmadan düşük karbonlu üretim yapmalarını sağlayarak geçiş sürecini daha ekonomik ve uygulanabilir kılar (Li ve diğ., 2019). Ulaşım sektöründe de süreç iyileştirmeleri sayesinde ciddi oranda karbon salımı azaltılabilir. Özellikle taşıma modlarının yeniden yapılandırılması, düşük emisyonlu yakıt kullanımına geçilmesi, filo modernizasyonu ve dijital rota optimizasyonu gibi uygulamalar sayesinde taşıma faaliyetlerinin çevresel etkisi minimuma indirilebilir. Bu tür iyileştirmeler, sadece gemi ve kara taşımacılığı için değil, aynı zamanda lojistik zincirlerinin tamamı için uygulanabilir (Li ve diğ., 2019).

Atık yönetimi ve arıtma sistemlerinde yapılan modernizasyon çalışmaları da doğrudan karbon azaltımına katkı sağlamaktadır. Arıtma sistemlerinin enerji tüketim profili, kullanılan ekipmanların verimliliği ve atıkların yeniden değerlendirilme oranları gibi parametreler, sürecin çevresel etkisini belirler. Bu kapsamda, enerji geri kazanımı, biyogaz üretimi ve dijital sensör sistemlerinin entegrasyonu gibi modern çözümler yaygınlaşmaktadır (Bang ve Khue, 2019). Biyoyakıt üretimi gibi alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesinde de süreç modernizasyonu kilit öneme sahiptir. Mikroalg gibi çevre dostu hammaddelerle yürütülen biyoyakıt üretimi, hem yüksek verimlilik sağlar hem de karbon ayak izini minimize eder. Üretim sürecinin mikrobiyal dönüşüm, fotobiyoreaktör sistemleri ve su geri kazanım teknolojileri ile desteklenmesi, bu sürecin çevresel performansını daha da iyileştirmektedir (Eleren ve Öner, 2019). Ayrıca karbon yakalama ve depolama (CCS) teknolojilerinde de modernizasyon önemli bir rol oynamaktadır. CCS sistemlerinin jeokimyasal etkileşim düzeyinde optimize edilmesi, mineralizasyon süresinin kısaltılması ve enjeksiyon güvenliğinin artırılması gibi teknik iyileştirmeler, karbonun yer altı formasyonlarında daha güvenli ve kalıcı olarak tutulmasını sağlar. Bu tür gelişmiş uygulamalar, karbon yönetiminin yalnızca yüzeyde değil, yer altında da sürdürülebilir biçimde yürütülmesini mümkün kılar (Alfredsson ve diğ., 2013; Snæbjörnsdóttir ve diğ., 2017). Süreç iyileştirmeleri ve modernizasyon, mevcut sistemlerin daha düşük emisyonlu ve daha verimli hale getirilmesini sağlayan temel müdahale alanlarındandır. Bu stratejiler, yeni teknolojilere geçiş sürecini hızlandırmakla kalmaz, aynı zamanda geçişin maliyetini azaltır, mevcut altyapıyı daha uzun süre kullanılır kılar ve sürdürülebilirlik politikalarını daha erişilebilir hale getirir. Sürdürülebilir kalkınma ve iklim hedeflerinin başarısı, bu iyileştirmelerin ne ölçüde sistematik ve yaygın biçimde uygulanabildiğiyle doğrudan ilişkilidir.

2.4.5. Atık Yönetimi ve Biyogaz Sistemleri

Sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik uygulamalarda atık yönetimi, hem doğrudan hem dolaylı katkı sağlayan önemli alanlardan biridir. Organik atıkların düzenli depolama yerine ayrıştırılarak biyolojik olarak işlenmesi, özellikle metan (CH_4) salımını azaltmak açısından kritik öneme sahiptir. Bu doğrultuda geliştirilen biyogaz sistemleri, hem atıkların enerjiye dönüştürülmesini sağlar hem de fosil yakıt kullanımının yerini alarak karbon ayak izini azaltır (Schmitz ve diğ., 2004). Atık yönetiminde çevresel performansın artırılması için ilk adım, emisyon kaynaklarının tespiti ve yönetim planlarının oluşturulmasıdır. Yükseköğretim kurumları ve yerel yönetimler gibi büyük ölçekli organizasyonlar, organik atık miktarlarını belirleyerek biyogaz üretim potansiyellerini analiz edebilir. Bu analizler, kampüslerin ve kamu alanlarının karbon ayak izine önemli katkılar sağlayan atık emisyonlarının sistematik olarak ele alınmasını mümkün kılar (Robinson ve diğ., 2018; Sippel ve diğ., 2018).

Biyogaz sistemleri, gıda atıkları, hayvansal gübreler ve diğer organik atıkların anaerobik sindirimi sonucu metan üretimini hedefleyen teknolojilerdir. Elde edilen biyogaz, elektrik üretiminde veya doğrudan ısıtma sistemlerinde kullanılabilir. Ayrıca süreç sonunda elde edilen sindirilmiş atık (digestate), tarımda organik gübre olarak değerlendirilebilir. Bu sistem hem emisyonları azaltmakta hem de döngüsel ekonomiye katkı sunmaktadır (Valls-Val ve Bovea, 2021). Karbon ayak izi çalışmaları, atık yönetimi uygulamalarının başarısını değerlendirmede en yaygın yöntemlerden biridir. Üniversiteler gibi yoğun nüfus barındıran yapılar, kampüs bazlı karbon ayak izi analizleriyle atık üretimini izlemekte ve biyogaz potansiyelini modellemektedir. Bu tür kurumlarda gıda atıkları başta olmak üzere kantin, yemekhane ve konaklama alanlarından toplanan biyolojik atıklar, entegre biyogaz tesislerine yönlendirilerek karbon salımı kayda değer ölçüde azaltılabilir (Yañez ve diğ., 2020; Yaka ve diğ., 2015).

Yerel yönetimler açısından da biyogaz sistemleri, katı atık düzenli depolama sahalarına alternatif olarak önemli çözümler sunar. Organik fraksiyonların ayrıştırılarak anaerobik işleme tabi tutulması sayesinde depolama sahalarında oluşan metan gazı kontrol altına alınabilir. Bu sayede hem sera gazı salımı azaltılır hem de enerji üretimi gibi ek faydalar sağlanır (Atabey, 2013). Bununla birlikte, biyogaz sistemlerinin başarısı yalnızca teknik kurulumla sınırlı değildir. Atıkların kaynağında ayrıştırılması, toplama sistemlerinin

etkinliği, halkın bilinç düzeyi ve yasal teşvik mekanizmaları bu sürecin sürdürülebilirliğini doğrudan etkiler. Ayrıca sistemin işletilmesi sırasında oluşan sızıntı ve kayıpların önlenmesi, elde edilen biyogazın kalitesinin artırılması gibi faktörler de verimliliği belirler (Schmitz ve diğ., 2004).

Atık yönetiminde süreç iyileştirme, sadece çevresel değil aynı zamanda ekonomik geri dönüşüm açısından da önemlidir. Organik atıklardan enerji elde edilmesi, enerji maliyetlerini düşürürken karbon kredisi sistemleriyle ekonomik kazanç da sağlayabilir. Bu sistemler aynı zamanda kurumsal sürdürülebilirlik stratejileri içerisinde yer alarak prestij artışı ve çevresel sorumluluk performansının güçlenmesine katkıda bulunur (Valls-Val ve Bovea, 2021). Atık yönetimi ve biyogaz sistemleri, düşük karbonlu kalkınma yolunda hem altyapısal hem de yönetsel düzeyde çok önemli bir yere sahiptir. Atıkların enerjiye dönüştürülmesiyle elde edilen çevresel ve ekonomik faydalar, emisyon azaltımı hedefleriyle doğrudan uyum içerisindedir. Bu süreçlerin yaygınlaştırılması, iklim değişikliği ile mücadelede yerel ve kurumsal düzeyde somut adımlar atılmasını sağlayacaktır.

2.4.6. ISO 14064-1 Standardı Kapsamında Nişasta Sektöründe Emisyon Hesaplama Yaklaşımı

Nişasta sektörü, tarımsal üretimden sanayiye uzanan çok aşamalı bir yapıya sahiptir ve bu süreçte doğrudan sera gazı (SGE) emisyonları önemli miktarda ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, nişasta endüstrisinde sera gazı emisyonlarının belirlenmesi, izlenmesi ve raporlanması için bilimsel ve uluslararası kabul görmüş bir yöntem olarak ISO 14064-1 standardı kullanılmaktadır. Bu standart, kuruluş düzeyinde sera gazı emisyonlarının sistematik bir biçimde hesaplanmasını ve yönetilmesini sağlayan bir çerçeve sunar. Nişasta sektörünün enerji yoğun prosesleri ve fosil yakıt kullanımı dikkate alındığında, ISO 14064-1'in uygulanması sektördeki çevresel performansın artırılması için kritik bir adımdır (Cano ve diğ., 2023).

ISO 14064-1 standardı, sera gazlarının organizasyon seviyesinde hesaplanmasını altı temel kategori üzerinden ele alır. Bu kategorilerden "Kategori 1 – Doğrudan Emisyonlar", nişasta üretim tesislerinde kömür, doğal gaz gibi yakıtların kullanıldığı buhar kazanları ve enerji üretim birimlerinden kaynaklanan emisyonların hesaplanmasını içerir. Nişasta

üretimi sırasında kullanılan yüksek sıcaklık prosesleri, özellikle kurutma ve ıslatma gibi aşamalarda ciddi miktarda enerji tüketmekte ve bu da CO_2 emisyonlarını doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, ISO 14064-1 standardı, bu tür faaliyetlerin doğru şekilde sınıflandırılması, ölçülmesi ve raporlanmasını sağlayarak, hem şirketin çevresel sorumluluklarını yerine getirmesine hem de karbon yönetim stratejilerini oluşturmasına olanak tanır (Bastianoni ve diğ., 2014). Standart kapsamında emisyonların hesaplanmasında genellikle "hesap temelli yöntem" tercih edilir. Bu yöntemde, yakıt tüketimi, enerji kullanımı ve proses girdilerine ilişkin veriler, emisyon faktörleri ile çarpılarak toplam sera gazı eşdeğeri hesaplanır. Türkiye'de bu kapsamda kullanılabilecek emisyon faktörleri IPCC 2006 Rehberi ve Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayımlanan ulusal veri tabanlarından temin edilebilir. Örneğin, bir nişasta tesisinde yıllık 1.000 ton kömür tüketiliyorsa, bu kömürün yanmasından kaynaklanan CO_2 emisyonu, standart bir emisyon faktörü kullanılarak ton CO_2 cinsinden hesaplanır. Bu hesaplama sonucu, firmanın yıllık karbon ayak izi belirlenir ve raporlanabilir hale gelir (Oblitas-Romero ve diğ., 2023).

ISO 14064-1 standardı sadece bir hesaplama aracı değil; aynı zamanda bir yönetim sistemidir. Bu sistem, kuruluşların kendi emisyon kaynaklarını analiz etmelerine, öncelikli alanları belirlemelerine ve emisyon azaltımı için stratejik planlar geliştirmelerine imkan sağlar. Nişasta sektöründe bu planlar, kömür kullanımının azaltılması, enerji verimli buhar kazanlarının kullanılması, proses optimizasyonları, ısı geri kazanım sistemlerinin devreye alınması gibi önlemleri kapsayabilir. Ayrıca, ölçüm ve raporlama sürecinde kalite kontrol (QA/QC) sistemlerinin kurulması, veri doğruluğunun artırılması açısından kritik öneme sahiptir. ISO 14064-1 standardı, nişasta sektöründe sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için bilimsel ve uygulama odaklı bir araç sunar. Bu standardın etkin kullanımı sayesinde sektör, yalnızca çevresel yükümlülüklerini yerine getirmekle kalmayıp, aynı zamanda uluslararası karbon düzenlemeleri ve iklim politikaları çerçevesinde rekabetçi bir konuma gelebilir. Bu yaklaşım, nişasta sanayiinde hem çevresel etkilerin azaltılması hem de üretim verimliliğinin artırılması açısından çift yönlü bir kazanım yaratır (Arı ve Kabakçı, 2024).

2.5. Mevzuat, Politikalar ve Teşvikler

Sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik teknik çözümlerin etkili olabilmesi için bu uygulamaların politika, mevzuat ve teşvik mekanizmaları ile desteklenmesi gereklidir. Karbon yönetiminin yalnızca teknolojik gelişmelerle değil, aynı zamanda düzenleyici çerçeveler, stratejik planlama ve ekonomik yönlendirmelerle sürdürülebilir hale gelmesi mümkündür. Bu kapsamda, ulusal ve uluslararası düzeyde geliştirilen yasal düzenlemeler ve teşvik sistemleri, emisyon azaltımının yönetsel altyapısını oluşturmakta; çevreye duyarlı üretim ve tüketim kalıplarının yaygınlaşmasını mümkün kılmaktadır (Şahin ve Önder, 2021). Avrupa Birliği başta olmak üzere gelişmiş ekonomiler, uzun yıllardır atık yönetimi, enerji verimliliği ve karbon salımı gibi çevresel sorunları düzenlemek adına kapsamlı politikalar yürürlüğe koymuştur. Avrupa Yeşil Mutabakatı bu çabaların en güncel ve kapsamlı örneğidir. Bu strateji kapsamında, 2050 yılına kadar net sıfır emisyon hedefine ulaşılması, atıkların döngüsel ekonomiye kazandırılması ve karbon yoğun sektörlerin dönüştürülmesi amaçlanmaktadır (Avrupa Komisyonu, 2019a). Bu hedeflere ulaşmak için mevzuat düzeyinde bağlayıcı yükümlülükler getirilmiş, karbon ticaret sistemleri ve çevresel vergilendirme politikaları teşvik edilmiştir (Avrupa Komisyonu, 2011).

Atık yönetimi politikaları da sera gazı emisyonlarının kontrolünde önemli rol oynamaktadır. Özellikle biyolojik atıkların düzenli depolamaya gitmeden önce ayrı toplanarak kompostlanması veya enerjiye dönüştürülmesi, metan salımını azaltan kritik uygulamalardır. Avrupa Çevre Ajansı tarafından yapılan değerlendirmelerde, atıkların düzenli depolamadan saptırılması yönündeki politikaların emisyon azaltımında etkili olduğu; ülkeler arası performans farklarının ise uygulanan mevzuatın kapsamı ve denetim etkinliğiyle doğrudan ilişkili olduğu belirtilmiştir (Avrupa Çevre Ajansı, 2009). Türkiye özelinde bakıldığında, iklim değişikliği ile mücadelede yasal ve kurumsal kapasitenin gelişmekte olduğu gözlemlenmektedir. Özellikle Avrupa Yeşil Mutabakatı'nın yansımaları çerçevesinde Türkiye, sanayi, tarım, enerji ve atık sektörlerinde yeni uyum politikaları geliştirmeye başlamıştır. Atık yönetimi alanında ise hem teknik altyapı hem de mevzuat düzeyinde ilerlemeler kaydedilmiş; geri dönüşüm oranlarını artıran ve depolama alanlarına giden atık miktarını azaltan politikalar hayata geçirilmiştir (Şahin ve Önder, 2021).

Veriye dayalı politika üretiminin önemi de bu noktada öne çıkmaktadır. Emisyon düzeylerinin izlenmesi, sektörel dağılımın belirlenmesi ve yıllar içindeki eğilimlerin analiz edilmesi için kapsamlı veri sistemlerinin oluşturulması gerekir. Avrupa Çevre Ajansı'nın sera gazı veri izleme platformu gibi araçlar, ülkelerin emisyon durumlarını karşılaştırmalı biçimde analiz etmelerine imkân tanımaktadır (Avrupa Çevre Ajansı, 2020). Bu tür sistemler, çevresel performansın ölçülmesi ve politika etkilerinin değerlendirilmesi açısından kritik rol oynamaktadır. Söz konusu mevzuat ve politikaların etkinliği büyük ölçüde uygulamaya alınan teşvik mekanizmalarına bağlıdır. Yeşil finansman, karbon ticareti, sürdürülebilir kamu alımları ve emisyon vergileri gibi ekonomik araçlar, emisyon azaltımını doğrudan ya da dolaylı biçimde desteklemektedir. Bu teşvikler sayesinde özel sektör, düşük karbonlu teknolojilere yatırım yapma konusunda daha istekli hale gelmekte; kamu kurumları da çevre dostu uygulamaları yaygınlaştırma konusunda daha güçlü bir pozisyona geçmektedir. Mevzuat, politikalar ve teşvikler, emisyon azaltım stratejilerinin bütünleyici ve sürdürücü unsurlarıdır. Bu yapıların bütüncül ve uyumlu biçimde çalışması, iklim değişikliği ile mücadelenin yalnızca niyet düzeyinde kalmamasını, somut ve ölçülebilir sonuçlar üretmesini sağlamaktadır. Bu kapsamda hem uluslararası uyum hem de yerel düzeydeki uygulama kapasitesi, çevresel hedeflere ulaşmada belirleyici olacaktır. Mevzuata uyumun izlenebilmesi ve firmalara yönelik politika ile teşviklerin etkin biçimde uygulanabilmesi için öncelikli adım, emisyonların belirlenmesidir. Emisyonların belirlenmesine ilişkin adımlar ise Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2. ISO 14064-1 Standardına Göre Sera Gazı Emisyonlarının Belirlenmesi

2.5.1. Türkiye'deki Yasal Düzenlemeler

Türkiye'de iklim değişikliğiyle mücadele kapsamında geliştirilen yasal düzenlemeler, son yıllarda hız kazanan çevre politikalarının ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin temel yapı taşını oluşturmaktadır. Bu düzenlemeler, emisyonların kontrol altına alınması, sera gazlarının izlenmesi, çevresel yükümlülüklerin netleştirilmesi ve yeşil dönüşümün yönlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle Cumhurbaşkanlığı tarafından 2021 yılında açıklanan 2053 Net Sıfır Emisyon ve Yeşil Kalkınma Hedefi, bu yasal zeminin daha da güçlendirilmesine yönelik stratejik bir dönüm noktası olmuştur (URL-1). Türkiye'nin iklim mevzuatının temelini oluşturan yasal metinlerden biri 2872 sayılı Çevre Kanunu'dur. Bu kanun; çevrenin korunması, kirletilmesinin önlenmesi ve sürdürülebilir kaynak kullanımı ile ilgili genel ilkeleri tanımlar. Kanun çerçevesinde çıkarılan yönetmelikler ve tebliğlerle, enerji, sanayi, ulaşım ve atık gibi sektörlerde çevresel yükümlülükler belirlenmiş; çevre izinleri, denetim ve yaptırım mekanizmaları oluşturulmuştur.

Son yıllarda iklim odaklı yeni mevzuatların hazırlanması yönünde önemli gelişmeler yaşanmıştır. 9 Temmuz 2025 yılında yayımlanan İklim Kanunu, Türkiye'nin iklim değişikliğiyle mücadele çerçevesini yasal bir zemine oturtma amacını taşımaktadır. Bu kanunda, emisyon ticareti sisteminin kurulması, ulusal emisyon azaltım hedeflerinin tanımlanması ve sektör bazlı karbon düzenlemelerinin oluşturulması gibi unsurlar yer almaktadır. Bu kanunla beraber Türkiye'nin Paris Anlaşması kapsamındaki taahhütlerini yerine getirme süreci yasal bir bağlayıcılığa kavuşacaktır (İklim Kanunu, 2025). Yasal düzenlemelerin dayandığı temel veri altyapısını ise sera gazı envanter raporları ve istatistiksel izleme sistemleri oluşturmaktadır. Türkiye İstatistik Kurumu (2023) tarafından yayımlanan Sera Gazı Emisyon İstatistikleri, yıllık emisyon eğilimlerini sektör bazında sunmakta ve karar vericiler için önemli bir referans sağlamaktadır. 2023 verilerine göre Türkiye'nin toplam sera gazı emisyonları artış eğilimini sürdürmekte olup, enerji ve sanayi sektörleri başlıca kaynaklar olarak öne çıkmaktadır (URL-2). Bu verilerin hazırlanması ve raporlanması sürecini yürüten Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, aynı zamanda Ulusal Sera Gazı Emisyon Envanteri Raporları'nı da hazırlamaktadır. Bu raporlar, IPCC metodolojilerine uygun olarak düzenlenmekte ve Türkiye'nin emisyon izleme altyapısını uluslararası standartlarla uyumlu hale

getirmektedir. 2023 envanter raporunda, sera gazı emisyonlarının kaynaklara göre dağılımı, metodolojik açıklamalar ve yıllar itibariyle karşılaştırmalı veriler sunulmuştur (URL-3)

Türkiye Büyük Millet Meclisi bünyesinde faaliyet gösteren İklim Değişikliğiyle Mücadele Komisyonu, iklim yasası hazırlıklarına katkı sağlayan teknik ve siyasi bir platform işlevi görmektedir. TBMM (2021), komisyon raporlarında, karbon fiyatlaması, yeşil finansman, sanayi dönüşümü, eğitim ve kamu bilinci gibi farklı başlıklarda öneriler sunulmakta; ayrıca Avrupa Yeşil Mutabakatı'nın Türkiye ekonomisine olan etkileri değerlendirilerek uyum stratejileri geliştirilmektedir. Türkiye'nin emisyon azaltımı konusunda hukuki temelleri atılmış olsa da uygulama aşamasında kapasite geliştirme ihtiyacı devam etmektedir. Özellikle sektör bazlı emisyon sınırları, karbon piyasalarının oluşturulması ve özel sektörün teşvik edilmesi gibi alanlarda ikincil düzenlemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, izleme, raporlama ve doğrulama (MRV) sistemlerinin daha etkin işletilmesi, yeni yasal düzenlemelerin başarısını doğrudan etkileyecektir. Türkiye'deki yasal düzenlemeler, iklim değişikliği ile mücadele sürecine kurumsal ve yapısal bir çerçeve sunmakta; veri temelli ve şeffaf bir çevre yönetimi anlayışını teşvik etmektedir. Ancak bu yasal yapıların etkili olabilmesi için sürekli güncellenmesi, uygulamaya geçirilmesi ve toplumsal katılımla desteklenmesi gerekmektedir. Bu süreçte uluslararası gelişmelerin takip edilmesi ve Türkiye'nin kendi ulusal gerçeklikleriyle bütünleştirilmiş, dinamik bir mevzuat sistemine sahip olması büyük önem taşımaktadır.

2.5.2. AB Yeşil Mutabakatı ve Etkileri

Avrupa Birliği'nin iklim değişikliğiyle mücadeledeki en kapsamlı girişimi olan Avrupa Yeşil Mutabakatı (European Green Deal), yalnızca AB sınırları içinde değil, küresel ölçekte çevre politikalarını etkileyen stratejik bir yol haritası niteliği taşımaktadır. 2019 yılında kamuoyuna sunulan bu girişim, Avrupa'yı 2050 yılına kadar iklim-nötr ilk kıta yapma hedefiyle şekillendirilmiştir. Bu hedef doğrultusunda, enerji, sanayi, ulaşım, tarım, finans, ticaret ve atık yönetimi gibi çok sayıda sektörde dönüştürücü politikalar devreye alınmıştır (Avrupa Komisyonu, 2019a). Yeşil Mutabakat yalnızca bir çevre stratejisi değil; aynı zamanda büyüme odaklı bir kalkınma modeli olarak da tasarlanmıştır. Ekonomik büyümenin kaynak kullanımından ayrıştırılması hedeflenmekte ve bu amaç doğrultusunda döngüsel ekonomi, yenilenebilir enerji, karbon ticaret sistemleri ve yeşil

finansman gibi politik araçlar yaygınlaştırılmaktadır (Avrupa Komisyonu, 2019b). Bu yapısal dönüşümün temelinde adil geçiş ilkesi yer almakta; çevresel, sosyal ve ekonomik yönlerin bütüncül bir şekilde yönetilmesi öngörülmektedir.

Yeşil Mutabakat'ın önemli bileşenlerinden biri olan atık yönetimi ve kaynak verimliliği, emisyonların azaltılmasında kritik rol oynamaktadır. AB, atık üretimini önlemeye ve atıkların tekrar kullanımı ile geri dönüşümünü artırmaya yönelik bağlayıcı mevzuatlar geliştirmiştir. Ayrıca, biyolojik atıkların enerjiye dönüştürülmesi ve düzenli depolamanın azaltılması gibi uygulamalar da desteklenmektedir. Eurostat verilerine göre, atık yönetimindeki bu dönüşüm, özellikle metan (CH_4) gibi güçlü sera gazlarının azaltılmasında önemli katkılar sağlamıştır (Avrupa Komisyonu, 2020a). Bir diğer dikkat çeken unsur ise metan stratejisidir. Avrupa Komisyonu 2020 yılında, enerji üretimi, tarım ve atık sektörlerinde metan salımını azaltmak amacıyla özel bir strateji açıklamıştır. Bu kapsamda, izleme ve raporlama sistemlerinin güçlendirilmesi, teknik sızıntıların önlenmesi ve biyogaz üretiminin teşviki gibi önlemler hayata geçirilmiştir. Strateji kapsamında ayrıca, AB dışı ticaret ortaklarının da metan emisyonlarını izlemeleri ve raporlamaları yönünde teşvik edilmeleri öngörülmektedir (Avrupa Komisyonu, 2020b).

Yeşil Mutabakat'ın küresel düzeyde etkileri de son derece önemlidir. AB, karbon ayak izi yüksek olan ürünlere yönelik sınırda karbon düzenlemesi (Carbon Border Adjustment Mechanism) gibi araçlarla dış ticarette iklim kriterlerini entegre etmeye başlamıştır. Bu durum, özellikle AB ile yoğun ticaret ilişkisi içinde olan Türkiye gibi ülkeleri kapsamlı uyum politikaları geliştirmeye zorlamaktadır (Şahin ve Önder, 2021). Uyum sağlanamaması hâlinde rekabet gücü zayıflayabilir, dolayısıyla ekonomik riskler söz konusu olabilir. Ayrıca Yeşil Mutabakat, yükseköğretim kurumları, sanayi kuruluşları ve yerel yönetimler gibi çok farklı aktörleri kapsam içine alarak, mikro düzeyde de emisyon azaltımına katkı sağlamayı hedeflemektedir. Kurumlar, karbon ayak izi hesaplamaları yapmaya, sürdürülebilirlik stratejileri oluşturmaya ve yeşil dönüşüm yatırımlarını hızlandırmaya teşvik edilmektedir. Bu yönüyle Yeşil Mutabakat, yalnızca devlet politikalarına değil, bireysel ve kurumsal düzeydeki çevre davranışlarına da yön vermektedir (Avrupa Komisyonu, 2019c). Avrupa Yeşil Mutabakatı sadece bir politika çerçevesi değil, aynı zamanda iklim temelli yeni bir kalkınma paradigmasıdır. Bu dönüşüm, ekonomik büyümeyi çevresel sürdürülebilirlik ilkeleriyle uyumlu hale

getirmeyi amaçlamakta ve küresel düzeyde çevresel yönetişimin şekillenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Hem AB üyesi ülkelerde hem de ticaret ortağı olan ülkelerde, Yeşil Mutabakat uyum süreci, karbon nötr bir gelecek için vazgeçilmez bir adımdır.

2.6. Ekonomik ve Çevresel Etkiler

Sera gazı emisyonlarının artışı, yalnızca çevresel değil, aynı zamanda ekonomik dengeleri de doğrudan etkileyen çok boyutlu bir krizdir. Küresel ısınma, iklim değişikliği ve doğal kaynakların tükenmesi gibi çevresel tehditlerin ekonomik yansımaları, üretim maliyetlerinden finansal risklere kadar geniş bir alana yayılmaktadır. Bu nedenle sera gazı emisyonlarının kontrol altına alınması, çevre politikalarıyla birlikte ekonomik stratejileri de içine alan bütüncül bir yaklaşımla ele alınmalıdır (Çabuk, 2011). Enerji sektörü, hem sera gazı emisyonlarının ana kaynağı hem de ekonomik kalkınmanın temel yapı taşıdır. Ancak fosil yakıt temelli enerji üretimi, yüksek karbon salımı nedeniyle hem çevresel riskler hem de ekonomik kırılganlıklar yaratmaktadır. Emisyon azaltımı için geliştirilen düşük karbonlu enerji stratejileri, uzun vadede enerji güvenliği ve fiyat istikrarı sağlayarak ekonomik sürdürülebilirliği desteklemektedir. Türkiye özelinde değerlendirildiğinde, enerji sektörü kaynaklı emisyonların sürdürülebilir kalkınma hedefleri ile çeliştiği ve bu durumun acil yapısal dönüşüm gerektirdiği görülmektedir (Kaygusuz, 2009). Binek otomobillerde kullanılan fosil yakıtlar, hem hava kalitesinin bozulmasına hem de sera gazı emisyonlarının artmasına neden olmaktadır. Taşımacılık sektörü kaynaklı karbon salımı, şehir içi yaşam kalitesini düşürmekte, sağlık harcamalarını artırmakta ve çevreye olan baskıyı artırmaktadır. Bu kapsamda geliştirilen düşük emisyonlu taşıt teknolojileri, çevresel kazanımların yanı sıra uzun vadede yakıt tasarrufu sağlayarak ekonomik yükleri azaltmaktadır (Akgerman ve Topçu, 2011). Özellikle şehir içi ulaşımda karbon emisyonlarını azaltan uygulamalar, enerji tüketimindeki verimlilikle birleştiğinde kentlerin ekonomik rekabetçiliğini de olumlu yönde etkiler.

Emisyon azaltımı politikalarının ekonomik etkileri, kısa vadede bazı maliyetler oluştursa da, uzun vadede iklim değişikliğinin önlenmesi sayesinde çok daha büyük ekonomik zararların önüne geçilmesini sağlar. Bu nedenle, karbon fiyatlandırması, çevre vergileri, emisyon ticareti gibi piyasa bazlı ekonomik araçlar, çevre dostu dönüşümün finansal sürdürülebilirliğini sağlar. Karbon maliyetinin içselleştirilmesi, kirletenin bedel ödemesi

prensibini devreye sokarak çevresel sorumluluğu ekonomik sisteme entegre eder (Çabuk, 2011). Ekonomik etkilerin daha sağlıklı analiz edilmesi için emisyon trendlerinin öngörülmesi büyük önem taşır. Bu doğrultuda yapılan zaman serisi analizleri ve modellemeler, özellikle enerji kaynaklı emisyonların gelecekteki olası düzeylerini ortaya koyarak politika geliştiricilere stratejik bir perspektif sunar. Türkiye özelinde yapılan eğilim analizleri, enerji tüketimi arttıkça CO_2 emisyonlarının da artma eğiliminde olduğunu, dolayısıyla yenilenebilir enerjiye geçişin yalnızca çevresel değil, ekonomik zorunluluk olduğunu göstermektedir (Köne ve Büke, 2010). Sürdürülebilir kalkınma, yalnızca çevresel etkilerin azaltılmasıyla değil; ekonomik büyümenin kaynak verimliliğiyle desteklenmesiyle mümkündür. Bu kapsamda, hem üretici hem de tüketici düzeyinde enerji verimliliği, geri dönüşüm ve atık yönetimi uygulamalarının yaygınlaştırılması, hem karbon ayak izini düşürmekte hem de kaynakların daha ekonomik kullanımını sağlamaktadır. Böylece doğal varlıkların korunmasıyla birlikte ekonomik tasarruf sağlanmakta, iklim politikaları ile kalkınma hedefleri birleştirilmektedir (Kaygusuz, 2009). Sera gazı emisyonlarının azaltımı hem çevresel hem de ekonomik düzlemde çok boyutlu kazanımlar sağlar. Çevreye duyarlı politikalar, doğru iktisadi araçlarla desteklendiğinde, yalnızca doğayı korumakla kalmaz; aynı zamanda ekonomik riskleri azaltır, finansal istikrarı güçlendirir ve toplumsal refahı artırır. Bu nedenle iklim politikaları, yalnızca çevreci değil, aynı zamanda ekonomik olarak da rasyonel bir tercih olarak ele alınmalıdır.

2.6.1. Maliyet–Fayda Analizi

İklim değişikliği ile mücadelede uygulanacak politikaların ve teknolojik müdahalelerin başarılı olabilmesi için sadece çevresel değil, ekonomik açıdan da sürdürülebilir olması gerekir. Bu noktada maliyet–fayda analizi, iklim politikalarının uygulanabilirliğini değerlendirmede kullanılan en temel yaklaşımlardan biridir. Maliyet–fayda analizi, bir yatırım veya müdahalenin toplam toplumsal maliyetini, beklenen çevresel ve ekonomik faydalarla karşılaştırarak net etkiyi hesaplamayı hedefler (Akcan ve diğ., 2018). Emisyon azaltımına yönelik teknolojik yatırımlar, başlangıçta yüksek sermaye gerektirse de uzun vadede yakıt tasarrufu, çevre sağlığı üzerindeki olumlu etkiler ve iklim değişikliği kaynaklı risklerin azalması gibi çok yönlü faydalar sağlar. Bu nedenle özellikle enerji ve sanayi sektörlerinde yapılacak yatırımların geri dönüş süresi ve etkisi detaylı ekonomik

analizlerle ortaya konmalıdır. Termik santrallerde uygulanan sürekli izleme ve iyileştirme sistemleri (MRV), kısa vadede ek maliyet oluştursa da, emisyon azaltımı yoluyla çevre cezası riskini ortadan kaldırmakta ve sürdürülebilir üretim sağlayarak rekabet avantajı kazandırmaktadır (Deveci, 2019).

Maliyet–fayda analizinin en somut uygulama alanlarından biri de biyoyakıt teknolojileridir. Mikroalgler gibi çevre dostu hammaddelerle üretilen biyoyakıtlar, fosil yakıtlara kıyasla daha düşük karbon salımı ile dikkat çeker. Üretim tesisleri için gerekli yatırım maliyeti yüksek olsa da, yerel üretim olanakları, tarım atıklarının değerlendirilmesi ve karbon ayak izinin düşürülmesi gibi faktörler, biyoyakıt sistemlerini uzun vadeli fayda sağlayan yatırımlar haline getirmektedir (Çalışkan ve diğ., 2019). Sanayi sektöründe yapılan temiz üretim ve eko-verimlilik uygulamaları, maliyet–fayda analizinin bir başka önemli uygulama alanıdır. Proses optimizasyonları, atıkların geri kazanımı ve enerji verimliliği projeleri hem doğrudan maliyetleri düşürmekte hem de üretim verimliliğini artırmaktadır. Türkiye'de gerçekleştirilen bazı uygulamalarda, eko-verimlilik yatırımlarının iki ila dört yıl içinde kendini amorti ettiği ve üretim süreçlerine rekabet avantajı kazandırdığı gözlemlenmiştir (Davarcıoğlu ve Lelik, 2017).

Karbon ayak izi hesaplamaları da maliyet–fayda analizine katkı sağlayan önemli veri kaynaklarıdır. Kurumsal düzeyde yapılan karbon ayak izi analizleri, hangi faaliyetlerin ne ölçüde emisyona neden olduğunu belirleyerek öncelikli müdahale alanlarını ortaya koyar. Bu sayede sınırlı kaynaklarla en yüksek faydanın elde edilebileceği alanlar belirlenebilir. Aynı zamanda çevreye duyarlı kurum imajı oluşturarak sosyal fayda üretimi ve kamuoyu desteği kazanılması da bu analizlerin dolaylı getirileri arasındadır (Üreden ve Özden, 2018). Maliyet–fayda analizi, ayrıca zaman serisi modellemeleri ile desteklendiğinde geleceğe yönelik karar süreçlerinde daha etkili hale gelir. Emisyon trendlerinin tahmin edilmesi, hangi sektörlerde nasıl bir emisyon azaltımı hedeflenmesi gerektiğini ortaya koyar. Bu doğrultuda ARIMA gibi istatistiksel modelleme teknikleri, gelecek senaryolarına dayalı maliyet projeksiyonlarının oluşturulmasını mümkün kılar (Nyoni ve Bonga, 2019). Maliyet–fayda analizi; karbon azaltım stratejilerinin teknik etkinliğini, ekonomik sürdürülebilirliğini ve sosyal kabul düzeyini bütüncül şekilde değerlendiren vazgeçilmez bir araçtır. Geliştirilen her yeni politika veya teknoloji, yalnızca çevreye değil; aynı zamanda toplumsal refaha, ekonomik verimliliğe ve

kurumsal sürdürülebilirliğe katkı sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır. Bu nedenle iklim değişikliği ile mücadelede her yatırımın arkasında sağlam bir maliyet–fayda perspektifi bulunmalıdır.

2.6.2. Emisyon Azaltımının Çevresel Kazanımları

Sera gazı emisyonlarının azaltılması, yalnızca iklim değişikliğinin yavaşlatılmasına değil, aynı zamanda hava, su ve toprak kalitesinin iyileştirilmesine, biyoçeşitliliğin korunmasına ve insan sağlığının geliştirilmesine doğrudan katkı sağlar. Emisyon kaynaklı çevresel yüklerin azaltılmasıyla birlikte, ekosistem hizmetlerinin sürdürülebilirliği sağlanmakta; özellikle enerji, ulaşım, atık ve tarım gibi yüksek emisyonlu sektörlerde çevresel denge yeniden yapılandırılmaktadır (Rahman ve diğ., 2017). Ulaşım sektörü, karbondioksit (CO_2) ve azot oksit (NO_x) gibi zararlı gazların ana kaynaklarından biridir. Fosil yakıtla çalışan kara ve hava ulaşım araçları, özellikle şehir içi bölgelerde hava kirliliğinin artmasına ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratılmasına neden olmaktadır. Emisyonların azaltılması sayesinde partikül madde yoğunluğu düşmekte, solunum yolu hastalıkları azalmaktadır. Örneğin, karayolu taşımacılığı kaynaklı emisyonların azaltılması, kent içi hava kalitesini artırmakla kalmaz, aynı zamanda kentsel ısı adası etkisinin hafiflemesine de katkı sağlar (Rahman ve diğ., 2017; Babaoğlu ve Özgünoğlu, 2017).

Atıksu arıtma tesisleri de emisyon azaltımının çevresel faydalarının somutlaştığı alanlardan biridir. Arıtma süreçlerinde kullanılan enerji türü ve verimlilik seviyesi, bu tesislerin karbon ayak izini doğrudan etkiler. Düşük karbonlu enerji sistemlerinin arıtma tesislerine entegre edilmesi, hem sera gazı salımını azaltmakta hem de su kalitesini artırarak alıcı ortamların ekolojik sağlığını korumaktadır. Bu durum, sucul yaşam üzerindeki baskının azalmasına ve ekosistemlerin dengesinin korunmasına doğrudan katkı sunar (Singh ve Maurya, 2016; Yapıcıoğlu ve Demir, 2017). Emisyon azaltımının bir diğer önemli çevresel kazanımı, iklim değişikliğinin etkilerinin yavaşlatılmasıdır. Atmosferdeki sera gazı konsantrasyonunun düşürülmesi, küresel sıcaklık artış hızını sınırlamakta ve buna bağlı olarak ekstrem hava olaylarının sıklığı ve şiddetini azaltmaktadır. Kuraklık, sel, fırtına gibi doğa olaylarının daha az zarar verici hale gelmesi, doğal alanların korunması ve tarımsal üretimin sürdürülebilirliği açısından kritik önem taşır (Mander ve diğ., 2016).

Bununla birlikte, emisyonların azaltılması yalnızca insan kaynaklı etkilerle sınırlı kalmaz; doğanın kendi dengesini korumasına da yardımcı olur. Özellikle orman, sulak alan ve kıyı ekosistemleri gibi karbon tutma kapasitesi yüksek doğal yutakların korunması, hem mevcut emisyonları nötralize eder hem de bu alanların bozulmasının önüne geçerek ilave salımların oluşmasını engeller. Bu sayede karbon döngüsü üzerindeki baskı azalır ve doğal sistemler iklim değişikliğine karşı tampon bölge işlevi görür (Mander ve diğ., 2016). Emisyon azaltım stratejilerinin uzun vadeli çevresel faydalarının hesaplanmasında modelleme ve tahminleme teknikleri de önemli rol oynar. ARIMA gibi zaman serisi modellemeleri kullanılarak yapılan öngörüler, emisyonların azaltılması durumunda gelecekteki atmosferik konsantrasyon değişikliklerini ve bunun doğaya olan etkilerini değerlendirmeye olanak tanır. Bu sayede, müdahale edilmediği durumda oluşabilecek riskler ile uygulanan stratejilerin getirdiği kazanımlar bilimsel olarak karşılaştırılabilir hale gelir (Rahman ve Hasan, 2017). Sera gazı emisyonlarının azaltılması sadece küresel ısınmanın kontrolü için değil; hava ve su kalitesinin korunması, ekosistem sağlığının sürdürülmesi, doğal afetlerin önlenmesi ve insan sağlığının geliştirilmesi açısından da geniş çaplı çevresel kazanımlar sunar. Bu faydalar, iklim politikalarının sadece ekonomik değil, aynı zamanda ekolojik değerler ekseninde tasarlanması gerektiğini açık biçimde ortaya koymaktadır. Emisyonların azaltılmasına yönelik her adım, doğa ile insan arasındaki dengeyi yeniden kurma yönünde atılmış stratejik bir adımdır.

2.6.3. Sektörel Rekabetçilik ve Sürdürülebilirlik

İklim değişikliğiyle mücadelede alınan önlemler, sadece çevresel değil, aynı zamanda ekonomik etkiler doğurmakta; sektörlerin rekabet gücü ile sürdürülebilirlik performansları doğrudan ilişkilendirilmektedir. Düşük karbonlu kalkınma vizyonu doğrultusunda, enerji, tarım, sanayi ve madencilik gibi emisyon yoğun sektörlerde çevresel performansın iyileştirilmesi, hem rekabetçiliği hem de uluslararası pazarlardaki konumu etkileyen belirleyici bir faktöre dönüşmektedir (Sun ve diğ., 2014). Tarım sektörü, hem iklim değişikliğinden doğrudan etkilenen hem de sera gazı üretimiyle çevresel baskı oluşturan temel sektörlerden biridir. Girdi maliyetleri, üretim desenleri ve verimlilik, iklimsel değişkenliklerden büyük ölçüde etkilenirken; aynı zamanda metan (CH_4) ve azot oksit (N_2O) salımı gibi tarımsal emisyonlar da çevresel sürdürülebilirliği tehdit etmektedir. Türkiye özelinde yapılan çalışmalar, iklim değişikliğinin tarımsal

verimliliği azaltarak üretim maliyetlerini artırdığını ve bu durumun sektörün rekabetçiliğini zayıflattığını göstermektedir (Bayraç ve Doğan, 2016; Şahin ve Avcıoğlu, 2016).

Enerji sektörü de emisyon azaltımı politikalarının doğrudan etkilediği bir diğer alandır. Özellikle kömür temelli enerji üretiminde çevresel düzenlemeler, işletme maliyetlerini artırmakta ve bu durum fosil yakıt temelli üretimi uzun vadede rekabet dışı bırakmaktadır. Kömür kaynaklı metan salımı, yalnızca sera gazı etkisiyle değil; aynı zamanda yerel hava kalitesi ve iş güvenliği açısından da risk oluşturur (Karakurt ve diğ., 2015). Bu nedenle enerji sektörünün yeşil dönüşüm süreci, yalnızca çevresel bir zorunluluk değil, aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirlik açısından da kaçınılmaz hale gelmiştir. Sanayi sektöründe sürdürülebilirlik uygulamaları, eko-verimlilik, enerji yönetimi ve temiz üretim teknolojileri ile ilişkilidir. Sektörel rekabetçiliğin korunması için çevresel yüklerin minimize edilmesi gerekmekte; bu da üretim süreçlerinin çevre dostu sistemlerle yeniden tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır. Küresel karbon fiyatlandırması, sınırda karbon düzenlemeleri ve çevre odaklı ticaret anlaşmaları gibi mekanizmalar, çevresel performansı düşük olan işletmelerin dış pazarlardaki erişimini sınırlayabilir (Erden ve diğ., 2014; Khan ve diğ., 2014).

Uluslararası alanda yapılan projeksiyonlar, emisyon azaltım hedeflerine uyum sağlayamayan ülkelerin dış ticarette ciddi rekabet dezavantajları yaşayacağını göstermektedir. Özellikle Avrupa Birliği'nin sınırda karbon düzenlemesi uygulamaları, ihraç ürünlerin karbon yoğunluklarını dikkate alarak tarife sistemi uygulamayı öngörmektedir. Bu durum, karbon ayak izi yüksek olan ülkeler için ekonomik risk anlamına gelmektedir (Skiba ve diğ., 2012; Lotfalipour ve diğ., 2013). Sektörel sürdürülebilirliğin sağlanmasında inovasyon, teknoloji transferi ve finansal destek mekanizmaları ön plana çıkmaktadır. Temiz üretim yatırımları, kısa vadede maliyetli görünse de uzun vadede enerji tasarrufu, üretim verimliliği ve dış finansman olanaklarına erişim gibi avantajlar sunar. Bu sayede işletmeler hem çevresel yükümlülüklerini yerine getirir hem de maliyet etkin biçimde rekabet gücünü artırır (Sun ve diğ., 2014). Sektörel rekabetçilik artık yalnızca üretim kapasitesi ve maliyet yapısıyla değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik kriterleriyle de şekillenmektedir. Sera gazı emisyonlarının azaltılması, her sektörün ulusal ve uluslararası pazarlardaki konumunu doğrudan

etkileyen stratejik bir unsur haline gelmiştir. Bu kapsamda, çevre ile uyumlu, iklim risklerine dirençli ve kaynak verimliliğini esas alan sektör yapıları inşa edilmedikçe, sürdürülebilir büyümeden söz etmek mümkün olmayacaktır.

3. YÖNTEM

3.1. Seçilen bir Nişasta Fabrikasında Proses İncelemesi

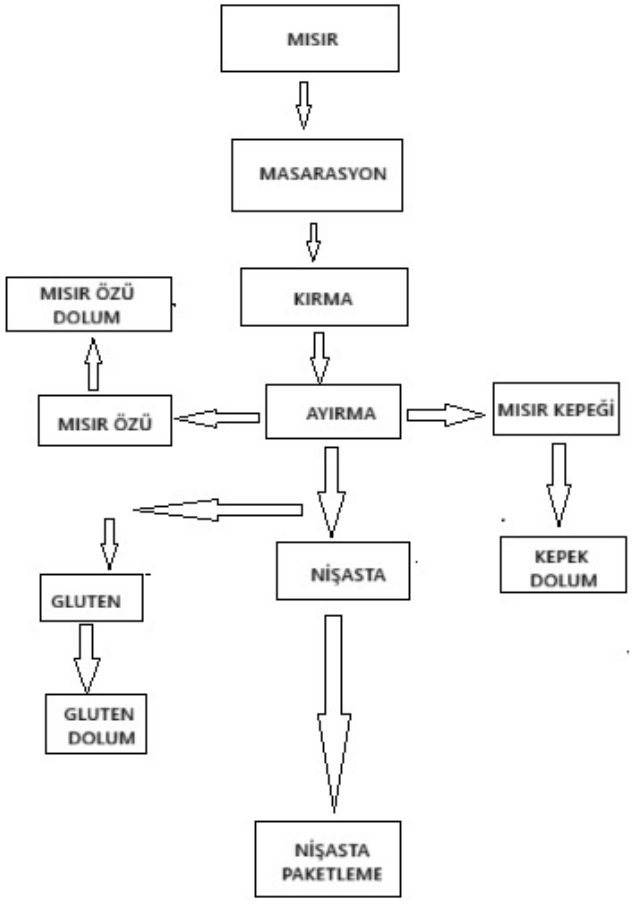
Bu tezin konusu Türkiye'de yer alan 27.237 m^2 kapalı, 84.826 m^2 açık alana sahip mısır nişastası, mısır kepeği, mısır gluteni, tatlandırıcılar, invert şeker üretimi yapan bir tesis için doğrudan sera gazı emisyonlarının ISO 14064-1 Madde 5.2.2 kapsamında belirlenmesidir. Hammaddenin tesise girişinden başlanarak ürün, ara ürün oluşuncaya kadar olan proses akışında bu bölümde ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

3.1.1. Mısır Nişastası ve Nişasta Bazlı Şeker Üretimi Faaliyeti

Mısır nişastası ve nişasta bazlı şekerler şu anda Türkiye'de mısırın işlenmesinden elde edilen iki önemli 'sanayi ara maddesi' olarak kullanılmaktadır. Mısır nişastası; oluklu mukavva, kağıt, tekstil, gıda (çorba, lokum, unlu mamuller), tutkal ve yapıştırıcı, nişasta bazlı şekerler ise; şekerlemeler ve şekerli maddeler, unlu mamuller, baklava, helva, dondurma, reçel, alkollü ve alkolsüz içecekler, sakız sanayilerinde kullanılmaktadır. Nişasta bazlı şekerler ürünün uygun raf ömrüne sahip olmasını sağladığından dolayı tercih edilmektedir. Nişasta üretiminde oluşan yan ürünler gluten, mısır özü ve mısır kepeği de yem ve yağ sanayiinde kullanılmaktadır. Nişasta ve nişasta bazlı şeker üretimi genel olarak iki aşamadan oluşur. Birinci aşama olan millhouse kısmında, ıslak öğütme işleminden sonra üretimin hammaddesi olan mısır dört temel bileşeni olan nişasta, gluten, mısır özü ve mısır kepeğine ayrılır. Prosesin amacı yüksek saflıkta nişasta sütü ve maksimum değerde gluten, kepek ve öz elde etmektir. Nişasta olarak satılacak olan ürün kurutulduktan sonra paketlenir. Yan ürünler de dolum tanklarında satılmak üzere stoklanır. İkinci aşama olan rafineri kısmında, beslenme değeri olan şekerler içeren, içeriklerine göre iki temel ürün olan glikoz ve fruktoz saflaştırılmış sıvı şurupları üretilir.

İşletmeye gelen hammadde mısır, stok tanklarına alındıktan sonra millhouse ünitesine geçerek burada nişasta ve yan ürünleri olan kepek, öz ve glutene ayrılır ve depolanır. Rafineri kısmına geçen nişasta, glikoz ve fruktoza dönüştürülür, daha sonra bu ürünlerin karışımları ve invert şeker (fruktoz'un boş kapasitesinde) üretimi gerçekleşir. Millhouse ve rafineri üniteleri birbiri içine geçmiş şekilde üzeri kapalı iki kattan oluşur. Millhouse Ünitesi, mısır nişastası ve yan ürünleri olan mısır özü, mısır kepeği, gluten üretimi işlemi

gerçekleştirilmektedir. Genel anlamda şu kısımlardan oluşur; hammadde girişi, stok tankları, masarasyon, kırma, ayırma, nişasta ve paketleme. Nişasta ve yan ürünleri mısır özü, mısır kepeği ve gluten hazırlama ünitesi iş akım şeması, makine ve ekipmanların fonksiyonları ve buna bağlı olarak üretim metodunun anlatımı aşağıdaki gibidir.



Şekil 3.1. Millhouse Ünitesi İş Akım Şeması

3.1.2. Milhouse Ünitesi Nişasta Üretim Prosesi

Nişasta üretiminin ana hammaddesi olan mısır tesise getirilmesinin ardından kantarlarda tartılarak hammadde silolarına aktarımı yapılmaktadır. Silolarda üretim sürecine dahil edilecek mısır depolanır. Depolarda muhafaza edilen mısır işletmeye alınmadan önce içerisindeki yabancı maddelerin uzaklaştırılması için mısır eleklerinden elenerek işletmeye gönderilmektedir. Mısırın işletmeye alınmasının ardından gerçekleştirilen üretim süreci;

- Masarasyonlama

- Kırma
- Ayırma
- Nişasta saflaştırma.

İşlemleri sırasıyla yapılarak gerçekleştirilir. Bu işlemler kendi içerisinde farklı uygulama yöntemleri ile gerçekleştirilmekte ve bunların sonucunda nişasta haricinde diğer yan ürünlerde elde edilmektedir. Üretilen nişasta, nişasta paketleme ünitesine gönderilerek ambalajlama işlemi yapılarak piyasaya sevk edilmektedir.

3.1.2.1. Masarasyon

Tesise dış alımla temin edilen mısır, silolarda depolanıp buradan işletmeye alınırken mısır eleklerinde elenerek içerisindeki yabancı maddeler uzaklaştırılır. Masarasyonlama ünitesinde amaç, mısırın bileşenlerine ayrışmasını kolaylaştırmaktır. Nişasta üretiminde; uygun sıcaklık, zaman, SO_2 konsantrasyonu, laktik asit içeriği gibi değişkenlerin istenilen değerlerde tutulması içi masarasyonlama işlemine tabi tutulması gerekir. İşletmeye alınan mısırın kolay işlenebilmesi için tanklar içerisine alınarak SO_2'li suda ortalama 48 saat muamele ettirilir. Ayrıca, bu işlem sayesinde mısırdan gelen mikrobiyolojik kontaminasyonların önüne geçilmiş olunur. Uygun şartlar altında bu işlem sırasında su, mısır tohumunun içerisine girerek tahılın yumuşamasını sağlamaktadır. Bu şekilde mısırın içeriğine ayrılması kolaylaşır. Tank içerisindeki mısır, SO_2 gazının su ile temas ettirilerek elde edilen 50 °C'deki masarasyon suyu ile işleme tabi tutulur. Bu süre zarfında mısır içerisine masarasyon suyunu alarak yumuşamaktadır. Kullanılan tankların dibi koni şeklindedir ve bu kısımda elek bulunmaktadır. Tank içerisindeki su buradan süzülerek başka bir tanka pompalanabilmekte ya da tekrar tankın içerisine verilebilmektedir. Tank içerisine kuru mısır yukardan boşaltılırken, ıslak ve kırmaya hazır haldeki mısır aşağıdan çekilerek alınmaktadır.

3.1.2.2. Kırma

Masarasyonlamadan gelen ve yumuşatılmış mısır ilk kırım için 1.değirmene beslenir. Birinci kırımdan geçirilen ve özü ayrıştırılan mısır; sırası ile 2. değirmene, daha ince öğütülmenin yapıldığı 3. değirmene gönderilir. Değirmende ince öğütülerek, nişasta, gluten ve kepeğin üzerindeki nişasta ve proteini bırakması sağlanır. Değirmenlerden

istenilen boyutta öğütme işlemi gerçekleştirilen mısır buradan ayırma işleminin gerçekleştirileceği bölüme transfer edilir.

3.1.2.3. Ayırma

Sulandırılmış ve öğütülmüş mısır, ayırma işleminin gerçekleştirileceği siklonlara pompalanır. Burada yoğunluk farkından faydalanılarak en hafif olan mısır özü karışımdan ayrılır. Preslerle özün suyu uzaklaştırılarak, çıkan ürün döner kurutucuya gönderilir, kurutma işlemi tamamlanır. Pres sonrası çıkan su geri devir yapılarak değirmene beslenen akımı sulandırmak için kullanılmaktadır. Bu ilk ayırma işleminden çıkan alt akım, ikinci bir defa daha değirmene gönderilir. Burada ki amaç ilk ayırma işleminde ayrılmamış özün ayrılmasını sağlamaktır. Yapılan bu işlem birinci ayırma işlemiyle benzerdir. Ayrılması tamamlanan öz birinci ayırma işlemlerinden geçmek üzere geri pompalanır ve aynı pres ve kurutma işlemlerinden geçirilir.

Kurutulan öz daha sonra mısır özü dolum deposuna gönderilmektedir. Yağ ve hayvan yemi sanayinde kullanılmak üzere sevk edilir Siklonlar ile gerçekleştirilen öz ayırma işleminden sonra mısır bulamacı içerisindeki nişasta ve gluteni kepekten ayırabilmek için elekten geçirilmektedir. Elekten geçirilen bulamaç, 3. değirmene girer. Değirmenden gelen bulamaç kepek eleklerinden geçerek kepek yıkama havuzuna alınır. Yıkanır ve yapışık olan nişastanın ayrılması sağlanmaktadır. İçerisindeki nişastadan ayrılmış olan kepek, kepek presten geçirilerek içerisindeki su alınır, sisteme geri gönderilir. Daha sonra kepeğe masarasyon suyu karıştırılmaktadır. Bunun amacı kepeğin protein oranını yükseltmektir. Masarasyon suyu ile karıştırılan kepek kurutularak öğütme için çekiçli değirmene gönderilir. Değirmenden çıkan kepek, kepek dolum ünitesine sevk edilir. Burada kepek depolanmak üzere tanklara doldurulur ve gelen talepler doğrultusunda hayvan yemi olarak kullanılmak üzere sevkiyatı gerçekleştirilir.

Üretim süreci içerisinde öz ve kepekten ayırma işlemi tamamlandıktan sonra geriye kalan nişasta ve protein, proteinin düşük yoğunluğundan faydalanılarak ayrılabilmektedir. Bu aşamada seperatör kullanılarak yüksek protein gluteni elde edilir. Daha sonra gluten içerisindeki suyun alınması için vakum filtreden geçirilerek, kurutmaya gönderilir. Kurutmadan çıkan ürün öğütme için çekiçli değirmene gelir. Değirmenden çıkan gluten, gluten dolum ünitesine sevk edilir. Burada gluten depolanmak üzere tanklara doldurulur

ve gelen talepler doğrultusunda hayvan yemi olarak kullanılmak üzere sevkiyatı gerçekleştirilir. Kepek eleklerinden gelen nişastalı-proteinli su, nişasta seperatörüne gelerek protein ile nişastanın ayrılaması sağlanır.

Birincil ayrışma işleminde (gluten eldesi) nişasta içerisindeki protein tam olarak uzaklaştırılamamaktadır. İçerisinde %3-5 oranında protein bulunduran nişasta ikinci bir ayrıştırma ile saflaştırılmak istenmektedir. Nişastanın tamamen proteinden ayrışması için hidrosiklonlarda, ters yıkama suyu ile yıkaması gerçekleştirilmektedir. Burada ters yıkama suyundan gelebilecek mikrobiyolojik kontaminasyonu engellemek için SO_2 dozlaması yapılmaktadır. SO_2 miktarı nişasta sütü ile kontrol edilir. Ters yıkama işleminde hidrosiklonlar kullanılmaktadır. Çok sayıda hidrosiklon üniteleri birbirine seri olarak bağlanır ve yıkama suyu nişastanın çıktığı son bölümden sisteme verilir. Bu şekilde yıkanan nişasta, nişasta sütü olarak adlandırılır ve santrifüje verilerek suyu alınıp, kek haline getirilir. Kurutmaya gönderilen kek, kurutma işleminden sonra nişasta stok tankına alınır. Tanka alınan nişasta buradan paketleme bölümüne alınarak paketlenir.

3.1.3. Rafineri Ünitesi, Fruktoz, Glikoz ve İnvert Şeker Üretimi

3.1.3.1. Nişasta Sütünün Glikoz ve İzoglikoz Şurubuna Dönüştürülmesi

Nişasta sütünden bu şurupların elde edilmesi iki farklı yöntemle gerçekleştirilebilmektedir. Nişasta sütüne asit hidrolizi veya enzimatik hidroliz ile nişasta sütünün glikoz dönüşümü gerçekleştirilir. Glikoz üretim prosesine alınan nişasta sütünü, parçalamak için enzim eklenir. Yüksek buhar ile nişasta sütü parçalanarak şuruba dönüştürme işlemi yapılır. Sıvılaştırma ünitesine alınan nişasta sütü, iki kola ayrılıp bir tarafta yüksek oranda maltoz şurubu diğer tarafta yüksek oranda dekstroz şurubu hazırlanmaktadır. Liquefaction çıkış şurup, dekstroz oluşumu için enzim ilavesi yapılarak saccarifikasyon tanklarına gönderilir.

Bekleme süresi tamamlanan şurup, içindeki proteinlerin alınması için vakum filtreye, oradan da içindeki iyonların alınması için reçine kolonlarına gönderilir. Evaporatörde yüksek buhar kullanılarak yoğunluğu arttırılan şurup, izomer enzim kolanlarından geçirilerek dekstroz şurubunun izoglikoza dönüşümü tamamlanmış olur. İyon değiştirici reçine kolonlarına gönderilen izoglikoz evaporatörde kuru madde miktarı arttırılarak,

ürün stok tankına alınır. Ürün tanktan transfer edilmeden önce torba filtrelerden doluma verilir. İzoglikoz şurubunun tanker ve varillere doldurularak sevkiyatı gerçekleştirilir.

Glikoz üretiminde, enzimatik hidroliz yöntemi ile oluşturulan maltoz şurubu glikoz ünitesine gelir. Maltoz şurubunun içindeki protein, RVF filtre ile uzaklaştırılmaktadır. İçerisindeki proteinden ayrılan şurup daha sonra iyonları alınmak üzere reçinelerden geçirilmektedir. Protein ve iyonlarından arındırılmış olan şurup, evaporatör de kuru madde miktarı arttırılarak, ürün stok tankına alınır. Ürün tanktan transfer edilmeden önce torba filtrelerden doluma verilir. Glikoz şurubunun tanker ve varillere doldurularak sevkiyatı gerçekleştirilir. Tesis dışından temin edilen sakaroz, su ile seyreltildikten sonra asit konversiyon veya enzim ile karıştırılarak kimyasal parçalanması sağlanmaktadır. Karışımın evaporatör ile konsantrasyonunun artırılması ile invert şeker üretimi gerçekleştirilmektedir. Nişasta sütü Reaksiyon tanklarına alınır. Reaksiyonun özelliğine göre sıcaklık, pH, kuru madde vb. değerler ayarlanır. Elde edilecek modifiye nişastaya göre kimyasal ajan ilave edilir. Gerçekleşmesi gereken reaksiyon süresi sonrası, reaksiyon sonlandırılarak ürün santrifüje alınır ve kurutma işlemi başlatılır. Kurutmadan sonra stok tankınan alınan ürün paketleme ünitesine gönderilir. Dekstroz evaporatör sonrası konsantre edilen ürün kristalizatöre verilir. Kristalizatörden çıkan ürün santrifüje verilir. Kristal olmayan ürün geriye alınır. Kristal olan ürün kurutmaya gönderilir. Kurutmadan sonra stok tankınan alınan ürün paketleme ünitesine gönderilir.

3.2. Seçilen bir Nişasta fabrikasında Doğrudan Sera gazı Emisyonlarının Hesabı

3.2.1. Hesaplama Yaklaşımı ve Kapsam

ISO 14064-1 standardında sera gazı emisyonları hesaplanırken, öncelikle kuruluş sınırlarının belirlenmesi gerektiği bahsedilmiştir. Seçilen Nişasta Fabrikası, sadece Marmara Bölgesinde yer alan tek bir adet tesisten oluşmaktadır herhangi başka bir şubesi bulunmamaktadır. Tek bir fabrikadaki doğrudan sera gazı emisyonları, çalışma kapsamına alınmıştır. ISO 14064-1 standartı doğrudan ve dolaylı sera gazı emisyonlarının belirlenmesini konu almıştır. Bu çalışmanın hesaplama sınırı ise doğrudan sera gazı emisyonlarının (Kapsam 1) belirlenmesidir. Sera gazı emisyon kategorileri Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. ISO 14064-1 Standardına Göre Sera Gazı Emisyon Kategorileri

Kapsam Dışı Bırakılan Karbon Emisyonu Kaynakları; Dolaylı Emisyon Kapsamına dahil olan her türlü iş ve işlemler bu çalışmanın konusu değildir. Ulaşımdan kaynaklanan dolaylı SGE, kuruluş sınırları tarafından kullanılan ürünler ve hizmetlerden kaynaklı SGE, kuruluş tarafından üretilen ürünlerin üretim sonrası, diğer kaynaklardan ortaya çıkan SGE faaliyetlerini kapsamamaktadır. Doğrudan sera gazları bu çalışmanın konusudur. Aşağıda ayrıntılı bir şekilde çalışmaya dahil olan emisyon kaynakları verilmiştir. Sabit Yakma Kaynaklı Doğrudan Emisyonlar: Sabit yanma kaynaklı emisyonlar, hareket etmeyen ekipmanları ve bulunmuş olduğu yerde yakıt yakarak buhar, ısı, elektrik veya proses enerjisi üreten ekipmanların çalışması sırasında oluşan gaz salımlarını ifade eder. Bu emisyonlar, bir kuruluşun doğrudan kontrolü altındaki kazanlar, fırınlar, sabit jeneratörler, brülörler, ısıtma sistemleri veya endüstriyel yanma üniteleri gibi sistemlerde gerçekleşir. Sabit olan hareketli olmayan ekipmanları kapsamaktadır. Tesiste bu kapsamda;

- 2 adet Kömür Kazanı
- 1 adet Doğalgaz Kazanı
- 5 adet Jeneratör
- 1 adet Mutfak Tüpü.

tespit edilmiş olup hesaba dahil edilmiştir.

Mobil Yakma Kaynaklı Doğrudan Emisyonlar: Motorlu ve hareketli ekipmanların kullandığı yakıtların yanması sonucu oluşan sera gazları, mobil yakma kaynaklı doğrudan emisyonlar olarak değerlendirilir. Mobil yanma olarak adlandırılmasının sebebi bu sera gazları durağan bir noktadan değil, hareket eden bir kaynaktan yaydığı içindir.

Yardımcı işletmeler bölümünde,

- 1 adet Kepçe
- 10 adet Forklift
- Tesis bünyesine ait olan 4 adet araç.

bu kapsamda hesaplamalara dahil edilmiştir.

Endüstriyel Süreçlerden Kaynaklı Doğrudan Emisyonlar ve Uzaklaştırmalar: Kuruluş sınırları içerisinde gerçekleşen endüstriyel prosesler sonucu ortaya çıkan Sera gazı emisyonlarına doğrudan proses emisyonları denir. Doğrudan proses emisyonlarına örnek verecek olursak;

- Kireç Taşının kalsine edilmesiyle beraber kimyasal olarak CO_2 ortaya çıkar. Buradaki CO_2 yanma kaynaklı değilde tamamen prosesin kimyasal reaksiyonundan dolayı oluşur.
- Kireç üretimi yapılırken kalsiyum karbonat pişirilir. Bu proses esnasındada doğrudan CO_2 açığa çıkar.
- Demir çelik üretimi sanayisinde, yüksek fırınlarda cevher indirgenirken karbon kullanılır ve proses boyunca CO_2 ve CO ortaya çıkar.
- En güçlü sera gazları arasında olan PFC gazları alüminyum üretimi sırasında oluşmaktadır. Hall-Heroult elektroliz prosesinde CF_4 ve C_2F_6 oluşmaktadır.
- Gübre üretim sanayinde, amonyak sentezinden kaynaklı CO_2, azotlu gübre üretiminde ise N_2O oluşmaktadır.
- Gıda endüstrisinde, fermantasyon (maya ve alkol üretimi vb.) sırasında CO_2 ortaya çıkmaktadır.

- Hidrojen üretimi prosesinde yine CO_2 açığa çıkmaktadır. Hidrojen üretimi petrol rafineleri sanayisinde görülmektedir.

Bu kapsamda tesisimizde sera gazı emisyonu oluşmamaktadır.

Doğrudan sızma/kaçaklardan kaynaklı doğrudan emisyonlar: Bu emisyonlar genelde tesiste kullanılan ekipman, boru hatları, vanalar, soğutma sistemleri gibi kapalı sistemlerin bozulma, eskime, bağlantı noktalarının sızdırması gibi nedenlerle ortaya çıkan emisyonlardır. Herhangi bir yanma işlemi olmadan gazların kontrolsüz bir şekilde atmosfere kaçmasıyla ortaya çıkar. Seçilen tesisimizde bu kapsamda sera gazı oluşturan ekipmanlar aşağıda sıralanmıştır;

- 1 adet chilller sistemi,
- 20 adet klima,
- 30 Yangın Tüpü
- 1 adet buzdolabı
- 1 adet kompresör

bu kapsamda hesaplamalara dahil edilmiştir.

Arazi kullanımı, arazi kullanımındaki değişiklik ve ormancılık (LULUCF) faaliyetlerinden kaynaklanan doğrudan emisyonlar ve uzaklaştırmalar: IPCC kılavuzlarına göre emisyonlar 6 temel arazi kullanımı kategorisinde; ormanlık alanlar, tarım alanları, çayır alanları, sulak alanlar, yerleşim alanları, diğer araziler yer almaktadır. Bu kategori arazi kullanım biçimi ve arazi kullanımındaki değişikliklerden kaynaklanan insan kaynaklı sera gazı emisyonları ile uzaklaştırmalarının raporlandığı kategoridir. Bu 6 temel arazi aşağıda sırasıyla açıklanmıştır (URL-4).

Ormanlık Alanlar: Ormanların tarım alanına dönüştürülmesiyle ya da yerleşim alanlarına dönüştürülmesiyle, ağaçlar kesilir ve toprağın yapısı bozulur. Dolasıyla CO_2 salımı artar. Ormanlar genelde karbon yutağıdır ve ağaçlar büyüdükçe CO_2 depolar. Ormansızlaşma emisyonların çoğalmasına ağaçlandırma ise uzaklaştırma yaratmaktadır.

Tarım Alanları: Ekili alanlar, tarlalar, bağlar bahçeler örnek olarak verilebilir. Toprağın işlenmesi, gübre kullanımı gibi faaliyetler CO_2 ve N_2O emisyonuna sebep olur.

İyileştirilmiş araziler CO_2 yi toprakta biriktirebilir. Bu süreçte atmosferdeki CO_2 seviyesini azaltmaya katkı sağlar.

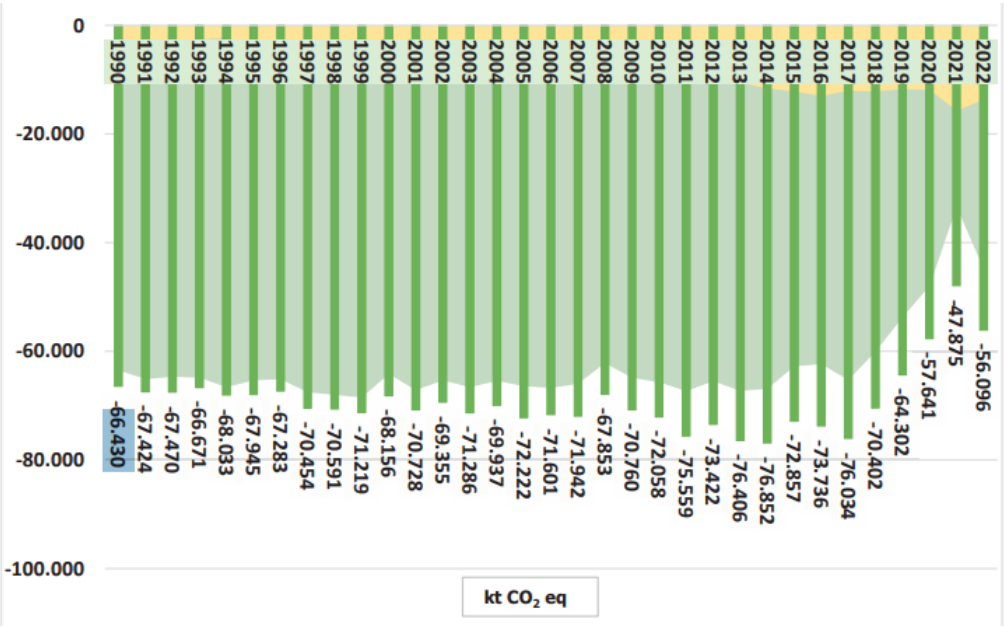
Çayır Alanları: Doğal çayırlar, meralar, hayvancılık için kullanılan otlaklar bu kategoridedir. Bozunduğunda CO_2 ve N_2O salabilir.

Sulak Alanlar: Bataklıklar, sazlıklar, turbalıklar örnek olarak verilebilir. Sulak alanlar kurutulduğunda yüksek emisyon açığa çıkarır.

Yerleşim Alanları: Kasabalar, şehirler, yollar, altyapılar bu alandadır. Doğrudan karbon depolamaz ancak arazi dönüşümlerinden kaynaklı emisyon ortaya çıkar.

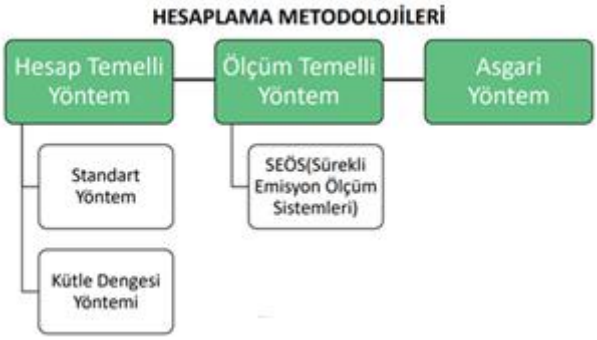
Diğer Araziler: Çöller, buzullar, kayalıklar gibi tarım ya da orman biyokütlesi bulunmayan alanlardır. Emisyon oluşturma ve uzaklaştırma etkisi düşüktür.

LULUCF hem sera gazı emisyon kaynağı hem de karbon yutak potansiyeli taşıyan önemli bir sektördür. Orman toprak ve biyokütle temelli karbon stokları hem doğrudan hem dolaylı faaliyetlerle artabilir ya da azalabilir. Türkiye'de LULUCF sektörü 1990'dan 2022'ye kadar net olarak karbon yutak işlevi görmüş ancak yıllar içinde yutak kapasitesinde dalgalanmalar olduğu Şekil 3.3'de görülmektedir.



Şekil 3.3. 1990-2022 yılları arasındaki LULUCF sektöründeki net uzaklaştırma eğilimleri

Tesis LULUCF'nin doğrudan emisyon kategorisine girmemektedir. Tesisin bulunduğu arazi daha önce herhangi bir orman, tarım, çayır, sulak alan değildir. IPCC 2006 Guidelines Volume 4, Chapter 3 e göre üretim tesisleri yerleşim alanları kategorisine girmektedir. Bu kategoride genelde oluşan emisyon miktarı ihmal edilebilir olarak varsayılır (IPCC 2006). Yukarıda doğrudan sera gazı emisyonları kategorisinde yer alan sabit yanma, mobil yanma ve sızma ve kaçaklardan kaynaklanan emisyonlar için hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalar ISO 14064-1 standardının emisyon hesaplama yöntemlerinden hesap temelli yöntem seçilmiş ve standart yöntem uygulanarak yapılmıştır. Bu yöntemler Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4. ISO 14064-1 Standartına Göre Hesaplama Metodolojileri

Hesaplamalarda Eşitlik (3.1) de ki formül kullanılmaktadır.

$$(\mathrm{FV}) \times (\mathrm{EF}) \times (\mathrm{KİP}) \times (\mathrm{NKD}) = \mathrm{t\,CO2\,e} \qquad (3.1)$$

E: Emisyon (t CO_2 e)

FV: Faaliyet Verisi (ton, m^3, kwh, L,vb.)

EF: Emisyon Faktörü (kg/tj)

KİP: Küresel Isınma Potansiyeli

NKD: Net Kalorifik Değer (tj/Gg)

Hesap temelli yöntemde adımlardan ikincisi sistem sınırlarının belirlenmesidir. Bu çalışmada operasyonel kontrol ilkesi seçilmiştir. Hesaplamalarda CO_2, CH_4, N_2O'ların, CO_2 eşdeğeri faktörleri kullanılmıştır. Faaliyet verilerinin toplanması aşamasında ise

seçilen nişasta firmasından gerçek veriler talep edilerek hesaplamalarda bu veriler kullanılmıştır. Emisyon faktörlerinin seçiminde ise ulusal kaynaklar, IPCC klavuzları kullanılmıştır.

İlgili tesiste kullanılan faaliyet verileri kapsamlarına göre Tablo 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Kapsam Emisyon Kaynağı

Kapsam	Emisyon Kaynağı
Kapsam 1 Doğrudan Sera Gazı Emisyonları	Doğalgaz ve Kömür kazanları, LPG tüpleri, Jeneratörler, Firmaya ait araçlar, Forkliftler, Klima Sızma Kaçakları

ISO 14064-1 e göre emisyon faktörü, bir faaliyet birimi başına açığa çıkan belirli sera gazı miktarıdır. Sera gazı emisyonu hesaplamalarında, temel bir araç olarak kullanılır. Emisyon faktörlerinin doğruluğu, toplam sera gazı emisyon hesaplamalarının güvenilirliği açısında önemlidir (Fankhauser ve diğ., 2008; Pandey ve diğ., 2011).

Firmanın faaliyet verileri ve emisyon faktörleri Tablo 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Faaliyet Verileri

Faaliyet Verisi	**Miktar**	**Faaliyet Birimi**
Doğalgaz Tüketimi	3.894.325,05	sm^3
Kömür Tüketimi	42.304.415	kg
Jeneratörler (Motorin)	18,09	ton
LPG Tüpleri (LPG)	0,273	ton
Kepçe (Motorin)	14,92	litre
Forklift (Motorin)	6515,25	litre
Şirkete Ait Araçlar (Motorin)	12.121,32	litre
Şirkete Ait Araçlar (Benzin)	16.019,46	litre

Tablo 3.2'de firmanın yıllık tüketmiş olduğu miktarlar birimleri ile beraber verilmiştir. Yakıtı benzin ve motorin olan şirkete ait araçlar, tesiste kullanılan motorinli iş makinaları, şirket içerisinde tüketilen toplam doğalgaz miktarı, kullanılan kömür miktarları, kullanılan yangın tüplerindeki CO_2 miktarlarının ve halihazırda bulunan jeneratör kullanımlarının da dahil olarak, kapsam 1 verileri ayrıntılı bir şekilde analizi yapılmıştır. Sera gazı emisyonu hesaplaması yaparken dikkat edilmesi gereken üç önemli gaz CO_2, CH_4 ve N_2O'dur.

Hesaplama yapılmadan önce aşağıdaki tablolarda gazlara ait küresel ısınma potansiyelleri emisyon faktörleri ve net kalorifik değerler verilmiştir.

Tablo 3.3. Küresel Isınma Potansiyelleri (KİP) (IPCC, 2006)

CO_2	**CH_4**	**N_2O**
1	27,9	273

Tablo 3.4. Kapsam 1 Emisyon Faktörleri (EF)

Kaynaklar	**CO_2 (EF)**	**CH_4 (EF)**	**N_2O (EF)**	**Birim**	**Kaynak**
Yakıt (Doğalgaz)	56.100	1	0,1	kg/tj	IPCC, 2006
Yakıt (Kömür)	101.000	1	1,5	kg/tj	IPCC, 2006
Motorin Jeneratör	74.100	3	0,6	kg/tj	IPCC, 2006
LPG Tüpü	63.100	1	0,1	kg/tj	IPCC, 2006
Motorin Kepçe	74.100	4,15	28,6	kg/tj	IPCC, 2006
Motorin Forklift	74.100	4,15	28,6	kg/tj	IPCC, 2006
Motorin Otomobil	74.100	3,9	3,9	kg/tj	IPCC, 2006
Benzin Otomobil	69.300	3,8	5,7	kg/tj	IPCC, 2006

Doğalgaz Yakıtı İçin;

Tablo 3.5. Doğalgaz emisyon hesaplama Değerleri

	Kullanılan Değer			
	CO_2	**CH_4**	**N_2O**	**Kaynak**
Net Kalorifik Değer (NKD) (tj/Gg)	48	48	48	IPCC, 2006
Doğalgaz Yoğunluğu (kg/sm3)	0,7267	0,7267	0,7267	Firmadan alınan veri (Faturalara göre)

Kömür Yakıtı İçin;

Tablo 3.6. Kömür emisyon hesaplama Değerleri

	Kullanılan Değer			
	CO_2	**CH_4**	**N_2O**	**Kaynak**
Net Kalorifik Değer (NKD) (tj/Gg)	11,9	11,9	11,9	IPCC, 2006

Jeneratör İçin;

Tablo 3.7. NKD Motorin Değerleri

	Kullanılan Değer			
	CO_2	**CH_4**	**N_2O**	**Kaynak**
Net Kalorifik Değer (NKD) (tj/Gg)	43	43	43	IPCC, 2006

Tablo 3.8. Jeneratör Bilgileri

Makine Adı	**Saatlik Tüketim Kapasitesi (l/h)**	**Çalışma Saati (h)**	**Motorin Yoğunluk (kg/l)**	**Motorin Tüketimi (kg)**	**Faaliyet Verisi (ton)**
Jeneratör 250 KVA	45	25	0,8405	945,5625	0,945
Jeneratör 580 KVA	115,1	13	0,8405	1257,64015	1,257
Jeneratör 825 KVA	161	18	0,8405	2435,769	2,435
DMH Jeneratör 1	82,1	16	0,8405	1104,0808	1,104
DMH Jeneratör 2	95	21	0,8405	1676,7975	1,676
					7,417

LPG (Tüp) yakıtı için;

Tablo 3.9. LPG için NKD Değerleri

	CO_2 Kullanılan Değer	**CH_4 Kullanılan Değer**	**N_2O Kullanılan değer**	**Kaynak**
Net Kalorifik Değer (NKD) (tj/Gg)	47,3	47,3	47,3	IPCC, 2006

Kepçede Motorin Yakıtı İçin;

Tablo 3.10. Motorin için NKD ve Yoğunluk Değerleri

	Kullanılan Değer			**Kaynak**
	CO_2	**CH_4**	**N_2O**	
Net Kalorifik Değer (NKD) (tj/Gg)	43	43	43	IPCC, 2006
Yoğunluk (kg/l)	0,845	0,845	0,845	Motorin yoğunluğu, firma tedarikçisi teknik bilgi formuna göre alınmıştır.

Forlift de Motorin Yakıt için;

Tablo 3.11. Motorin için NKD ve Yoğunluk Değerleri

	Kullanılan Değer			**Kaynak**
	CO_2	**CH_4**	**N_2O**	
Net Kalorifik Değer (NKD) (tj/Gg)	43	43	43	IPCC, 2006
Yoğunluk (kg/l)	0,845	0,845	0,845	Motorin yoğunluğu, firma tedarikçisi teknik bilgi formuna göre alınmıştır.

Araçlarda Motorin Yakıt İçin;

Tablo 3.12. Motorin için NKD ve Yoğunluk Değerleri

	CO_2 Kullanılan Değer	**CH_4 Kullanılan Değer**	**N_2O Kullanılan değer**	**Kaynak**
Net Kalorifik Değer (NKD) (tj/Gg)	43	43	43	IPCC, 2006
Yoğunluk (kg/l)	0,82	0,82	0,82	Motorin yoğunluğu, firma tedarikçisi teknik bilgi formuna göre alınmıştır.

Araçlarda Benzin Yakıtı için;

Tablo 3.13. Benzin için NKD ve Yoğunluk Değerleri

	CO_2 Kullanılan Değer	**CH_4 Kullanılan Değer**	**N_2O Kullanılan değer**	**Kaynak**
Net Kalorifik Değer (NKD) (tj/Gg)	44,3	44,3	44,3	IPCC, 2006
Yoğunluk (kg/l)	0,72	0,72	0,72	Motorin yoğunluğu, firma tedarikçisi teknik bilgi formuna göre alınmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Doğalgaz Emisyon Hesaplamaları

Doğalgaz hesaplamaları yapılırken kullanılan değerler yukarıdaki Tablo 3.4 ve 3.5'de verilmiştir.

Doğrudan sera gazı emisyonlarından doğalgaz kaynaklı emisyon hesaplamaları Eşitlik (4.1) ile hesaplanmaktadır;

$$(\mathrm{FV}) \times (\mathrm{EF}) \times (\mathrm{KİP}) \times (\mathrm{NKD}) = \mathrm{t\,CO2\,e} \qquad (4.1)$$

E: Emisyon (t CO_2 e)

FV: Faaliyet Verisi (sm3, ton, m^3, kwh, L,vb.)

EF: Emisyon Faktörü (kg/tj)

KİP: Küresel Isınma Potansiyeli

NKD: Net Kalorifik Değer (tj/Gg)

CO_2 için Emisyon Hesabı:

3.894.325,05 sm^3 × 56.100 kg/tj × 48 tj/Gg × 0,7267 kg/sm^3 × 0,000001 Gg/kg

=7.620,64 ton CO_2

CH_4 için Emisyon Hesabı:

3.894.325,05 sm^3 × 1 kg/tj × 48 tj/Gg × 0,7267 kg/sm^3 × 0,000001 Gg/kg

=0,135 ton CH_4

Hesaplama sonuçları emisyonların CO_2 eşdeğeri (CO_2e) cinsinden ifade edilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda sera gazı miktarları, ilgili küresel ısınma potansiyeli (GWP) katsayıları ile çarpılarak CO_2 eşdeğerine dönüştürülmektedir.

Ton CO_2= 0,135 ton × 27,9 =3,76

CH_4 için emisyon hesaplama;

3.894.325,05 sm^3 × 0,1 kg/tj × 48 tj/Gg × 0,7267 kg/sm^3 × 0,000001 Gg/kg

=0,0136 ton N_2O

Ton CO_2= 0,0136 ton × 273 =3,71 ton CO_2

Toplam Emisyon Miktarı: 7.620,64 ton CO_2 + 3,76 ton CO_2 + 3,71 ton CO_2 = 7.628,02 ton CO_2 olarak hesaplanmıştır.

4.2. Kömür Emisyon Hesaplamaları

Kömür emisyon hesaplamaları yapılırken kullanılan değerler Tablo 3.4 ve 3.6'da verilmiştir. Doğrudan sera gazı emisyonlarından kömür kaynaklı emisyon hesaplamaları Eşitlik (4.1) ile hesaplanmıştır. Kömür yakıtı için yapılan hesaplamalara göre toplam emisyon miktarı: 51.065,85 ton CO_2 olarak hesaplanmıştır.

4.3. Jeneratör Emisyon Hesaplamaları

Doğrudan sera gazı emisyonlarına dahil olan jeneratörlerin sebep olduğu sera gazı emisyonu hesaplamaları için kullanılan NKD değeri Tablo 3.7'de verilmiştir. Jenaratörlere ait bilgilerden yola çıkarak faaliyet verisi bulunabilir. Bilgiler Tablo 3.8'de verilmiştir. Motorin yoğunluğu, firma tedarikçisi teknik bilgi formuna göre alınmıştır. Bu çalışmada kullanılan motorin tüketim verilerinin kütleye dönüştürülmesinde, firma-özel yakıt özellikleri esas alınmıştır. Motorinin yoğunluğu, yakıt tedarikçisinden temin edilen teknik bilgi formuna göre 0,8405 kg/l olarak alınmıştır. ISO 14064-1 standardı gereği, sera gazı hesaplamalarında mümkün olan durumlarda kuruluşa özgü, doğrulanabilir ve belgelenmiş verilerin kullanılması tercih edilmiştir. Bu kapsamda, IPCC varsayılan değerleri, yalnızca firma-özel verilerin mevcut olmadığı durumlarda kullanılmak üzere referans kabul edilemektedir. Kullanılan yoğunluk değeri, hesaplama metodolojisi boyunca tutarlı şekilde uygulanmış ve raporun ilgili bölümlerinde açıkça belirtilmiştir.

Kazan Tüketim miktarı:

Kazanlarda kullanılan toplam motorin miktarı: 12.691,00 l

Motorin yoğunluk: 0,8405 kg/l

Motorin Tüketim: 10.666,78 kg =10,67 ton

Toplam Motorin tüketim miktarı: 10,67 ton+ 7,42= 18,09 ton

Eşitlik (4.1) ile hesaplama yapılmıştır.

Jeneratörler ve kazanların oluşturmuş olduğu emisyon miktarı: 57,83 ton CO_2 olarak bulunmuştur.

4.4. LPG Tüpleri için Emisyon Hesaplama:

LPG Tüplerinin doğrudan sera gazı emisyonlarını hesaplamak için Eşitlik (4.1) kullanılmaktadır. LPG tüketim miktarı 0,273 ton dur. Hesaplamalarda kullanılan NKD Tablo 3.9'da verilmiştir. LPG tüpleri için toplam emisyo miktarı: 0,815 ton CO_2 olarak bulunmuştur.

4.5. Mobil Yanma Emisyonlarından Kepçe için Emisyon Hesabı:

Tesiste kepçelerin tüketmiş olduğu motorin miktarı, 14.926,0 litredir. Motorin için NKD ve Yoğunluk değerleri Tablo 3.10'da verilmiştir. Kepçe için doğrudan sera gazı emisyonlarını hesaplamak için Eşitlik (4.1) kullanılmıştır. Kepçe için toplam emiston miktarı: 44,48 ton CO_2'dir.

4.6. Mobil Yanma Emisyonlarından Forklift için Emisyon Hesabı:

Tesiste forkliflerin tüketmiş olduğu motorin miktarı, 6.515,25 litredir. Motorin için NKD ve Yoğunluk değerleri Tablo 3.11'de verilmiştir. Forklifler için doğrudan sera gazı emisyonlarını hesaplamak için Eşitlik (4.1) kullanılmıştır. Forkliflet için toplam emisyon miktarı:19,66 ton CO_2 olarak bulunmuştur.

4.7. Mobil Yanma Emisyonlarından Araç Emisyonlarının Emisyon Hesabı:

Tesiste motorin yakıtlı araçların tüketmiş olduğu motorin miktarı, 12.121,32 litredir Motorin için NKD ve Yoğunluk değerleri Tablo 3.12'de verilmiştir. Araçlara ait emisyon hesaplamaları Eşitlik (4.1) ile yapılmıştır. Toplam Emisyon miktarı: 32,15 ton CO_2 olarak

bulunmuştur. Tesiste benzin yakıtlı araçların tüketmiş olduğu benzin miktarı, 16.019,46 litredir. Benzin için NKD ve Yoğunluk değerleri Tablo 3.13'de verilmiştir. Araçlara ait emisyon hesaplamaları Eşitlik (4.1) ile yapılmıştır. Toplam Emisyon miktarı: 36,25 ton CO_2 olarak bulunmuştur. Araçlar için toplam emisyon miktarı: 36,25+32,15=68,40 ton CO_2 olarak bulunmuştur.

4.8. Doğrudan Sızma Kaçaklardan Kaynaklanan Emisyonlar

4.8.1. Klima Kaçakları İçin Emisyon Hesaplamaları

Tablo 4. 1. Gaz İçin NKD ve Yoğunluk Değerleri

Klimalar	**Gaz Cinsi**	**Gaz Miktarı(kg)**	**Kaçak Oranı**	**Kaynak**
20 adet Klima	R-410	80	%1	IPCC, 2006

GWP Değeri Hesaplama: R-410 gazı aşağıdakli gaz karışımlarından oluşmaktadır.

R-410 =HFC 32 + HFC 125 (IPCC, 2006) (4.2)

HFC 32 için GWP değeri: 771

HFC 125 için GWP değeri: 3740

GWP= (3740+771) × 0,5=2.255,5

Klimalardan Kaynaklan Kaçak Emisyon Miktarı hesaplama: Kaçak Emisyon: (80 kg × %1) × 2.255,5=1,80 ton CO_2

4.8.2. Chiller Kaçakları İçin Emisyon Hesaplamaları

Tesiste bir adet chiller bulunmaktadır.

Tablo 4.2. Chiller Kaçakları İçin NKD ve Yoğunluk Değerleri

Klimalar	Gaz Cinsi	Gaz Miktarı(kg)	Kaçak Oranı	Kaynak
1 adet Chiller	R-410	130	%2	IPCC, 2006

Chiller Kaynaklan Kaçak Emisyon Miktarı hesaplama: GWP değeri Eşitlik (4.2)'den alınmıştır.

Kaçak Emisyonu: (130 kg × %2) × 2.255,5=5,86 ton CO_2

4.8.3. Buzdolabı Kaçakları İçin Emisyon Hesaplamaları

Tesiste bir adet buzdolabı bulunmaktadır.

Tablo 4.3. Buzdolabı Kaçakları İçin NKD ve Yoğunluk Değerleri

Klimalar	Gaz Cinsi	Gaz Miktarı(kg)	Kaçak Oranı	Kaynak
1 adet Buzdolabı	R-404	2	%2	IPCC, 2006

GWP Değeri Hesaplama: R-404 A gazı aşağıdaki gaz karışımlarından oluşmaktadır.

R 404 A = HFC-125/HFC-143a/HFC-134a (44.0/52.0/4.0)

= (3740 × 44/100)+(5810 × 52/100)+(1530 × 4/100)

= 1635,6+3021,2+61,2

= 4718

Buzdolabından Kaynaklan Kaçak Emisyon Miktarı hesaplama:

Kaçak Emisyon: (2 kg×%2) ×4718=0,188 ton CO_2

4.8.4. Kompresör Kaçakları İçin Emisyon Hesaplamaları

Tesiste bulunan kompresör R-134a gazı içermektedir ve 17,91 kg olduğuna dair bilgi alınmıştır.

Tablo 4.4. Kompresör Kaçakları İçin NKD ve Yoğunluk Değerleri

Klimalar	**Gaz Cinsi**	**Gaz Miktarı(kg)**	**Kaçak Oranı**	**Kaynak**
Kompresör	R-134a	17,91	%1	IPCC, 2006

Kaçak Emisyon: (17,91 kg×%1) ×1530=0,274 ton CO_2

4.8.5. CO_2 Yangın Tüpleri için Kaçak Emisyon Hesaplamaları

Yangın tüpleri toplamda 145 kg gaz içerdiği bilgisi alınmıştır.

Tablo 4.5. Yangın Tüpleri Kaçakları İçin NKD ve Yoğunluk Değerleri

Klimalar	Gaz Cinsi	Gaz Miktarı(kg)	Kaçak Oranı	Kaynak
Yangın Tüpleri	R-134a	145	%4	IPCC, 2006

Kaçak Emisyon: (145 kg×%4) ×1=0,0058 ton CO_2

Tablo 4.6. Kaçaklardan Kaynaklanan Emiyon Miktarları

Ekipmanlar	Emisyon Miktarı (ton CO_2)
Klimalar	1,80
Chiller	5,86
Buzdolabı	0,188
Kompresör	0,274
Yangın Tüpleri	0,0058
Toplam Kaçak Emisyon Miktarı	8,127

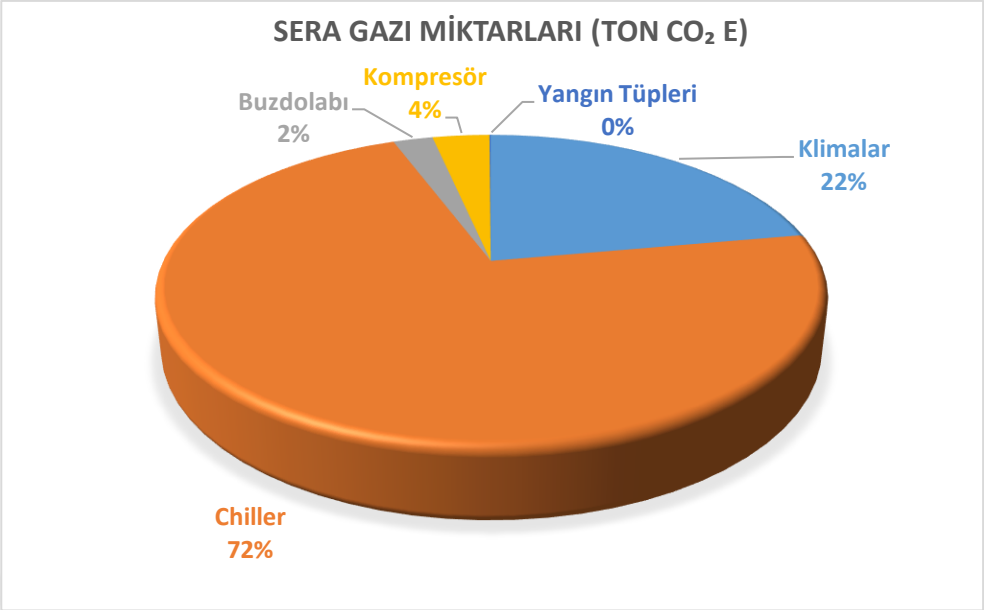
4.8.6 Doğrudan Sera Gazı Emisyon Sonuçları

Bu çalışmada gerçekleştirilen hesaplamalar doğrultusunda, 2024 yılına ait toplam emisyon değerleri incelendiğinde, kapsam 1 kapsamında oluşan sera gazı emisyonunun 58.893,18 ton CO_2 eşdeğeri olduğu hesaplanmıştır. Tablo 4.7'de tesiste tüm emisyon kaynaklarının yaymış olduğu toplam sera gazı emisyon miktarları verilmiştir.

Tablo 4.7. Toplam Sera gazı Emisyon Miktarları

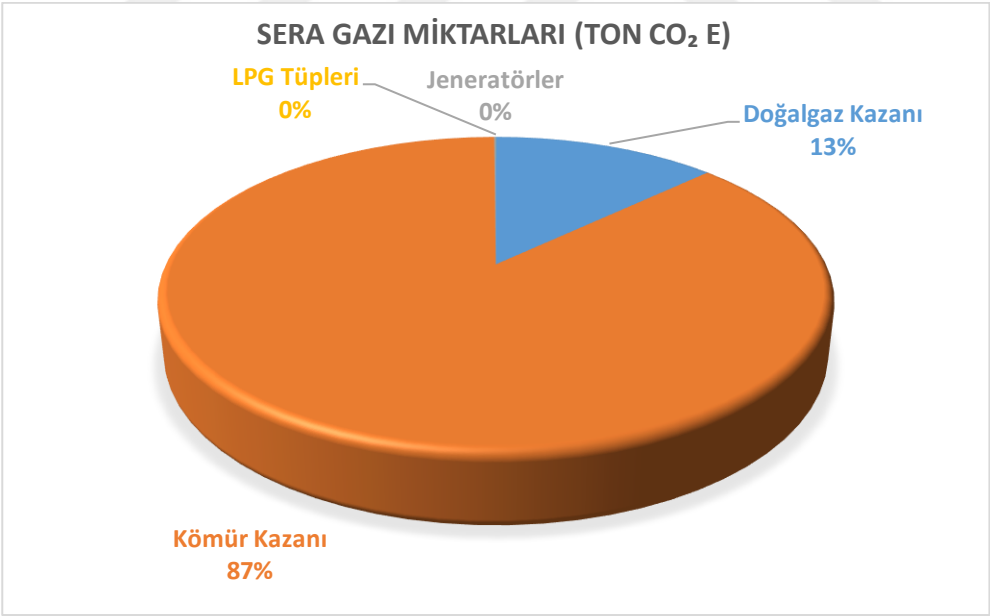
Emisyon Kaynağı	**Faaliyet Tanımı**	**Yakıt Türü**	**CO_2e (t/yıl)**
Sabit Yanma	Buhar Kazanı	Doğalgaz	7628,02
Sabit Yanma	Buhar Kazanı	Kömür	51.065,85
Sabit Yanma	Jeneratör	Motorin	57,83
Sabit Yanma	LPG tüpleri	LPG	0,815
Mobil Yanma	Kepçe	Motorin	44,48
Mobil Yanma	Forklift	Motorin	19,66
Mobil Yanma	Otomobil	Motorin	32,15
Mobil Yanma	Otomobil	Benzin	36,25
Doğrudan Szıma/Kaçaklardan Kaynaklı Doğrudan Emisyon	Klimalar	R-410	1,80
Doğrudan Szıma/Kaçaklardan Kaynaklı Doğrudan Emisyon	Chiller	R-410	5,86
Doğrudan Szıma/Kaçaklardan Kaynaklı Doğrudan Emisyon	Buzdolabı	R-404	0,188
Doğrudan Szıma/Kaçaklardan Kaynaklı Doğrudan Emisyon	Kompresör	R-134a	0,27
Doğrudan Szıma/Kaçaklardan Kaynaklı Doğrudan Emisyon	Yangın Tüpleri	LPG	0,0058
		Toplam	58893,18

İlgili tesisten, sızıntı kaçak kategorisi içerisinde bulunan ekipmanlara göre kaynaklanan sera gazı emisyon miktarı yüzdelik gösterimleri Şekil 4.1 ’de verilmiştir.



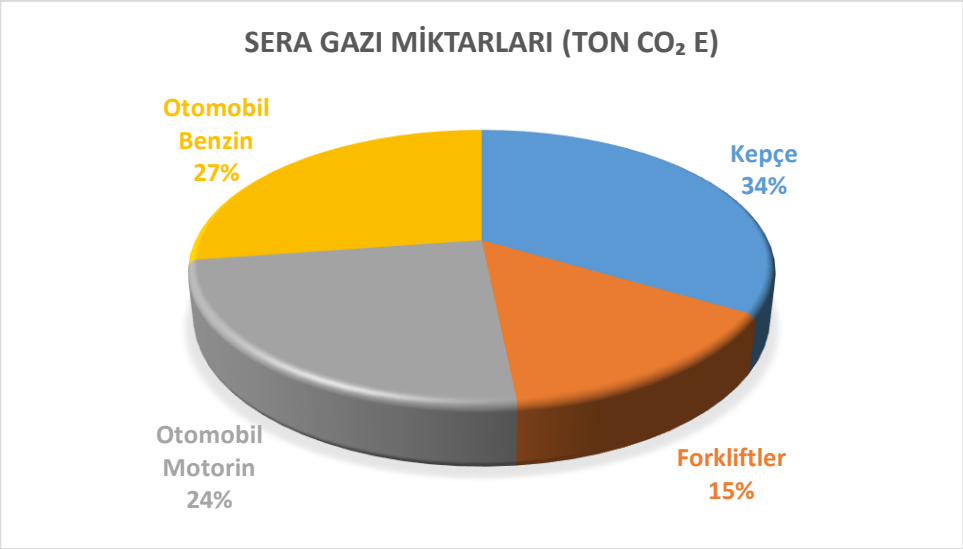
Şekil 4.1. Sera Gazı Miktarları Yüzdelik Gösterim

İlgili tesisten, sabit yanma kategorisi içerisinde bulunan ekipmanlara göre kaynaklanan sera gazı emisyon miktarı yüzdelik gösterimleri Şekil 4.2 ’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Sera Gazı Miktarları Yüzdelik Gösterim

İlgili tesisten mobil yanma kategorisi içerisinde bulunan ekipmanlara göre kaynaklanan sera gazı emisyon miktarı yüzdelik gösterimleri Şekil 4.3 ’de verilmiştir.



Şekil 4.3. Sera Gazı Miktarları Yüzdelik Gösterim

Bu çalışmada hesaplanan sera gazı emisyon düzeyinin, büyük ölçüde tesis bünyesinde gerçekleşen fosil yakıt tüketiminin bir yansıması olduğu görülmektedir. Özellikle enerji üretiminde kullanılan kömür miktarı, toplam emisyon değerleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Tesiste kullanılan kömür miktarının %10 oranında azaltılması durumunda emisyon seviyelerinde de önemli bir düşüş meydana geleceği belirlenmiştir. Bu doğrultuda yapılan hesaplamalar, kömür yakıtlı buhar kazanından kaynaklanan emisyon miktarının 45.959,28 ton CO_2 eşdeğeri seviyesine gerileyeceğini göstermiştir. Bu durum, fosil yakıt tüketiminde yapılacak görece küçük ölçekli iyileştirmelerin dahi sera gazı emisyonlarının azaltılmasında önemli katkılar sağlayabileceğini göstermektedir.

Literatürde benzer çalışmalar yer almaktadır ve tarım aşamasının çevresel etkilerine dikkat çekmiştir. Örneğin, AAF yetkisi altında gerçekleşen bir çalışmada hammadde yetiştirmenin sera gazı emisyonlarının oluşmasına en büyük paya sahip olduğunu göstermektedir (Vercalsteren ve diğ., 2012). Tayland da yapılan bir çalışmada ise 1 ton kuru nişasta üretimi başına ortalama 594 kg CO_2 e emisyon oluşmakta olup toplam yıllık 10,5 milyon ton CO_2 olarak hesaplama yapılmıştır. Sonuçlar tarım ve hasat işlemlerinin önemli sera gazı emisyon kaynağı olduğunu göstermektedir (Usubharatana ve Phungrassami, 2015). Yine Taylandda yapılan bir başka çalışmada tarımsal üretimin toplam emisyonun %60 ını oluşturduğu görülmüştür. Fosil yakıt yerine biyogaz kullanımı, firmanın toplam emisyonunun 0,9-1,0 milyon ton CO_2 azaltmada önemli etkili olduğunu raporlamıştır (Hansupalak ve diğ., 2016). Avrupa nişasta sektörü LCA

çalışmasınana göre nişasta üretiminde oluşan sera gazı emisyonlarının önemli bir bölümü tarımsal üretim aşamasından kaynaklanmakta olup, yapılan yaşam döngüsü analizlerinde toplam karbon ayak izinin yaklaşık %60'ının gübre kullanımı ve tarımsal faaliyetlerden kaynaklandığı ve fabrika üretim aşamasında enerji tükemi olduğu belirlenmiştir. Türkiye'de doğrudan nişasta üretiminde sera gazı emisyonu üzerine çok fazla çalışma mevcut değildir çoğu araştırma tarım ürünleri, gıda üretimi veya biyokütle/atık yönetimi üzerinden dolaylı olarak nişasta hammaddelerini (mısır, patates vb.) incelemektedir. Uluslararası Gıda Tarım ve Hayvan Bilimleri Dergisine göre Türkiye'de toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %14'ü tarım sektöründen kaynakladığını belirtmektedir.

4.9. Doğrudan Sera Gazı Emisyonları Azaltımı için Geliştirilmiş Yöntemler

Bu çalışmada bölüm 2.4'de sera gazı emisyonlarının azaltımı ile geliştirilmiş yöntemlerden ayrıntılı bir şekilde bahsedilmiştir. Firma özelinde bu yöntemlerden de yola çıkarak doğrudan sera gazı emisyonlarını azaltmak için neler yapılabilir konusu üzerinde durmak gerekirse, öncelikle sera gazı emisyonuna en büyük sebep olan faktörün kömür yakıtının kullanılması olduğu bu çalışmanın hesaplama sonuçlarına bakarak görülmüştür. Doğrudan sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik yöntemler incelendiğinde, firmaların kontrol alanı içinde yer alan teknik ve operasyonel iyileştirmelerin çok kısa vadede etkili sonuçlar sunduğu öngörülmektedir. Doğrudan sera gazı emisyonu sebep olabilecek faktörler göz önünde bulundurularak azaltmak için kullanılabilecek yöntemler Tablo 4.8'de özet olarak verilmiştir.

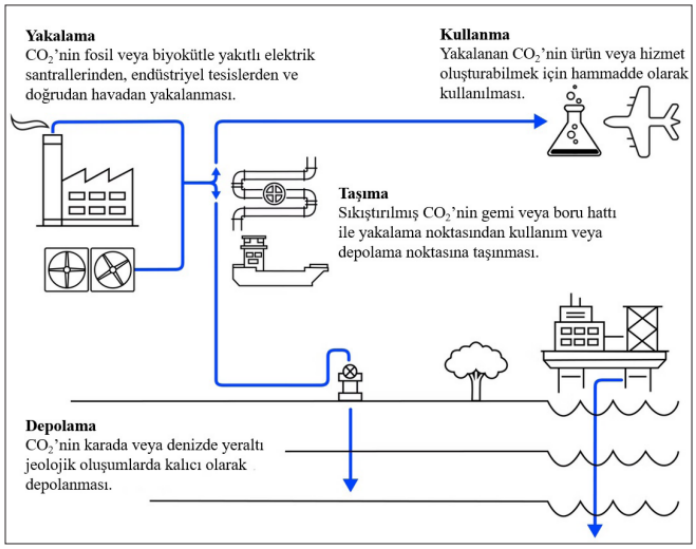
Tablo 4.8. Sera Gazı Emisyonu Azaltmak İçin Kullanılabilecek Yöntemler

Yöntem	Uygulama Alanı	Açıklama	Örnek Uygulama
Yakıt Dönüşümü	Sabit yanma	Kömür veya fuel-oil yerine doğal gaz veya biyogaz kullanımı	Üretim tesislerinde doğal gazlı kazanlara geçiş
Elektrifikasyon	Mobil yanma	Fosil yakıtlı araçlar yerine elektrikli araç kullanım	Firma araç filolarının elektrikli araçlara dönüştürülmesi
Enerji Verimli Ekipman	Sabit yanma	Yüksek verimli kazan ve motor kullanım	Eski kazanların yüksek verimli kazanlarla değiştirilmesi
Proses Optimizasyonu	Endüstriyel Prosesler	Üretim süreçlerinin iyileştirilmesi	Kimyasal reaksiyonların daha düşük misyonla gerçekleşmesi

Tablo 4.8. (Devam) Sera Gazı Emisyonu Azaltmak İçin Kullanılabilecek Yöntemler

Soğutucu Gaz Yönetimi	Soğutma Sistemeleri	Düşük Küresel Isınma Potansiyeline (GWP) sahip gazların kullanımı	HFC yerine doğal soğutucu akışkan kullanımı
Bakım ve Kaçak Kontrolü	Tesis yönetimi	Düzenli bakım ile yakıt tüketimi ve gaz kaçaklarının azaltılması	Periyodik sızdırmazlık testler

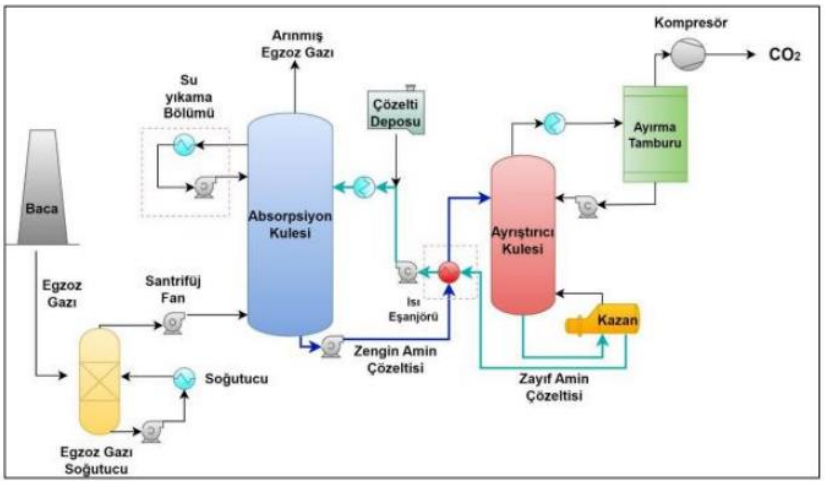
Bu tabloda tesiste gerçekleştirilecek teknik iyileştirmeler ile sera gazı emisyonlarının azaltılabileceği hususu değerlendirilmiştir. Ancak ileri düzey bir teknolojinin uygulanması durumunda, Karbon Yakalama ve Depolama teknolojileri sera gazı emisyon miktarının azaltılması açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Bu teknoloji 1970 lerden bu zamana kadar fosil yakıt endüstrisinde gelişmiş petrol geri kazanımı amacıyla yer altına CO_2 depolanması ile uygulanmaktadır. Geliştirilmiş petrol kazanımı (EOR) amacı dışında, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik olarak geliştirilen ilk CO_2 jeolojik depolama projesi Norveç'te bulunan Sleipner gaz sahasında uygulamaya alınmıştır (Kayhan, 2023). Karbon yakalama ve depolama (CCS) sistemi sadece sera gazı emisyonları azaltımı için kullanılan teknoloji iken Karbon yakalama, kullanım ve depolama (CCUS) ise yakalanan CO_2 nin faydalı bir şekilde kullanılmasınıda içerir, yani sadece sera gazı emisyonu azaltmakla kalmaz ekonomik değer de katmaktadır. CCUS sisteminin süreç adımlarını içeren Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4. CCUS Sürecinin Adımları (Kayhan,2022)

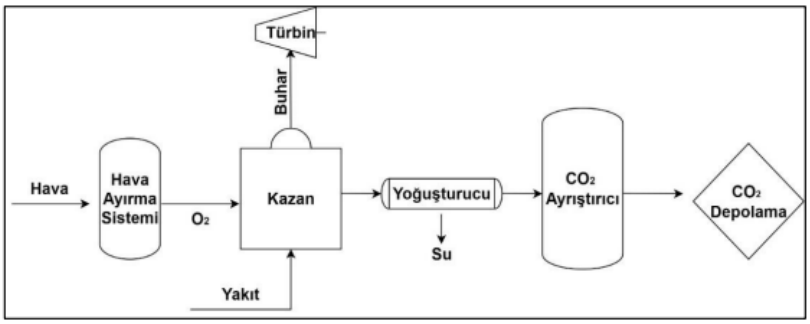
Kimya, demir-çelik, biyo-yakıt ve enerji üretim tesislerinde CCS teknolojisi kullanılmaktadır. Akademik yayınlar incelendiğinde CCS teknolojilerinin önümüzdeki yıllarda artarak devam edeceği hatta 2050 yılında karbon uzaklaştırma endüstrisinin toplam büyüklüğünün 1,2 trilyon dolara ulaşacağı tahmin edilmektedir (Yılmaz,2024). Avrupa Yeşi Mutabakatı belgesi ile karbon emisyonlarının en kısa sürede azaltılması ve 2050 yılına kadar sıfır karbon emisyonu hedeflenmektedir (Kumcu ve Özyörük, 2023). Dolasıyla hedeflerin sağlanması için hem enerji üretim kaynaklarının değiştirilmesi hemde CCS teknolojilerinin yaygınlaştırılması gerekmektedir. Teknolojinin yüksek maliyetli olduğu bilinmesine karşın, yakalanan ve depolanan karbonun yeniden değerlendirilmesine yönelik uygulamalar aracılığıyla ekonomik yükün kısmen azaltılabildiği literatürde bildirilmektedir. CCS teknolojileri, yanma öncesinde, yanma sonrasında veya oksi-yakıt yanması olarak üç ana kategoride ele alınmaktadır. Fosil yakıttan yanma gerçekleşmeden CO_2 yakalanması, yanma öncesinde kullanılan karbon yakalama teknolojisidir. Bu proseste karbon türevi yakıtlar yüksek sıcaklık ve basınç altında gazlaştırma prosesine tabi tutulmaktadır (Ertemel ve diğ., 2023).

Yöntemin avantajı ana yanma gerçekleştirilmeden yakıtın karbondan ayrıştırılmasıdır. Günümüzde amonyak üretiminde ve kömür gazlaştırma tesislerinde kullanılmaktadır (Varış ve diğ., 2023). Sanayi sektöründe yaygın olarak kullanılması, CO_2 yakalama oranı yüksek olması, yakma sonrası yakalama prosesi ile kıyaslandığında daha az su kullanılması da bu yöntemin diğer avantajları arasında yer almaktadır. Dezavantajları ise mevcut tesisler için fiziki olarak uygulanması zor ve maliyetli aynı zamanda yüksek basınçla çalışma, yanma sonrası yakalama prosesine kıyasla daha yüksek enerji kaybı yaşanmaktadır (Yılmaz, 2024). Yanma sonrası karbon yakalama teknolojisinde fosil yakıt yakıldıktan sonra ortaya çıkan ve baca gazında bulunan CO_2 in yakalanması amaçlanmaktadır (Ertemel ve diğ., 2023). Atık gaz içerisinde CO_2 yakalama verimi oldukça yüksek olan bu teknoloji aynı zamanda mevcut tesisler faaliyetlerine devam ederkende aplike edilebilmektedir. Yüksek su ihtiyacı gerektiren de bir teknolojidir (Yılmaz, 2024). Bu teknoloji, kazanlar, çimento fırınları ve endüstriyel fırınlar gibi büyük ölçekli fosil yakıtın yakılmasında kaynaklanan baca gazlarından CO_2 nin ayrılması içi kullanılır. Yakıt türüne göre tutulan CO_2 miktarı değişmekle beraber bu teknoloji ile yaklaşık %80-90 oranında CO_2 geri kazanılmaktadır (Bıyık ve Bahar, 2024). Yanma sonrası karbon yakalama diyagramı Şekil 4.5'de verilmiştir.



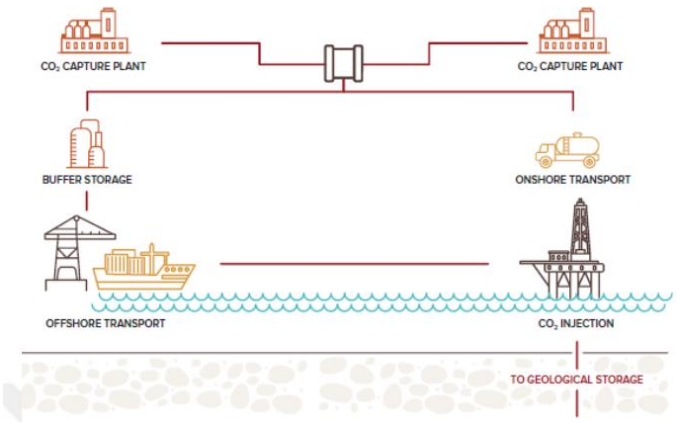
Şekil 4.5. Yanma Sonrası Karbon Yakalama Diyagramı (Bıyık ve Bahar, 2024)

Oksi-yakıt yanma ile karbon yakalama teknolojisinde yakıt saf O_2 ile yakılması sonucunda enerji elde edilmektedir (Varış, 2023). Bu teknoloji, pulverize kazanlı kömür santrallerinde, akışkan yataklı kömür santrallarinde ve gaz türbinlerinde kullanılabilmektedir (Ertemel ve diğ., 2023). Oksi-yakıt yakalama yöntemi Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Oksi-yakıt Yakalama Yöntemi (Varış,2023)

Prosesin en başında havadan ayrıştırılmış yüksek orandaki oksijen ile yakıtın tepkimeye girer ve yakıtın saf oksijenle yanmasından sonra yüksek oranda CO_2 ve H_20 elde edilir. Yüksek CO_2 içeriğine sahip bu atık gaz yoğuşturularak H_2O'dan ayrılır ve süreç sonlandırılmış olur (Varış, 2023). Saflaştırılmış karbondioksit, taşıma aşamasında depolama veya kullanım sahalarına nakledilmektedir. Sıkıştırılmış ve nemi giderilmiş CO_2, boru hatları veya tankerler aracılığıyla taşınabilmekte olup, bu yöntemler sayesinde karbondioksitin depolama alanlarına güvenli ve kontrollü bir şekilde ulaştırılması sağlanmaktadır. CO_2 taşıma Şekil 4.7'de verilmiştir.



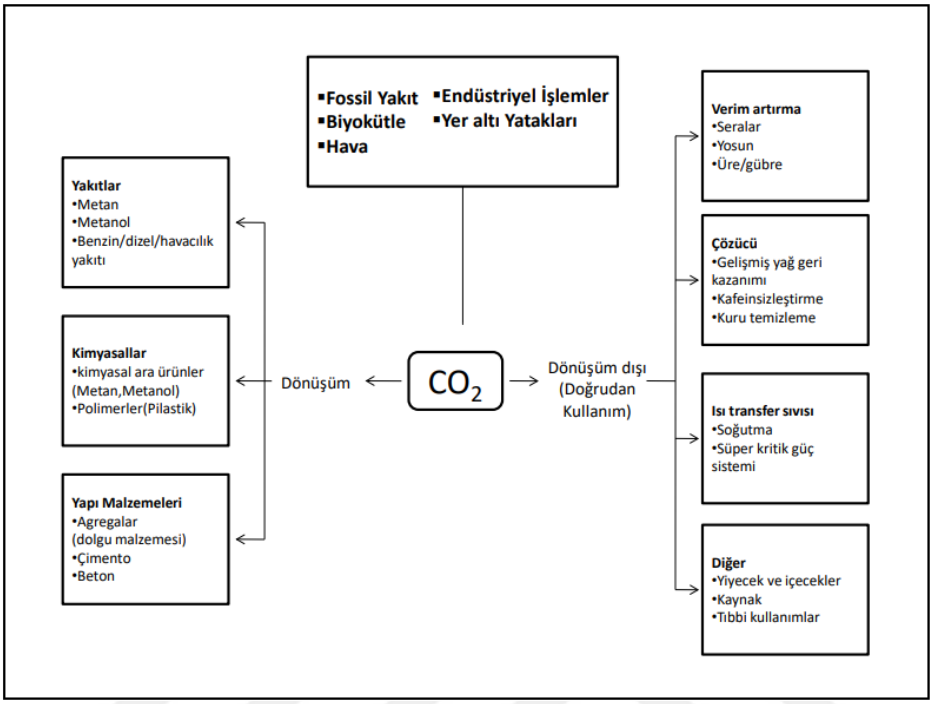
Şekil 4.7. CO_2 Taşıma (Filtekin, 2022)

CO_2 kullanımı uygulanabilir bir altenatif olsada uzun vadeli azaltma çabalarını desteklemek için CO_2 inin kalıcı depolama için yer altına enjekte edilmesi gerekmektedir (Özdemir, 2025). Sedimanter kayaçlar, rezevuar kayaçlar, örtü kayaçlar, derin tuzlu akifer gibi alanlarda CO_2 depolanabilmektedir (Filtekin, 2022). Karbon, günlük yaşamda kullanılan birçok ürün ve malzemenin temel yapı taşlarından biridir. Bu bağlamda CO_2 çevresel bir atık olarak ele alınması yerine, sürdürülebilir üretim ve döngüsel ekonomi kapsamında değerli bir hammadde olarak değerlendirilmesi gerekmektedir (Özdemir, 2025). CO_2, CCUS sistemleri kapsamında farklı sektörlerde çok yönlü kullanım potansiyeline sahip bir bileşen olarak değerlendirilmektedir.

CO_2'nin kullanım alanları; sentetik yakıt üretimi, kimyasal ve polimer üretimi, inşaat malzemeleri, EOR uygulamaları ile tarım ve biyolojik süreçler şeklinde sınıflandırılmaktadır. Kimya sektöründe CO_2, çeşitli kimyasal dönüşüm süreçleri aracılığıyla hammadde olarak kullanılmakta ve polimerler ile katma değeri yüksek kimyasal ürünlerin üretiminde değerlendirilmektedir. İnşaat sektöründe ise mineralizasyon mekanizmaları yoluyla kalsiyum karbonat gibi kararlı mineral fazlara dönüştürülerek beton ve çimento üretiminde yapı bileşeni olarak kullanılabilmektedir.

Yakalanan CO_2, kimyasal sentez süreçleri sonucunda metanol ve etanol gibi sentetik yakıtlara dönüştürülmekte ve bu sayede fosil yakıtlara alternatif düşük karbonlu enerji taşıyıcılarının üretimine katkı sağlamaktadır. Bunun yanı sıra CO_2, tükenmiş petrol sahalarına enjekte edilerek EOR uygulamalarında kullanılmakta olup, bu yöntem hem

petrol üretim verimliliğini artırmakta hem de CO_2'nin yeraltında uzun süreli olarak tutulmasına olanak sağlamaktadır. CO_2 kullanım alanları Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8. CO_2 Kullanım Alanları (Ceylan ve diğ., 2024)

1991 yılında ilk defa Norveç hükümeti CO_2 emisyonları için vergi oluşturmuştur. Kirleten öder ilkesine göre düzenlenen iklim değişikliğine ilişkin bu sistemle beraber sera gazı emisyonları sınırlandırmak amaçlanmıştır. CCS projeleri ilk kez 1996 yılında Norveç'te hayata geçirilmiştir. Sleipner CO_2 enjeksiyon projesi, 1996 yılından bu yana yaklaşık 16 milyon ton karbondioksitin enjekte edildiği ve dünyanın ilk endüstriyel ölçekli açık deniz CO_2 yakalama ve depolama projesi olarak tanımlanmaktadır. Kanada'da faaliyete geçen Boundary Dam Termik Santrali ise, karbon yakalama ve depolama prosesine sahip dünyanın ilk büyük ölçekli termik santrali olarak değerlendirilmektedir (Ceylan, ve diğ., 2024).

Teknolojik gelişmelerin hız kazanması ve buna paralel olarak maliyetlerin azalmasıyla birlikte söz konusu teknoloji giderek yaygınlaşmış; Global CCS Institute tarafından yayımlanan CCS 2025 Küresel Durum Raporu'na göre faaliyette olan CCS tesislerinin sayısının yıllık baz da %54 oranında arttığı rapor edilmiştir. 2024 Küresel CCS Durumu Raporu'nun yayımlanmasından bu yana 27 CCS projesi işletmeye alınmış, buna ek olarak

30 proje inşaat aşamasına geçmiştir. Geliştirme aşamasındaki CCS tesislerinin sayısı; artan politika desteği, yükselen ticari ilgi ve CCS'nin iklim değişikliğiyle mücadelede kritik bir çözüm aracı olarak giderek daha fazla kabul görmesi doğrultusunda, son bir yıl içerisinde kayda değer ölçüde artış göstermiştir. Yakalama kapasitesi ise tüm proje geliştirme aşamalarında sergilenen güçlü büyüme eğilimiyle artmaya devam etmektedir.

2017 yılından bu yana toplam planlanan karbon yakalama kapasitesi yıllık bileşik baz da %30'un üzerinde bir büyüme oranı sergilemiş, bu artış eğilimi geçtiğimiz yıl da korunmuştur. Ülkeler bazında CCS teknolojileri incelenecek olursa; Amerika kıtası, 2023 yılı itibarıyla 223 milyon tonun üzerinde CO_2 depolamış olup, bölgede hâlihazırda 39 CCS projesi faal durumdadır. Nihai yatırım kararına ulaşılması beklenen Blue Point–Louisiana ve BKV–South Texas projelerinin devreye alınmasıyla birlikte, kıtadaki aktif proje sayısının ve toplam depolama kapasitesinin önümüzdeki dönemde daha da artacağı öngörülmektedir (Global CCS Institute, 2025). Birleşik Krallık'ın önde gelen CCS girişimleri arasında yer alan Net Zero Teesside (NZT) ve Northern Endurance Partnership (NEP), toplam 8 milyar sterlin tutarındaki borç finansmanının sağlanmasının ardından finansman sürecini başarıyla tamamlamıştır. Söz konusu projeler, Birleşik Krallık'ta son birkaç on yıl içerisinde gerçekleştirilen en büyük ölçekli proje finansmanları arasında yer almakta olup, aynı zamanda tam zincirli bir CCS projesi için gerçekleştirilen ilk proje finansmanı olma niteliğini taşımaktadır.

Umman da önemli ilerlemeler kaydetmektedir. OQGN, ülkenin Net Sıfır 2050 stratejisiyle uyumlu olarak, emisyon kaynaklarını depolama ve kullanım sahalarına bağlamayı amaçlayan ulusal bir CO_2 taşıma ağı kurmayı planlamaktadır. Başlıca girişimler arasında, Shell ile iş birliği içinde yeraltı CO_2 depolama projelerinin geliştirilmes, Oxy Oman ortaklığında EOR amacıyla bir CO_2 boru hattının kurulması, ayrıca Shell, OQ ve PDO ortaklığında yürütülen ve hâlihazırda ön fizibilite mühendislik ve tasarım aşamasında bulunan Blue Horizons düşük karbonlu amonyak projesi yer almaktadır (Global CCS Institute, 2025).

Avustralya'daki Cooper Havzası'nda yer alan Santos ve Beach Energy ortaklığındaki Moomba CCS projesi, Cooper Basin'de bulunan Moomba Gas Plant'ten yılda 1,7 milyon ton CO_2'nin yakalanması ve depolanmasına Ekim 2024'te başlamıştır. Ton başına toplam maliyeti 30 ABD dolarının altında olan Moomba, düşük maliyetli bir proje olarak öne

çıkmakta ve güçlü politika çerçeveleriyle desteklendiğinde CCS'nin ticari bir model içerisinde nasıl hayata geçirilebileceğini açık biçimde ortaya koymaktadır (Global CCS Institute, 2025). Japonyada Tomakomai Gösteri Projesi, Japon karbon yakalama ve depolama şirketi tarafından yürütülen tam zincir pilot projesidir. Açık denizde 300.000 tCO_2'nin üzerinde depolama gerçekleştirmektedir.

Küresel iklim ve enerji hedeflerine ulaşma sürecinde stratejik bir rol üstlenen CCUS teknolojilerinin Türkiye'de araştırılması, teknik ve kurumsal yetkinliklerin geliştirilmesi, pilot ölçekli uygulamaların gerçekleştirilmesi ve nihayetinde ticari kullanıma hazır hale getirilmesi güncel politika gündeminde önemli bir yer tutmaktadır. Bu doğrultuda, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ile TENMAK koordinasyonunda "Ulusal Karbondioksit Tutma ve Değerlendirme Teknolojileri Yol Haritası" hazırlanması çalışmaları yürütülmektedir. Ayrıca, 2023 yılında TENMAK tarafından Ar-Ge Teşvikleri kapsamında CCUS teknolojilerine yönelik özel bir çağrı açılarak bu alandaki araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin desteklenmesi hedeflenmiştir.

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ile EBRD iş birliğinde hazırlanan Türkiye Çelik, Alüminyum ve Çimento Sektörleri için Düşük Karbonlu Yol Haritaları projelerinde de CCUS teknolojilerine yer verilmiş; böylece enerji yoğun ve emisyon yoğun sektörlerde bu teknolojilerin uygulanabilirliği stratejik planlama belgelerine entegre edilmiştir. Türkiye'nin optimum uygulama politikası seçeneklerini belirleyecek iki önemli faktör vardır. Birincisi, kalıcı jeolojik CO_2 depolama sahalarının doğal mevcudiyeti ve bunların teknik ve ekonomik fizibilitesi ve ikinci olarak Türkiye'nin 2053 net-sıfır hedefi kapsamındaki politik hedefleri içerisinde CCUS seçeneği tercihidir. Türkiye'nin, net-sıfır salıma ulaşmada tanımlanan ulusal iklim hedeflerinde CCUS'un yer alıp almayacağı konusundaki siyasi pozisyonunu netleştirmesi gerekmektedir (Sayman ve diğ., 2024).

Sera Gazı Azaltım Politikaları Dairesi Başkanlığı, 2024 yılında yürütülen faaliyet ve projelere yer vermiştir. Bu projelerden biride CCS mevzuat altyapısının geliştirilmesi projesidir. Bu projede, Avrupa Birliği Karbon Yakalama ve Depolama Yönergesi'nin ülkemize uyarlanması ve bu yönergeye uygunluk sağlamak için kapasite geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Projenin başlıca teknolojik, kurumsal, hukuki ve prosedürel ihtiyaçların tespit edilmesi, CCS konusunda teknik ve kurumsal kapasitenin artırılması, AB-CCS Direktifi hakkında farkındalığın artırılması iş paketlerini kapsamaktadır

(Sayman ve diğ., 2024). Projenin mevcut durumunda değerlendirme süreçlerinin devam ettiği bilinmektedir. Türkiyede CCS hakkında henüz bir mevzuat bulunmaması ile beraber uygulanan bir CSS teknolijiside bulunmamaktadır. Buna karşın Türkiye, teknolojik açıdan benzer uygulamalar kapsamında, gelişmiş petrol kurtarımı ve jeotermal sahalarda rezervuar basıncının artırılması amacıyla CO_2'nin yakalanarak yeniden yeraltına enjekte edilmesi konusunda bir deneyime sahiptir. Bu alanlarda edinilen tecrübeler, Türkiye'nin CCUS politikalarının geliştirilmesine önemli ölçüde katkı sağlayabilecek niteliktedir. Türkiye, gelişmiş petrol kurtarımı amacıyla yeraltı jeolojik formasyonlarına CO_2 enjeksiyonu gerçekleştiren öncü ülkeler arasında yer almaktadır. Ancak bu uygulamalarda temel hedef, sanayi tesislerinden yakalanan baca gazı veya karbondioksitin yeraltında depolanması değil, doğal CO_2 rezervuarlarından üretilen CO_2 kullanılarak petrol üretiminin artırılması olmuştur.

Son yıllarda özellikle jeotermal enerji alanında pilot çalışmaların hız kazandığı görülmektedir. Türkiye'de, başta Menderes Grabeni olmak üzere birçok jeotermal sahada, jeotermal akışkan ile birlikte önemli miktarlarda CO_2 yüzeye çıkmaktadır. Denizli ilinde yer alan Kızıldere Jeotermal Sahası'nda üretilen CO_2'nin sınırlı bir bölümü, bölgede faaliyet gösteren Linde firmasına ait bir tesiste gıda kullanımına uygun saf CO_2 olarak işlenmekte ve ticarileştirilmektedir. Geri kalan CO_2 ise atmosfere salınmaktadır. Yürütülen pilot projeler kapsamında, jeotermal sahalardan üretilen CO_2'nin yakalanarak yeniden sisteme kazandırılmasının, hem rezervuar sürdürülebilirliğine hem de emisyonların azaltılmasına olası katkıları araştırılmaktadır (Sayman ve diğ., 2024).

5. SONUÇLAR

Gelecek kuşaklara yaşanabilir bir çevre bırakılabilmesi amacıyla, günümüzde oluşan sera gazı emisyonlarının belirlenmesi ve bu emisyonların azaltılmasına yönelik geleceğe dönük hedeflerin ortaya konulması önemli bir gerekliliktir.

Enerji, nişasta sektörünün üretim sürekliliğini sağlayan, ürün kalitesini belirleyen ve maliyetleri doğrudan etkileyen temel bir ihtiyaçtır. Üretim süreçlerinin birçok aşaması yüksek miktarda enerji gerektirmektedir. Bu tezde Türkiye'de bir nişasta firmasının 2024 yılındaki doğrudan sera gazı emisyonu belirlenmiş ve azaltılmasına yönelik önlemler değerlendirilmiştir. İlk olarak sahada bulunan emisyon kaynakları, saha verileri tespit edilmiştir. ISO 14064-1 standartı yaklaşımı ile hesaplamalar yapılmıştır. Toplam doğrudan sera gazı emisyon miktarının 58.893,18 ton CO_2 olduğu hesaplanmıştır. Sabit yanma kaynaklı oluşan emisyonların, 58.752,52 ton CO_2 olduğu, buhar kazanlarından kömür yakıtı kullanımından kaynaklanan CO_2 eşdeğeri emisyonları 51.065,85 ton CO_2 olarak hesaplanmıştır. Kömür kullanımı, toplam doğrudan sera gazı emisyonlarının yaklaşık %87 sini oluşturmaktadır. Diğer ekipmanlardan kaynaklanan emisyonlar görece daha düşük seviyerlerde kalmıştır. Çalışmanın sınırlarında dolaylı sera gazı emisyonları içerisinde yer alan elektrik kullanımından kaynaklan emisyonlar, tedarik zincirinden kaynaklanan emisyonlar, atık yönetimine ait emisyonlar yer almamaktadır ancak dolaylı emisyonlarda özellikle tarımsal kaynaklı emisyonlar hesaplamalara dahil edilseydi oluşacak toplam emisyon miktarının ciddi düzeyde artış olacağı öngörülmektedir.

Emisyonların belirlenmesi tek başına çevresel iyileştirme gerçekleştirmez, etkin azaltım yöntemlerinin uygulanması en önemli adımlardan biridir. Enerji verimliliği uygulamaları, yakıt kaynağı dönüşümü, yenilenebilir enerji entagrasyonu ve atık ısı geri kazanım tesisleri gibi yöntemlerin uygulanması emisyonu azaltmak için kullanılabilmektedir. Bu yöntemler sadece emisyonu azaltmakla kalmaz aynı zamanda enerji maliyetlerinide düşürmekte ve dolasıyla ekonomik sürdürülebilirliğide desteklemektedir. Bunların yanında soğutucu gazların ve karbondiosit tüplerinin daha çevreci olan alternatiflerinin kullanılması, araçların çevre dostu yakıtlar kullanması, kaçak emisyonların önlenmesi için periyodik bakımların düzenli olarak yapılması gibi yapılacak aksiyonlar yine azaltım için etkili sonuçlar doğurmaktadır. Bu çalışma özelinde değerlendirilecek olursa doğrudan sera gazı emisyonuna sebep olan en büyük etkenin kömür kullanımı olduğu

görülmüştür ve sera gazı emisyonu azaltımı için önerilebilecek en etkin yöntem ise yakıt dönüşümü ve temiz enerji kullanımı olarak sunulabilmektedir. Yine son dönemlerde adından sıkça bahsedilen CCS teknolojileride özellikle fosil yakıt kullanan tesislerde sera gazı emisyonlarını azaltımı için kullanılan bir teknolojidir. Enerji üretimi ile birlikte sera gazı emisyonlarının yoğun olduğu sektörlerde, yalnızca yenilenebilir enerjiye geçiş yoluyla kısa vadede tam bir karbonsuzlaşmanın sağlanması gerçekçi görünmemektedir. Bu bağlamda CCS teknolojileri, mevcut endüstriyel altyapının tamamen terk edilmesi yerine dönüştürülmesini mümkün kılan ara çözüm mekanizmaları sunmaktadır. Nitekim 1990'lı yıllardan itibaren uygulamada olan Sleipner CO_2 Enjeksiyon Projesi gibi projeler, uzun dönemli jeolojik depolamanın teknik açıdan uygulanabilir ve izlenebilir olduğunu göstermiş; böylece teknolojinin yalnızca teorik değil, pratik düzlemde de işlerliğini kanıtlamıştır.

Türkiye açısından değerlendirildiğinde, jeolojik depolama potansiyelinin belirlenmesi, saha karakterizasyon çalışmalarının artırılması ve karbon yönetimi altyapısının oluşturulması öncelikli gereklilikler arasında yer almaktadır. Özellikle petrol ve doğal gaz sahalarındaki rezervuar yönetimi deneyimi ile jeotermal alanlardaki enjeksiyon uygulamaları, teknik kapasite açısından önemli bir başlangıç noktası oluşturmaktadır. Bununla birlikte, CCS teknolojilerinin ulusal ölçekte uygulanabilirliğinin sağlanabilmesi; açık ve öngörülebilir bir yasal çerçeve, ekonomik teşvik mekanizmaları, karbon fiyatlandırma araçları ve güçlü bir MRV sistemi ile desteklenmelidir. CCS teknolojileri tek başına nihai çözüm olmamakla birlikte, enerji dönüşüm sürecinin bütüncül bir bileşeni olarak değerlendirildiğinde stratejik önem taşımaktadır. Uzun vadeli net sıfır hedeflerine ulaşılabilmesi için yenilenebilir enerji yatırımları, enerji verimliliği uygulamaları ve sanayide yapısal dönüşüm politikaları ile entegre biçimde planlanması gerekmektedir. Bu çerçevede CCS teknolojileri, Türkiye'nin sürdürülebilir kalkınma hedefleri ile iklim taahhütleri arasında denge kurulmasında tamamlayıcı ve sistemik bir araç olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, bu tez nişasta sektörü özelinde doğrudan sera gazı emisyon sonuçlarını ortaya koymuş ve bu emisyonların azaltılması için uygulanabilecek yöntemleri değerlendirmiştir. Bu yönüyle çalışma, sektöre özgü emisyon yönetimi konusunda literatüre katkı sağlamıştır. Ayrıca, sera gazı emisyonlarının azaltımı açısından yakıt

dönüşümü, temiz enerji kullanımı ve karbon yakalama teknolojilerinin uygulanabilirliğine dair değerlendirme sunmuş; gelecekte yapılacak araştırmalar için de sektörel sürdürülebilirlik stratejilerinin geliştirilmesine ve emisyon azaltım politikalarının planlanmasına temel teşkil etmiştir.

KAYNAKLAR

Adenle, Y., ve Alshuwaikhat, H. (2017). Spatial estimation and visualization of CO_2 emissions for campus sustainability: The case of King Abdullah University of Science and Technology (KAUST), Saudi Arabia. *Sustainability, 9*(11), 2124. https://doi.org/10.3390/su9112124

Ahsan, N., Hewage, K., Razi, F., Hussain, S. A., ve Sadiq, R. (2023). 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, 185*, 113621. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113621

Akcan, S. (2020). A hybrid approach to identify the risk priority of sources of greenhouse gases. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 26*(1), 17–25. https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1512603

Akcan, S., Kuvvetli, Y., ve Kocyigit, H. (2018). Time series analysis models for estimation of greenhouse gas emitted by different sectors in Turkey. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 24*(2), 522–533. https://doi.org/10.1080/10807039.2017.1385313

Akça, B., ve Yetişgin, S. O. (2023). Hayvansal üretim sistemlerinde sera gazı emisyonlarının etkisini hafifletmeye yönelik öneriler. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology, 11*(5), 987–993. https://doi.org/10.24925/turjaf.v11i5.987-993.6151

Akgerman, N., ve Topçu, İ. (2011). Binek otomobillerde CO_2 emisyon miktarının azaltılmasına yönelik stratejilerin değerlendirilmesi. *İTÜDERGİSİ/d, 10*(2).

Aksu, İ. R., Kuruderse, G., Altın, A. N., ve Derse, O. (2025). Greenhouse gas emission estimation and risk assessment for sectors. *International Scientific and Vocational Studies Journal, 9*(1), 81–93. https://doi.org/10.47897/bilmes.1666752

Alfredsson, H. A., Oelkers, E. H., Hardarsson, B. S., Franzson, H. S., Gunnlaugsson, E., ve Gislason, S. R. (2013). The geology and water chemistry of the Hellisheidi, SW-Iceland carbon storage site. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 12, 399–418. https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.11.019

Alper, D., ve Anbar, A. (2008). İklim değişikliğinin finansal hizmet sektörüne etkileri. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi, 7*(23), 223–253.

Argun, M. E., Ergüç, R., ve Sarı, Y. (2019). Konya/Selçuklu ilçesi karbon ayak izinin belirlenmesi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7*(2), 287–297.

Argun, M. E., Ergüç, R., ve Sarı, Y. (2019). Konya/Selçuklu ilçesi karbon ayak izinin belirlenmesi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7*(2), 287–297.

Arı, M. Ç., Kabakcı, S. B. (2024). Bir Organize Sanayi Bölgesinde Sera Gazı Envanteri Hazırlanması ve Emisyon Azaltım Projelerinin Belirlenmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 10*(2), 465-477.

Atabey, T. (2013). Karbon ayak izinin hesaplanması: Diyarbakır örneği. Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 346227.

Avrupa Çevre Ajansı. (2009). *Diverting waste from landfill: Effectiveness of waste management policies in the European Union* (EEA Report No. 7/2009). https://www.eea.europa.eu/highlights/landfillingdown-as-europe-shifts-tobetter-waste-management (Ziyaret tarihi: 10 Mayıs 2025)

Avrupa Çevre Ajansı. (2020). *Greenhouse gas – Data viewer*. https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer (Ziyaret tarihi: 21 Mayıs 2025)

Avrupa Komisyonu. (2011). *Report from the Commission to the European Parliament, the European Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on the thematic strategy on the prevention and recycling of waste*. Brussel.

Avrupa Komisyonu. (2019a). *Communication on the European Green Deal*. The European Commission. https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-dealcommunication_en.pdf (Erişim tarihi: 10 Mayıs 2025)

Avrupa Komisyonu. (2019b). *European Union climate action and the European Green Deal*. https://ec.europa.eu/clima/policies/eu-climate-action_en (Erişim tarihi: 10 Mayıs 2025)

Avrupa Komisyonu. (2019c). *A European Green Deal: Striving to be the first climate-neutral continent*. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en#policy-areas (Ziyaret Tarihi: 22 Mayıs 2025)

Avrupa Komisyonu. (2020a). *Greenhouse gas emissions from waste*. https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/DDN-20200123-1 (Erişim tarihi: 10 Mayıs 2025)

Avrupa Komisyonu. (2020b). *Reducing greenhouse gas emissions: Commission adopts EU methane strategy as part of European Green Deal*. Brussels.

Aygül, Ö., ve Baştuğ, S. (2020). Deniz taşımacılığı kaynaklı hava kirliliği ve insan sağlığına etkisi. *Journal of Maritime Transport and Logistics, 1*(1), 26–40.

Babaoğlu, N., ve Özgünoğlu, K. (2017). Kahramanmaraş havalimanı için uçaklardan kaynaklanan emisyonların belirlenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20*(3), 24–30.

Bang, H. Q., ve Khue, V. H. N. (2019). Air emission inventory. In A. Khare (Ed.), *Air Pollution - Monitoring, Quantification and Removal of Gases and Particles* (pp. 1–18). IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.79928

Bastianoni, S., Marchi, M., Caro, D., Casprini, P., & Pulselli, F. M. (2014). The connection between 2006 IPCC GHG inventory methodology and ISO 14064-1 certification standard–A reference point for the environmental policies at sub-national scale. *Environmental science & policy*, *44*, 97-107.

Bayraç, N. H., ve Doğan, E. (2016). Türkiye'de iklim değişikliğinin tarım sektörü üzerine etkileri. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi, 11*(1), 23–48.

Bıyık, C. O., & Bahar, M. (2024). Carbon capture, utilization, storage technology, and effect of underground storage on seismicity. *International Sustainable Tourism Congress Bildiri Kitabı* (s. 14-32). Aksaray.

Bogner, J., et al. (2008). Mitigation of global greenhouse gas emissions from waste: Conclusions and strategies from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report. *Waste Management ve Research, 26*(1), 11–32. https://doi.org/10.1177/0734242X07088433

Cano, N., Berrio, L., Carvajal, E., & Arango, S. (2023). 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, 30*(16), 3980–3996. https://doi.org/10.1007/s11356-022-22119-4

Ceylan, N., Yıldızay, H. D., Aydın, Ö., & Felek, E. (2024). *Karbon yakalama, depolama (CCS) ve gelişmiş petrol geri kazanımı (EOR) teknolojilerinin Türkiye'de uygulanabilirliği üzerine bir fizibilite çalışması*. M. Bozdemir (Ed.). Yaz Yayınları

Coşkun, S., ve Doğan, N. A. (2021). Tekstil endüstrisinde karbon ayak izinin belirlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 25*(1), 28–35.

Çabuk, S. Ö. (2011). Küresel ısınmaya yol açan sera gazı emisyonlarındaki artış ile mücadelede iktisadi araçların rolünün değerlendirilmesi: Enerji sektörü örneği. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara, 302758.

Çağlar, H. (2021). Sürdürülebilir mimarlık kapsamında eğitim yapılarının enerji etkin aydınlatma açısından incelenmesi ve uygulama örneklerinin değerlendirilmesi. Yüksek lisans tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, İstanbul.

Çalışkan Eleren, S., ve Öner, B. (2019). Sürdürülebilir ve çevre dostu biyoyakıt hammaddesi: Mikroalgler. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 25*(3), 304–319.

Çalışkan, M. E., Arslan, M., Karalar, D., Demirel, D., ve Demirel, M. (2025). Nişasta ve şeker bitkileri üretiminde mevcut durum ve sürdürülebilirlik. *Türkiye Ziraat Mühendisliği X. Teknik Kongresi, Bildiriler Kitabı-1* (ss. 456–476). Ankara.

Çalışkan, M. E., Çalışkan, S., Demirel, U., Aksoy, E., ve Arıoğlu, H. H. (2020). Nişasta ve şeker bitkileri üretiminde mevcut durum ve gelecek. *Türkiye Ziraat Mühendisliği IX. Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı-1,* 439.

Çalışkan, M. E., Çalışkan, S., Demirel, U., Aksoy, E., ve Arıoğlu, H. H. (2022). Nişasta ve şeker bitkileri üretiminde mevcut durum ve gelecek. *Orta Avrupa Yeşil İnovasyon Dergisi*, 10(2), 37–50. https://doi.org/10.33038/jcegi.3472

Çalışkan, M. E., Onaran, H., ve Arıoğlu, H. (2010). Overview of the Turkish potato sector: Challenges, achievements and expectations. *Potato Research, 53*(3), 255–266. https://doi.org/10.1007/s11540-010-9167-4

Çalışkan, M. E., Söğüt, T., Demirel, U., ve Arıoğlu, H. H. (2015). Nişasta ve şeker bitkileri üretiminde değişimler ve yeni arayışlar. *Türkiye Ziraat Mühendisliği VIII. Teknik Kongresi* (ss. 426–449). Ankara.

Çerçi, M. (2020). IPCC Tier 1 ve DEFRA metodları ile karbon ayak izinin belirlenmesi: Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi örneği. Yüksek lisans tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzincan,706266.

Çevre Kanunu. (1983). *T.C Resmî Gazete* (27019, 9 Ekim 2008). ÇŞİB (T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değiişikliği Bakanlığı).

Dağlıoğlu, S. T. (2021). Carbon footprint analysis of Ege University within the scope of environmental sustainability. *Commagene Journal of Biology, 5*(1), 51–58.

Davarcıoğlu, B., ve Lelik, A. (2017). Sanayide iklim değişikliğine uyum ve eko-verimlilik (temiz üretim) programı: Örnek uygulamalar. *Mesleki Bilimler Dergisi (MBD), 6*(2), 94–105.

Del Grosso, S. J., Wirth, T., Ogle, S. M., ve Parton, W. J. (2008). Tarımsal azot oksit emisyonlarının tahmin edilmesi. *EOS, İşlemler Amerikan Jeofizik Birliği, 89*(51), 529.

Derse, O. (2022). CO_2 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*, 1–12. https://doi.org/10.1007/s11356-022-19913-9

Deveci, E. Ü. (2019). Termik santrallerin MRV sistemi sera gazı emisyon hesabı ve emisyonların iyileştirilmesi. *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi (Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences), 22*(4), 199–214. https://doi.org/10.17780/ksujes.639564

Dritsaki, M. (2020). Forecasting European Union CO_2 emissions using autoregressive integrated moving average-autoregressive conditional heteroscedasticity models. *670216917*, 411–423.

Dumrul, Y. (2019). Sağlık harcamaları ve çevre kirliliği: ASEAN-5 ülkeleri üzerine bir panel veri analizi. *IBAD Sosyal Bilimler Dergisi*, 396–407.

Dündar, O., ve Kolay, A. (2021). 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, 14*(1), 317–334.

Eleren, S. Ç., ve Öner, B. (2019). Sürdürülebilir ve çevre dostu biyoyakıt hammaddesi: Mikroalgler [Sustainable and eco-friendly raw materials for biofuels: Microalgae]. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(3), 304–319.

Elleby, C., Domínguez, I. P., Adenauer, M., ve Genovese, G. (2020). COVID-19 salgınının küresel tarım piyasaları üzerindeki etkileri. *Çevre ve Kaynak Ekonomisi*, *76*(4), 1067–1079. https://doi.org/10.1007/s10640-020-00473-6

Enerji Raporu. (2013*). Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi*, ISSN:1301-6318, 18-56

Erden, C., ve Turan Koyuncu, F. (2014). Kalkınma ve çevresel sağlık riskleri: Türkiye için ekonometrik bir analiz. *Aksaray Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, *6*(2), 9–23.

Erdoğan, S. (2020). Enerji, çevre ve sera gazları. *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 10*(1), 277–303.

Ertemel, E., Dora Üreten,. H., Helvacı, M.E., Kardeş, Yiğit.,(2023). Karbon Yakalama ve Depolama Teknolojileri Bilgilendirme Notu. *Türkiye Sınai Kalkınma Bankası,* 1-29

Filimonau, V., Archer, D., Bellamy, L., Smith, N., ve Wintrip, R. (2021). The carbon footprint of a UK university during the COVID-19 lockdown. *Science of the Total Environment, 756*, 143964. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143964

Filtekin, N. (2022). Türkiye'de karbon yakalama ve depolama potansiyelinin araştırılması- çimento tesisi örneği. Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul,771534.

Fankhauser, S., Smith, S., & Allen, T. (2008). How do international organizations account for greenhouse gas emissions? **Energy Policy*, 36*(8), 3156–3162. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.03.007

García, S., et al. (2023). 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, 891, 164417. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164417

Goncaloğlu, B. İ., Ertürk, F., ve Erdal, A. (2000). Termik santrallerle nükleer santrallerin çevresel etki değerlendirmesi açısından karşılaştırılması. *Ekolojik Çevre Dergisi*, 34, İstanbul.

González, C. A., et al. (2021). Greenhouse gases emissions from the diet and risk of death and chronic diseases in the EPIC-Spain cohort. *European Journal of Public Health, 31*(1), 130–135. https://doi.org/10.1093/eurpub/ckaa205

Gowrisankar, L., Gupta, R., ve Sivasubramanian, A. (2022). Greenhouse gas emissions: A rapid submerge of the world. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 32*(6), 061104. https://doi.org/10.1063/5.0094543

Gödekmerdan, E., Baştabak, B., ve Sarptaş, H. (2023). Sınırda karbon düzenleme mekanizması ve Türkiye'de tarımın geleceği: Fermente gübre, kompost ve biyoçar perspektifi. *Yeşil Ekonomi: Araştırmacılar Konferansı Tam Bildiri Metinleri Kitapçığı*, 7–19.

Gökten, Y. S., Koçak, E., ve Gökten, K. (2022). Antroposen krizini aşmak: CO_2 emisyonunu etkileyen değişkenler üzerine bir panel veri analizi. *Kafkas Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 13*(26), 1013–1035.

Gülhan, H., Özgün, H., Erşahin, M. E., Dereli, R. K., ve Öztürk, İ. (2018). İstanbul'daki biyolojik atıksu arıtma tesislerinin sera gazı emisyonunun modelleme metodu ile tahmini. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 30*(1), 59–67.

Günel, E., Çalışkan, M. E., Kuşman, N., Tuğrul, K. M., Yılmaz, A., Ağırnaslıgil, T., ve Onaran, H. (2010). Nişasta ve şeker bitkileri üretimi. *Türkiye Ziraat Mühendisliği VII. Teknik Kongresi*, 11(15), 377–396.

Global CCS Institute. (2025). *Global status of CCS 2025: Staying the course*. Global CCS Institute

Halimatussadiah, A., Nainggolan, D., Yui, S., Moeis, F. R., ve Siregar, A. A. (2021). Endonezya'da ilerici biyodizel politikası: Hükümetin ekonomik önermesi geçerli mi? *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 150*, 111431. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111431

Hansupalak, N., Piromkraipak, P., Tamthirat, P., Manitsorasak, A., Sriroth, K., & Tran, T. (2016). *Biogas reduces the carbon footprint of cassava starch: A comparative assessment with fuel oil*. AGRIS / FAO.

Harsányi, E., Bashir, B., Almhamad, G., Hijazi, O., Maze, M., Elbeltagi, A., ve Szabó, S. (2021). AB-28'de tarım sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonları: Çok değişkenli bir analiz yaklaşımı. *Energies, 14*(20), 6495. https://doi.org/10.3390/en14206495

Hasan, M., ve Oláh, J. (2022). Avrupa Birliği'nde biyoyakıt üretimi ve tüketiminde mevcut eğilimler. *Orta Avrupa Yeşil İnovasyon Dergisi*, 10(2), 37–50. https://doi.org/10.33038/jcegi.3472

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Edited by Eduardo, C., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M., ve Malley, J. IPCC. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. & Tanabe, K. (Eds.). IGES, Japan. Erişim: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/

IPCC. (2005). *IPCC special report on carbon dioxide capture and storage*. Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf

İklim Kanunu (2025). *T.C Resmî Gazete* (7552, 9 Temmuz 2025). ÇŞİB (T.C Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı).

Javanmard, M. E., ve Ghaderi, S. F. (2022). A hybrid model with applying machine learning algorithms and optimization model to forecast greenhouse gas emissions with energy market data. *Sustainable Cities and Society, 82,* 103886. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103886

Kalonya, D. H. (2022). İklim değişikliği azaltım ve uyum süreçlerinde mera alanlarının önemi. *Çevre Şehir ve İklim Dergisi, 1*(1), 128–157.

Karakurt, İ., Aydın, G., ve Kaya, S. (2015). Kömür kökenli metan üretiminden kaynaklanan çevresel problemler. *Maden İşletmelerinde İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu*, 133–140.

Kaygusuz, K. (2009). Energy and environmental issues relating to greenhouse gas emissions for sustainable development in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13*(1), 253–270. https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.07.003

Kayhan, D. Y. (2023). 21. yüzyılın enerji kaynaklarının enerji dönüşümü çerçevesinde değerlendirilmesi. *MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, 36, 51–65.

Khan, M. A., Khan, M. Z., Zaman, K., ve Naz, L. (2014). Global estimates of energy consumption and greenhouse gas emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 29*, 336–344. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.080

Koç, A., Yağlı, H., Koç, Y., ve Uğurlu, İ. (2018). Dünyada ve Türkiye'de enerji görünümünün genel değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makine*, 59(692), 86–114.

Korkmaz, K. (2007). Küresel ısınma ve tarımsal uygulamalara etkisi. *Alatarım Dergisi, 6*(2), 43–49.

Kour, M. (2022). Modelling and forecasting of carbon-dioxide emissions in South Africa by using ARIMA model. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1–8. https://doi.org/10.1007/s13762-022-04177-2

Köne, Ç., ve Büke, T. (2010). Forecasting of CO_2 emissions from fuel combustion using trend analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14*(9), 2906–2915. https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.06.006

Kulsuwan, P., Sirisathit, P., ve Srisuwan, C. (2019). The carbon footprint assessment from electricity of undergraduate students at Mahidol University Amnatcharoen Campus for eco university. *International Journal of Agricultural Technology, 15*(6), 925–932.

Kumaş, K., Akyüz, A., ve Güngör, A. (2019). Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bucak Yerleşkesi yükseköğretim birimlerinin karbon ayak izi tespiti. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8*(2), 1277–1291.

Kumcu, S., & Özyörük, B. (2023). Sürdürülebilir yeşil kalkınma için salınan karbonun yakalanması, depolanması ve kullanımına yönelik bir araştırma. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(2), 386–394.

Kurnuç Seyhan, A., ve Çerçi, M. (2022). IPCC Tier 1 ve DEFRA metotları ile karbon ayak izinin belirlenmesi: Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi'nin yakıt ve elektrik tüketimi örneği. *Journal of Natural and Applied Sciences / Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 26*(3), 386–397. https://doi.org/10.19113/sdufenbed.1061021

Li, Y., Li, M., Cheng, J., Wang, R., Xu, H., ve Zheng, C. (2019). Comparative analysis of inventory compilation methods for ship emissions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 631*(3), 032008. https://doi.org/10.1088/1757-899X/631/3/032008

Lotfalipour, M. R., Falahi, M. A., ve Bastam, M. (2013). Prediction of CO_2 emissions in Iran using grey and ARIMA models. *International Journal of Energy Economics and Policy, 3*(3), 229–237.

Mander, U., Sohar, K., Tournebize, J., ve Parn, J. (2016). Risk analysis of global warming-induced greenhouse gas emissions from natural sources. *International Journal of Safety and Security Engineering, 6*(2), 181–192. https://doi.org/10.2495/SAFE-V6-N2-181-192

Ning, L., Pei, L., ve Li, F. (2021). Forecast of China's carbon emissions based on ARIMA method. *Discrete Dynamics in Nature and Society, 2021*, Article ID 6694636. https://doi.org/10.1155/2021/6694636

Nyoni, T., ve Bonga, W. G. (2019). Prediction of CO_2 emissions in India using ARIMA models. *DRJ-Journal of Economics ve Finance, 4*(2), 1–10.

Oblitas-Romero, A. M., Pérez-Díaz, A. N., & Zúñiga, C. L. O. (2023). Application of the Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol) and the ISO 14064-1: 2006 standard for the estimation of the carbon footprint at the National University of Jaen in 2021. *Dyna, 90*(226), 90-97.

Özdemir, Z. (2025). Challenges and considerations in the adoption of carbon capture, utilization and storage technologies in developing countries: The case of Türkiye Yüksek lisans tezi, Boğaziçi University, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 946773.

Rahman, M., ve Hasan, M. M. (2017). Modeling and forecasting of carbon dioxide emissions in Bangladesh using Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) models. *Open Journal of Statistics, 7*(4), 560–566. https://doi.org/10.4236/ojs.2017.74039

Rahman, S. M., Khondaker, A. N., Hasan, M. A., ve Reza, I. (2017). Greenhouse gas emissions from road transportation in Saudi Arabia—a challenging frontier. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 69*, 812–821. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.032

Remoundou, K., ve Koundouri, P. (2009). Environmental effects on public health: An economic perspective. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 6*(8), 2160–2178. https://doi.org/10.3390/ijerph6082160

Richardson, D., Felgate, H., Watmough, N., Thomson, A., ve Baggs, E. (2009). Mitigating release of the potent greenhouse gas N_2O from the nitrogen cycle—Could enzymic regulation hold the key? *Trends in Biotechnology, 27*(7), 388–397. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2009.03.008

Robinson, O. J., Tewkesbury, A., Kemp, S., ve Williams, I. D. (2018). Towards a universal carbon footprint standard: A case study of carbon management at universities. *Journal of Cleaner Production, 172*, 4435–4455. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.205

Romero, J. P., ve Gramkow, C. (2021). Economic complexity and greenhouse gas emissions. *World Development, 139*, 105317. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.105317

Schmitz, S., Dawson, B., Spannagle, M., Thomson, F., Koch, J., ve Eaton, R. (2004). *The greenhouse gas protocol – A corporate accounting and reporting standard* (9th ed., p. 116). World Resources Institute.

Sayman, R. Ü., Sinayuç, Ç., & Korkmaz, E. (2024). Türkiye'nin karbon yakalama, kullanma ve depolama potansiyeli. *Çevre ve İklim Derneği (REC),* 55-102.

Selici, T., Utlu, Z., ve İlten, N. (n.d.). Enerji kullanımının çevresel etkileri ve sürdürülebilir gelişme açısından değerlendirilmesi. 1–5. http://www.solaracademy.com/menuis/Enerji-Kullanimi-Cevresel-Etkiler-SurdurulebilirEnerji.005428.pdf (Erişim Tarihi: 11.11.2019)

Sera gazı emisyon raporlarının doğrulanması ve doğrulayıcı kuruluşların yetkilendirilmesi tebliği. (2015). *T.C Resmî Gazete* (27019, 9 Ekim 2008). ÇŞİB T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı.

Singh, D. P., ve Maurya, N. S. (2016). A comparative study of the various methodologies for estimation of greenhouse gas emission from wastewater treatment systems. *Oriental Journal of Chemistry, 32*(3), 1373.

Sippel, M., Meyer, D., ve Scholliers, N. (2018). What about greenhouse gas emissions from students? An analysis of lifestyle and carbon footprints at the University of Applied Science in Konstanz, Germany. *Carbon Management, 9*, 201–211. https://doi.org/10.1080/17583004.2018.1459579

Skiba, U., et al. (2012). UK emissions of the greenhouse gas nitrous oxide. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 367*(1593), 1175–1185. https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0365

Smeets, E. M., Bouwman, L. F., Stehfest, E., Van Vuuren, D. P., ve Posthuma, A. (2009). Contribution of N_2O to the greenhouse gas balance of first-generation biofuels. *Global Change Biology, 15*(1), 1–23. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01705.x

Smith, K. R., ve Haigler, E. (2008). Co-benefits of climate mitigation and health protection in energy systems: Scoping methods. *Annual Review of Public Health, 29*, 11–25. https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090750

Snæbjörnsdóttir, S. Ó., Oelkers, E. H., Mesfin, K., Gunnarsson, I., Gunnlaugsson, E., ve Gislason, S. R. (2017). The chemistry and saturation states of subsurface fluids during the in situ mineralisation of CO_2 and H_2S at the CarbFix site in SW-Iceland. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 58, 87–102. https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.01.007

Sun, M., Yuan, Y., Zhang, J., Wang, R., ve Wang, Y. (2014). Greenhouse gas emissions estimation and ways to mitigate emissions in the Yellow River Delta High-efficient Eco-economic Zone, China. *Journal of Cleaner Production, 81*, 89–102. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.048

Şahin, G., ve Avcıoğlu, A. O. (2016). Tarımsal üretimde sera gazları ve karbon ayak izi. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi, 12*(3), 157–162.

Şahin, G., ve Önder, H. G. (2021). Atık yönetimi, sera gazı emisyonları ve Türkiye: Avrupa Yeşil Mutabakatı çerçevesinde bir değerlendirme. *Akademik Sosyal Araştırmalar Dergisi, 9*(112), 194–216. https://doi.org/10.29228/ASOS.47802

Taşkın, E. (2018*).* Linyit yakıtlı pilot termik santral için baca gazı emisyon azaltma seçeneklerinin yaşam döngüsü değerlendirmesi. Yüksek lisans tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 526888.

Topal, H., Durmaz, A., ve Atımtay, A. T. (2018). Petrokok ve linyit karışımlarının dolaşımlı akışkan yatakta yakılması ve emisyonları. *Engineer and Machinery (Mühendis ve Makine),* 59(692), 86–114.

Turanlı, A. M. (2015). Karbon ayak izi kestirimi: Orta Doğu Teknik Üniversitesi için bir çalışma. Yüksek lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 416655.

Türker, M., Berk, A., ve Öztürk, H. (2020). Tarım ürünlerinin karbon ayak izinin azaltılması. *Proceedings of the 4th International Sustainable Development Congress*, 481–491.

Türkiye Büyük Millet Meclisi (TBMM). (2021). Küresel İklim Değişikliğinin Etkilerinin En Aza İndirilmesi, Kuraklıkla Mücadele Ve Su Kaynaklarının Verimli Kullanılması İçin Alınması Gereken Tedbirlerin Belirlenmesi Amacıyla Kurulan Meclis Araştırması Komisyonu Raporu Sıra Sayısı:300. *TBMM*, 369-680.

URL-1: https://csb.gov.tr/haberler/bakan-kurum-2053-net-sifir-emisyon-hedefimiz-ve-dongusel-ekonomiye-geciste-onemli-bir-adim-302193/, (Ziyaret Tarihi: 21 Ekim 2025)

URL-2: https://veriportali.tuik.gov.tr/tr/press/53974/, (Ziyaret Tarihi: 26 Mayıs 2025).

URL-3: https://iklim.gov.tr/tuik-ulusal-sera-gazi-emisyon-envanteri-yayinlandi-haber-1122/, (Ziyaret tarihi: 29 Temmuz 2025)

URL-4: https://unfccc.int/topics/land-use/workstreams/land-use--land-use-change-and-forestry-lulucf/, (Ziyaret tarihi: 29 Temmuz 2025)

URL-5: https://www.enerjiatlasi.com/komur/, (Ziyaret Tarihi:26 Mayıs 2025)

USDA Foreign Agricultural Service. (2021). *European Union: Biofuels Annual 2021*. https://www.fas.usda.gov/data/european-union-biofuels-annual-2 (Ziyaret Tarihi:26 Mayıs 2025)

Usubharatana, P., & Phungrassami, H. (2015). *Carbon footprint of cassava starch production in North-Eastern Thailand. Procedia CIRP*, 29, 462-467. https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.072

Üreden, A., ve Özden, S. (2018). Kurumsal karbon ayak izi nasıl hesaplanır: Teorik bir çalışma. *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi, 4*(2), 98–108.

Valls-Val, K., ve Bovea, M. D. (2021). Carbon footprint in higher education institutions: A literature review and prospects for future research. *Clean Technologies and Environmental Policy, 23*, 2523–2542. https://doi.org/10.1007/s10098-021-02110-5

Varış, Ç., Yalçın, Y., Duran, Y., & Şahin, M. (2023). Enerji üretim tesislerinde karbon yakalama teknolojileri incelemesi: Yanma sonrası karbon yakalama yöntemi derlemesi. *2nd International Conference on Scientific Researches*, 01–03 Eylül 2023, Tokat.

Verdonck, M. L., Demuzere, M., Hooyberghs, H., Priem, F., ve Van Coillie, F. (2019). Heat risk assessment for the Brussels capital region under different urban planning and greenhouse gas emission scenarios. *Journal of Environmental Management, 249*, 109210. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109210

Vercalsteren, A., Dils, E., & Boonen, K. (2012). Life cycle assessment study of starch products for the European starch industry association (AAF): Sector study. *European Starch Industry Association (AAF)*. (2011/TEM/R/104).

World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, 2004 https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol

Yaka, İ. F., Koçer, A., ve Güngör, A. (2015). Akdeniz Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu karbon ayak izinin tespiti. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 12*(3), 37–45.

Yañez, P., Sinha, A., ve Vásquez, M. (2020). Carbon footprint estimation in a university campus: Evaluation and insights. *Sustainability, 12*(1), 181. https://doi.org/10.3390/su12010181

Yapıcıoğlu, P., ve Demir, Ö. (2017). Atıksu arıtma tesisleri için iklim değişikliğine ve sera etkisine genel bir bakış. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 22*(3), 235–250.

Yapıcıoğlu, P., ve Demir, Ö. (2020). Environmental performances of the wastewater treatment plants: Green Index. *International Journal of Global Warming, 21*(1), 1–19. https://doi.org/10.1504/IJGW.2020.111818

Yılmaz, Ö. F. (2024). Atık yakma ve enerji üretim tesislerinde karbon yakalama teknolojisinin teknik ve ekonomik fizibilitesi: İstanbul örneği. Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 885309.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Farımaz, **A.,** Veli, S., (2025). Nişasta Sektöründe Doğrudan Sera Gazı Emisyonlarının Belirlenmesi ve Azaltılması İçin Geliştirilen Yöntemler. *6. Uluslararası Sürdürülebilirlik Akademik Araştırmaları Kongresi (INARS),* İstanbul, 19 Aralık 2025.

Veli, S., İşgören, M., Arslan, A., **Geçili, A**., Zor, S. (2017). Applicability of metal oxide supported polymeric catalysts to catalytic wet air oxidation. *Proceedings of the 2nd International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICOCEE)*, Nevşehir, 8-10 Mayıs 2017.

ÖZGEÇMİŞ

Ayşenur FARIMAZ, Kocaeli Üniversitesi Çevre Mühendisliği lisansını 2016 yılında bölüm ikincisi olarak tamamlamıştır. Lisans eğitiminin ardından çevre laboratuvarında emisyon raporlama sorumlusu olarak çalışmıştır. 2018 yılında ise çevre danışmanlık sektörüne geçmiş hala bu sektörde çalışmaya devam etmektedir. Mezuniyetinden sonra yaklaşık 10 yıllık mesleki tecrübeye sahip olup Çevre Uzmanı olarak çalışma hayatına devam etmektedir.