



**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ KURUPELİT KAMPÜSÜ
KARBON AYAK İZİ HESAPLAMALARINDA ÖLÇÜM
BELİRSİZLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Mevlüt ALICI

Danışman
Doç. Dr. Andaç AKDEMİR

SAMSUN
2025

T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ KURUPELİT KAMPÜSÜ
KARBON AYAK İZİ HESAPLAMALARINDA ÖLÇÜM
BELİRSİZLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Yüksek Lisans Tezi

Mevlüt ALICI

Danışman

Doç. Dr. Andaç AKDEMİR

Bu çalışma Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından BAP04-A-2024-5054 proje numarası ile desteklenmiştir.

SAMSUN
2025

TEZ KABUL VE ONAYI

Mevlüt ALICI tarafından, Doç. Dr. Andaç AKDEMİR danışmanlığında hazırlanan “ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ KURUPELİT KAMPÜSÜ KARBON AYAK İZİ HESAPLAMALARINDA ÖLÇÜM BELİRSİZLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 17.7.2025 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Unvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	Sonuç
Üye Prof. Dr. Nurdan Gamze TURAN Ondokuz Mayıs Üniversitesi Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye (Danışman) Doç. Dr. Andaç AKDEMİR Ondokuz Mayıs Üniversitesi Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye Prof. Dr. Hüseyin Kurtuluş ÖZCAN İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

Prof. Dr. Faik Ahmet SESLİ
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Yüksek Lisans tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi ?

Evet ☐ (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır ☒

11/08/2025
Mevlüt ALICI

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı : ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ KURUPELİT KAMPÜSÜ
KARBON AYAK İZİ HESAPLAMALARINDA ÖLÇÜM BELİRSİZLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 11/08/2025 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 16

Tek kaynak oranı : % 1 çıkmıştır.

11/08/2025
Doç. Dr. Andaç AKDEMİR

ÖZET

ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ KURUPELİT KAMPÜSÜ KARBON AYAK İZİ HESAPLAMALARINDA ÖLÇÜM BELİRSİZLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mevlüt ALICI

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans, Temmuz/2025

Danışman: Doç. Dr. Andaç AKDEMİR

Karbon ayak izi hesaplamalarında kilit unsur emisyon faktörleridir ve bu faktörlerin belirlenmesindeki zorluk, ölçüm belirsizliğine karar vermeyi zorlaştırmaktadır. Ölçüm belirsizliğini ihmal eden karbon ayak izi hesaplamaları, tahmin edilen karbon ayak izi değerlerine güvenmeyi zorlaştırır. Eksik bir hesaplamadan elde edilen değerler, iklim eylemine ilişkin yanlış kararlara yol açabilir. Belirsizlik hesaplamaları, veri kalitesinin zayıf olduğu alanların belirlenmesine yardımcı ve veri toplama yönetiminde iyileştirmeler yapılmasına da olanak sağlar. Ölçüm belirsizliğinin daha güvenilir bir karbon ayak izi değeri hesaplamak için gerekli olduğu düşüncesiyle, model kuruluş olarak farklı kategorilerde hizmet üreten bir üniversite kampüsünde çalışma yürütülmüştür. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Samsun, Türkiye'de yer almaktadır. Üniversitede fakülteler, hastaneler, yurtlar, yerleşim alanları, spor kompleksleri ve idari binalar bulunmaktadır. Üniversite, 2357 akademisyen, 4192 idari personel, 51696 öğrenci ve 106 ülkeden 4959 uluslararası öğrenci ile 8800 dönümlük bir alanda faaliyet göstermektedir. Üniversitenin Kurupelit kampüsü, 2024 UI GreenMetric sıralamasında yeşil kampüs olarak 281. sırada yer aldı.

Bu çalışmada, ISO 14064-1:2018, IPCC, DEFRA ve GHG protokollerine dayalı olarak karbon ayak izlerini ve belirsizlik bütçelerini hesaplamıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda kampüsün toplam karbon ayak izi 85.323,86 tCO₂ e olarak belirlenmiştir. Emisyonların kapsam bazında dağılımı incelendiğinde, Kapsam 1'in toplam emisyonların % 14,1'ini, Kapsam 2'nin %15,76'sını ve Kapsam 3'ün %70,14'ünü oluşturduğu görülmüştür. Kategori bazında ise Kategori 1'in %14,1'ini, Kategori 2'nin %15,76'sını, Kategori 3'ün % 64,69'unu, Kategori 4'ün % 4,39'unu ve Kategori 6'nın %1,05'ini oluşturduğu görülmüştür. Belirsizlik hesaplamaları, hem toplam düzeyde hem de kapsam ve kategori düzeyinde yapılmıştır. Toplam ölçüm belirsizliği $k = 2$ %95 güven aralığı ile birlikte $\pm 14.590,14$ tCO₂ e olarak belirlenmiş olup bu değer toplam emisyonun %17,1'lik kısmına karşılık gelmektedir. Kapsam bazında belirsizliklerin durumu incelendiğinde Kapsam 1'in %3,55'e, Kapsam 2'nin %15,3'e ve Kapsam 3'ün %14,1'lik bir paya sahip olduğu görülmektedir. Kategori düzeyinde ise kategori 1'in %3,55'e, Kategori 2'nin %15,3'e, Kategori 3'ün %12,47'ye, Kategori 4'ün %31,14'e ve kategori 6 %42,77'ye karşılık geldiği görülmektedir. Bu sonuçlar, kampüs genelinde emisyonların hem miktar olarak hem de ölçüm güvenilirliği açısından detaylı bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamıştır.

Anahtar Sözcükler: Ölçüm belirsizliği, Karbon ayak izi, Eşdeğer karbon, Sera gazı, İklim değişimi, Küresel ısınma

ABSTRACT

ONDOKUZ MAYIS UNIVERSITY KURUPELİT CAMPUS INVESTIGATION OF MEASUREMENT UNCERTAINTIES IN CARBON FOOTPRINT CALCULATIONS

Mevlüt ALICI

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Environmental Engineering

Master, July/2025

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Andaç AKDEMİR

Emissions factors are a key element in carbon footprint calculations, and the difficulty in determining these factors makes it challenging to decide on measurement uncertainty. Carbon footprint calculations that ignore measurement uncertainty make it difficult to trust the estimated carbon footprint values. Values obtained from an incomplete calculation can lead to incorrect decisions regarding climate action. Uncertainty calculations help identify areas where data quality is poor and enable improvements in data collection management. With the idea that measurement uncertainty is necessary to calculate a more reliable carbon footprint value, a study was conducted at a university campus that provides services in different categories as a model institution. Ondokuz Mayıs University is located in Samsun, Turkey. The university has faculties, hospitals, dormitories, residential areas, sports complexes, and administrative buildings. The university operates on an 8,800-acre campus with 2,357 academics, 4,192 administrative staff, 51,696 students, and 4,959 international students from 106 countries. The university's Kurupelit campus ranked 281st in the 2024 UI GreenMetric ranking as a green campus.

In this study, carbon footprints and uncertainty budgets were calculated based on ISO 14064-1:2018, IPCC, DEFRA, and GHG protocols. As a result of the calculations, the total carbon footprint of the campus was determined to be 85,323.86 tCO₂ e. When examining the distribution of emissions by scope, it was observed that Scope 1 accounted for 14.1% of total emissions, Scope 2 for 15.76%, and Scope 3 for 70.14%. In terms of categories, Category 1 accounts for 14.1%, Category 2 accounts for 15.76%, Category 3 accounts for 64.69%, Category 4 accounts for 4.39%, and Category 6 accounts for 1.05%. Uncertainty calculations were performed at both the total level and the scope and category levels. The total measurement uncertainty was determined as $\pm 14,590.14$ tCO₂ e with a 95% confidence interval ($k = 2$), corresponding to 17.1% of total emissions. When examining the status of uncertainties at the scope level, Scope 1 accounts for 3.55%, Scope 2 for 15.3%, and Scope 3 for 14.1%. At the category level, Category 1 accounts for 3.55%, Category 2 for 15.3%, Category 3 for 12.47%, Category 4 for 31.14%, and Category 6 for 42.77%. These results have enabled a detailed assessment of emissions across the campus, both in terms of quantity and measurement reliability.

Keywords: Uncertainty measurement, Carbon footprint, Equivalent carbon, Greenhouse gas, Climate change, Global warming

ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

Çalışmam boyunca bilgi ve desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Andaç Akdemir'e ve her zaman yanımda olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışma Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından BAP04-A-2024-5054 proje numarası ile desteklenmiştir.

Mevlüt ALICI

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	ii
TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	2
2.1. İklim Değişikliği ve Küresel Isınma	2
2.2. Sera Gazları ve KIP Değerleri	4
2.2.1. Doğrudan Sera Gazları.....	5
2.2.2. Dolaylı (Öncü) Sera Gazları	10
2.3. İklim Değişikliği Politikaları	13
2.3.1. Avrupa Birliği Emisyon Ticareti Sistemi.....	13
2.3.2. Sınırdaki Karbon Düzenlemesi (SKDM)	13
2.3.3. Yeşil Mutabakat ve Karbon Nötr	14
2.4. Karbon Ayak İzi.....	15
2.5. Karbon Ayak İzi Hesaplama Yöntemleri ve Standartları	16
2.5.1. Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC)	16
2.5.2. Sera Gazı Protokolü (GHG).....	18
2.5.3. Uluslararası Organizasyon Standardı (ISO).....	19
2.5.4. İngiltere Çevre, Gıda ve Köy İşleri Bakanlığı (DEFRA).....	20
2.6. Sera Gazları Emisyon Kapsam ve Kategorileri	20
2.6.1. Kapsam 1 (Doğrudan Emisyonlar)	21
2.6.2. Kapsam 2 (Dolaylı Emisyonlar)	21
2.6.3. Kapsam 3 (Diğer Dolaylı Emisyonlar)	21
2.7. Ölçüm Belirsizliği	25
2.8. Ölçüm Belirsizliklerinde İstatistiksel Analiz Yöntemleri	25
2.8.1. Bayes Yöntemi	25
2.8.2. Bootstrap Yöntemi	26
2.8.3. Blok Bootstrap	26
2.8.4. Bulanık Mantık Yöntemi	27
2.8.5. Naive Yaklaşım.....	27
2.8.6. Latin Hypercube Sampling (LHS)	27
2.8.7. Monte Carlo Simülasyonu	28
2.8.8. MCS W/ CTV Analizi	28
2.8.9. Yayılma Tabanlı Yöntem.....	28
2.8.10. Goodman Tahmin Edici	29
2.8.11. Rosenblueth Nokta Tahmin Yöntemi (RPEM).....	29
2.8.12. Hong Nokta Tahmin Yöntemi (HPEM).....	29
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	32
3.1. Organizasyonel Sınırların Belirlenmesi	32
3.2. Raporlama Sınırlarının ve Baz Yılına Belirlenmesi	33
3.3. Sera Gazı Kaynaklarının Belirlenmesi.....	33
3.4. Hesaplama Metodolojisinin Belirlenmesi.....	37
3.5. Veri Seçme ve Toplama.....	37
3.6. Sera Gazı Uzaklaştırmaları ve Yutakları.....	37

3.7. Karbon Ayak İzi Hesaplamalarında Kullanılacak Formüller.....	38
3.7.1. Kategori 1 Hesaplamaları.....	38
3.7.2. Kategori 2 Hesaplamaları.....	39
3.7.3. Kategori 3 Hesaplamaları.....	39
3.7.4. Kategori 4 Hesaplamaları.....	40
3.7.5. Kategori 5 Hesaplamaları.....	40
3.7.6. Kategori 6 Hesaplamaları.....	40
3.8. Ölçüm Belirsizliği Hesaplama Formülleri	42
3.8.1. Aktivite Belirsizliğinin Hesaplamaları.....	42
3.8.2. Emisyon Faktörü Belirsizliğinin Hesaplamaları	43
3.8.3. Bileşik Belirsizliğin Hesaplamaları	43
3.8.4. Mutlak Belirsizliğin Hesaplamaları	44
3.8.5. Varyans Katkısının Hesaplamaları.....	44
3.8.6. Alt Güven Sınırının Hesaplamaları	45
3.8.7. Üst Güven Sınırının Hesaplamaları	45
4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	46
4.1. Kurupelit Kampüsü Karbon Ayak İzi Hesaplamaları	46
4.2. Kurupelit Kampüsü Ölçüm Belirsizliği Hesaplamaları	60
5. SONUÇ	67
KAYNAKLAR	70
ÖZ GEÇMİŞ.....	75

SİMGELER VE KISALTMALAR

IPCC	: Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli
NASA	: Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
EPA	: Çevre Koruma Ajansı
EEA	: Avrupa Çevre Ajansı
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
UNFCCC	: Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
WBCSD	: Dünya Sürdürülebilir Kalkınma İş Konseyi
EU ETS	: Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi
EUA	: Avrupa Birliği Emisyon İzni
SKDM	: Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması
AYM	: Avrupa Yeşil Mutabakatı
CCS	: Karbon yakalama ve depolama
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Kurumu
DEFRA	: İngiltere, Çevre, Gıda ve Kırsal İşler Bakanlığı
GHG	: Sera Gazları
WRI	: Dünya Kaynakları Enstitüsü
KIP	: Küresel Isınma Potansiyeli
eCO ₂	: Karbondioksit Eşdeğer
GWP	: Küresel Isınma Potansiyeli
EEX	: Avrupa Enerji Borsası
WMO	: Dünya Meteoroloji Örgütü
UNEP	: Birleşmiş Milletler Çevre Programı
MCS	: Monte Carlo Simülasyonu
CTV	: Varyans Katkısı Analizi
RPEM	: Rosenblueth Nokta Tahmin Yöntemi
HPEM	: Hong Nokta Tahmin Yöntemi
LHS	: Latin Hypercube Sampling

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. 2023 Yılı Kişi Başına Düşen Sera Gazı Miktarı.....	12
Şekil 2.2. Emisyon Kaynaklarının Dağılımı	23
Şekil 2.3. Emisyon Kaynaklarının İçerikleri	24
Şekil 3.1. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kurupelit Kampüsü Uydu Görüntüsü	32
Şekil 4.1. Toplam Emisyon Değerlerinin Kategori Bazında Sınıflandırılması	57
Şekil 4.2. Toplam Emisyon Değerlerinin Kapsam Bazında Sınıflandırılması.....	58
Şekil 4.3. Kurupelit Kampüsünün Emisyon Kaynaklarına Göre Sınıflandırılması	59
Şekil 4.4. Toplam Emisyon Belirsizlik Değerinin Genel Oranı.....	65
Şekil 4.5. Toplam Emisyon Belirsizlik Değerlerinin Kapsam Bazında Oranları	65
Şekil 4.6. Emisyon Kaynaklarının Kategori Bazında Belirsizlik Oranları	66
Şekil 4.7. Emisyon Kaynaklarının Genel Belirsizlik Oranları	66

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. IPCC Raporlarına Göre Sera Gazlarının Küresel Isınma Potansiyel Değerleri.....	5
Tablo 2.2. ISO 14064-1 Standardına Göre Karbon Ayak İzi Hesaplama Kategoriler.....	22
Tablo 2.3. Literatürde Kullanılan Alternatif Belirsizlik Analizi Yöntemler.....	30
Tablo 2.4. Farklı Üniversite Kampüsleri İçin Karbon Ayak İzi Değerlendirme Özeti.....	31
Tablo 3.1. OMÜ Kurupelit Kampüsü Karbon Ayak İzi Raporlaması Sınırı.....	35
Tablo 3.2. OMÜ Kurupelit Kampüsü Raporlama Sınırındaki Biyolojik Kökenli Emisyonlar	38
Tablo 4.1. Kategori 1 ve Kapsam 1 Sınıfına Giren Doğrudan Emisyon Kaynak Verileri.....	47
Tablo 4.2. Kategori 1 ve Kapsam 1 Sınıfına Giren Doğrudan Emisyon Kaynak Verileri.....	47
Tablo 4.3. Kategori 2 ve Kapsam 2 Sınıfına Giren Dolaylı Emisyon Kaynak Verileri.....	49
Tablo 4.4. Kategori 3 ve Kapsam 3 Sınıfına Giren Diğer Dolaylı Emisyon Kaynak Verileri	49
Tablo 4.5. Kategori 3 ve Kapsam 3 Sınıfına Giren Diğer Dolaylı Emisyon Kaynak Verileri	51
Tablo 4.6. Kategori 3 ve Kapsam 3 Sınıfına Giren Diğer Dolaylı Emisyon Kaynak Verileri	52
Tablo 4.7. Kategori 3 ve Kapsam 3 Sınıfına Giren Diğer Dolaylı Emisyon Kaynak Verileri	52
Tablo 4.8. Kategori 3 ve Kapsam 3 Sınıfına Giren Diğer Dolaylı Emisyon Kaynak Verileri	53
Tablo 4.9. Kategori 3 ve Kapsam 3 Sınıfına Giren Diğer Dolaylı Emisyon Kaynak Verileri	54
Tablo 4.10. Kategori 4 ve Kapsam 3 Sınıfına Giren Diğer Dolaylı Emisyon Kaynak Verileri	56
Tablo 4.11. Kategori 6 ve Kapsam 3 Sınıfına Giren Diğer Dolaylı Emisyon Kaynak Verileri	56
Tablo 4.12. Sera Gazlarının Kategori ve Kapsam Bazında Miktar Özetlemesi.....	57
Tablo 4.13. Emisyon Kaynaklarının Belirsizlik Değerleri.....	61
Tablo 4.14. Emisyon Kaynaklarının Belirsizlik Hesaplamaları.....	62
Tablo 4.15. Sera Gazlarının Toplam Belirsizlik Miktarı	63
Tablo 4.16. Sera Gazlarının Güven Katsayısı ve Oranları.....	64
Tablo 4.17. Sera Gazlarının Toplam Güven Katsayısı İle Birlikte Belirsizlik Miktarı	64

1. GİRİŞ

Üniversitelerin küresel ısınma ve iklim değışikliklerindeki rolleri her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle Üniversiteler başta karbon ayak izi olmak üzere bağlantılı birçok konuda çalışmalarını hızlandırmaktadır. Üniversite kampüsleri bacasız sanayi olarak binaları, hastaneleri, laboratuvarları, yaşam alanları ve konaklama alanları ile enerji tüketiminde ve atık üretiminde çok yönlü olarak dolaylı ve dolaysız sera gazları emisyonları için önemli kaynaklardır. Bunun yanı sıra karbon nötr kapsamında kampüs içerisinde bulundurdıkları yeşil alanlarla birlikte önemli bir yutak alanlarını da içinde barındırırlar. Sera gazlarının tespiti, sürdürülebilir kampüs eğitimi açısından önemli bir adımdır. Üniversite kampüsleri içerisinde yetki sorumlulukları çok farklı portföyde birimler oluşturan ve karbon ayak izi hesaplamalarında belirsizlikleri yüksek alanlardan biridir. Araştırma kapsamında, eğitim-öğretim kampüs yaşamı, konaklama ve sağlık hizmetleri alanlarında ölçüm belirsizlikleri çok fazladır ve bu durum veri toplanmasını zorlaştırmaktadır. Belirsizlikleri azaltmak için, bütüncül hesaplama yerine kampüs içerisinde operasyonel sınırların belirlenmesi son derece önemlidir. Ayrıca karbon ayak izi hesabında kullanılan emisyon faktörlerinin seçilmesi ve hesaplama metodoloji seçimleri de nihai karbon ayak izi tahminini etkiler.

Bu çalışmada Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kurupelit kampüsü içerisinde etki alanları çok farklı yerlerde olabilen ve bunların içerisinde çok farklı bileşenlerden kaynaklı sera gazı salınımları incelenerek emisyon envanteri oluşturulmuş, oluşturulan emisyon envanteri ve raporlama sınırı ile birlikte karbon ayak izi hesaplaması yapılmıştır. Elde edilen verilerle birlikte belirsizlik bileşenlerine dayalı belirsizlik bütçesi hazırlanmıştır. Bu sonuçlar, kampüs genelindeki sera gazı emisyonlarının hem nicelik hem de ölçüm doğruluğu açısından ayrıntılı bir şekilde analiz edilmesini sağladı ve özellikle yüksek belirsizlik içeren kategorilerde veri kalitesinin iyileştirilmesi ihtiyacını gösterdi.

Bununla birlikte belirsizlik hesaplamaları üniversitelerin veri toplama ve tahmin yöntemlerini geliştirebilecekleri alanları belirlemelerine, karbon ayak izi sonuçlarını uygun bir dikkatle yorumlamalarına ve iklim eylem stratejileri hakkında daha bilinçli kararlar almalarına olanak tanır. Belirsizlikleri şeffaf bir şekilde raporlamak, çevresel taahhütlerinin güvenilirliğini artırır ve zamanla ve benzer kurumlarla daha sağlam karşılaştırmalar yapılmasını kolaylaştırır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. İklim Değişikliği ve Küresel Isınma

İklim, belirli bir bölgede uzun yıllar süresince gözlemlenen sıcaklık, yağış ve rüzgar gibi atmosferik değişkenlerin istatistiksel ortalaması şeklinde tanımlanmakta ve bu iklim durumu, ekosistem direncinden tarımsal üretime, enerji arzından halk sağlığına kadar çok çeşitli alanlarda etkili bir rol oynar (WMO, 2023).

İklim değişikliği, Dünya'nın iklim sistemindeki uzun süreli değişiklikleri ifade eder. Bu değişiklikler küresel sıcaklık artışları, yükselen deniz seviyeleri, eriyen buzullar ve sık sık yaşanan aşırı hava olayları gibi çeşitli etkileri içermektedir. İnsan faaliyetlerinin, özellikle de fosil yakıtların kullanımı ve ormansızlaşmanın, sera gazı emisyonlarını artırarak iklim değişikliğine önemli ölçüde katkıda bulunduğu bilimsel olarak kanıtlanmıştır (NASA, 2024).

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'ne (IPCC) göre iklim değişikliği, iklim sisteminin temel özelliklerinde uzun bir zaman dilimi boyunca, istatistiksel çalışmalarla tespit edilebilen değişiklikler olarak tanımlanmaktadır. Bu değişikliklere doğal iç süreçler veya güneş radyasyonundaki değişiklikler, volkanik patlamalar ve atmosferik bileşim veya arazi kullanımındaki kalıcı antropojenik değişiklikler gibi dış güçler neden olmaktadır (IPCC, 2014a).

Dünyanın ortalama yüzey sıcaklığındaki artışla kendini gösteren bir çevre sorunu olan iklim değişikliği, bu sürecin en bilinen ve belirgin sonucudur ve insan faaliyetleri nedeniyle atmosferde karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve diğer sera gazlarının sürekli birikmesiyle artma eğiliminde olduğu görülebilmektedir. (EPA, 2021).

Uydu gözlemleri ve yüzey sıcaklığı kayıtları, Dünya'nın 19. yüzyıldan bu yana yaklaşık 1,2 °C ısındığını göstermektedir. Sıcaklık artışının ana nedeni kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtların yakılması sonucu atmosfere salınan sera gazlarıdır (NASA, 2024).

Küresel sıcaklık artışlarının 1,5 °C'yi aşması halinde, şiddetli ve ekonomik açıdan ciddi sonuçların ortaya çıkabileceği savunulmaktadır. 21. yüzyıl boyunca emisyonlar azaltılamazsa, deniz seviyelerinin birkaç metre yükselmesi, kuraklık ve aşırı hava olaylarının daha sık yaşanması beklenmektedir. IPCC bu nedenle karbon

yakalama ve depolama gibi teknoloji projelerinin önemini vurgulamaktadır. Sanayi tesislerinde ve enerji santrallerinde karbondioksit yakalama ile birlikte uzun bir süre boyunca gerçekleştirilebilecek bir süreç olan karbon yakalama ve depolama, atmosferdeki CO₂ oluşumunu kontrol etmede önemli bir rol oynayabilir (IPCC, 2021).

Avrupa Birliği'nin Copernicus İklim Değişikliği Hizmeti, iklim değişikliğini izlemek için uydu ve yer tabanlı gözlemleri kullanarak küresel sıcaklık, deniz seviyesi ve sera gazlarının atmosferik konsantrasyonları hakkında güncel veriler sağlar. Bu veriler bilim insanları ve karar alıcılar tarafından iklim değişikliğinin mevcut etkilerini anlamak ve geleceğe yönelik politika önerileri geliştirmek için kullanılmaktadır. İklim değişikliğine uyum sağlamak ve 1,5 °C'ye kadar küresel sıcaklık artışlarını sınırlamak ve kontrol etmek için gereken önlemlerin alınması önemli bir adımı oluşturacaktır (Copernicus, 2025).

Küresel ısınma sadece sıcaklık artışlarıyla sınırlı değildir; deniz seviyesinin yükselmesi, okyanus asidifikasyonu ve aşırı hava olaylarında artış gibi önemli etkileri de vardır. Örneğin, sıcaklıklar arttıkça kutup bölgelerindeki buzulların erimesi hızlanmakta ve deniz seviyesinin yükselmesine yol açmaktadır. Deniz seviyesinin yükselmesi kıyı habitatlarını tehdit etmekte, kıyı erozyonunu ve selleri artırmaktadır. İklim değişikliğinin bir diğer önemli sonucu da biyolojik çeşitliliğin azalmasıdır. İklim değişikliğinin ekosistemler üzerindeki baskıları göz önünde bulundurulduğunda, artan sıcaklıklarla birlikte değişen iklim koşullarının birçok canlı türünün yaşam alanını tehdit ettiği görülmektedir. Şu anda meydana gelen değişiklikler bazı türlerin yok olmasına yol açabilir ve ekosistemlerin dengesini bozabilir. Bu durum, gıda güvenliğinin yanı sıra ekosistem hizmetlerinin sürdürülebilirliğini de tehdit etmektedir. Aşırı sıcaklık artışı, hava kirliliği ve hastalık bulaştırma oranı yüksek bölgelerdeki değişiklikler gibi faktörler de halk sağlığını doğrudan tehdit etmektedir. Örneğin, hava kirliliği koşulları, sıcaklıklar arttıkça kalp ve solunum yolu hastalıklarında da artışa neden olabilir. Küresel ısınmanın kontrol altına alınması ve sınırlandırılması için sera gazı emisyonlarının azaltılması, yenilenebilir enerji kullanımının artırılmasına yönelik araştırmaların teşvik edilmesi ve karbon yakalama teknolojilerinin geliştirilmesi ve kullanılması gibi politikaların iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynayacağı savunulmaktadır. (EPA, 2021).

2.2. Sera Gazları ve KIP Değerleri

İklim değişikliği, Dünya'nın atmosferinde ve okyanuslarında meydana gelen uzun vadeli değişiklikler olarak tanımlanabilir ve bu değişikliklerin önemli bir unsuru atmosferdeki sera gazı konsantrasyonlarının artmasına bağlanabilir. Sera gazları güneş ışığının Dünya yüzeyine ulaşmasını sağlar ve yüzeyden yansıyan ısıyı atmosferde hapsederek küresel sıcaklıkların yükselmesine neden olur. Bu sera gazlarının en yaygın olanları karbondioksit (CO_2), metan (CH_4), nitroz oksit (N_2O), florlu gazlar, dolaylı olarak ozon ve siyah karbondur. Sanayi Devrimi ve sonrasında fosil yakıtların kullanımı ve ormansızlaşma gibi insan faaliyetleri sonucunda, bu gazların atmosferdeki konsantrasyonları hızla artarak küresel ısınmayı hızlandırmıştır. 2021'de yayınlanan IPCC 6. Değerlendirme Raporu (AR6), 1850-1900 yılları arasındaki küresel ortalama sıcaklığın, 2011-2020 yılları arasındaki ortalama sıcaklığa kıyasla yaklaşık 1,1 °C arttığını bildirmektedir. Sıcaklıktaki bu artışın temel nedeninin insan faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonları olduğu savunulmaktadır. Karbondioksit atmosferdeki en yaygın sera gazıdır ve fosil yakıtlar yakıldığında atmosfere salınır. Atmosferdeki CO_2 seviyesinin arttığı her yıl, mevcut küresel sıcaklığın daha hızlı bir oranda arttığı gözlemlenmiştir. Metan (CH_4) bir diğer önemli sera gazıdır ve özellikle hayvancılık ve pirinç üretimi gibi faaliyetlerle tarım sektöründe atmosferdeki miktarı artmaktadır. Metan, karbondioksit göre yaklaşık 25 kat daha fazla ısı tutma potansiyeline sahip olduğundan, kısa vadede küresel ısınmaya çok daha fazla katkıda bulunmaktadır. Ayrıca tarım ve sanayi sektörleri tarafından atmosfere salınan nitroz oksit (N_2O) de sera etkisini artıran sera gazları arasında yer almaktadır (IPCC, 2021).

IPCC raporu, artan metan ve nitroz oksit seviyelerinin sera gazlarının atmosferik konsantrasyonlarının artmasına önemli ölçüde katkıda bulunduğunu ve bunun da artan küresel sıcaklıklar üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu gazların etkilerine ek olarak, ısınan okyanuslar buzulların erimesi, deniz seviyelerinin yükselmesi, su döngülerinin bozulması ve hava olaylarında aşırı artış gibi birçok olumsuz çevresel koşul yaratmaktadır. Küresel sıcaklık artışının 1.5°C ile sınırlandırılması için dünya genelinde sera gazı emisyonlarının hızla azaltılması gerektiği vurgulanmaktadır. Ancak sera gazlarının atmosfer üzerindeki etkisini değerlendirmek için karbondioksit eşdeğeri (eCO_2) ve küresel ısınma potansiyeli

(KIP) gibi kavramlar kullanılmaktadır. CO₂ 'nin KIP değeri 1 olarak alınırken, metanın (CH₄) değerinin 25 kat daha güçlü bir sera gazı olması, metanın atmosferdeki ısı tutma potansiyelinin CO₂ 'ye göre 25 kat daha fazla olduğunu göstermektedir. IPCC raporunda, KIP'a göre sıralanan sera gazlarının önemi, küresel ısınmaya katkılarının anlaşılmasını sağlar ve sera gazı emisyonlarının durumunu azaltmaya yönelik stratejiler geliştirmek için fayda ve rehberlik sağlar (IPCC, 2021).

Farklı dönemlerde hazırlanan IPCC raporlarına göre; sera gazları ve küresel ısınma potansiyeli (KIP) değerlerinin özeti Tablo 2.1’de verilmiştir. Hesaplamalarda AR6 raporuna ait 100 yıllık KIP değerleri esas alınmıştır.

Tablo 2.1. IPCC Raporlarına Göre Sera Gazlarının Küresel Isınma Potansiyel (KIP) Değerleri

Sera Gazı	Küresel Isınma Potansiyelleri (KIP kgCO ₂ e/kg GHG)								
	AR4 (2007)	AR4 (2007)	AR4 (2007)	AR5 (2014)	AR5 (2014)	AR5 (2014)	AR6 (2021)	AR6 (2021)	AR6 (2021)
	20 Yıl	100 Yıl	500 Yıl	20 Yıl	100 Yıl	500 Yıl	20 Yıl	100 Yıl	500 Yıl
CO ₂	1	1	1	1	1	1	1	1	1
CH ₄	72	25	7,6	84	28	-	81,2	27,9	7,95
N ₂ O	289	298	153	264	265	-	273	273	130
HFC-123	273	77	24	292	79	-	325	90,4	25,8
CFC-11	6730	4750	1620	6900	4660	-	8320	6230	2090
PFB	6330	8860	12500	6870	9200	-	7300	10000	13400
SF ₆	16300	22800	32600	17500	23500	-	18300	25200	34100

2.2.1. Doğrudan Sera Gazları

2.2.1.1. Karbon Dioksit (CO₂)

Dünya atmosferinde karbon ve oksijen atomlarının bağlanmasıyla oluşan karbondioksit, insanların içinde yaşadığı atmosferin sadece %0,034'ünün oluşumunda yer almaktadır. Karbondioksit seviyeleri, solunum ve fotosentez gibi doğal süreçler nedeniyle atmosferde sürekli bir değişim halindedir (Sağlar, 2019).

Tüm canlıların ve fosil yakıtların temeli olan karbon, canlıların solunum sisteminde meydana gelen yanma süreçleri, topraktaki mikroorganizmaların faaliyetleri ve insan eylemleri ya da eylemsizlikleri sonucunda karbondioksit formunda atmosfere gönderilmektedir (Dulkadiroğlu, 2018).

Karbondioksit şeffaf, renksiz ve kokusuz bir gazdır ve küresel ısınma döngüsü üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Atmosferdeki gazlar, özellikle de karbondioksit, güneş ışınlarının emilmesine ve tekrar yansıtılmamasına neden olmaktadır. Bu durumun sonucu olarak da Dünya'da önemli bir sıcaklık artışı

yaşanmaktadır. Karbondioksit dünya genelinde ısınmanın artmasında çok önemli ve etkili bir rol oynamaktadır (Uzunçakmak, 2014).

Karbondioksit oranı iklim değerleri ve yaşam üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Atmosferdeki CO₂ miktarının artması, tüm dünyada sıcaklığın artmasına ve iklimin normal değerlerinden sapmasına neden olmuştur. (Altıntaş, 2013).

Sanayi sektörleri de atmosferdeki ortalama CO₂ miktarındaki artış üzerinde büyük ve önemli bir etkiye sahiptir. Özellikle çoğu sanayi sektöründe kullanılan fosil yakıtlar, sera gazı emisyonlarının artmasında önemli bir rol oynamaktadır. Sanayileşmiş gelişmiş ülkeler doğal gaz gibi daha düşük karbondioksit emisyonuna sahip yakıtları tercih ederken, gelişmekte olan ülkeler sera gazı emisyonlarının artmasında önemli bir etkiye sahip olan fosil yakıtları kullanmaya devam etmektedir. Özellikle gelişmekte olan bu ülkeler, atmosferde CO₂ artışına neden olan fosil yakıtlardan biri olan kömürü sıklıkla kullanmaktadır (Güller, 2018).

Isıyı tutma kabiliyeti diğer sera gazlarına kıyasla düşük olsa da atmosferdeki CO₂ miktarının fazla olması ve diğer sera gazlarına kıyasla daha uzun süre varlığını sürdürmesi onu iklim değişikliğinde en önemli sera gazı haline getirmektedir. Küresel ısınma kapasitesi en düşük olan ancak atmosferdeki miktarı bakımından en önemli gaz olan CO₂, sera gazlarının en önemlisidir (Lindsey, 2020).

2.2.1.2. Metan (CH₄)

Metan renksiz, kokusuz ve havadan daha hafif bir gaz olarak bilinir. Metan, biyolojik ayrışma nedeniyle oksijen seviyesinin düşük olduğu bölgelerde yaygın olarak bulunur ve doğal gazın önemli bir unsurudur (Muslu, 2000).

Metan doğal gazın ana bileşenidir ve sera gazlarının yüzde 20'sinden sorumludur. Organik maddenin oksijensiz bir ortamda ayrışması ile üretilir. Metan, karbondioksitten 20 kat daha fazla ısı tutucu görevi görür (EPA, 2019).

Metan gazının çoğu antropojenik kaynaklardan ve enterik fermantasyonundan gelir. Metan, fosil yakıtların anaerobik ayrışmasından veya eksik yanmasından kaynaklanan bir gaz türü olarak bilinir. Bu gaz normalde hava yapısında bulunmaz, ancak tarımsal gübre, çöp yığınları, sulak alanlar, doğal gaz boru bağlantıları, pirinç tarlaları ve hayvan çığneme gibi faaliyetlerden oluşabilir. Her yıl yaklaşık 100 milyon ton metan, özellikle geviş getirme sırasında hayvanların bağırsaklarında meydana gelen fermantasyon sonucunda atmosfere salınmaktadır. Bu gazın atmosferdeki

miktarı karbondioksitten daha az olmasına rağmen küresel ısınmada önemli bir rol oynamaktadır (Keser, 2021).

CO₂'den sonra küresel ısınmaya en fazla katkıda bulunan ikinci sera gazıdır. CH₄ doğal olarak sulak alanlarda, bataklıklarda ve kutuplardaki metan tutucu buzlarda oluşur. Atmosferdeki CH₄ konsantrasyonlarının artmasında insan etkisi önemli bir rol oynamaktadır ve CH₄ emisyonlarının yaklaşık yüzde 60'ı insan kaynaklıdır. Tarım ve hayvancılık, biyokütle yakma, atık, doğal gaz ve petrol çıkarma ve dağıtımı gibi çeşitli endüstriyel faaliyetler insan kaynaklı CH₄ emisyonlarına örnektir. Atmosferdeki CH₄ konsantrasyonu Sanayi Devrimi'nden bu yana %150 oranında artmıştır. Atmosferde kalma süresi yaklaşık 12 yıl olan CH₄, 100 yıllık bir süre boyunca CO₂'den 28 kat daha büyük bir etkiye sahiptir (Borunda, 2019).

IPCC, atmosfere yayılan metan konsantrasyonlarının çoğunun insan faaliyetlerinden kaynaklandığını tespit etmiştir. İnsan faaliyetlerinden kaynaklanan metan kaynakları arasında çöp sahaları, doğal gaz ve petrol çıkarma tesisleri, tarımsal faaliyetler, gübre üretimi, kömür madenciliği, ısınma faaliyetleri, motorlu taşıtlar, kanalizasyon arıtma tesisleri ve çeşitli endüstriler yer almaktadır. Ayrıca metan, sera gazlarının en önemli türlerinden ve küresel ısınmanın en önemli nedenlerinden biridir. Metan tehlikeli bir gaz olmasına rağmen dünyanın birçok yerinde bulunmaktadır (Keser, 2021).

2.2.1.3. Nitröz Oksit (N₂ O)

Azot ve oksijen birleştiğinde oluşum gösteren ve sera etkisine önemli katkıda bulunan bir gazdır. Bu gazın sera etkisinin %15'inden sorumlu olduğu tahmin edilmektedir. İnsan faaliyetleri, özellikle tarım, sanayi ve enerji üretimi gibi faktörler N₂O emisyonlarında artışa yol açmaktadır. N₂O'nun sera etkisi karbondioksitinkinden daha güçlüdür ve atmosferde daha uzun süre kalabilir. Bu nedenle, N₂O emisyonlarının azaltılması ve kontrol altına alınması küresel iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir adımdır (Muslu, 2000).

Renksiz ve yanıcı olmayan bir gaz olan N₂O, genellikle tarım ve hayvancılık faaliyetleri sonucu ortaya çıkar. N₂O gazı doğrudan ve dolaylı olarak atmosfere karışmaktadır. Nitrifikasyon ve denitrifikasyon faaliyetleri nedeniyle doğrudan emisyonlar gözlenirken, uçucu azot sızıntıları nedeniyle dolaylı emisyonlar gözlenmektedir. Hayvansal faaliyetler etkili neden olduğundan, emisyon değerlerini

azaltmak için çeşitli önlemler geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları hayvan popülasyonunun azaltılması, verimliliğin artırılması, beslenme alışkanlıklarının değiştirilmesi ve toprak işlemedeki değişiklikler nedeniyle emisyon değerlerinin azaltılması olarak belirtilmektedir (Ersoy, 2017).

Karbondiyoksitin atmosferdeki ömrü 100 yıl iken, N_2O 'nun ömrü 150 yıldır. Bu iki gazın sera etkisini karşılaştıracak olursak, N_2O gazı karbondioksit'e göre yaklaşık 300 kat daha fazla sera etkisine sahiptir (Civelekoğlu, 2018).

Küresel ısınma potansiyeli 310 CO_2 eşdeğeri olan N_2O 'nun küresel ısınmaya etkisinin %8 olduğu bilinmektedir (EPA, 2014).

Azot döngüsünün bir yan ürünü olan N_2O gazı atmosferde yaklaşık 120 yıl kalabilir. Isıyı tutma kabiliyeti CO_2 'den 310 kat daha fazladır. N_2O emisyonlarının yaklaşık yüzde 40'ı insan faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Buna fosil yakıtların yakılması, toprak yönetimi, tarımsal alanlarda gübre kullanımı, kanalizasyon arıtma tesisleri, naylon üretiminde kullanılan adipik asit üretimi ve gübre ve madencilik endüstrilerindeki nitrik asit üretimi neden olmaktadır. N_2O gazı ayrıca toprak ve okyanuslardaki doğal süreçlerle de açığa çıkmaktadır (IPCC, 2007).

2.2.1.4. Kloroflorokarbonlar (CFC)

Isı soğurma özellikleri ile yayılan kloroflorokarbonlar toksik değildir, yanıcı değildir ve kararlıdır. Bu özellikleri ile iklimlendirme sistemlerinde yaygın olarak kullanılan kloroflorokarbonlar doğada oluşmayan emisyonlardır. İklimlendirme sistemlerinin yanı sıra yalıtım malzemesi olarak, sert ve yumuşak köpük ürünlerde, teneke kutulardaki aerosollerde ve savunma sanayinde kullanılmaktadırlar. CFC'lerin atmosferde kalma süreleri 100 ila 8.000 yıl arasında değişmekle birlikte, küresel ısınma potansiyelleri CO_2 'ye kıyasla oldukça yüksektir. Aynı zamanda atmosferdeki CFC'ler ozon gazı ile reaksiyona girmeleri nedeniyle ozon tabakasına zarar vermektedir. Güneşten gelen ultraviyole ışınlarının geçişinde önemli bir etkiye sahip olan ozon tabakasına verdikleri zarar nedeniyle Montreal Protokolü tarafından üretimleri kısıtlanmıştır (Civelekoğlu, 2018).

Buna ek olarak, kloroflorokarbonlar sprey ve parfüm kullanımı, klimalar, buzdolapları ve araba egzozları yoluyla atmosfere yayılmaktadır (Karakoç, 2022).

CFC'ler, ozon tabakasının incelmeye neden olan maddelerin modifikasyonu ve alüminyum ve yarı iletkenlerin üretimi de dahil olmak üzere çeşitli endüstriyel süreçler

yoluyla üretilmektedir. Birçok florlu gaz, diğer sera gazı emisyonlarına kıyasla çok yüksek bir küresel ısınma potansiyeline (GWP) sahiptir, bu nedenle atmosferdeki düşük konsantrasyonlar küresel sıcaklık üzerinde orantısız bir etkiye sahip olabilir. Ayrıca atmosferde uzun süre yaşayabilirler, bazı durumlarda binlerce yıl kalabilirler. Diğer uzun ömürlü sera gazları gibi, birçok florlu gaz atmosfere iyi karışır ve daha sonra dünyaya yayılır. Birçok florlu gaz ancak güneş ışığı onları atmosferde yok ettiğinde atmosferi terk eder. Genel olarak, florlu gazlar en uzun ömürlü ve en güçlü antropojenik sera gazlarıdır (EPA, 2022).

2.2.1.5. Hidroflorokarbonlar (HFC)

Hidroflorokarbon gazı, kloroflorokarbonlar gibi iklim değişikliğine neden olmasının yanı sıra stratosfer tabakasındaki ozon seviyesini azaltmakta ve bunun sonucunda güneşin zararlı ışınlarını dünyaya daha fazla yansıtmaktadır. Atmosfer tabakasında bulunan ozon gazı ise, küresel ısınmada etkin bir rol oynamasının yanı sıra güneşin zararlı ışınlarını yansıtarak dünyanın bu ışınlardan korunmasına yardımcı olmaktadır (Karakoç, 2022).

2.2.1.6. Perflorokarbonlar (PFC)

Perflorokarbonlar (PFC'ler) sadece karbon ve flor atomlarından oluşan son derece kararlı sera gazlarıdır ve özellikle alüminyum üretiminde, yarı iletken endüstrisinde ve tıbbi uygulamalarda önemli salım yapıcılarıdır (IPCC, 2013).

Küresel ısınma potansiyelleri (KIP) oldukça yüksektir; örneğin, perflorometan (CF_4) 7.390 KIP'e ve yaklaşık 50.000 yıllık atmosferik ömre sahipken, perfloroetan (C_2F_6) 12.200 KIP'e ve yaklaşık 10.000 yıllık ömre sahiptir (EPA, 2022).

Endüstriyel süreçlerde PFC emisyonlarını azaltmak için alternatif gazların kullanımı, enerji verimliliği odaklı üretim yöntemleri ve geri kazanım sistemleri gibi teknikler kullanılmaktadır (UNFCCC, 2019).

PFC'lerin uzun atmosferik kalıcılığı ve yüksek KIP nedeniyle, sera gazı emisyonlarının önemli kaynaklarından birisi olmakla beraber karbon ayak izi hesaplamalarına dahil edilmeleri önemlidir. Çevreye ve iklim değişikliğine olan olumsuz etkilerinden dolayı kontrol edilmelidir.

2.2.1.7. Kükürt Hekzaflorür (SF₆)

Kükürt hekzaflorür renksiz, kokusuz ve yanıcı olmayan bir gazdır. Ozon tabakasına verdikleri zarar nedeniyle kloroflorokarbon gazlarının kullanımına getirilen kısıtlamalar nedeniyle atmosferdeki sülfür hekzaflorür miktarı zamanla artmıştır. Atmosferde kalma süreleri ve küresel ısınma potansiyelleri açısından önemli sera gazları arasında yer almaktadır (Özlem, 2013).

Kükürt hekzaflorür, dielektrik özellikleri nedeniyle güç iletim ve dağıtım süreçleri, elektrik tesisatları ve güç sistemleri gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. SF₆ gazı günümüzde bilinen en verimli sera gazlarından biridir. Yapılan araştırmalara göre SF₆ gazının 100 yıl boyunca kızılötesi radyasyonu yakalamada eşdeğer miktardaki karbondioksit göre 23.500 kat daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca SF₆ gazı atmosferde 3.200 yıl boyunca var olma potansiyeline sahiptir. Bu gaz atmosfere salındığında, ayrışmadan yüzyıllar boyunca atmosferde birikebilir. Bu nedenle, atmosfere salınan az miktarda SF₆ gazı bile küresel iklim değişikliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir (Kurban, 2023).

2.2.2. Dolaylı (Öncü) Sera Gazları

2.2.2.1. Ozon (O₃)

Oksijen elementinin bir başka formu olan ozon, atmosferdeki doğal maddelerin birincil kirleticilerle reaksiyona girmesiyle oluşur. Ayrıca hava kirliliğine neden olan azot oksitlerin ve hidrokarbonların güneş ışığında reaksiyona girmesiyle de oluşur. Troposferde nadiren oluşan ozon, oksijen moleküllerinin yüksek enerjili ışınlarla etkileşime girdiğinde parçalanması ve henüz parçalanmamış O₂ ile reaksiyona girmesiyle oluşur (Pekin, 2006).

Atmosferin stratosfer tabakasındaki ultraviyole ışınları, ozon tabakasındaki ozon gazı ile bileşikler oluşturarak atmosfere gönderilen kloroflorokarbon sera gazlarının stratosfer tabakasına geçmesini engellemektedir. (Dindar, 2021). Böylece ozon tabakasının güneşten yeryüzüne gelen UV ışınlarını engellemesi, ozon tabakasının incilmesi olarak da ifade edilebilmektedir (Bıyık, 2018).

İklim değişikliğine güçlü katkısı olan ozon, dolaylı sera gazlarından biri olarak iklim değişikliğinin tetikleyicisi ve ekosistemlerin korunması hususunda kritik bir gaz olarak bilinmektedir.

2.2.2.2. Siyah Karbon

Siyah karbon, biyokütle ve biyoyakıtların fosil yakıtlarla birlikte eksik yanması sonucu ortaya çıkan ince bir kirletici olarak tanımlanmaktadır. Atmosferik ortamda kısa ömürlü olduğu bilinmesine rağmen, iklim değişikliğinin güçlü bir emisyon gücü olduğu da bilinmelidir (Bond vd., 2013).

Küresel ısınma üzerindeki etkisi, gelen güneş ışığını doğrudan emerek, atmosferi ısıtarak ve kar ve buz yüzeylerinde birikerek albedoyu azaltarak ortaya çıkar. (Ramanathan & Carmichael, 2008).

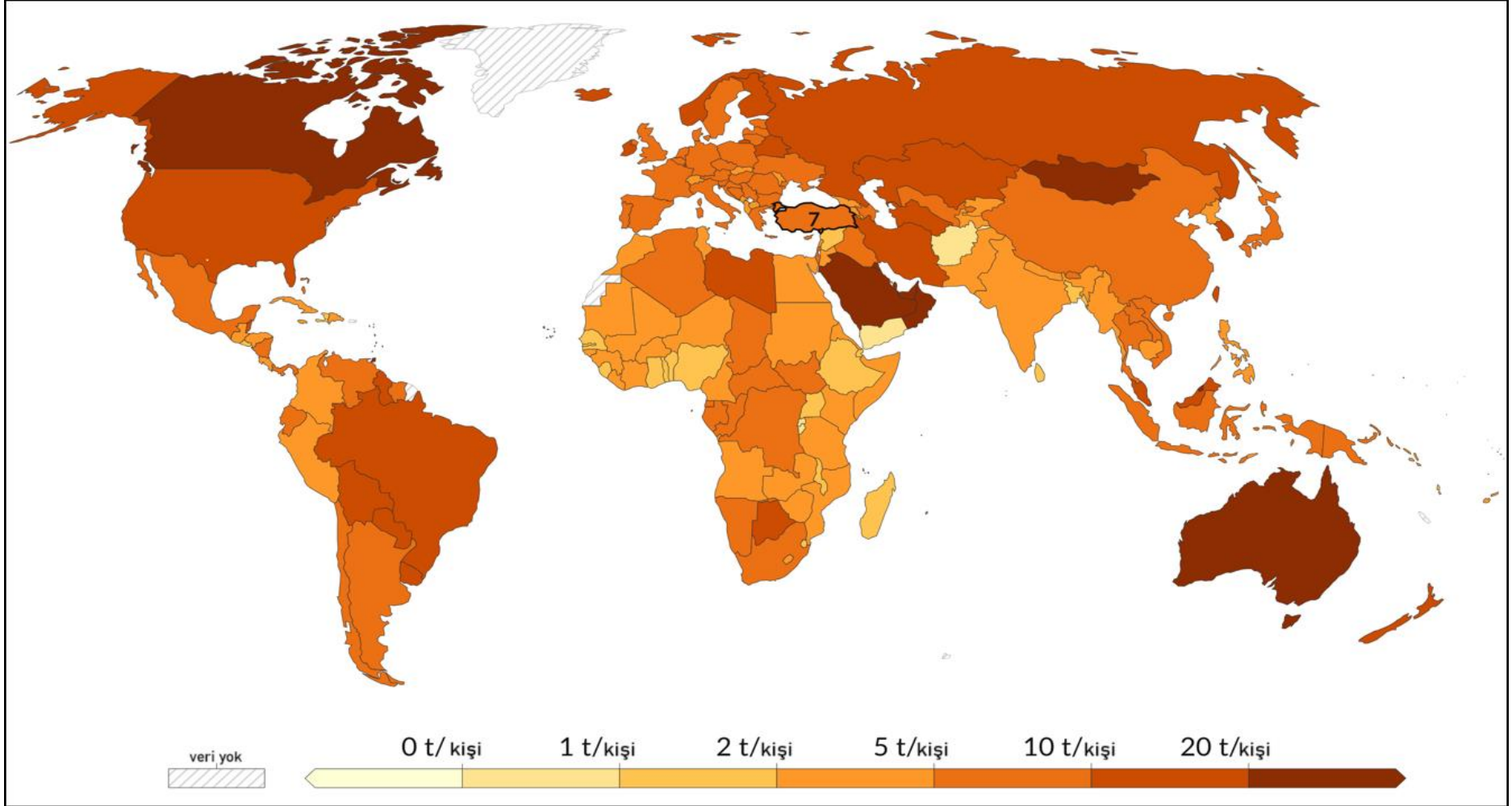
Buna ek olarak, ciddi bir sağlık tehlikesi olabilir ve solunum ve kardiyovasküler hastalıkların gelişimiyle bağlantılıdır (Janssen vd., 2011).

Siyah karbon kaynakları arasında dizel motorlar, kömür yanması, orman yangınları ve geleneksel biyokütle yakma yer almaktadır (Bond vd., 2013).

Sera gazı emisyonları, özellikle sanayileşmiş gelişmiş ülkelerde bölgesel olarak azalma eğilimindeyken, gelişmekte olan ülkelerde artma eğilimindedir (Lelieveld vd., 2015).

Siyah karbonun iklim üzerindeki etkisi karbondioksitten (CO_2) daha kısa vadeli olmasına rağmen, ısıyı CO_2 'den daha güçlü bir şekilde emebildiği için kısa vadeli iklim politikasında önceliklidir (Shindell vd., 2012).

Atmosferde biriken sera gazları, dünyanın genel olarak enerji dengesini bozarak yüzey sıcaklık değerlerinin artmasına neden olmaktadır. Şekil 2.1'de 2023 yılı kişi başı olarak düşen sera gazı emisyonlarını gösteren bu mevcut haritada karbondioksit (CO_2), metan (CH_4) ve nitroz oksit (N_2O) dahil olmak üzere tüm kaynaklara ait olan ve arazi kullanımı değişiklikleri ile beraber kaynaklanan emisyon değerleriyle birlikte, tCO_2e olarak 100 yıllık zaman dilimine ait verilerle sunulmaktadır. Genel veriler Our World in Data, Oxford Üniversitesi Global Change Data Lab. tarafından yayımlanan çalışmalardan alınmıştır. Renk skalasına bakıldığında açık tonlardan koyu tonlara doğru artan emisyon miktarları görülmektedir. 2023 yılı itibarıyla hazırlanan bu kişi başı ortalama sera gazı haritasında, sera gazlarının etkileri ve sıcaklık artışları genel olarak ele alınmış olup, bu bulgular neticesinde aynı zamanda sera gazlarının yalnızca sıcaklık artışına neden olmadığı, bölgesel olarak iklim dengelerinin bozulmasına sebep olabileceğini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 2.1. 2023 Yılı Kişi Başına Düşen Sera Gazı Miktarı (Our World in Data, Oxford Üniversitesi – *Global Change Data Lab*, Jones ve ark., 2024)

2.3. İklim Değişikliği Politikaları

2.3.1. Avrupa Birliği Emisyon Ticareti Sistemi

2005'te yürürlüğe giren ve üst sınır ve ticaret ilkesine dayanan Avrupa Birliği Emisyon Ticaret Sistemi, dünyanın en büyük karbon piyasasını temsil etmektedir (EU, 2023).

Sistem, elektrik üretimi, enerji yoğun endüstriler, havacılık ve denizcilik gibi sektörleri kapsayacak şekilde, 2024'ten itibaren her yıl belirlenen emisyon üst sınırları dahilinde işletmelere emisyon tahsisatı (EUA) vermektedir (EEX, 2023).

İşletmeler, emisyonlarını bu sınırlar içinde tutmak için izin satın alabilir, satabilir veya takas edebilir ve sınırın aşılması durumunda cezalarla karşı karşıya kalabilirler (UNFCCC, 2023).

AB emisyon ticareti sistemi dört aşamada geliştirilmiştir ve 2021-2030 yıllarını kapsayan 4. aşama, ücretsiz tahsisatların aşamalı olarak kaldırılmasını ve karbon sınırı ayarlaması (CCAD) gibi mekanizmalar yoluyla karbon kaçağının önlenmesini amaçlamaktadır (EU, 2023).

Sistem, 2005 yılından bu yana kapsadığı sektörlerde yaklaşık yüzde 40 emisyon azaltımı sağlayarak Avrupa Yeşil Anlaşması kapsamında sunulan 2050 karbon nötr hedeflerine ulaşılmasında önemli bir rol oynamıştır (EEX, 2023).

2023'e kadar ton CO₂ başına 85-100 Avro karbon fiyatları, sanayiye yenilenebilir enerji yatırımlarına ve enerji verimliliğini artıran projelere yönlendirmektedir (EU, 2023).

2.3.2. Sınırdaki Karbon Düzenlemesi (SKDM)

İklim hedeflerine ulaşılmasını desteklemek amacıyla Avrupa Birliği tarafından uygulamaya konulan ve AB dışından ithal edildiğinde yüksek karbon yayan ürünlerin üretiminde ortaya çıkan çevresel maliyetleri hesaplayan ve raporlayan bir mekanizmadır. Mekanizma, özellikle karbon yoğun ürünlere sahip sektörlerde AB dışındaki ülkelere ihracat yapan firmaları, AB karbon piyasası (EU ETS) doğrultusunda karbonsuzlaştırılmış üretim aşamalarına geçmeye teşvik etmek üzere tasarlanmıştır. SKDM, AB'deki üreticiler için rekabet avantajı sağlarken, emisyonları azaltmayı ve yurtdışındaki üreticileri daha sürdürülebilir üretim yöntemlerine kaydırmayı amaçlamaktadır.

Bu hüküm öncelikle çimento, demir ve çelik, elektrik ve hidrojen gibi yüksek karbon emisyonuna sahip sanayi ürünleri için geçerlidir. İthalatçıların bu ürünlerin üretiminden kaynaklanan karbon emisyonlarını ve menşe ülkede ödenen karbon fiyatını üç ayda bir raporlamaları gerekmektedir. İthalatçıların bu bilgileri raporlama yükümlülüğü geçiş dönemi olarak adlandırılan 2023 yılında başlamış ve tam uygulama aşaması 2026 yılı için planlanmaktadır (EU, 2025).

SKDM'nin getirdiği en önemli yeniliklerden biri de karbon emisyonlarının raporlanması ve bu emisyonlara "karbon vergisi" uygulanması zorunluluğudur. Bu mekanizma aynı zamanda AB'nin karbon ticareti sisteminin korunması ve güçlendirilmesinde de önemli bir rol oynuyor. AB, bu düzenlemeyi sınırda uygulayarak hem dış ticareti daha çevre dostu hale getirmeyi hem de ithal edilen yüksek karbonlu ürünlere adil fiyatlandırma uygulayarak yerli üreticiler için haksız rekabeti önlemeyi amaçlamaktadır (EU, 2021).

AB'nin SKDM aracılığıyla ulaşmak istediği uzun vadeli hedeflerden biri de küresel ölçekte karbon kaçağını önlemek ve diğer ülkeleri iklim dostu uygulamaları desteklemeye teşvik etmektir. Mekanizma ayrıca AB'nin küresel iklim değişikliği politikasındaki liderlik konumunu güçlendirmeyi ve karbon emisyonlarının uluslararası ticarete adil bir şekilde dağıtılmasını sağlamayı amaçlamaktadır. Sonuç olarak SKDM, AB'nin yeşil dönüşüm sürecinin bir parçası olarak çevresel sürdürülebilirliği ekonomik büyüme ile uyumlu hale getirmeyi amaçlamaktadır (EU, 2025).

2.3.3. Yeşil Mutabakat ve Karbon Nötr

Avrupa Birliği, Aralık 2019 itibarıyla Avrupa ekonomisini daha sürdürülebilir ve çevre dostu hale getirmeyi amaçlayan Avrupa Yeşil Mutabakatı adlı bir politika çerçevesini uygulamaya koymuştur. 2050 yılına kadar sıfır sera gazı emisyonuna ulaşarak ve kaynak verimliliğini artırarak AB ülkelerini ekonomik açıdan rekabetçi ve iklim açısından nötr kıtalar haline getirmeyi amaçlayan bir stratejidir. İklim kriziyle mücadeleyle yönelik hedefleri arasında 2050 yılına kadar sıfır sera gazı emisyonuna ulaşılması, ilk iklim nötr kıta olmak için çaba gösterilmesi ve yeşil ekonomiye geçişin ekonomik bir fırsat haline getirilmesi yer almaktadır. Anlaşma sadece politika önerileriyle sınırlı kalmayıp, iklim krizinin önlenmesi için yeşil ekonomi ve temiz teknoloji araştırmalarının desteklenmesini de amaçlıyor.

Hem kısa hem de uzun vadeli yönleri olan anlaşma, kısa vadede 2030 yılına kadar sera gazı emisyonlarını 1990 seviyelerinin yüzde 55 altına indirmeyi, uzun vadede ise 2050 yılına kadar bunu yüzde 100'e çıkarmayı, yani net sera gazı emisyonlarını sıfıra indirerek Avrupa'yı iklim-nötr bir kıta haline getirmeyi planlamaktadır (Küçük ve Yüce, 2022).

Yeşil Anlaşma ve Yeni Sanayi Stratejilerinin hedefleri doğrultusunda Avrupa Birliği 11 Mart 2020 tarihinde "Kapalı Döngü Ekonomisi Eylem Planı"nı açıklamıştır. Bu plan, sürdürülebilir üretim politikalarının uygulanmasına öncelik verirken, elektronik ve bilgi teknolojileri, plastik, pil ve taşıtlar, gıda, ambalaj, yapı malzemeleri, tekstil, besin maddeleri ve su gibi sektörler ve ürün değer zincirlerine öncelik veriyor. Ülkemiz ile Avrupa Birliği arasında imzalanan Gümrük Birliği kapsamında Avrupa Birliği ile süregelen ticari entegrasyonumuz ve ülkemizin de bir parçası olduğu değer zinciri göz önünde bulundurulduğunda, Avrupa Birliği tarafından getirilecek politika değişikliklerinin gerek enerji gerekse kaynak kullanımı açısından yoğun sektörlerde faaliyet gösteren ekonomik olguları üzerinde önemli bir etki yaratması muhtemeldir. Özellikle sürdürülebilir ürünler konusunda Avrupa Birliği teknik mevzuatına uyum sağlanarak ülkemiz ile Avrupa Birliği arasında yürütülen serbest dolaşımın sürdürülebilmesi için Avrupa Birliği tarafından belirlenen hedeflerin ve uygulanması planlanan kuralların yakından takip edilmesi ve uyum sağlanması önem arz etmektedir (T.C. Ticaret Bakanlığı, 2022)

2.4. Karbon Ayak İzi

Karbon ayak izi, bir bireyin, kurumun, kuruluşun, hizmetin veya ürünün iklim değişikliği üzerindeki etkisini hesaplamak amacıyla kullanılan bir ölçüm aracıdır. Karbon ayak izi tüm sera gazı emisyonlarını kapsamakla birlikte, evrensel bir kullanım olarak genellikle karbondioksit eşdeğeri cinsinden ölçülür. Hesaplama sayısal bir ölçüt olduğundan ve üretimden bertarafa kadar olan süreçlerin hacmine göre kategorize edildiğinden, çevresel konulara matematiksel ve somut bir bakış açısı sağlar (EPA, 2014).

Kurumların yıllık sera gazı emisyonları kurumsal karbon ayak izi olarak adlandırılır. Emisyon kaynakları farklı standartlara göre kategorize edilmektedir. Genel olarak üç alanda ele alınabilir: kurum tarafından kullanılan fosil kaynaklardan kaynaklanan doğrudan emisyonlar, kurum tarafından kullanılan elektrikten

kaynaklanan dolaylı emisyonlar ve kurum tarafından kullanılan ürünler ve dışarıdan alınan hizmetlerin yarattığı diğer dolaylı emisyonlar (Dindar, 2021).

Bir ürünün karbon ayak izi, ürünün yaşam döngüsü boyunca doğrudan ve dolaylı olarak salınan sera gazı emisyonlarının toplam miktarıdır. Bu hesaplama, bir ürünün tüm aşamalarındaki çevresel etkisini belirlemek ve bu etkiyi en aza indirmek için önemlidir. Karbon ayak izi genellikle kilogram veya ton cinsinden ifade edilir ve genellikle CO₂ e (karbondioksit eşdeğeri) birimleriyle ölçülür (ISO 14067, 2018).

2.5. Karbon Ayak İzi Hesaplama Yöntemleri ve Standartları

Karbon ayak izi hesaplamaları yoluyla sera gazı emisyonlarının belirlenmesi iklim değişikliğinin önlenmesi açısından önemlidir. Bu amaçla uluslararası ortaklıklar, protokoller ve anlaşmalar oluşturulmuştur. Karbon ayak izi hesaplama yöntemleri uluslararası araştırmalarla geliştirilmektedir (Lin, 2016).

Yaygın olarak kullanılan protokol ve standartlar Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO 14064), Sera Gazı (GHG) Protokolü, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) ve Birleşik Krallık Çevre, Gıda ve Köy İşleri Bakanlığı (DEFRA) olarak sıralanabilir.

2.5.1. Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC)

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) 1988 yılında Kanada'nın Toronto kentinde kurulmuş olup Birleşmiş Milletler himayesinde faaliyet göstermektedir. Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) ve Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) tarafından iklim değişikliğinin daha iyi anlaşılması için bilimsel, teknik ve sosyo-ekonomik bilgileri değerlendiren ve gerekli analizleri sağlayan bir kuruluştur. Türkiye'nin de aralarında bulunduğu Birleşmiş Milletler ve Dünya Meteoroloji Örgütü üyesi 195 IPCC üyesi ülke tarafından tanımlanan süreçlerle çalışmalarını sürdürmektedir. İlk raporu 1990 yılında yayımlanmıştır ve her beş yılda bir rapor yayımlanmaktadır (Sıleybi, 2023).

IPCC Kılavuz kitapçıkları sera gazı envanterlerinin hesaplanması için enerji, tarım, ormancılık, atık, endüstriyel faaliyetler, ürün kullanımı, genel rehberlik ve raporlama gibi konuları kapsamaktadır. Kılavuz, emisyonları belirlemek için adım adım verilerin nasıl toplanacağını, bu verilerin nasıl tahmin edileceğini ve nasıl raporlanacağını gösterir. Kılavuzda ayrıca ülkelerin elde edemediği veriler için kullanılabilecek ortalamalar da yer alıyor. Çalışmada enerji bölümünde toplam, sanayi

ve ulaştırma emisyonlarını içeren kılavuzun içeriği kullanılmıştır. Ulaşım sektörü emisyonları yakıtın yanması ile ilgili olduğundan ve karbondioksit (CO₂) yanmanın doğal bir ürünü olduğundan, karbondioksit (CO₂) kaynaklı emisyonlar net bir şekilde hesaplanabilmektedir. Her lke için yakıt tüketimi de raporlarda yer almaktadır. Bununla birlikte, ulusal envanter perspektifinden bakıldığında, ülkelerin imkanları varsa kendi emisyon faktörlerini oluşturmaları ve kullanmaları teşvik edilmektedir (Atabey, 2013).

IPCC, karbon ayak izi hesaplamalarında kullanılan Tier yöntemlerini ilk olarak 1996 yılında geliştirmiş ve yayınladığı kılavuzda detaylı açıklamalara yer vermiştir. Bu metodoloji birçok ülke ve kurum tarafından benimsenmiş ve karbon hesaplamalarında kullanılmaktadır. Tier yöntemleri 3'e ayrılır: Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 (IPCC, 2007).

Tier 1: Bir şehrin araçlarıyla ilişkili emisyonlar incelenirken, şehirdeki tüm araçlar için standartlaştırılmış bir emisyon faktörü kullanılır. Kademe 1 yaklaşımı yanma emisyonlarını, yakılan yakıt miktarını ve ortalama emisyon faktörünü içerir. Bu yöntem CO₂ emisyonları için ayrıntılı olarak düzenlenmiştir.

Ancak, metan ve nitröz oksitler gibi karbondioksit (CO₂) dışındaki gazlar için ortalama emisyon faktörleri kullanılır. Kademe 1 yöntemi, karbon ayak izlerinin hesaplanmasında kullanılan en temel ve basit yöntemdir. Kademe 1 yönteminde hazır veriler incelenir ve tüm faaliyet ve kuruluşların doğrudan emisyonlarına odaklanılarak karbon ayak izi hesaplanır (Argun vd., 2019).

Tier 2: şehirdeki araçların kullandığı yakıt türlerine göre emisyon faktörlerinin belirlenmesi ve ilgili hesaplamaların yapılması. Kademe 2 yaklaşımı, Kademe 1 yaklaşımından farklı olarak ülkeye özgü emisyon faktörlerini kullanır. Bu yaklaşım, Kademe 1 yaklaşımına göre daha detaylı ve daha iyi tahminler sağlamaktadır. Bu nedenle daha detaylı ve doğru bir ölçüm yöntemi olarak kabul edilmektedir. Bu yöntem hem dolaylı hem de doğrudan emisyonları ölçmek için kullanılır (eri, 2021).

Tier 3: Tüm araçların marka, model, yakıt türü, trafik ve yolcu yakıt tüketimi gibi faktörler dikkate alınarak hesaplanır. Tier 3 yöntemi, karbon ayak izi ölçümünde kullanılan en kapsamlı yöntemdir. Bu yöntem de tıpkı Tier 2 yöntemi gibi doğrudan ve dolaylı emisyonları belirlemek için kullanılır, ancak ondan farklı olarak daha spesifik veriler gerektirir.

Bu nedenle, bir karbon ayak izi çalışması yürütürken hangi Kademe yönteminin kullanılacağı, elde edilen verilerin kalitesine bağlıdır (Argun vd., 2019).

Tier 3 yaklaşımı, bireysel saha düzeyinde ölçümler ve veriler kullanır. Bu yaklaşım, karbondioksit (CO₂) dışındaki sera gazları için daha doğru tahminler sağlar. Tier-3 yaklaşımında, ulaştırma sektöründeki yakıt tüketim değerlerinden farklı olarak, araçların kat ettikleri mesafe ve taşıdıkları yük değerleri de dikkate alınmaktadır (Çerçi, 2021).

Tier 3 yöntemi, diğer Kademe 1 ve Kademe 2 yöntemlerinden daha doğrudur, ancak hesaplamalar ve veri detaylarında uzmanlık gerektirir. Bu standartlaştırılmış yöntemleri kullanarak hükümetler, şirketler ve tüm kuruluşlar ölçüm kapasitelerine göre sera gazı emisyonlarını doğru bir şekilde belirleyebilirler (IPCC, 2007).

2.5.2. Sera Gazı Protokolü (GHG)

Sera Gazı Protokolü, Dünya Kaynakları Enstitüsü (WRI) ve Dünya Sürdürülebilir Kalkınma İş Konseyi (WBCSD) tarafından yönetim kuruluşları, işletmeler, sivil toplum kuruluşları (STK'lar) ve diğerleri ile birlikte düzenlenmiş ve derlenmiştir. 1998 yılından bu yana Dünya Kaynakları Enstitüsü (WRI) ve Dünya Sürdürülebilir Kalkınma İş Konseyi (WBCSD) Sera Gazı Protokolünü geliştirmek için birlikte çalışmış ve 170 uluslararası şirket tarafından kabul edilmiştir. Protokol birbiriyle ilişkili 2 standarttan oluşmaktadır: Kurumsal Muhasebe ve Raporlama Standardı ve Proje Sayısallaştırma Standardı (Hickmann, 2017).

Eylül 2001'de Sera Gazı Protokolü'nün Kurumsal Muhasebe ve Raporlama Standardı'nın ilk yayınlanmış versiyonu dünyaya duyuruldu. Daha sonra 9 ülkede toplam 30 şirket tarafından test edilmiş ve uygulanmıştır. Sera Gazı Protokolü Kurumsal Muhasebe ve Raporlama Standardının temel amacı, Kyoto Protokolünde yer alan sera gazlarının muhasebeleştirilmesi konusunda tüm kuruluşlara rehberlik sağlamaktır. Sera Gazı Protokolü'nün muhasebesini verimli ve şeffaf bir şekilde yönetmek için Kapsam 1, 2 ve 3 olarak üç alan belirlenmiştir. Kapsam 1 doğrudan emisyonları, yani kuruluşun sahip olduğu ve kontrol ettiği kaynakları hesaplar. Ancak Kyoto Protokolüne dahil olmayan sera gazları buraya dahil edilmeyecektir. Dolaylı emisyonlar, yani kuruluşlar tarafından elektrik satın alınması ve tüketiminden kaynaklanan sera gazı emisyonları kapsam 2'de hesaplanır. Kapsam 3 diğer dolaylı

emisyonları, yani kuruluşun faaliyetleri sonucunda sahip olmadığı veya kontrol etmediği kaynaklardan kaynaklanan sera gazı emisyonlarını hesaplar (Bhatia, 2004).

Kyoto Protokolü kapsamındaki altı sera gazı için muhasebe ve raporlamayı kapsar. Protokolün sera gazı standartları, şirketlerin standartlaştırılmış yaklaşımlarla birlikte ilkeleri kullanarak emisyonlarını doğru ve tutarlı bir şekilde hesaplayan bir sera gazı envanteri oluşturmalarına yardımcı olur. Bu, sera gazı envanteri geliştirmeyi basitleştirir ve maliyetleri azaltır (Ranganathan vd., 2004).

2.5.3. Uluslararası Organizasyon Standardı (ISO)

Sera gazı emisyonlarını sınırlandırmak ve ilerlemelerini izlemek için dünya çapında kurumlarda boşluklar vardır. Bu boşluğu doldurmak için Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) sistematik bir bilimsel yaklaşım için bir çerçeve geliştirmek üzere bir çalışma grubu kurmuş ve 2012 yılında ISO 14064'ü oluşturmuştur. Bu standart 2006 yılında sera gazlarını ele almak üzere oluşturulmuştur. Standart, gönüllü emisyon azaltımlarında, ticaretinde veya projelerde kullanılabilir. Standartın içeriği üç bölümden oluşmaktadır. ISO 14064-1, kurum düzeyinde kurumların sera gazı envanterlerinin hazırlanması ve geliştirilmesini raporlar. ISO 14064-2, sera gazı emisyonlarının azaltılması ile ilgili faaliyetlerin projelerini raporlar. ISO 14064-3, sera gazı projelerinin doğrulanması veya onaylanması için gereklilikleri raporlar (ISO, 2020).

ISO 14064, bir kurum veya kuruluşun sera gazı emisyon envanterinin hazırlanması, emisyonların azaltılmasına yönelik projelerin geliştirilmesi, raporlanması, kalite yönetimi ve doğrulanması için gereklilikleri belirleyen bir standarttır. Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) tarafından 45 ülkeden 175'ten fazla uzmanın katılımıyla hazırlanmıştır. Standart üç bölümden oluşmaktadır. Her bölüm ayrı uygulama alanlarını içermektedir;

ISO 14064-1: Kurum, kuruluş veya şirket düzeyinde sera gazı envanterlerinin geliştirilmesini, emisyonların ve uzaklaştırmaların hesaplanmasını ve raporlanmasını içerir.

ISO 14064-2: Sera gazı emisyonlarına neden olan eylemleri belirlemek, izlemek, raporlamak, azaltmak veya ortadan kaldırmak için tasarlanmış sera gazı projelerine dayalı faaliyetleri içerir.

ISO 14064-3: Kuruluşlar tarafından hazırlanan sera gazı envanterleri, emisyonların azaltılması için yürütülen projelerin doğrulanması, onaylanması ve raporlanması hakkında detaylı bilgiler içerir.

2.5.4. İngiltere Çevre, Gıda ve Köy İşleri Bakanlığı (DEFRA)

İngiltere Çevre, Gıda ve Köy İşleri Bakanlığı (DEFRA), karbon ayak izinin hesaplanması ve sera gazı emisyonlarının raporlanması için ayrıntılı bir metodoloji sunmaktadır. Bu teknoloji, kendi faaliyetlerinden kaynaklanan emisyonları daha doğru bir şekilde ölçmeyi mümkün kılmaktadır (DEFRA, 2023).

Sera gazı emisyonları üç kapsama ayrılır: Kapsam 1, Kapsam 2 ve Kapsam 3. Kapsam 1, doğrudan kaynaklanan emisyonları kapsar. Bu alana dahil edilen kaynaklar genellikle kurumsal araçlar ve yerinde yakıt kullanımıdır (EEA, 2022).

Kapsam 2, dışardan satın alınan elektrik ve kuruluş içindeki enerji kaynaklarından kaynaklanan dolaylı emisyonları kapsar. Bu kapasite, ülkedeki elektrik üretim türüne bağlı olarak kullanılan emisyon katsayısı ile belirlenir ve DEFRA bu konuda özel güncellemeler yayınlar (IEA, 2023).

Kapsam 3 emisyonları, doğrudan kontrol edilmeyen, ancak faaliyetlerinin bir zincirleme reaksiyonu sonucu ortaya çıkan dolaylı emisyonları kapsar. Bunlar tedarik zinciri, iş seyahatleri, atık yönetimi ve diğer dolaylı harcamalardan ayrıdır. Bu kapasite raporlaması genellikle gönüllülük esasına dayanır (WRI & WBCSD, 2011).

DEFRA'nın yaklaşımı, sadece emisyonları sunmakla kalmayıp, bunların nasıl hesaplandığını ve değerlendirildikleri göstergeleri de açıklayarak programlamanın güvenilirliğini artırmaktadır (DEFRA, 2023).

DEFRA'nın karbon ayak izi programlama metodolojisi, sera gazı emisyonlarına ilişkin genel bir bakış, sistematik bir anlayış ve rehberlik sağlar. Kapsam 3, Kapsam 1 ve 2'nin raporlanması şartıyla gönüllü bir alandır (European Commission, 2021).

2.6. Sera Gazları Emisyon Kapsam ve Kategorileri

Sera gazı emisyonlarının izlenmesi ve raporlanmasında kullanılan sınıflandırmalar için üç ana kapsam kullanılmaktadır : Kapsam 1, Kapsam 2 ve Kapsam 3. Bu sınıflandırma GHG Protokolü ve IPCC tarafından geliştirilen metodolojilere dayanmaktadır (WBCSD, 2004; IPCC, 2006)

2.6.1. Kapsam 1 (Doğrudan Emisyonlar)

Kapsam 1, kurumun sahip olduğu veya doğrudan kontrolü altındaki kaynaklardan kaynaklanan emisyonları ifade eder. Bu kapsam, kurumun tesislerinde fosil yakıtların yanmasından, kurumun araç filosunun kullanımından ve bazı endüstriyel süreçlerden doğrudan yayılan sera gazlarını içerir. Ayrıca bu grupta tarımsal faaliyetlerden, üniversitenin araştırma laboratuvarlarında kullanılan gazlardan veya jeneratörlerden kaynaklanan emisyonlar da yer almaktadır. Bu tür emisyonlar doğrudan kontrol edilebilir olduğundan, azaltma stratejilerinde öncelikli olarak ele alınmaktadır (IPCC, 2006)

2.6.2. Kapsam 2 (Dolaylı Emisyonlar)

Kapsam 2, kurum tarafından tüketilen ancak doğrudan üretilmeyen elektrik, buhar, ısı veya soğutma gibi enerji kaynaklarının üretiminden kaynaklanan dolaylı emisyonları kapsar. Örneğin, üniversite binalarında tüketilen elektrik, kampüs aydınlatma sistemleri ve laboratuvar ekipmanlarının çalışması gibi enerji kullanımları Kapsam 2 kapsamındadır. Bu emisyonlar dolaylı olarak kurumun kontrolü altında olduğundan, azaltma potansiyeli daha sınırlıdır; ancak yeşil enerjiye geçiş veya enerji verimliliği önlemleri ile azaltılabilirler (GHG Protokolü, 2015).

2.6.3. Kapsam 3 (Diğer Dolaylı Emisyonlar)

Kapsam 3, bir kuruluşun faaliyetlerinden kaynaklanan ancak doğrudan kontrol etmediği diğer dolaylı emisyonları kapsar. Bu alan oldukça geniş ve genellikle en karmaşık hesaplama süreçlerine sahiptir. Kapsam 3'te yer alan kategoriler arasında personel ve öğrencilerin taşınması, kurumsal atık yönetimi, su ve atık su sistemleri, hizmet alımı, malzeme ve ürünlerin taşınması, yatırımlar ve dijital faaliyetler yer almaktadır. Üniversiteler gibi büyük kurumlarda bu kategori, toplam sera gazı emisyonlarının önemli bir oranını temsil edebilir ve Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerine ulaşılmasında önemli bir rol oynayabilir (CDP, 2020).

Kapsam 3, kurumun sahip olduğu veya doğrudan kontrolü altındaki kaynaklardan kaynaklanan emisyonları ifade eder. Bu kapsam, kurumun tesislerinde fosil yakıtların yanmasından, kurumun araç filosunun kullanımından ve bazı endüstriyel süreçlerden doğrudan yayılan sera gazlarını içerir. Ayrıca bu grupta tarımsal faaliyetlerden, üniversitenin araştırma laboratuvarlarında kullanılan gazlardan

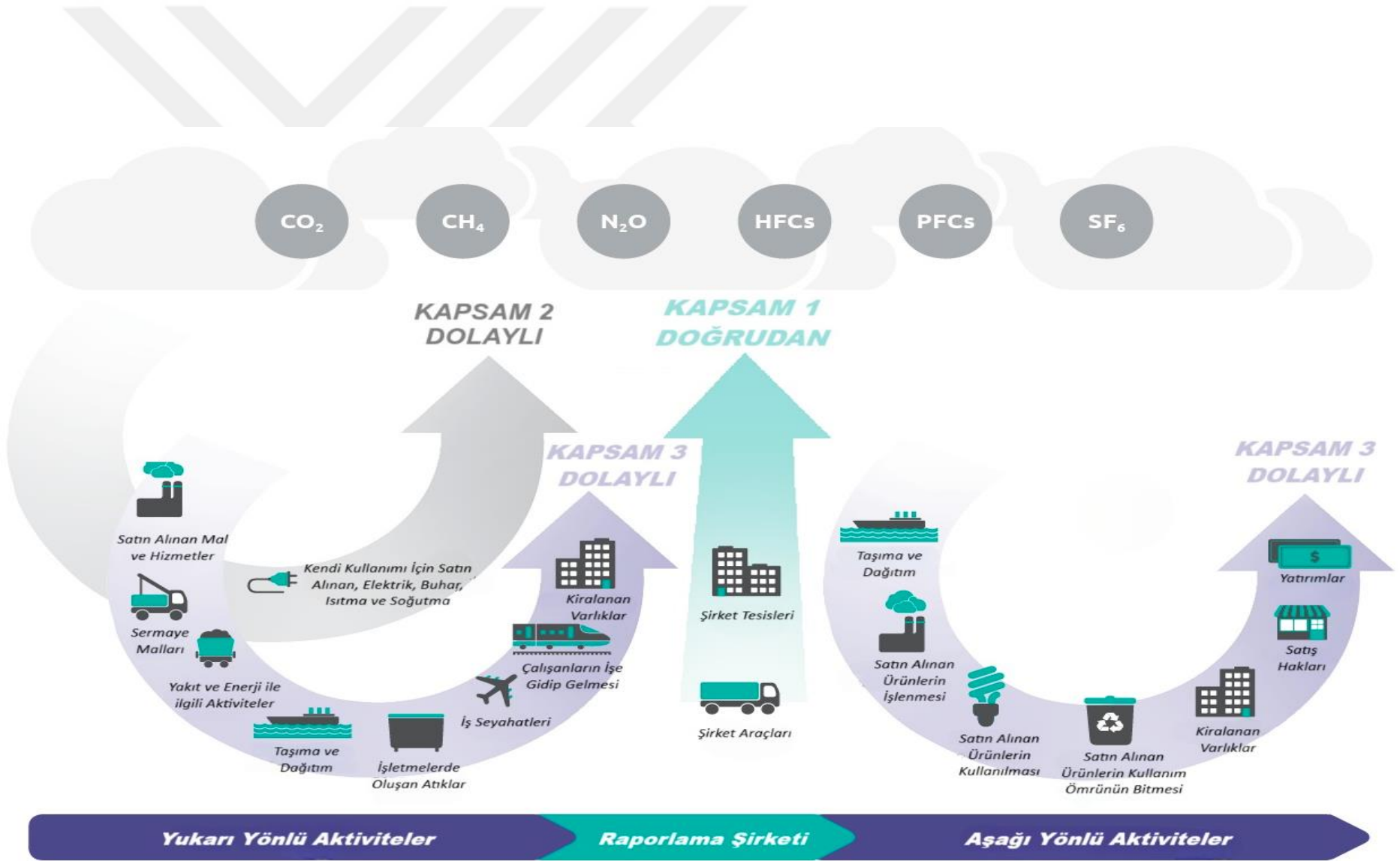
veya jeneratörlerden kaynaklanan emisyonlar da yer almaktadır. Bu tür emisyonlar doğrudan kontrol edilebilir olduğundan, azaltma stratejilerinde öncelikli olarak ele alınmaktadır. (IPCC, 2006)

Bu kapsamlı sınıflandırma, kurumsal karbon ayak izi çalışmalarında emisyon kaynaklarının sistematik değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. ISO 14064-1 standardına göre karbon ayak izi hesaplamalarında söz konusu olan kapsam ve temel kategorilere ait genel gruplandırma, Tablo 2.2’de gösterilmiştir.

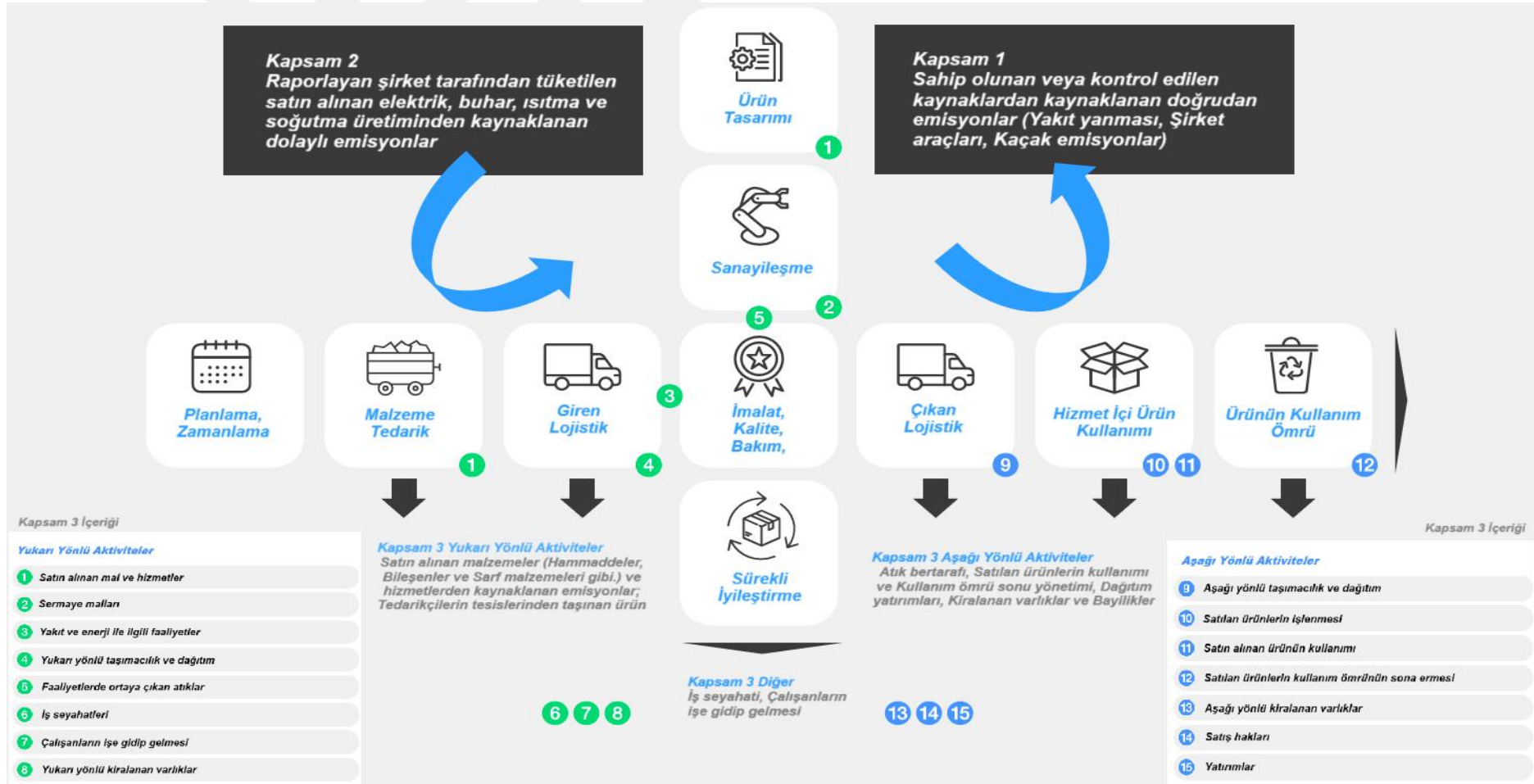
Tablo 2.2. ISO 14064-1 Standardına Göre Karbon Ayak İzi Hesaplama Kategoriler

Kapsam	Kategori	İçerik	Emisyon Türü	Alt Kategori
Kapsam 1	Kategori 1	Doğrudan Sera Gazı Salınımları	Doğrudan Emisyonlar	Sabit yanma, Mobil yanma, Proses emisyonları, Sızıntı emisyonları, Arazi kullanımı emisyonları
	Kategori 2	İthal Edilen Enerjiden Kaynaklanan	Dolaylı Emisyonlar	Tedarik edilen elektrik Tedarik edilen enerji
Kapsam 2	Kategori 3	Ulaşımdan Kaynaklanan	Dolaylı Emisyonlar	Satın alınan hammadde/hizmetler için lojistik faaliyetler, Satılan ürün/hizmetler için lojistik faaliyetler, Çalışanların işe gidiş gelişleri, Müşteri ve diğer ziyaretçilerin tesise gerçekleştirdikleri ziyaretler, İş seyahatleri
	Kategori 4	Kuruluşun Kullandığı Ürünlerden Kaynaklanan	Dolaylı Emisyonlar	Satın alınan malın/yakıtın üretiminden kaynaklanan emisyonlar, Sermaye mallarından kaynaklanan emisyonlar, Atıkların yönetimi, Kiralanan varlıklardan kaynaklanan emisyonlar, Danışmanlık, temizlik, bankacılık, finans gibi vb. hizmetlerden kaynaklanan emisyonlar
	Kategori 5	Kuruluşa Ait Ürünlerin Kullanımıyla Bağlantılı	Dolaylı Emisyonlar	Üretilen ürünün kullanım aşaması boyunca oluşturduğu emisyonlar, Kiraya verilen varlıklardan kaynaklanan emisyonlar, Üretilen ürünün kullanım ömrü sonundaki oluşan emisyonlar, Gerçekleştirilen ve yapılan yatırımlardan kaynaklanan emisyonlar
	Kategori 6	Diğer Kaynaklar	Dolaylı Emisyonlar	Başka kategorilerde raporlanamayan herhangi bir kuruluşa özgü emisyonları kapsar. Kategorinin içeriğini tanımlamak kuruluşun sorumluluğundadır.
Kapsam 3				

Emisyon kaynaklarının değer zincirine göre kapsam içeriklerine ait dağılımlar Şekil 2.2’de gösterilmektedir. Diğer bir kaynakta gösterimi sağlanan kapsam ve içerik bazında genel dağılım ise Şekil 2.3’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Emisyon Kaynaklarının Dağılımı (WRI ve WBCSD, 2004)



Şekil 2.3. Emisyon Kaynaklarının İçerikleri (WRI & WBCSD, 2004)

2.7. Ölçüm Belirsizliği

Ölçülen belirsizliği niteleyen büyüklük değerlerinin dağılımını niteleyen, düzeltmeler ve ölçüm standardına atanmış büyüklük değerleri gibi sistematik etkilerden kaynaklanan sayısal parametredir (BIPM, 2008).

Emisyon ve uzaklaştırma envanter tahminleri birçok nedenden dolayı gerçek temel değerden farklılık gösterir. Bazı farklılıklar potansiyel belirsizlik aralığının iyi tanımlanmış ve kolayca karakterize edilebilen tahminlerini oluşturabilir (Rypdal ve Winiwarter, 2001).

Bir belirsizlik analizinde mümkün olduğunca tüm belirsizlik nedenlerinin hesaba katılması ve bazı belirsizlik nedenlerinin dahil edilmemiş olması halinde bunun açıkça belgelenmesi doğru bir yöntemdir.

2.8. Ölçüm Belirsizliklerinde İstatistiksel Analiz Yöntemleri

İstatistiksel yöntemler genellikle gözlemlerdeki ve dağılımlardaki belirsizlikleri modellemeye çalışan veri odaklı yaklaşımlardır. Bu yöntemler parametrik olmayan teknikler kullanır ve genellikle doğrudan gözlemsel verilerden çıkarımlar yapabilir (Efron & Tibshirani, 1993).

2.8.1. Bayes Yöntemi

Bayes yöntemi, teori olarak olasılıksal metodlara dayanan istatistiksel bir çıkarım yaklaşımıdır. Bu yöntem, mevcut veriler ışığında hipotezi güncelleyerek hipotezin doğruluğunu belirlemeye çalışır. Thomas Bayes tarafından geliştirilen Bayes metodu temel alınarak oluşturulmuştur. Bu teorem, gözlemlenen verilerle birlikte öncül olan olasılıkları artçıl olasılıklara dönüştürmeyi sağlamaktadır (Gelman vd., 2013).

Bayes yaklaşımı, klasik yöntemlerin aksine tüm bilinmeyenleri olasılık dağılımları ile ifade ettiği için, belirsizliklerin yüksek olduğu durumlarda özellikle tercih edilir. Yüksek belirsizlik düzeylerinde oldukça etkili sonuçlar verebilmektedir.

Bayes metodu, çevre bilimleri ile sağlık bilimine kadar, makine öğrenimlerinden sosyal bilimlere değin birçok disiplin alanlarında kullanılmaktadır. Özellikle sınırlı veri kümeleriyle çalışırken, mevcut bilgilere dayalı olarak sonuçlara varmak avantajlıdır (Kruschke, 2015).

Örnek olarak, karbon ayak izi hesaplamaları kapsamında kullanılan emisyon katsayılarının belirsizlikleri, Bayes yaklaşımıyla birlikte daha güvenilir olan aralıklarla ifade edilebilmektedir. Bu yöntemle birlikte, uzman görüşleri dışında nicel olmayan bilgi türleri de modele entegre edilebilmektedir (McElreath, 2020). Sonuç itibarıyla, Bayes metodu, bilimsel olarak karar alma süreçlerinde kullanılabilecek verilerle öğrenilen dinamik ve esnek bir yapı sunar.

2.8.2. Bootstrap Yöntemi

Bootstrap, istatistiksel belirsizliği ve hatayı tahmin etmek için yaygın olarak kullanılan bir yeniden örnekleme tekniğidir. Bu yöntem, orijinal veri setinden belirli sayıda rastgele örnek seçerek yeni veri setleri oluşturur. Her yeni örnek için yapılan analizler, güven aralıklarının ve model parametrelerinin doğruluğunun belirlenmesine yardımcı olur. Bootstrap yöntemi, özellikle dağılımsal varsayımların yapılmasının zor olduğu veya küçük veri setleriyle yürütülen çalışmalarda önemli avantajlar sağlayabilir (Efron ve Tibshirani, 1993).

Bootstrap yönteminin temel prensibi, verilerden rastgele örnekler almak ve bu örnekleri analiz etmektir. Bu örnekler genellikle değiştirilerek alınır, bu da her gözlemin birden fazla kez örneklenebileceği anlamına gelir. Bu işlem binlerce kez tekrarlandığında, ortaya çıkan örnekler üzerinde yapılan analizler sayesinde parametrelerin güvenilirliği daha iyi değerlendirilebilir. Bu yöntem, özellikle küçük veri setlerinde, model doğruluğunu ve belirsizliğini ölçmek, model çıktılarındaki belirsizliği anlamak ve parametre güven aralıklarını hesaplamak için oldukça etkilidir (Davison ve Hinkley 1997).

2.8.3. Blok Bootstrap

Blok Bootstrap Yöntemi, zaman serileri gibi bağımlı verilerin belirsizliğini analiz etmek için kullanılan bir yeniden örnekleme tekniğidir. Bu yöntemde veriler tanımlanmış bloklara bölünür ve bu bloklar rastgele seçilerek yeni örnek kümeleri oluşturulur. Bu yaklaşım, standart bootstrap yöntemlerinin etkisiz kaldığı durumlarda, özellikle de veriler arasında otokorelasyon olduğunda tercih edilir. Doğru blok boyutunun seçilmesi yöntemin başarısı için çok önemlidir. Bootstrap yönteminin benzer alternatif yöntemi olarak oldukça işlevli bir kullanım alanı sunmaktadır (Kühnsch, 1989).

2.8.4. Bulanık Mantık Yöntemi

Bulanık mantık yönteminde, klasik mantığın yeterli olmadığı durumlarda belirsizlikleri tahmin etmeyi sağlayan bir metoddur. Çevre yönetimi, sürdürülebilirlik analizi ile birlikte sera gazı emisyonlarının değerlendirmeye alınması gibi alanlarda giderek daha fazla kullanım alanı bulmaktadır. (Liu vd., 2020).

Örneğin olarak karbon ayak izi hesaplamalarında araç kullanımları, enerji verimliliği ile bireysel tüketim kısımlarında birçok değişkeni kesin değerlerle tanımlamak zor olabilir. Bu durumda, bulanık mantık analiz yöntemi, uzman görüşlerine dayalı belirsiz olan verileri matematiksel bir modele entegre etme imkanı sunar (Onat vd., 2014).

Ayrıca, çok kriterli seçenekleriyle birlikte karar verme sistemlerine entegre edilerek sürdürülebilirlik değerlendirme işlemlerinde kullanılmakta, alternatif olarak senaryoların karşılaştırılması ile birlikte optimum çözümlerin bulunması amacıyla oldukça işlevli bir araç görevi görmektedir.

2.8.5. Naive Yaklaşım

Naive yaklaşım, belirsizlik analizinin en temel yöntemlerinden biri olarak kabul edilir. Bu yöntemde her bir değişkenin belirsizliği ayrı ayrı değerlendirilir ve bu belirsizlikler elde edilen sonuçlara doğrudan yansıtılır. Birden fazla değişken içeren hipotezler test edilirken naive yöntemde her bir değişken için bağımsız t-istatistikleri hesaplanır ve ayrı ayrı analiz edilir. Ancak değişkenler arasındaki korelasyonlar göz ardı edildiğinden, özellikle yüksek korelasyonlu değişkenlerde bu yaklaşımın kullanılmaması önerilmektedir. Bu nedenle, değişkenler arasında bağımsız değişkeni dikkate alan hesaplamalarda naive yöntem tercih edilmektedir (Gelman vd., 2020).

2.8.6. Latin Hypercube Sampling (LHS)

Latin Hypercube Yöntemi (LHS), çok değişkenli parametre uzaylarında daha verimli örnekleme için kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, her bir girdi değişkeninin dağılımını eşit olasılık aralıklarına böler ve her aralıktan örnekleme yaparak kombinasyonlar oluşturur. LHS, özellikle Monte Carlo simülasyonu ile karşılaştırıldığında, daha az örnekle benzer doğrulukta sonuçlar sağlar. Bu nedenle hesaplama maliyetlerinin yüksek olduğu durumlarda genellikle tercih edilmektedir (McKay vd., 1979).

2.8.7. Monte Carlo Simülasyonu

Monte Carlo Simülasyonu, matematiksel problemleri çözmek için çeşitli biçimlerde rastgele örnekler kullanan bir hesaplama tekniğidir. Sera gazı emisyon envanterlerinde kullanılabilen Monte Carlo modellemesinin temeli, emisyon faktörleri, faaliyet verileri ve diğer tahmini parametrelerin rastgele değerlerini ayrı olasılık dağılım fonksiyonlarından seçmek ve karşılıklı gelen emisyonları hesaplamaktır. Monte Carlo modellemesi genellikle belirsizliklerin büyük olduğu, dağılımların Gauss olmadığı ve envanterin farklı yılları için belirsizliklerin mevcut olduğu durumlarda kullanılır. Monte Carlo modellemesinde, her bir girdi için tanımlanan olasılık dağılım fonksiyonlarına göre rastgele örnekler oluşturulur. Oluşturulan rastgele örnekler modele girilir ve model çıktıları tahmin edilir. Bu süreçte iterasyon sayısı istenildiği kadar tekrarlanabilir ve iterasyon sayısı arttıkça sonuçların hassasiyetinin artması beklenir (IPCC, 2006a).

2.8.8. MCS W/ CTV Analizi

Monte Carlo Simülasyonu (MCS) varyans katkı analizi, model çıktılarında belirsizliğe neden olan girdileri belirlemek için kullanılır. Bu yöntem, her bir girdi değişkeninin genel belirsizliğe katkısını ölçer. CTV analizi, özellikle sera gazı emisyon modelleri gibi karmaşık sistemlerde hangi girdilerin belirsizliğe en fazla katkıda bulunduğunu belirlemek için kullanılır. Bu sayede veri toplama ve model geliştirme araştırmaları daha verimli bir şekilde yönlendirilebilir (Kong vd., 2019).

2.8.9. Yayılma Tabanlı Yöntem

Yayılım Tabanlı Yöntem, ölçüm belirsizliklerinin model çıktılarına nasıl yayıldığını analiz etmek için kullanılan klasik yöntemdir. Bu yöntem, özellikle mühendislik ve fiziksel ölçümlerde sıklıkla tercih edilmektedir. Temel olarak, bir fonksiyonun çıktısındaki belirsizlik, girdi verilerindeki belirsizliklerden ve fonksiyonun bu girdi verilerine olan duyarlılığından hesaplanır. Bu özellikle doğrusal fonksiyonlar için geçerlidir, ancak doğrusal olmayan fonksiyonlara da uygulanabilir (Taylor, 1997).

Dağılıma dayalı yöntemde, bir fonksiyonun çıktısındaki belirsizlik, her bir girdi değişkeninin varyansı ve kovaryansı dikkate alınarak hesaplanır. Değişkenler bağımsızsa, bu hesaplama basitleştirilir. Ancak, bağımlı değişkenler varsa, kovaryans terimleri devreye girer ve daha karmaşık hesaplamalar gerekir. Dağılıma dayalı

yöntem, ölçüm cihazlarının doğruluğu biliniyorsa, bu belirsizliğin sistemin çıktısını nasıl etkileyeceğini analitik olarak gösterebilir. Bu yöntem genellikle bilimsel ve mühendislik hesaplamalarında kullanılır, ancak karmaşık sistemlerdeki değişkenler arasındaki etkileşimi göz ardı ettiği için kullanımı sınırlı olabilir. Buna ek olarak, doğrusal olmayan sistemler için daha gelişmiş yöntemler gerekebilir. Monte Carlo modellemesi gibi daha sofistike analizler bu aşamada devreye girebilir (Bevington ve Robinson, 2003).

2.8.10. Goodman Tahmin Edici

Goodman tahmini, özellikle olasılık teorisinde, koşullu olaylar arasındaki karşılıklı ilişkileri tahmin etmek için kullanılan bir tekniktir. Goodman-Nguyen oranı, koşullu olaylar arasındaki örtüşme ilişkisini özetler ve bu nedenle belirsizlik ölçümlerinde kullanılabilir. Bu yaklaşım, özellikle belirsizlik olasılık teorisinde alt ve üst olasılıkların doğal uzantılarını belirlemek için kullanılır. Bu şekilde, daha geniş bir çerçevede belirsizlik tahmin edilebilir (Coolen vd., 2013).

2.8.11. Rosenblueth Nokta Tahmin Yöntemi (RPEM)

Rosenbluth Nokta Tahmin Yöntemi (RPEM) belirsizlik analizinde kullanılan deterministik bir yaklaşımdır. Bu yöntem, her bir belirsiz parametre için belirli sayıda nokta seçer ve model çıktılarını bu noktalara göre hesaplar. RPEM, özellikle hesaplama maliyetinin yüksek olduğu durumlarda Monte Carlo simülasyonuna alternatif olarak kullanılır. Bu yöntem, daha az sayıda simülasyon ile belirsizlik analizleri gerçekleştirme olanağı sağlar (Rosenblueth, 1975).

2.8.12. Hong Nokta Tahmin Yöntemi (HPEM)

Hong Noktası Tahmin Yöntemi (HPEM) belirsizlik analizlerinde kullanımı bulunan bir diğer deterministik yaklaşımdır. Bu yöntem, özellikle mühendislik uygulamaları ile birlikte belirsizliklerin etkisini tahmin etmek amacıyla kullanılır. HPEM, her belirsiz parametre için belirli sayıda nokta seçer ve model çıktılarını bu noktalara göre hesaplar. Bu yöntem özellikle zaman ve kaynak kısıtlamalarının olduğu durumlarda tercih edilmektedir (Hong, 1998).

Tablo 2.3' de farklı belirsizlik analizi metotlarının sektörlerde kullanım alanına göre oluşturulan genel dağılımları verilmektedir.

Tablo 2.3. Literatürde Kullanılan Alternatif Belirsizlik Analizi Yöntemler

Kaynak	Sektör	Monte Carlo Simülasyonu	Yayılma Tabanlı Yöntem	Naive Yaklaşım	Monte Carlo Simülasyonu ile Varyans Katkısı	Goodman Tahmin Edici	Bootstrap Yöntemi	Blok Bootstrap Yöntemi	Latin Hypercube Sampling	Bayes Metodu	Rosenblueth Nokta Tahmin	Hong Nokta Tahmin Yöntemi	Bulanık Mantık Teori
Fortin, 2021	Sera Gazı (Biyokütle ve Turba)	X	X	X		X							
Lee ve ark., 2020	Sera Gazı (Tarım)	X					X						
Lee ve ark., 2017	Sera Gazı (Tarım)	X						X					
Yu ve ark., 2001	Yağış akış modeli	X							X		X	X	
Park et al., 2019	Sera Gazı (Tarım)	X			X								
Camacho vd., 2015	Hidrolik ve Hidrodinamik Model	X								X			X
Doktor ve al., 1988	Yeraltı Suyu Akış Modeli	X							X				
Romano ve diğerleri al., 2004	Hava Emisyonu Verisi	X					X						
Salway, 2010	Sera Gazı (Tüm Sektörler)	X	X				X		X				
Fausser vd., 2012	Sera Gazı (Tüm Sektörler hariç, LULUCF)	X	X										
Garcia-Alfonso ve Cordova-Esparza, 2018	Kamera Kalibrasyon Modeli	X							X				
Kim ve Bahadori-Jahromi, 2017	Bina Simülasyon Modeli	X											X
McCandless ve Gustafson, 2017	Kalp Yetmezliği Verileri	X								X			

Tablo 2.4. Farklı Üniversite Kampüsleri İçin Karbon Ayak İzi Değerlendirme Özeti

ÜNİVERSİTE	YIL	ECO ₂ /YIL	KAYNAK
Oulu, FI	2020	745.83	(Javid, 2022)
Oulu, FI	2019	15,827	(Kiehle et al., 2021)
Autónoma de México, MX	2020	7199.29	(Alanis et al., 2021)
Maiêutica, PT	2019	2937	(Veludo et al., 2021)
Unal, CO	2019	7238.91	(Cano et al., 2022)
Bournemouth, UK	2019	2140	(Filimonau et al., 2020)
Afe caballa, NG	2019	12,837.037	(Folorunso et al., 2020)
ESNE Madrid, ES	2019	255,546	(Filippone et al., 2021)
Rijeka, HR	2019	1039	(Žiković et al., 2020)
Hassanuddin, ID	2019	2203.035	(Zakaria et al., n.d.)
Teremgganu, MY	2018	1,209,743.2	(Abdullah et al., 2019)
Jaume I, ES	2018	11,083	(Valls- Val & Bovea, 2022)
Sharjah, AE	2018	94,553.3	(Samara et al., 2022)
EAN, CO	2018	2.08	(García- Alaminos et al., 2022)
Diponegoro, ID	2018	16,345.83	(Ivanova et al., 2020)
OMÜ, TR	2024	85323,455	(Omü,2021)

Farklı üniversitelere ait karbon ayak izi verileri incelendiğinde, yıllık bazda hesaplaması yapılan kampüslerin genel verileri Tablo 2.4’de görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde üniversiteler arasında genel olarak kapsam, metodoloji ile birlikte, veri kalitesinde değişiklik olduğu görülmektedir. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kurupelit Kampüsüne ait toplam karbon ayak izi sonucu 85323,455 tCO₂e olarak tabloda görülmektedir. Genel olarak karbon ayak izi hesaplamalarının çoğunlukla her üniversitede raporlandığı görülse de, literatürde üniversite bazında belirsizlik hesaplamalarının neredeyse hiç yapılmadığı veya nadiren hesaplamalarının olduğu görülmektedir. Bu çalışma, üniversiteye ait belirsizlik hesaplamalarını ve raporlamalarını gerçekleştiren, kapsamlı olarak ele alan az sayıda üniversiteler arasında yer alarak öne çıkmaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Organizasyonel Sınırların Belirlenmesi

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, 1 Nisan 1975 tarihinde Samsun'da kurulmuş bir devlet üniversitesidir. Üniversite bünyesinde 21 fakülte, 4 enstitü, 1 konservatuvar, 1 yüksekokul ve 14 meslek yüksekokulu olmak üzere toplam 41 akademik birim bulunmaktadır. 2024-2025 eğitim-öğretim yılı itibarıyla toplam 49.487 öğrenci, 2318 akademik personel ve 4291 idari personele bulunmaktadır.

Üniversitenin ana yerleşkesi olan Kurupelit Kampüsü ise Samsun'un Atakum ilçesinde, Karadeniz kıyısında yaklaşık 8.800 dönümlük bir alan üzerine kurulmuştur. Kurupelit Yerleşkesi'nde 12 fakülte, 1 yüksekokul, 3 enstitü, 1 konservatuvar ve çok sayıda araştırma merkezi yer almaktadır. Şekil 3.1'de OMÜ Kurupelit kampüsüne ait uydu görüntüsü verilmektedir. Kurupelit Yerleşkesi'nin coğrafi 41.3694° Kuzey ve 36.2108° Doğu koordinatları ile tanımlanmıştır.



Şekil 3.1. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kurupelit Kampüsü Uydu Görüntüsü (Google Earth, 2025)

Konsolidasyon sınırlarının belirlenmesi için kampüs dahilinde organizasyonel birimlerden elde edilen emisyon verileri bir araya getirilerek toplanır ve raporlanır. Burada Üniversite Yönetiminin tam yetkiye sahip olduğu operasyonların emisyonları dahil edilmiştir. Dolayısıyla kampüs dahilinde olan ve Kredi Yurtlar Genel Müdürlüğü'ne bağlı olan tüm öğrenci yurtları organizasyon sınırlarının dışına alınmıştır. Aynı şekilde Üniversite Yönetiminin tam yetkili olmadığı Teknopark, Yaşam Merkezinde yer alan özel firmalara kiralanmış kafeteryalar, market, kırtasiye ve diğer kuruluşlar da organizasyon sınırları dahilinden çıkarılmıştır.

3.2. Raporlama Sınırlarının ve Baz Yılıının Belirlenmesi

Raporlama sınırları ISO 14064-1:2018 standardına uygun olarak belirlenmiş olup Tablo. 3.1’de raporlamaya esas olan kategori ve alt kategorilere göre verilmiştir.

ISO 14064-1:2018’e göre temel yıl, sera gazı emisyonlarının veya uzaklaştırmalarının zaman içinde karşılaştırılması için temel oluşturan belirli yıl veya yıllar olarak tanımlanır. Temel yıl belirlenirken faaliyetlerin temsil kabiliyeti, veri kalitesi ve izlenebilirliği göz önünde bulundurulmalıdır. Kurumsal yapıdaki önemli değişiklikler, metodoloji güncellemeleri, veri hatalarının düzeltilmesi veya sera gazı kısıtlamalarındaki değişiklikler gibi durumlarda, temel yıl verileri yeniden hesaplanmalıdır (ISO, 2018).

Temel yıl, bir kuruluşun mevcut sera gazı emisyonlarını izlemeye başladığı temel yıl olarak tanımlanır ve o yıla ait emisyonların izlenmesi ve karşılaştırılması için bir başlangıç noktası sağlar. Temel yıl için sera gazı emisyon envanteri, o yıl için emisyonları daha ayrıntılı olarak gösterir ve emisyonların kaynağını, hacmini ve dağıtım oranını ifade eder. Tez aşamasında raporlama sınırı 2021 olarak alınmıştır.

3.3. Sera Gazı Kaynaklarının Belirlenmesi

Belirlenen raporlama sınırlarındaki doğrudan ve dolaylı emisyon kaynakları belirlenmiştir. Belirlenen sera gazları ve kapsamları:

Kapsam-1 (doğrudan emisyonlar); kuruluşun doğrudan kontrolü altındaki kaynaklardan çıkan üniversiteye ait doğalgazla, araçların yakıt tüketimi çalışan ısıtma sistemleri, jeneratörler ve laboratuvarlardaki kimyasal süreçlerden kaynaklanan doğrudan salımlar vb. yer alır. Kapsam 1 dahilinde, kategori 1 kaynaklarını içermektedir.

Kapsam-2 (dolaylı emisyonlar); satın alınan elektrik, ısıtma, soğutma gibi enerjilerden dolayı oluşan dolaylı emisyonlar olup, üniversitenin dışarıdan satın aldığı elektrik gibi dolaylı enerji kaynaklarından oluşan emisyonları kapsar. Bu bağlamda Kurupelit Kampüsü’nde tüketilen şebeke elektriği ve varsa dış tedarikli buhar veya merkezi ısıtma sistemleri bu sınıfa girer. Kapsam 2 dahilinde, kategori 2 kaynaklarını içermektedir.

Kapsam-3 (diğer dolaylı emisyonları); üniversitenin kontrolü dışında gerçekleşen ancak faaliyetleriyle bağlantılı emisyonlardır. Gönüllü olarak veya

kapsamlı analiz için dahil edilir. Bunlar arasında öğrenci ve personelin toplu taşıma, özel araç ya da servis kullanarak kampüse ulaşımı; üniversiteye malzeme ve kargo taşıyan araçlar, kampüs kaynaklı atık yönetimi; su kullanımı ve atıksu arıtımı; çalışanların iş seyahatleri ile üniversite tarafından satın alınan ürün ve hizmetlerin üretim ve taşınmasından kaynaklanan emisyonlar yer alır. Kapsam 3 dahilinde, kategori 3, 4, 5 ve 6 kaynaklarını içermektedir.

Sera gazı kaynaklarına ait envanter ile birlikte raporlama sınırlarının belirlenmesi oldukça önem arz etmektedir. İklim değişikliği ile mücadele kapsamında bir kuruluşun gerçekleştireceği en temel adımlardan biridir. Envanter sınırlarının net bir şekilde tanımlanması, hangi kaynak ve emisyonların dahil olacağının belirlenmesi hesaplamaların tutarlı olmasını ve karşılaştırılabilir olmasını sağlamaktadır. Raporlama sınırlarının oluşturulması ise şeffaflık, güvenilirlik ve gerekli işlemlerin tamamlanması için kritik öneme sahiptir. Karar vericiler, paydaş gruplar ve denetleyici mekanizmalar için şeffaf değerlendirme sunarak iklim stratejileri ile birlikte alınabilecek diğer önlem ve kararlarda güvenilirlik sağlamaktadır.

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kurupelit Kampüsü karbon ayak izi hesaplamalarının gerçekleştirilmesi amacıyla sera gazı kaynakları incelenerek hesaplama dahil edilecek emisyon kaynaklarına ait başlıklar belirlenmiştir. Burada emisyon kaynaklarının seçimi için kapsam 1, kapsam 2 ve kapsam 3 başlıkları ile birlikte kategorileri detaylıca incelenerek üniversite bünyesinde değerlendirmeye alınabilecek, üniversitenin tam yetkisinin bulunduğu alanlar uygulamaya dahil edilmiştir. Üniversitenin tam yetkisinin bulunmadığı alanlar veya üniversitenin mevcut sera gazı kaynaklarına ait faaliyetinin bulunmadığı alanlar kapsam alanlarının dışında tutulmuştur.

Tablo 3.1’de Kurupelit Kampüsüne ait raporlama sınırları oluşturulmuş ve kapsam, emisyon türleri ve kaynaklarla ilgili sınıflarına göre düzenleme yapılmıştır. Raporlamaya dahil edilecek başlıklar tabloda detaylıca belirtilerek sunulmuştur. Sera gazı kaynaklarının, sera gazı envanterlerinin ve raporlama sınırlarının belirlenmesiyle birlikte genel oluşum süreci tamamlanarak hesaplama adımlarına geçilmiştir. Hesaplama kısımları diğer bölümlerde detaylıca verilmektedir.

Tablo 3.1. OMÜ Kurupelit Kampüsü Karbon Ayak İzi Raporlaması Sınırı

Kategori	Kapsam	Emisyon Türü	Kaynak	Raporlama Sınırına Dahil Olma
1	1	Sabit yanmadan kaynaklanan doğrudan salımlar Hareketli yanmadan kaynaklanan doğrudan salımlar (Doğrudan)	Sabit Yanma: Isınma Amaçlı Doğal gaz	√
			Sabit Yanma: Dizel Jeneratör	√
			Sabit Yanma: LPG	X
			Sabit Yanma: Proses Emisyonları	X
			Kaçak Emisyonlar: Kyoto Gazları (ekipman bağlantıları, soğutma kuleleri, klima gazları ve yangın tüpleri vb. kaçaklar)	X
			Atık Arıtımı: Atıksu Arıtma Tesis	X
			Atık Arıtımı: İçme Suyu Arıtma Tesis	X
2	2	İthal Edilen Enerji Kaynaklı (Dolaylı)	Kuruma Ait Servisler (Dizel, Benzinli, Elektrikli)	√
			İthal edilen enerji kaynaklı (Elektrik)	√
3	3	Ulaştırma Kaynaklı (Diğer Dolaylı)	(Yukarı Yönlü) Kuruma Hizmet Veren Kuruluşlar ve Kurum Personelin Şahsi Araçları (Dizel, Elektrik, Benzin, Motosiklet)	√
			(Aşağı Yönlü) Taşıma ve Dağıtım (Otobüs, Minibüs, Hafif Raylı Sistem)	√
			(Yukarı Yönlü) İş Seyahatleri (Hava yolu, Karayolu)	X
4	3	Kuruluş Tarafından Kullanılan Ürünlerden Kaynaklı (Diğer Dolaylı)	(Yukarı Yönlü) Yatırım Malları	X
			(Yukarı Yönlü) Kullanılan Ürün Kaynaklı (Satın Alınan Mal ve Hizmetler)	X
			(Yukarı Yönlü) Atık Oluşumu (Organik, Kağıt, Su, Diğer)	√

Tablo 3.1. OMÜ Kurupelit Kampüsü Karbon Ayak İzi Raporlaması Sınırı (devamı)

Kategori	Kapsam	Emisyon Türü	Kaynak	Raporlama Sınırına Dahil Olma
5	3	Kuruluş Ürünlerinin Kullanımı İle İlişkili (Diğer Dolaylı)	(Yukarı Yönlü) Kiralanan Varlıklar	X
			(Aşağı Yönlü) Kiralanan Varlıklar	X
			(Aşağı Yönlü) Satın Alınan Ürünlerin İşlenmesi	X
			Ürünlerin İşlenmesinde Yaşam Döngüsünün Sonu	X
			(Aşağıya Yönlü) Franchising İmtiyaz Hakkı	X
			(Aşağıya Yönlü) Yatırımlar (İnşaatlar)	X
6	3	Diğer Kaynaklardan Gelen (Diğer Dolaylı)	Kompostlaştırma	√
			Tarım Arazileri	√
			Hayvan Yetiştirme	√
			Yeşil Alanlar	√

3.4. Hesaplama Metodolojisinin Belirlenmesi

Ondokuz Mayıs Üniversitesi sorumluluğunda Kurupelit Kampüsünde gerçekleştirilen operasyonlara ilişkin sera gazı emisyonlarını ve uzaklaştırmalarını kuruluş seviyesinde hesaplamak ve ISO 14064-1:2018 standardının gerekliliklerine göre yapmaktadır. Tablo 3.1’de verilen emisyon kaynaklarında ölçüm sistemleri mevcut olmadığından hesaplama bazlı metodoloji kullanılmıştır. Hesaplama metodoloji referansları ise; ISO 14064-1:2018, Greenhouse Gas Protocol (GHG), Uluslararası İklim Değişimi Paneli (IPCC), DEFRA, ve diğer Protokol ve veri bankaları kullanılmıştır. Hesaplamaların esasında kullanılan sera gazı karbondioksittir. Ayrıca nitroz oksit (N₂O) ve metan (CH₄) sera gazları da hesaplamaya dahil edilmiştir. Toplam karbon ayak izi verisinin oluşturulmasında ton başına eşdeğer karbon ifadesi kullanılmıştır. Bu nedenle nitroz oksit ve metan gazlarının karbon dioksit dönüşümleri IPCC’ nin AR& raporunda verilen 100 yıllık Küresel Isınma Potansiyelleri (KIP) ile yapılmıştır. Eşdeğer karbondioksit miktarı;

$$\text{ton} \frac{eCO_2}{\text{yıl}} = \text{Faaliyet Verisi} \times \text{Emisyon Faktörü} \times \text{KIP Katsayısı}$$

3.5. Veri Seçme ve Toplama

Metodolojiye uygun faaliyet verileri Üniversitenin Kalite Yönetim Sistemi proseslerine uygun şekilde toplanmış ve kontrol edilmiştir. Veri seçme ve toplama adımları tamamlanarak hesaplama kısmı için genel oluşum tamamlanmıştır.

3.6. Sera Gazı Uzaklaştırmaları ve Yutakları

Üniversitenin kendi mali ve idari kontrolünde olan tesislere ait hesaplanmış bütün sera gazı emisyonlarından ve/veya uzaklaştırmalarından sorumludur. Bu nedenle sera gazı emisyonlarının ve uzaklaştırmalarının birleştirilmesinde “Operasyonel Kontrol Yaklaşımı” metodu seçilmiştir. Kuruluş sınırları içerisinde yutak niteliği taşıyacak seviyede ağaçlandırma faaliyeti bulunmaktadır. Ağaçlandırma faaliyeti yutak kaynağı olarak ayrıca hesaplanmış ve nötr karbon hesabında kullanılmıştır. Üniversite Kurupelit Kampüsü’nde faaliyet sahası içerisinde, yutak olarak değerlendirilerek sera gazı emisyonlarının indirgenmesi için hesaplamalara katılabilecek yeşil alan ve faaliyetler Tablo 3.1’de verilmiştir. Yeşil alanlara ait genel bilgi ve veriler ayrıca detaylandırılmıştır. Üniversite bünyesinde biyolojik kökenli emisyonlar ise Tablo 3.2’de verilmektedir.

Tablo 3.2. OMÜ Kurupelit Kampüsü Raporlama Sınırlarındaki Biyolojik Kökenli Emisyonlar

Tür	Kaynak	Emisyon türü
Organik Atık Ayrışması	Kompostlaştırma	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
Atıksu Arıtma	Arıtmadaki Biyolojik süreçler	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
Arazi Kullanımı, Arazi Kullanım Değişikliği ve Ormancılık	Kampüs dahilindeki tüm yeşil alanlar ve çayır-orman statüsündeki alanları	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
Tarımsal Faaliyetler	Ziraat Fakültesinin Ekili Tarım Alanları	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
Hayvansal Faaliyetler	Ziraat Fakültesinin Hayvan Yetiştirme Birimleri	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O

3.7. Karbon Ayak İzi Hesaplamalarında Kullanılacak Formüller

3.7.1. Kategori 1 Hesaplamaları

Kojen Ünitesi doğalgaz tüketimi emisyon türlerinin kategori 1 bazında hesaplanması yapılarak kullanılan işlemlerde Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) protokollerinde yayınlanan baz yılına ait kılavuzlar kullanılarak uygun emisyon faktörü değerleriyle birlikte hesaplamalar yapılmıştır. Burada standart metreküp (sm³) olmak üzere Kojen Ünitesi doğalgaz tüketimi kaynaklı sera gazı ton eşdeğer karbondioksit olarak aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır;

$$tCO_{2e} = Veri (TJ) \times [(EF_{CO_2}(kg \text{ faktör}) \times KIP_{CO_2}) + (EF_{CH_4}(kg \text{ faktör}) \times KIP_{CH_4}) + (EF_{N_2O}(kg \text{ faktör}) \times KIP_{N_2O})]$$

Burada Küresel Isınma Potansiyelleri (KIP) karbon dioksit için 1, metan için 27,9 ve nitroz oksit için 273 alınmıştır. TJ olarak veri değeri ise aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır;

$$Veri (TJ) = Veri (sm^3) \times 8250 \text{ kcal}/m^3 \times 4186,8 \times 10^{-12}$$

Dizel jeneratör için TJ olarak veri değeri ise;

$$Veri (TJ) = Veri (saat) \times Tüketim \left(\frac{L}{saat} \right) \times Verim \times 10200 \text{ kcal}/kg \times 4186,8 \times 10^{-12}$$

Dizel araçlar emisyon türlerinin kategori 1 bazında hesaplanması yapılarak kullanılan işlemlerde Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) protokollerinde yayınlanan baz yılına ait kılavuzlar kullanılarak uygun emisyon faktörü değerleriyle birlikte hesaplamalar yapılmıştır. Burada, sera gazı ton eşdeğer karbondioksit olarak aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır;

$$tCO_{2e} = Veri (TJ) \times [(EF_{CO_2}(kg \text{ faktör}) \times KIP_{CO_2}) + (EF_{CH_4}(kg \text{ faktör}) \times KIP_{CH_4}) + (EF_{N_2O}(kg \text{ faktör}) \times KIP_{N_2O})]$$

Burada Küresel Isınma Potansiyelleri (KIP) karbon dioksit için 1, metan için 27,9 ve nitroz oksit için 273 alınmıştır. TJ olarak veri değeri ise aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır;

$$Veri (TJ) = Veri (L) \times Verim \times 10200 \text{ kcal/kg} \times 4186,8 \times 10^{-12}$$

3.7.2. Kategori 2 Hesaplamaları

İthal edilen enerji kaynaklı emisyon türlerinin kategori 2 bazında hesaplanması yapılarak kullanılan işlemlerde T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı protokollerinde yayınlanan baz yılına ait kılavuzlar kullanılarak uygun emisyon faktörü değerleriyle birlikte hesaplamalar yapılmıştır. Burada, sera gazı ton eşdeğer karbondioksit olarak aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır;

$$tCO_{2e} = Faaliyet Verisi \times [(EF_{CO_2}(kg \text{ faktör}) \times KIP_{CO_2}) + (EF_{CH_4}(kg \text{ faktör}) \times KIP_{CH_4}) + (EF_{N_2O}(kg \text{ faktör}) \times KIP_{N_2O})]$$

Kılavuzlarda belirtilen emisyon faktör değerleri tanımlanan gaz grubuna göre formülde hesaplamaya dahil edilerek işlem yapılır. Eğer kılavuzda emisyon faktörleri KIP değerleriyle çarpılmış olarak verilmişse, bu değer doğrudan kullanılır.

3.7.3. Kategori 3 Hesaplamaları

Ulaştırma kaynaklı emisyon türlerinin kategori 3 bazında hesaplanması yapılarak kullanılan işlemlerde İngiltere Çevre, Gıda ve Tarım Bakanlığı (DEFRA) protokollerinde yayınlanan baz yılına ait kılavuzlar kullanılarak uygun emisyon faktörü değerleriyle birlikte hesaplamalar yapılmıştır. Burada, sera gazı ton eşdeğer karbondioksit olarak aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır;

$$tCO_{2e} = \text{Faaliyet Verisi}$$

$$\times [(EF_{CO_2}(kg \text{ faktör}) \times KIP_{CO_2}) + (EF_{CH_4}(kg \text{ faktör}) \times KIP_{CH_4}) \\ + (EF_{N_2O}(kg \text{ faktör}) \times KIP_{N_2O})]$$

Kılavuzlarda belirtilen emisyon faktör değerleri tanımlanan gaz grubuna göre formülde hesaplamaya dahil edilerek işlem yapılır. Eğer kılavuzda emisyon faktörleri KIP değerleriyle çarpılmış olarak verilmişse, bu değer doğrudan kullanılır.

3.7.4. Kategori 4 Hesaplamaları

Kuruluş Tarafından Kullanılan Ürünlerden Kaynaklı başlıkta verilen kategori 4 bazında hesaplanması yapılarak kullanılan işlemlerde İngiltere Çevre, Gıda ve Tarım Bakanlığı (DEFRA) protokollerinde yayınlanan baz yılına ait kılavuzlar kullanılarak uygun emisyon faktörü değerleriyle birlikte hesaplamalar yapılmıştır. Burada, sera gazı ton eşdeğer karbondioksit olarak aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır;

$$tCO_{2e} = \text{Faaliyet Verisi}$$

$$\times [(EF_{CO_2}(kg \text{ faktör}) \times KIP_{CO_2}) + (EF_{CH_4}(kg \text{ faktör}) \times KIP_{CH_4}) \\ + (EF_{N_2O}(kg \text{ faktör}) \times KIP_{N_2O})]$$

Kılavuzlarda belirtilen emisyon faktör değerleri tanımlanan gaz grubuna göre formülde hesaplamaya dahil edilerek işlem yapılır. Eğer kılavuzda emisyon faktörleri KIP değerleriyle çarpılmış olarak verilmişse, bu değer doğrudan kullanılır.

3.7.5. Kategori 5 Hesaplamaları

Kuruluş ürünlerinin kullanımı ile ilişkili başlıkta verilen kategori 5 bazında verilen sera gazı emisyon kaynakları incelendiğinde Ondokuz Mayıs Üniversitenin yetki alanında olmayan kaynakların yer aldığı ve üniversitenin ilgili alanlarla alakalı faaliyetinin olmaması gibi nedenlerden dolayı belirtilen emisyon kaynakları detaylıca incelenmiş olup, Kurupelit Kampüsü karbon ayak izi hesaplamalarında kategori 5 kısmı raporlamaya dahil edilmemiştir. Sera gazı raporlama sınırları alanında ilgili kısım bilgileri verilerek hesaplamaya dahil edilmediği ayrıca belirtilmiş ve toplam karbon ayak izi miktarına herhangi bir etkisi bulunmamaktadır.

3.7.6. Kategori 6 Hesaplamaları

Diğer Kaynaklardan gelen emisyon türlerinin kategori 6 bazında hesaplanması yapılarak kullanılan işlemlerde Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC)

protokollerinde yayınlanan baz yılına ait kılavuzlar kullanılarak uygun emisyon faktörü değerleriyle birlikte hesaplamalar yapılmıştır. Burada, sera gazı ton eşdeğer karbondioksit olarak aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır;

$$tCO_{2e} = Faaliyet Verisi$$

$$\times [(EF_{CO_2}(kg \text{ faktör}) \times KIP_{CO_2}) + (EF_{CH_4}(kg \text{ faktör}) \times KIP_{CH_4}) + (EF_{N_2O}(kg \text{ faktör}) \times KIP_{N_2O})]$$

Burada Küresel Isınma Potansiyelleri (KIP) karbon dioksit için 1, metan için 27,9 ve nitroz oksit için 273 alınmıştır. Kılavuzlarda belirtilen emisyon faktör değerleri tanımlanan gaz grubuna göre formülde hesaplamaya dahil edilerek işlem yapılır. Eğer kılavuzda emisyon faktörleri KIP değerleriyle çarpılmış olarak verilmişse, bu değer doğrudan kullanılır.

Genel itibariyle Tablo 3.1’de verilen sera gazı emisyon kaynakları ve raporlama sınırları içerisinde yer alan emisyon türleri kapsam ve kategori bazında incelenerek karbon ayak izi hesaplamalarının gerçekleştirilmesi için uygun formüllerin oluşturulması sağlanmıştır. Bu kısımda Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) protokolleri, İngiltere Çevre, Gıda ve Tarım Bakanlığı (DEFRA) protokolleri başta olmak üzere diğer ulusal ve uluslararası güncel kılavuzlardan alınan verilerle birlikte sağlanan hesaplama akışı oluşturulmuştur. Hesaplamalar kalıp olarak verilen formüllerle birlikte sağlanmış, burada kılavuzlarda belirtilen emisyon gazlarının yer verilmesine göre formüllere yerleştirilerek eşdeğer karbon cinsinden toplamlarına ulaşılmıştır. Burada önemli hususlardan bir diğeri kılavuzlarda verilen bazı değerlerin KIP değerleriyle çarpılmış halde olanların doğrudan hesaplanmaya dahil edilmesidir. Böylelikle bazı kategori hesaplamalarında kılavuzda verilen emisyon faktörleri direkt olarak alınarak hesaplamaya alınmıştır.

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kurupelit Kampüsü karbon ayak izi hesaplamalarında kullanılacak formüller kategori bazında açıklanarak yukarıda detaylıca verilmiş olup, mevcut hazırlanan formüllerle birlikte kampüs karbon ayak izi hesaplaması yapılacaktır. Hesaplama ile birlikte ortaya çıkan emisyon değerlerinin kategori bazında belirsizlik düzeyleri belirlenerek raporlamanın amacına ulaşması sağlanacak ve güven aralıklarıyla birlikte verilen değerlerin uygun bir şekilde değerlendirilmesi yapılacaktır.

3.8. Ölçüm Belirsizliği Hesaplama Formülleri

Karbon ayak izi hesaplamalarında ölçüm belirsizliğinin temel anlamı, mevcut ölçüm sonucunun gerçek değerinden sapmaya uğrama derecesidir. Bu belirsizlik, ölçüm aletlerinin doğruluğu, prosedür kısımlarının farklılıkları ve veri toplamaya ait yöntemlerden kaynaklanabilir (IPCC, 2006).

Karbon ayak izi emisyon değerlerinin bulunmasıyla birlikte elde edilen verilerin, ölçüm belirsizlikleri hesaplanmasında kullanılabilecek yaygın formüller genel olarak ayrı ayrı incelenerek, detaylı olarak hazırlanmıştır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) protokolleri, İngiltere Çevre, Gıda ve Tarım Bakanlığı (DEFRA) protokolleri başta olmak üzere diğer ulusal ve uluslararası güncel kılavuzlarda verilen ölçüm belirsizliği verileri baz alınarak uygun değerler oluşturulmuştur. Protokollerde yer alan ölçüm belirsizliğine ait veriler doğrudan verilmişse tanımlanan değere göre formülde doğrudan hesaplama dahil edilerek işlem yapılmaktadır. Doğrudan tanımlanmayan değerler için aşağıda verilen hesaplama metodolojileri kullanılarak işlem yapılmaktadır.

3.8.1. Aktivite Belirsizliğinin Hesaplamaları

Aktivite belirsizliği, Emisyonların hesaplama esnasında kullanılan faaliyet verilerinin eksik olması veya hata meydana gelmesi nedeniyle oluşan belirsizliklere denir (IPCC, 2006).

$$UA = \left(\frac{\sigma A}{A} \right) \times 100$$

UA: Aktivite verisinin bağıl belirsizliği (%)

σA : Aktivite verisinin standart sapması

A: Aktivite verisinin ortalama değeri

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) protokolleri, İngiltere Çevre, Gıda ve Tarım Bakanlığı (DEFRA) protokolleri başta olmak üzere diğer ulusal ve uluslararası güncel kılavuzlarda verilen aktivite belirsizliğine ait değerlendirmeler baz alınarak uygun değerler oluşturulmuştur. Protokollerde yer alan aktivite belirsizliğine ait veriler doğrudan verilmişse tanımlanan değere göre formülde doğrudan hesaplama dahil edilerek işlem yapılır. Doğrudan tanımlanmayan durumlarda yukarıdaki hesaplama metodolojileri kullanılarak işlem yapılmaktadır.

3.8.2. Emisyon Faktörü Belirsizliğinin Hesaplamaları

Emisyon faktörünün Belirsizliği, farklı koşullar, şartlar ve kaynaklardan dolayı standart olan değerlerde sapma olması sonucu ortaya çıkan belirsizlik türüdür (GHG Protocol, 2011).

$$UEF = \left(\frac{\sigma_{EF}}{EF} \right) \times 100$$

UEF : Emisyon faktörünün bağıl belirsizliği (%)

σ_{EF} : Emisyon faktörünün standart sapması

EF : Emisyon faktörünün ortalama değeri

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) protokolleri, İngiltere Çevre, Gıda ve Tarım Bakanlığı (DEFRA) protokolleri başta olmak üzere diğer ulusal ve uluslararası güncel kılavuzlarda verilen emisyon faktörü belirsizliğine ait değerlendirmeler baz alınarak uygun değerler oluşturulmuştur. Protokollerde yer alan emisyon belirsizliğine ait veriler doğrudan verilmişse tanımlanan değere göre formülde doğrudan hesaplamaya dahil edilerek işlem yapılır.

3.8.3. Bileşik Belirsizliğin Hesaplamaları

Bileşik belirsizlik genel olarak birden fazla belirsizliğe ait verilerin birlikte hesaplandığı durumdur. Genel olarak bağımsız belirsizliklerin karelerinin alınarak toplamalarının karekökünün alınmasıyla hesaplanır (IPCC, 2006).

$$U_c = \sqrt{\{ U_A^2 + U_{EF}^2 \}}$$

U_c : Bileşik bağıl belirsizlik (%)

U_A : Aktivite verisi belirsizliği (%)

U_{EF} : Emisyon faktörü belirsizliği (%)

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) protokolleri, İngiltere Çevre, Gıda ve Tarım Bakanlığı (DEFRA) protokolleri başta olmak üzere diğer ulusal ve uluslararası güncel kılavuzlarda verilen bileşik belirsizliğe ait değerlendirmeler baz alınarak gerekli işlemler yapılmıştır. Protokollerde yer alan bileşik belirsizliğe ait veriler doğrudan verilmişse tanımlanan değere göre formülde doğrudan hesaplamaya dahil edilerek işlem yapılır.

3.8.4. Mutlak Belirsizliğin Hesaplamaları

Mutlak belirsizlik bir ölçümün ya da tahminin kesin olarak değerden ne kadarlık bir sapma yapabileceğini ifade eden, aynı birimde ölçümü yapılan belirsizlik türüdür (DEFRA, 2010).

$$\Delta E = \frac{Uc \times E}{100}$$

ΔE : Emisyonun mutlak belirsizliği (tCO₂ e gibi)

Uc : Bileşik bağlı belirsizlik (%)

E : Hesaplanan toplam emisyon değeri

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) protokolleri, İngiltere Çevre, Gıda ve Tarım Bakanlığı (DEFRA) protokolleri başta olmak üzere diğer ulusal ve uluslararası güncel kılavuzlarda verilen mutlak belirsizliğe ait değerlendirmeler önceki hesaplamalara baz alınarak gerekli işlemler yapılmıştır. Mutlak belirsizliğe ait elde edilen veriler neticesinde, varyans katkılarının bulunmaları için bir sonraki aşamaya geçilmektedir.

3.8.5. Varyans Katkısının Hesaplamaları

Varyans katkısı kavramı, hesaplamalarla birlikte elde edilen mutlak belirsizlik değerlerinin karelerinin alınmasıyla birlikte işleme alınmaktadır. Burada standart bileşik belirsizliğin bulunması ve genel aralıkların oluşturulması için varyansta alınan karelerin toplamının karekökü ilgili belirsizlik değerini vermektedir. (IPCC, 2006).

$$VCi = \frac{(Ui \times Ai)^2}{\sum (Uj \times Aj)^2} \times 100$$

VCi : Kaynak i 'nin toplam bileşik belirsizliğe katkısı (%)

Ui : Kaynak i 'nin bağlı belirsizliği

Ai : Kaynak i 'nin aktivite verisi

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) protokolleri, İngiltere Çevre, Gıda ve Tarım Bakanlığı (DEFRA) protokolleri başta olmak üzere diğer ulusal ve uluslararası güncel kılavuzlarda verilen varyans katkısına ait değerlendirmeler önceki hesaplamalar baz alınarak gerekli işlemler yapılmıştır. Protokollerde yer alan varyans katkısına ait veriler doğrudan bulunan değere göre formülde hesaplamaya dahil edilerek işlem sonucu belirlenmektedir.

3.8.6. Alt Güven Sınırının Hesaplamaları

Alt güven sınırı kavramı, toplam belirsizlik içerisinde bulunan her bir bileşenin varyans katkısı olarak ne kadarlık bir etki içinde bulunduğunun ölçüsüdür. Toplam emisyon değerinden, bulunan belirsizlik değerinin çıkarılmasıyla birlikte belirlenmektedir (IPCC, 2006).

$$E_{alt} = E - \Delta E$$

E_{alt}: Alt güven sınırı (tCO₂ e)

E: Toplam emisyon

ΔE: Mutlak belirsizlik

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) protokolleri, İngiltere Çevre, Gıda ve Tarım Bakanlığı (DEFRA) protokolleri başta olmak üzere diğer ulusal ve uluslararası güncel kılavuzlarda verilen değerlendirmeler ve hesaplamalar yapılmıştır. Alt güven sınırına ait veriler bulunan değere göre formülde doğrudan hesaplamaya dahil edilerek işlem sonucu belirlenmektedir.

3.8.7. Üst Güven Sınırının Hesaplamaları

Üst güven sınırı kavramı belirli bir güven aralığında gerçek değere ait verinin üst sınırını ifade eder ve belirsizlik durumunun pozitif olarak yönünü temsil eder. Toplam emisyon değerinden, bulunan belirsizlik değerinin toplanmasıyla birlikte belirlenmektedir (IPCC, 2006).

$$E_{ust} = E + \Delta E$$

E_{alt}: Alt güven sınırı (tCO₂ e)

E: Toplam emisyon

ΔE: Mutlak belirsizlik

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) protokolleri, İngiltere Çevre, Gıda ve Tarım Bakanlığı (DEFRA) protokolleri başta olmak üzere diğer ulusal ve uluslararası güncel kılavuzlarda verilen değerlendirmeler ve hesaplamalar yapılmıştır. Üst güven sınırına ait veriler bulunan değere göre formülde doğrudan hesaplamaya dahil edilerek işlem sonucu belirlenmektedir. Bununla birlikte toplam belirsizlik değeri alt ve üst güven aralığı ile birlikte uygun güven katsayısı dahil edilerek, belirlenen güven oranıyla birlikte raporlamaya sunulmaktadır.

4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kurupelit Kampüsü'ne ait sera gazı emisyonları, üç ana kapsam altında detaylandırılmıştır. Kapsam 1 emisyonları doğrudan yakıt tüketiminden, Kapsam 2 emisyonları elektrik enerjisi kullanımından, Kapsam 3 emisyonları ise dolaylı faaliyetlerden kaynaklanan salımları kapsamaktadır. Bu emisyonlar, kampüsün karbon ayak izinin doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için farklı kaynaklardan toplanan veriler ışığında belirlenmiştir.

4.1. Kurupelit Kampüsü Karbon Ayak İzi Hesaplamaları

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kurupelit Kampüsüne ait karbon ayak izi hesaplamaları kapsamında, ilgili envanter oluşturularak emisyon kaynakları sınıflandırılmış ve gerekli sınırlamalar kapsamında hesaplamalar yapılmıştır. Sera gazları emisyonları kapsam 1, kapsam 2, kapsam 3 bazında incelenerek ilgili kategorilerinde dahil edilmesiyle birlikte detaylı bir çalışma yapılmış olup, sonuçları tablo ve grafiklerle desteklenmesi sağlanmıştır. Bununla birlikte yapılan hesaplama ve işlemlerin genel olarak karbon ayak izine neden olan emisyonların daha iyi bir şekilde görülmesi ve yorumlanması ile birlikte sonuçların iyileştirilebilmesinin sağlanmasının amaçlanmasıdır. Hesaplama sonrasında emisyonların belirsizlik değerlendirilmesi yapılarak alınabilecek önlem ve tedbirler için uygun adımların atılması sağlanacaktır.

Kapsam 1 ve dahilinde bulunan kategori 1 kısmı için, sabit yanma ve hareketli yanma hesaplamaları gerçekleştirilmiş olup, Tablo 4.1'de ve Tablo 4.2'de verilmiştir.

Genel olarak kapsam 1 ve kategori 1 kısmı için karbon ayak izi hesaplamasının 12035,6015 tCO₂e olarak sonuçlandığı ve tabloda yer verildiği görülmektedir.

Kapsam 2 ve dahilinde bulunan kategori 2 kısmı için, ithal enerjiden kaynaklı enerji hesaplamaları çerçevesinde, elektrik tüketimine ait veriler Tablo 4.3'de verilmektedir.

Genel olarak kapsam 2 ve kategori 2 kısmı için karbon ayak izi hesaplamasının 13.488,88 tCO₂e olarak sonuçlandığı ve tabloda yer verildiği görülmektedir.

Bununla birlikte kapsam 1 ve kapsam 2'nin karbon ayak izi hesaplama işlemleri tamamlanarak tablolarda gerekli veriler verilmiş olup kategori bazında, kategori 1 ve kategori 2 kısımlarının da aynı zamanda hesaplama işlemleri tamamlanmıştır.

Tablo 4.1. Kategori 1 ve Kapsam 1 Sınıfına Giren Doğrudan Emisyon Kaynak Verileri

1.1. Sabit Yanma Ekipmanı

	Veri	Birim	Dönüşüm	kg CO ₂ Faktör (KIP=1)	kg CH ₄ Faktör (KIP=27,9)	kg N ₂ O Faktör (KIP=273)	CO _{2e} Faktör	TJ Veri	kg CO ₂	kg (CH ₄)	kg (N ₂ O)	tCO _{2e}
Kojen Ünitesi Doğalgaz Tüketimi	6.100.661,64	Sm ³	8250 Kcal/sm ³	56100	1	0,1	-	210,72	11821591,93	5900,26	5584,17	11.833,08
Jeneratörün Dizel tüketimi 54,5 lt/h 0,83	480,00	Saat	10200 Kcal/sm ³	74100	3	0,6	-	0,93	68709,44	77,89	147,43	68,93
Referans: IPCC											Ara Toplam	11.902,01

Tablo 4.2. Kategori 1 ve Kapsam 1 Sınıfına Giren Doğrudan Emisyon Kaynak Verileri

1.1. Hareketli Yanma Ekipmanı (Kuruluşa Ait)

	Motor Hacmi	Ortalama (Km 2021)	Azami Ağırlık	kg CO ₂ Faktör (KIP=1)	kg CH ₄ Faktör (KIP=27,9)	kg N ₂ O Faktör (KIP=273)	CO _{2e} Faktör	TJ Veri	kg CO ₂	kg CO ₂ (CH ₄)	kg CO ₂ (N ₂ O)	tCO _{2e}
Binek araçlar	1364	13.306	-	0,1357	0,000004	0,00188	-	-	1805,624	0,053	0,025	1,81
Dizel tüketimi	2143	29.100	-	0,20533	0,000004	0,00188	-	-	5975,103	0,116	54,708	6,030
Binek araçlar	1598	9.300	-	0,18717	0,00032	0,00036	-	-	1740,681	2,976	3,348	1,747
Benzin tüketimi	1587	3.300	-	0,18717	0,00032	0,00036	-	-	617,661	1,056	1,188	0,620
Referans: DEFRA											Ara Toplam	10,207

Tablo 4.2. Kategori 1 ve Kapsam 1 Sınıfına Giren Doğrudan Emisyon Kaynak Verileri (Devamı)

1.1. Hareketli Yanma Ekipmanı (Kuruluşa Ait)

	Motor Hacmi	Ortalama (Km 2021)	Azami Ağırlık	kg CO ₂ Faktör (KIP=1)	kg CH ₄ Faktör (KIP=27,9)	kg N ₂ O Faktör (KIP=273)	CO _{2e} Faktör	TJ Veri	kg CO ₂	kg CO ₂ (CH ₄)	kg CO ₂ (N ₂ O)	tCO _{2e}
Otobüs - Dizel	-	6824	18000	1,08528	0,0002	0,01191	-	-	7405,95072	1,3648	81,27384	7,488589
Otobüs - Dizel	-	8315	18000	1,08528	0,0002	0,01191	-	-	9024,1032	1,663	99,03165	9,124798
Otobüs - Dizel	-	6712	13500	0,67911	0,00012	0,00729	-	-	4558,18632	0,80544	48,93048	4,607922
Otobüs - Dizel	-	15889	5000	0,51576	0,0001	0,00598	-	-	8194,91064	1,5889	95,01622	8,291516
Otobüs - Dizel	-	1493	6480	0,51576	0,0001	0,00598	-	-	770,02968	0,1493	8,92814	0,779107
Otobüs - Dizel	-	5582	8000	0,67911	0,00012	0,00729	-	-	3790,79202	0,66984	40,69278	3,832155
Otobüs - Dizel	-	1413	16990	0,67911	0,00012	0,00729	-	-	959,58243	0,16956	10,30077	0,970053
Otobüs - Dizel	-	7743	17537	1,08528	0,0002	0,01191	-	-	8403,32304	1,5486	92,21913	8,497091
Otobüs - Dizel	-	7148	17500	1,08528	0,0002	0,01191	-	-	7757,58144	1,4296	85,13268	7,844144
Otobüs - Dizel	-	15686	16900	0,67911	0,00012	0,00729	-	-	10652,51946	1,88232	114,35094	10,76875
Otobüs - Dizel	-	13815	17500	1,08528	0,0002	0,01191	-	-	14993,1432	2,763	164,53665	15,16044
Minibüs - Dizel	-	3214	4100	0,51576	0,0001	0,00598	-	-	1657,65264	0,3214	19,21972	1,677194
Minibüs - Dizel	-	19001	3500	0,26343	-	0,00186	-	-	5005,43343	0	35,34186	5,040775
Minibüs - Dizel	-	28802	3700	0,51576	0,0001	0,00598	-	-	14854,91952	2,8802	172,23596	15,03004
Minibüs - Dizel	-	21455	3500	0,26343	-	0,00186	-	-	5651,89065	0	39,9063	5,691797
Minibüs - Dizel	-	5195	2800	0,26343	-	0,00186	-	-	1368,51885	0	9,6627	1,378182
Kamyon – Dizel	-	8678	25000	1,0542	0,00012	0,0119	-	-	9148,3476	1,04136	103,2682	9,252657
Kamyon – Dizel	-	1669	8000	0,67911	0,00012	0,00729	-	-	1133,43459	0,20028	12,16701	1,145802
Kamyon – Dizel	-	7987	8500	0,67911	0,00012	0,00729	-	-	5424,05157	0,95844	58,22523	5,483235
Kamyonet - Benzin	-	76	3500	0,31233	0,00024	0,00049	-	-	23,73708	0,01824	0,03724	0,023793
Kamyonet - Dizel	-	4887	3216	0,26343	-	0,00186	-	-	1287,38241	0	9,08982	1,296472
Referans: DEFRA											Ara Toplam	123,3845
											TOPLAM	12035,6015

Tablo 4.3. Kategori 2 ve Kapsam 2 Sınıfına Giren Dolaylı Emisyon Kaynak Verileri

2. İthal Edilen Enerji

Veri	Birim	Dönüşüm	kg CO ₂ Faktör (KIP=1)	kg CH ₄ Faktör (KIP=27,9)	kg N ₂ O Faktör (KIP=273)	CO _{2e} Faktör	TJ Veri	kg CO ₂	kg CO ₂ (CH ₄)	kg CO ₂ (N ₂ O)	tCO _{2e}
Elektrik Tüketimi	30.556.544 kWh	-	-	-	-	0,44	tCO _{2e} /MWh	13444879,36	-	-	13.444,88
Referans: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı										TOPLAM	13.444,88

Tablo 4.4. Kategori 3 ve Kapsam 3 Sınıfına Giren Diğer Dolaylı Emisyon Kaynak Verileri

3. Ulaştırma Kaynaklı (Kuruma Hizmet Veren Kuruluşlar ve Kurum Personelin Şahsi Araçları – Kiralık Araçlar)

Motor Hacmi	Ortalama km	Azami Ağırlık	kg CO ₂ Faktör (KIP=1)	kg CH ₄ Faktör (KIP=27,9)	kg N ₂ O Faktör (KIP=273)	CO _{2e} Faktör	TJ Veri	kg CO ₂	kg CO ₂ (CH ₄)	kg CO ₂ (N ₂ O)	tCO _{2e}
Otomobil - Dizel	1300	22000	0,1357	0,000004	0,00188	-	-	2985,4	0,088	41,36	3,026848
Otomobil – Dizel	1500	12200	0,1357	0,000004	0,00188	-	-	1655,54	0,0488	22,936	1,678525
Otomobil – Dizel	1499	25000	0,1357	0,000004	0,00188	-	-	3392,5	0,1	47	3,4396
Referans: DEFRA										Ara Toplam	8,145

Kapsam 3 ve dahilinde bulunan kategori 3 kısmı için, ulaştırma kaynaklı kuruma hizmet veren kuruluşlar ve kurum personelin şahsi araçlarına ait hesaplamaları gerçekleştirilmiş olup, Tablo 4.4 ve Tablo 4.5’de verilmiştir. Genel olarak kapsam 3 ve kategori 3 kısmı için Tablo 4.4 ve Tablo 4.5’e ait karbon ayak izi hesaplamasının ara toplamı 526,4921 tCO₂e olarak sonuçlandığı ve tabloda yer verildiği görülmektedir.

Kapsam 3 ve dahilinde bulunan kategori 3 kısmı için, ulaştırma kaynaklı kurum personelin ve niversiteye giriş yapan 1. sınıf araçların neden olduğu emisyonlara ait veriler Tablo 4.6’da verilmektedir. Genel olarak kapsam 3 ve kategori 3 kısmı için Tablo 4.6’ya ait karbon ayak izi hesaplamasının ara toplamının 48.246,45 tCO₂e olarak sonuçlandığı ve tabloda yer verildiği görülmektedir.

Kapsam 3 ve dahilinde bulunan kategori 3 kısmı için, ulaştırma kaynaklı taşıma dağıtım alanında niversiteye hizmet veren dolmuşların emisyonlarına ait veriler Tablo 4.7’de verilmektedir. Genel olarak kapsam 3 ve kategori 3 kısmı için Tablo 4.7’e ait karbon ayak izi hesaplamasının ara toplamının 790,04 tCO₂e olarak sonuçlandığı ve tabloda yer verildiği görülmektedir.

Kapsam 3 ve dahilinde bulunan kategori 3 kısmı için, ulaştırma kaynaklı taşıma dağıtım alanında niversiteye hizmet veren belediye otobüslerinin emisyonlarına ait veriler Tablo 4.8’de verilmektedir. Genel olarak kapsam 3 ve kategori 3 kısmı için Tablo 4.8’e ait karbon ayak izi hesaplamasının ara toplamının 4164,26573 tCO₂e olarak sonuçlandığı ve tabloda yer verildiği görülmektedir.

Kapsam 3 ve dahilinde bulunan kategori 3 kısmı için, ulaştırma kaynaklı taşıma dağıtım alanında niversiteye hizmet veren hafif raylı sistem emisyonlarına ait veriler Tablo 4.9’da verilmektedir. Genel olarak kapsam 3 ve kategori 3 kısmı için Tablo 4.9’a ait karbon ayak izi hesaplamasının ara toplamının 1469,857 tCO₂e olarak sonuçlandığı ve tabloda yer verildiği görülmektedir. Tabloda yer alan ortalama mesafeler gidiş geliş olarak uygun aralıklarda belirlenerek hesaplama dahil edilmiştir.

Kapsam 3 ve dahilinde bulunan kategori 3 kısmına ait emisyon verilerinin tamamı incelenerek hesaplama gerçekleştirilmiştir. Kategori 3 kısmına ait toplam karbon ayak izi 55197,149 tCO₂e olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.5. Kategori 3 ve Kapsam 3 Sınıfına Giren Diğer Dolaylı Emisyon Kaynak Verileri

3. Ulaştırma Kaynaklı (Kuruma Hizmet Veren Kuruluşlar ve Kurum Personelin Şahsi Araçları - Kiralık Araçlar)

	Motor Hacmi	Ortalama km	Azami Ağırlık	kg CO ₂ Faktör (KIP=1)	kg CH ₄ Faktör (KIP=27,9)	kg N ₂ O Faktör (KIP=273)	CO _{2e} Faktör	TJ Veri	kg CO ₂	kg CO ₂ (CH ₄)	kg CO ₂ (N ₂ O)	tCO _{2e}
Otobüs – Dizel	-	219700	17000	0,67911	0,00012	0,00729	-	-	149200,467	26,364	1601,613	150,8284
Otobüs – Dizel	-	9960	17000	0,67911	0,00012	0,00729	-	-	6763,9356	1,1952	72,6084	6,837739
Otobüs – Dizel	-	41780	17000	0,67911	0,00012	0,00729	-	-	28373,2158	5,0136	304,5762	28,68281
Otobüs – Dizel	-	61752	17000	0,67911	0,00012	0,00729	-	-	41936,40072	7,41024	450,17208	42,39398
Otobüs – Dizel	-	171383	17000	0,67911	0,00012	0,00729	-	-	116387,9091	20,56596	1249,38207	117,6579
Otobüs – Dizel	-	35856	17000	0,67911	0,00012	0,00729	-	-	24350,16816	4,30272	261,39024	24,61586
Otobüs – Dizel	-	91632	17000	0,67911	0,00012	0,00729	-	-	62228,20752	10,99584	667,99728	62,9072
Otobüs – Dizel	-	9960	17000	0,67911	0,00012	0,00729	-	-	6763,9356	1,1952	72,6084	6,837739
Minibüs - Dizel	-	100000	3700	0,51576	0,0001	0,00598	-	-	51576	10	598	52,184
Minivan - Dizel	-	25000	3200	0,26343	-	0,00186	-	-	6585,75	0	46,5	6,63225
Minivan - Dizel	-	66750	3200	0,26343	-	0,00186	-	-	17583,9525	0	124,155	17,70811
Kamyonet	-	4000	3200	0,26343	-	0,00186	-	-	1053,72	0	7,44	1,06116
(Elektrik)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(Benzin)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(Motosiklet)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Referans: DEFRA											Ara Toplam	518,3471

Tablo 4.6. Kategori 3 ve Kapsam 3 Sınıfına Giren Diğer Dolaylı Emisyon Kaynak Verileri

3. Ulaştırma Kaynaklı (Kurum Personelin ve Üniversiteye giriş yapan 1. Sınıf araçların neden olduğu emisyonlar)

	Toplam km	Birim	Dönüşüm	kg CO ₂ Faktör (KIP=1)	kg CH ₄ Faktör (KIP=27,9)	kg N ₂ O Faktör (KIP=273)	CO _{2e} Faktör	TJ Veri	kg CO ₂	kg CO ₂ (CH ₄)	kg CO ₂ (N ₂ O)	tCO _{2e}
Haftaiçi 1 nolu Yol	178620000	km	-	0,1702	0,00017	0,011	-	-	30401124	30365,4	1964820	32396,31
Haftaiçi 2 nolu yol	9906000	km	-	0,1702	0,00017	0,011	-	-	1686001,2	1684,02	108966	1796,651
Hafta içi 3 nolu yol	36998000	km	-	0,1702	0,00017	0,011	-	-	6297059,6	6289,66	406978	6710,327
Hafta sonu 1 nolu yol	31293600	km	-	0,1702	0,00017	0,011	-	-	5326170,72	5319,912	344229,6	5675,72
Hafta sonu 2 nolu yol	1783600	km	-	0,1702	0,00017	0,011	-	-	303568,72	303,212	19619,6	323,4915
Hafta sonu 3 nolu yol	7410000	km	-	0,1702	0,00017	0,011	-	-	1261182	1259,7	81510	1343,952
Referans: DEFRA											Ara Toplam	48246,45

Tablo 4.7. Kategori 3 ve Kapsam 3 Sınıfına Giren Diğer Dolaylı Emisyon Kaynak Verileri

3. Ulaştırma Kaynaklı (Taşıma ve Dağıtım) – Üniversiteye hizmet veren dolmuşların emisyonları

	Ortalama km	Azami Ağırlık	Birim	kg CO ₂ Faktör (KIP=1)	kg CH ₄ Faktör (KIP=27,9)	kg N ₂ O Faktör (KIP=273)	CO _{2e} Faktör	TJ Veri	kg CO ₂	kg CO ₂ (CH ₄)	kg CO ₂ (N ₂ O)	tCO _{2e}
Dizel Minibüs - Hafta içi	2730000	-	-	0,2393	-	0,00186	-	-	653289	0	5077,8	658,3668
Dizel Minibüs - Hafta sonu	546000	-	-	0,2393	-	0,00186	-	-	130657,8	0	1015,56	131,6734
Elektrikli Otobüs	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Benzinli Minibüs	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Referans: DEFRA											Ara Toplam	790,0402

Tablo 4.8. Kategori 3 ve Kapsam 3 Sınıfına Giren Diğer Dolaylı Emisyon Kaynak Verileri

3. Ulaştırma Kaynaklı (Taşıma ve Dağıtım) - Üniversiteye hizmet veren belediye otobüslerinin emisyonları

	Ortalama km	Azami Ağırlık	Birim	kg CO ₂ Faktör (KIP=1)	kg CH ₄ Faktör (KIP=27,9)	kg N ₂ O Faktör (KIP=273)	CO _{2e} Faktör	TJ Veri	kg CO ₂	kg CO ₂ (CH ₄)	kg CO ₂ (N ₂ O)	tCO _{2e}
Dizel Otobüs – E1 – Hafta içi	676000	18000	kg	1,08528	0,0002	0,01191	-	-	733649,28	135,2	8051,16	741,8356
Dizel Otobüs – E5 - Hafta içi	910000	18000	kg	1,08528	0,0002	0,01191	-	-	987604,8	182	10838,1	998,6249
Dizel Otobüs – 15/17 – Hafta içi	286000	18000	kg	1,08528	0,0002	0,01191	-	-	310390,08	57,2	3406,26	313,8535
Dizel Otobüs – 26/17 - Hafta içi	416000	18000	kg	1,08528	0,0002	0,01191	-	-	451476,48	83,2	4954,56	456,5142
Dizel Otobüs – 12/17 - Hafta içi	390000	18000	kg	1,08528	0,0002	0,01191	-	-	423259,2	78	4644,9	427,9821
Dizel Otobüs – 24 A-B - Hafta içi	370500	18000	kg	1,08528	0,0002	0,01191	-	-	402096,24	74,1	4412,655	406,583
Dizel Otobüs – E1 – Hafta sonu	202800	18000	kg	1,08528	0,0002	0,01191	-	-	220094,784	40,56	2415,348	222,5507
Dizel Otobüs – E5 - Hafta sonu	254800	18000	kg	1,08528	0,0002	0,01191	-	-	276529,344	50,96	3034,668	279,615
Dizel Otobüs – 15/17 - Hafta sonu	49400	18000	kg	1,08528	0,0002	0,01191	-	-	53612,832	9,88	588,354	54,21107
Dizel Otobüs – 26/17 - Hafta sonu	83200	18000	kg	1,08528	0,0002	0,01191	-	-	90295,296	16,64	990,912	91,30285
Dizel Otobüs – 12/17 - Hafta sonu	57200	18000	kg	1,08528	0,0002	0,01191	-	-	62078,016	11,44	681,252	62,77071
Dizel Otobüs – 24 A-B - Hafta sonu	98800	18000	kg	1,08528	0,0002	0,01191	-	-	107225,664	19,76	1176,708	108,4221
Referans: DEFRA											Ara Toplam	4164,26573

Tablo 4.9. Kategori 3 ve Kapsam 3 Sınıfına Giren Diğer Dolaylı Emisyon Kaynak Verileri

3. Ulaştırma Kaynaklı (Taşıma ve Dağıtım) – Üniversiteye hizmet veren hafif raylı sistem

	Ortalama yolcu	Ortalama mesafe	Birim	kg CO ₂ Faktör (KIP=1)	kg CH ₄ Faktör (KIP=27,9)	kg N ₂ O Faktör (KIP=273)	CO _{2e} Faktör	TJ Veri	kg CO ₂	kg CO ₂ (CH ₄)	kg CO ₂ (N ₂ O)	tCO _{2e}
Hafif Raylı Sistem												
1 no'lu Durak - Hafta içi	5788	50	km	0,02832	0,00011	0,00018	-	-	8195,808	31,834	52,092	8,279734
Hafif Raylı Sistem												
2 no'lu Durak - Hafta içi	357239	50	km	0,02832	0,00011	0,00018	-	-	505850,424	1964,8145	3215,151	511,0304
Hafif Raylı Sistem												
3 no'lu Durak - Hafta içi	122126	50	km	0,02832	0,00011	0,00018	-	-	172930,416	671,693	1099,134	174,7012
Hafif Raylı Sistem												
4 no'lu Durak - Hafta içi	110642	50	km	0,02832	0,00011	0,00018	-	-	156669,072	608,531	995,778	158,2734
Hafif Raylı Sistem												
5 no'lu Durak - Hafta içi	233357	50	km	0,02832	0,00011	0,00018	-	-	330433,512	1283,4635	2100,213	333,8172
Hafif Raylı Sistem												
6 no'lu Durak - Hafta içi	50034	50	km	0,02832	0,00011	0,00018	-	-	70848,144	275,187	450,306	71,57364
Hafif Raylı Sistem												
7 no'lu Durak - Hafta içi	51938	50	km	0,02832	0,00011	0,00018	-	-	73544,208	285,659	467,442	74,29731
Hafif Raylı Sistem												
1 no'lu Durak - Hafta sonu	864	50	km	0,02832	0,00011	0,00018	-	-	1223,424	4,752	7,776	1,235952
Hafif Raylı Sistem												
2 no'lu Durak - Hafta sonu	35952	50	km	0,02832	0,00011	0,00018	-	-	50908,032	197,736	323,568	51,42935
Hafif Raylı Sistem												
3 no'lu Durak - Hafta sonu	5346	50	km	0,02832	0,00011	0,00018	-	-	7569,936	29,403	48,114	7,647453
Hafif Raylı Sistem												
4 no'lu Durak - Hafta sonu	8787	50	km	0,02832	0,00011	0,00018	-	-	12442,392	48,3285	79,083	12,5698
Hafif Raylı Sistem												
5 no'lu Durak - Hafta sonu	24405	50	km	0,02832	0,00011	0,00018	-	-	34557,48	134,2275	219,645	34,91135
Hafif Raylı Sistem												
6 no'lu Durak - Hafta sonu	6797	50	km	0,02832	0,00011	0,00018	-	-	9624,552	37,3835	61,173	9,723109
Hafif Raylı Sistem												
7 no'lu Durak - Hafta sonu	14238	50	km	0,02832	0,00011	0,00018	-	-	20161,008	78,309	128,142	20,36746
Referans: DEFRA											Ara Toplam	1469,857
											Toplam	55197,149

Kapsam 3 ve dahilinde bulunan kategori 4 kısmı için atık oluşumlarına ait hesaplamaları gerçekleştirilmiş olup, Tablo 4.10'da verilmiştir. Genel olarak kapsam 3 ve kategori 4 kısmı için Tablo 4.10'a ait karbon ayak izi hesaplamasının toplam olarak 3.746,897 tCO₂e olarak sonuçlandığı ve tabloda yer verildiği görülmektedir.

Kapsam 3 ve dahilinde bulunan kategori 6 kısmı için diğer dolaylı kaynaklara ait hesaplamalar gerçekleştirilmiş olup, Tablo 4.11'da verilmiştir. Genel olarak kapsam 3 ve kategori 6 kısmı için Tablo 4.11'e ait karbon ayak izi hesaplamasının toplam olarak sonucu 898,907 tCO₂e çıktığı ve tabloda yer verildiği görülmektedir.

Burada önem arz eden durum ise yeşil alanlar kısmı ile alakalıdır. Karbon yutakları, biyolojik, kimyasal veya fiziksel olarak belirli süreçler ile birlikte atmosferdeki karbondioksiti bağlayarak sera gazı emisyonlarını azaltan ekosistemlerdir. Ormanlar, ağaçlar, çayırlar, sulak alanlar ve diğer yeşil alanlar gibi örnekleri verilmektedir. Yeşil alanlar, karbonu biriktirirken aynı zamanda ekosistem hizmetleri sağlamakta ve fotosentez yoluyla atmosferdeki CO₂ 'yi organik karbona dönüştürmektedir. Bu tür durumlardan kaynaklanan negatif emisyonlar genellikle karbon ayak izi hesaplamalarına doğrudan dahil edilmez. Karbon nötr, net emisyon azaltımı kapsamında ayrı olarak ele alınır. Bundan dolayı, yeşil alanların olması, emisyonların bir kısmını telafi ederek doğal bir mekanizma işlevi görür ve toplam karbon ayak izini doğrudan artırmaz. Yeşil alanlar tabloda verilerek bulunduğu kategori kısmı için geçerli hesaba katılmamış olup, toplam değeri üzerinden sonuca etkisi hesaplanmıştır.

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kurupelit Kampüsü'ne ait kurumlardan alınan veriler neticesinde yeşil alanlar kapsamında yaklaşık 2.543.500 adet ağaç bulunmaktadır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) kılavuz verilerine göre ağaçların durumu, dağılımı ve potansiyeline göre verilen emisyon faktörü aralığından, ağaç adeti başına ortalama 22 kg CO₂ alınarak karbon yutak kapasitesi belirlenmiştir. Bununla birlikte toplam yutak kapasitesi baz yılına göre 55.507,00 tCO₂e negatif emisyon olarak bulunmuştur.

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kurupelit Kampüsü'nün yapılan hesaplamalar sonucunda toplam karbon ayak izi miktarı 85.323,455 tCO₂e olarak belirlenmiştir. Yerleşkede bulunan yeşil alanlar kapsamında, toplam emisyonun % 65,5 oranında azaldığı görülmektedir.

Tablo 4.10. Kategori 4 ve Kapsam 3 Sınıfına Giren Diğer Dolaylı Emisyon Kaynak Verileri

4. Atık Oluşumu (Katı Atık Oluşumu, Atıksu Oluşumu)

	Veri	Birim	Dönüşüm	kg CO ₂ Faktör (KIP=1)	kg CH ₄ Faktör (KIP=27,9)	kg N ₂ O Faktör (KIP=273)	CO _{2e} Faktör	TJ Veri	kg CO ₂	kg CO ₂ (CH ₄)	kg CO ₂ (N ₂ O)	tCO _{2e}
Plastik	4805	kg	-	-	-	-	21,294	--	102.317,67	-	-	102,318
Kâğıt-Karton	47453	kg	-	-	-	-	21,294	-	1.010.464,182	-	-	1.010,464
Organik Atık	5600	kg	-	-	-	-	446,242	-	2498952,400	-	-	2498,952
Su Tüketimi	907134	m ³	-	-	-	-	0,149	-	135.162,966	-	-	135,163
Referans: DEFRA											TOPLAM	3.746,897

Tablo 4.11. Kategori 6 ve Kapsam 3 Sınıfına Giren Diğer Dolaylı Emisyon Kaynak Verileri

6. Diğer Dolaylı Kaynaklar

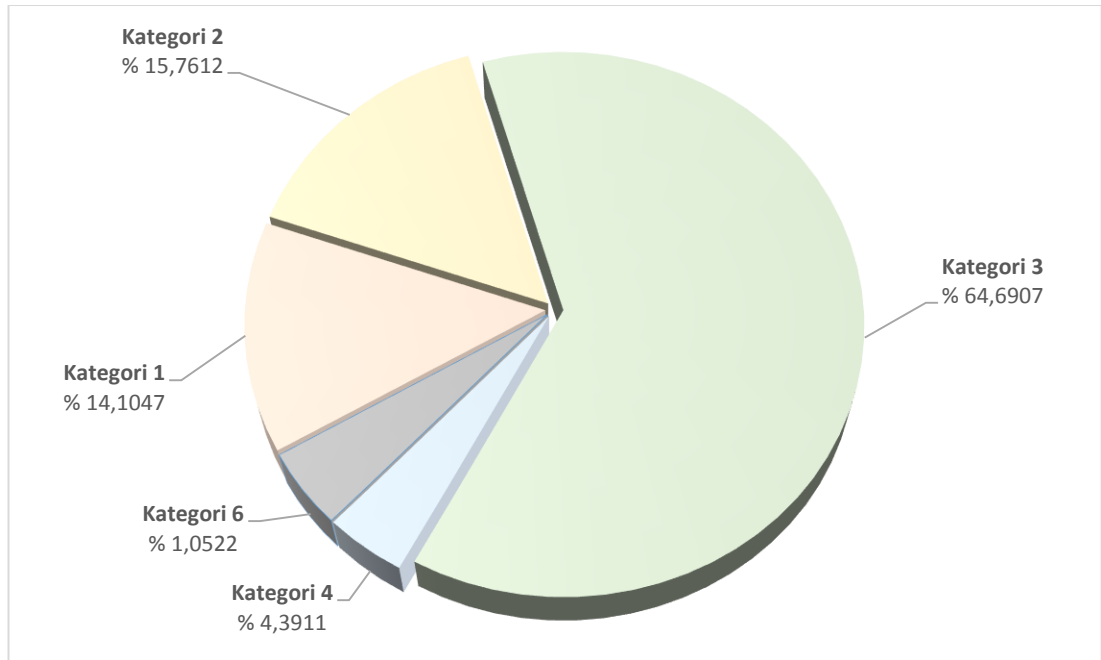
	Veri	Birim	Açıklama	kg CO ₂ Faktör (KIP=1)	kg CH ₄ Faktör (KIP=27,9)	kg N ₂ O Faktör (KIP=273)	CO _{2e} Faktör	TJ Veri	kg CO ₂	kg CO ₂ (CH ₄)	kg CO ₂ (N ₂ O)	tCO _{2e}
Kompostlaştırma	5600	kg	Karışık Organik	-	5	0,02		-		781.200	30.576	811,776
Tarım Arazileri Kullanımı (Genel)	55700	m ²	Tarla Bitkisi	-	-	-	0,4 kg CO ₂	-	22280	-	-	2,228
Hayvan Yetiştirme	17	adet	Sığır	-	86	1		-		40.789,8	4641	45,431
Hayvan Yetiştirme	107	adet	Koyun	-	8	0,1		-		23.882,4	2.921,1	26,803
Hayvan Yetiştirme	3	adet	Keçi	-	5	0,1		-	1200	418,5	409,5	0,828
Hayvan Yetiştirme	2156	adet	Tavuk	-	0,099	0,01		-	21344,4	5.955,08	5.885,88	11,841
Yeşil Alanlar (Genel)	2.543.500	Adet	Ağaç	-	-	-	22 kg CO ₂	-	55.957.000	-	-	- 55,957
Referans: IPCC											TOPLAM	898,907

Hesaplamalar neticesinde ortaya çıkan sera gazlarının kategori ve kapsam bazında miktarları, toplam emisyon değeri ve yüzdelik etkileri Tablo 4.12’ de verilmiştir.

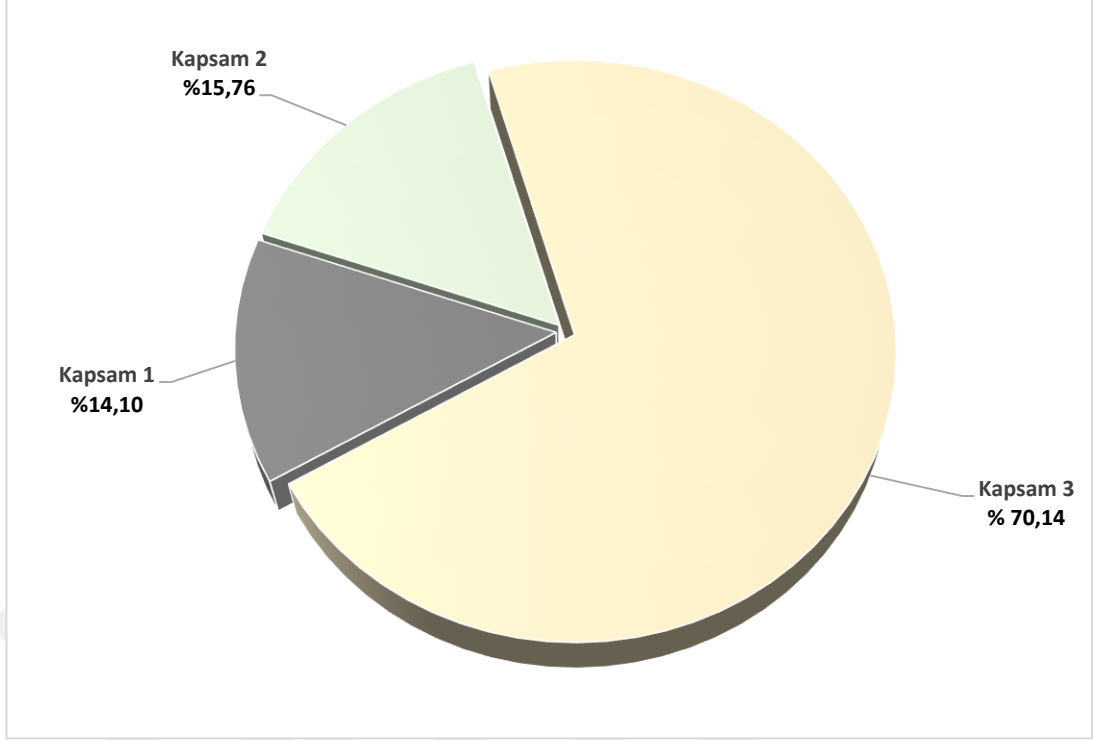
Tablo 4.12. Sera Gazlarının Kategori ve Kapsam Bazında Miktar Özetlemesi

Kapsam	Kategori	Toplam Emisyonlar (tCO ₂ e)	Katkı Yüzdesi (%)
1	1	12035,602	14,1047
2	2	13444,88	15,7612
3	3	55197,149	64,6907
	4	3746,897	4,3911
	6	898,907	1,0522
Toplam		85.323,455	100

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Kurupelit Kampüsü’nün karbon ayak izi hesaplaması, kapsam ve kategoriler bazında detaylıca incelenerek sera gazı envanteri oluşturulmuş olup, kampüs bazında uygun sınırlamalar yapılmıştır. Yapılan hesaplama neticesinde kampüsün toplam karbon ayak izi, 85323,45 tCO₂e olarak belirlenmiştir. Şekil.4.1’de, Şekil.4.2’de ve Şekil.4.3.’de kapsam ve kategoriler bazında emisyonların dağılımları verilmiştir.

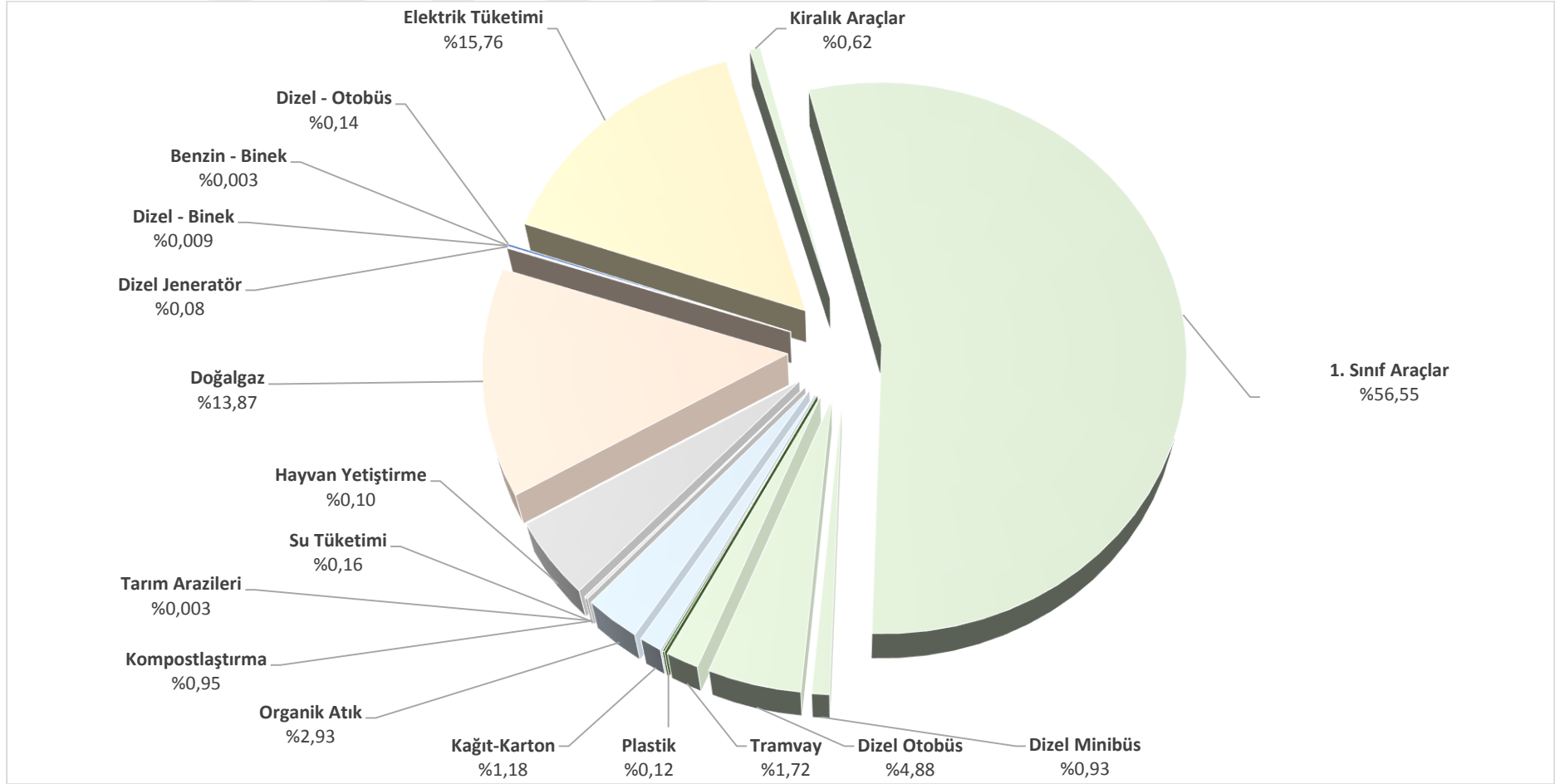


Şekil 4.1. Toplam Emisyon Değerlerinin Kategori Bazında Sınıflandırılması



Şekil 4.2. Toplam Emisyon Değerlerinin Kapsam Bazında Sınıflandırılması

Genel olarak Şekil.4.1. ve Şekil 4.2. incelendiğinde mevcut kampüs karbon ayak izinin toplam emisyon değerinin kategori 3 kısmında en yüksek oranda olduğu ve buna bağlı olarak kapsam 3 kısmının en yüksek oranda emisyonu sebep olduğu görülmektedir. Devamında miktar bazlı sıralamada kategori 2 ve buna bağlı olarak kapsam 2 kısmı emisyonu sebep olurken, kategori 1 ve dahil olduğu kapsam sınıfı olan kapsam 1 ise en az emisyon oranını oluşturmaktadır. Şekil 4.3.'de verilen Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kurupelit Kampüsüne ait emisyon kaynaklarının detaylı sınıflandırılması, verilerle birlikte ilgili kaynakların oranlarının net bir şekilde görülmesini sağlarken aynı zamanda mevcut durumda kaynaklara düşen payın incelenmesi amacıyla oldukça önem taşımaktadır. Bununla birlikte ilgili kapsam, kategori ve emisyon kaynaklarının detaylı olarak ele alınmasıyla, sürecin devamı olan ölçüm belirsizliği hesaplamaları için uygun referans değerleri alınarak belirsizlik analizi yapılmıştır. Burada temel işlem olarak emisyon kaynaklarının hesaplanan değerlerinin belirsizlik durumlarının ele alınmasıyla elde edilen verilerin daha doğru, güvenilir ve şeffaf sonuçlar vermesi amaçlanmaktadır.



Şekil 4.3. Kurupelit Kampüsünün Emisyon Kaynaklarına Göre Sınıflandırılması

4.2. Kurupelit Kampüsü Ölçüm Belirsizliği Hesaplamaları

Belirsizlik analizi, sera gazı emisyon hesaplama sonuçlarının güvenilirliğini değerlendirmek için gerekli hale gelmiştir. Bu çalışmada, aktivite verilerinin belirsizliği ve emisyon katsayılarının belirsizliği her bir emisyon kaynağı için ayrı ayrı belirlenmiş ve sonrasında bu değerler bileşik belirsizlik yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

Belirsizlik değerlerini belirlemek için öncelikle Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), İngiltere Çevre, Gıda ve Tarım Bakanlığı (DEFRA) ve diğer uluslararası referans kaynakları kullanıldı. İlgili kaynaklar, belirli emisyon kategorileri için önerilen belirsizlik aralıkları sağlamakta ve çalışmada veri setine en uygun değerlerin seçimi yapılmıştır. Bazı kategoriler için, yüzde belirsizlik değerleri doğrudan belirtilmediğinden, IPCC tarafından önerilen varsayılan değerler veya literatürde yayınlanan güncel akademik araştırmalardan elde edilen değerler çalışmada kullanılmıştır.

Aktivite verilerinin belirsizliği ile birlikte tüm emisyon kaynakları için belirlenen emisyon katsayılarının belirsizliği, IPCC tarafından önerilen bileşik belirsizlik formülü kullanılarak hesaplandı ve bunların bağımsız değişkenler olduğu varsayıldı.

Elde edilen bileşik belirsizliklere ait veriler, emisyon miktarları ile çarpılarak varyans değerleri bulunmuştur.

Tüm emisyon kategorilerine ait varyans katkılarının toplanmasıyla birlikte, toplam standart belirsizliğin bulunması için karekökleri alınarak hesaplama yapılmış olup, mevcut belirsizlik değeri ortaya çıkmıştır.

Son kısımda, güven aralığını belirlemek için IPCC tarafından önerilen güvenlik katsayısı kullanılmıştır. % 95 güven aralığı için güvenlik katsayısı 2 alınmıştır.

Bununla birlikte Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kurupelit Kampüsü'ne ait belirsizlik hesaplamaları toplam belirsizlik seviyesi ve aralıklarının ile bulunarak raporlama kısmına eklenmesiyle tamamlanmıştır.

Tablo 4.13'de emisyon kaynaklarının belirsizlik değerleri yukarıda verilen kaynaklar ile birlikte incelenerek uygun verilerin tabloya işlenmesi sağlanmıştır.

Tablo 4.13. Emisyon Kaynaklarının Belirsizlik Değerleri

Kapsam	Kategori	Parametre	Toplam Karbon Ayak İzi (tCO ₂)	Aktivite Belirsizliği (%)	Referans	EF Belirsizliği (%)	Referans	Bileşik Belirsizlik (%)
Kapsam 1	Kategori 1	Doğalgaz	11.833,08	3	IPCC 2019 Refinement Vol.1, Chapter 3, Table 3.2	2	DEFRA 2021 UK GHG Inventory Tablo Enerji (Sayfa 11)	3,605551275
		Dizel Jeneratör	68,93	7	IPCC 2019 Refinement Vol.1, Chapter 3, Energy Sector	7	IPCC 2019 Refinement Vol.1, Chapter 3, Energy Sector	9,899494937
		Binek araçlar Dizel	7,84	10	DEFRA 2021 UK GHG Inventory	10	DEFRA 2021 UK GHG Inventory	14,14213562
		Binek araçlar Benzin	2,367	10	DEFRA 2021 UK GHG Inventory	10	DEFRA 2021 UK GHG Inventory	14,14213562
		Otobüs - Dizel	123,3845	15	IPCC 2019 Refinement Vol.2, Chapter 3, Transport Sector	15	IPCC 2019 Refinement Vol.2, Chapter 3, Transport Sector	21,21320344
Kapsam 2	Kategori 2	Elektrik Tüketimi	13,444,88	3	IEA 2023 Energy Statistics	15	IPCC 2019 Refinement Vol.1, Chapter 3 (ülke enerji karması)	15,29705854
Kapsam 3	Kategori 3	Kiralık Araçlar	526,4921	15	DEFRA 2021 UK GHG Inventory ve GHG Protocol	15	DEFRA 2021 UK GHG Inventory ve GHG Protocol	21,21320344
		1.sınıf araçlar	48246,45	10	DEFRA 2021 UK GHG Inventory	10	DEFRA 2021 UK GHG Inventory	14,14213562
		Dizel Minibüs	790,0402	15	IPCC 2019 Refinement Vol.2, Chapter 3, Transport Sector	15	IPCC 2019 Refinement Vol.2, Chapter 3, Transport Sector	21,21320344
		Dizel Otobüs	4164,26573	15	IPCC 2019 Refinement Vol.2, Chapter 3, Transport Sector	15	IPCC 2019 Refinement Vol.2, Chapter 3, Transport Sector	21,21320344
		Tramvay	1469,857	7	IPCC 2019 Refinement Vol.1, Chapter 3, Electricity Usage	7	IPCC 2019 Refinement Vol.1, Chapter 3, Electricity Usage	9,899494937
	Kategori 4	Plastik	102,318	20	DEFRA 2021 UK GHG Inventory, Waste Sector	25	DEFRA 2021 UK GHG Inventory, Waste Sector	32,01562119
		Kâğıt-Karton	1.010,46	20	DEFRA 2021 UK GHG Inventory, Waste Sector	25	DEFRA 2021 UK GHG Inventory, Waste Sector	32,01562119
		Organik Atık	2498,952	25	IPCC 2019 Refinement Vol.5, Chapter 2-3, Waste Sector	35	IPCC 2019 Refinement Vol.5, Chapter 2-3, Waste Sector	43,01162634
		Su Tüketimi	135,163	5	DEFRA 2021 UK GHG Inventory	5	DEFRA 2021 UK GHG Inventory	7,071067812
	Kategori 6	Kompostlaştırma	811,776	25	IPCC 2019 Refinement Vol.5, Chapter 3, Waste Sector	40	IPCC 2019 Refinement Vol.5, Chapter 3, Waste Sector	47,16990566
		Tarım Arazileri	2,228	30	IPCC 2019 Refinement Vol.4, Chapter 11, AFOLU Sector	40	IPCC 2019 Refinement Vol.4, Chapter 11, AFOLU Sector	50
		Hayvan Yetiştirme	84,903	20	IPCC 2019 Refinement Vol.4, Chapter 10, AFOLU Sector	35	IPCC 2019 Refinement Vol.4, Chapter 10, AFOLU Sector	40,31128874
		Yeşil Alanlar	55.957	20	IPCC 2019 Refinement Vol.4, Chapter 6, AFOLU Sector	30	IPCC 2019 Refinement Vol.4, Chapter 6, AFOLU Sector	36,05551275

Tablo 4.13’de ilgili kaynak referansları verilen emisyon kaynaklarının belirsizlik değerleri ve oranları, belirsizliğin durumuna göre belirli aralıklarda verilmektedir. Burada elde edilen verilerle birlikte uygun belirsizlik değerlerinin alınarak tabloya işlenmesi sağlanmıştır. Aktivite belirsizliği ile emisyon faktörünün belirsizliğinin bağımsız olduğu varsayılarak korelasyon katsayısı $P = 0$ olarak kabul edilmiştir.

Tablo 4.14. Emisyon Kaynaklarının Belirsizlik Hesaplamaları

Kapsam	Kategori	Parametre	Toplam Karbon Ayak İzi (tCO ₂)	Mutlak Belirsizlik	Varyans Katkısı
Kapsam 1	Kategori 1	Doğalgaz	11.833,08	426,6477669	182028,317
		Dizel Jeneratör	68,93	6,82372186	46,56318002
		Binek araçlar Dizel	7,84	1,108743433	1,229312
		Binek araçlar Benzin	2,367	0,33474435	0,11205378
		Otobüs - Dizel	123,3845	26,17380499	685,0680678
Kapsam 2	Kategori 2	Elektrik Tüketimi	13.444,88	2056,671164	4229896,278
Kapsam 3	Kategori 3	Kiralık Araçlar	526,4921	111,6858402	12473,72691
		1.sınıf araçlar	48246,45	6823,078393	46554398,75
		Dizel Minibüs	790,0402	167,5928348	28087,35829
		Dizel Otobüs	4164,26573	883,3741609	780349,9082
		Tramvay	1469,857	145,5084193	21172,70008
		Plastik	102,318	32,75774329	1073,069745
	Kategori 4	Kâğıt-Karton	1.010,46	323,5063265	104656,3433
		Organik Atık	2498,952	1074,839897	1155280,803
		Su Tüketimi	135,163	9,557467387	91,34518285
		Kompostlaştırma	811,776	382,9139734	146623,111
	Kategori 6	Tarım Arazileri	2,228	1,114	1,240996
		Hayvan Yetiştirme	84,903	34,22549348	1171,384404
		Yeşil Alanlar	55.957	20175,58327	407054160,4

Tablo 4.14’de verilen belirsizlik hesaplamaları, Tablo 4.13’de verilen uygun belirsizlik oranlarına göre işleme alınarak oluşturulmuştur. Burada sera gazı emisyon değerlerinin bileşik belirsizlik değerleriyle işleme alınması ile mutlak belirsizlik verileri ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte toplam emisyon miktarının belirlenmesi ve toplam belirsizliğin bulunması için mutlak belirsizlik değerlerinin karelerinin işleme

alınmasıyla varyans katkısı bulunmaktadır.

Toplam varyans katkısı değerlerinin kareköklerinin alınmasıyla birlikte toplam sera gazı emisyon kaynaklarına ait genel standart bileşik belirsizlik değeri ortaya çıkmakta ve böylelikle toplam belirsizlik miktarına ulaşılmaktadır.

Kapsam	Kategori	Toplam Emisyonlar (tCO ₂ e)	Toplam Varyans Katkısı	Toplam Belirsizlik Miktarı
1	1			
2	2			
	3	85.323,455	53.218.037,31	7295,0693 (tCO ₂ e)
3	4			
	6			

Tablo 4.15. Sera Gazlarının Toplam Belirsizlik Miktarı

Tablo 4.15’de Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kurupelit Kampüsü’ne ait toplam karbon ayak izi emisyon değerleri, toplam varyans katkısına ait değerler ve kampüsün toplam belirsizlik miktarı verilmiştir. Kurupelit Kampüsünün toplam Karbon ayak izi miktarının 85.323,455 tCO₂e olduğu görülmektedir. Bununla birlikte Kurupelit Kampüsünün karbon ayak izi hesaplama raporuna göre toplam belirsizlik miktarı 7295,0693 tCO₂e olarak hesaplanmıştır. Ölçüm belirsizliği hesaplamasının toplam olarak belirlenmesiyle birlikte güvenlik katsayısı ile beraber alt ve üst güven aralıklarının işleme alınmasıyla sonucun güvenilirlik, doğruluk ve şeffaflık açısından uygun raporlanması sağlanacaktır.

Güvenlik katsayısı (k) kavramı, belirsizlik hesaplamalarında kullanılan standart belirsizliğin bulunarak belirli bir güven aralığında genişletilmesi için kullanılır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) ve Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) gibi referans kılavuzlarda, k = 1 yaklaşık olarak % 68 oranını sağlamakta, k = 2 yaklaşık olarak % 95 oranını sağlamakta ve k = 3 yaklaşık olarak % 99,7 oranını sağlamaktadır. Genellikle karbon ayak izi belirsizlik hesaplamalarında k = 2 değeri tercih edilerek raporlamalarda işleme alınmaktadır. Burada hesaplama alına değerin gerçek değerini % 95 olasılık ile kapsamaya aldığını gösterir. Bu yöntem belirsizlik hesaplamalarının standart ve karşılaştırılabilir olarak raporlanmasına olanak sağlamaktadır. (IPCC, 2006; ISO, 2008)

Tablo 4.16’da toplam belirsizlik değerinin güvenlik katsayıları ile birlikte işleme alınarak belirtilen üç değere göre hesaplaması yapılmış olup, kampüs karbon ayak izi belirsizlik değerinin güven aralıklarıyla birlikte işleme alınmasıyla toplam belirsizlik değeri bulunmuştur.

Tablo 4.16. Sera Gazlarının Güven Katsayısı ve Oranları

Toplam Belirsizlik (tCO₂e)	k = 1 Güven Aralığı (%68)	k = 2 Güven Aralığı (% 95)	k = 3 Güven Aralığı (% 99,7)
7295,0693	7295,0693 tCO ₂ e	14.590,1386 tCO ₂ e	21.885,2079 tCO ₂ e

Normal dağılım gösteren veri gruplarında güven aralıklarının bulunması amacıyla kullanılan ve istatistikte empirik kural olarak tanımlanan ölçümlerin % 68 oranı ortalama ± 1 standart sapma $k = 1$ olarak verilmekte, % 95 oranı ortalama ± 2 standart sapma $k = 2$ olarak verilmekte ve % 99,7 oranı ortalama standart sapma $k = 3$ olarak verilerek işleme alınmaktadır. Uygulama kısmında $k = 1$ alındığı durumlarda genellikle düşük güven seviyeleri veya ön değerlendirme aşamaları için raporlamaya dahil edilmektedir. $k = 1$ için 7295,0693 tCO₂e toplam belirsizlik değeri bulunmuştur. $k = 2$ alındığı durumlarda genellikle uluslararası standartlarda yaygın olarak kullanılan ve tercih edilen güven seviyesi olarak bilinmektedir. $k = 2$ alındığı durumlarda 14.590,1368 tCO₂e toplam belirsizlik değeri ortaya çıkmaktadır. $k = 3$ alındığı durumlar ise genellikle yüksek güven gerektiren, kritik raporlama ve güven odaklı çalışmalarda tercih edilmektedir. $k = 3$ alındığı durumlarda 21.885,2079 tCO₂e toplam belirsizlik değeri ortaya çıkmaktadır.

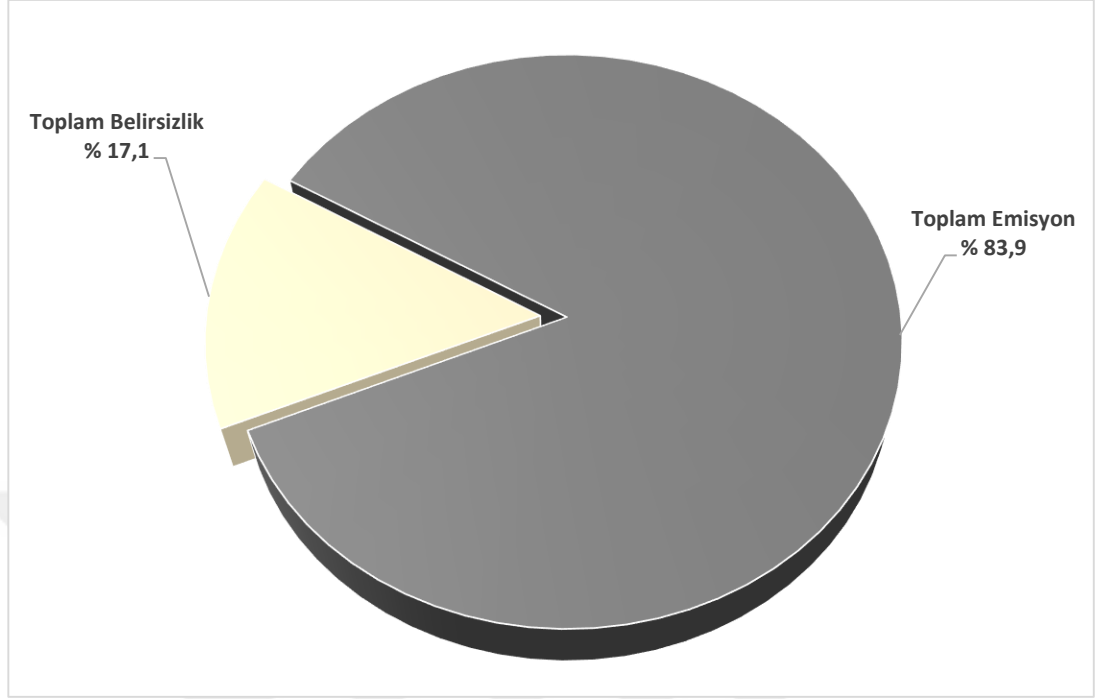
Tablo 4.17’de verilen güven katsayısına göre hesaplaması yapılan toplam belirsizlik değerlerinin yaygın ve genel kullanımı olarak $k = 2$ verisi alınarak % 95’lik güven aralığı ile birlikte belirsizlik hesabı kabul edilmiştir.

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kurupelit Kampüsü’ne ait toplam karbon ayak izi miktarının hesaplanmasının ardından, elde edilen verilerle birlikte ölçüm belirsizliği hesaplamaları yapılmıştır. Hesaplamalarda uygun veriler ve değerler alınarak işlemler tamamlanmış olup, belirsizlik hesaplamaları neticesinde Kurupelit Kampüsü’nün toplam emisyonu kıyasla, toplam belirsizlik miktarı $\pm 14.590,139$ tCO₂e olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.17. Sera Gazlarının Toplam Güven Katsayısı İle Birlikte Belirsizlik Miktarı

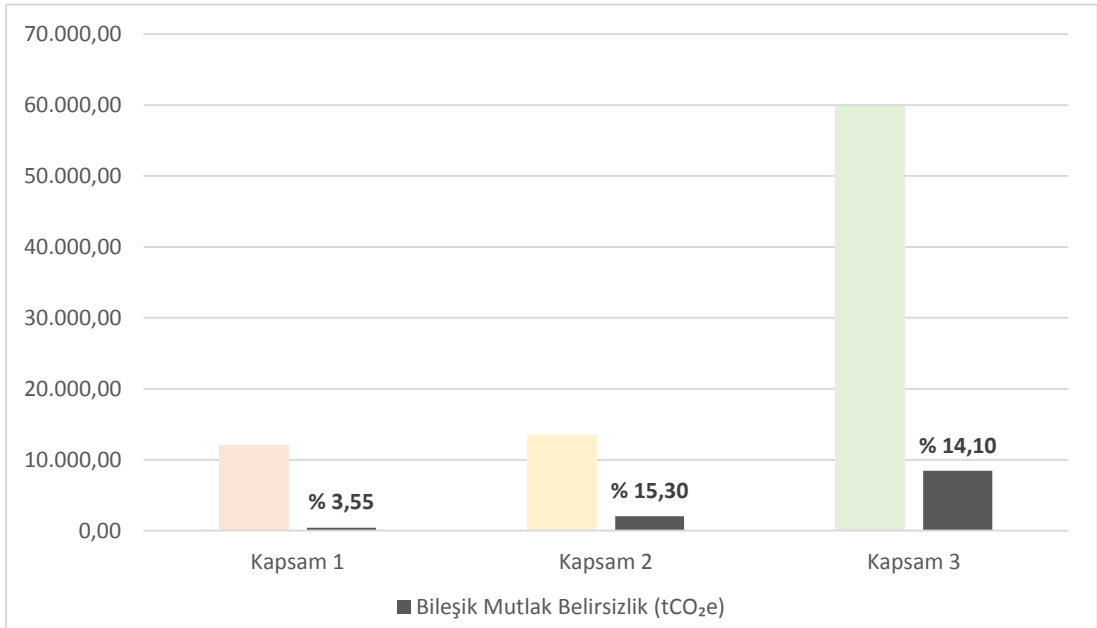
Kapsam	Kategori	Toplam Emisyon (tCO₂e)	Güven Katsayısı	Toplam Belirsizlik Miktarı
1	1	85.323,455	$k = 2$ % 95	$\pm 14.590,139$ tCO ₂ e
2	2			
3	3			
	4			
	6			

Şekil 4.4’de toplam emisyon miktarındaki, toplam belirsizlik değerinin hesaplanmasıyla birlikte % 17,1’lik bir oranda olduğu görülmektedir.



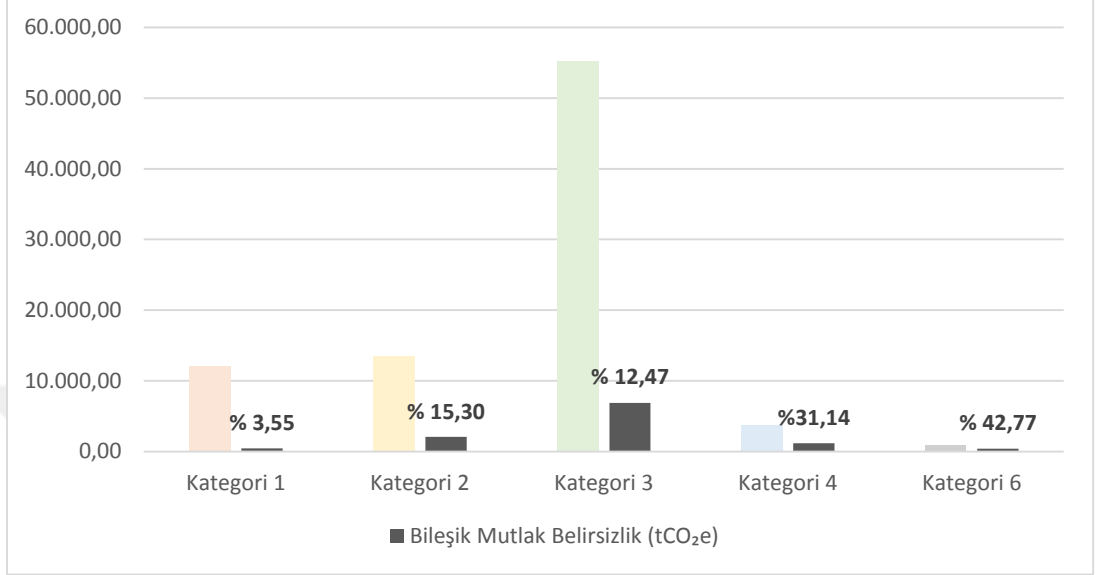
Şekil 4.4. Toplam Emisyon Belirsizlik Değerinin Genel Oranı

Şekil 4.5’de kapsam bazında emisyon değerlerinin belirsizlik oranları verilmiştir. Kapsam 1’e ait belirsizliğin %3,55 olduğu, kapsam 2’ye ait belirsizliğin %15,3 olduğu ve kapsam 3’e ait belirsizliğin %14,1 oranında olduğu görülmektedir.



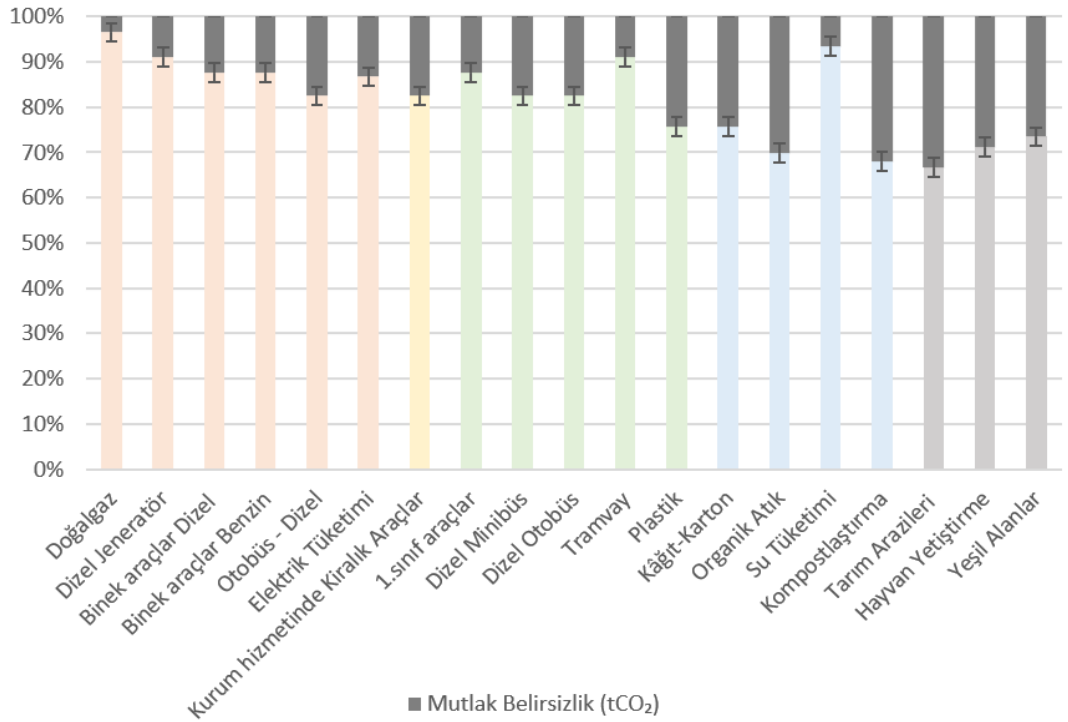
Şekil 4.5. Toplam Emisyon Belirsizlik Değerlerinin Kapsam Bazında Oranları

Şekil 4.6’de kategori bazında emisyon değerlerinin belirsizlik oranları verilmiştir. Kategori 1’e ait belirsizliğin %3,55, kategori 2’ye ait belirsizliğin %15,3, kategori 3’e ait belirsizliğin %12,47, kategori 4’e ait belirsizliğin %31,14, kategori 6’ya ait belirsizliğin %42,77 olduğu görülmektedir.



Şekil 4.6. Emisyon Kaynaklarının Kategori Bazında Belirsizlik Oranları

Şekil 4.7’de sera gazı emisyon kaynaklarının belirsizlik oranı verilerek kaynak bazında belirsizlik durumları görülmektedir.



Şekil 4.7. Emisyon Kaynaklarının Genel Belirsizlik Oranları

5. SONUÇ

İnsan faaliyetleri nedeniyle atmosfere salınan sera gazı emisyonlarının artmasıyla oluşan iklim değişikliği, küresel kapsamda çevresel, ekonomik ve sosyal sonuçları olan bir krize yol açmıştır. Artan küresel sıcaklıklar, kuraklıklar, yükselen deniz seviyeleri ve daha sık görülen aşırı iklim olaylar bu durumun açık işaretleridir. Bu bağlamda, sera gazı emisyonlarının bilimsel olarak izlenmesi ve hesaplanması iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir temel unsurdur.

Bu kapsamda, karbon ayak izi hesaplaması, bireyler, kuruluşlar ve sistemler tarafından sera gazı emisyonlarının değerlendirilmesinde kullanılan başlıca araçlardan biridir. Karbon ayak izinin doğru hesaplanması yalnızca çevresel etki analizi için değil, aynı zamanda sürdürülebilir kalkınma politikaları geliştirmek, çevre raporları hazırlamak ve yasal yükümlülükleri yerine getirmek için de önemlidir. Ancak, bu hesaplamalardan güvenilir sonuçlar elde etmek için kullanılan verilerin güvenilir olduğundan, sınırların doğru bir şekilde tanımlandığından ve metodolojik tutarlılığın yerinde olduğundan emin olmak gerekir.

Karbon ayak izi hesaplamalarında çeşitli belirsizlik türleri vardır. Genel olarak belirsizlikler, kaynaklar arasındaki emisyon faktörlerindeki farklılıklar, faaliyet verilerinin ölçümündeki hatalar, zaman veya coğrafi bölge içindeki değişkenlik, varsayımların kapsamı ve seçilen yöntemlerin hesaplamaların doğruluğu üzerindeki etkisi gibi birçok faktörden kaynaklanabilir. Bununla birlikte, yetersiz veri veya düşük veri çözünürlüğü de hesaplamaların genel doğruluğunu azaltabilir. Belirsizlik yalnızca bir hata olarak değil, aynı zamanda karar vericiler için hesaplamalara olan güven derecesini belirleyen bir kalite göstergesi olarak görülmelidir.

Belirsizliklerin hesaplanması ve raporlanması, emisyon envanterinin bilimsel ve yönetsel güvenilirliği açısından gerekli bir adımdır. Özellikle, emisyon azaltma hedefleri belirlenirken veya zaman içindeki değişiklikler analiz edilirken, yalnızca mutlak değerleri değil, aynı zamanda taşıdıkları belirsizlik düzeyini de dikkate almak gerekir.

Belirsizlik analizi, hesaplamaların güven aralığını belirlemeye, kritik veri boşluklarını belirlemeye ve kaynakların nereye odaklanacağını daha net bir şekilde belirlemeye yardımcı olabilir. Ayrıca, şeffaf doğrulama ve izleme süreçleri iklim politikasının bilimsel temeli açısından bir belirsizlik değerlendirmesi de gerektirir.

Çalışmamızda, kuruluşun faaliyetleri tarafından oluşturulan karbon ayak izi hesaplandı ve bu hesaplamalarda ölçüm belirsizlikleri ayrıntılı olarak değerlendirildi.

Karbon ayak izini hesaplamak için yalnızca mutlak emisyon hacimlerini belirtmek yeterli değildir, bu hacimlerin ne kadar güvenilir olduğunu ve tahmin edildikleri belirsizlik sınırlarını açıkça belirtmek de gerekir. Bu bağlamda gerçekleştirilen belirsizlik analizi, hesaplanan sonuçlarımız için daha güvenilir, şeffaf ve karşılaştırılabilir bir temel sağladı.

Analiz, doğal gaz tüketimi, dizel ve benzinli araç kullanımı, elektrik tüketimi, atık üretimi, su tüketimi ve diğer dolaylı emisyonlar gibi ana emisyon kaynaklarına ait emisyon faktörleri ve faaliyet verilerindeki belirsizlikleri dikkate aldı. Bu belirsizlikler, IPCC, Sera Gazı Protokolü ve DEFRA gibi uluslararası kaynaklardan alınan değerlere dayanarak kullanıldı ve birleşik belirsizlik yöntemi kullanılarak sayısallaştırıldı.

Yapılan hesaplamalar sonucunda kampüsün toplam karbon ayak izi 85.323,86 tCO₂ e olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte emisyonların kapsam bazında dağılımı incelendiğinde, Kapsam 1'in toplam emisyonların %14,1'ini, Kapsam 2'nin %15,76'sını ve Kapsam 3'ün %70,14'ünü oluşturduğu görülmüştür.

Kategori bazında ise Kategori 1'in %14,1'ini, Kategori 2'nin %15,76'sını, Kategori 3'ün % 64,69'unu, Kategori 4'ün % 4,39'unu ve Kategori 6'nın %1,05'ini oluşturduğu görülmüştür.

Belirsizlik hesaplamaları, hem toplam düzeyde hem de kapsam ve kategori düzeyinde yapılmıştır. Toplam ölçüm belirsizliği $k = 2$ %95 güven aralığı ile birlikte $\pm 14.590,14$ tCO₂ e olarak belirlenmiş olup bu değer toplam emisyonun %17,1'lik kısmına karşılık gelmektedir. Kapsam bazında belirsizliklerin durumu incelendiğinde Kapsam 1'in %3,55'e, Kapsam 2'nin %15,3'e ve Kapsam 3'ün %14,1'lik bir paya sahip olduğu görülmektedir.

Kategori düzeyinde ise kategori 1'in %3,55'e, Kategori 2'nin %15,3'e, Kategori 3'ün %12,47'ye, Kategori 4'ün %31,14'e ve kategori 6 %42,77'ye karşılık geldiği görülmektedir.

Sonuçlar, emisyonları yalnızca miktar açısından değil, aynı zamanda güven açısından da ele almayı mümkün kıldı.

Karbon ayak izi hesaplamalarına belirsizlik analizini dahil etmek, özellikle veri kalitesinin değiştiği veya ölçümlerin doğrudan yapılamadığı alanlarda çok önemlidir. Ulusal ve uluslararası yapılan karbon ayak izi raporlamalarında çoğunlukla belirsizlik hesaplamalarına yer verilmediği görülmektedir. Yaptığımız bu çalışma ile birlikte belirsizlik hesaplamalarının önemi vurgulanmış oldu. Bu analiz ile birlikte, hangi emisyon kaynaklarının yüksek belirsizliğe sahip olduğunu, hangi alanların veri iyileştirme ve doğrulama için öncelikli olduğunu belirlemeyi mümkün kılmıştır. Aynı zamanda, belirsizliğin raporlanması hesaplamaların bilimsel güvenilirliğini artırır ve kurumsal karbon yönetiminde daha iyi kararlar alınmasını sağlar.

Sonuç olarak, çalışmamız karbon ayak izi hesaplamalarında belirsizlik analizinin gerekliliğini ve katkısını açıkça göstermiştir. Belirsizliklerin nicelleştirilmesi yalnızca hesaplamaların güvenilirliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda sürdürülebilir kalkınma stratejilerinin daha doğru formüle edilmesi için bir temel oluşturur. Bu bağlamda, yapılan analizlere göre, elde edilen emisyon değerlerine ek olarak, aynı zamanda bu değerlerle ilgili belirsizlik düzeyinin de net bir sunumu, çalışmamızın en önemli sonuçlarından birini sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- Altıntaş, H., (2013). Türkiye’de Birincil Enerji Tüketimi, Karbondioksit Emisyonu ve Ekonomik Büyüme İlişkisi: Eş Bütünleşme ve Nedensellik Analizi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 8(1), 263-294.
- Argun, M. E., Ergüç, R., Sarı, Y. (2019). Konya/Selçuklu ilçesi karbon ayak izinin belirlenmesi. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7(2), 287-297. <https://doi.org/10.15317/Scitech.2019.199>
- Bevington, P. R., Robinson, D. K. (2003). Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Borunda, A. (2019). Methane facts and information. <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/methane> (Erişim Tarihi: 31.05.2025)
- Bıyık, Y. (2018). Isparta İlinde Karayolu Kaynaklı Karbon Ayak İzinin Hesaplanması. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta
- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., DeAngelo, B. J., Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118(11), 5380-5552. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>
- Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). (2008). Evaluation of measurement data Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf (Erişim Tarihi: 21.12.2024)
- Civelekoğlu G., Bıyık, Y. (2018). Ulaşım sektöründen kaynaklı karbon ayak izi değişiminin incelenmesi. Bilge International Journal of Science and Technology Research, 2(2), 157-166.
- Coolen, F. P. A., Coolen-Maturi, T., Godichon-Baggioni, A. (2013). An Introduction to Imprecise Probabilities. Wiley.
- Copernicus Climate Change Service. (2025). About the Copernicus Climate Change Service. <https://climate.copernicus.eu/about-c3s> (Erişim Tarihi: 31.05.2025)
- CDP. (2020). Guidance for Scope 3 Emissions Reporting. https://cdn.cdp.net/cdp-production/cms/guidance_docs/pdfs/000/005/652/original/CDP-Scope-3-Emissions-Guidance.pdf (Erişim Tarihi: 21.12.2024)
- Davison, A. C., & Hinkley, D. V. (1997). Bootstrap Methods and Their Application. Cambridge University Press.
- DEFRA. (2023). Greenhouse gas reporting: conversion factors 2023. Department for Environment, Food and Rural Affairs. <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2023> (Erişim Tarihi: 31.05.2025)
- Dulkadiroğlu, H., (2018). Türkiye’de Elektrik Üretiminin Sera Emisyonları Açısından İncelenmesi. Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7(1), 67-74.
- Dindar, G., (2021). Otomotiv Yan Sanayinde Karbon Ayak İzi Hesaplaması- Bursa İli Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Efron, B., & Tibshirani, R. J. (1993). An Introduction to the Bootstrap. Chapman & Hall/CRC.

- Ersoy, A.E., (2017). Türkiye'nin Hayvansal Gübre Kaynaklı Sera Gazı Emisyonları Durumu ve Biyogaz Enerjisi Potansiyeli. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara
- EPA. (2014). Sources of Greenhouse Gas Emissions. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>(Erişim Tarihi: 21.12.2024)
- EPA. (2021). Climate change indicators in the United States. <https://www.epa.gov/climate-indicators> (Erişim Tarihi: 21.12.2024)
- EPA. (2022). <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases> (Erişim Tarihi: 15.05.2025).
- European Commission. (2023). Climate Action: EU Emissions Trading System (EU ETS). https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_en (Erişim Tarihi: 22.04.2025)
- European Commission. (2021). Carbon Border Adjustment Mechanism: Ensuring a level playing field in global trade. https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12604-Carbon-Border-Adjustment-Mechanism_en (Erişim Tarihi:31.05.2025)
- European Commission. (2021). Guidance on greenhouse gas reporting. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/ghg-reporting_en (Erişim Tarihi: 21.12.2024)
- European Commission. (2025). Implementation of the Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM). https://ec.europa.eu/environment/topics/climate-change-and-energy/carbon-border-adjustment-mechanism_en (Erişim Tarihi: 31.05.2025)
- European Energy Exchange (EEX). (2023). EU Emissions Trading System Factsheet. <https://www.eex.com/en/market-data/environmental-markets/eua-futures> (Erişim Tarihi :31.05.2025)
- European Environment Agency (EEA). (2022). National greenhouse gas emissions data. <https://www.eea.europa.eu/themes/climate/national-greenhouse-gas-emissions> (Erişim Tarihi: 18.04.2025)
- Gelman, A., Carlin, J. B., Stern, H. S., Dunson, D. B., Vehtari, A., & Rubin, D. B. (2020). Bayesian Data Analysis (3. baskı). CRC Press.
- Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol). (2015). Corporate Standard. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. <https://ghgprotocol.org/corporate-standard> (Erişim Tarihi: 14.12.2024)
- Güller, S. (2018). Muğla Evsel Atıksu Arıtma Tesisi Karbon Ayak İzini Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Bilimleri Ana Bilim Dalı, Muğla.
- Hickmann, T. (2017). Voluntary global business initiatives and the international climate negotiations: A case study of the Greenhouse Gas Protocol. Journal of Cleaner Production, 169, 94-104
- Hong, H. P. (1998). An efficient point estimate method for probabilistic analysis. Reliability Engineering System Safety, 59(3), 261–267. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0951832097000719>
- IPCC. (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/> (Erişim Tarihi: 10.01.2025)

- IPCC (2006a). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 1: General Guidance and Reporting.
- IPCC. (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor M. ve H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp 129 - 235.
- IPCC. (2007). Climate Change 2007 - Mitigation of Climate Change: Working Group III contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511546013>
- IPCC. (2014). Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/> (Erişim Tarihi: 10.01.2025)
- IPCC. (2014a). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., Field, C.B., Dokken, D.J., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., Alexandratos, N., Bruinsma, J. (2012). World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision (No. 12-03, p. 4). Rome, FAO: ESA Working paper.
- 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 (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, et al., Eds.). Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> (Erişim Tarihi: 10.01.2025)
- International Energy Agency (IEA). (2023). Electricity information: Overview. <https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview> (Erişim Tarihi: 31.05.2025)
- 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. <https://www.iso.org/standard/66453.html> (Erişim Tarihi: 10.01.2025)
- ISO. (2018). 14067:2018 - Carbon Footprint of Products Requirements and Guidelines for Quantification and Communication.
- Johansen, S. (2010). Monte Carlo Simulation and Its Applications.
- Karakoç, A., (2022). Yerel Yönetimler İçin Karbon Ayak İzinin Hesaplanması; Kahraman kazan Örneği. Necmettin Erbakan Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi.
- Kurban, D., (2023). İklim Değişikliği Karşısında Kentlerin Eylem Planları: AB ve Türkiye Kentleri. Trakya Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Keser, O., Kutay, H., (2021). Küresel ısınmaya karşı ruminantlarda metan emisyonu azaltmaya yönelik besleme stratejileri, Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi.
- Kong, Y., Zhang, L., Zhou, H., Li, X. (2019). Uncertainty and sensitivity analysis of greenhouse gas emissions from China's cement industry using Monte Carlo simulation. Journal of Cleaner Production, 220, 462–474. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.118>
- Küçük, G., & Yüce Dural, B. (2022). Avrupa yeşil mutabakatı ve yeşil ekonomiye geçiş: Enerji senaryoları üzerinden bir değerlendirme. Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 22(1), 137-156. <https://doi.org/10.18037/ausbd.1095137>

- Künsch, H. R. (1989). The jackknife and the bootstrap for general stationary observations. The Annals of Statistics, 17(3), 1217-1241. <https://doi.org/10.1214/aos/1176347262>
- Lindsey, R. (2020). Climate change: Atmospheric carbon dioxide. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide> (Erişim Tarihi: 21.12.2024)
- Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D., Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. Nature, 525(7569), 367-371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>
- McKay, M. D., Beckman, R. J., Conover, W. J. (1979). A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. Technometrics, 21(2), 239-245.
- Muslu, Y., (2000). Ekoloji ve Çevre Sorunları. Aktif Yayınevi.
- NASA. (2024). Climate change: How do we know? NASA Climate Change. <https://climate.nasa.gov/evidence/> (Erişim Tarihi: 31.05.2025)
- Özlem, B., (2013). Seçilen Bir Kağıt Fabrikasında Karbon Ayak İzi Belirlenmesi. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Ramanathan, V., Carmichael, G. (2008). Global and regional climate changes due to black carbon. Nature Geoscience, 1(4), 221-227. <https://doi.org/10.1038/ngeo156>
- Ranganathan, J., Corbier, L., Schmitz, S., Oren, K., Dawson, B., Spannagle, M., Bp, M. M., Boileau, P., Canada, E., Frederick, R., Vanderborght, B., Thomson, H. F., Kitamura, K., Woo, C. M., Naseem, Kpmg, P., Miner, R., Pricewaterhousecoopers, L. S., Koch, J., Camobreco, V. (2004). The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard. <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf> (Erişim Tarihi: 21.12.2024)
- Rosenblueth, E. (1975). Point estimates for probability moments. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 72(10), 3812-3814. <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.72.10.3812>
- Sağlar, E., (2019). İzmir İli Hava Kirliliğinin Alansal ve Zamansal Olarak Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum.
- Sıleybi, L. (2023). Harran üniversitesi Osmanbey kampüsü karbon ayak izinin hesaplanması, Yüksek lisans tezi. Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, Türkiye.
- Shindell, D., Faluvegi, G., Seltzer, K., Shindell, C. (2012). Quantified, localized health benefits of accelerated carbon dioxide emissions reductions. Nature Climate Change, 8(4), 291-295. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0108-y>
- Taylor, J. R. (1997). An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements (2nd ed.). University Science Books.
- T.C. Ticaret Bakanlığı. (2021). Yeşil mutabakat eylem planı. <https://ticaret.gov.tr/data/60f1200013b876eb28421b23/MUTABAKAT%20YE%C5%9E%C4%B0L.pdf> (Erişim Tarihi :21.12.2024)
- T.C. Ticaret Bakanlığı. (2020). Döngüsel Ekonomi Eylem Planı ve Türkiye-AB Ticari İlişikleri. <https://www.ticaret.gov.tr/data/5f3d9c8e13cdb.pdf> (Erişim Tarihi: 21.12.24)

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2023). Emissions Trading. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-kyoto-protocol/mechanisms-under-the-kyoto-protocol/emissions-trading> (Erişim Tarihi: 31.05.2025)

World Resources Institute (WRI). (2015). Greenhouse Gas Protocol: Corporate Standard. <https://ghgprotocol.org/corporate-standard> (Erişim Tarihi: 31.05.2025)

World Resources Institute (WRI) - World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). (2004). The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard. <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf> (Erişim Tarihi: 18.04.2025)

World Meteorological Organization. (2023). State of the global climate 2023. <https://public.wmo.int/en/resources/state-of-climate> (Erişim Tarihi: 31.05.2025)

World Resources Institute - World Business Council for Sustainable Development (WRI - WBCSD). (2011). Corporate value chain (Scope 3) accounting and reporting standard. <https://ghgprotocol.org/standards/scope-3-standard> (Erişim Tarihi: 18.04.2025)



ÖZ GEÇMİŞ

Mevlüt ALICI ilk, orta ve lise öğrenimini Amasya ili Gümüşhacıköy ilçesinde tamamladı. Samsun Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisans Çevre Mühendisliği Bölümünü 2021 yılında bölüm ikincisi olarak bitirdi. 2022 yılında Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisansüstü Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisansa başladı. Akademik hayatına devam etmekte ve aynı zamanda İş Güvenliği Uzmanı olarak görev yapmaktadır.

İletişim Bilgileri

ORCID ID : 0009-0001-5518-9264.

Yayınlar:

1. Alıcı, M., & Akdemir, A. (2025). Investigation of measurement uncertainties in carbon footprint calculations. *11th International New York Conference on Evolving Trends in Interdisciplinary Research & Practices*, 1-3 February 2025, Manhattan, New York City.
2. Alıcı, M., & Akdemir, A. (2024). Review and evaluation of current renewable energy potential in Turkey. *Middle East 9th International Conference on Contemporary Scientific Studies*, 71-77, Beirut, Lebanon.
3. Alıcı, M., & Akdemir, A. (2024). Biogas potential in Turkey: Design criteria, strategic evaluation, and sustainable energy future. *Middle East 9th International Conference on Contemporary Scientific Studies*, 78-85, Beirut, Lebanon.
4. Alıcı, M., & Akdemir, A. (2024). Comparison of modern and primitive methods in agricultural irrigation: A study on efficiency, sustainability, climate change, and water resources. *Silk Road 3rd International Scientific Research Congress*, 213-220, Samarkand, Uzbekistan.
5. Alıcı, M., & Akdemir, A. (2024). Investigation of rainwater harvesting systems within the scope of sustainable smart cities, investigation of their applicability, and assessment of their effect on the current water potential. *Silk Road 3rd International Scientific Research Congress*, 199-207, Samarkand, Uzbekistan.

6. Alıcı, M., & Akdemir, A. (2023). Detailed examination of sewage sludge dewatering methods and research of current applications. *5th International Black Sea Modern Scientific Research Congress*, 463-469, Rize, Turkey.
7. Alıcı, M., & Akdemir, A. (2023). Investigation of the usability of treated wastewater in agricultural irrigation and evaluation of current application status in Turkey. *5th International Black Sea Modern Scientific Research Congress*, 1, 454-462, Rize, Turkey.
8. Alıcı, M., & Akdemir, A. (2023). Investigation of combustion efficiency improvement in pellet stoves through design performance analysis using Ansys Fluent program. *II. International Conference on Environment, Energy, and Economics*, 83-99, Giresun, Turkey.

Kazanılan Ödüller, Teşvikler ve Burslar

1. Çevre Mühendisliği Bölümü, Bölüm İkinciliği, 2021