T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

DONDURULMUŞ MEYVE VE SEBZE ÜRETİM TESİSİNİN KARBON AYAK İZİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE OPTİMİZASYONU

Esma Gizem YILMAZ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE POLİTİKALARI

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞUBAT 2026

ANTALYA

T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

DONDURULMUŞ MEYVE VE SEBZE ÜRETİM TESİSİNİN KARBON AYAK İZİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE OPTİMİZASYONU

Esma Gizem YILMAZ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE POLİTİKALARI

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞUBAT 2026

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DONDURULMUŞ MEYVE VE SEBZE ÜRETİM TESİSİNİN KARBON AYAK İZİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE OPTİMİZASYONU

Esma Gizem YILMAZ

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE POLİTİKALARI

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞUBAT 2026

Evrak Tarih ve Sayısı: 07.02.2026-883

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DONDURULMUŞ MEYVE VE SEBZE ÜRETİM TESİSİNİN KARBON AYAK İZİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE OPTİMİZASYONU

Esma Gizem YILMAZ

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE POLİTİKALARI

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 06 / 02 /2026 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Aslı Seyhan ÇIĞGIN (Danışman)
Prof. Dr. İbrahim Ethem KARADİREK
Dr. Öğr. Ü. Senem TEKSOY BAŞARAN

Bu belge, güvenli elektronik İmza ile imzalanmıştır.
Evrak sorgulaması https://turkiye.gov.tr/ebd?eK=5543&eD=BSAT69F1BP&eS=883 adresinden yapılabilir. (PIN:95062)

ÖZET

DONDURULMUŞ MEYVE VE SEBZE ÜRETİM TESİSİNİN KARBON AYAK İZİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE OPTİMİZASYONU

Esma Gizem YILMAZ

Yüksek Lisans Tezi, İklim Değişikliği ve Politikaları Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Aslı Seyhan ÇIĞGIN

Ocak 2026; 50 sayfa

Sanayi Devrimi'nden bu yana fosil yakıt odaklı enerji tüketimi ve endüstriyel süreçler, atmosferdeki sera gazı konsantrasyonlarını arttırmış, buna paralel küresel sıcaklıkların artması kaçınılmaz bir son olmuştur. Bu çevresel krizle mücadelede enerji verimliliği ve karbon ayak izi yönetimi, endüstriyel tesislerin sürdürülebilirliği için temel ölçütler haline gelmiştir. Özellikle dondurulmuş meyve ve sebze sektörü, üretim aşamalarındaki yüksek enerji yoğunluğu ve soğutma sistemlerinde kullanılan, yüksek küresel ısınma potansiyeline sahip florlu gazlar nedeniyle, küresel ısınma üzerinde doğrudan ve dolaylı olarak önemli bir etkiye sahiptir.

Bu tez çalışmasının temel amacı, dondurulmuş meyve ve sebze üretimi gerçekleştiren bir tesisin sera gazı envanterini ISO 14064-1 standardına uygun olarak hesaplamak ve analiz etmektir. Çalışma kapsamında, tesisin organizasyonel sınırları içerisindeki sabit yanma, hareketli yanma, kaçak emisyonlar ve ithal edilen enerji (elektrik) ile seçili dolaylı emisyonlar incelenmiştir. Araştırmada, IPCC 2021 tarafından sağlanan en güncel değerler ile yerel yönetimler tarafından belirlenen güncel veriler kullanılarak, yerel ve bilimsel şartlara uyumlu bir analiz gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, tesisin toplam emisyonları içindeki "sıcak noktalar" elektrik tüketimi, soğutucu gaz kaçakları ve atık yönetimi olarak belirlenmiştir. Belirlenen sıcak noktalara yönelik senaryoların değerlendirilmesi sonucunda, en yüksek katkıyı yenilenebilir enerji kullanımının sağlayacağı belirlenmiştir. Tesise yenilenebilir enerji entegrasyonu ile %42,09 üzerinde emisyon azaltımı sağlanabilirken, soğutucu gazların değiştirilmesinin %15,42 ve atık yönetim stratejilerinin değiştirilmesi %2,58 katkı sağlayacak potansiyele sahip olduğu belirlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Dondurulmuş gıda sektörü, Enerji tüketimi, ISO 14064-1, İklim değişikliği, Karbon ayak izi, Küresel ısınma potansiyeli, Sera gazı envanteri

JÜRİ: Prof. Dr. Aslı Seyhan ÇIĞGIN

Prof. Dr. İ. Ethem KARADİREK

Dr. Öğr. Ü. Senem TEKSOY BAŞARAN

ABSTRACT

EVALUATION AND OPTIMIZATION OF THE CARBON FOOTPRINT OF A FROZEN FRUIT AND VEGETABLE PRODUCTION FACILITY

Esma Gizem YILMAZ

MSc. Thesis in Environmental Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Aslı Seyhan ÇIĞGIN

January 2026; 50 pages

Since the Industrial Revolution, fossil fuel–based energy consumption and industrial processes have increased atmospheric greenhouse gas concentrations, making a rise in global temperatures an inevitable consequence. In addressing this environmental crisis, energy efficiency and carbon footprint management have become fundamental criteria for the sustainability of industrial facilities. In particular, the frozen fruit and vegetable sector exerts a significant direct and indirect impact on global warming due to its high energy intensity during production stages and the use of fluorinated gases with high global warming potential in refrigeration systems.

The primary aim of this thesis is to calculate and analyze the greenhouse gas inventory of a facility engaged in the production of frozen fruits and vegetables in accordance with the ISO 14064-1 standard. Within the scope of this study, direct emissions from stationary and mobile combustion, fugitive emissions, and indirect emissions from purchased energy (electricity) were examined within the organizational boundaries of the facility. The research was conducted using the most recent Global Warming Potential values provided by the IPCC 2021, the latest data from the national authorities, ensuring an analysis compatible with both local conditions and scientific standards. The study identified electricity consumption, refrigerant leaks, and waste management as "hot spots" within the facility's total emissions. Evaluation of scenarios targeting these hot spots revealed that renewable energy use would provide the greatest contribution. Integrating renewable energy into the facility could achieve over 42.09% emission reduction, while changing refrigerants could contribute 15.42% and modifying waste management strategies 2.58%.

KEYWORDS: Carbon footprint, Climate change, Global warming potential, Greenhouse gas inventory, Energy consumption, Frozen food sector, ISO 14064-1

COMMITTEE: Prof. Dr. Aslı Seyhan ÇIĞGIN

Prof. Dr. İ. Ethem KARADİREK

Asst. Prof. Dr. Senem TEKSOY BAŞARAN

ÖNSÖZ

Tezimin hazırlanma sürecinde bana her zaman destek olan danışman hocam Prof. Dr. Aslı Seyhan ÇIĞGIN'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Lisans dönemimden bu yana akademik yolculuğumun her aşamasında yanımda olmuş, her konuda danışabileceğim, beni hem akademik hem de kişisel olarak yönlendiren bir rehber olmuştur. Zorlandığım anlarda cesaret veren, sıkıştığımda doğru ve gerçekçi yaklaşımıyla yol gösteren, bazen de eğlenmek ve motive olmak istediğimde yanında olmayı ihmal etmeyen hocam, tez sürecinde de engin bilgi birikimi, deneyimi ve vizyonuyla bana rehberlik etmiş, akademik gelişimimde yol gösterici olmuştur.

Yüksek lisans sürecim boyunca, bana alan tanıyan ve büyük destek veren işverenlerim Güray ÇOLAK ve Nazire CAN'a teşekkürlerimi sunarım. Sadece profesyonel gelişimim için değil, kişisel olarak da her zaman yanımda durmaları benim için büyük değer taşımaktadır.

Bu süreçte mesafeleri gözetmeksizin her koşulda yanımda olan başarımla gururlanan, motivasyon kaynağım canım arkadaşlarıma ve hayatımdaki varlıklarına teşekkür ederim.

Son olarak, her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme; kıymetli annem Zeynep KARAMAN ve babam Muzaffer YILMAZ, canım ablalarım Büşra Şükufe GÜL, Suna Kübra GÜNGÖR ve biricik kardeşim Orhan Enes YILMAZ'a en derin teşekkürlerimi sunarım. Yeri geldi birlikte geçiremediğimiz zamanların özlemiyle bana eşlik ettiler, ancak temelde başarının fedakârlık gerektirdiğini bana onlar öğretti. Ferdi olmaktan gurur duyduğum ailemin, benim başarılarımla gurur duyması ise bu yolculuğumun mihenk taşı oldu.

İÇİNDEKİLER

ÖZET i
ABSTRACT ii
ÖNSÖZ iii
İÇİNDEKİLER iv
AKADEMİK BEYAN vii
SİMGELER VE KISALTMALAR viii
ŞEKİLLER DİZİNİ x
ÇİZELGELER DİZİNİ xi
1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK TARAMASI 3
2.1. İklim Değişikliği ve Sera Gazları 3
2.1.1. Küresel iklim değişikliği: nedenleri ve sonuçları 3
2.1.2. Sera gazı türleri ve etkileri 3
2.1.3. Küresel ısınma potansiyeli (KIP) 7
2.1.4. Uluslararası iklim politikaları ve hedefler 8
2.1.5. Türkiye'nin iklim politikasındaki mevzuat evrimi 9
2.2. Karbon Ayak İzi Kavramı ve Sürdürülebilirlik Bağlamı 10
2.3. Karbon Ayak İzi Hesaplama Yöntemleri 11
2.3.1. Kategori 1: Doğrudan sera gazı emisyonları 13
2.3.2. Kategori 2: İthal Edilen Enerji Kaynaklı Dolaylı Sera Gazı Emisyonları 13
2.3.3. Kategori 3: Ulaşım kaynaklı dolaylı sera gazı emisyonları 14
2.3.4. Kategori 4: Kuruluş tarafından kullanılan ürünlerin/hizmetlerin üretiminden/sunulmasından kaynaklanan dolaylı sera gazı emisyonları 14
2.3.5. Kategori 5: Kuruluş tarafından üretilen ürünlerin/sunulan hizmetlerin kullanımı ile ilişkili dolaylı sera gazı emisyonları 15
2.3.6. Kategori 6: Diğer 15
2.4. Karbon Ayak İzi Hesaplamak için Temel Hususlar 15
2.4.1. Veri doğruluğu 15
2.4.2. Veri toplama 16
2.4.3. Emisyon faktörleri 16
2.5. Gıda Sanayinde Karbon Ayak İzi ve Emisyon Kaynakları 16

2.6. Dondurulmuş Meyve ve Sebze Sektörüne Genel Bakış 18
2.7. Karbon Ayak İzinin Azaltılması: Teknolojik ve Operasyonel Yaklaşımlar 18
2.8. Gıda Üretiminde Karbon Ayak İzi Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar 19
3. MATERYAL VE METOT 22
3.1. Dondurulmuş Meyve ve Sebze Üretim Tesisi Bilgileri 22
3.2. ISO 14064 Karbon Ayak İzi Hesaplama Metodolojisi 23
3.2.1. Kategori 1: Doğrudan emisyon kaynakları 24
3.2.2. Kategori 2: İthal Edilen Enerji Kaynaklı Dolaylı Sera Gazı Emisyonları 27
3.2.3. Kategori 3: Ulaşım kaynaklı dolaylı emisyonlar 27
3.2.4. Kategori 4: Kuruluş tarafından kullanılan ürünlerin/hizmetlerin üretiminden/sunulmasından kaynaklanan dolaylı sera gazı emisyonları 28
3.2.5. Kategori 5: Kuruluş tarafından üretilen ürünlerin/sunulan hizmetlerin kullanımından kaynaklı dolaylı sera gazı emisyonları 29
3.4. Dondurulmuş Meyve ve Sebze Üretim Tesisinden Temin Edilen Veriler 30
3.5. Belirsizlik Analizi 31
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 32
4.1. Dondurulmuş Meyve ve Sebze Üretimi Karbon Ayak İzi 32
4.1.1. Kategori 1: Doğrudan Emisyon Kaynakları 32
4.1.2. Kategori 2: İthal Edilen Enerji Kaynaklı Dolaylı Sera Gazı Emisyonları 34
4.1.3. Kategori 3: Ulaşım Kaynaklı Dolaylı Emisyonlar 34
4.1.4. Kategori 4: Kuruluş Tarafından Kullanılan Ürünlerin/Hizmetlerin Üretiminden/Sunulmasından Kaynaklanan Dolaylı Sera Gazı Emisyonları 35
4.1.5. Kategori 5: Kuruluş Tarafından Üretilen Ürünlerin/Sunulan Hizmetlerin Kullanımı ile İlişkili Dolaylı Sera Gazı Emisyonları 35
4.1.6. Dondurulmuş meyve ve sebze üretimi genel değerlendirmesi 36
4.2. Dondurulmuş Meyve ve Sebze Üretimi Karbon Ayak İzinin Optimizasyonu 39
4.2.1. Yenilenebilir Enerji ve Enerji Verimliliği Senaryosu 39
4.2.2. Soğutucu Gaz Dönüşümü Senaryosu 40
4.2.3. Atık Yönetimi Senaryosu 41
4.2.4. Senaryo Karşılaştırması 42
5. SONUÇLAR 44
6. KAYNAKLAR 45

ÖZGEÇMİŞ

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Dondurulmuş Meyve ve Sebze Üretim Tesisinin Karbon Ayak İzinin Değerlendirilmesi ve Optimizasyonu” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

06/02/2026

Esma Gizem YILMAZ

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

°C	: Santigrat
CH_4	: Metan
CO_2	: Karbondioksit
CO_2e	: Karbondioksit eşdeğeri
H_2O	: Su buharı
N_2O	: Nitröz Oksit
O_3	: Ozon
NF_3	: Azot triflorür
NH_3	: Amonyak
SF_6	: Kükürt hekzaflorür
HFC	: Hidroflorokarbon
PFC	: Perflorokarbon
NO_x	: Azot Oksitler
TJ	: Terajul
Gg	: Gigagram

Kısaltmalar

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ASHRAE	: Amerikan Isıtma, Soğutma ve Klima Mühendisleri Derneği
COP	: Taraflar Konferansı
EF	: Emisyon faktörü
EU ETS	: Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi
FLW	: Gıda kaybı ve israfı (Food Loss and Waste)
FV	: Faaliyet verisi
GEKAP	: Geri Kazanım Katılım Payı
GES	: Güneş Enerji Santrali
GHG Protocol	: Sera Gazı Protokolü
IPCC	: Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Örgütü
KAİ	: Karbon ayak izi

KIP	: Küresel ısınma potansiyeli
MCF	: Metan düzeltme katsayısı
NDC	: Ulusal katkı beyanları
NKD	: Net kalorifik değer
ODP	: Ozon inceltici potansiyel
SG	: Sera gazı
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
UNEP	: Birleşmiş Milletler Çevre Programı
UNFCCC	: Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
ÜID	: Üst ısıl değer
WBCSD	: Sürdürülebilir Kalkınma için Dünya İş Konseyi
WRI	: Dünya Kaynakları Enstitüsü

Bu tezde ondalık ayıracı olarak virgül (,) kullanılmıştır.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Toplam ve kişi başı sera gazı emisyonu 1990-2023 (TÜİK 2025)..... 4
Şekil 2.2. Sektörlere göre sera gazı emisyon oranları (TÜİK 2025) 4
Şekil 2.3. ISO 14064-1 2018 standardına göre emisyon kategorileri 12
Şekil 2.4. ISO 14064-1 ve GHG Protocol standartlarında tanımlanan kategorilerin karşılaştırması (TSE 2024)..... 13
Şekil 2.5. Gıda tedarik zincirinde emisyon kaynakları 17
Şekil 3.1. Dondurulmuş meyve ve sebze üretim tesisi iş akım şeması..... 22
Şekil 4.1. Tesis için belirlenen kategoriler ve kategoriler kapsamında temin edilen veriler 33
Şekil 4.2. Kategori 1 kapsamında alt kategorilerin payı..... 34
Şekil 4.3. Kategori 4 kapsamında alt kategorilerin payı..... 36
Şekil 4.4. Emisyon kaynaklarının KAİ'deki payı..... 37
Şekil 4.5. Senaryo 1'in Kategori 2'ye etkisi 40
Şekil 4.6. Senaryo 2'nin Kategori 1 ve Kategori 3 üzerindeki etkisi 41
Şekil 4.7. Azaltım senaryolarının KAİ'ye etkisi..... 42

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Sektörlere göre sera gazı emisyonları 1990-2023 (TÜİK 2025) 5

Çizelge 2.2. Gazlara göre sera gazı emisyonları, 1990-2023 (TÜİK 2025) 5

Çizelge 2.3. IPCC 100 yıllık Küresel Isınma Potansiyeli (KIP) Değerleri (GHG Protocol 2024) 8

Çizelge 3.1. ISO 14064-1 kapsamında kategoriler ve alt başlıkları 23

Çizelge 3.2. Küresel Isınma Potansiyelleri 24

Çizelge 3.3. Sabit ve hareketli yanma için emisyon faktörleri (IPCC 2006a) 25

Çizelge 3.4. Soğutma Sistemlerinden Kaynaklanan Emisyon Faktörleri (IPCC 2019a) 26

Çizelge 3.5. Satın Alınan Hizmetler Kaynaklı Emisyon Faktörleri (EPA 2021) 29

Çizelge 3.6. Tüketici atığı kaynaklı emisyon faktörleri (DEFRA 2024) 30

Çizelge 3.7. Kategorilere göre temin edilen veri türleri 30

Çizelge 4.1. Kategori 1 emisyon değerleri 34

Çizelge 4.2. Kategori 4 emisyon değerleri 35

Çizelge 4.3. Emisyon Kaynaklarının Genel Dağılımı ve Önemi 36

Çizelge 4.4. Dondurulmuş Gıda Üretiminden kaynaklı CO_2e Emisyonları 37

1. GİRİŞ

İklim değişikliği, günümüzde ekosistemlerin dengesini, biyolojik çeşitliliği ve insan refahını tehdit eden en kapsamlı küresel çevre sorunlarının başında gelmektedir. Sanayi Devrimi ile başlayan fosil yakıt odaklı enerji tüketimi, ormansızlaşma ve yoğun endüstriyel faaliyetler, atmosferdeki sera gazı (SG) konsantrasyonlarını kritik seviyelere ulaştırmıştır (IPCC 2023). Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından yapılan değerlendirmeler, 1850 sonrası dönemde gözlemlenen yaklaşık 1,1 °C'lik küresel sıcaklık artışının doğrudan insan faaliyetlerinden kaynaklandığını açıkça ortaya koymaktadır (IPCC 2023). Bu süreç, yalnızca sıcaklık artışıyla sınırlı kalmayıp; deniz seviyelerinin yükselmesi, ekstrem hava olaylarının sıklığının artması ve tarımsal üretim sistemlerinin bozulması gibi çok boyutlu ve yıkıcı sonuçları beraberinde getirmektedir (EPA 2022).

Küresel ölçekte yürütülen iklim diplomasisi, Paris Anlaşması ile yeni bir döneme girmiş ve küresel sıcaklık artışını 1,5 °C ile sınırlandırma hedefi tüm ülkeler için ortak bir vizyon haline gelmiştir (UNFCCC 2015). Türkiye de bu küresel mücadelenin bir parçası olarak 2021 yılında Paris Anlaşması'nı onaylamış ve "2053 Net Sıfır Emisyon" hedefini ilan ederek ulusal iklim politikalarını bu doğrultuda güncellemiştir. Türkiye İstatistik Kurumu'nun (TÜİK) güncel verileri, toplam sera gazı emisyonlarının %71,6'sının enerji kaynaklı olduğunu göstermekte; bu durum sanayi sektöründe enerji verimliliği ve emisyon yönetiminin, ulusal hedeflere ulaşılmasındaki stratejik önemini kanıtlamaktadır (TÜİK 2025).

Bu stratejik dönüşümün merkezinde yer alan KAİ kavramı, bir faaliyetin veya kurumun neden olduğu sera gazı emisyonlarını karbondioksit eşdeğeri (CO_2e) cinsinden nicelendirerek çevresel performansın ölçülmesini sağlar (Wiedmann ve Minx 2008). KAİ hesaplamaları, yalnızca çevresel bir gösterge değil, aynı zamanda Avrupa Yeşil Mutabakatı ve sınırda karbon düzenlemeleri gibi politikalarla birlikte ekonomik rekabet gücünün ve sürdürülebilir kurumsal yönetimin temel bir bileşeni haline gelmiştir (European Commission 2019). Şirketlerin emisyonlarını şeffaf ve bilimsel yöntemlerle raporlaması, "yeşil dönüşüm" sürecinde risklerin yönetilmesi ve düşük karbonlu fırsatların belirlenmesi açısından hayati önem taşımaktadır.

Gıda sanayi, küresel enerji tüketimindeki %30'luk payı ve tedarik zincirindeki yüksek emisyon yoğunluğu ile iklim değişikliği yönetiminde kritik bir sektördür (Flammini vd. 2024). Gıda işleme endüstrisi içinde dondurulmuş meyve ve sebze sektörü, sahip olduğu operasyonel özellikler nedeniyle özgün bir konuma sahiptir. Üretim aşamalarındaki şok dondurma süreçleri ve kesintisiz soğuk zincir gereksinimi, yüksek enerji tüketimine yol açarken; soğutma sistemlerinde yaygın olarak kullanılan ve yüksek Küresel Isınma Potansiyeli'ne (KIP) sahip florlu gazların (HFC, HCFC vb.) kaçakları, tesislerin doğrudan emisyon yükünü önemli ölçüde artırmaktadır (Chapa vd. 2019; Pedretti vd. 2023). Bununla birlikte dondurulmuş gıda teknolojileri, taze ürünlere kıyasla daha düşük bozulabilirlik sağlayarak gıda kaybı ve israfını (FLW) azaltma ve dolaylı olarak gıda sisteminin toplam karbon yükünü dengeleme potansiyeline sahiptir (Nomad Foods 2023).

Uluslararası düzeyde sera gazı envanterlerinin oluşturulması için ISO 14064-1 standardı ve Sera Gazı Protokolü (GHG Protocol) gibi çerçeveler katı metodolojik

kurallar sunmaktadır. Ancak Türkiye'deki dondurulmuş gıda sektörü özelinde yapılan çalışmaların birçoğunun eski emisyon katsayılarına dayanması ve güncel sektörel veri setlerinin sınırlılığı, emisyonların doğru yönetilmesinin önünde bir engel teşkil etmektedir. Özellikle IPCC Altıncı Değerlendirme Raporu (AR6) ile güncellenen KIP değerlerinin ve Türkiye'nin güncel elektrik emisyon faktörlerinin entegre edildiği, tesis bazlı ve doğrulanabilir envanter modellerine duyulan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır.

Bu tez çalışması, Batı Akdeniz bölgesinde faaliyet gösteren bir dondurulmuş meyve ve sebze üretim tesisinin sera gazı envanterini en güncel bilimsel veriler ve uluslararası standartlar ışığında analiz etmeyi amaçlamaktadır. Çalışma ile tesisin organizasyonel sınırları içindeki emisyon "sıcak noktaları" belirlenerek; yenilenebilir enerji kullanımı, soğutucu gaz değişimi ve atık yönetimi gibi farklı azaltım senaryolarının çevresel etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, Türkiye'nin düşük karbonlu kalkınma hedefleri doğrultusunda gıda sektöründeki işletmelere bilimsel bir yol haritası sunmayı ve kurumsal sürdürülebilirlik stratejilerinin uluslararası standartlarla uyumlu hale getirilmesine katkı sağlamayı hedeflemektedir.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. İklim Değişikliği ve Sera Gazları

2.1.1. Küresel iklim değişikliği: nedenleri ve sonuçları

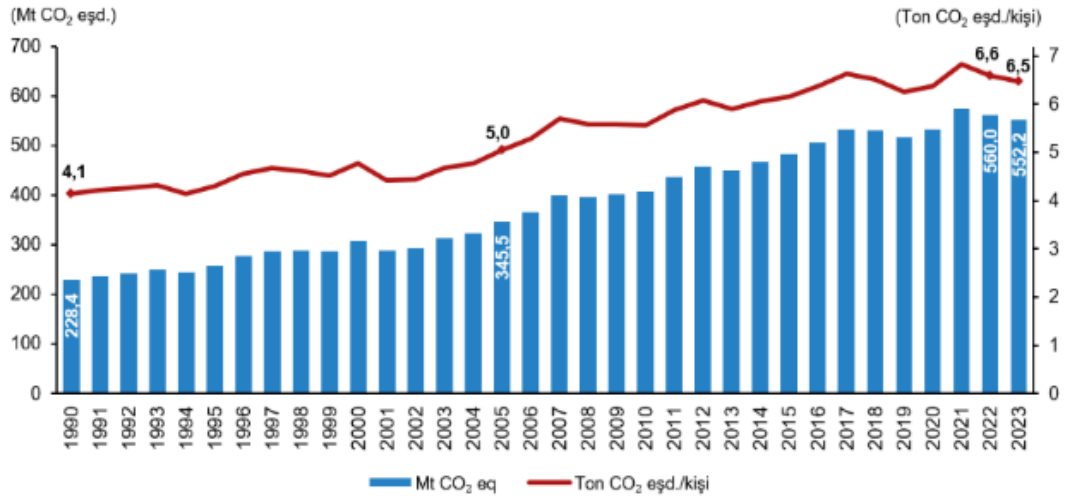
İklim değişikliği, en önde gelen küresel çevre sorunlarından olup, atmosferdeki sera gazı (SG) konsantrasyonlarının artışına bağlı olarak ortaya çıkan iklim desenlerindeki değişiklikler ve uzun dönemli sıcaklık olarak tanımlanmaktadır (IPCC 2021; EPA 2022). Sanayi Devrimi ile birlikte fosil yakıt kullanımının hızla artması, ormansızlaşma ve yoğun tarım uygulamaları, atmosferdeki karbondioksit (CO_2), metan (CH_4) ve nitröz oksit (N_2O) gibi gazların yoğunluğunu önemli ölçüde yükseltmiştir (IPCC 2023). Bu süreç, özellikle 1850 sonrası dönemde küresel ortalama sıcaklıkların sanayi öncesi döneme göre yaklaşık 1,1 °C artmasına neden olmuştur (IPCC 2023). Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından sanayi devriminden sonra artan gaz yoğunluklarıyla ortaya çıkan 150 yıldaki küresel ısınmanın (1850–1900 ile 2010–2019 yılları arasında gözlemlenen küresel ısınmanın) insan faaliyetlerinden kaynaklandığı belirtmiştir (IPCC 2023). Bu bulgu, gözlenen küresel sıcaklık artışının doğrudan insan kaynaklı emisyonlardan kaynaklandığını göstermektedir.

Çok boyutlu sonuçları olan iklim değişikliği; küresel ölçekte sıcaklık artışı, deniz seviyelerinin yükselmesi, buzulların erimesi, ekosistemlerde bozulmalara ve biyoçeşitliliğin azalmasına yol açmaktadır (WRI 2023). Ayrıca ekstrem hava olaylarının sıklığı ve şiddeti artmış; sel, kuraklık, fırtına ve sıcak hava dalgaları gibi olaylar tarımsal üretimi, insan sağlığını ve ekonomik sistemleri olumsuz etkilemeye başlamıştır (EPA 2022). Özellikle düşük gelirli bölgelerde bu etkiler daha yıkıcı olmakta ve sosyal eşitsizlikleri derinleştirmektedir (IPCC 2022).

2.1.2. Sera gazı türleri ve etkileri

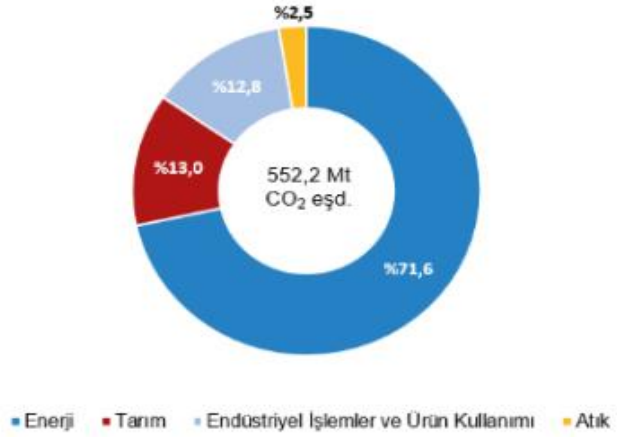
Sera gazları, doğal ya da insan faaliyetlerinden kaynaklanan (antropojenik) ve atmosferde ısıyı tutabilen gazlardır. Başlıca sera gazları; su buharı (H_2O), karbondioksit (CO_2), metan (CH_4), diazot monoksit (N_2O), ozon (O_3) ve florlu gazlardır (IPCC 2021). Bu gazlar atmosferde farklı sürelerde kalarak küresel ısınma üzerinde farklı etkiler yaratmaktadır. Bu gazların iklim üzerindeki etkileri, atmosferdeki kalış süreleri ve küresel ısınma potansiyelleri (KIP) ile açıklanmaktadır. Bu gazların etkilerini IPCC, GHG Protokolü ve ISO 14064 gibi politika ve raporlama standartlarında karşılaştırabilmek ve sera gazlarının toplam ısınma etkilerini görebilmek için CO_2 eşdeğeri (CO_2e) birimi kullanılmaktadır (IPCC 2019; WRI & WBCSD 2004; ISO 2018).

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) 2023 yılı sera gazı envanteri sonuçlarına göre sera gazı emisyonu 552,2 Mt CO_2e ve kişi başı toplam sera gazı emisyonu 6,5 ton CO_2e olarak hesaplanmıştır (TÜİK 2025). Bu hesaplamalara göre, Şekil 2.1'de görüldüğü gibi, toplam sera gazı emisyonunun bir önceki yıla kıyasla %1,4 azalmıştır.



Şekil 2.1. Toplam ve kişi başı sera gazı emisyonu 1990-2023 (TÜİK 2025)

TÜİK, 2023 yılı toplam sera gazı emisyonlarında, Şekil 2.2'den görüleceği üzere, CO_2e olarak en büyük payı %71,6 ile enerji kaynaklı emisyonlar alırken bunu sırasıyla %13,0 ile tarım, %12,8 ile endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı ve %2,5 ile atık sektörü takip etmiştir (TÜİK 2025).



Şekil 2.2. Sektörlere göre sera gazı emisyon oranları (TÜİK 2025)

1990-2023 yılları arasında sektörlere göre sera gazı emisyonlarının değişimi Çizelge 2.1'de, 1990-2023 yılları arasında gazlara göre sera gazı emisyonlarının miktarları ise Çizelge 2.2'de sunulmuştur.

Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2 birlikte değerlendirildiğinde, Türkiye'nin sera gazı emisyonlarının 1990–2023 döneminde hem sektörler hem de gaz türleri bazında önemli değişimler gösterdiği görülmektedir. Sektörel açıdan bakıldığında emisyonların büyük ölçüde enerji sektöründen kaynaklandığı, bunu sırasıyla endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı, tarım ve atık sektörlerinin izlediği anlaşılmaktadır. Bu durum, Türkiye'de

ekonomik büyüme, sanayileşme ve artan enerji talebinin emisyon artışlarının temel belirleyicileri olduğunu göstermektedir.

Çizelge 2.1. Sektörlere göre sera gazı emisyonları 1990-2023 (TÜİK 2025)

Yıl	Toplam	1990 yılına göre değişim (%)	Milyon ton CO_2e			
			Enerji	Endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı	Tarım	Atık
1990	228,4	-	143,2	23,1	51,8	10,3
1995	257,0	12,5	170,0	25,9	49,0	12,1
2000	307,0	34,4	219,8	26,6	46,0	14,5
2005	345,5	51,2	247,7	34,7	46,3	16,9
2010	406,4	77,9	290,9	49,7	47,7	18,1
2015	481,3	110,7	344,1	60,3	59,2	17,7
2020	531,9	132,9	369,6	68,9	76,4	17,0
2021	573,8	151,2	406,5	76,5	75,4	15,4
2022	560,0	145,1	400,5	71,9	71,5	16,0
2023	552,2	141,7	395,4	70,9	71,8	14,1
Tablodaki değerler, yuvarlamadan dolayı toplamı vermeyebilir.						
Ormancılık ve diğer arazi kullanımından kaynaklanan emisyonlar ve tutumlar dahil edilmemiştir.						

Çizelge 2.2. Gazlara göre sera gazı emisyonları, 1990-2023 (TÜİK 2025)

Yıl	Toplam	Milyon ton CO_2e			
		CO_2	CH_4	N_2O	F-gazlar
1990	228,4	154,6	51,3	22,2	0,4
1995	257,0	184,7	50,8	21,2	0,4
2000	307,0	232,9	51,5	22,0	0,5
2005	345,5	267,7	53,3	23,1	1,4
2010	406,4	318,7	60,1	24,4	3,2
2015	481,3	387,4	60,6	28,7	4,6
2020	531,9	416,1	73,5	36,1	6,2
2021	573,8	457,1	73,9	35,9	6,9
2022	560,0	443,4	71,9	34,3	10,4
2023	552,2	442,9	64,3	35,1	9,9
Tablodaki değerler, yuvarlamadan dolayı toplamı vermeyebilir.					
Ormancılık ve diğer arazi kullanımından kaynaklanan emisyonlar ve tutumlar dahil edilmemiştir.					

Gaz türlerine göre dağılım ise bu tabloyu destekler nitelikte olup, toplam sera gazı emisyonları içerisinde en büyük payın karbondioksit (CO_2) emisyonlarına ait olduğu, metan (CH_4) ve diazot monoksit (N_2O) emisyonlarının ise daha sınırlı ancak özellikle tarım ve atık sektörleri ile ilişkili olarak önemini koruduğu görülmektedir. Florlu gazların payı düşük olmakla birlikte 1990 yılına kıyasla artış eğilimi göstermesi, sanayi süreçleri ve soğutma sistemlerindeki kullanımın etkisini ortaya koymaktadır. Genel olarak her iki tablo birlikte ele alındığında, Türkiye'nin sera gazı emisyon profilinin CO_2 ağırlıklı ve enerji odaklı olduğu, dolayısıyla azaltım politikalarının özellikle enerji üretimi, sanayi ve tüketim alışkanlıkları üzerinde yoğunlaşması gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır (TÜİK, 2025).

2.1.2.1 Su buharı (H_2O)

Atmosferdeki yoğunluğu doğrudan insan faaliyetleriyle değil, iklim sisteminin geri besleme mekanizmalarıyla ilişkilidir. Sıcaklık arttıkça buharlaşma hızlanır ve atmosferde daha fazla H_2O birikir; bu da ek bir ısınmaya yol açar. Gezegenin sıcaklığı, artan küresel ısınmanın etkisiyle arttıkça, CO_2 ve diğer sera gazları, atmosferdeki su buharı içeriğini artırarak iklim sisteminde en güçlü pozitif geri beslemeyi üretir (Colman ve Soden, 2021). Su buharı atmosferdeki kısa kalış süresi nedeniyle (genellikle günler veya daha kısa) doğrudan sera gazı emisyonlarının KIP hesaplamalarına dahil edilmez (IPCC 2021). Ancak iklim değişikliğinde pozitif geri besleme mekanizması nedeniyle kritik öneme sahiptir: Küresel sıcaklık arttığında, daha fazla su buharı birikir ve sera etkisi güçlenir.

2.1.2.2 Karbondioksit (CO_2)

Atmosferdeki en önemli insan kaynaklı sera gazlarından biridir ve atmosferdeki toplam sera etkisine doğrudan katkısı yaklaşık %20 civarındadır (IPCC 2021). CO_2'nin başlıca kaynakları, fosil yakıtların yakılması, sanayi süreçleri ve arazi kullanım değişiklikleridir (IPCC 2021). Atmosferde uzun süre kalıcı olması (yaklaşık 100–300 yıl) nedeniyle, CO_2 uzun vadeli küresel ısınma potansiyeli (KIP) hesaplamalarında temel referans gaz olarak kullanılır ve diğer sera gazlarının etkileri CO_2 eşdeğeri (CO_2e) cinsinden ifade edilir (IPCC 2021; EPA 2022; GHG Protocol 2023). Artan CO_2 konsantrasyonu, atmosferdeki su buharı miktarını artırarak, sıcaklık gradyanı ve su buharı geri beslemeleri yoluyla küresel ısınmayı daha da hızlandırır (Colman ve Soden, 2021). Bu nedenle CO_2, yalnızca doğrudan ısı tutucu etkisiyle değil, iklim sistemindeki geri beslemeleri tetikleyerek da sıcaklık artışının güçlenmesine katkıda bulunur.

2.1.2.3. Metan (CH_4)

Atmosferdeki en güçlü kısa ömürlü sera gazlarından biridir (IPCC 2021). Metan emisyonlarının başlıca insan faaliyetli kaynakları; hayvancılık, tarım (özellikle pirinç tarlaları), atık depolama alanları ve fosil yakıt üretimi olarak gösterilmektedir (IPCC 2021; EPA 2022). Günümüzde salınan CH_4, ortalama olarak yaklaşık on yıl dayanır; bu da CO_2'den çok daha kısa bir süredir. Ancak CH_4, CO_2'den çok daha fazla enerji emer. Daha kısa ömür ve daha yüksek enerji emiliminin net etkisi KIP'e yansır (EPA 2025).

2.1.2.4. Nitröz oksit (N_2O)

Atmosferdeki uzun ömürlü ve güçlü sera gazlarından biridir. CO_2 ve CH_4'e kıyasla atmosferde daha düşük konsantrasyona sahip olsa da uzun ömürlü olması nedeniyle birim kütlede CO_2'den çok daha fazla ısı tutar (Ravishankara vd. 2009). KIP değeri, 100 yıllık zaman dilimi için CO_2'nin yaklaşık 273 katı olarak rapor edilmektedir; bu nedenle düşük atmosferik konsantrasyonuna rağmen, güçlü bir sera gazı olarak küresel ısınmaya önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır (IPCC 2021; EPA 2025). Stratosferde fotokimyasal süreçler sonucunda NOx bileşiklerine dönüşen N_2O, ozon tabakasının parçalanmasına yol açarak sera etkisinin yanı sıra ozon tabakasını incelten başlıca madde hâline gelmiştir (Ravishankara vd. 2009).

2.1.2.5. Ozon (O_3)

Atmosferdeki konumuna bağlı olarak hem yararlı hem de zararlı etkilere sahip bir gazdır. Yararlı etkiye sebep olan ozon, stratosfer tabakasında yüksek konsantrasyonda bulunarak Güneş'ten gelen zararlı ultraviyole (UV-B) ışınımını absorbe ederek canlı yaşamı için koruyucu bir işlev görür (WMO 2018). Buna karşın, zararlı olan ozon uçucu organik bileşikler (VOC) ve azot oksitlerin (NO_x) fotokimyasal reaksiyonları sonucunda meydana gelen troposfer tabakasında oluşan ikincil bir kirleticidir (IPCC 2021). Bitkilerde fotosentez kapasitesini azaltmakta, insan sağlığı açısından solunum yolu rahatsızlıklarını artırmakta ve ekosistemlere zarar vermektedir. Ozonun atmosferdeki ömrü ve konsantrasyonu oldukça değişken olduğundan, IPCC tarafından küresel ısınma potansiyeli (KIP) değeri doğrudan hesaplanmamaktadır (IPCC 2021). Bu nedenle ozon, iklim değişikliği çalışmalarında hem sera gazı hem de kısa ömürlü iklim kirletici olarak değerlendirilmektedir.

2.1.2.6. Florlu gazlar [Hidroflorokarbon (HFC), Perflorokarbon (PFC), Kükürt hekzaflorür (SF_6), Azot triflorür (NF_3)]

Atmosferde doğal olarak bulunmayan, tamamen antropojenik, uzun ömürlü sera gazlarıdır. HFC'ler genellikle soğutma ve iklimlendirme sistemlerinde, PFC'ler alüminyum üretimi ve elektronik sanayide, SF_6 elektrik endüstrisinde yalıtım ve ark söndürme gazı olarak, NF_3 ise yarı iletken üretiminde kullanılmaktadır (IPCC 2021; EPA 2022). Bu gazlar düşük konsantrasyonlarda bulunmalarına rağmen çok yüksek ısı tutma potansiyeline (KIP) sahiptirler ve atmosferde çok uzun süre kalabilirler.

Bu başlık altında aktif florlu sera gazları verilmiş olup, Montreal Protokolü kapsamında yasaklanmış ve IPCC AR6'da "*geçmişte kullanılan ve ozon tabakasını tahrip eden eski gazlar*" olarak nitelendirilen gazlara yer verilmemiştir.

2.1.3. Küresel ısınma potansiyeli (KIP)

IPCC tarafından KIP belirli bir süre boyunca (genellikle 20 yıl, 100 yıl veya 500 yıl) bir sera gazının atmosferde yarattığı toplam ısı tutma etkisinin, aynı kütledeki CO_2 ile karşılaştırılmasının oranı olarak tanımlanmaktadır (IPCC 2021). KIP değeri, hesaplamaları tek birimde toplamaya olanak tanıyarak sera gazı etkilerini karşılaştırmayı ve toplam karbon ayak izini hesaplamayı kolaylaştırır. KIP Eşitlik (2.1)'de görüldüğü gibi ifade edilebilir:

$$\text{KIP} = \frac{\text{Gazın 100 yıllık ısı tutma etkisi}}{CO_2'\text{nin 100 yıllık ısı tutma etkisi}} \tag{2.1}$$

IPCC, KIP değerini yayımlayan ana kurumdur. Değerlendirme Raporları (Assessment Reports – AR) ve Envanter Kılavuzları (IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories) kapsamında farklı sera gazları için KIP değerleri 20 yıllık, 100 yıllık ve 500 yıllık zaman dilimleri için belirlenmiştir.

GHG Protokolü tarafından 07.08.2024 tarihinde yayınlanan "*IPCC Küresel Isınma Potansiyeli Değerleri*" dokümanında 4. 5. ve 6. Değerlendirme raporlarında (AR4, AR5 ve AR6) 100 yıllık zaman dilimleri için belirlenen KIP değerleri sunulmuştur (GHG

Protocol 2024). AR6 (2020) değerleri en güncel olanlardır; ancak envanter ve raporlama amaçlarıyla AR4 (2007) ve AR5'de (2014) yer alan değerler de zaman zaman kullanılmaktadır. Bu raporda yer verilen başlıca sera gazları ve bu gazların KIP değerleri Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. IPCC 100 yıllık Küresel Isınma Potansiyeli (KIP) Değerleri (GHG Protocol 2024)

Başlıca Sera Gazları	Kimyasal Formül	KIP (100 Yıl)		
		AR4	AR5	AR6
Karbondioksit	CO_2	1	1	1
Metan (fosil olmayan)	CH_4	25	28	27,0
Metan (fosil)	CH_4	-	30	29,8
Azot oksit	N_2O	298	265	273
Azot triflorür	NF_3	17.200	16.100	17.400
Sülfür hekzaflorür	SF_6	22.800	23.500	25.200

2.1.4. Uluslararası iklim politikaları ve hedefler

Süregelen en büyük global sorunlardan biri haline gelen iklim değişikliği için ulusal ve uluslararası ölçekte çalışmalar yapılmaktadır. Kronolojik olarak özetlediğimizde; küresel çevre sorunlarını ilk kez uluslararası düzeyde tartışmak ve çevre korumayı kalkınma politikalarına entegre etme hedefi ile 1972 yılında Stockholm'da gerçekleştirilen "Birleşmiş Milletler İnsan Çevresi Konferansı" diğer adını gerçekleştirildiği kentten alan "Stockholm Konferansı", oluşturduğu temelle Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP)'nın kurulmasına yol açmıştır (UN 1972; UNEP 2017). Sonucunda, çevre koruma bilinci küresel düzeyde kabul görmüş ve "İnsan Çevresi Bildirgesi" yayımlanmıştır (UN 1972). İklim sistemini bilimsel olarak değerlendirmek ve iklim değişikliğine yönelik erken uyarı sistemleri geliştirmek amacıyla 1979 yılında Birinci Dünya İklim Konferansı düzenlenmiş, "Dünya İklim Programı" başlatılmış ve bu programla bilimsel iş birliği güçlendirilmiştir. Ayrıca bu konferans IPCC'nin kurulmasına bilimsel zemin hazırlamıştır (WMO 1979; WMO 2019).

1985 yılında Viyana Sözleşmesi ile ozon tabakasının korunması için uluslararası yeni bir iş birliği mekanizması kurmak adına adımlar atılmıştır (UNEP 1985). Ülkeler arasında ozon tabakası incelmesiyle ilgili bilgi paylaşımları ve araştırmalar başlatılmıştır. Bunun üzerine 1987 yılında imzalanan Montreal Protokolü'nün temelleri oluşturulmuş ve bu protokol ile ozon tabakasına zarar veren CFC ve HCFC gibi florlu gazların üretim ve tüketiminin kademeli olarak azaltılması söz konusu olmuştur (UNEP 1987). Taraf olan ülkelerin fazla olması sebebiyle tarihin en başarılı çevre anlaşmalarından biri haline gelmiştir.

Birinci Dünya İklim Konferansı'nın zeminini hazırladığı IPCC, 1988 yılında iklim değişikliğinin bilimsel, teknik ve sosyoekonomik boyutlarını değerlendirmek amacıyla kurulmuştur (IPCC 2013; IPCC 2021). Günümüzde tüm uluslararası iklim anlaşmaları IPCC bulgularına dayandırılmaktadır. Atmosferdeki sera gazı birikimlerini tehlikeli düzeyde artmadan stabilize etmek amacıyla 1992 yılında Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) imzalanmıştır (UNFCCC 1992). Taraf

ülkeler sera gazı emisyonlarını izlemeyi ve raporlamayı kabul etmişlerdir. Bu sebeple iklim değişikliğine karşı küresel çerçeveyi belirleyen temel sözleşme olarak kabul edilmektedir. Ayrıca UNFCCC, Rio Zirvesi- Gündem 21'de kabul edilmiş olup, UNFCCC'ye taraf olan ülkelerin her yıl düzenli olarak bir araya geldiği Taraflar Konferansı (COP) süreci bu zirvede başlamıştır (UN 1992; UNFCCC 2023).

1997 yılında yasal bağlayıcılığı olan ilk iklim anlaşması olarak tarihe geçen Kyoto Protokolü (COP3) ile gelişmiş ülkelere sera gazı emisyonlarını azaltma yükümlülüğü getirilerek, 2008–2012 arasında %5 azaltım hedefi belirlenmiştir (UN 1998; UNFCCC 1997). Ancak ABD gibi büyük emisyon yayıcılar taraf olmamıştır. 2005 yılında AB Emisyon Ticaret Sistemi (EU ETS), emisyon azaltımını piyasa temelli bir mekanizmayla teşvik etmeyi hedefleyerek Dünyadaki en büyük ve en etkili karbon ticaret sistemi hâline gelmiştir. Karbon fiyatlandırması sistemi kurularak şirketlere emisyon izinleri tahsis edilmiştir.

2007 yılında Bali Eylem Planı (COP13), Kyoto sonrası dönemde küresel iklim rejimi için müzakereleri başlatmak amacıyla gelişmekte olan ülkelerin de sürece dâhil edilmesi sağlanmıştır (UNFCCC 2007). Kopenhag Mutabakatı (COP15) 2009 yılında, küresel sıcaklık artışını 2 °C ile sınırlandırmak için ortak niyet beyanı oluşturma hedefiyle gerçekleştirilmiştir (UNFCCC 2009). Sonucunda yasal bağlayıcılığı olmamakla birlikte birçok ülke gönüllü emisyon hedefi sunmuştur. Böylelikle 2015 yılında yapılan Paris Anlaşması'na geçiş süreci hızlanmış ve bu anlaşma ile ilk kez tüm ülkeleri kapsayan küresel ve bağlayıcı bir çerçeve oluşturmuştur (UN 2015; UNFCCC 2015). Küresel sıcaklık artışını 2 °C'nin altında, mümkünse 1,5°C ile sınırlandırma amacıyla tüm ülkeler ulusal katkı beyanları (NDC) sunmayı taahhüt etmiştir.

Yine aynı yıl "*Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri*" belirlenmiş; 2030 yılına kadar yoksulluğu azaltma, eşitsizlikleri giderme ve çevreyi korumaya yönelik 17 hedef belirlenmiştir (UN 2015b). 17 hedeften biri doğrudan "İklim Eylemi" dir. 2016 yılında Kigali Değişikliği ile 2036 yılına kadar HFC emisyonlarının %80 oranında düşürülmesi hedeflenmiştir (UNEP 2016). Ozon koruma politikalarıyla iklim değişikliği önlemlerini birleştiren ilk anlaşma olmuştur. Küresel ticaret ve üretim zincirlerinde düşük karbonlu dönüşümü hızlandıran Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı (2019), döngüsel ekonomi, temiz enerji ve karbon sınır vergisi gibi politikalar benimsenmesine öncülük etmiştir (European Commission 2019). Paris Anlaşması hedeflerini güçlendirmek ve kömür kullanımını azaltmak adına 2021 yılında gerçekleştirilen COP26'da Glasgow İklim Paktı ile ilk kez "kömürden çıkış" ifadesi resmi bir COP kararında yer almıştır (UNFCCC 2021). 2023 yılında gerçekleştirilen COP28 'te ise fosil yakıtların aşamalı olarak azaltılması ve yenilenebilir enerjiye geçişin hızlandırılması gündem olmuştur (UNFCCC 2023). Tüm ülkeler, üç kat yenilenebilir kapasite artırımı hedefinde uzlaşmışlardır. Bununla birlikte enerji dönüşümünün artık geri döndürülemez bir süreç olduğu kabul edilmiştir.

2.1.5. Türkiye'nin iklim politikasındaki mevzuat evrimi

Türkiye'nin iklim politikası, küresel ölçekte yürütülen çevre ve iklim değişikliği mücadele süreçleriyle paralel biçimde şekillenmiştir. 1983 yılında yürürlüğe giren 2872 sayılı Çevre Kanunu, ülkemizde çevre koruma konusundaki ilk kapsamlı yasal çerçeveyi oluşturmuştur (RG 1983). Çevre Kanunu ilerleyen yıllarda ozon tabakasının korunmasına ilişkin Montreal Protokolü (1987) ve sera gazı azaltım hedefleri içeren uluslararası

anlaşmalarla uyumlu hale getirilmiştir (UNEP 1987). Türkiye, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne (UNFCCC) 24 Mayıs 2004 tarihinde taraf olarak, ulusal sera gazı envanterini hazırlama ve emisyon azaltım politikalarını geliştirme yükümlülüğünü üstlenmiştir. Ardından, Kyoto Protokolü'ne 26 Ağustos 2009 tarihinde taraf olan Türkiye, bu dönemde ilk kez sera gazı emisyonlarının izlenmesi, raporlanması ve doğrulanması süreçlerini kurumsal hale getirmiştir. Bu kapsamda, Ulusal Bildirim Raporları (National Communications) ve İki Yıllık Güncelleme Raporları (BURs) yayımlanarak Birleşmiş Milletler'e sunulmuştur (UNFCCC 1992; UNFCCC 1997).

Türkiye, Paris Anlaşması'nı 22 Nisan 2016'da imzalamış ve 2021 yılında TBMM tarafından onaylanarak yürürlüğe koymuştur. Bu anlaşma, Türkiye'nin "*2053 Net Sıfır Emisyon*" hedefini belirlemesinde temel politika çerçevesini oluşturmuştur (UN 2015). Paris Anlaşması sonrası dönemde, sera gazı azaltımına yönelik yasal altyapının güçlendirilmesi amacıyla 7552 sayılı İklim Kanunu 02.07.2025 tarihinde kabul edilmiştir (RG 2025). Ayrıca, 14.01.2025 tarih ve 32782 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan 01.12.2025 tarihinden itibaren yürürlüğe giren Endüstriyel Emisyonların Yönetimi Yönetmeliği ile sanayi sektörlerinde AB Yeşil Mutabakatı ile uyumlu emisyon kontrolü standartları getirilmiştir (ÇŞİDB 2025). Tüm bu gelişmeler, Türkiye'nin iklim değişikliğiyle mücadelede uluslararası yükümlülüklerini ulusal mevzuata entegre ederek, düşük karbonlu kalkınma hedeflerine doğru ilerlediğini göstermektedir.

2.2. Karbon Ayak İzi Kavramı ve Sürdürülebilirlik Bağlamı

İnsan faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonları, günümüzün en kritik çevresel sorunları arasında yer alan küresel ısınma ve iklim değişikliği süreçlerinin temelinde yer almaktadır. Karbon ayak izi (KAİ) kavramı, bu emisyonların çevre üzerindeki etkisini nicel olarak ortaya koymak amacıyla geliştirilen, sürdürülebilir çevre yönetiminin merkezinde yer alan önemli bir göstergedir (Wiedmann ve Minx 2008; ISO 2018). Bireylerin, kurumların ya da toplumsal sistemlerin faaliyetleri sonucunda atmosfere doğrudan veya dolaylı biçimde salınan sera gazlarının toplamını ifade eder. Bu kapsamda yapılan hesaplamalar, karbondioksit eşdeğeri (CO_2e) cinsinden ifade edilerek çevresel etkilerin ölçülmesini ve raporlanmasını mümkün kılar.

Bu kavram, yalnızca emisyon miktarının belirlenmesiyle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda çevresel performansın değerlendirilmesinde, iyileştirme alanlarının tespitinde ve düşük karbonlu stratejilerin oluşturulmasında önemli bir araç işlevi görür. Böylece, sürdürülebilir kalkınma politikalarının oluşturulmasında bilimsel bir temel sunar. Bu bağlamda, KAİ hesaplamaları; enerji tüketimi, üretim süreçleri, ulaşım, atık yönetimi ve tedarik zinciri gibi birçok alanda karar alma süreçlerine veri sağlama potansiyeline sahiptir (WRI & WBCSD 2004; ISO 2019c).

Son yıllarda ulusal ve uluslararası düzeyde yürürlüğe giren iklim yasaları, Avrupa Yeşil Mutabakatı ve Yeşil Dönüşüm politikaları, KAİ'nin yalnızca bir çevresel gösterge değil, aynı zamanda ekonomik dönüşümün ve rekabet gücünün bir bileşeni haline geldiğini göstermektedir (AB 2019). Bu politikalar, sera gazı emisyonlarının azaltılmasını, enerji verimliliğinin artırılmasını ve döngüsel ekonomiye geçişi hedefleyerek, üretim ve tüketim alışkanlıklarında yapısal bir değişimi zorunlu kılmaktadır.

Dolayısıyla KAİ, sürdürülebilirlik anlayışıyla bütünleşmiş bir kavram olarak, çevresel, ekonomik ve toplumsal boyutlarıyla birlikte değerlendirilmelidir. Sürdürülebilirliğin temelinde, mevcut kaynakların gelecek kuşakların yaşam hakkını riske atmadan kullanılması ilkesi yer alırken; KAİ bu dengenin korunup korunmadığını ölçen bir araç görevi üstlenir. Bu yönüyle KAİ, sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin somut bir göstergesi olmanın ötesinde, yeşil dönüşüm sürecinin de ölçülebilir temelini oluşturur (WRI & WBCSD 2004; ISO 2019c; Weidema ve Hischier 2019).

2.3. Karbon Ayak İzi Hesaplama Yöntemleri

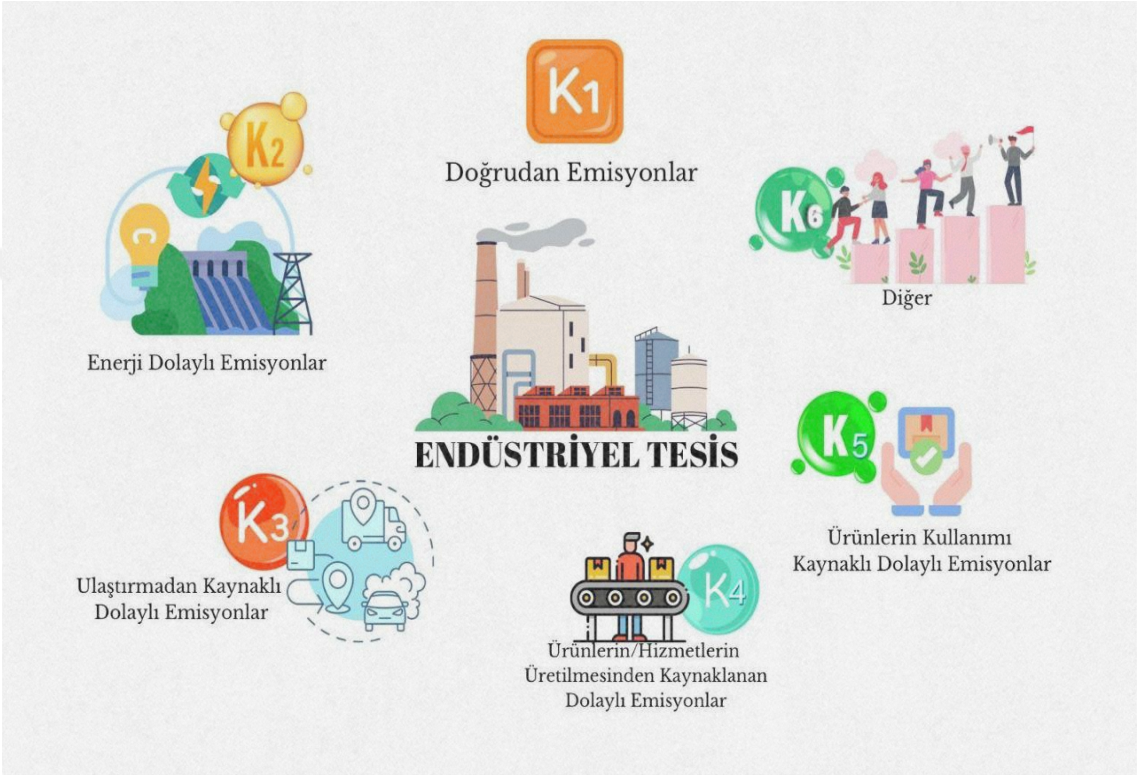
Karbon ayak izi hesaplamalarında uluslararası düzeyde kabul gören standartlara başvurmak hem metodolojik tutarlılığı hem de hesaplamaların güvenilirliğini artırır. Bu alanda en yaygın kullanılan çerçevelerden ikisi Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol) ve ISO 14064'tür (WRI & WBCSD 2004; ISO 2018). GHG Protocol; Dünya Kaynakları Enstitüsü (WRI) ve Sürdürülebilir Kalkınma için Dünya İş Konseyi (WBCSD) tarafından geliştirilmiş olup, ilk versiyonu 2001 yılında, en son güncellemesi ise 2023 yılında yayınlanmıştır. Bu protokolün amacı, kurumsal ve ürün bazında sera gazı emisyonlarının hesaplanması, raporlanması ve yönetimi için metodolojik çerçeve sağlamaktır (GHG Protocol 2023). Şirketlerin, şehirlerin veya ürünlerin KAİ hesaplaması ve raporlaması için esnek bir rehber olarak kullanılır. Yasal bağlayıcılığı bulunmamakla beraber gönüllülük esasına dayanır. ISO 14064-1 standardı ise; Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) tarafından geliştirilmiş olup, ilk olarak 2006 yılında yayımlanmış ve 2018 yılında güncellenmiştir (ISO 2018). Sera gazı envanteri, doğrulama ve raporlama için uluslararası standart tanımlar oluşturmak amacıyla geliştirilmiştir (ISO 2018; WRI & WBCSD 2004). ISO 14064-1 doğrulanabilir ve denetlenebilir sera gazı envanteri oluşturmak isteyen kurumlar için resmi standart oluşturmaktır. Birçok ülke ve kurum tarafından yasal veya resmi raporlama standardı olarak tanınır (Ribeiro ve Kruglianskas 2018; ISO 2018)

Bu iki metodoloji arasında bazı temel farklar bulunmaktadır. GHG Protocol, daha esnek ve uygulama odaklı bir rehber olarak, işletmelerin kendi KAİ'yi anlaması ve azaltım stratejisi geliştirmesi için uygulanırken, ISO 14064-1 daha standartlaştırılmış, denetlenebilir ve sertifikasyon odaklı olması sebebiyle resmi beyanlar ve doğrulama süreçlerinde tercih edilir.

ISO 14064-1 standardı üç ayrı bölümden oluşur: ISO 14064-1, ISO 14064-2 ve ISO 14064-3 (ISO 2018; ISO 2019a; ISO 2019b). Her bölüm, farklı kullanıcı gruplarına ve amaçlarına yöneliktir.

- ISO 14064-1, kuruluş düzeyinde sera gazı (GHG) emisyonlarının ve giderimlerinin hesaplanması ve raporlanması için ilkeleri ve gereklilikleri belirler (ISO 2018).
- ISO 14064-2, sera gazı emisyonlarının azaltılmasını veya giderimlerinin artırılmasını amaçlayan faaliyetlerin projeler düzeyinde hesaplanması, izlenmesi ve raporlanması için ilkeleri, gereklilikleri ve rehberliği belirler (ISO 2019a).
- ISO 14064-3, sera gazı beyanlarının doğrulanması ve/veya geçerlilik değerlendirmesini yürüten veya yöneten kişiler için ilkeleri ve gereklilikleri belirler ve rehberlik sağlar (ISO 2019b).

Sera gazı emisyonları ISO 14064-1 standardında Kategori 1, Kategori 2, Kategori 3, Kategori 4, Kategori 5 ve Kategori 6 olarak sınıflandırılırken (Şekil 2.3), GHG Protocol standartlarına göre; Kapsam 1, Kapsam 2, Kapsam 3 olarak sınıflandırılır (WRI & WBCSD 2004; ISO 2018). Şekil 2.4'te özetlendiği gibi, ISO 14064-1 standardında bulunan Kategori 1 ve Kategori 2 GHG Protocol'deki sırasıyla Kapsam 1 ve Kapsam 2'ye denk gelmektedir. ISO 14064-1'de tanımlanan Kategori 3, Kategori 4, Kategori 5 ve Kategori 6 ise GHG Protocol'deki Kapsam 3 ile benzerlik göstermektedir (WRI & WBCSD 2004; ISO 2018).



Şekil 2.3. ISO 14064-1 2018 standardına göre emisyon kategorileri

GHG Protocol Standardı kuruluş düzeyinde raporlamayı teşvik eder ama mutlak bir yasal zorunluluk getirmez. Bu standarda göre sera gazı envanteri raporlamasında Kapsam 1 ve Kapsam 2 mutlaka raporlanmalıdır. Buna karşın Kapsam 3, kuruluşun raporlama amacına bağlı olarak isteğe bağlıdır (WRI & WBCSD 2004). Benzer şekilde ISO 14064-1 standardı da kuruluşların sera gazı envanterlerini oluştururken Kategori 1 ve Kategori 2 emisyonlarını raporlamasını zorunlu tutmakta, Kategori 3, Kategori 4, Kategori 5 ve Kategori 6 emisyonlarının raporlanmasını ise standartta "özellikle dikkate alınması tavsiye edilen" bir alan olarak yer alır, ancak raporlamasının "zorunlu" olup olmadığı standart tarafından isteğe bağlı biçimde esnek bırakılarak kuruluşun tercihine bırakmaktadır (ISO 2018). Türkiye'de ise sera gazı raporlamasına ilişkin yükümlülükler, uluslararası standartlardan ziyade ulusal mevzuat ve TÜİK tarafından yürütülen ulusal sera gazı envanteri çalışmaları kapsamında belirlenmekte olup, sektör ve faaliyet türüne göre değişiklik gösterebilmektedir.



Şekil 2.4. ISO 14064-1 ve GHG Protocol standartlarında tanımlanan kategorilerin karşılaştırması (TSE 2024)

Türkiye'de sera gazı emisyon raporlamaları, "Sera Gazı Emisyonlarının Takibi Hakkında Yönetmelik" ve ilgili tebliğler çerçevesinde yürütülür; bu kapsamda tesislerin faaliyetlerinden kaynaklanan tüm sera gazı emisyon verileri izlenmeli, raporlanmalı ve doğrulanmalıdır. Yönetmelik metinlerinde "Kapsam" veya "Kategori" gibi uluslararası standart sınıflandırmaları doğrudan yer almaz, ancak uluslararası standartlara göre (ISO 14064-1 ve GHG Protocol) Kapsam 1 ve Kapsam 2 raporlamaları genellikle öncelikli olmakla birlikte, Kapsam 3 emisyonlarının dahil edilmesi işletmenin raporlama hedeflerine bağlı olarak gerçekleştirilebilir (ÇŞİDB 2014a; ÇŞİDB 2014b; ISO 2018; WRI & WBCSD 2004).

2.3.1. Kategori 1: Doğrudan sera gazı emisyonları

Doğrudan sera gazı emisyonları kuruluş sınırları içindeki ve kuruluşun sahip olduğu veya kontrol ettiği sera gazı kaynaklarından meydana gelir. Bu kaynaklar sabit veya hareketli ekipmanlar, endüstriyel süreçler, kaçak gazlar veya arazi kullanımı olabilir (ISO 2018).

2.3.2. Kategori 2: İthal Edilen Enerji Kaynaklı Dolaylı Sera Gazı Emisyonları

Bu kategori, elektrik, ısınma, soğutma, basınçlı hava gibi yalnızca nihai enerji veya hizmetlerin üretimi ile ilişkili yakıtların yakılması sonucunda açığa çıkan sera gazı emisyonlarını içermektedir. Kuruluş tarafından ithal edilen elektriğin üretimi ve tüketimiyle ilgili sera gazı emisyonları dahil, ithal edilen elektrikten kaynaklanan dolaylı emisyonlar ve fiziksel bir ağ vasıtasıyla (tüketilen elektrik hariç) enerjinin (buhar, ısınma, soğutma ve basınçlı hava) üretimi ile ilgili ithal edilen enerjiden kaynaklanan dolaylı emisyonları kapsar (ISO 2018).

2.3.3. Kategori 3: Ulaşım kaynaklı dolaylı sera gazı emisyonları

Kuruluş sınırlarının dışında bulunan kaynaklardan meydana gelir. Bu kaynaklar hareketlidir ve çoğunlukla ulaşım ekipmanlarında yakılan yakıttan kaynaklanır. İlgili olmaları durumunda; soğutma gazı sızıntıları kaynaklı emisyonlar, yakıt üretimi ve yakıt nakliyesi/dağıtımından kaynaklanan yukarı yöndeki emisyonlar ve aracın üretimi kaynaklı emisyonlar da bu kategoriye dahil edilebilir (ISO 2018). Bu kategoriye esas sera gazı emisyonları aşağıdaki gibi listelenebilir:

- Kuruluştan giden veya dağıtımından kaynaklı emisyonlar,
- Kara, deniz, hava yolu taşımacılığı kaynaklı emisyonlar,
- Çalışanların evlerinden işyerlerine taşınmasıyla ilgili emisyonlar dahil, çalışanların işe gidiş gelişinden kaynaklı emisyonlar,
- Müşterilerin ve ziyaretçilerin raporlama yapan şirketin tesisine seyahatleri kaynaklı emisyonlar ve
- İş seyahatleri kaynaklı emisyonlar.

2.3.4. Kategori 4: Kuruluş tarafından kullanılan ürünlerin/hizmetlerin üretiminden/sunulmasından kaynaklanan dolaylı sera gazı emisyonları

Kuruluş tarafından kullanılan mallar ile ilişkili kuruluş sınırlarının dışında bulunan kaynaklardan oluşur. Bu kaynaklar sabit veya hareketli olabilir ve raporlama yapan kuruluş tarafından satın alınan her tür mal ile ilişkilendirilebilir. Emisyonlar çoğunlukla "beşikten tedarikçi kapısına" yaklaşımında hammaddelerin çıkarılması, tarımsal faaliyetler, tedarikçiler arasında hammadde/ürün nakliyesi, hammaddelerin üretimi ve işlenmesi aşamalarından kaynaklanmaktadır. Bu kategori altında en çok değerlendirilen emisyonlar aşağıda özetlenmiştir (ISO 2018):

- *Temin edilen mallardan kaynaklı dolaylı emisyonlar:* Ürünün imalatı ile ilişkili olan satın alınan hammadde/mamul/yarı mamul vb. kaynaklı emisyonlar. Bu emisyonlar, geniş bir ürün yelpazesi ile ilişkili olabilmektedir. Hedef kullanıcı tarafından ürünlerin türlerine göre bir alt kategorizasyon tanımlanabilir.
- *Sermaye mallarının üretimi kaynaklı dolaylı sera gazı emisyonları:* Sermaye mallarından kaynaklanan emisyonlar. Bu mallar kuruluş tarafından bir ürün üretmek, bir hizmet sağlamak veya satmak, depolamak ve teslim etmek için kullanılan malları (Ekipmanlar, makineler, binalar, tesisler, araçlar) içerir.
- *Katı ve sıvı atıkların bertarafı kaynaklı dolaylı emisyonlar:* Katı ve sıvı atıkların bertarafı (düzenli atık depolama, yakma, biyolojik arıtma veya geri dönüşüm süreçleri) kaynaklı emisyonlar.
- Raporlama yapan kuruluş tarafından kiralanan, kontrolü kuruluşta olmayan ekipmanların kullanımı kaynaklı dolaylı emisyonlar.
- Danışmanlık, temizlik, bakım, kurye, bankacılık vb. hizmet alımları kaynaklı dolaylı emisyonlar**.**

2.3.5. Kategori 5: Kuruluş tarafından üretilen ürünlerin/sunulan hizmetlerin kullanımı ile ilişkili dolaylı sera gazı emisyonları

Kuruluşun ürünleri kullanımıyla ilişkili emisyonlar, kuruluşun üretim sürecinden sonraki yaşam aşamalarında kuruluş tarafından satılan ürünlerden kaynaklanmaktadır. Bu emisyonlar, aşağıda verilen örneklerde olduğu gibi, çok geniş bir hizmet yelpazesini ve ilgili süreçleri kapsayabilir (ISO 2018):

- Ürünün kullanım sürecinde kaynaklanan emisyonlar (TV üreticisine göre televizyonun elektrik tüketimi),
- Alt yöndeki kiraya verilen varlıklardan kaynaklanan emisyonlar (Kiracılardan ödeme alan bir kuruluş için geçerlidir),
- Ürünün kullanım ömrü sonu aşamasından kaynaklanan dolaylı emisyonlar (Üretici ve kullanıcıya göre ürünün bertarafı kaynaklı emisyonlar),
- Yatırım kaynaklı dolaylı emisyonlar (Finans kuruluşuna göre, finansman kaynaklı emisyonlar).

2.3.6. Kategori 6: Diğer

Diğer kategori kapsamında, kaynak olarak değerlendirilmeyen diğer dolaylı sera gazı emisyon kaynakları değerlendirilmektedir (ISO 2018).

2.4. Karbon Ayak İzi Hesaplamak için Temel Hususlar

2.4.1. Veri doğruluğu

KAİ hesaplamak için ilk adım verilerin doğru bir şekilde toplanması ve güvenilir bir sera gazı envanteri oluşturulmasıdır. Bu çerçeve, veri kaynağının doğruluğu, veri tutarlılığı ve tekrarlanabilirlik, veri kalitesini artırma, yasal çerçeveye uyum ile verilerin kategorize edilmesi emisyon raporlama ve sürdürülebilirlik hedeflerinin başarıyla izlenmesini sağlayacaktır (Düzgüneş ve Kesici 1973)

Veri kaynağının doğruluğundan emin olmak için, veriler güvenilir ve tanınmış kurumlardan sağlanmalıdır. Türkiye'de sera gazı envanteri için Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı gibi resmî kurumların verileri kullanılabilir. Ayrıca, IPCC, UNFCCC gibi uluslararası organizasyonların belirlediği metodolojiler ve veri tabanları doğrulama için referans alınmalıdır. Veri tutarlılığı ve tekrarlanabilirlik sağlamak amacıyla yeni toplanan veriler, geçmişte elde edilenlerle tutarlı olmalı ve sapmalar açıklanabilir olmalıdır. Bu kapsamda, aynı veri için farklı kaynaklardan gelen bilgiler, çelişkilerin tespiti ve çözümü için kullanılabilir (IPCC 2019; WRI & WBCSD 2004).

Veri kalitesini artırmak amacıyla veri doğrulama, personel eğitimi veya belirsizlik analizi yapılabilir. Veri doğrulama kapsamında, sahadan toplanan veya raporlanan her veri kontrol edilmeli ve gerekirse bağımsız bir doğrulama sürecine tabi tutulmalıdır. Personel eğitimi kapsamında veri toplayan saha ekiplerinin eğitimli olması ve standart metodolojilere hâkim olması önemlidir. Belirsizlik analizi kapsamında ise verilerin doğruluğunu etkileyebilecek belirsizliklerin analizi ve bu belirsizliklerin azaltılması üzerine çalışılmalıdır (ISO 2018; IPCC 2019).

Verilerin toplanması ve raporlanması sırasında ulusal ve uluslararası yasal düzenlemelere uyulması önem arz etmektedir. Toplanan veriler şeffaf bir şekilde belgelenmeli ve gerektiğinde ilgili taraflarla paylaşılabilmelidir (UNFCCC 2014; ISO 2018). Verilerin kategorize edilmesi ile raporlama sınırı belirlenmektedir. Raporlama sınırının belirlenmesi, kuruluşun faaliyetleri ile ilişkili doğrudan ve dolaylı sera gazı emisyonlarını belirlemesi ve belgelemesi için gereklidir.

2.4.2. Veri toplama

KAİ hesaplamak için gerekli veriler doğrudan ölçümler ve raporlardan temin edilmektedir. Tesislerde doğrudan ölçüm cihazlarıyla toplanan veriler birincil veriler olarak değerlendirilmektedir (WRI & WBCSD 2004; ISO 2018). Bu tür veriler yakıt tüketimi, proses emisyonları veya elektrik tüketimi gibi verileri içermektedir. Karbon emisyonları ve enerji tüketimi gibi parametrelerin ölçümünde gerçek zamanlı veri sağlayan sensörler kullanılabilir. Tesiste verilerin toplanması aşamasında; doğru kaynak kullanımına dikkat edilmeli, elektrik ve ısı tüketimi (doğal gaz) gibi enerji verileri, tedarikçi faturaları ve otomatik izleme sistemleriyle kaydedilmelidir. Tesisin çalışma yılı baz alınarak tarihsel verilerle karşılaştırma yapılıp, temel yıl belirlenmelidir. Veri toplayan saha personeline standart metodolojilere hâkim olması için bilinçlendirme çalışmaları yapılmalı ve doğru veri toplanmasına ilişkin yönlendirmeler yapılmalıdır (WRI & WBCSD 2004; ISO 2018).

2.4.3. Emisyon faktörleri

KAİ hesaplamalarında, faaliyet verilerinin sera gazı emisyonlarına dönüştürülmesi için kullanılan temel katsayılar emisyon faktörleri olarak tanımlanır (IPCC 2019; EPA 2020). Bu faktörler genellikle yakıt türü, enerji kaynağı veya süreç bazında belirlenir ve uluslararası kabul görmüş referanslardan alınır (IPCC 2019; DEFRA 2023). En yaygın kullanılan referans dokümanlar arasında IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (2006, 2019 İyileştirmesi), UK DEFRA/BEIS Emission Factors Database, ve EPA Emission Factors (AP-42) yer almaktadır (IPCC 2019; DEFRA 2023; EPA 2020). Türkiye'de ise Sera Gazı Envanteri ve emisyon faktörleri, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB) ile TÜİK tarafından IPCC metodolojisi temel alınarak belirlenmektedir (TÜİK 2024; ÇŞİDB 2023).

2.5. Gıda Sanayinde Karbon Ayak İzi ve Emisyon Kaynakları

Küresel sera gazı emisyonlarının önemli bir kısmını gıda sektöründe enerji kullanımı ve emisyon kaynakları oluşturmaktadır. Gıda üretimi, işlenmesi, taşınması ve tüketimi süreçlerinde enerji yoğunluğu yüksek faaliyetler bulunmakta ve fosil yakıt kullanımı, elektrik tüketimi ve soğutma sistemleri nedeniyle CO_2 emisyonları oluşmaktadır; özellikle gıda işleme endüstrisi, dünya genelindeki toplam enerji tüketiminin yaklaşık %30'unu kullanmaktadır (Flammini vd. 2024). Tarımsal üretim aşamasında, toprak işleme, gübre kullanımı ve sulama işlemleri N_2O ve CO_2 emisyonu açığa çıkarken, hayvancılık faaliyetleri (sığır ve süt üretimi) CH_4 emisyonu salımına; arazi değişimi ve ormansızlaşma ise CO_2 salımına yol açar (IPCC 2019; FAO 2021). Ürünlerin işlenmesi ve paketlenmesi aşamalarında ise, enerji yoğun prosesler, fosil yakıt kullanımıyla ilişkili olarak CO_2 emisyonlarını artırır (Webster vd. 2021). Gıda tedarik zincirindeki başlıca emisyon kaynakları Şekil 2.5'te sunulmuştur.



Şekil 2.5. Gıda tedarik zincirinde emisyon kaynakları

Ürünlerin depolama ve dağıtımı sırasında, özellikle soğuk zincir lojistiği yüksek enerji gereksinimi nedeniyle gıda zincirine ciddi emisyon yükü bindirir; küresel ölçekte bu süreçlerin 2020 itibarıyla toplam sera gazı emisyonları yaklaşık 1,18 Gt CO_2e olarak tahmin edilmiştir (Flammini vd. 2024). Soğuk zincir lojistiği, ürünlerin tazeliğini ve güvenliğini korurken enerji yoğunluğu nedeniyle KAİ'yi artırır. Ambalajlama süreçleri de metal, cam, plastik ve kağıt materyallerin üretimi, taşınması ve atık yönetimi aşamalarında CO_2 emisyonlarına katkı sağlar. Aşırı veya gereksiz ambalaj kullanımı karbon yükünü yükseltirken, doğru yönetilen ambalaj kayıpları azaltılarak emisyonlar düşürebilir (WWF 2022). Perakende ve tüketici aşamasında ürünlerin depolanması ve pişirilmesi sırasında enerji kullanımı CO_2 emisyonu üretir ve ayrıştırılamayan gıda atıkları CH_4 emisyonuna yol açar (FAO 2021). Bu zincirleme süreçler, gıda sektörünün KAİ ve sera gazı yükünün anlaşılmasında kritik öneme sahiptir.

2.6. Dondurulmuş Meyve ve Sebze Sektörüne Genel Bakış

Dondurulmuş meyve ve sebze üretimi; hasat, ayıklama, yıkama, blanşlama, şok dondurma ve paketleme gibi aşamalardan oluşan, enerji yoğun bir süreçtir (Chapa vd. 2019; Pedretti vd. 2023). Bu süreçlerde kullanılan elektrik, soğutucu gazlar ve lojistik faaliyetler, sektörün çevresel etkilerini artıran başlıca faktörlerdir (Flammini vd. 2024). Şok dondurma işlemleri yüksek enerji tüketirken, soğutucu gazlar küresel ısınma potansiyeli yüksek kimyasallar içerir. Dondurulmuş gıda tedarik zincirlerinde, ilk dondurma ve depolama için ek enerji gereksinimi olmasına rağmen, temel fayda, gıdaların düşük bozulabilirlik özelliği sayesinde daha az gıda kaybı ve israfı (Food Loss and Waste- FLW) yaşanmasıdır; bu durum, ek enerji kullanımını dengeleme potansiyeline sahiptir (Nomad Foods 2023). Son olarak, üretim sırasında organik atıklar ve ambalaj atıkları oluşmaktadır. Sektör, bu çevresel etkileri azaltmak için yenilenebilir enerji kullanımı, düşük emisyonlu soğutucu gazlara geçiş, lojistik optimizasyonu ve atık yönetim sistemlerinin geliştirilmesi gibi sürdürülebilirlik stratejilerine odaklanmaktadır (REN21 2023).

Dondurulmuş meyve ve sebze üretiminde KAİ'yi belirleyen dört ana faktör aşağıdaki gibi belirlenmiştir (Nomad Foods 2023):

- Perakende ve tüketicinin kullandığı elektrik karışımı (düşük KAİ'ye sahip karışımlar dondurulmuş ürünler için daha avantajlıdır),
- Tüketicinin dondurucuda tutma süresi (daha kısa süre avantajlıdır),
- Perakende ve tüketici aşamasındaki gıda kaybı ve israfı miktarı (alternatif ürünlerin FLW'si ne kadar yüksekse, dondurulmuş ürün o kadar avantajlı olur) ve
- Ürünün doğasında var olan KAİ (yüksek üretim ayak izine sahip ürünlerin israf edilmesinin etkisi daha büyük olacaktır).

2.7. Karbon Ayak İzinin Azaltılması: Teknolojik ve Operasyonel Yaklaşımlar

KAİ'nin azaltılmasında en etkili stratejilerden biri, enerji verimliliği uygulamaları ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonudur. Sanayi tesislerinde yüksek verimli motorlar, ısı geri kazanım sistemleri ve otomasyon tabanlı enerji yönetimi uygulamaları, toplam sera gazı emisyonlarını %10–30 oranında azaltabilmektedir (IEA 2022). Özellikle elektrik yoğun sektörlerde, yenilenebilir enerji (güneş, rüzgâr veya biyogaz) kullanımı,

fosil yakıtlardan kaynaklanan CO_2 emisyonlarını doğrudan azaltır ve üretim süreçlerinde karbon nötrlüğe geçişi destekler (REN21 2023).

Soğutma sistemlerinde yapılan teknolojik inovasyonlar ve izolasyon iyileştirmeleri, enerji tüketiminin yanı sıra florlu sera gazı (HFC, HCFC, SF_6) kaçaklarını da minimize eder; modern sistemlerde doğal soğutucular (CO_2, amonyak, propan vb.) tercih edilerek hem küresel ısınma potansiyeli (KIP) hem de ozon inceltici potansiyel (ODP) düşürülmektedir (UNEP 2023; IPCC 2019).

Ayrıca, sürdürülebilir lojistik stratejileri; rota optimizasyonu, filo yenileme (elektrikli veya hibrit araçlar) ve intermodal taşımacılık uygulamaları taşımadan kaynaklanan dolaylı emisyonların azaltılmasında önemli rol oynamaktadır. Bu yöntemler, toplam sera gazı emisyonlarını %15'e kadar azaltabilmekte ve tedarik zinciri boyunca karbon verimliliğini artırmaktadır (Dünya Bankası 2021; McKinnon vd. 2020).

2.8. Gıda Üretiminde Karbon Ayak İzi Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar

Tez konusu ile ilgili literatür taranarak, gıda üretimi ile ilişkili sera gazı emisyonlarının değerlendirildiği çeşitli çalışmalar özetlenmiştir.

Michalsky (2015) tarafından Birleşik Krallık'a hava yoluyla getirilen belirli meyve ve sebzelerin iklim değişikliği üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Çalışma beş adet yerel olarak yetiştirilebilen meyve ve sebzenin (elma, kiraz, çilek, sarımsak ve bezelye) Birleşik Krallık, Avrupa ve Avrupa dışı ülkelerdeki üretim ve ulaşım aşamalarını kapsamaktadır. Çalışma sonucunda incelenen tüm meyve ve sebzeler için toplam KAİ (2013 yılı için, yerel üretim, Avrupa ithalatı ve NE ülkelerinden hava ithalatı dahil) 593,5 ktonCO_2e/kg olarak hesaplanmıştır. Hava yoluyla ithal edilen meyve ve sebzelerin önemli miktarda sera gazı emisyonuna neden olduğunu ve bu emisyonların yerel üretimle önemli ölçüde azaltılabileceği vurgulanmıştır.

Wrobel-Jedrzejewska vd. (2016) tarafından meyve püresi üretiminde soğuk depolamanın çevresel etkisini azaltmaya yönelik bir metodoloji sunmak hedeflenmiştir. Homojenize çilek püresi üretim sürecinin detaylı olarak incelendiği çalışmada, homojenize çilek püresi üretiminin ortalama KAİ 2,47 kg CO_2/kg olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, soğuk depolamanın, toplam KAİ'nin yaklaşık %73'ünden sorumlu olduğu belirlenmiş ve soğuk depolama süreçlerinin optimizasyonunun önemi vurgulanmıştır. Çalışma sonucunda, üretim sürecinden kaynaklanan emisyon 73,58 ton CO_2e/yıl, taşımadan kaynaklanan yıllık emisyon 1,51 ton CO_2e/yıl ve toplam emisyon 75,09 ton CO_2e/yıl olarak hesaplanmıştır.

Chapa vd. (2019) tarafından Şili'den ithal edilen taze organik yaban mersinleri ile ABD'de üretilen dondurulmuş organik yaban mersinlerinin çevresel performansı karşılaştırılmıştır. Çalışma tarım, hasat, işleme, taşıma ve depolama aşamalarını kapsamaktadır. Şili'den ithal edilen yaban mersini için KAİ 1,50 ±0,1 kgCO_2e/kg olarak hesaplanırken, Michigan ve Washington'da üretilen taze yaban mersinleri için KAİ sırasıyla 2,93 ±0,32 ve 2,04 ± 0,07 kgCO_2e/kg olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda; taze yaban mersini ithalinin asitlenme, küresel ısınma, ozon tabakası incelmesi, insan toksisitesi, tatlı su ve deniz ekotoksisitesi ve fotokimyasal oksidasyon açısından daha sürdürülebilir olduğu bulunmuştur. Dondurulmuş depolama süresi ve kullanılan soğutucu

akışkan türünün, tüketicilerin dondurulmuş veya taze yaban mersini tercihinde önemli bir faktörler olduğu belirlenmiştir.

Rios-Fuentes vd. (2021) tarafından Meksika'da dondurulmuş brokoli üretimindeki çevresel etki azaltma eylemleri değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmede, brokoli işleme tesislerinin temel atığı olan brokoli sapının değerlendirilmesine yönelik iki farklı alternatif (hayvan yemi olarak kullanımı ve yenilebilir un üretimi) incelenerek yapılmıştır. Çalışma Meksika'nın Guanajuato eyaletindeki brokoli üretim bölgesini temel almakta ve tarımsal brokoli üretimi, nakliye ve endüstriyel işleme süreçlerini kapsamaktadır. Dondurulmuş brokoli üretiminde ortaya çıkan sera gazı emisyonlarının, brokoli sapının hayvan yemi veya insan gıdası olarak değerlendirilmesiyle önemli ölçüde azaltılabileceği belirlenmiştir. Özellikle, brokoli sapının un haline getirilerek insan tüketimine sunulmasının, çevresel etkileri azaltmanın yanı sıra, bölgedeki bitkisel gıda sisteminin döngüselliğini de artırma potansiyeli olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışma sonucunda brokoli çiçeği (floret) için KAİ 48 kg CO_2e/ton, dondurulmuş brokoli için ise 816,44 kg CO_2e/ton olarak hesaplanmış ve dondurulmuş brokoli üretiminin %91 daha fazla KAİ'ye sebep olduğu belirlenmiştir.

Wrobel-Jedrzejewska ve Polak (2022) tarafından endüstriyel bir dondurulmuş sebze üretimi tesisinde teknolojik hatlara özel bir ölçüm sistemi kurulup enerji tüketimi ve diğer üretim verileri toplanarak KAİ belirlenmiştir. Çalışma sebzelerin yetiştiriciden tesise taşınması, dondurulmuş sebze üretim süreci (teknolojik işlemler ve iç nakliye) ve sebzelerin dondurularak depolanması aşamalarını kapsamaktadır. Analiz, tarladan kapıya (field-to-gate) yaklaşımıyla tüm doğrudan ve dolaylı emisyonları kapsayacak şekilde yapılmıştır. Ayrıca, farklı sebze türlerinin (ıspanak, karnabahar, brokoli, bezelye, fasulye ve soğan) KAİ'leri ayrı ayrı değerlendirilmiştir. En düşük KAİ bezelye üretimi için (0,110 kg CO_2e/kg), en yüksek KAİ ise karnabahar sapı üretimi için (0,403 kg CO_2e/kg) belirlenmiştir. Soğutma süreçlerinin, dondurulmuş sebze üretiminden kaynaklanan emisyonların büyük bir kısmını oluşturduğu ve ortalama olarak emisyonların %90'ına neden olduğu vurgulanmıştır.

Pedretti vd. (2023) tarafından yürütülen çalışmada orta ölçekli bir İtalyan sebze işleme tesisinde dondurulmuş ıspanak üretimi ve dağıtımıyla ilişkili çevresel etkiler hesaplanarak, üretim zincirindeki ana emisyon kaynakları belirlenmiştir. Çalışma entegre ve organik tarım sistemlerinde ıspanak yetiştiriciliği ve hasat sonrası faaliyetleri kapsamaktadır. Dondurulmuş ıspanak üretiminde en büyük çevresel etkinin yetiştirme aşamasından kaynaklandığı ve bu aşamada kullanılan tarım kimyasalları ile enerjinin önemli rol oynadığı belirlenmiştir. Paketleme malzemelerinin, özellikle oluklu mukavva kutular ve paletler, abiyotik kaynak tükenmesi ve ekotoksisite gibi konularda önemli çevresel etkilere sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, işleme sırasında kullanılan elektrik ve doğal gazın küresel ısınma ve ozon tabakası incelmesi üzerinde etkilere sahip olduğu belirlenmiştir. 1 kg dondurulmuş ıspanak için küresel ısınma potansiyeli 1,55 kg CO_2e/kg hesaplanmıştır.

Rasines vd. (2023) tarafından taze kesilmiş ve ön pişirilmiş sebzelerin çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliği yaşam döngüsü analizi ile değerlendirilmiştir. Çalışma, "beşikten pazara" yaklaşımını kullanarak, ürünlerin tüm yaşam döngüsü aşamalarını (hammadde üretimi, işleme, paketleme, nakliye ve atık yönetimi) kapsamaktadır. KAİ taze kesilmiş sebze için 0,72 kg CO_2e/kg olarak belirlenirken, ön pişirilmiş sebze için

0,86 kg CO_2e/kg olarak belirlenmiştir. Ön pişirilmiş sebzelerin daha yüksek bir KAİ'ye sahip olmasının nedeni, ilave işlem adımları (örneğin, haşlama ve ısıl işlem), daha fazla ambalaj malzemesi ve daha yüksek elektrik tüketimi olarak belirlenmiştir.

Bosona (2024) tarafından organik elma kurutma yöntemlerinin çevresel etkileri değerlendirilmiş ve özellikle geleneksel ve ısı pompalı (HP) kurutma tekniklerinin çevresel etkileri karşılaştırılmıştır. Çalışma İsveç'te tarımsal üretim, kurutma süreci, hasat sonrası işlemler, perakendeci ve nakliye aşamalarını kapsamaktadır. Tüketim seviyesi ve atık yönetimi kapsam dışında tutulmuştur. Küresel ısınma potansiyeli geleneksel kurutma için 130 kg CO_2/ton, ısı pompalı kurutma için ise 120 kg CO_2/ton olarak belirlenmiştir. Isı pompalı kurutma kullanımının, geleneksel kurutmaya göre daha az enerji tüketimi sonucunda daha az sera gazı emisyonuna sebep olduğu belirtilmiştir.

Wrobel-Jedrzejewska ve Przybysz (2024) tarafından meyve işleme ve depolama faaliyetlerinin KAİ hesaplanmıştır. Çalışma meyve püresi üretim teknolojileri (yaban mersini ve kiraz püresi), meyvelerin (elma ve yaban mersini) soğuk depolanması ve bu ürünlerin taşınması gibi farklı süreçleri kapsamaktadır. Çalışma sonucunda enerji tüketiminin doğru belirlenmesinin KAİ hesaplamalarında oldukça önemli olduğu vurgulanmıştır. Yaban mersini püresi ve kiraz püresi için KAİ'leri sırasıyla 0,103 kg CO_2e/kg ve 0,075 kg CO_2e/kg olarak hesaplanmıştır. Yaban mersini depolaması sırasında açığa çıkan emisyonların elma depolaması sırasında açığa çıkan emisyonlardan daha az olduğu belirlenmiştir.

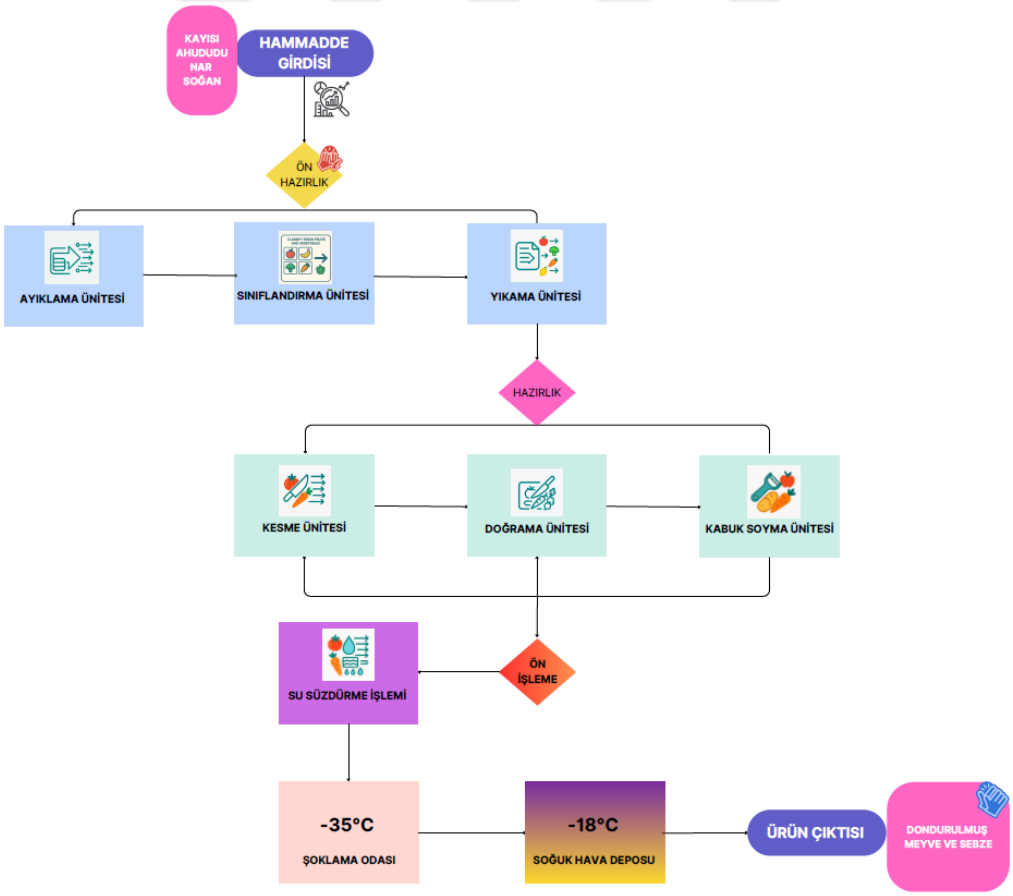
Wrobel-Jedrzejewska vd. (2024) tarafından dondurulmuş sebze üretiminden arta kalan dondurulmuş sebze atıklarını kullanarak dondurulmuş ürünler üretme teknolojilerinin KAİ belirlenmiştir. Çalışma laboratuvar ve endüstriyel ölçekte vejetaryen burgerler, çok sebzeli ezmeler ve liobatonlar gibi ürünlerin üretim süreçlerini kapsamaktadır. Üretim süreçlerindeki emisyonların büyük bir kısmının, haşlama, kızartma, pastörizasyon ve dondurarak kurutma gibi enerji yoğun işlemlerden kaynaklandığı ve üretimde sebze atıklarının kullanımı sayesinde bu ürünlerin benzer üretim süreçlerine kıyasla KAİ'lerinin azaldığı belirlenmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Dondurulmuş Meyve ve Sebze Üretim Tesisi Bilgileri

Karbon ayak izinin ISO 14064-1 standardı kapsamında hesaplanacağı bu çalışmada (ISO 2018), Batı Akdeniz bölgesinde faaliyet gösteren orta ölçekli bir dondurulmuş meyve ve sebze üretim tesisine ait veriler kullanılmıştır. İşletme, organize sanayi bölgesi sınırları içinde yer almakta olup, 3.971 m^2 kapalı alan olmak üzere toplam 6.578 m^2 yüzölçümlü alanda faaliyet göstermektedir. Üretim faaliyetleri mevsime bağlı olarak değişen tesiste hesaplama yapılan temel yıl içerisinde; soğan, kayısı, ahududu ve nar olmak üzere 4 farklı ürün olarak yaklaşık 1.154 ton üretim gerçekleştirilmiştir.

Seçilen dondurulmuş meyve ve sebze üretim tesisinde üretim alanına gelen yaş meyve ve sebzeler sırasıyla; ayıklama, sınıflandırma ve yıkama işlemlerinden geçirilmektedir. Kesme, doğrama veya kabuk soyma gibi operasyonlar da hazırlık aşamasını kapsar. Ön işlemede donma verimini arttıracak su süzdürme işleminden sonra, şoklama işlemi uygulanmaktadır. Şok dondurma işlemi merkez sıcaklığı -35°C olan şok dondurma odalarında gerçekleştirilmektedir. Dondurulan ürünler besin değerini kaybetmeden paketlenmekte, paketlenen ürünler soğuk zincirin kırılmaması için -18°C'deki soğuk hava depolarına alınıp sevkiyatı gerçekleşene kadar soğuk hava depolarında korunmaktadır.



Şekil 3.1. Dondurulmuş meyve ve sebze üretim tesisi iş akım şeması

3.2. ISO 14064 Karbon Ayak İzi Hesaplama Metodolojisi

Sera gazı emisyonlarının kurumsal düzeyde belirlenmesi, izlenmesi ve raporlanmasına yönelik en yaygın kullanılan uluslararası çerçevelerden biri ISO 14064-1:2018 "*Sera gazı—Bölüm 1: Kuruluş düzeyinde sera gazı emisyonları ve giderimlerinin belirlenmesi ve raporlanmasına yönelik şartlar*" standardıdır. Bu standart, kuruluşların sera gazı emisyonlarını şeffaf, tutarlı ve doğrulanabilir bir yöntemle hesaplamasını ve raporlamasını amaçlamaktadır (ISO 2018). ISO 14064-1 kapsamında kuruluşların öncelikle organizasyonel sınırlarını ve operasyonel sınırlarını (doğrudan ve dolaylı emisyonlar) tanımlamaları gerekmektedir (ISO 2018). Bu kapsamda incelenen tesis için operasyonel sınırlar ana kategori ve bu kategorilerin alt başlıkları olarak Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. ISO 14064-1 kapsamında kategoriler ve alt başlıkları

Ana Kategori	Alt Kategori
Kategori 1	**1.1** Sabit yanma kaynaklı doğrudan emisyonlar
	1.2 Hareketli yanma kaynaklı doğrudan emisyonlar
	1.3 Antropojenik sistemlerden sızan/kaçak kaynaklı doğrudan emisyonlar
	1.4 Endüstriyel süreçlerden kaynaklı doğrudan emisyonlar
	1.5 Arazi kullanımı, arazi kullanımındaki değişiklik ve ormancılık faaliyetlerinden kaynaklanan doğrudan emisyonlar
Kategori 2	**2.1** Kuruluş tarafından ithal edilen elektriğin dolaylı emisyonlar
	2.2 Fiziksel bir ağ vasıtası ile tüketilen elektrik hariç enerjinin ile ilgili dolaylı emisyonlar
Kategori 3	**3.1** Ürünlerin kuruluşa gelen taşınmasından kaynaklı dolaylı emisyonlar
	3.2 Ürünlerin kuruluştan dağıtımından kaynaklı dolaylı emisyonlar
	3.3 Personelin işe geliş gidişlerinden kaynaklı dolaylı emisyonlar
	3.4 Kara, deniz, hava yolu taşımacılığından kaynaklanan dolaylı emisyonlar
	3.5 Tesise gelen müşteri ve misafirlerin ulaşımından kaynaklanan dolaylı emisyonlar
	3.5 İş seyahatleri kaynaklı dolaylı emisyonlar
Kategori 4	**4.1** Katı ve sıvı atıkların bertarafı kaynaklı dolaylı emisyonlar
	4.2 Danışmanlık, temizlik, bakım, kurye, bankacılık vb. hizmet alımlar kaynaklı dolaylı emisyonlar
	4.3 Temin edilen ürünlerden kaynaklı dolaylı emisyonlar
	4.4 Sermaye mallarının üretiminden kaynaklanan dolaylı emisyonlar
	4.5 Kiralanan ekipmanların kullanımı kaynaklı dolaylı emisyonlar
Kategori 5	**5.1** Ürünün kullanım ömrü sonu aşamasından kaynaklanan dolaylı emisyonlar
	5.2 Ürünün kullanım sürecinde kaynaklanan dolaylı emisyonlar
	5.3 Kiraya verilen varlıklardan kaynaklanan dolaylı emisyonlar
	5.4 Yatırım kaynaklı dolaylı emisyonlar

ISO 14064-1 standardına göre sera gazı emisyonları, faaliyet verisinin (FV) ilgili emisyon faktörü (EF) ile çarpılması esasına dayanan Tier 1 yaklaşımı kullanılarak hesaplanmaktadır. Faaliyet verisi, bir proses tarafından tüketilen veya üretilen yakıt veya maddelere ilişkin veriyi tanımlar (ÇŞİDB 2014b).

ISO 14064-1 kapsamında yapılan hesaplamalar IPCC rehberlerini esas alır. IPCC (2019) rehberinde CO_2 eşdeğerini (CO_2e); belirli bir zaman diliminde, bir sera gazı/bir sera gazı karışımının salınan miktarıyla, aynı entegre radyatif zorlamaya/sıcaklık değişimine neden olacak CO_2 emisyonu miktarı olarak tanımlamıştır. Genellikle, CO_2e emisyon, bir sera gazının emisyonunun 100 yıllık bir zaman dilimi için küresel ısınma potansiyeli (KIP) ile çarpılmasıyla elde edilir (IPCC 2019). Bu doğrultuda, sera gazı emisyonlarının hesaplanmasının ardından, tüm emisyonların CO_2e olarak raporlanması için kullanılan KIP değerleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Küresel Isınma Potansiyelleri

Sera Gazı	**KIP ($kgCO_2e/kg$)**	**Kaynaklar**
CO_2	1	GHG Protocol (2024)
CH_4	29,8	
CH_4 (biyojenik)	27	
N_2O	273	
HFC-32 (R32)	771	IPCC (2021)
HFC-125 (R-125)	3740	
HFC134a (R-134a)	1530	
HFC143a (R-143a)	5810	
HFO- 1234yf R-1234yf	0,501	
R404A (HFC-125/HFC143a/HFC134a-44/52/4)	4728	IPCC (2019a)
R-449A (HFC-32/HFC-125/HFC-134a/HFO-1234yf-24,3/24,7/25,7/25,3)	1504,5	CARB (2020)

3.2.1. Kategori 1: Doğrudan emisyon kaynakları

Doğrudan emisyon kaynakları ISO 14064-1 standardı kapsamında Kategori 1 olarak tanımlanır. Kuruluş sınırları içindeki ve kuruluşun sahip olduğu veya kontrol ettiği sera gazı kaynaklarından meydana gelir (TSE 2024). Kategori 1 beş alt kategoriden oluşmasına karşın incelenen tesis kapsamında temin edilen verilere göre bu çalışmada Kategori 1 için üç alt kategori için hesaplamalar yapılmıştır.

3.2.1.1. Kategori 1.1: Sabit yanma kaynaklı emisyonlar

Sabit yanma kaynaklı emisyonlar tesiste ısıtma ve sıcak su amaçlı şebekeden temin edilen doğalgaz ile elektrik kesintileri halinde çalışan jeneratör gibi sabit ekipmanlarda yakıtların yanmasından kaynaklanan doğrudan emisyonlardır. Tesise ait doğalgaz faturaları ve jeneratör çalışma saati verileri temin edilmiş olup, hesaplamalar bu veriler üzerinden yapılmıştır. Sabit ve hareketli yanma kaynaklı emisyon hesaplamalarında kullanılan emisyon faktörleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Sabit ve hareketli yanma için emisyon faktörleri (IPCC 2006a)

Emisyon Kaynağı		**EF (tCO_2/TJ)**	**EF (tCH_4/TJ)**	**EF (tN_2O/TJ)**
Sabit Yanma	Doğal Gaz	56,1	0,001	0,0001
	Motorin	74,1	0,003	0,0006
Hareketli Yanma	Motorin	74,1	0,0039	0,0039

IPCC metodolojilerinde bu hesaplamalarda doğalgaz için genellikle alt ısıl değer esas alınmaktadır (IPCC 2019). Ancak Türkiye'de sera gazı emisyonlarının izlenmesi ve raporlanmasına ilişkin ulusal mevzuat kapsamında "*Doğal Gaz Kaynak Akışı Faaliyet Verisi Hesaplamaları*" dokümanında, doğalgaz kaynak akışına ilişkin faaliyet verisinin ton cinsinden raporlanabilmesi amacıyla üst ısıl değere (ÜID) dayalı bir hesaplama yöntemi tanımlanmıştır (ÇŞİDB 2024a). Bu çalışma kapsamında tesis Türkiye'de faaliyet gösterdiği için faaliyet verisinin ton cinsinden belirlenmesinde söz konusu ulusal metodoloji esas alınmış, devamında sera gazı emisyonlarının hesaplanmasında ISO 14064-1 ve IPCC kılavuzlarında yer alan emisyon faktörleri kullanılmıştır. Böylece hesaplama sürecinde doğalgaz faaliyet verisi ($FV_{doğalgaz}$) ulusal düzenlemelerin uluslararası metodolojiye uyarlanması ile hesaplanmıştır (Eşitlik 3.1):

$$\mathrm{FV_{Doğalgaz}(ton)} = \left(\frac{\mathrm{kWh}}{10{,}64}\right) \times \left(\frac{9155}{\mathrm{ÜID}}\right) \times \left(\frac{273{,}15}{288{,}15}\right) \times \left(\frac{0{,}75\ \mathrm{kg}}{\mathrm{Nm^3}}\right) \times 10^{-3}\ \frac{kg}{\mathrm{ton}} \qquad (3.1)$$

Eşitlik 3.1'de tüketim miktarı kWh biriminden Sm^3'e dönüştürülmüş, ardından ÜID kullanılarak $Stdm^3$ ve Nm^3 cinsine çevrilmiş ve doğalgazın yoğunluğu ile çarpılarak ton cinsinden ifade edilmiştir. Tesis bazında üst ısıl değer, dağıtıcı firmanın internet adresinden yayınladığı günlük dağıtım verilerinden temin edilmiş (Torosgaz 2024) ve aylık ortalaması alınarak hesaplamaya dahil edilmiştir. Doğalgaz için net kalorifik değer ise 48 TJ/Gg olarak kabul edilmiştir (IPCC 2006a). Bu doğrultuda, sabit yanma kaynaklı emisyonlar CO_2e cinsinden ($KAİ_{1.1DG}$) Eşitlik 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\begin{aligned}\mathrm{KAİ_{1.1DG}}\left(\frac{\mathrm{ton}}{\mathrm{yıl}}\right) = \mathrm{FV}\left(\frac{\mathrm{ton}}{\mathrm{yıl}}\right) \times \Big[\left(\mathrm{EF_{CO_2}}\left(\frac{\mathrm{ton}}{\mathrm{TJ}}\right) \times KIP_{\mathrm{CO_2}}\right) + \left(\mathrm{EF_{CH_4}}\left(\frac{ton}{\mathrm{TJ}}\right) \times \right.\\ \left. KIP_{\mathrm{CH_4}}\right) + \left(\mathrm{EF_{N_2O}}\left(\frac{ton}{\mathrm{TJ}}\right) \times KIP_{\mathrm{N_2O}}\right)\Big] \times \mathrm{NKD}\left(\frac{\mathrm{TJ}}{\mathrm{Gg}}\right)\end{aligned} \qquad (3.2)$$

Eşitlik 3.2'de *FV* faaliyet verisini, *NKD* net kalorifik değeri, *EF* emisyon faktörünü ve *KIP* küresel ısınma potansiyelini ifade etmektedir.

Elektrik kesintileri halinde kullanılan jeneratörden kaynaklı emisyonların hesaplanmasında jeneratör yakıtı olarak kullanılan motorinin net kalorifik değeri 43 TJ/Gg (IPCC 2006a) ve yoğunluğu (d) 0,83 kg/L kabul edilmiştir Jeneratör yakıtının yanması sonucu oluşan sera gazı emisyonları CO_2e olarak ($KAİ_{1.1M}$) Eşitlik 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$KAİ_{1.1M}\left(\frac{ton}{yıl}\right) = FV\left(\frac{L}{yıl}\right) \times d\ \left(\frac{kg}{L}\right) \times \left[\left(EF_{CO_2}\left(\frac{ton}{TJ}\right) \times KIP_{CO_2}\right) + \left(EF_{CH_4}\left(\frac{ton}{TJ}\right) \times KIP_{CH_4}\right) + \left(EF_{N_2O}\left(\frac{ton}{TJ}\right) \times KIP_{N_2O}\right)\right] \times NKD\left(\frac{TJ}{Gg}\right) \quad (3.3)$$

3.2.1.2. Kategori 1.2: Hareketli yanma kaynaklı emisyonlar

Hareketli yanma kaynaklı emisyonlar tesise ait tüm hareketli yanma kaynaklarından oluşacak sera gazı emisyonlarını kapsamaktadır. Bu kapsamda tesise ait araçların yakıt türleri ve tüketim miktarları temin edilmiştir. Tier 1 yaklaşımı kullanılarak hareketli yanma kaynaklı emisyonların CO_2e olarak ($KAİ_{1.2}$) Eşitlik 3.3'te verilen formül ve Çizelge 3.3'te hareketli yanma için verilen emisyon faktörleri kullanılarak hesaplanmıştır.

3.2.1.3. Kategori 1.3: Antropojenik sistemlerden sızan/kaçak sera gazı emisyonları

Antropojenik sistemlerden sızan/kaçak sera gazı emisyonları tesiste soğutucu gaz kullanan klimalar, soğuk ve şok odalarından kaynaklanan kaçak emisyonlardan oluşturmaktadır. Klimaların ısı enerjisi, şok ve soğuk odaların hacim verileri ve soğutucu gaz türleri temin edilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan soğutma sistemlerinden kaynaklanan emisyon faktörleri Çizelge 3.4'te verilmiştir (IPCC 2019a).

Çizelge 3.4. Soğutma Sistemlerinden Kaynaklanan Emisyon Faktörleri (IPCC 2019a)

Emisyon Kaynağı	Sera Gazı	EF (%)
Klimalar	HFC-32	5
Şok ve soğuk oda	R-449A	28,8
Frigorifik taşımacılık	R-404A	20

Bu verilerle toplam gaz dolum kapasiteleri üzerinden kaçak sera gazı emisyonları CO_2e olarak ($KAİ_{1.3}$) Eşitlik 3.4 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$KAİ_{1.3}\left(\frac{ton}{yıl}\right) = FV\left(\frac{ton}{yıl}\right) \times EF(\%) \times KIP \quad (3.4)$$

Eşitlik 3.4'te KIP_G gaz karışımının küresel ısınma potansiyelini ifade etmekte olup, farklı hidroflorokarbonlardan oluşan soğutucu gaz karışımı için KIP değeri Eşitlik 3.5 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$KIP_G = \sum(KIP \times a) \quad (3.5)$$

Eşitlik 3.5'te *a* karışımı oluşturan gazların karışımdaki yüzde oranını ifade etmektedir.

3.2.2. Kategori 2: İthal Edilen Enerji Kaynaklı Dolaylı Sera Gazı Emisyonları

ISO 14064-1 standardına göre Kategori 2 iki alt kategoriden oluşmaktadır. Ancak, tesiste elektrik enerjisi hariç fiziksel bir ağ vasıtası ile başka bir enerji kullanılmadığı için sadece kuruluş tarafından ithal edilen elektrikten kaynaklı dolaylı sera gazı emisyonları oluşumu söz konusudur. Tesiste şebekeden temin edilen elektrik kullanılmaktadır. Elektrik tüketim verileri faturalardan temin edilmiş, enerji kaynaklı emisyon faktörü ise T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) verilerine göre 0,438 tCO_2/MWh olarak kabul edilmiştir (ETKB 2024). Bu verilere göre kuruluş tarafından ithal edilen elektrikten kaynaklı dolaylı emisyonlar CO_2e cinsinden ($KAİ_2$) Eşitlik 3.6 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$KAİ_2\left(\frac{\text{ton}}{\text{yıl}}\right) = FV(MWh) \times \left[EF_{CO_2}\left(\frac{\text{ton}}{MWh}\right) \times KIP_{CO_2}\right] \quad (3.6)$$

3.2.3. Kategori 3: Ulaşım kaynaklı dolaylı emisyonlar

Ulaşım kaynaklı dolaylı emisyonlar kuruluş sınırları dışında bulunan kaynaklardan meydana gelmektedir. Bu kaynaklar hareketlidir ve çoğunlukla ulaşım ekipmanlarında yakılan yakıttan kaynaklanır (ISO 2018). Beş alt kategoriden oluşan Kategori 3 için incelenen tesis kapsamında temin edilen verilere göre, incelenen tesiste ürünlerin kuruluşa taşınmasından, ürünlerin kuruluştan dağıtımından ve personelin işe geliş gidişlerinden kaynaklı olmak üzere üç alt kategoride ulaşım kaynaklı sera gazı emisyonlarının açığa çıktığı belirlenmiştir.

3.2.3.1. Kategori 3.1: Ürünlerin kuruluşa taşınmasından kaynaklı emisyonlar

Tesiste hammadde olarak kullanılan meyve ve sebzelerin tesise gelişi bu kategori altında değerlendirilmektedir. Tesise gelen ürünler belirlenen yıl içerisinde 2 farklı halden temin edilmiş olup, tesise olan mesafeleri, yaptıkları sefer sayıları, taşıdıkları ürün miktarı, aracın km başına yakıt tüketimi ve yakıt cinsi verileri temin edilmiştir. Bu bilgiler kullanılarak ürünlerin kuruluşa taşımacılığından kaynaklanan emisyonlar CO_2e cinsinden ($KAİ_{3.1}$) Eşitlik 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

3.2.3.2. Kategori 3.2: Ürünlerin kuruluştan dağıtımından kaynaklı emisyonlar

Ürünlerin kuruluştan dağıtımı kaynaklı emisyonların hesaplanması amacıyla kiralık olarak dağıtımda kullanılan frigorifik araca ait yakıt tüketimi ve soğutma sistemi (hacim verileri ve soğutucu gaz cinsi) bilgileri temin edilmiştir. Frigorifik taşımacılık için yakıtın yanmasından kaynaklı emisyonlar CO_2e cinsinden ($KAİ_{3.2}$) Eşitlik 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

Aracın soğutucu ünitesinden kaynaklanacak soğutucu gaz kaçak emisyonları ise CO_2e cinsinden ($KAİ_{3.2S}$) toplam gaz dolum kapasiteleri dikkate alınarak Eşitlik 3.4 kullanılarak hesaplanmıştır. Farklı hidroflorokarbonların karışımından oluşan soğutucu gaz için KIP_G değeri ise Eşitlik 3.5 kullanılarak hesaplanmıştır.

3.2.3.3. Kategori 3.3: Personelin işe geliş gidişlerinden kaynaklı emisyonlar

Kendi aracıyla işe gelip-giden personellerin yıllık yakıt tüketim ve yakıt türü verileri temin edilmiştir. Bu verilere göre personelin işe geliş gidişlerinden kaynaklı emisyonlar CO_2e cinsinden (KAİ $_{3.3}$) Eşitlik 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

3.2.4. Kategori 4: Kuruluş tarafından kullanılan ürünlerin/hizmetlerin üretiminden/sunulmasından kaynaklanan dolaylı sera gazı emisyonları

Kategori 4 beş alt kategoriden oluşmasına karşın incelenen tesis kapsamında temin edilen verilere göre bu çalışmada Kategori 4 için katı atıkların bertarafı ve satın alınan ürünlerden/hizmetlerden kaynaklanan emisyonlar olmak üzere iki alt kategoride emisyon açığa çıktığı belirlenmiştir.

3.2.4.1. Kategori 4.1: Katı atıkların bertarafı kaynaklı emisyonlar

Tesiste işlenen ürünler sebebiyle en büyük payı organik atıklar oluşturmaktadır. Tesisten temin edilen organik atık miktarı üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. Katı atıkların bertarafı kaynaklı sera gazı emisyonları, IPCC tarafından 2019 yılında katı atıklara ilişkin sunulan dokümanda bulunan eşitlikler ve sabitler kullanılarak hesaplanmıştır (IPCC 2019). Bu kapsamda ilk olarak tesisten temin edilen depolanan atık miktarı ve IPCC (2019) tarafından önerilen katsayılar kullanılarak depolanan ayrışabilir organik karbon kütlesi ($DDOC_m$) Eşitlik 3.7 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\mathrm{DDOC_m(ton)} = \mathrm{W\ (ton)} \times \mathrm{DOC\ (\%)} \times \mathrm{DOC_f\ (\%)} \times \mathrm{MCF\ (\%)} \quad (3.7)$$

Eşitlik 3.7'de *DDOC$_m$* depolanan ayrışabilir organik karbon kütlesini, W depolanan atık miktarını, *DOC* ayrışabilir organik karbon fraksiyonunu, *DOC$_f$* DOC'un ayrışabilen fraksiyonu ve *MCF* aerobik ayrışma için CH_4 düzeltme faktörünü ifade etmektedir. Depolanan ayrışabilir organik karbon kütlesi hesaplandıktan sonra Eşitlik 3.8 kullanılarak katı atıklardan açığa çıkan CH_4 miktarı hesaplanmıştır.

$$\mathrm{L_0(ton\ CH_4)} = \mathrm{DDOC_m(ton)} \times \frac{16}{12} \times \mathrm{F(\%\ CH_4)} \quad (3.8)$$

Eşitlik 3.8'de *L$_0$* katı atıklardan açığa çıkan CH_4 miktarını ve *F* düzenli depolama gazındaki CH_4 hacim fraksiyonunu ifade etmektedir.

Tesisten kaynaklanan atıklardan açığa çıkan CH_4 miktarı faaliyet verisi olarak kullanılarak, tesis kaynaklı atıkların düzenli depolama sahasında sebep olacağı emisyonlar CO_2e cinsinden (KAİ $_{4.1}$) Eşitlik 3.9 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\mathrm{KAİ_{4.1}}\left(\frac{\mathrm{ton}}{\mathrm{yıl}}\right) = \mathrm{FV}\left(\frac{\mathrm{ton CH_4}}{\mathrm{yıl}}\right) \times \mathrm{KIP} \quad (3.9)$$

Eşitlik 3.9'da *k* yıllık ayrışma katsayısını ifade etmektedir. Organik atıklardan kaynaklanan metan emisyonları biyojenik kökenli kabul edildiğinden bu hesaplamada biyojenik metan için raporlanmış KIP değeri olan 27 ton CO_2/tonCH_4 değeri kullanılmıştır.

3.2.4.2. Kategori 4.2: Satın alınan ürünlerden/hizmetlerden kaynaklı emisyonlar

Danışmanlık, temizlik, bakım, kurye, bankacılık vb. hizmet alımlar kaynaklı emisyonlar bu alt başlıkta belirlenmiştir. Tesise ait çevre danışmanlık, ilaçlama ve iş sağlığı ve güvenliği (İSG) hizmetlerinin aylık ücretleri temin edilmiştir. Temin edilen verilere göre satın alınan ürünlerden/hizmetlerden kaynaklı emisyonlar CO_2e cinsinden (KAİ $_{4.2}$) Eşitlik 3.10 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\text{KAİ}_{4.2}\left(\frac{\text{ton}}{\text{yıl}}\right) = \text{FV}\left(\frac{\text{TL}}{\text{yıl}}\right) \times \text{EF}_{\text{CO}_2\text{e}}\left(\frac{\text{kg CO}_2e}{\text{USD}}\right) \times \text{k}\left(\frac{\text{USD}}{\text{TL}}\right) \quad (3.10)$$

Eşitlik 3.10'da k güncel döviz kurunu (USD/TL) ifade etmektedir. Satın alınan ürünlerden/hizmetlerden kaynaklanan emisyonların hesaplanmasında kullanılan emisyon faktörleri Çizelge 3.5'te sunulmuştur (EPA 2021).

Çizelge 3.5. Satın Alınan Hizmetler Kaynaklı Emisyon Faktörleri (EPA 2021)

Emisyon Kaynağı	**EF (kg CO_2e/USD)**
Çevre Danışmanlık Hizmeti	0,079
İSG	0,084
İlaçlama	0,167

3.2.5. Kategori 5: Kuruluş tarafından üretilen ürünlerin/sunulan hizmetlerin kullanımından kaynaklı dolaylı sera gazı emisyonları

ISO 14064-1 kapsamında Kategori 5 dört alt başlıkta incelenmektedir. Ancak incelenen tesis kapsamında temin edilen verilere göre, ürünlerin kullanım ömrü sonu aşamasından kaynaklı dolaylı emisyonların hesaplanması mümkün olmuştur. Piyasaya süren sıfatıyla tesiste üretilen ambalajlı ürünlerin kullanım sonrasında oluşan ambalaj atıkları, tüketici kaynaklı atık kapsamında değerlendirilmiş ve bu atık miktarlarının belirlenmesinde tesise ait Geri Kazanım Katılım Payı (GEKAP) beyanlarında bildirilen ambalaj miktarları veri kaynağı olarak kullanılmıştır. Elde edilen verilere göre kuruluş tarafından üretilen ürünlerin/sunulan hizmetlerin kullanımından kaynaklı dolaylı sera gazı emisyonları CO_2e cinsinden (KAİ $_{5.1}$) Eşitlik 3.11 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\begin{aligned}\text{KAİ}_{5.1}\left(\frac{\text{ton}}{\text{yıl}}\right) = &\left[\text{FV}\left(\frac{ton}{\text{yıl}}\right) \times \%\,\text{DD} \times \text{EF}_{\text{DD}-\text{CO}_2\text{e}}\left(\frac{\text{kg CO}_2e}{\text{ton}}\right)\right] + \\ &\left[\text{FV}\left(\frac{ton}{\text{yıl}}\right) \times \%\,\text{GK} \times \text{EF}_{GK-\text{CO}_2\text{e}}\left(\frac{\text{kg CO}_2e}{\text{ton}}\right)\right]\end{aligned} \quad (3.11)$$

Eşitlik 3.11'de *DD* düzenli depolamayı ve *GK* geri kazanımı ifade etmektedir. Hesaplamalarda kullanılan emisyon faktörleri Çizelge 3.6'da sunulmuştur (DEFRA 2024). Ek olarak, Türkiye için belirlenmiş olan geri dönüşüme giden atık miktarları yüzdesi kullanılmış, geri kalan atıkların düzenli depolamaya gitmesi üzerinden hesaplama yapılmıştır. 2023 yılında geri dönüşüme giden atık miktarı %34,92 olarak belirlenmiştir (ÇŞİDB 2024b).

Çizelge 3.6. Tüketici atığı kaynaklı emisyon faktörleri (DEFRA 2024)

Emisyon Kaynağı	**Düzenli Depolama EF (kg CO_2e / ton)**	**Geri Kazanım EF (kg CO_2e / ton)**
Plastik Ambalaj	8,88386	6,41061
Kâğıt/Karton Ambalaj	1164,39015	6,41061

3.4. Dondurulmuş Meyve ve Sebze Üretim Tesisinden Temin Edilen Veriler

Tesis için 6 ana kategori ve bu kategorileri oluşturan alt kategorilerin emisyon kaynakları belirlenmiş olup, bu kaynaklara göre sera gazı emisyon miktarlarının hesaplanabilmesi için tesisten temin edilen veri türleri **Hata! Başvuru kaynağı b ulunamadı.**'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.7. Kategorilere göre temin edilen veri türleri

Alt kategori	**Temin edilen veri türü**
1.1. Sabit yanma kaynaklı doğrudan emisyonlar	Doğal gaz faturaları
	Jeneratör yakıt tüketimi
1.2. Hareketli yanma kaynaklı doğrudan emisyonlar	Şirkete ait araçların yakıt tüketimi
1.3. Antropojenik sistemlerden sızan/kaçak sera gazları kaynaklı doğrudan emisyonlar	Klima bilgileri
	Soğuk hava ve şok dondurma odaları bilgileri
2.1. Kuruluş tarafından ithal edilen elektriğin dolaylı sera gazı emisyonları	Elektrik faturaları
3.1. Ürünlerin kuruluşa taşınmasından kaynaklı emisyonlar	Kuruluşa gelen hammadde tedarikçisinin yakıt tüketimi
3.2. Ürünlerin kuruluştan dağıtımından kaynaklı emisyonlar	Frigorifik taşımacılık için yakıt tüketimi
	Frigorifik taşımacılık soğutma sistemi bilgileri
3.3. Personelin işe gidiş gelişleri kaynaklı emisyonlar	Kendi aracını kullanan personelin işe gidiş geliş yakıt tüketimleri
4.1. Katı atıkların bertarafı kaynaklı emisyonlar	Organik atık miktarı
4.2. Danışmanlık, temizlik, bakım, kurye, bankacılık vb. hizmet alımlar kaynaklı emisyonlar	Alınan hizmetler için ödenen ücretler

5.1. Ürünün kullanım ömrü sonu aşamasından kaynaklanan dolaylı emisyonlar	Geri kazanım katılım payı beyannameleri

3.5. Belirsizlik Analizi

Çalışmaya konu olan dondurulmuş meyve ve sebze üretim tesisi için kategori bazında hesaplanana karbondioksit emisyonları için belirsizlik analizi yapılmıştır. Bu kapsamda, tesisten kaynaklanan sera gazı emisyonlarına toplamda %90'ın üzerinde katkı yaptığı belirlenen doğrudan emisyonlar (Kapsam 1) ile ithal edilen enerji (Kapsam 2) ve ulaşımdan kaynaklı (Kapsam 3) dolaylı emisyonlar belirsizlik analizinde ele alınmıştır.

Belirsizlik analizi GHG Protocol kapsamında belirtilen yönteme göre yapılmıştır (WRI & WBCSD 2004). Belirlenen kategorilerdeki toplam envanter belirsizliğine yönelik tesise özgü veriler toplanması mümkün olmadığı, tüm faaliyet verileri ve emisyon faktörleri için, IPCC kılavuzunda endüstriyel tesislerde emisyon faktörü ve faaliyet verisi belirsizliklerine yönelik olarak önerilen %7 belirsizlik oranı kabul edilmiştir (IPCC 1997). Ardından, rastgele hatalardan kaynaklanan istatistiksel parametre belirsizlikleri Birinci Derece Yayılım (Gaussian) yöntemi ile kümülatif belirsizlik olarak Eşitlik 3.12 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\pm u = t \pm \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(H_i \times I_i)^2}}{M} \tag{3.12}$$

Eşitlik 3.12'de; u % belirsizliği, H i kaynağı için CO_2 emisyonunu, I i kaynağı için belirsizliği M toplam sera gazı emisyonunu ifade etmektedir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Dondurulmuş Meyve ve Sebze Üretimi Karbon Ayak İzi

ISO 14064-1 kapsamında çalışmanın yapıldığı tesis için belirlenen kategori ve bu kapsamda temin edilen veriler Şekil 4.1'de açıklanmıştır.

4.1.1. Kategori 1: Doğrudan Emisyon Kaynakları

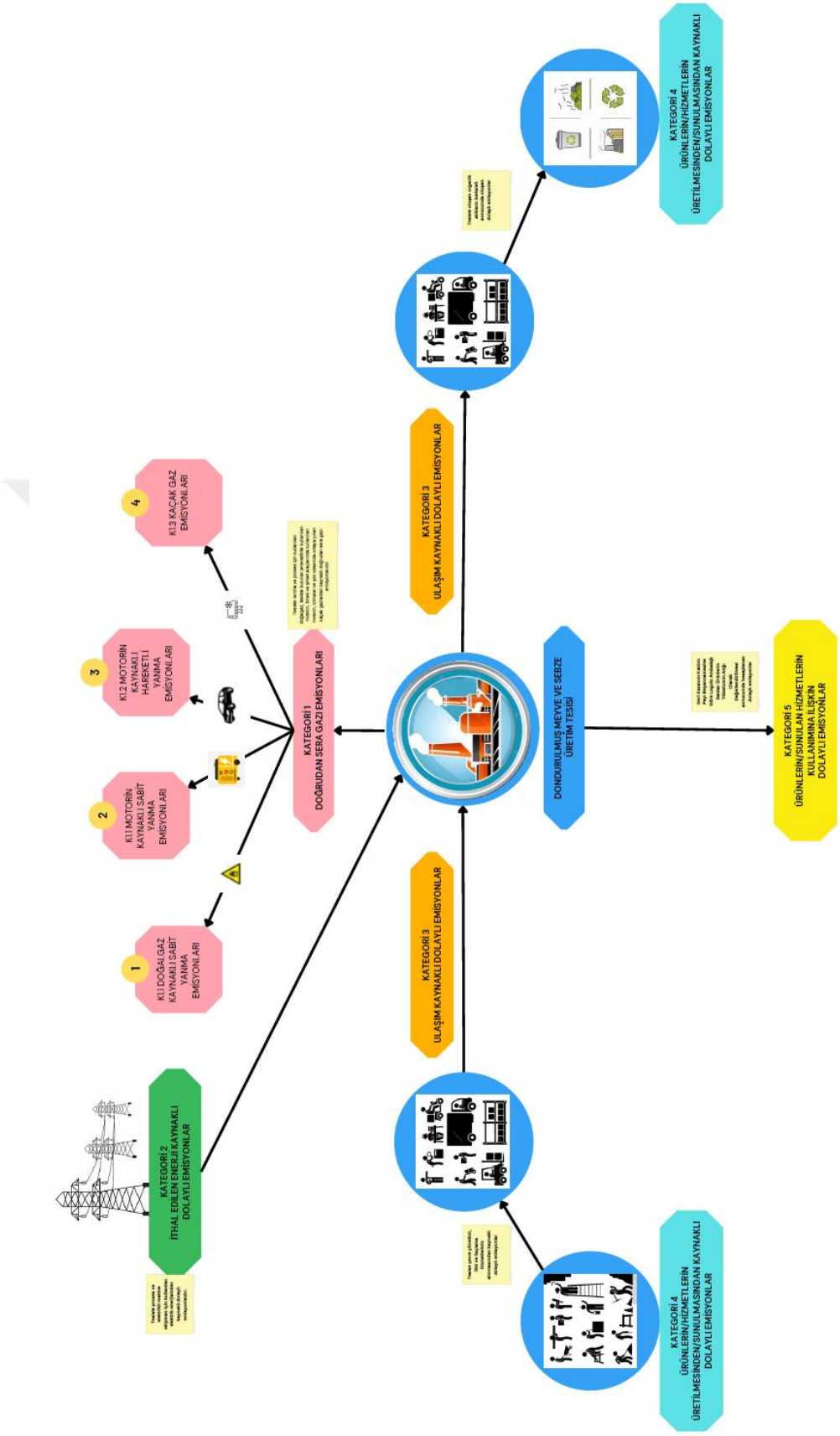
Tesiste ısıtma ve sıcak su eldesi amacıyla doğal gaz kullanılmaktadır. Hesaplama sürecinde faaliyet verisinin belirlenmesinde ulusal düzenlemelere (Eşitlik 3.1), emisyon faktörlerinin kullanımında ise uluslararası metodolojiye uyum sağlanmıştır (Eşitlik 3.2). Tesis bazında üst ısıl değer, dağıtıcı firmanın internet adresinden yayınladığı günlük dağıtım verilerinden temin edilmiş ve aylık ortalaması alınarak hesaplamaya dahil edilmiştir. Bu doğrultuda tesis için envanterin oluşturulduğu 2024 yılında toplam tüketilen doğal gaz miktarı (faaliyet verisi) 56.244,22 kWh olarak belirlenmiştir. Doğalgaz tüketim verisine göre doğalgaz kaynaklı CO_2, CH_4 ve N_2O emisyonları sırasıyla 9928,514 kg/yıl, 0,177 kg/yıl ve 0,018 kg/yıl olarak hesaplanmıştır. Toplam sera gazı emisyonları ise CO_2 eşdeğeri cinsinden gazlar için tanımlanmış KIP değerleri kullanılarak sera gazı emisyonları 9,939 tonCO_2e/yıl olarak hesaplanmıştır.

Tesiste elektrik kesintilerine karşı kullanılan jeneratör için bildirilen yıllık çalışma süresi 30,6 saat ve saatlik yakıt tüketimi 4,25 L/sa verilerine göre jeneratörün yakıt tüketimi 107,94 ton/yıl olarak hesaplanmıştır. Yakıt tüketimine göre Eşitlik 3.3 kullanılarak jeneratör kullanımı kaynaklı CO_2, CH_4 ve N_2O emisyonları sırasıyla 343,934 kg/yıl, 0,014 kg/yıl ve 0,003 kg/yıl olarak hesaplanmıştır. Toplam sera gazı emisyonları ise CO_2 eşdeğeri cinsinden gazlar için tanımlanmış KIP değerleri kullanılarak sera gazı emisyonları 0,345 tonCO_2e/yıl olarak hesaplanmıştır.

Tesise ait şirket araçlarında yakıt olarak motorin kullanıldığı ve yakıt tüketiminin 3000 L/yıl olduğu belirlenmiştir. Bu bilgilere göre toplam yakıt tüketimi 2,49 ton/yıl ve hareketli yanma kaynaklı sera gazı emisyonları 8,06 tonCO_2e/yıl olarak hesaplanmıştır.

Tesiste soğutucu gaz kullanan; klimalar, soğuk ve şok odalarından kaynaklanan kaçaklar doğrudan emisyonlara sebep olmaktadır. Klimaların ısı enerjisi, şok ve soğuk odaların hacim verileri ve soğutucu gaz türleri temin edilmiştir. Bu verilerle göre klimalarda toplam 5,803 kg/yıl HCFC-32 (R-32) gazı, şok ve soğuk odalarda ise 199,140 kg/yıl R-449A gazı kullanıldığı belirlenmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda klimalardan kaynaklı kaçak sera gazı emisyonları 0,224 tonCO_2e/yıl, şok ve soğuk odalardan kaynaklı kaçak sera gazı emisyonları 86,287 tonCO_2e/yıl olarak hesaplanmıştır.

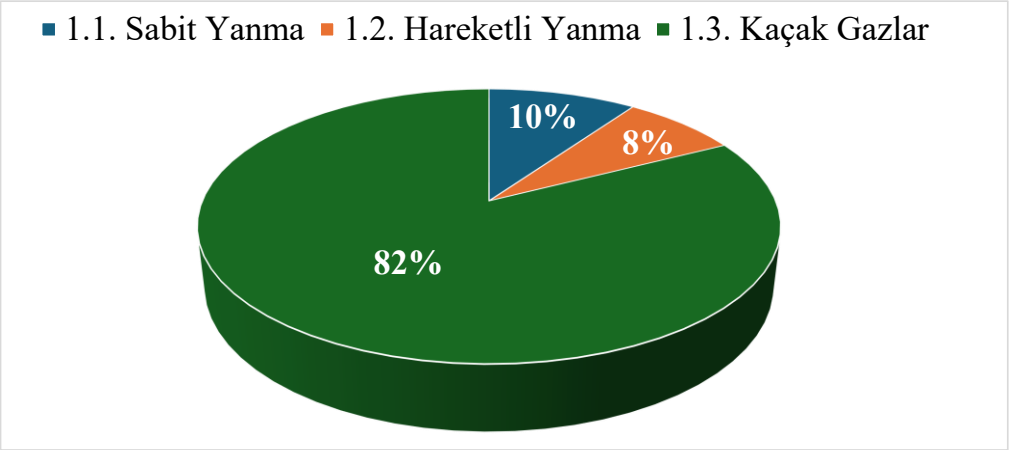
Tesiste doğalgaz ve jeneratör kullanımı, şirket araçları ve kaçak emisyonlardan kaynaklanan doğrudan emisyon miktarları Çizelge 4.1'de özetlenmiştir. Kategori 1 kapsamında değerlendirilen alt kategorilerin payları Şekil 4.2'de sunulmuştur. En büyük emisyon kaynağı toplam doğrudan emisyonların %82,51'ini oluşturan şok ve soğuk oda kullanımdan kaynaklı kaçak emisyonlar olarak belirlenmiştir. Bu durum, dondurulmuş gıda sektöründe kaçak soğutucu gazların (HCFC, HFC gibi yüksek KIP'e sahip florlu gazlar) çevresel etkisinin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.1. Tesis için belirlenen kategoriler ve kategoriler kapsamında temin edilen veriler

Çizelge 4.1. Kategori 1 emisyon değerleri

Kategori	Emisyon Kaynağı	Kaynak bazında emisyonlar (ton CO_2e/yıl)	Alt kategori bazında emisyonlar (ton CO_2e/yıl)
1.1	Isıtma ve sıcak su	9,939	10,284
	Jeneratör	0,345	
1.2	Şirkete ait araçlar	8,060	8,060
1.3	Klimalar	0,224	86,510
	Şok ve soğuk oda	86,287	
Kategori 1 Toplam			**104,854**



Şekil 4.2. Kategori 1 kapsamında alt kategorilerin payı

4.1.2. Kategori 2: İthal Edilen Enerji Kaynaklı Dolaylı Sera Gazı Emisyonları

Tesiste şebekeden temin edilen elektrik kullanılmaktadır. Elektrik tüketim verileri faturalardan temin edilmiş olup, 2024 yılı için toplam elektrik tüketimi 968,454 MWh olarak hesaplanmıştır. Bu elektrik tüketimine göre Eşitlik 3.6 kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Tesise ait Kategori 2 emisyonu 424,183 tCO_2e olarak hesaplanmıştır. Şok dondurma ve soğuk hava depolama süreçlerinin yüksek enerji ihtiyacı, bu kategorinin temel belirleyicisidir.

4.1.3. Kategori 3: Ulaşım Kaynaklı Dolaylı Emisyonlar

Tesise gelen ürünler belirlenen yıl içerisinde 2 farklı halden temin edilmiş olup, tesise olan mesafeleri, yaptıkları sefer sayıları, taşıdıkları ürün miktarı, araçların km başına yakıt tüketimi ve yakıt cinsi verileri temin edilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, hammadde tedarikine ilişkin taşımacılık faaliyetlerinden kaynaklanan emisyonlar Eşitlik 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

Kuruluştan giden ve günlük ortalama 2 saat süreyle kiralık olarak kullanılan frigorifik taşımacılık faaliyetlerine ilişkin yakıt tüketimi ve soğutma sistemi (hacim verileri ve soğutucu gaz cinsi) bilgileri temin edilmiştir. Frigorifik taşımacılık yapılan

aracın soğutucu ünitesinden kaynaklanan soğutucu gaz kaçakları toplam gaz dolum kapasitesi üzerinden Eşitlik 3.4 kullanılarak hesaplama yapılmıştır.

Kendi aracıyla işe gelip- giden personellerin yıllık yakıt tüketim ve yakıt türü verileri temin edilmiştir. Bu verilere göre Eşitlik 3.3 kullanılarak hesaplama yapılmıştır. Personel ulaşımı, hammadde tedarik ve lojistik faaliyetlerine ilişkin toplam yakıt tüketimi 2918,28 kg/yıl ve bu yakıt tüketiminden kaynaklı sera gazı emisyonları 9,447 tCO_2e/yıl olarak hesaplanmıştır. Ürünlerin taşınması amacıyla kullanılan soğuk depolu frigorifik araçta soğutucu gaz kullanımı sonucu açığa çıkan kaçak gaz miktarı 0,6kg/yıl olarak hesaplanmıştır. Kaçak gaz miktarı çok düşük hesaplanmış olmakla birlikte araçta kullanılan R-404A gazı yüksek KIP'e sahip olduğu için sera gazı emisyonları 2,837 tCO_2e/yıl olarak hesaplanmıştır. Böylece kategori 3 için toplam sera gazı emisyonları 12,284 tCO_2e/yıl olarak hesaplanmıştır.

4.1.4. Kategori 4: Kuruluş Tarafından Kullanılan Ürünlerin/Hizmetlerin Üretiminden/Sunulmasından Kaynaklanan Dolaylı Sera Gazı Emisyonları

Tesisten temin edilen organik atık miktarı üzerinden hesaplamalar Eşitlik 3.7, 3.8, 3.9 kullanılarak yapılmıştır. Faaliyet verisi CH_4 emisyonu hesaplanarak belirlenmiş ve değerlendirmeye dahil edilmiştir. Tesise ait çevre danışmanlık, ilaçlama ve iş sağlığı ve güvenliği (İSG) hizmetlerinin aylık ücretleri temin edilerek hesaplamalar Eşitlik 3.10 kullanılarak yapılmıştır. Organik atık yönetimi ile satın alınan hizmetlerden kaynaklanan emisyon değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

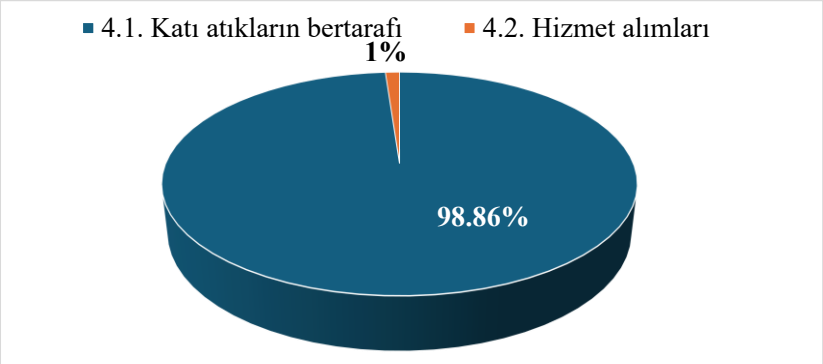
Çizelge 4.2. Kategori 4 emisyon değerleri

Kategori	Emisyon Kaynağı	Kaynak bazında emisyonlar (ton CO_2e/yıl)
4.1	Organik atıkların bertarafı	37,422
4.2	Alınan hizmetler	0,433
	Kategori 4 Toplam	**37,85**

Kategori 4 emisyonlarının %98,86'sı tesis faaliyetleri sonucu açığa çıkan organik atıkların bertaraf sürecinden kaynaklanmıştır (Şekil 4.3). Bu sonuç, tesisin tedarik zinciri ve hizmet alımı süreçlerinde en kritik iyileştirme alanının organik atık yönetimi olduğunu kanıtlamaktadır.

4.1.5. Kategori 5: Kuruluş Tarafından Üretilen Ürünlerin/Sunulan Hizmetlerin Kullanımı ile İlişkili Dolaylı Sera Gazı Emisyonları

Piyasaya süren sıfatıyla tesiste üretilen ambalajlı ürünlerin kullanım sonrasında oluşan ambalaj atıkları, tüketici kaynaklı atık kapsamında değerlendirilmiş ve bu atık miktarlarının belirlenmesinde tesise ait Geri Kazanım Katılım Payı (GEKAP) beyanlarında bildirilen ambalaj miktarları veri kaynağı olarak kullanılmıştır. Hesaplamalar Eşitlik 3.11 kullanarak yapılmıştır. Ürünün kullanım ömrü sonunda tüketicinin atığı olmasından kaynaklanan, satılan ürünlerin ambalajlarının (plastik ve kağıt/karton) tüketici tarafından bertaraf edilmesi sonucu 0,223 tCO_2e/yıl emisyon oluştuğu hesaplanmıştır.



Şekil 4.3. Kategori 4 kapsamında alt kategorilerin payı

4.1.6. Dondurulmuş meyve ve sebze üretimi genel değerlendirmesi

ISO 14064-1 standardına göre belirlenen emisyon kategorilerinin toplam karbon ayak izine katkıları incelendiğinde, emisyonların büyük çoğunluğunun Kategori 2 ve Kategori 1 kaynaklarından geldiği tespit edilmiştir. Çizelge 4.3'te en fazla emisyona sebep olan emisyon kaynağından en aza göre sıralanarak CO_2e cinsinden toplam sera gazı ve Şekil 4.4'te bu emisyonların toplamdaki payları gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Emisyon Kaynaklarının Genel Dağılımı ve Önemi

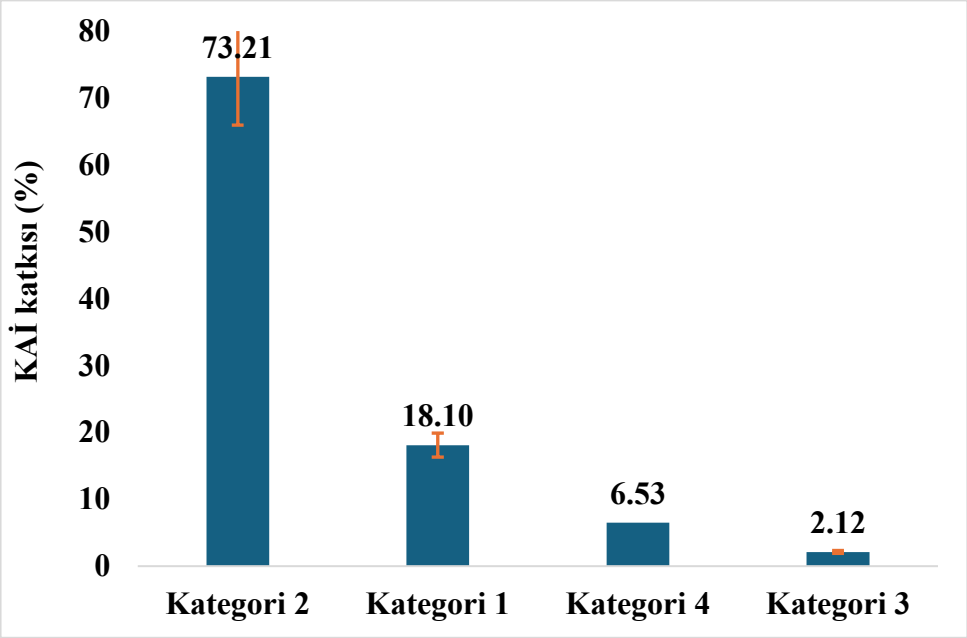
Ana Kategori	Emisyon Kaynağı	CO_2e Emisyonu (tCO_2e)
Kategori 2	İthal Edilen Elektrik	424,18 ± 41,99
Kategori 1	Doğrudan Emisyonlar	104,85 ± 10,38
Kategori 4	Satın Alınan Hizmet ve Atık Bertarafı	37,85
Kategori 3	Ulaşım Kaynaklı Dolaylı Emisyonlar	12,28 ± 1,22
Kategori 5	Satılan Ürünün Tüketici Bertarafı	0,22
	TOPLAM	**579,39** ± 42,89

KAİ hesaplamaları, dondurulmuş meyve ve sebze üretim tesisindeki enerji tüketimi (Kategori 2) ve soğutucu akışkan/gaz kaçaklarının (Kategori 1) çevresel yükün ana belirleyicileri olduğunu açıkça göstermiştir. Doğrudan emisyonlar (Kategori 1), toplam KAİ'nin %18,1'ini oluşturarak ikinci büyük emisyon kaynağıdır. Bu bulgular, gıda sektöründeki benzer çalışmalarla paralellik göstermektedir.

Ayrıca tesisin %93,43 çevresel yükünü taşıyan Kategori 1,2 ve 3 için yapılan belirsizlik analizinde kümülatif belirsizlik ±%7,9 hesaplanarak envanter kalitesi "iyi" olarak değerlendirilmiştir.

Bu sonuçlar, tesisin KAİ optimizasyonu çalışmalarında öncelikle elektrik tüketimini azaltmaya yönelik enerji verimliliği projelerine ve soğutma sistemi kaçaklarını önlemeye ve/veya soğutma sistemlerinde kullanılabilecek daha düşük KIP'e sahip gazların araştırılmasına odaklanması gerektiğini göstermektedir. Ayrıca, Kategori 4'te

önemli bir paya sahip olan organik atıkların (37,42 tCO_2e/yıl) daha döngüsel veya düşük emisyonlu bertaraf yöntemleriyle (örneğin kompostlama veya biyogaz üretimi) değerlendirilmesi, toplam emisyonları önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir.



Şekil 4.4. Emisyon kaynaklarının KAİ'deki payı

Bu çalışmada elde edilen bulgular doğrultusunda faaliyet verilerinin temin edildiği yıl rapor edilen 1154 ton ürün miktarına göre ürün başına emisyonlar hesaplanmış ve literatürde bulunan benzer çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4. Dondurulmuş Gıda Üretiminden kaynaklı CO_2e Emisyonları

Tesis Türü	CO_2e Emisyonu ($kgCO_2e$/ton ürün)						Kaynaklar
	Kategori 1	Kategori 2	Kategori 3	Kategori 4	Kategori 5	Toplam	
Dondurulmuş meyve-sebze	90,86	367,57	10,64	32,80	0,19	502	Bu çalışma
Homojenize çilek püresi	-	2.420	50	-	-	2.470	Wrobel-Jedrzejewska vd. (2016)
Dondurulmuş ıspanak	527	353	60,3	608,6	-	1.550	Pedretti vd. (2023)
Dondurulmuş yaban mersini-Washington	560	266	110	144	-	1.200	Chapa vd. (2019)
Dondurulmuş yaban mersini-Michigan	1.190	266	20	144	-	1.720	

Hesaplanan 502 kg CO_2e/ton ürün değerinin literatürde raporlanan dondurulmuş gıda üretimlerine ait KAİ değerleri ile belirgin farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Bu farklılıklar, ağırlıklı olarak kullanılan üretim prosesleri, enerji profilleri ve soğutma sistemlerinde tercih edilen materyaller temelinde değerlendirilmektedir.

Literatürle karşılaştırıldığında en önemli benzerlik, emisyonların elektrik tüketimi (Kategori 2) kaynaklı yoğunlaşmasıdır. Bu çalışmada toplam sera gazı emisyonlarının %73,21'i elektrik tüketiminden kaynaklanmakta olup, bu durum Wrobel-Jędrzejewska vd. (2016) tarafından yürütülen homojenize çilek püresi çalışması ile uyumludur. Söz konusu çalışmada da soğuk depolama ve dondurma süreçlerinin teknolojik emisyonların yaklaşık %73'ünü oluşturduğu belirtilmiştir. Her iki çalışmada da soğuk zincir uygulamalarının dondurulmuş gıda üretiminde başlıca "sıcak nokta" olduğu açıkça görülmektedir.

Buna karşın, literatürde yer alan dondurulmuş ıspanak ve yaban mersini çalışmalarına kıyasla bu çalışmada hesaplanan toplam emisyon değerinin daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu farklılığın temel nedenlerinden ilki, analiz sınırlarının farklılığıdır. Pedretti vd. (2023) ve Chapa vd. (2019) çalışmalarında sera gazı envanteri "beşikten kapıya" yaklaşımıyla ele alınmış ve tarımsal yetiştirme aşaması analize dâhil edilmiştir. Bu çalışmalarda, toplam emisyonların önemli bir bölümünün tarla aşamasında gübre kullanımı ve yakıt tüketiminden kaynaklandığı raporlanmıştır. Bu çalışmada ise tarımsal üretim aşaması organizasyonel sınırların dışında tutulmuş olup, yalnızca tesis operasyonlarına odaklanılması birim emisyon değerinin daha düşük hesaplanmasına neden olmuştur.

Farklılıkların bir diğer önemli nedeni, ürün formu ve proses yapılarındaki ayrışmadır. Homojenize çilek püresi üretimi; dondurma işlemine ek olarak homojenizasyon ve pastörizasyon gibi ilave ve enerji yoğun prosesler içermektedir. Benzer şekilde literatürde, yaban mersini için dondurma işleminin yalnızca soğutma uygulamalarına kıyasla çok daha yüksek elektrik tüketimine yol açtığı belirtilmiştir. Bu çalışmada incelenen tesiste ise meyve-sebze üretimi ağırlıklı olarak şoklama ve dondurma işlemleriyle sınırlı olup, püre üretimine özgü çok aşamalı ve yüksek ısı değişimli prosesler bulunmamaktadır.

Öte yandan, emisyon profilindeki farklılıkları belirleyen kritik unsurlardan biri de kullanılan soğutucu gaz türleridir. Bu çalışmada soğutma sistemlerinde R-449A ve R-32 gibi yüksek KIP'e sahip florlu gazlar kullanılmakta olup, bu durum Kategori 1 (kaçak emisyonlar) kapsamında toplam karbon ayak izinin %14,93'lük bir bölümünü oluşturmaktadır. Buna karşılık, literatürde karşılaştırma yapılan ıspanak ve yaban mersini çalışmalarında ana soğutucu olarak amonyak (NH_3) tercih edilmiş ve soğutucu gaz sızıntılarının toplam çevresel etki üzerindeki payının oldukça düşük olduğu belirtilmiştir. Chapa vd. (2019) çalışmasında, amonyak yerine yüksek KIP'li bir soğutucu kullanılması durumunda toplam KIP değerinin önemli ölçüde artacağı vurgulanmıştır. Bu durum, soğutucu gaz seçiminin tesis bazlı KAİ sonuçları üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, Çizelge 4.5'te yer alan literatür çalışmaları ile bu çalışmada elde edilen sonuçlar arasındaki benzerlikler, dondurulmuş gıda sektöründe elektrik tüketimi ve soğuk zincirin baskın rolünü doğrularken; farklılıklar ise analiz sınırları, ürün formu, üretim prosesleri ve özellikle soğutucu gaz türleri gibi teknik ve materyal bazlı unsurlardan kaynaklanmaktadır. Bu yönüyle elde edilen sonuçlar, literatür ile tutarlı olmakla birlikte tesis özelinde gerçekleştirilen operasyonel değerlendirmeyi yansıtan özgün bir emisyon profili ortaya koymaktadır.

4.2. Dondurulmuş Meyve ve Sebze Üretimi Karbon Ayak İzinin Optimizasyonu

Dondurulmuş meyve ve sebze üretim tesisinin KAİ'sinin büyük bir kısmı enerji tüketimi ve soğutma süreçlerinden kaynaklandığından, optimizasyon stratejileri bu alanlara odaklanmalıdır. Literatür bilgileri, bu süreçlerin optimize edilmesi için önemli bir nitel ve nicel azaltım potansiyeli olduğunu göstermektedir. Bu kapsamda KAİ azaltımına yönelik senaryolar belirlenmiştir.

Yapılan çalışmada, en yüksek emisyonlu süreç olarak 424,18 tCO_2e ile soğuk hava depoları, şok dondurma üniteleri ve genel üretim süreçlerinde kullanılan ithal elektriğin neden olduğu dolaylı emisyonlar ön plana çıkmaktadır. Bu potansiyel göz önüne alındığında Senaryo 1'de "Yenilenebilir Enerji ve Enerji Verimliliği" değerlendirilmiş olup, Tesisin toplam karbon ayak izinin %73,21'ini oluşturan elektrik tüketimi (Kategori 2), emisyon azaltımı için en yüksek potansiyele sahip alandır. Bu kapsamda, şebekeden satın alınan elektrik yerine "farklı" ve daha düşük emisyonlu çözümlerin kullanıldığı iki alt senaryo modellenmiştir.

4.2.1. Yenilenebilir Enerji ve Enerji Verimliliği Senaryosu

Senaryo 1a: Çatı Tipi Güneş Enerji Santrali (GES) Entegrasyonu

Tesisin toplam 3.971 m² çatı alanı, literatürde çatı tipi fotovoltaik sistemler için yaygın olarak kabul edilen 1 kWp kurulu güç başına 6 m² alan gereksinimi (Vimpari ve Junnila 2019) varsayımı dikkate alındığında, yaklaşık 661,83 kWp kurulu güç kapasitesine sahiptir. Türkiye'de birim kurulu güç başına yıllık fotovoltaik elektrik üretiminin 1200–1700 kWh/kWp aralığında olduğu (IEA 2024) ve Akdeniz iklim koşullarındaki benzer endüstriyel çatılarda gözlemlenen ortalama 1.55 kWh/kWp verim (Sánchez-Jiménez vd. 2025) değerleri göz önünde bulundurulduğunda, söz konusu sistem yaklaşık 1029 MWh/yıl brüt üretim potansiyeline sahiptir. Kaynaklardaki gerçek saha verileri, iyi tasarlanmış bir endüstriyel GES'in şebekeye olan bağımlılığı ortalama %37-%89 oranında giderdiğini göstermektedir (Sánchez-Jiménez vd. 2025). Bu çalışmada kurulacak GES'in şebekeye olan bağımlılığı %40 oranında giderdiği kabul edilmiştir.

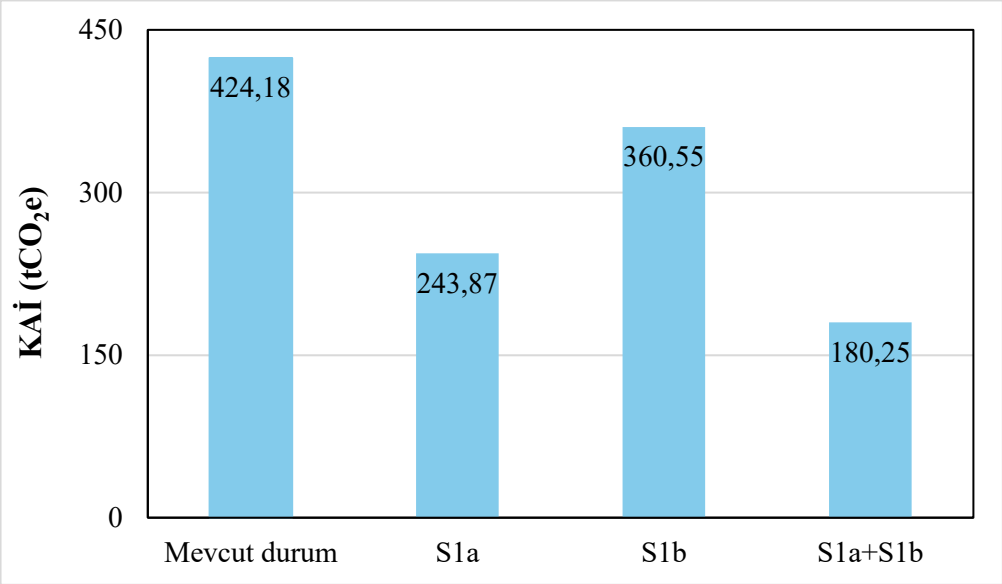
Bu kabuller doğrultusunda GES kurulumunun 180,31 MWh/yıl elektrik enerjisi sağlayacağı ve böylece toplam elektrik tüketiminin %42,09'ini karşılayabileceği hesaplanmıştır. Bu kapsamda değerlendirilen çatı tipi GES entegrasyonunun, tesisin toplam KAİ'yi tek başına yaklaşık %31,1 oranında azaltma potansiyeline sahip olduğu belirlenmiştir.

Senaryo 1b: Enerji Verimliliği

Sanayi tesislerinde yüksek verimli elektrik motorlarının kullanımı, otomasyon tabanlı enerji yönetim sistemlerinin entegrasyonu ve ısı kayıplarının azaltılmasına yönelik yalıtım iyileştirmeleri sayesinde toplam sera gazı emisyonlarında %10–30 aralığında bir azalma sağlanabileceği belirtilmektedir (IEA 2022). Tesisin mevcut ekipman altyapısının "ortalama teknoloji" seviyesinde olduğu varsayımıyla, çalışmada ihtiyatlı bir yaklaşımla %15'lik bir enerji verimliliği artışı senaryosu kabulü yapılmıştır. Bu kapsamda kurgulanan Senaryo 1b uyarınca; tesiste kullanılan mevcut motor ve

kompresörlerin IE4 sınıfı (süper yüksek verimli) modellerle değiştirilmesi ile yıllık 63,63 tCO_2e/yıl tasarruf sağlanabileceği hesaplanmıştır.

Şekil 4.5'ten görüleceği üzere, mevcut durum ile Senaryo 1 kapsamında enerji tedarik yönteminin fosil yakıt odaklı şebekeden yerinde üretim sağlayan yenilenebilir kaynaklara (Senaryo 1a) evrilmesi durumunda %42,5 ve tesisin mevcut enerji yoğunluklu cihazlarının yüksek verimli alternatifleriyle değiştirilmesi (Senaryo 1b) kapsamında %15 ve her iki senaryonun birlikte uygulanması durumunda ise yaklaşık %57,5 oranında bir azaltım sağlanabileceği hesaplanmıştır.



Şekil 4.5. Senaryo 1'in Kategori 2'ye etkisi

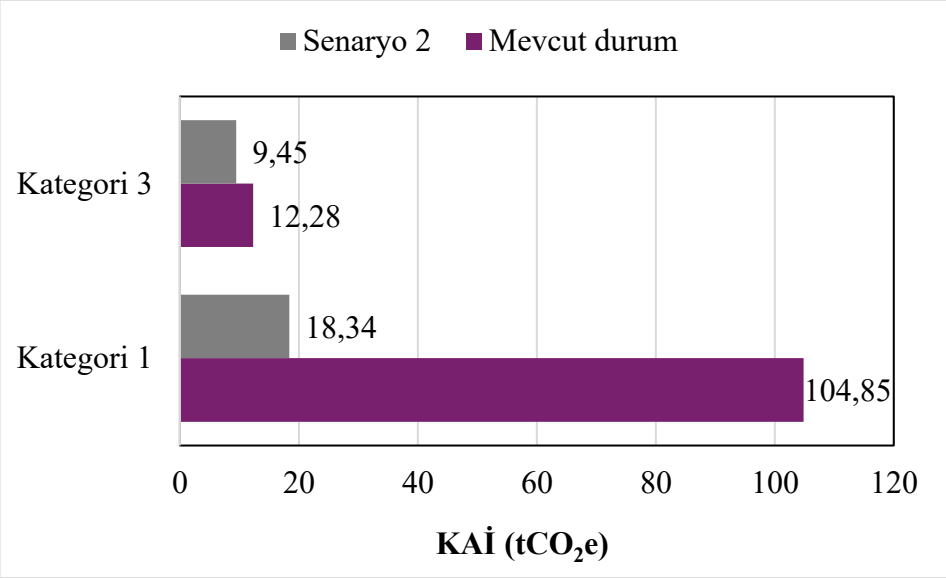
4.2.2. Soğutucu Gaz Dönüşümü Senaryosu

Tesiste yüksek küresel ısınma potansiyeline sahip florlu soğutucu gazların kullanımı; hem doğrudan operasyonlardan kaynaklanan emisyonlar (Kategori 1.3) hem de lojistik faaliyetler kapsamında yer alan frigorifik taşımacılık süreçleri (Kategori 3.2) açısından önemli bir çevresel yük oluşturmaktadır. Mevcut durumda tesiste şok dondurma ve soğuk hava depolarında R-449A (KIP: 1504,5 $kgCO_2e/kg$), iklimlendirme sistemlerinde R-32 (KIP: 771 $kgCO_2e/kg$) kullanılırken; frigorifik taşımacılık faaliyetlerinde ise KIP değeri oldukça yüksek olan R-404A (KIP: 4728 $kgCO_2e/kg$) tercih edilmektedir. Bu doğrultuda, yüksek KIP'li florlu gazların neden olduğu kaçak emisyonların azaltılmasına yönelik olarak "Soğutma Sistemlerinde Doğal Soğutucu Gaz Dönüşümü" Senaryo 2 olarak tanımlanmıştır.

Senaryo 2 kapsamında, tesiste ve lojistik süreçlerinde kullanılan söz konusu florlu soğutucu gazların tamamının, literatürde çevresel sürdürülebilirliği ile öne çıkan doğal bir soğutucu olan Amonyak (NH_3) ile ikame edilmesi değerlendirilmiştir. IPCC değerlendirmelerinde KIP değerleri yalnızca doğrudan sera gazları için tanımlanmakta olup, NH_3 IPCC tarafından doğrudan sera gazı olarak sınıflandırılmadığından KIP hesaplamalarına dahil edilmemekte ve bu nedenle doğrudan KIP etkisi sıfır (0) olarak kabul edilmektedir (IPCC 2021). Bu durum, amonyağın doğal soğutucular arasında yer

alması ve ozon tabakası inceltme potansiyelinin bulunmamasıyla uyumlu olup, Amerikan Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Derneği (ASHRAE) tarafından da NH_3'ün hem ozon tabakası inceltme potansiyelinin (ODP) hem de KIP değerinin sıfır olduğu belirtilmektedir (ASHRAE 2019).

Bu dönüşüm sonucunda; şok dondurma ve soğuk hava depoları, iklimlendirme sistemleri ve frigorifik taşımacılık faaliyetlerinden kaynaklanan toplam 89,35 tCO_2e/yıl düzeyindeki kaçak soğutucu gaz emisyonlarının tamamen ortadan kaldırılması öngörülmektedir. Senaryo 2'nin uygulanmasıyla birlikte, tesisin doğrudan operasyonları (Kategori 1.3) ve lojistik zinciri (Kategori 3.2) kapsamında yer alan tüm soğutma süreçlerinin doğal soğutucu bazlı hale getirilebilmesi ve ilgili emisyonlar envanterden tamamen elimine edilebilmesi mümkün gözükmektedir. Bu iyileştirme, tesisin toplam KAİ'nde %15,4 azalış sağlayabilecektir. Şekil 4.6'da görüldüğü üzere, Senaryo 2 kapsamında soğutma sistemlerinde doğal soğutucu gaz dönüşümü ile Kategori 1 emisyonları 104,85 tCO_2e/yıl'dan 18,34 tCO_2e/yıl'a düşerek yaklaşık %82,5 oranında azaltılabilmektedir. Aynı senaryoda frigorifik taşımacılıktan kaynaklanan emisyon azaltımı ile Kategori 3 emisyonlarında ise %23,09 gibi ölçülebilir bir azalış sağlanabileceği hesaplanmıştır.



Şekil 4.6. Senaryo 2'nin Kategori 1 ve Kategori 3 üzerindeki etkisi

4.2.3. Atık Yönetimi Senaryosu

Katı atıkların bertarafından kaynaklanan 37,85 tCO_2e/yıl emisyon değeri, tesisin KAİ envanterinde Kategori 4 kapsamında önemli bir paya sahiptir. Bu emisyonların büyük bölümü, organik gıda atıklarının depolama sahalarında anaerobik koşullar altında bozunması sonucu açığa çıkan metan (CH_4) emisyonlarından kaynaklanmaktadır. Metanın yüksek KIP'i dikkate alındığında, bu sürecin iyileştirilmesi önemli bir azaltım potansiyeli sunmaktadır.

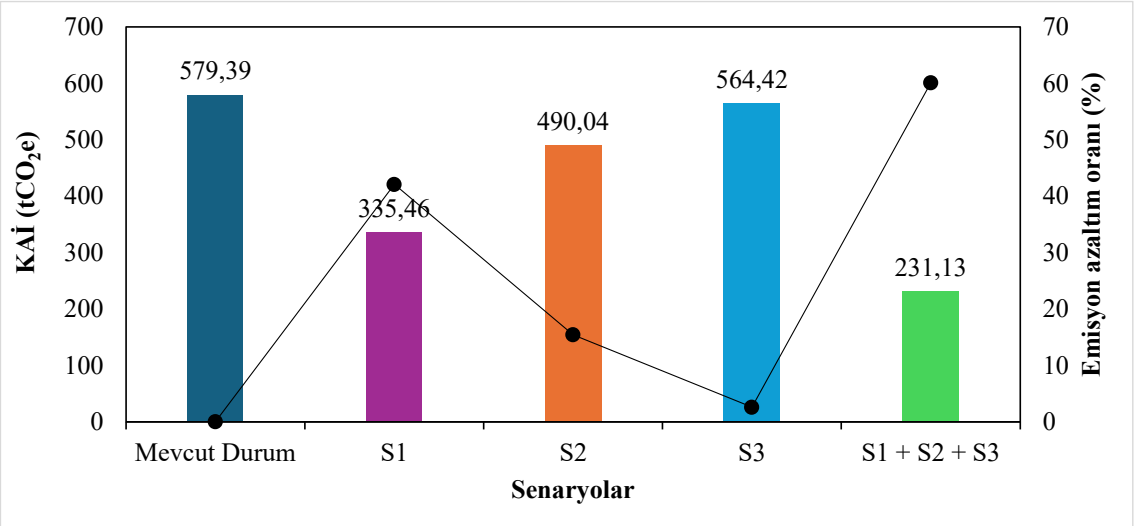
Bu kapsamda geliştirilen Senaryo 3 "Atık Yönetimi", IPCC (2019b) kapsamında tanımlanan aktif havalandırma (aerobik yönetim) yaklaşımının uygulanmasını

öngörmektedir. Atık yığınına kontrollü hava enjeksiyonu sağlanarak anaerobik koşulların oluşması engellenmekte, organik maddenin metan yerine biyojenik karbondioksit (CO_2) olarak ayrışması teşvik edilmektedir. Biyojenik CO_2 salınımları sera gazı envanterinde net emisyon olarak değerlendirilmediğinden, bu yöntem doğrudan metan kaynaklı emisyonların azaltılmasına olanak sağlamaktadır (IPCC 2019b).

Mevcut durumda depolama için kullanılan "Managed – anaerobic" koşuluna ait 1,0 katsayısı yerine, IPCC tarafından aktif havalandırmalı tesisler için önerilen "Managed well – active aeration" koşuluna karşılık gelen 0,4 emisyon katsayısının kullanılması durumunda (IPCC 2019b), katı atık bertarafından kaynaklanan emisyonların 37,42 tCO_2e/yıl'dan 22,45 tCO_2e/yıl seviyesine indirilebileceği hesaplanmıştır. Atıkların gönderildiği sahanın aerobik stabilizasyon veya aktif havalandırma yöntemlerine geçmesi durumunda Kategori 4.1 emisyonlarının hiçbir ek yatırım yapmadan azaltımı mümkün olacaktır. Bu iyileştirmenin, Kategori 4 kapsamındaki emisyonlarda yaklaşık %40 oranında bir azaltım sağlayacağı hesaplanmıştır.

4.2.4. Senaryo Karşılaştırması

Belirlenen "sıcak noktalara" yönelik kurgulanan Senaryo 1, 2 ve 3'ün tekil etkilerinin ardından, bu stratejilerin eş zamanlı (kombine) uygulanması durumunda tesisin çevresel performansındaki değişim analiz edilmiştir. Şekil 4.7'de görüldüğü üzere, envanterin en büyük paydaşı olan elektrik tüketimine (Kategori 2) yönelik Senaryo 1, tek başına tesis emisyonlarının yarısına yakın emisyon azaltımı (%42,09) kapasitesine sahiptir. Ancak eş zamanlı değerlendirme yapıldığında, Senaryo 2'nin (Soğutucu Gaz) katkısı, tesisin doğrudan emisyonlarını (Kategori 1) kontrol altına alarak bütüncül bir azaltım sağlayabilecek potansiyele sahiptir.



Şekil 4.7. Emisyon azaltım senaryolarının KAİ'ye etkisi

Eş zamanlı uygulama (Kombine Senaryo), literatürde Pedretti vd. (2023) tarafından vurgulanan "üretim zincirindeki tüm ana emisyon kaynaklarına aynı anda müdahale" stratejisiyle örtüşmektedir. Sadece enerji verimliliğine odaklanmak,

dondurulmuş gıda sektörünün karakteristik bir sorunu olan yüksek KIP'li gaz sızıntılarını (Kategori 1.3) çözemezken; eş zamanlı senaryo ile hem dolaylı hem doğrudan emisyonlar optimize edilebilmektedir.

Sonuç olarak, bu üç stratejinin birlikte uygulanmasının, tesisin birim üretim başına düşen emisyonunu 502 $kgCO_2e$/ton değerinden yaklaşık 200,29 $kgCO_2e$/ton seviyesine indirebileceği hesaplanmıştır. Bu radikal düşüş, Türkiye'nin "2053 Net Sıfır Emisyon" hedefleri ve Avrupa Yeşil Mutabakatı'nın getirdiği sınırda karbon düzenlemeleri için gıda sektörü bazında somut ve uygulanabilir bir yol haritası sunmaktadır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışma, Batı Akdeniz bölgesinde faaliyet gösteren orta ölçekli bir dondurulmuş meyve ve sebze üretim tesisinin kurumsal karbon ayak izini, ISO 14064-1 standardı çerçevesinde 2024 temel yılı için analiz etmektedir. Çalışmanın kapsamı; doğrudan emisyonları (Kategori 1), ithal edilen enerji kaynaklı emisyonları (Kategori 2) ve ulaşım, atık yönetimi ile ambalaj bertarafını içeren dolaylı emisyonları (Kategori 3-5) kapsamaktadır. Tesisin 1154 tonluk yıllık üretimi üzerinden gerçekleştirilen hesaplamalar, sektörün iklim değişikliği üzerindeki etkisini nicel olarak ortaya koymuş ve optimizasyon stratejilerinin geliştirilmesi için veri temeli oluşturmuştur.

Araştırmanın temel bulgularına göre tesisin toplam KAİ'si 579,39 tCO_2e/yıl olarak hesaplanmıştır. Birim üretim başına düşen emisyon miktarı ise 0,502 tCO_2e/ton olarak belirlenmiştir. Emisyonların kategorilere göre dağılımı incelendiğinde, Kategori 2 (ithal edilen elektrik) %73,21'lik pay (424,18 tCO_2e/yıl) ile en baskın kaynak olurken, bunu %18,10 ile Kategori 1 (doğrudan emisyonlar) takip etmektedir. Kategori 1 içerisinde özellikle soğutucu gaz kaçakları (R-449A ve R-32), 86,51 tCO_2e/yıl ile doğrudan yakıt tüketiminden çok daha yüksek bir çevresel yüke neden olmaktadır. Kategori 4 kapsamında ise tesisin 340 tonluk organik atığının bertarafı, 37,42 tCO_2e/yıl emisyon oluşumuna sebep olarak kritik bir atık yönetimi ihtiyacına işaret etmektedir.

Elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırıldığında, bu tez çalışmasına paralel olarak dondurulmuş gıda sektöründe tesisin birim ayak izi emisyonların yaklaşık %90'ının soğutma ve enerji kaynaklı olması, dondurulmuş gıda sektöründe soğuk zincirin emisyonların ana belirleyicisi olduğu yönündeki genel bilimsel eğilimle uyumludur. Bu çalışmanın uygulamaya ve bilime katkısı, Türkiye dondurulmuş gıda sektörü için ISO 14064-1 temelli doğrulanabilir bir KAİ envanteri modeli sunması ve Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında sınırda karbon düzenlemelerine hazırlık için yol gösterici bir çerçeve oluşturmasıdır. Yapılan optimizasyon değerlendirmeleri, Güneş Enerji Santrali (GES) yatırımları, düşük KIP'li doğal soğutucu gazlara geçiş ve organik atıkların kompostlama veya biyogaz yoluyla değerlendirilmesi gibi uygulamaların emisyonları önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Çalışmanın sınırlılıkları arasında, veri toplama sürecinde tarımsal üretim aşamasına ilişkin "beşikten-kapıya" emisyonların (gübre kullanımı, toprak işleme vb.), tesisin operasyonel sınırları dışında kalması nedeniyle hesaplamalara dahil edilmemesi yer almaktadır. Ayrıca ulaştırma verileri, yalnızca tesis kontrolünde bulunan veya faturalandırılmış lojistik faaliyetlerle sınırlı kalmıştır. Tez çalışması sonucunda elde edilen bulgular doğrultusunda, ürünlerin tam yaşam döngüsü emisyonlarını kapsayacak şekilde kapsamın genişletilmesi ve tarımsal hammadde üretim aşamasının envantere dahil edilmesi, dondurulmuş gıda sektöründe daha bütüncül sera gazı değerlendirmelerinin yapılmasına önemli katkı sağlayacaktır. Ayrıca, farklı dondurma teknolojilerinin karbon verimliliği açısından karşılaştırılması ile organik atıkların döngüsel ekonomi uygulamaları kapsamında değerlendirilmesine yönelik çalışmaların yaygınlaşmasının, sektörde emisyon azaltımına yönelik en uygun stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

6. KAYNAKLAR

AB 2019. *The European Green Deal*. European Commission, Brussels. https://ec.europa.eu/greendeal. [Son erişim Tarihi: 02.11.2025]

ASHRAE 2019. *ASHRAE, UN Environment Programme Announce Lower GWP Award Selections*. ASHRAE News. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

Bosona, T. 2024. *Life cycle assessment of dried organic apple value chains considering conventional and heat-pump-assisted drying processes: The case of Sweden. Agriculture,* 14(3): 461.

CARB 2020. *Technical documentation: Refrigerant GWP values and leakage rates*. California Air Resources Board California Environmental Protection Agency.

Chapa, J., Salazar, M.B., Kipp, S., Cai, H., Huang, J.-Y. 2019. A comparative life cycle assessment of fresh imported and frozen domestic organic blueberries consumed in Indiana. *Journal of Cleaner Production*, 217: 716–723.

Colman, R., & Soden, B. J. 2021. *Water vapor and lapse rate feedbacks in the climate system. Reviews of Modern Physics*, 93(4), 045002.

ÇŞİDB 2014a. *Sera Gazı Emisyonlarının Takibi Hakkında Yönetmelik*. 17/05/2014 tarih ve 29003 sayılı Resmî Gazete. https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=19678&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5. [Son erişim Tarihi: 17.01.2026]

ÇŞİDB 2014b. *Sera Gazı Emisyonlarının İzlenmesi ve Raporlanması Hakkında Tebliğ.* 22/07/2014 tarih ve 29068 sayılı Resmî Gazete. https://mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=19920&MevzuatTur=9&MevzuatTertip=5. [Son erişim Tarihi: 17.01.2026]

ÇŞİDB 2023. *Ulusal Sera Gazı Envanteri*. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı.

ÇŞİDB 2024a. *Doğal gaz kaynak akışı faaliyet verisi hesaplamaları (Versiyon r_01).* T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, İklim Değişikliği Bakanlığı.

ÇŞİDB 2024b. *Sıfır Atık ile geri kazanım oranı %35'e ulaştı.* T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. https://cygm.csb.gov.tr/sifir-atik-ile-geri-kazanim-orani-35e-ulasti.-haber-286897. [Son erişim Tarihi: 17.01.2026]

ÇŞİDB 2025. *Endüstriyel Emisyonların Yönetimi Yönetmeliği.* 14/01/2025 tarih ve 32782 sayılı Resmî Gazete. https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/icerikler/endustr-yel-em-syonlarin-yonet-m--yonetmel-g--14.01.2025-32782-20250115130137.pdf. [Son erişim Tarihi: 17.01.2026]

DEFRA 2023. *UK Government GHG Conversion Factors for Company Reporting*. Department for Energy Security and Net Zero.

DEFRA 2024. *UK government GHG conversion factors for company reporting: 2024 – condensed set (for most users) [Dataset]*. https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2024. [Son erişim Tarihi: 27.01.2026]

Düzgüneş, O., & Kesici, T. (1973). *İstatistik metodları*. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, 861.

EPA 2021. *Compilation of Air Pollutant Emission Factors (AP-42), Fifth Edition*. U.S. Environmental Protection Agency.

EPA 2020. *Understanding Global Warming Potentials*. United States Environmental Protection Agency.

EPA 2022. *Sources of greenhouse gas emissions – Methane*. United States Environmental Protection Agency.

EPA 2025. *Understanding Global Warming Potentials*. United States Environmental Protection Agency.

ETKB 2024. *Türkiye elektrik üretimi ve elektrik tüketim noktası emisyon faktörleri bilgi formu* T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı. (Doküman No: ETKB-EVÇED-FRM-042, Rev.01; Hesaplama dönemi: 2022, hesaplama yayım tarihi: 06.12.2024). Ankara.

FAO 2021. *The State of Food and Agriculture 2021: Making Agrifood Systems More Resilient to Shocks and Stresses*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. http://www.fao.org/publications [Son erişim Tarihi: 02.11.2025]

Flammini, A., Tubiello, F.N., Allouche, Y. 2024. Greenhouse Gas Emissions from Cold Chains in Agrifood Systems. *MDPI Sustainability*, 16(21): 9184.

GHG Protocol 2004. *The Greenhouse Gas Protocol: A corporate accounting and reporting standard (revised edition).* World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development.

GHG Protocol 2023. *Corporate Standard*. World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development.

GHG Protocol 2024. *IPCC global warming potential values (Version 2.0: Updated with AR6 values)*.

GHG Protocol 2025. *Tool for calculating aggregated uncertainty [Spreadsheet].* World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development. https://ghgprotocol.org/calculation-tools. [Son erişim Tarihi: 18.11.2025]

IEA 2022. *Energy Efficiency 2022: Analysis and Outlooks to 2030*. International Energy Agency.

IEA 2024. *Turkey Energy Policy Review Retrieved.* International Energy Agency.

IPCC 1988. *Principles governing IPCC work.* Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC 1997. *Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Reporting instructions.* Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC 2006a. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2: Energy.* IGES, Intergovernmental Panel on Climate Change, Japan.

IPCC 2006b. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5: Waste.* IGES, Intergovernmental Panel on Climate Change, Japan.

IPCC 2019. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html. [Son erişim Tarihi: 25.02.2026]

IPCC 2019a. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 3.* Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC 2019b. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5: Waste.* Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC 2023. *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.

ISO 2018. *ISO 14064-1:2018 — Greenhouse gases — Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals*. International Organization for Standardization, Geneva. https://www.iso.org/standard/66453.html. [Son erişim Tarihi: 14.01.2026]

ISO 2019a. *ISO 14064-2:2019 — Greenhouse gases — Part 2: Specification with guidance at the project level for quantification, monitoring and reporting of greenhouse gas emission reductions or removal enhancements*. International Organization for Standardization, Geneva.

ISO 2019b. *ISO 14064-3:2019 — Greenhouse gases — Part 3: Specification with guidance for the verification and validation of greenhouse gas statements*. International Organization for Standardization, Geneva.

ISO 2019c. *ISO 14067:2018 — Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification*. International Organization for Standardization, Geneva.

Kumar, R., Karmakar, S., Minz, A., Singh, J., Kumar, A., Kumar, A. 2021. Assessment of greenhouse gas emission in maize-wheat cropping system under varied N fertilizer application using cool farm tool. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 710108.

McKinnon, A.C., Browne, M., Piecyk, M., Whiteing, A. 2020. *Green Logistics: Improving the Environmental Sustainability of Logistics*. Kogan Page Publishers.

Michalsky, R. 2015. The impact of seasonality and imports on the carbon footprint of fresh fruit and vegetables in the UK. Doktora Tezi, Cranfield Üniversitesi, 163 s.

Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change (Türkiye). 2023. *Seventh National Communication and Third Biennial Update Report of Turkey to the UNFCCC*. Ankara.

Nomad Foods. 2023. *Life cycle assessment of 22 frozen food products — summary report*. Nomad Foods Europe Limited.

Pedretti, E.F., Duca, D., Ballarini, M., Boakye-Yiadom, K.A., Ilari, A. 2023. Environmental assessment of frozen spinach production: a cradle-to-factory gate life cycle assessment in central Italy. *Resources, Environment and Sustainability*, 12: 100110.

Rasines, L., Morera, S., San Miguel, G., Artés-Hernández, F., Aguayo, E. 2023. Environmental and economic sustainability of fresh-cut and pre-cooked vegetables. *Science of The Total Environment*, 872: 162169.

Ravishankara, A.R., Daniel, J.S., Portmann, R.W. 2009. Nitrous oxide (N_2O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. *Science*, 326(5949): 123–125.

REN21. 2023. *Renewables 2023 Global Status Report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.

RG 1983. Çevre Kanunu. 11.08.1983 tarih ve 18132 sayılı Resmî Gazete. https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=2872&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5. [Son erişim Tarihi: 17.01.2026].

RG 2025. İklim Kanunu. 09/07/2025 tarih ve 32951 sayılı Resmî Gazete. https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2025/07/20250709-1.htm. [Son erişim Tarihi: 17.01.2026]

Ribeiro, F., Kruglianskas, I. 2018. Comparing GHG Protocol and ISO 14064 standards for greenhouse gas accounting. *Journal of Cleaner Production*, 182: 709–719.

Rios-Fuentes, B., Rivas-García, P., Estrada-Baltazar, A., Rico-Martínez, R., Miranda-López, R., Botello-Álvarez, J.E. 2022. Life cycle assessment of frozen broccoli processing: Environmental mitigation scenarios. *Sustainable Production and Consumption*, 32: 27–34.

Sánchez-Jiménez, J. L., Jiménez-Castillo, G., Rus-Casas, C., Martínez-Calahorro, A. J., Muñoz-Rodriguez, F. J. 2025. *Performance evaluation of photovoltaic self-consumption systems on industrial rooftops under continental Mediterranean climate conditions with multi-string inverter topology.* Energy Reports, 14, 1020–1042.

TSE 2020. *TS EN ISO 14064-1:2019 — Sera gazları – Kuruluş düzeyinde sera gazı emisyonlarının ve uzaklaştırmalarının belirlenmesi ve raporlanması için şartlar*. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

TSE 2020. *TS EN ISO 14064-2 — Sera gazları — Bölüm 2: Sera gazı emisyon azaltımı veya uzaklaştırma artırımı projelerinin belirlenmesi ve raporlanması için şartlar ve rehber.* Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

TSE 2024, Temmuz 8. *Sera gazı emisyonlarının hesaplanması ve raporlanması: Antalya OSB eğitim sunumu.* Türk Standardları Enstitüsü.

TÜİK 2024. *Sera Gazı Emisyon Envanteri, 1990–2022*. Türkiye İstatistik Kurumu.

TÜİK 2025. *Sera Gazı Emisyon İstatistikleri, 1990–2023 (Düzeltilmiştir)*. Basın bülteni, Sayı: 53974. Türkiye İstatistik Kurumu. https://data.tuik.gov.tr. [Son erişim Tarihi: 02.11.2025]

Torosgaz 2024. Torosgaz AYBS Plus rapor portalı. https://portal.torosgaz.com.tr/AybsPlus.Portal/rms. [Son erişim Tarihi: 17.01.2026]

UN 1972. Declaration of the United Nations Conference on the Human Environment (Stockholm Declaration). United Nations.

UN 1992. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). United Nations, New York.

UN 1992. Agenda 21: Programme of action for sustainable development. United Nations.

UN 1997. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. United Nations, Kyoto.

UN 2015. Paris Agreement. United Nations, Paris. https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement

UN 2015. Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations.

UNEP 1985. *Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer.* United Nations Environment Programme.

UNEP 1987. Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. United Nations Environment Programme, Montreal.

UNEP 2016. *Kigali Amendment to the Montreal Protocol.* United Nations Environment Programme.

UNEP 2023. *Cooling Emissions and Policy Synthesis Report: A Contribution to the UNEP Cool Coalition*. United Nations Environment Programme.

UNFCCC 2007. *Bali Action Plan (Decision 1/CP.13),* United Nations Framework Convention on Climate Change.

UNFCCC 2009. *Copenhagen Accord (Decision 2/CP.15),* United Nations Framework Convention on Climate Change.

UNFCCC 2014. *UNFCCC reporting guidelines on annual inventories for Parties included in Annex I to the Convention*, United Nations Framework Convention on Climate Change.

UNFCCC 2021. *Glasgow Climate Pact,* United Nations Framework Convention on Climate Change.

UNFCCC 2023. *Outcome of the first global stocktake (UAE Consensus),* United Nations Framework Convention on Climate Change.

Vimpari, J., & Junnila, S. 2019. *Estimating the diffusion of rooftop PVs: A real estate economics perspective.* Energy, 172, 1087–1097.

Webster, J., MacLeod, M., Ziegler, F. 2021. Estimating energy consumption and GHG emissions in the U.S. food supply chain: Informing the net-zero transformation. *International Journal of Sustainable Energy*, 40(5): 445–460.

Weidema, B.P., Hischier, R. 2019. Harmonization of carbon footprint standards. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(5): 974–986.

WMO 1979. Report of the World Climate Conference: A conference of experts on climate and mankind. World Meteorological Organization, Geneva.

World Bank. 2021. *Decarbonizing Transport: Pathways and Policies*. World Bank Group, Washington, D.C.

Wrobel-Jedrzejewska, M., Przybysz, Ł., Stęplewska, U., Kuleta, P., Polak, E. (2016). Carbon footprint of fruit paste technology. Polish Journal of Environmental Studies, 25(1), 341-349.

ÖZGEÇMİŞ

Esma Gizem YILMAZ

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2022 – 2026	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İklim Değişikliği ve Politikaları Ana Bilim Dalı, Antalya
Lisans 2017 – 2022	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Antalya
Ön Lisans 2018 – 2021	Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi, Tarım Bölümü, Eskişehir