

T.C.  
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İLERİ ATIKSU ARITMA TESİSİNDE KARBON  
AYAKIZININ HESAPLANMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Öğrencinin Adı SOYADI : Büşra ÇAYIR

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :

Enstitü Anabilim Dalı : Çevre Mühendisliği

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Başak TAŞELİ

Haziran 2024  
GİRESUN

T.C.  
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İLERİ ATIKSU ARITMA TESİSİNDE KARBON  
AYAKIZININ HESAPLANMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Büşra ÇAYIR

Enstitü Anabilim Dalı : Çevre Mühendisliği

Bu tez 03/06/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr.  
Yüksel ARDALI  
Jüri Başkanı

Prof. Dr.  
Cengiz MUTLU  
Üye

Prof. Dr.  
Başak TAŞELİ  
Üye

Prof. Dr.  
Bahadır KOZ  
Enstitü Müdürü

## BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Büşra ÇAYIR

09/05/2024

## TEŞEKKÜR

Çıktığım bu yolda bana rehberlik eden yolumu aydınlatan hayallerimden daha fazlasına sahip olmamı sağlayan değerli danışmanım Prof. Dr. Başak TAŞELİ 'ye desteği, motivasyonu ve emekleri için teşekkür ederim. Ayrıca değerli jüri üyeleri Prof. Dr. Yüksel ARDALI 'ya ve Prof. Dr. Cengiz MUTLU 'ya değerlendirme ve görüşlerinden dolayı teşekkür ederim.

Hayatım boyunca en büyük destekçim olan annem Zeynep Çayır'a, babam Ergün ÇAYIR 'a ve kardeşim İsra ÇAYIR 'a, yaptığım bu çalışma boyunca desteğini benden esirgemeyen sevgili meslektaşım Barış KÜÇÜKKARACA 'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman daha iyisini başarabileceğimize bizleri inandıran Gazi Mustafa Kemal ATATÜRK' e sonsuz Saygı, Sevgi ve Şükranla..

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VI
TABLolar LİSTESİ.....	VII
ÖZET.....	VIII
SUMMARY.....	IX
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	8
2.1. Küresel İklim Değişikliği .....	8
2.2. Sera Gazları ve Etkileri .....	9
2.2.1. Nitröz Oksit (N <sub>2</sub> O) .....	11
2.2.2. Metan (CH <sub>4</sub> ).....	12
2.2.3. Karbondioksit (CO <sub>2</sub> ) .....	13
2.2.4. Kloroflorokarbon (CFC).....	14
2.2.5. Ozon (O <sub>3</sub> ) .....	16
2.2.6. Su Buharı .....	16
2.3. Küresel Düzeyde İklim Değişikliğine İlişkin Düzenlemeler.....	17
2.3.1. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi .....	17
2.3.2. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli .....	20
2.3.3. Kyoto Protokolü.....	21
2.3.4. Paris İklim Antlaşması.....	22
2.3.5. Avrupa Yeşil Mutabakatı.....	24
2.3.6. Montreal Protokolü.....	27
2.4. Karbon Ayakizi Kavramı .....	29
2.5. Gömülü Karbon Ayakizi Kavramı.....	32
2.6. Atıksu Arıtma Tesisleri Özelinde Karbon Ayakizi Çalışmaları .....	35

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	44
3.1. Seçilen İleri Atıksu Arıtma Tesisi Bileşenleri .....	44
3.1.1. Izgaralar.....	45
3.1.2. Kum Tutucular.....	46
3.1.3. Anaerobik Fosfor Havuzları .....	46
3.1.4. Havalandırma Havuzları.....	46
3.1.5. Çökeltme Havuzları.....	47
3.1.6. Çamur Susuzlaştırıcı.....	48
3.1.7. Elektrik Tüketimi .....	48
3.2. Seçilen İleri Atıksu Arıtma Tesisi Faaliyetlerinden Kaynaklı Emisyon Hesapları	49
3.2.1. Metan Emisyon Hesabı.....	49
3.2.2. Diazot Monoksit Emisyon Hesabı.....	51
3.2.3. Karbondioksit Emisyon Hesabı.....	52
3.2.4. Elektrik Kullanımı Kaynaklı Emisyon Hesabı .....	52
3.3. Seçilen İleri Atıksu Arıtma Tesisi Gömülü Karbon Emisyon Hesapları .....	53
BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....	63
4.1. Seçilen Atıksu Arıtma Tesisinin Faaliyetleri Kaynaklı Emisyon Sonuçları .....	63
4.1.1. İleri Atıksu Arıtma Tesisi Kaynaklı Metan Emisyonu.....	63
4.1.2. İleri Atıksu Arıtma Tesisi Kaynaklı Nitröz Oksit Emisyonu .....	65
4.1.3. Elektrik tüketimi kaynaklı emisyonlar .....	67
4.2. Seçilen Atıksu Arıtma Tesisinin Gömülü Karbon Emisyon Sonuçları .....	68
BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....	73
KAYNAKLAR .....	81
ÖZGEÇMİŞ .....	87

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AAT	: Atıksu Arıtma Tesisi
AB	: Avrupa Birliği
AKR	: Ardışık Kesikli Reaktör
AYM	: Avrupa Yeşil Mutabakatı
BM	: Birleşmiş Milletler
BMİDÇS	: Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
BOİ	: Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı
CFC	: Kloroflorokarbon
CH <sub>4</sub>	: Metan
CHP	: Kojenerasyon
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
CO <sub>2e</sub>	: Karbondioksit eşdeğeri
COP	: Taraflar Konferansı
ÇO	: Çözünmüş Oksijen
EPD	: Environmental Product Declaration (Çevresel Ürün Beyanları)
ETS	: Emisyon Ticaret Sistemi
GHG	: Greenhouse Gas (Sera Gazı)
GMP	: Global Methane Pledge (Küresel Metan Taahhüdü )
GWP	: Global Warming Potential (Küresel Isınma Potansiyeli)
HFC	: Hidroflorokarbonlar
IMEO	: International Methane Emission Observatory (Uluslararası Metan Emisyon Gözlemevi)
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli)
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Organizasyonu
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı

MCF	: Methane Correction Factor (Metan Düzeltme Faktörü)
N <sub>2</sub> O	: Nitröz Oksit
O <sub>3</sub>	: Ozon
OİP	: Ozon İnceltme Potansiyeli
PFC	: Perflorokarbonlar
SF <sub>6</sub>	: Sülfür heksaflorür
SKD	: Sınırdaki Karbon Düzenlemesi
SRT	: Sludge Retention Time (Çamur bekletme süresi)
SVI	: Sludge Volume Index (Çamur Hacim İndeksi)
TKN	: Toplam Kjeldahl Azotu
TN	: Toplam Azot
TOW	: Total Organics in Wastewater in Inventory Year (Envanter Yılında Atıksudaki Toplam Organik Madde)
TP	: Toplam Fosfor
UNEP	: United Nations Environment Programme (Birleşmiş Milletler Çevre Programı)
UNFCCC	: United Nations Framework Convention on Climate Change (Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi)
UV	: Ultraviyole
WMO	: World Meteorological Organization (Dünya Meteoroloji Örgütü)
YDD	: Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Gazlara Göre Küresel Sera Gazı Emisyonları .....	9
Şekil 2.2. Azot Parçalanma İşlemleri .....	11
Şekil 2.3. Stratosferde Bulunan CFC'nin Ozon Tabakasını Tahrip Etme Mekanizması .....	15
Şekil 2.4. Bir Binanın Temel Yaşam Döngüsü Aşamaları Boyunca Gömülü ve Operasyonel Karbonu .....	33
Şekil 2.5. 2020-2050 Yılları Arasında Yeni Bir Binanın Yerleşik ve Operasyonel Karbonunun Göreceli Etkisi .....	34
Şekil 2.6. Sektörlere Göre Küresel CO <sub>2</sub> Emisyonları .....	34
Şekil 2.7. Atıksu Arıtma Tesisinde Emisyon Faktörleri .....	36
Şekil 3.1. Tesisin Genel Yerleşim Planı .....	45
Şekil 3.2. Yaşam döngüsü aşamaları .....	54
Şekil 4.1. Küresel ısınma potansiyeli tCO <sub>2</sub> e yaşam döngüsü aşamaları.....	68
Şekil 4.2. Küresel ısınma potansiyeli tCO <sub>2</sub> e sınıflandırmalar.....	70
Şekil 4.3. Küresel ısınma potansiyeli tCO <sub>2</sub> e kaynak türleri.....	71

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Sera gazlarının CO <sub>2</sub> 'e göre küresel ısınma potansiyel değerleri .....	10
Tablo 2.2. Ozon tabakasını etkileyen başlıca gazlar ve kullanım alanları.....	16
Tablo 2.3. COP kapsamında gerçekleştirilen konferanslar .....	18
Tablo 2.4. Montreal Protokolü kapsamında üretimi ve kullanımını yasaklanan kimyasallar .....	28
Tablo 3.1. Çökeltme havuzu tasarım kriterleri.....	47
Tablo 3.2. Çamur arıtma ünitesi tasarım kriterleri .....	48
Tablo 3.3. Atıksu arıtma tesisindeki malzeme miktarları .....	53
Tablo 3.4. Avrupa hesaplamalarındaki nakliye senaryoları.....	56
Tablo 4.1. Evsel atıksudaki organik bozunabilen maddeler.....	63
Tablo 4.2. Evsel atıksu için metan emisyon faktörü.....	63
Tablo 4.3. Evsel atıksudan kaynaklanan metan emisyonları. ....	64
Tablo 4.4. N <sub>2</sub> O için varsayılan veriler. ....	65
Tablo 4.5. Atıksudaki azot tahmini.....	65
Tablo 4.6. Atıksudan kaynaklanan dolaylı N <sub>2</sub> O emisyonlarının emisyon faktörü ve emisyonlarının tahmini. ....	67
Tablo 4.7. Atıksu arıtma tesisinin elektrik tüketimi kaynaklı emisyonu. ....	67
Tablo 4.8. Seçilen bir atıksu arıtma tesisinin işletimi kaynaklı toplam karbon emisyonları. ....	68
Tablo 4.9. Malzeme türüne göre gömülü karbon ve malzeme kullanımı. ....	69
Tablo 4.10. Küresel ısınma tCO <sub>2</sub> e sınıfları. ....	70
Tablo 4.11. Küresel ısınma tCO <sub>2</sub> e - kaynak türleri. ....	71

# İLERİ ATIKSU ARITMA TESİSİNDE KARBON AYAKIZININ HESAPLANMASI

## ÖZET

Mevcut tez çalışması, ileri atıksu arıtma tesisinin işletimi kaynaklı (hem elektrik kullanımından hem de genel tesis faaliyetlerinden kaynaklanan emisyonları) sera gazı emisyonlarını ve atıksu arıtma tesisinin inşaatı ve devam eden operasyonları için kullanılan malzemelerin içerdiği gömülü karbon emisyonu incelemiştir. Seçilen atıksu arıtma tesisinin faaliyetlerinden kaynaklanan doğrudan ve dolaylı sera gazı emisyonları hesabı için Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli tarafından belirlenen yöntem kullanılmıştır. Ek olarak, atıksu arıtma tesisinin inşaatı ve devam eden operasyonları için kullanılan malzemelerin içerdiği gömülü karbon emisyonu doğruluk ve uygunluk sağlamak amacıyla ülkeye özgü verilerden yararlanılarak yaşam döngüsü değerlendirmesi modeli kullanılarak hesaplanmıştır.

Bu tez çalışmasının birinci kısmı, ileri atıksu arıtma tesisinin faaliyetlerinden kaynaklı sera gazı emisyonlarına ilişkin veriler sunmaktadır. Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli'nin öngördüğü yöntemler ile yapılan hesaplamalar sonucunda seçilen atıksu arıtma tesisi 91,05 tCO<sub>2e</sub> CH<sub>4</sub> gazı emisyonuna ve 0,344 tCO<sub>2e</sub> N<sub>2</sub>O gazı emisyonuna sahiptir. Dolaylı sera gazı emisyonları ağırlıklı olarak elektrik kullanımından kaynaklanmaktadır ve 15,20 tCO<sub>2e</sub> dir. Sonuç olarak seçilen tesisinin faaliyetlerinden kaynaklanan kümülatif sera gazı emisyonları 107 tCO<sub>2e</sub> dir.

Çalışmanın ikinci kısmını oluşturan atıksu arıtma tesisinin gömülü karbon miktarı ise yaşam döngüsü analizi kullanılarak hesaplanmıştır. Atıksu arıtma tesisinin yapısının incelenmesi sonucunda hazır beton ve çelik sırasıyla yaklaşık 397,48 ve 286,79 tonCO<sub>2e</sub> ile en yüksek miktarda gömülü karbona katkıda bulunmaktadır. Gömülü karbon emisyonlarına en büyük katkıyı sağlayan, dış duvarlar ve cephedir ve bu da atıksu arıtma tesisinin toplam karbon emisyonlarının %39,83'ünü oluşturmakta ve 750 tCO<sub>2e</sub> emisyon yaymaktadır. Kaynak türünün gömülü karbon emisyonlarına etkisi araştırıldığında ise en büyük katkıyı %32,73 ve 620 tCO<sub>2e</sub> emisyon ile boyaların kaplamaların ve cilaların verdiği ve bunu %24,08 ve 450 tCO<sub>2e</sub> ile dış duvarlar ve zeminler için hazır betonun yaydığı emisyon takip etmektedir. İnşaat malzeme üretim aşaması (A1-A3), en yüksek gömülü karbon oranını oluşturmakta olup (1371,01 tCO<sub>2e</sub>), bunu inşaat/kurulum aşaması A5 (453,96 tCO<sub>2e</sub>) ve tesise nakil A4 aşaması (58,18 tCO<sub>2e</sub>) takip etmektedir. Tesisin toplam gömülü karbon emisyonu 1883 tCO<sub>2e</sub> dir.

**Anahtar kelimeler:** İleri atık su arıtımı, Sera gazı emisyonları, Gömülü karbon emisyonları, Metan emisyonları, Nitröz oksit emisyonları, Karbondioksit emisyonları, Sürdürülebilirlik.

# CARBON FOOTPRINT CALCULATION IN ADVANCED WASTEWATER TREATMENT PLANT

## SUMMARY

The current thesis study examined greenhouse gas emissions from the operation of an advanced wastewater treatment plant (emissions from both electricity use and general plant operations) and embodied carbon emissions contained in the materials used for the construction and ongoing operations of the wastewater treatment plant. Direct and indirect greenhouse gas emissions originating from the selected wastewater plant were estimated using the methodology delineated by the Intergovernmental Panel on Climate Change. Additionally, the embodied carbon contained within the materials utilized for the construction and ongoing operations of the wastewater treatment plant was calculated by life cycle assessment model, leveraging country-specific data to ensure accuracy and relevance.

The first part of this thesis provides data regarding the operational greenhouse gas emissions associated with advanced wastewater treatment plant. As a result of the calculations made with the methods prescribed by the Intergovernmental Panel on Climate Change, the selected wastewater treatment plant has 91.05 tCO<sub>2</sub>e CH<sub>4</sub> gas emissions and 0.344 tCO<sub>2</sub>e N<sub>2</sub>O gas emissions. Indirect greenhouse gas emissions predominantly stem from electricity usage, comprising 15.20 tCO<sub>2</sub>e. As a result the cumulative greenhouse gas emissions resulting from the activities of selected wastewater treatment plant are 107 tCO<sub>2</sub>e.

The amount of embodied carbon in the wastewater treatment plant, which constitutes the second part of the study, was calculated using life cycle analysis. The examination of the structure of selected wastewater treatment plant revealed that ready-mix concrete and steel contribute the highest amount of embodied carbon, approximately 397.48 and 286.79 tCO<sub>2</sub>e, respectively. The major contributor to embodied carbon emissions is external walls & facade, which accounts for 39.83% of the total carbon, and emits 750 tCO<sub>2</sub>e. The major contributors of resource type to embodied carbon emissions are paints, coatings & lacquers and ready-mix concrete for external walls & floors which account for 32.73% and 24.08% of the total carbon, respectively, and emit 620 and 450 tCO<sub>2</sub>e. The construction materials stage (A1-A3) constitutes the highest proportion of embodied carbon (1371.01 tCO<sub>2</sub>e), followed by the construction/installation stage A5 (453.96 tCO<sub>2</sub>e) and transportation to the building site A4 stage (58.18 tCO<sub>2</sub>e). Cumulatively, this accounts for a total of 1883 tCO<sub>2</sub>e.

**Keywords:** Advance wastewater treatment, Greenhouse gas emissions, Embodied carbon emissions, Methane emissions, Nitrous oxide emissions, Carbon dioxide emissions, Sustainability.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Dünyadaki üretim ve tüketim dengesizliği, yüksek üretim, tüketim ve artan nüfus gibi olumsuz etkiler, düşünülmeden doğal kaynakların tüketilmesi önüne geçilemez çevre sorunları meydana getirerek bir dizi karmaşık ekolojik soruna neden olmaktadır. Bu sorunlardan küresel ısınma ve iklim değişikliği konusu araştırmacıların dikkatini son yıllarda çekmektedir. Bilindiği gibi, karbondioksit (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>), azotoksit (N<sub>2</sub>O) ve kloroflorokarbonlu (CFC) gazlar küresel ısınmaya etkisi olan sera gazlarıdır. Küresel ısınmaya etki faktörü olarak en az katkıyı CO<sub>2</sub> gazı vermekle birlikte emisyon hacmi en yüksek olan gazdır. Bu sebeple küresel ısınma konusunda CO<sub>2</sub> gazının yeri, önemi ve hacmi önemli bir yer teşkil etmektedir.

Hızlı nüfus artışı, toplumun refahının artması, ekonomik büyüme, sanayileşme, kentleşme bunlara bağlı doğan aşırı kaynak tüketimi, iklim değişikliği, buzulların erimesi ekosisteme zarar veren parametrelerdir çevresel deformasyona neden olup doğal dengeyi bozmaktadır. Dünya üzerinde canlı yaşamının devamını sağlayan temel unsur ekolojik dengedir. Bu dengenin bozulmasına ya da yok olmasına büyük ölçüde antropojenik faaliyetlerin neden olduğu açıktır. Antropojenik etkiler gelişen teknoloji ve buna bağlı olarak yaşam standardının yükselmesi sonucunda sera gazlarında bir artış trendi söz konusu olmuştur. Bu artış da iklim değişikliğini ve küresel ısınmayı tetiklemektedir.

Bu etkilerin ekonomik yansımaları ve toplumsal sonuçları, küresel ısınmanın rasyonel olarak ortaya konulması ihtiyacını doğurmuştur. Hangi sektörün ne kadar CO<sub>2</sub> emisyonu oluşturduğunun bilinmesi, alınacak önlemler ve eylem planları için önemli bir başlangıç noktası olduğundan küresel ısınmaya doğrudan katkısı olan CO<sub>2</sub> gazının rasyonel hesaplanması için yapılan çalışmalar karbon ayakizi kavramını ortaya çıkarmıştır.

Sürdürülebilirliğin değerlendirilmesinde önemli bir ölçüm olan karbon ayakizi, atıksu arıtma tesislerinin (AAT) iklim değişikliği üzerindeki çevresel etkisinin kapsamlı bir şekilde ölçülmesinde kritik bir rol üstlenmektedir. Karbon ayakizi analizi, dünya çapında yaygın bir şekilde benimsenmiş olup, küresel karbon nötrlüğüne ulaşma kolektif arayışında atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılması zorunluluğunun altını çizmektedir. Sera gazı emisyonları, karbon döngüsünün işleyişi yoluyla küresel iklim değişikliği dinamiklerini güçlendirerek çevre üzerinde önemli olumsuz sonuçlar doğurmaktadır (IPCC, 2014; Kumar, 2018). Bu emisyonlar, karbon dioksit (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>), nitroz oksit (N<sub>2</sub>O), hidroflorokarbonlar (HFC'ler), perflorokarbonlar (PFC'ler) ve sülfür heksaflorür (SF<sub>6</sub>) içeren 'altılı sera gazı sepeti' olarak bilinen bir gaz spektrumunu kapsar ve ton karbondioksit eşdeğeri (CO<sub>2</sub>e) cinsinden ölçülür. Hem CO<sub>2</sub> hem de CO<sub>2</sub>e genel olarak karbon emisyonları olarak ifade edilir. Bunlar arasında CO<sub>2</sub>, toplam küresel emisyonların yaklaşık %76'sını oluşturan baskın sera gazıdır (IPCC, 2014).

Küresel karbon döngüsünün yıllık bilimsel değerlendirmesi olan 2023 karbon bütçesi açıklanmış ve veriler ekonomiyi karbondan arındırmaya yönelik küresel çabalarda gerekli hızlanma sağlanmadığı takdirde, fosil yakıtlardan kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyonlarının 2023 yılında tarihi bir zirveye ulaşmasının beklendiğini göstermektedir. Küresel karbon projesi tarafından sağlanan verilere göre, mevcut emisyon oranları devam ederse, kalan karbon miktarı güçlü iklim tedbirleri alınmadığı sürece bütçe azalmaya devam ederek 1,5 °C'lik ısınma eşiğinin yaklaşık yedi yıl içinde kalıcı olarak aşılması ihtimalinin yüzde 50 olacağı tahmin edilmektedir. Bu tahmin, en son Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) raporlarında belirtilen zaman çizelgesiyle karşılaştırıldığında bir gecikmeye işaret etmektedir. Projeksiyonlar, 2022 yılına kıyasla 2023 yılında fosil karbon emisyonlarında yüzde 1,1 artış ile 36,8 milyar ton CO<sub>2</sub> olacağını göstermektedir. Yine Küresel karbon projesi tarafından sağlanan verilere göre kömür, petrol ve gaz da dahil olmak üzere tüm yakıt türlerinde emisyonlar artacaktır. Son on yılda CO<sub>2</sub> emisyonlarındaki artışta küresel bir yavaşlamaya ve bazı ülkelerde gözlemlenen

azalmalara rağmen, iklim değişikliğinin tehlikelerini önlemek için kaydedilen ilerleme yetersiz olarak değerlendirilmiştir (Friedlingstein ve ark., 2023).

Küresel karbon projesi tarafından sağlanan verilere göre Türkiye, 2022'de kaydedilen 400 milyon ton karbon emisyonuyla dünyanın en büyük karbon emisyonu yayan ülkeleri arasında 15. sırada yer almaktadır. Türkiye'nin emisyonlarına en büyük katkı sağlayan 167,2 milyon ton CO<sub>2</sub> ile kömür olurken, onu petrol, gaz ve çimento sektörleri takip etmektedir. Küresel emisyonlarda Çin, ABD ve Hindistan başı çekerken, bölgesel emisyon eğilimleri önemli farklılıklar göstermektedir. Tahminler, 2023'te Hindistan (%8,2) ve Çin'in (%4,0) emisyonlarında artış olacağını gösterirken, AB (% -7,4), ABD (% -3,0) ve dünyanın geri kalanının (%-0,4) düşüşlere tanık olması beklenmektedir (Friendlingstein ve ark., 2023).

Kaynakların sınırlı olduğu gezegenimizde sonsuz ve sınırsız bir büyüme mümkün değildir bu da doğal kaynakların dönüşümünü kaçınılmaz kılmaktadır. Atıksu arıtma tesisleri sürdürülebilir kalkınmanın vazgeçilmez unsurları olup su döngüsünün etkin ve sürdürülebilirliği açısından önemlidir. Bu bağlamda her türlü evsel ve endüstriyel faaliyet sonucunda oluşan atıksuyun arıtılarak, arıtılan suyun yeniden kullanımı sağlanarak sonrasında alıcı ortama deşarj edilmesi gerekmektedir.

Atıksu arıtımı kirleticilerin doğal ortama deşarj edilmeden önce fiziksel, kimyasal ve biyolojik işlemlerle ayrıştırıldığı bir süreçten oluşmaktadır, bu arıtmanın yeterli olmadığı yerlerde ise askıda katı madde, çözünmüş kirleticilerin vb. arıtımı için ileri atıksu arıtma prosesi uygulanır. Atıksu karakterizasyonu incelendiğinde içeriğindeki organik yüke bağlı olarak karbondioksit (CO<sub>2</sub>), nitröz oksit (N<sub>2</sub>O) ve metan (CH<sub>4</sub>) gibi sera gazı emisyonlarının kaynağıdır. Dünyadaki toplam CH<sub>4</sub> emisyon miktarının %9'u ve N<sub>2</sub>O emisyon miktarının %3'ü atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanmaktadır (Eijo-Río ve ark., 2015).

Atıksu arıtma tesisleri yoğun oksijen ihtiyacı olan kirlilik yüküne sahip, buna uygun arıtma teknolojileri kullanan önemli miktarda elektrik tüketimi ve sera gazı emisyonu yayan tesislerdir. Atıksuyun karakterizasyonuna bağlı olarak proses tipi, arıtma teknolojileri, işletme tüketim giderleri (elektrik, su, kimyasal) ve bu etmenlere bağlı olarak da sera gazı emisyon miktarı da değişkenlik göstermektedir (Gülhan ve ark., 2015).

Atıksu arıtma operasyonlarında karbondioksit (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>) ve nitroz oksit (N<sub>2</sub>O) gibi önde gelen sera gazlarının (GHG'ler) neden olduğu sera etkisinin değerlendirilmesi, bunların Küresel ısınma potansiyellerine (GWP'ler) dayanmaktadır. Bir asırlık süre boyunca, bir ton metanın ve nitroz oksidin ısınma etkisi sırasıyla 25 ve 298 ton CO<sub>2</sub>'ye eşittir. Azot oksit (N<sub>2</sub>O), 114 yıllık bir ömre sahip olması ve karbondioksite kıyasla küresel ısınma üzerinde 298 kat daha güçlü bir etkiye sahip olmasıyla sera etkisine önemli bir katkıda bulunan bir gaz olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca ozon tabakasının incelmesinde güçlü bir ajan olarak görev yapmaktadır (Ravishankara ve ark., 2009). Tarım, atıksu yönetimi ve çeşitli endüstriyel prosesler dahil olmak üzere insan faaliyetleri, atmosferik N<sub>2</sub>O seviyelerinin yükselmesine katkıda bulunmaktadır. Önemli miktarda enerji tüketimiyle bilinen atıksu arıtma alanında, Çin ulusal verilerine göre, toplam N<sub>2</sub>O emisyonlarının yaklaşık %5,6'sı tarım, enerji üretimi ve diğer endüstriyel faaliyetlerden sonra dördüncü en büyük emisyon kaynağı olarak konumlanmaktadır. Ek olarak, çok sayıda kanıt, biyolojik nitrojen giderim süreçleri sırasında önemli miktarlarda N<sub>2</sub>O üretildiğini, atıksu arıtma tesisi inşaatının yaygınlaşması ve son yıllarda daha sıkı deşarj standartlarının uygulanması nedeniyle emisyonların arttığını göstermektedir. İleri atıksu arıtma sistemlerinde N<sub>2</sub>O'nun oluşumu hem nitrifikasyon hem de denitrifikasyon prosesleri sırasında meydana gelen çeşitli mikrobiyal reaksiyonlardan kaynaklanmaktadır (Hong ve ark., 2022).

Atıksu arıtmanın uygulanması doğrudan çevresel etkileri azaltma potansiyeline sahip olmakla birlikte öncelikle arıtma tesislerinin işletilmesi ve atıksu altyapısının bakımı için artan enerji kullanımı nedeniyle yeni zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Gelişmekte olan birçok ülkede, enerji yönetimi ile su yönetiminin önceliklendirilmesi arasında bir ikilem mevcut olup, su, enerji ve sera gazı emisyonları arasındaki karmaşık etkileşimin anlaşılmasına çok az vurgu yapılmaktadır (Wanjiru ve Xia, 2017). Bu nedenle, politika yapıcıları ve düzenleyicileri bilinçli karar verme araçlarıyla donatmak için atıksu altyapısındaki enerji tüketimini ve karbon ayakizini incelemeye yönelik acil bir ihtiyaç ortaya çıkmaktadır.

Atıksu arıtma tesislerindeki toplam enerji tüketimi hem operasyonel enerjiyi hem de altyapı ve kimyasal kullanımında yer alan enerjiyi kapsamaktadır (Zang ve ark., 2019) Gömülü enerji, atıksu arıtımında ve inşaatta kullanılan malzemelerin üretimi

için gerekli olan ham madde çıkarma, işleme, üretim ve taşımayı kapsayan tüm akış süreçlerinde harcanan enerjidir (Dixit, 2017). Çeşitli çalışmalar, çeşitli arıtma teknolojileri genelinde enerji yoğunluğunu etkileyen operasyonel faktörleri incelerken, sıklıkla altyapı bileşenlerini gözden kaçırmaktadır (Niu ve ark., 2019; Xu ve ark, 2018). Atıksu arıtma tesislerinin 43 yaşam döngüsü değerlendirme (YDD) çalışmasından sadece 14'ünün inşaat aşamasını hesaba kattığı Gallego ve Tarphani., (2019) tarafından bildirilmiştir. Bu eşitsizlik, atıksu altyapısının analizinin emek yoğun doğasından ve envanterlere sınırlı erişilebilirlikten kaynaklanmaktadır. İdeal olarak, kapsamlı proje raporları, herhangi bir arıtma altyapısındaki inşaat malzemelerinin miktarını kesin olarak belirlemek için doğrulanmış inşaat tahminleri sağlamalıdır. Bu inşaat envanteri, inşaata atfedilen çevresel etkilerin toplam etkilerin %15'ini aştığı bildirildiğinden önem taşımaktadır (Jeong ve ark., 2015; Li ve ark., 2013). Ayrıca, atıksu arıtımında inşaatın etkisi büyük ölçüde arıtma teknolojisine ve sistem sınırlarına bağlıdır (Singh ve ark., 2016).

Atıksu sistemlerinin enerji yoğun özelliklerinden dolayı, toplam enerji tüketiminin nüfus artışına ve buna bağlı olarak atıksu üretimindeki artışa paralel olarak artması beklenmektedir. Atıksu arıtma sistemlerine ilişkin mevcut literatürde beşikten mezara analizlerin baskın olmasına rağmen, bir tesisin işletme aşaması sırasında enerji verimliliğine ilişkin önemli bilgiler sağlayabilecek kapsamlı kapıdan kapıya sistem analizlerine odaklanma sınırlıdır. Atıksu arıtma tesislerinin inşasında kullanılan yapı malzemelerine ilişkin kapsamlı bir veri tabanının oluşturulması, özellikle gelişmekte olan ve az gelişmiş ülkelerdeki tesislerle ilgili çalışmaların çoğunda ihmal edildiği göz önüne alındığında çok önemlidir.

Chen ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmada çimento, çelik, tuğla ve kireç önemli düzeyde gömülü enerji ve karbona sahip olan dört ana malzeme olarak belirlenmiştir. Toplu olarak, bu malzemeler toplam gömülü enerjinin yaklaşık %93,1'ini ve kabaca toplam gömülü karbonun %95,7'sini oluşturmaktadır. Özellikle çelik ve çimento, inşaattaki yaygın uygulamaları ve büyük ölçüde imalat süreçlerinde yer alan madencilik faaliyetlerine atfedilen önemli miktarda gömülü enerji nedeniyle öne çıkmaktadır (Niu ve ark., 2019).

Uluslararası Standardizasyon Organizasyonu (ISO) 14040/14044 tarafından zorunlu kılınan önemli bir metodoloji olan Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi yaklaşımı, binalardaki gömülü karbonun hesaplanması ve değerlendirilmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır (Pai ve ark., 2021; Hellweg ve Mila., 2021). Son yıllarda gömülü karbon değerlendirmelerini kolaylaştırmayı amaçlayan resmi standartlar ve tanınmış endüstri raporları oluşturmak için önemli çabalar sarf edilmektedir (Teng ve ark., 2018). 2014 yılında EN 15804'e uygun olarak tanıtılan Çevresel Ürün Beyanları, çeşitli yapı malzemelerinin çevresel etkilerinin aydınlatılmasında ve gömülü karbon değerlendirmeleri sürecinin düzenlenmesinde temel bir rol oynamaktadır (Esauve ark., 2021; BS EN ISO14040, 2020). Çevresel ürün beyanları, inşaat ürünleri pazarında giderek daha değerli bir çevresel veri kaynağı olarak hizmet etmekte, çevresel performansın değerlendirilmesine yardımcı olmakta ve bina tasarımının sonraki aşamalarında satın alma kararları için ürün karşılaştırmalarına olanak sağlamaktadır (Waldman ve ark.,2020).

Ayrıca, gömülü karbon değerlendirmesi için çeşitli yazılım programları mevcuttur; OpenLCA ve SimaPro en önemlileri arasındadır. Ancak Li (2021) bazı yaşam döngüsü araçlarının tam yaşam döngüsü karbon emisyonları için kapsamlı sonuçlar sağlayamayabileceğini ve birçok aracın bölgeye özgü verilere ve bina normlarına dayandığını, bunların menşe ülkelerinin ötesinde uygulanabilirliğinin dikkatli bir şekilde değerlendirilmesini gerektirdiğini belirtmektedir.

Ülkemizde AB müktesebatına uyum sürecinde sera gazı emisyonları mevzuata girmiş olup üretimde ve tüketimde oluşturulan sera gazı emisyonu hesaplamaları ulusal bazda yapılmaya başlanmıştır. Gelişmekte olan ülkemizde üretim ve tüketim sırasında oluşan CO<sub>2</sub> gazının atmosfere etkilerinin, üretimin her aşamasında hesaplanması, detaylı olarak çalışılması gereken bir konudur.

Bu tez çalışması, ileri aktif çamur proses teknolojisine dayalı bir arıtma tesisinin işletilmesiyle (hem elektrik kullanımından hem de genel tesis faaliyetlerinden kaynaklanan emisyonları) bağlantılı sera gazı emisyonlarını ve arıtma tesisinin inşaatı ve devam eden operasyonları için kullanılan malzemelerin içerdiği gömülü karbon emisyonu incelemektedir. Atıksu-ya ait veriler, toplam enerji tüketimi ve arıtma tesisindeki çeşitli ünite süreçlerinde kullanılan malzemelerle ilgili birincil

veriler sistematik olarak toplanarak titiz bir analize tabi tutulmuştur. Tesisin faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonları, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli tarafından belirlenen metodoloji kullanılarak hesaplanmıştır.

İlaveten, atıksu arıtma tesisinin inşaatı ve devam eden operasyonları için kullanılan malzemelerin içerdiği gömülü karbon emisyonu doğruluk ve uygunluk sağlamak amacıyla ülkeye özgü verilerden yararlanılmış ve yaşam döngüsü modeli ile (Open LCA) modeli kullanılarak tahmin edilmiştir.



## **BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI**

### **2.1. Küresel İklim Değişikliği**

Küresel iklim değişikliği ile küresel ısınma kavramları birbirinden farklı kavramlar olup bu terimler her ne kadar birbirinin yerine kullanma eğiliminde olursa da küresel ısınma, küresel iklim değişikliğinin sadece bir yönünü oluşturur. Küresel ısınma tanım olarak yeryüzünde canlı yaşamı etkileyen ve çevresel değişikliklere neden olan sıcaklık artışıdır (Özmen, 2009; Karaman ve Gökalp, 2010; Babalık ve Dursun, 2019). İki kavramın birbirine karıştırılmasının başlıca nedeni ise her ikisinin de meydana gelmesi sonrası oluşacak sorunlarının ortak olmasıdır. Bölgesel kuraklık, aşırı yağış, sel, buzulların erimesi, deniz seviyesinin yükselmesi, erozyon, tarım arazilerinin yok olması ekolojik yapıda meydana gelen olumsuzluklar hem küresel ısınmanın ve hem de küresel iklim değişikliğinin ortaya çıkardığı başlıca sorunlardır (Keskin ve Kanat, 2018).

Atmosfer; çeşitli gazlar ve asal gazlardan oluşur. Güneşten gelen ışıklardan bir kısmı atmosferi oluşturan gazlar tarafından tutulur. Bu tutulma oranını güneş ışıklarının açısı ve uzaklığı belirler. Aynı tür atomdan oluşmayan herhangi bir gaz molekülü ısıyı soğurup yeniden yayabilir. Atmosferdeki su buharı metan, karbondioksit, karbonmonoksit, azotmonoksit, azotdioksit ve ozon gibi aynı tür iki atomdan oluşmayan tüm gazlar sera gazıdır.

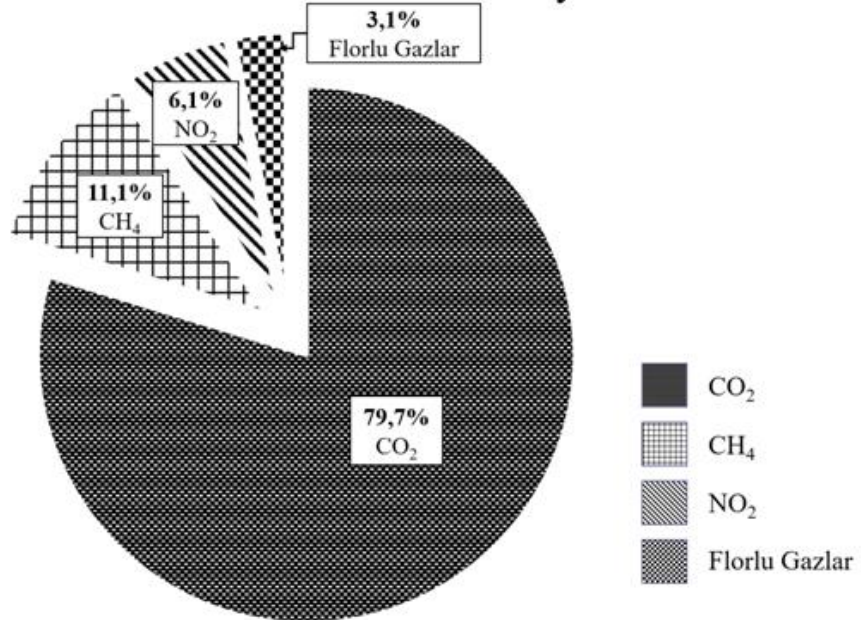
Sera gazları elektromanyetik radyasyonu tutarak yeryüzünden yayılan enerjinin bir kısmını emerek ve yayarak atmosferin en alt katmanı olan troposferde tutulmaya neden olur. Troposfer katmanında bulunan su buharı, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, CFC gibi gazlar güneşten gelen ve yeryüzünden geri yansıyan elektromanyetik dalgaların bir

kısmını soğurur. Bu soğurulan dalgalar tekrar yeryüzüne iner ve bu olaya sera gazı etkisi denir.

Dünya atmosferden gelen ısıyı soğurup yansıtmak yerine ısıyı içinde tutup sera etkisi gösterir. Antropojenik faaliyetlerin çevresel deformasyona etkisine bağlı olarak CO<sub>2</sub> emisyon etkisi hızla artmaktadır. Isı absorpsiyon özelliği yüksek olan, atmosferde ozon yoğunluğunu etkileyen; metan (CH<sub>4</sub>), ozon (O<sub>3</sub>), kloroflorokarbon (CFC), karbondioksit (CO<sub>2</sub>) gibi gazların atmosfere verilim miktarı ve atmosferde yoğunluğu artmaktadır. Bu gazların artışıyla beraber küresel etkiler, iklim değişikliği ortaya çıkmaktadır (Özmen, 2009).

## 2.2. Sera Gazları ve Etkileri

Sera gazı konsantrasyonunun artması atmosfer tabakasını kalınlaştırmak suretiyle küresel ısınma üzerinde çok önemli bir etkisi vardır. Sera etkisi denilince ilk akla gelen gaz CO<sub>2</sub> olmasına rağmen küresel ısınma potansiyeli olarak CH<sub>4</sub> ve N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> den daha etkili gazlardır. Şekil 2.1'de gösterildiği üzere sera gazlarından en yoğun şekilde üretilerek atmosfere verilmesi bakımından CO<sub>2</sub> birinci sıradadır (EPA, 2024).



Şekil 2.1. Gazlara Göre Küresel Sera Gazı Emisyonları (EPA, 2024)

Atmosfer üzerinde her gazın soğurma özelliği, atmosferde tutunduğu süreler farklılık gösterir. Bu özellikleri küresel ısınma üzerinde farklı sera gazlarının farklı etkileri ve potansiyelleri olduğunu gösterir. IPCC, (2006) tarafından sera gazlarının etkilerinin karşılaştırılması ve değerlendirmesi için Küresel ısınma potansiyeli kavramı (GWP) üzerinde çalışılmış ve 20, 100, 500 yıllık zaman dilimleri için potansiyel değerler yayınlanmıştır. GWP için genellikle kullanılan zaman dilimi 100 yıllıktır. GWP; 1 ton gaz emisyonununun 1 ton karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonuna göre oranı ile ölçülür. CO<sub>2</sub>'in GWP değeri 1 kabul edilir ve referans gaz olarak kullanılır. Bunun nedeni CO<sub>2</sub> gazı sistemde çok uzun süre kalmasıdır. Metan (CH<sub>4</sub>) gazının GWP değeri 28 olarak belirlenmiştir. Metan gazı iklim sisteminde yaklaşık 10 yıl kalmaktadır. Sistemde kalma süresi kısa olmasına rağmen enerji emilim potansiyeli yüksektir. Nitröz oksit (N<sub>2</sub>O) için GWP potansiyeli 265 olarak belirlenmiştir. Az miktarda da olsa güçlü ve etkin bir değere sahiptir. Diazotmonoksitin sistemde kalma süresi ortalama 100 yıldır. Sera gazlarının CO<sub>2</sub>'e göre küresel ısınma potansiyel değerleri Tablo 2.1'de verilmiştir (IPCC, 2006).

Tablo 2.1. Sera gazlarının CO<sub>2</sub>'e göre küresel ısınma potansiyel değerleri.

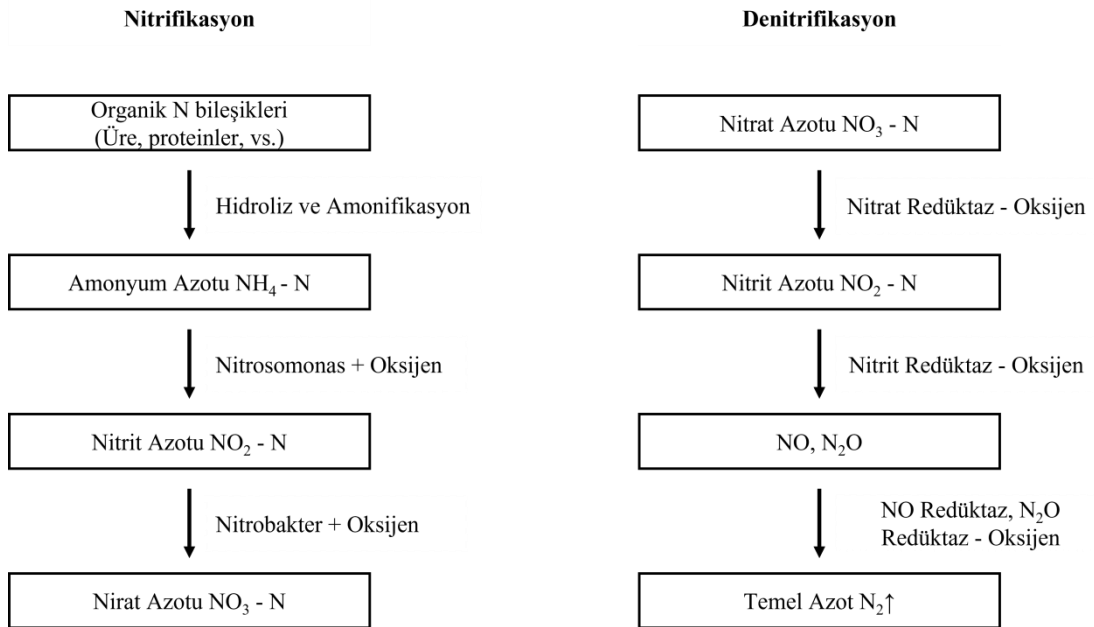
Kimyasal Adı	Kimyasal Formülü	100 Yıllık Zamanda GWP Değeri
Karbondioksit	CO <sub>2</sub>	1
Metan	CH <sub>4</sub>	28
Nitröz Oksit	N <sub>2</sub> O	265
Hidroflorokarbonlar	HFC'ler	
HFC-23	CHF <sub>3</sub>	12400
HFC-32	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	677
HFC-125	CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	3170
HFC-134	CHF <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub>	1120
HFC-134a	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>	1300
HFC-143	CH <sub>2</sub> FCHF <sub>2</sub>	328
HFC-143a	CH <sub>3</sub> CF <sub>3</sub>	4800
HFC-152a	CH <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub>	138
HFC-227ea	CF <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	3350
HFC-236fa	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	8060
HFC-43-10mee	CF <sub>3</sub> CHFCH <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	1650

Tablo 2.1. (Devamı)

Perflorokarbonlar	PFC'lar	
PFC-14	CF <sub>4</sub>	6630
PFC-116	C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	111000
PFC-218	C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>	8900
PFC-318	c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>	9540
PFC-31-10	C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>	9200
PFC-51-14	C <sub>6</sub> F <sub>14</sub>	7910
Kükürt Hekzaflorür	SF <sub>6</sub>	23500

### 2.2.1. Nitröz Oksit (N<sub>2</sub>O)

Nitröz oksit Dünya'nın nitrojen döngüsünün bir parçası olarak atmosferde doğal olarak bulunur ve çeşitli doğal kaynaklara sahiptir. Azot gazı doğada organik ve inorganik halde bulunur. Şekil 2.2 azotun azot fiksasyonu, nitrifikasyon, denitrifikasyon, çürüme, bozunma gibi süreçleri gerçekleştirerek aktif bir döngü içinde olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.2. Azot Parçalanma İşlemleri (Sönmez, 2011)

Azot, N<sub>2</sub>O dahil olmak üzere, azot döngüsü boyunca çeşitli kimyasal formlar alır. Doğal N<sub>2</sub>O emisyonları, esas olarak, topraklarda ve okyanuslarda azotu parçalayan bakterilerden kaynaklanır. Nitröz oksit, belirli bakteri türleri tarafından emildiğinde veya ultraviyole radyasyon veya kimyasal reaksiyonlarla yok edildiğinde atmosferden uzaklaştırılır.

Nitröz oksit emisyonları atıksu arıtma tesislerinde biyolojik arıtma-ileri arıtma proseslerinden kaynaklanır. Çözünmüş oksijen oranının yüksek olduğu biyolojik azot giderimi yapılan proseslerde nitrifikasyon ve denitrifikasyon aşamalarında N<sub>2</sub>O üretimi oldukça fazladır. Nitröz oksit sera gazı eşdeğeri karbondioksit gazının 265 katıdır ve bu açıdan biyolojik arıtma esnasında az miktarda oluşmasına rağmen sera gazı etkisi açısından önemlidir. Atıksu arıtma tesislerinde nitröz oksit emisyonları temel olarak üç reaksiyon sonucu olmaktadır. Bunlar nitrifikasyon, denitrifikasyon ve kimyasal reaksiyonlardır (Erdoğan, 2015).

### **2.2.2. Metan (CH<sub>4</sub>)**

Metan gazının karbondioksite göre ısı tutma kapasitesi çok yüksektir. CO<sub>2</sub>'den daha kısa süre atmosferde kalır. Metan, karbondioksitten sonra iklim değişikliğine en çok katkıda bulunan ikinci sera gazıdır. Metan ve karbondioksit formundaki sera gazı emisyonları, evsel ve endüstriyel atıksu ve bunların artık katı yan ürünleri (çamur) anaerobik koşullar altında veya anaerobik koşullara tabi tutulduğunda üretilir. Metan güçlü bir hava kirliliği parametresi olup konsantrasyonu hızla artmakta ve ciddi sağlık sorunlarına neden olan ozon oluşumuna katkıda bulunmaktadır.

100 yıllık bir zaman ölçeğinde metan, karbondioksitten 28 kat daha fazla küresel ısınma potansiyeline sahiptir ve 20 yıllık bir zaman ölçeğinde CO<sub>2</sub>'den 80 kat daha güçlüdür. Ülkeler uluslararası düzeyde emisyon azaltımı üzerine politikalar geliştirmektedir. Metan emisyon miktarını 2030 yılına kadar %30 oranda azaltmak için 2021 COP26'da küresel metan taahhüdü (GMP) başlatılmıştır, bu zamana kadar yaklaşık 100 ülke bu konuya destek verirken bu toplantıda ülke sayısı 150'ye ulaşmış ve ciddi bir destek başlamıştır. Konunun ileriye götürülmesine yardımcı olmak için

2021'de UNEP, İklim ve Temiz Hava Koalisyonu ve Uluslararası Enerji Ajansı ile birlikte Uluslararası Metan Emisyon Gözlemevi (IMEO) kurulmuştur. Aralık 2023'te COP28'de yine Küresel Metan Taahhüt Zirvesi düzenlenmiş, AB ülkelere metan gazının toplanması halinde satın alacağına dair teşvikte bulunmuştur (Avrupa Komisyonu, 2024).

Küresel antropojenik metan emisyonlarının yaklaşık üçte biri enerji sektöründen kaynaklanmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı, metanın doğal gaz şeklinde satılabilir bir ürün olduğu göz önüne alındığında, bu emisyonların %45'inin net maliyet olmaksızın azaltılabileceğini tahmin etmektedir. Önümüzdeki 30 yıl içinde insan faaliyetleriyle ilişkili metan emisyonlarını %50 azaltmak, küresel sıcaklık değişimini 2050 yılına kadar 0,2°C azaltabilir, bu da sıcaklık artışını 2°C'nin altında tutmak için önemli bir adımdır (Avrupa Komisyonu, 2024).

CH<sub>4</sub> emisyonlarını azaltmak, sadece iklim ve çevreyi değil aynı zamanda enerji güvenliğini de iyileştirmek için çeşitli politika seçenekleri ve teknolojileri mevcuttur. Buna örnek olarak çöp gazı geri kazanımı veya tarımsal gübreden üretilen biyogazın, enerji sektöründe elektrik ve ısı üretmek için kullanılması verilebilir (Avrupa Komisyonu, 2024).

### **2.2.3. Karbondioksit (CO<sub>2</sub>)**

Karbon hem canlı organizmanın hem de modern endüstrinin vazgeçilmez bir parçasıdır. Canlı organizmalar, tortul kayaçlar, jeolojik süreçler, volkanik aktiviteler, okyanuslar, fosil yakıtlar, besin zinciri vb. etkenlerle atmosferdeki CO<sub>2</sub> seviyesi uzun süreçler ve döngüler boyunca değişkenlik gösterir. Volkanik patlamalar, yanmalar, hücresel solunum, doğal bozunmalar atmosferde bulunan karbon kaynaklarıdır. Yeşil bitkiler, kemosentez yapan bakteriler, klorofile sahip mikroorganizmalar belli başlı yutak alanlardır (Smith ve ark., 2008; Ersoy, 2017).

Gülhan ve ark. (2018) tarafından yapılan araştırmada karbondioksitin, antropojenik faaliyetler kaynaklı sera gazlarının küresel ısınmaya katkısının toplam ısınmanın üçte

biri olduğu belirtilmiştir. Atmosferde kalma sũresinin diğer gazlardan fazla olması sebebiyle karbondioksit konsantrasyonu dũřuk oranlarda artsa dahi bũyũk efektif etkiye neden olmaktadır. Karbondioksit 2000-15000 nanometre arasındaki dalga boylarındaki enerjiyi emer ve daha sonra titreşim ve kızılõtesi yoluyla enerjiyi her yõne yayar. Bu enerjinin yaklaşık yarısı uzaya gider ve diğer yarısı tekrar dũnyaya yansiyarak sera etkisi yapar (Gillingham ve Stock, 2018). CO<sub>2</sub> gazı biyolojik kõkenli olduğu için emisyon raporlarına dahil edilmez. GWP hesaplamalarında referans gaz olarak değeri 1 kabul edilir (IPCC, 2006).

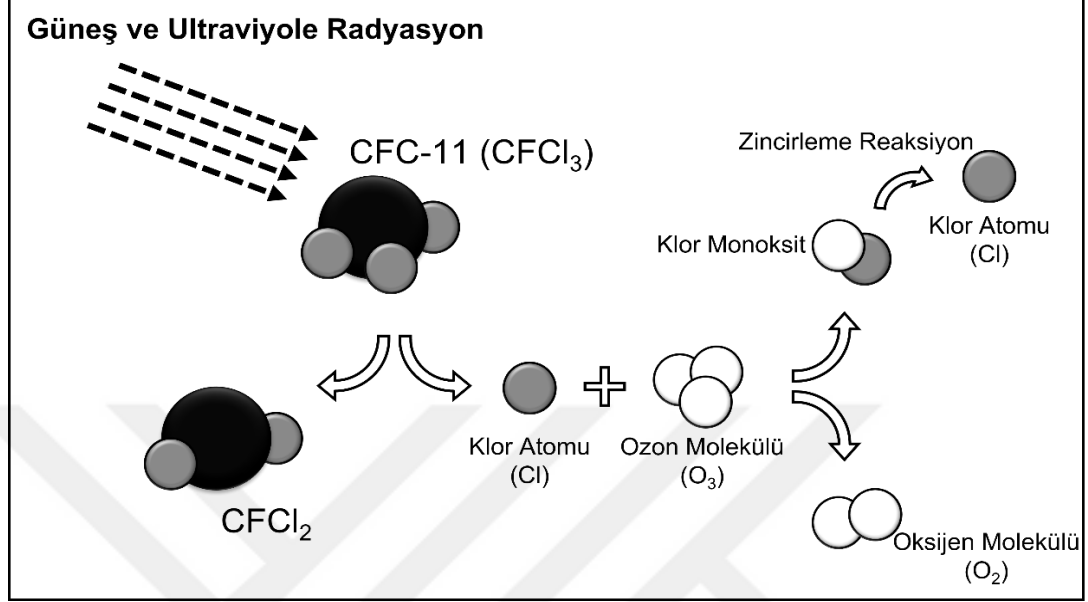
Karbondioksit, insan faaliyetleri yoluyla yayılan birincil sera gazıdır. Karbondioksit, Dũnya'nın karbon dõngũsũnũn bir parçası olarak atmosferde doğal olarak (karbonun atmosfer, okyanuslar, toprak, bitkiler ve hayvanlar arasında doğal dolaşımı) bulunur. İnsan faaliyetleri hem atmosfere daha fazla CO<sub>2</sub> ekleyerek hem de ormanlar ve topraklar gibi doğal yutakların atmosferden CO<sub>2</sub> ıkarma ve depolama yeteneklerini etkileyerek karbon dõngũsũnũ değiştirir (Mercan ve Karakaya, 2013). İnsan faaliyetleri CO<sub>2</sub> emisyonlarının yaklaşık yũzde 3'ũnden ve sanayi devriminden bu yana atmosferde meydana gelen 7 milyar ton karbon emisyonundan sorumludur (Õzaę ve ark., 2017).

#### **2.2.4. Kloroflorokarbon (CFC)**

Kloroflorokarbon (CFC) gazı atmosferdeki radyasyonu artırma ve ozon tabakasını inceltme özelliğine sahip gũclũ bir sera gazıdır. CFC antropojenik faaliyetler sonucu ortaya çıkar. 1990 sonrasında kullanım alanlarına sınırlama ve yasaklama getirilmiştir. (evre şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024). Bir sonraki bõlũmde Montreal Protokolũ başlığı altında detaylı bilgi verilmiştir.

Atmosferdeki emisyon miktarını artıran başlıca kloroflorokarbon gazları CFC-11,12,13'tũr. CFC'ler klor, flor ve karbon atomlarından oluşur ve atmosferdeki diğer molekũllerle kolayca reaksiyona girmezler. Denklem 2.1 ve 2.2'de verildiği üzere bir klor atomu stratosferde bulunan ozon (O<sub>3</sub>) ile defalarca reaksiyona girerek ozon tabakasına zarar verir. şekil 2.3 stratosferde bulunan CFC'nin ozon tabakasını tahrip

etme mekanizmasını göstermektedir (Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024).



Şekil 2.3. Stratosferde Bulunan CFC'nin Ozon Tabakasını Tahrip Etme Mekanizması (Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024)



Atmosfere yayılan CFC'ler kimyasal bozunma yaşamadan stratosfer tabakasına kadar ilerleyerek bu katmanda güneşten aldıkları UV ışınlarıyla parçalanıp klormonoksit atomlarını ortaya çıkarılmaktadır. Serbest halde bulunan klormonoksit atomları ozonla tepkimeye girer, klor ve oksijen ortaya çıkarır. Bu tepkimenin defalarca tekrarlanması sonucunda bir klor atomu 100000 ozon molekülünü parçalar. Ozon molekülünün hızla azalması ozon tabakasının incilmesi olarak ifade edilir. Kloroflorokarbonlar (CFC), hidrokloroflorokarbonlar (HCFC), halonlar, klor, azot, brom gibi kimyasallar ozonla tepkimeye girip ozon tabakasının incelmeye sebep olur (Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024).

### 2.2.5. Ozon (O<sub>3</sub>)

Yeryüzüne yakın seviyelerde zehirli bir kirletici olan ozon stratosfer tabakasında oldukça önemli bir işlev görür. Stratosfer katmanında bir tabaka haline gelen ozon güneşten dünyaya gelen ultraviyole ışınlarını absorbe ederek koruyucu etki göstermektedir. Ancak atmosferde yüzeye yakın bulunan ozon gazı sıcaklığı da absorbe ederek yoğunlaşır ve sera etkisi gösterir. Özellikle kentleşme ve sanayileşme ozon miktarını artırmaktadır. Tablo 2.2. ozon tabakasını etkileyen başlıca gazlar ve kullanım alanlarını özetlemektedir.

Tablo 2.2. Ozon tabakasını etkileyen başlıca gazlar ve kullanım alanları.

Gazın Adı	Gazın Kullanım Alanı	Gazın Kimyasal Formülü
Halon-1301	Yangın söndürme cihazları	CBrF <sub>3</sub>
Metil kloroform	Solventler	CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub>
Karbon tetraklorür	Solventler	CCl <sub>4</sub>
CFC-113	Solventler	C <sub>2</sub> Cl <sub>3</sub> F <sub>3</sub>
CGC-11	Aerosoller, yangın söndürme cihazları	CCl <sub>3</sub> F
CFC-12	Aerosoller, yangın söndürme cihazları	CCl <sub>3</sub> F

1839 yılında ozonun keşfinden itibaren 1860 yılından beri düzenli ozon ölçümleri yapılmaya başlanmıştır. Dünya Meteoroloji Teşkilatı tarafından konuya önem verilerek konunun önemini anlatmak için ilk kez 1975 yılında ozon tabakasının kalınlığıyla değerlendirme raporu yayınlamıştır. Dünya Meteoroloji Teşkilatının yayınladığı bu değerlendirme raporuna istinaden 1985'te Ozon Tabakasının Korunmasına İlişkin Viyana Sözleşmesi ve 1987'de Ozon Tabakasının Korunmasına Dair Montreal Protokolü imzalanmıştır (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2024).

### 2.2.6. Su Buharı

Küresel ısınma dünyanın büyük bir kısmına hâkim olan yüzey sularının (okyanus, akarsu, göl, deniz vb.) buharlaşmasını ve böylelikle atmosferdeki su buharı yüzdesini artırmaktadır. Küresel ısınma aynı zamanda albedo (herhangi bir yüzeyin üzerine düşen güneş ışığını yansıtma kapasitesi) etkisini artırıp güneşten gelen ısının daha

çok soğurulmasına ve dünyanın ortalama sıcaklığının artmasına sebep olur. Yüzey sıcaklığının artmasına bağlı olarak üst troposferin özgül nem değeri artmakta ve dolaylı sera etkisine neden olmaktadır (Yang ve Tung, 1998).

Su buharı atmosferdeki kızılötesi opaklığı sağlayan en baskın sera gazıdır. Küresel ısınma artması su buharını artırmakta bu da diğer sera gazlarının efektif etkisini artırmakta ve kontrol edilemez bir handikap haline getirmektedir (Held ve Soden, 2000). Su buharı diğer sera gazlarından daha fazla dalga boyunda kızılötesi radyasyon yayar, emer ve diğer sera gazlarından daha fazla miktarda bulunur ve bu nedenle atmosferde açık ara en fazla sera etkisi yapan gazdır (Easterbrook, 2016).

### **2.3. Küresel Düzeyde İklim Değişikliğine İlişkin Düzenlemeler**

#### **2.3.1. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi**

1992 yılında gerçekleştirilen Rio zirvesinde Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve sözleşmesi imzaya açılmıştır. Uluslararası düzeyde atılan ilk adım olup Ülkemiz bu sözleşmeye 2004 yılında katılmıştır (Öztürk, 2019). Sözleşmede bazı maddeler tüm katılımcı ülkeler için ortakken bazı maddelerde gelişmekte olan ve gelişmiş ülke ayrımına gidilmiş ve bu kriter baz alınmıştır. Ayrıca ek maddelerle de bu ülkeler ve yaptırımları da netleştirilmiştir. Ek-1 de bulunan ülkeler gelişmekte olan ülkelerdir. Sera gazının azaltılması, sera gazı emen yutak alanları genişletmeyi ve 2000 yılı emisyon miktarını 1990 seviyesine indirmeyi hedefleyen maddeler öngörülmüştür. Ek-2 de bulunan ülkeler gelişmiş ülkelerdir. Gelişmekte olan ülkelere sözleşme yükümlülüklerini yerine getirmesi emisyon miktarını azaltması için gelişmekte olan ülkelere teknolojik ve ekonomik yardım yapılması öngörülmüştür (Dışişleri Bakanlığı, 2024).

İklim değişikliği çerçeve sözleşmesi adı üstünde çerçeve kısa ve somut hükümleri olan net bağlayıcılığı olmayan bir sözleşmedir. Her ne kadar burada yükümlülük diye bahsetsek de bu sözleşme kapsamındaki tüm maddeler gönüllülük ve bireysel farkındalık esasına dayanmaktadır.

Taraflar Konferansı (Conferences of the Parties, COP) sözleşmenin yürürlüğe girdiği 1994 yılından sonra ilk defa 1995 yılında Berlin’de düzenlenmiştir. Halihazırda 28 tanesi tamamlanmış olan konferanslar arasında en önemlisi 1997 yılında Kyoto’da düzenlenen üçüncü taraflar konferansıdır ki bu konferansta Kyoto Protokolü imzalanmıştır.

Son olarak COP 28 adı altında 2023 yılında Dubai’de düzenlenen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı 85.000 katılımcıyla alanında düzenlenen en büyük konferans olarak kayıtlara geçmiştir. Paris Anlaşması’nın (COP21) hedef konuları, sera gazı emisyon azaltımında ilerlemesi yavaş olan teknolojik desteğe ihtiyacı olan ülkelere destek paketleri, fosil yakıtlardan uzaklaşma ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim konferansın önemli konu başlıklarıdır (UNFCCC, 2023).

Birleşmiş Milletler Çerçeve Sözleşmesi yürürlüğe girdikten sonra alınan kararların yaptırımların incelenmesi için Müzakere Komitesi kurulmuş 1995 yılında Müzakere Komitesinin sözleşmesi fesih edilmiş ve Taraflar Konferansı (COP- Conference of the Parties) sözleşmenin nihai otoritesi olarak kabul edilmiştir. COP alınan kararların uygulamasını teşvik etme, bunların etkinliğini denetleme, ayrıca uluslararası faaliyet raporlarını düzenleme yetkisine sahiptir (Sadioğlu ve Ağıralan, 2020). Sözleşme hedefleri doğrultusunda Tablo 2.3’de verildiği üzere birçok defa çalışmalar ve toplantılar yapılmıştır.

Tablo 2.3. COP kapsamında gerçekleştirilen konferanslar.

İklim Değişikliği Konferansı (İDK)	Oturum	Tarih	Konum
Berlin İDK	COP 1	Nisan, 1995	Berlin, Almanya
Geneva İDK	COP 2	Temmuz, 1996	Geneva, İsviçre
Kyoto İDK	COP 3	Aralık, 1997	Kyoto, Japonya
Buenos Aires İDK	COP 4	Kasım, 1998	Buenos Aires, Arjantin
Bonn İDK	COP 5	Ekim, 1998	Bonn, Almanya

Tablo 2.3. (Devamı)

İklim Değişikliği Konferansı	Oturum	Tarih	Konum
Lahey İDK	COP 6	Temmuz, 2001	Lahey, Hollanda
Bonn İDK	COP 6-2	Ekim, 2001	Bonn, Almanya
Marakeş İDK	COP 7	Ekim, 2002	Marakeş, Fas
Yeni Delhi İDK	COP 8	Aralık, 2002	Yeni Delhi, Hindistan
Milano İDK	COP 9	Aralık, 2003	Milan, İtalya
Buenos Aires İDK	COP 10	Aralık, 2004	Buenos Aires, Arjantin
Montreal İDK	COP 11	Aralık, 2005	Montreal, Kanada
Nairobi İDK	COP 12	Kasım, 2006	Nairobi, Kenya
Bali İDK	COP 13	Aralık, 2007	Bali, Endonezya
Poznan İDK	COP 14	Aralık, 2008	Poznan, Polonya
Kopenhag İDK	COP 15	Aralık, 2009	Kopenhag, Danimarka
Cancun İDK	COP 16	Kasım, 2010	Cancun, Meksika
Durban İDK	COP 17	Kasım, 2011	Durban, Güney Afrika
Doha İDK	COP 18	Kasım, 2012	Doha, Katar
Varşova İDK	COP 19	Kasım, 2013	Varşova, Polonya
Lima İDK	COP 20	Aralık, 2014	Lima, Peru
Paris İDK	COP 21	Kasım, 2015	Paris, Fransa
Marakeş İDK	COP 22	Kasım, 2016	Marakeş, Fas
BM İDK	COP 23	Kasım, 2017	Bonn, Almanya
Katowice İDK	COP 24	Aralık, 2018	Katowice, Polonya

Tablo 2.3. (Devamı)

İklim Değişikliği Konferansı	Oturum	Tarih	Konum
BM İDK	COP 25	Aralık, 2019	Madrid, İspanya
Glasgow İDK	COP 26	Ekim-Kasım, 2021	Glasgow, Büyük Britanya
Şarm El- Şeyh İDK	COP 27	Kasım, 2022	Şarm El-Şeyh, Mısır
Dubai İDK	COP 28	Kasım-Aralık, 2023	Dubai, Birleşik Arap Emirlikleri

### 2.3.2. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli

1988 yılında Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) ve Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) tarafından oluşturulan Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) nin amacı, her düzeydeki hükümetlere iklim politikaları geliştirmek için kullanabilecekleri bilimsel bilgileri sağlamaktır. IPCC raporları aynı zamanda uluslararası iklim değişikliği müzakerelerinde önemli bir girdidir. IPCC, Birleşmiş Milletler veya WMO üyesi olan hükümetlerin oluşturduğu bir kuruluştur. IPCC'nin şu anda 195 üyesi bulunmaktadır (IPCC, 2024).

IPCC bireysel çalışma yapmayan objektif değerlendirme yapan bir otoritedir. IPCC çalışma ilkesi olarak; antropojenik faaliyetlerin iklim değişikliğine etkisini, iklim değişikliğinin yarattığı riskleri ve çözüm önerilerini benimsemiştir. IPCC iklim değişikliği kapsamında bilimsel literatür taraması uzman heyeti tarafından incelenmektedir. IPCC de bilim insanları ve hükümet temsilcileri yer almaktadır. İncelenen bilimsel çalışmalar hangi konularda eksiklik olduğunu hangi alanda çalışmalar yapıldığı ve ilerleme sağlandığı uluslararası düzeyde incelenip hükümetlere referans olarak sunulmakta ve Değerlendirme Raporu olarak yayınlanmaktadır. Birçok bilim insanı IPCC bu çalışmalarına katılmak için gönüllü olmaktadır. IPCC iklim değişikliğinin etkileri bu etkilerin uyum sürecinde karşılaşılan bilimsel, teknik, sosyoekonomik, çevresel, ekonomik, sektörel konularda

bilimsel araştırmaları inceleyerek değerlendirme raporları dzenlemekte ve yılda genellikle iki kez toplanarak raporları değerlendirmektedir (IPCC, 2024).

IPCC Ulusal Sera Gazı Envanteri için 2006 da yayımlanan kılavuz baz alınarak çalışmalar yapıldıkça gncellenmektedir. Birçok parametreye göre emisyon faktörleri belirlenmiştir. Bunlar ülkelere sera gazı envanteri hazırlamalarında rehberlik etmektedir. IPCC'nin bu envanteri COP19'da yayımlanarak bu konferans sonrasında birçok revizeyle gnclendirilmiştir.

UNFCCC 2015'te COP21'de Paris Anlaşması'na vardıkında küresel ısınmayı 1,5°C'de tutmaya çalışırken 2°C'nin oldukça altında tutma hedefini belirledi ancak o zamanlar 1,5°C'lik ısınmanın ne anlama geldiğine dair çok az anlayış hakimdi. 1,5°C'nin etkilerinin 2°C'den nasıl farklı olacağını açıklayan çok az bilimsel araştırma olup ısınmanın 1,5°C'de nasıl tutulacağı konusunda çok az anlayış vardı. Bu nedenle UNFCCC, IPCC'yi 1,5°C'lik küresel ısınma hakkında bir rapor hazırlamaya davet etmiş  IPCC alışma grubu da raporu hazırlamak için iş birliği yapmıştır. IPCC, 1,5°C Küresel Isınma zel Raporunu (SR15) yayınlamıştır (IPCC, 2018). Bu yayımlanan özel raporda ülkelerin ve bireylerin sürdürülebilirliğe adaptasyonu konusunda orta ve yüksek ölçekli tavsiyeler verilmiştir.

### **2.3.3. Kyoto Protokolü**

Birleşmiş Milletler ereve Sözleşmesinin (BMİDÇS) somut ve bağlayıcı maddeler içermemesi bu toplantıların devam sürecinde somut ve bağlayıcı bir sözleşme ihtiyaını doğurmuştur. 1995 yılında Berlin'de yapılan Taraflar Konferansında (COP1) bağlayıcılığı olan hukuki bir belge üzerinde anlaşmaya varılmıştır. 1997 yılında nc Taraflar Konferansında (COP3) uluslararası sera gazı emisyonu azaltımında bağlayıcı hedefleri olan Kyoto Protokolünün imza sürecini başlatan dzenlemeler yapılmıştır. Kyoto protokolü süreci,1997 yılında Japonya'nın Kyoto kentinde yapılan COP3 toplantısı kapsamında başlamıştır. 1998 yılında imza süreci başlamış 2004 yılında Rusya'nın imzası sonucunda 16 şubat 2005'te yürürlüğe girmiştir.

Kyoto protokolü sera etkisi bulunan bütün gazların emisyon miktarını azaltmayı hedeflemektedir. Ortak yükümlülükler ve farklılaştırılmış sorumluluklar yükümlülüğü bulunan devletlerin farklı sorumlulukları bulunmaktadır. Bu farklı sorumluluklar noktasında sera gazı emisyon miktarları referans alınmıştır. Sera gazlarını azaltma yükümlülüğü gelişmiş ülkelere getirilmiştir. Bu ülkeler ve azalmaları gereken miktarlar ek maddelerde belirlenmiştir. Gelişmekte olan ülkeler için azaltma miktarı gibi bir yükümlülük getirilmemiş sadece raporlama düzenleme ve envanter hazırlama yükümlülüğü bulunmaktadır. Gelişmiş ülkelerin bir diğer sorumluluğu da gelişmekte olan ülkelere yardım etmektir.

Protokolün Ek-A kısmında en etkili 6 sera gazı ve bunların en çok emisyon yaydığı sektörler listelenmiştir. Ek-B kısmında Ek-1 ülkeleri ve emisyon hedefleri raporlanmıştır. Taraflarının 2008-2012 taahhüt dönemindeki hedefi ülkelerin sera gazı emisyon düzeyini 1990 yılının %5 altına indirmektir. Protokolün 2013-2020 taahhüt döneminde hedefleri ise 2020 yılında sera gazı emisyonlarının %18 azaltılmasıdır. Kyoto protokolü her ne kadar bağlayıcılığı olan uluslararası bir sözleşme olsa da yaptırımlar konusunda netlik içermemektedir (Binboğa, 2017).

Ülkelerin karbon emisyonlarının azaltılması uluslararası ve bağlayıcı bir düzenleme olmadan pek mümkün gözükmemektedir. Kyoto Protokolü bu bağlamda önemli ve öncü özellik taşımaktadır. Her ne kadar hedefler yerine getirilememiş olsa da emisyon oranında azalma ve küresel bir bilinç oluşmuştur. Kyoto Protokolü BMİDÇS kapsamında başlatılan sera gazı emisyonunu azaltmak için atılan önemli adımların başında gelmektedir.

#### **2.3.4. Paris İklim Antlaşması**

İklim değişikliği farkında olduğumuz ya da olmadığımız birçok operasyonun birbiriyle etkileşimli halde olduğu sistematik bir süreçtir. Paris iklim antlaşması küresel bir sorun olan iklim değişikliğiyle tüm dünya ülkeleri olarak hep birlikte mücadele etmemiz için ortak bir çalışma modeli sunan uluslararası bir anlaşmadır.

Kyoto Protokolünün kapsam bakımından bir başlangıç olduğu için yeterli olmaması, kapsadığı sektör sayısının yetersiz olması ve katılım olarak yetersiz kalması özellikle ABD, Çin gibi devletlerin katılımının olmaması protokolden istenilen verimin alınmasını engellemiştir. Protokolün ülkelerin iç hukukunda işleyişinin yavaş olması da uluslararası etkiyi de azaltmıştır.

2011 yılında 17. Taraflar Konferansı (COP 27) Durban'da 2020 yılında yürürlüğe girmesi için taslak antlaşma üzerinde uzlaşmaya varılmıştır. 2012 yılında ise 18. Taraflar konferansı (COP 28) olan Doha Konferansı yeni iklim dönemine geçişinde önemli bir yer tutmaktadır. Bu konferans 2012 yılında süresi dolan Kyoto Protokolünün süresini uzatmış ve 2. Taahhüt dönemi olan 2013-2020 süreci başlamıştır. Doha konferansında tüm ülkelere çağrı yapılmış iklim değişikliğinde yeni bir dönem başlamasına yönelik çalışmalar başlamış ve takvim belirlenmiştir. 2015 yılında Paris'te toplanan 21.Taraflar Konferansı (COP21) 2020 yılında işlerlik kazanacak yeni kapsamlı bir anlaşmanın müzakere süreci başlatmıştır.

Paris İklim Antlaşmasının global bir hedefi vardır. Küresel sıcaklık artışını 19. yy da ki sanayi öncesi döneme göre 2 derecenin oldukça altında hatta mümkünse 1,5 dereceyle sınırlamayı hedeflemektedir. Bunun için her ülkeye kendi hedefini belirleme fırsatı verilmiş ve bu durum ulusal katkı beyanı olarak tanımlanmıştır. Taraf ülkelerin emisyon azaltım miktarları kendi beyanlarına göre belirlenerek buna göre bir iyileştirme planı hazırlanacaktır. Her ülkenin 5 yılda bir kendi hedefini gözden geçirip hazırladığı envanterleri değerlendirmesi ve bir önceki hedefini geçmesi gerekmektedir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024).

Antlaşma maddelerine göre gelişmiş ülkeler sera gazı azaltılması konusunda öncülük edecek ve gelişmekte olan ülkeleri teşvik edip maddi ve teknolojik yardımda bulunacaktır. Paris anlaşmasıyla en büyük karbon kaynağı olan fosil yakıtların kullanımını azaltılmış yenilenebilir enerji kaynaklarıyla ilgili çalışmalar artmış ve kullanım alanı artırılmıştır.

### 2.3.5. Avrupa Yeşil Mutabakatı

Avrupa Birliği 2050 karbon-nötr hedefi kapsamında Aralık 2019'da Avrupa Yeşil Mutabakatını (AYM) yayınlamıştır. Yeşil Mutabakat adı verilen iklim yasası 2021 yılında onaylanmış ve tüm sektörlerin iklim nötr olma kapsamında yasal bir zorunlulukla harekete geçmesi sağlanmıştır. Yeşil mutabakat kapsamında 2030 ve 2050 yılları için orta ve uzun vade hedefler koyulmuştur. AYM 2050 yılı için kendine iklim-nötr hedefi koymuş ve 2030 yılında 1990 seviyesine kıyasla; iklim, enerji, arazi kullanımı, ulaşım ve vergilendirme politikalarından kaynaklı emisyonu %55 azaltmak için 55 uyum paketini 2021'de yayınlamıştır. Emisyon miktarını 2030 yılında %55 azaltılması 2050 için karbon nötr olmak hedeflenmiştir. (Ticaret Bakanlığı, 2023).

Avrupa Yeşil Mutabakatı, AB'nin 2050'ye kadar karbonsuz ekonomik büyüme ve bu süreçte kaynak kullanımına bağımlılığın sona ermesi gibi temel hedeflerini içeren yeni bir büyüme stratejisidir. Bu stratejinin önemli bir bileşeni, ekonomide döngüsellüğün kritik bir unsuru olan atık azaltımı ve geri dönüşümünü içeren "döngüsel ekonomi" başlığı altında ele alınmaktadır. Bu bağlamda, atıksular en büyük potansiyel kaynaklardan birini oluşturur.

İklim değişikliği ve küresel ısınma ile birlikte su kaynaklarında ciddi azalmalar yaşanmaktadır. Hızlı nüfus artışı ve sanayileşme, su ihtiyacının artmasına ve çeşitlenmesine neden olmakta ve kaynakların çevresel kirliliklerden yeterince korunamamasına yol açmaktadır. Dolayısıyla, mevcut su kaynaklarıyla sürdürülebilir ve dengeli ekonomik büyüme mümkün olamamaktadır. Bu durumu düzeltmek için arıtılmış atıksuların alternatif su kaynağı olarak değerlendirilmesi ve yeniden kullanımı önemlidir.

Mutabakat incelendiğinde, tarım, ulaşım, enerji ve yeşil ekonomi dahil olmak üzere tüm başlıklarda suyun önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Bu gelişmelerin tamamında sürdürülebilir bir yapı oluşturmak, su kaynaklarının doğru şekilde yönetilmesiyle mümkündür. 2021 Yeşil Mutabakat Eylem Planı'nda, su konusuna da

önem verilmiş ve yapılması gerekenler şu şekilde sıralanmıştır (Ticaret Bakanlığı, 2021):

- Su kullanımının azaltılmasına yönelik politikaların izlenmesi, teknolojik yatırım ve uygulamaların bu yönde teşvik edilmesi,
- Su kullanım master planının hazırlanması,
- Arıtılmış suların yeniden kullanımının artırılması/teşvik edilmesi,
- Su kayıp kaçaklarının minimuma indirilmesi,
- Atılacak adımlarda katılımcılığın artırılması, sektörel paydaşlar ile ortak hareket edilmesi,
- Tarımsal sulama kapsamında akıllı sulama programlarının geliştirilmesi,

Avrupa Birliği, Yeşil Mutabakat kapsamında döngüsel ekonomiye dayalı büyüme stratejileri geliştirmiştir. AYM kapsamında; iklim, çevre, enerji, ulaşım, tarım, finans ve bölgesel gelişme, inovasyon eylem planlarıyla döngüsel ekonomi sürdürülebilirlik biyoçeşitlilik, atık azaltımı ve geri dönüşümü konuları ele alınmıştır. Döngüsel ekonomi, önemli bir hedef olup 2050 karbonsuz büyümenin de yapı taşlarından biridir. Döngüsel ekonomi atık azaltımını bu da yeşil enerji kullanımı, sera gazı emisyonunun azaltılması ve suyun sürdürülebilirliğini hedeflemektedir (Atlı ve ark., 2023).

2030 Sürdürülebilir Kalkınma gündeminin desteklenmesi ve geliştirilmesi için; 2020 yılında Ticaret Bakanlığı koordinasyonunda ve diğer bakanlıkların katılımıyla çalışma grubu oluşturulmuş yapılan istişareler sonunda 2021 yılında Yeşil Mutabakat Eylem Planı yayınlanmıştır. Eylem Planında, sınırda karbon düzenlemeleri, yeşil ve döngüsel bir ekonomi, yeşil finansman, temiz, ekonomik ve güvenli enerji arzı, sürdürülebilir tarım, sürdürülebilir akıllı ulaşım, iklim değişikliği ile mücadele, diplomasi ve Avrupa Yeşil Mutabakatı bilgilendirme ve bilinçlendirme faaliyetleri olmak üzere 9 ana başlık olarak belirlenmiş bu konu başlıklarıyla ilgili 32 hedef ve 81 eylem planı hedeflenmiştir.

Döngüsel ekonomi kapsamında öncelikli sektörler belirlenip bunların ihtiyaçları doğrultusunda planlama yapılması, yeşil dönüşüm için gerekli AR-GE çalışmaları

yapılması, içme suyu kaynaklarında endokrin sistem bozucu kimyasalların takibinin yapılması, su tüketiminin fazla olduğu sanayi sektörlerinde temiz üretim mevzuatının güncellenmesi, ulusal sürdürülebilir üretim ve tüketim paketinin hazırlanması, arıtılmış suların kullanımının yaygınlaştırılması, su yeniden kullanım master planının hazırlanması, sektörel su tahsisinin belirlenmesi için su ayakizi ile ilgili rehber dokümanın hazırlanması gerekmektedir (Ticaret Bakanlığı, 2021).

Hava kirliliğinin azaltılması, toprak kirliliğinin azaltılması ve kalitesinin artırılması, plastik ve mikroplastiklerin azaltımıyla su kalitesinin iyileştirilmesi, endüstriyel ve belediye atıklarının azaltılmasına yönelik Sıfır Kirlilik Eylem Planı yayınlanmıştır. Mutabakat kapsamında değerlendirilen tüm sektörlerin tamamında suyun olduğu, gelişmelerin hepsinin su kaynaklarını doğrudan etkilediği görülmektedir. Atık azaltımı ve suyun sürdürülebilirliği; atıksuların arıtılması ve arıtılmış suyun tekrar kullanılması hedeflenmektedir. Bu durum da dolaylı olarak yüksek enerji ihtiyacına ve sera gazı emisyonuna sebep olmaktadır. Arıtılmış suların tarımsal sulama, sanayi, yeşil alan sulama gibi amaçlarla kullanılmasının araştırılması, su kaynaklarının kontrollü kullanımı için su ayakizinin hesaplanması ve takibinin yapılması da önem arz etmektedir (Atlı ve ark., 2023).

Bu mutabakat kapsamında uluslararası ticareti etkileyen önemli gelişmelerden biri olarak Sınırdaki Karbon Düzenlenmesi (SKD) yapılmıştır. Öncelikle, sınırda karbon düzenlemeleri çerçevesinde, öncü sektörlerin sera gazı emisyonunu azaltmaya yönelik destek mekanizmalarının oluşturulması ve sektörel ihtiyaçlara uygun eylemlerin planlanması hedeflenmiştir. Bu süreçle birlikte, tekstil ve deri sektörlerinin su tüketiminin fazla olması da dikkate alınması gereken bir sorundur. Bu bağlamda, bu endüstrilerin daha az kaynak kullanarak daha temiz bir üretim gerçekleştirmesi için gerekli adımlar atılmalıdır. Bu adımların başında, bu hedeflere ulaşmayı sağlayacak teknolojilerin ülkemizde geliştirilmesi ve kullanıma sunulması için çalışmalar yapılması gerekmektedir. SKD için Ekim 2023-Ocak 2026 geçiş dönemi olarak belirlenmiş ve bu dönem içerisinde demir-çelik, çimento, alüminyum, gübre, elektrik ve hidrojen ürünlerinin üretim süreçlerinde doğrudan ve dolaylı emisyonların raporlamasının yapılması ve Ocak 2026 sonrası süreç için ithal ürünlerde gömülü

karbon hesabı için AB Emisyon Ticaret Sistemi tarafından haftalık karbon ücretlendirmesi yapılacaktır. AYM'nin uygulanabilirliği için Enerji Sistem Entegrasyon Stratejisi, Hidrojen Stratejisi, bina sektörü için Yenileme Dalgası (Renovasyon) Stratejisi, Metan Stratejisi, Açık Deniz (Offshore) Yenilenebilir Enerji Stratejisi, Enerji Sistemleri Entegrasyonu Stratejisi gibi önemli strateji politikaları yayınlanmıştır (Ticaret Bakanlığı, 2023).

### **2.3.6. Montreal Protokolü**

Ozon tabasının korunmasına yönelik 1985 yılında Viyana Sözleşmesi ve 1987 yılında ise 190'dan fazla ülke katılımıyla Montreal Protokolü imzalanmıştır. Montreal Protokolünün ile Viyana Sözleşmesine göre daha katı maddeler içermesi sebebiyle daha etkin sonuçlar gözlenmiştir. 1990-2010 yılları arasında Montreal Protokolünde alınan ve uygulanan kararlar doğrultusunda dünya çapında 135 milyar ton CO<sub>2</sub>e değerinde emisyon engellenmiştir. Türkiye ise bu protokole 1991 yılında taraf olmuş ve öncesi de dahil tüm uygulamaları kabul etmiştir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024).

Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından Ozon Tabakasını İncelten Maddelere Dair Montreal Protokolü kapsamında bir yönetmelik yayınlanmış ve Ozon İnceltme Potansiyeline (OİP) göre kimyasallar kategorize edilmiştir. Bu kapsamda bazı kimyasalların tamamen kullanımı yasaklanırken bazı kimyasallara denetim ve kısıtlama getirilmiştir. Tablo 2.4'de ozon tabakasını incelten maddelere ilişkin yönetmelik kapsamında kontrol altına alınan, kısıtlama getirilen maddeler listelenmektedir.

Tablo 2.4. Montreal Protokolü kapsamında üretimi ve kullanımı yasaklanan kimyasallar.

Kimyasal İsmi	Ozon İnceltme Potansiyeli (OİP)
<b>Kloroflorokarbonlar</b>	
CFCl <sub>3</sub> Triklorflormetan (CFC-11)	1,0
CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> Diklordiflormetan (CFC-12)	1,0
C <sub>2</sub> F <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub> Triklortrifloretan (CFC-113)	0,8
C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub> Diklortetrafloretan (CFC-114)	1,0
C <sub>2</sub> F <sub>5</sub> Cl Klorpentafloretan (CFC-115)	0,6
CF <sub>3</sub> Cl Klortriflorometan (CFC-13)	1,0
C <sub>2</sub> FC <sub>15</sub> Pentaklorofloroetan (CFC-111)	1,0
C <sub>2</sub> F <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub> Tetraklorodifloroetanlar (CFC-112)	1,0
C <sub>3</sub> FC <sub>17</sub> Heptaklorofloropropanlar (CFC-211)	1,0
C <sub>3</sub> F <sub>2</sub> Cl <sub>6</sub> Hezasklorodifloropropanlar (CFC-212)	1,0
C <sub>3</sub> F <sub>3</sub> Cl <sub>5</sub> Pentaklorotrifloropropanlar (CFC-213)	1,0
C <sub>3</sub> F <sub>4</sub> Cl <sub>4</sub> Tetraklorotetrafloropropanlar (CFC-214)	1,0
C <sub>3</sub> F <sub>5</sub> Cl <sub>3</sub> Trikloropentafloropropanlar (CFC-215)	1,0
C <sub>3</sub> F <sub>6</sub> Cl <sub>2</sub> Diklorohekzafloropropanlar (CFC-216)	1,0
C <sub>3</sub> F <sub>7</sub> Cl Kloroheptafloropropanlar (CFC-217)	1,0
<b>Halonlar</b>	
CF <sub>2</sub> BrCl Bromoklorodiflorometanlar (Halon 1211)	3,0
CF <sub>3</sub> Br Bromotriflorometanlar (Halon 1301)	10,0
C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> Br <sub>2</sub> Dibromotetrafloroetanlar (Halon 2402)	6,0
<b>Diğer</b>	
CCl <sub>4</sub> Karbontetraklorür	1,1
C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub> Trikloretan (metil kloroform)	1,1
CH <sub>3</sub> Br Metil bromür	0,6
CH <sub>2</sub> BrCl Bromoklorometan (Halon 1011)	0,12

2016 yılında Ruanda'nın Kigali kentinde, 28. Taraflar Toplantısında (COP28) yapılan değişikliğe göre hidroflorokarbonlar Montreal Protokolü listesine eklenmiş ve 2040 yılına kadar küresel sıcaklık ortalamasında 0,5°C'lik bir düşüş hedeflenmiştir (Dışişleri Bakanlığı, 2024).

## 2.4. Karbon Ayakizi Kavramı

Çevresel problemlerle ve bu problemlerin insan sağlığına ve yaşamına olumsuz etkileriyle 1970’li yıllarda tanışan Türkiye, çevresel çözüm politikalarını diğer ülkelere kıyasla oldukça geç benimsemiştir. 1970’li yıllarda ülkemizde henüz çevreci bir faaliyet veya oluşum bulunmazken, dünyadaki birçok ülkede çevresel düzenleme ve çevreci örgüt yapısının olması Türkiye’yi de harekete geçirmiş, bu yıllardan sonra çevre politikaları gelişmeye, çevreci kurum ve kuruluşlar ortaya çıkmaya başlamıştır (Özışık, 2020).

Karbon ayakizi yeryüzünde yaşayan tüm insanların günlük yaşamında kullandığı veya satın aldığı ürünler ısıtma soğutma için harcadığı enerji yaşamı boyunca kullandığı ulaşım araçlarının atmosfere yaydığı karbon miktarı gibi birçok değişkenin bir araya gelmesiyle oluşan bireyin atmosfere yaydığı karbon miktarına işaret eden bir terimdir. Kullandığımız ürünlerin tamamı ve gerçekleştirdiğimiz her faaliyet için gerekli olan enerjinin üretilmesi aşamasında atmosfere salınan birim karbondioksit cinsinden karbon gazı toplamını ifade etmektedir. Bireylerin karbon ayakizini kullandığı ürünler ve yaşam tarzı belirlemektedir. Ürünlerin karbon ayakizinin belirlenmesinde yaşam döngüsü analizi yapılmaktadır. Yaşam döngüsü analizi bir ürün ya da hizmetin beşikten mezara üretim sürecinde ürünün hammaddesinin temininden tüketici tarafından atık olarak bertarafını kapsayacak şekilde farklı aşamalardaki doğrudan ya da dolaylı çevresel etkilerini sera gazı emisyonlarını hesaplamak için kullanılan bir yöntemdir.

Karbon ayakizi, kişilerin veya devletlerin tüketimleri nedeniyle evrende neden olduğu etki boyutunun incelenmesinde ve mukayese edilmesinde, meydana gelen evrensel ve yerel problemlere çözüm önerileri sunulmasında önemli bir ölçüm aracıdır (Wiedmann ve ark., 2008; Lynas, 2009; Karakaş, 2021).

Sadece ölçülebilir yönetilebilir kuralına göre, farklı ürün, yapı ve süreçlerin sera gazı yoğunluğunun ölçülmesi, karbon ayakizleri olarak ifade edilmektedir. Karbon ayakizi hesaplama metodolojileri hala gelişmekte ve sera gazı yönetimi için önemli

bir araç olarak ortaya çıkmaktadır. Karbon ayakizi kavramı hayatın ve ekonominin tüm alanlarına nüfuz etmiş ve ticarileştirilmektedir ancak çalışmalar arasında karbon ayakizinin tanımları ve hesaplamalarında çok az tutarlılık olup gazların seçiminde ve ayakizi hesaplamalarında kapsanacak emisyonların sıralamasında anlaşmazlıklar vardır. Sera gazı muhasebesi standartları, ayakizi doğrulamasının zorunlu bir hükmü olmamasına rağmen, ayakizi hesaplamalarında kullanılan ortak kaynaklardır. Karbon ayakizi, ilgili emisyon kesintilerine ve doğrulamalarına rehberlik edecek bir araç olup ve bu nedenle uluslararası düzeyde standardizasyonu gereklidir (Pandey ve ark., 2010).

Karbon ayakizi hesaplamalarının sonucu birim olarak kg veya ton eşdeğer CO<sub>2</sub> cinsinden ifade edilmektedir. Karbon eşdeğeri, karbon dışındaki sera gazlarının aynı miktar karbona nazaran kaç kat daha fazla ısı depolama potansiyelini olduğunu gösterir. Böylece bütün sera gazları eş değer bir paydada bir araya getirilerek, gerçekleşen emisyonların ölçümü anlaşılır bir düzeyde basitleştirilir (Şahin,2019; Karakaş 2021). Sera gazı emisyon miktarları, gazların küresel ısınma potansiyeli (GWP) bağlı olarak hesaplanır. Yüksek küresel ısınma potansiyel değerine sahip gazlar, aynı miktardaki karbondioksit göre küresel ısınma pay ölçeğinde daha büyük orana sahiptirler. Bununla beraber, diğer sera gazlarına nispeten salınan karbondioksit miktarı çok yüksek olduğu için küresel ısınmanın esas sorumlusu olarak gösterilmektedir (Yapıcıoğlu, 2018).

Doğrudan ve dolaylı sera gazlarının kategorize edilip daha kolay envanter haline getirilmesi amacıyla ISO14064 kapsamında 6 kategoride kategorize edilmiştir. (ISO, 2018).

Kategori 1: Doğrudan sera gazı emisyonlarını ifade eder. Doğrudan emisyonların değerlendirilmesi için faaliyetler kendi içerisinde kategorize edilmiştir: Yanma işlemine bağlı (ısıtıcılar, gaz türbinleri), motorlu taşıtlardan kaynaklı (kamyon, gemi, uçak), sanayi süreçlerine bağlı (çimento üretimi, kimyasal süreçler), antropojenik faaliyetlere bağlı (tarım, hayvancılık), arazi kullanımına bağlı (otlak, sulak arazi).

Kategori 2: İthal enerjinin yalnızca üretim sürecinden kaynaklı emisyonları kapsamaktadır. Buhar, ısıtma, soğutma, basınçlı hava gibi adımları kapsarken; tesiste bulunan gömülü emisyon, nakliye ve dağıtım süreçlerinden kaynaklanan emisyonlar dahil edilmez.

Kategori 3: Kişi ve eşya taşımacılığında kullanılan ulaşım (deniz, kara, hava, demir yolu) kaynaklı dolaylı emisyonları kapsamaktadır. Yük taşımacılığı, malların nakliyesi, çalışanların evlerine gidiş-gelişleri, müşteri ve ziyaretçi taşımacılığından ve iş seyahatlerinden kaynaklı emisyonlar olarak alt kategorilere ayrılmıştır.

Kategori 4: Beşikten tedarikçiye kadar olan zincirdeki emisyonlar değerlendirilmektedir. Ürün imalat süreci, sermaye malları (ekipman, bina, mülk).

Kategori 5: Kuruluştaki ürünlerin kullanımından kaynaklı emisyonları kapsamaktadır. Ürünün kullanımından kaynaklı emisyonlar, kiralanmış varlıklardan kaynaklı emisyonlar, ürünün kullanım ömrünün sonundan kaynaklanan emisyonlar ve yatırım kaynaklı emisyonlar olarak alt kategoriler oluşturulmuştur.

Kategori 6: Kategori 1, 2, 3, 4 ve 5 de yer almayan veriler burada değerlendirilmektedir. Sera gazı emisyonunun hangi kategoride yer alacağını bildirmek kurumun sorumluluğundadır.

IPCC ise tesislerden kaynaklanan emisyonları 3 kapsam da inceler (IPCC, 2006).

Kapsam-1 doğrudan tesis kaynaklı sera gazı emisyonları,

Kapsam-2 tesis içerisinden üretilmeyen (elektrik-su) dışarıdan tedarik edilen sera gazı emisyonları,

Kapsam-3 ise Kapsam-2’de yer almayan ancak kurumun tesis dışı kullanım sağladığı sera gazı emisyonlarıdır.

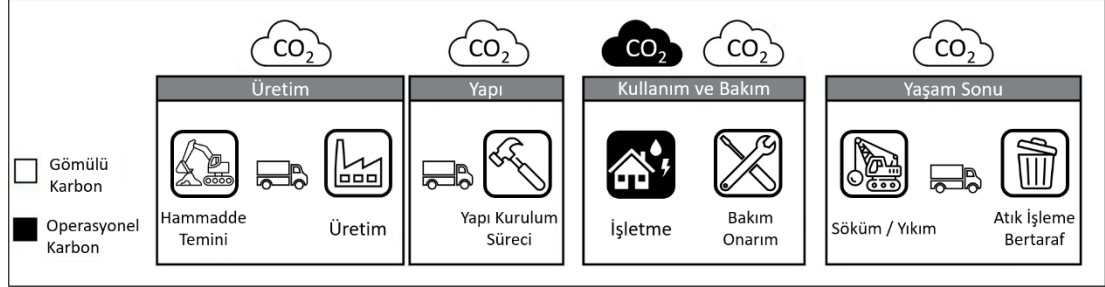
## 2.5. Gömülü Karbon Ayakizi Kavramı

Gömülü enerji; bir yapıda kullanılan malzemelerin üretimi, nakliyesi, imalatı dahil işletmeye alınana kadar ki süreci ve bu sürecin çevresel etkisini ifade etmektedir. Yapının imalatında kullanılan malzemeler yüksek oluşum enerjisine sahiptir. İnşaat sektörü kaynak tüketimi ve dolaylı olarak karbon emisyonu açısından büyük bir paya sahiptir. Gömülü karbon değeri her ne kadar hesaplaması detaylı ve zor görünse de sürdürülebilirlik ve yapının çevresel etkisi açısından büyük önem arz etmektedir. Yapının tasarım aşamasında kullanılan malzemelerin seçiminde enerji miktarlarının değerlendirilmesi karbon emisyonunu azaltacak bir yöntemdir (Azkur ve Canan, 2022).

Bir yapının karbon emisyon değeri hesaplanırken genellikle kullanım enerjisi dikkate alınmaktadır. Ancak yapının karbon ayakizinin etkin bir şekilde azaltılabilmesi için kullanım enerjisinin yanı sıra gömülü karbon enerjisinin de hesaplamalara dahil edilerek daha gerçekçi verilerle hesaplamalar yapmak gerekmektedir (Koç ve ark., 2022). Kullanım enerjisi işletme sırasındaki birçok faktörden etkilenmekte olan değişken aynı zaman da aktif bir değer olduğu için düşürülmesi mümkündür ancak gömülü karbon değeri üretim sürecine bağlı olduğu için sabit bir değerdir. Bu değer düşürülmesi tasarım, proses seçimi gibi başlangıç aşamasında mümkündür. Gömülü karbon emisyon değeri giderek popüler hale gelmekte ve yapının yaşam döngüsü analizindeki emisyon değerinin düşürülmesi için yapı tasarım hesaplarına dahil edilmeye başlamıştır. Gömülü karbon emisyonunun yaşam döngüsü analizinden azaltılması bir amaç haline geldiğinde süreçle ilgili yapılan çalışmalar yapı malzemelerinin üretim sürecinin doğrudan etkilediği gibi endüstriyel tesisleri de dolaylı olarak etkilemektedir (Koç ve ark., 2022).

Gömülü karbon, yapı malzemelerinin üretimi, nakliyesi, kurulumu, bakımı ve imhasından kaynaklanan sera gazı emisyonlarını ifade etmektedir. Küresel emisyonların önemli bir yüzdesini oluşturduğundan bu soruna çözüm bulmak için acil eylem gerekmektedir. İnşaat sektöründe gömülü karbon, inşaat malzemelerinin imalatı, nakliyesi, kurulumu, bakımı ve bertarafından kaynaklanan sera gazı

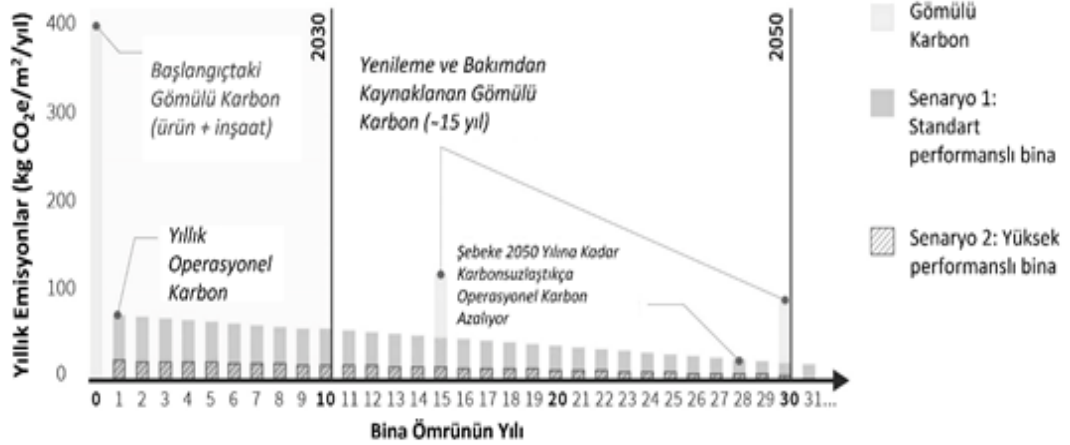
emisyonlarını ifade etmektedir (CLF, 2020). Buna karşılık operasyonel karbon, binanın faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını vermektedir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Bir Bina'nın Temel Yaşam Döngüsü Aşamaları Boyunca Gömülü ve Operasyonel Karbonu (CLF, 2020)

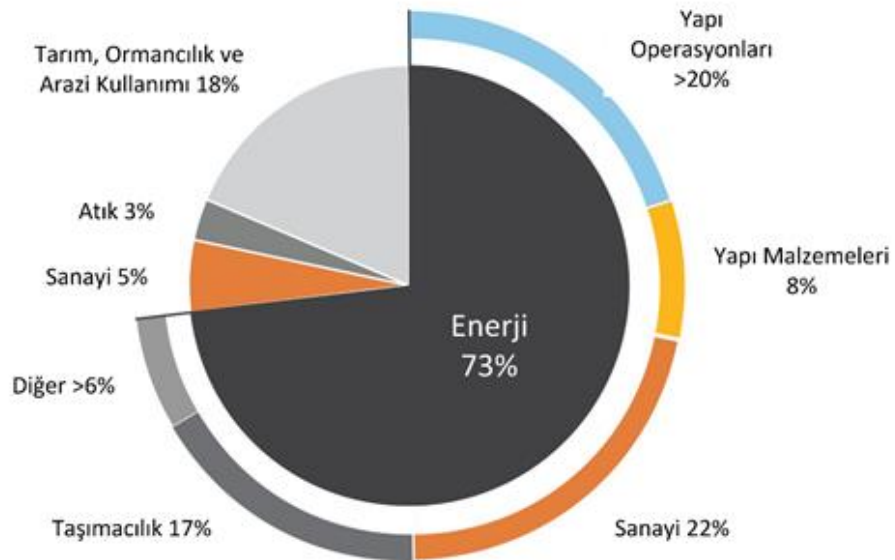
Sera gazı emisyonlarını ve bunların iklim değişikliği üzerindeki potansiyel etkilerini ölçmek amacıyla bilim insanları bir ürünün veya sürecin tüm yaşam döngüsü boyunca üretilen emisyonlarını takip etmek amacıyla yaşam döngüsü değerlendirmesi adı verilen bir yöntem kullanmaktadır. Bu emisyonlar, çevre üzerindeki potansiyel etkilerini yansıtan ölçümlere dönüştürülür. Bu ölçümlerden biri kilogram CO<sub>2</sub> eşdeğeri (kg CO<sub>2</sub>e) cinsinden ölçülen küresel ısınma potansiyelidir (GWP).

Bir tesisin toplam gömülü karbonunun çoğunluğu, tesisin ömrünün başlangıcındaki ürün aşamasında önden salınır (Şekil 2.5). Operasyonel karbondan farklı olarak, tesis inşa edildikten sonra verimlilikteki güncellemelerle gömülü karbonu azaltma şansı yoktur. Kısa vadeli ve uzun vadeli iklim hedeflerini tutturmak için gömülü karbonun ele alınmasına acil bir ihtiyaç vardır (CLF, 2020).



Şekil 2.5. 2020-2050 Yılları Arasında Yeni Bir Binanın Yerleşik ve Operasyonel Karbonunun Göreceli Etkisi (CLF, 2020)

Tüm küresel karbon emisyonlarının yaklaşık %30'u inşaat sektörüne atfedilir ve en az %8'i inşaat malzemeleri imalatından kaynaklanır (Şekil 2.6). Küresel emisyonların ek bir yüzdesi, sanayi ve atık sektörlerinden kaynaklanan gömülü karbona atfedilebilir. Binalarda gömülü karbonun azaltılması sanayi sektöründeki eylemlerle başlarken inşaat sektörü, daha düşük karbonlu ürünlere yönelik pazar talebi yaratarak kilit bir role sahiptir (CLF, 2020).



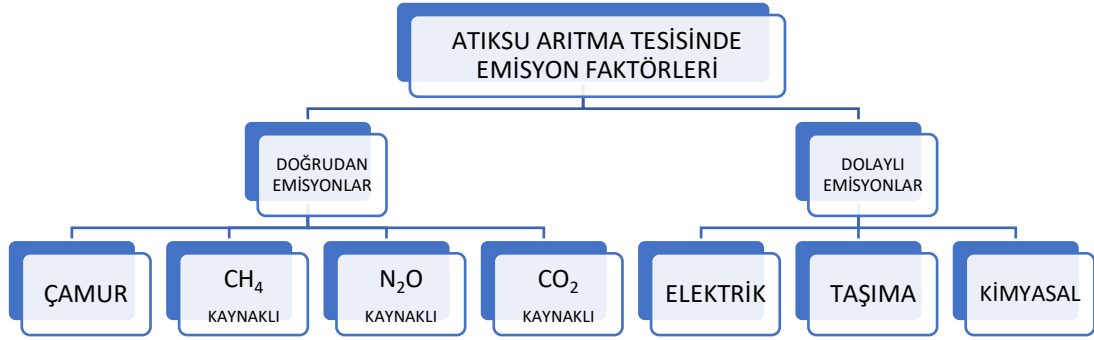
Şekil 2.6. Sektörlere Göre Küresel CO<sub>2</sub> Emisyonları (CLF, 2020)

## 2.6. Atıksu Arıtma Tesisleri Özelinde Karbon Ayakizi Çalışmaları

Atıksular, belirli noktalara deşarj edilebilmeleri için fiziksel, kimyasal ve biyolojik proseslerden geçirilir. Bu prosesler alıcı ortamın fiziksel, kimyasal, bakteriyolojik ve ekolojik özelliklerini değiştirmemek için uygulanırlar. Atıksudaki kirleticilerin uzaklaştırılması için atıksuyun karakterine ve deşarj edileceği noktaya göre çeşitli arıtma yöntemleri uygulanmaktadır. Bu sistemler; fiziksel arıtma, kimyasal arıtma, biyolojik arıtma ve ileri arıtma sistemleridir (Karataş, 2021).

Maktabifard ve arkadaşları tarafından 2019 yılında yapılan bir çalışmada kuzey Polonya'da bulunan 2 adet atıksu arıtma tesisinde karbon ayakizi değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışma yapılan tesisler orta ölçekli biyolojik besin giderimi yapan tesislerdir. Ayrıca iki tesiste de biyogaz dönüşümü olmayıp tüm enerji şehir şebekesinden temin edilmektedir. Arıtma tesislerinde karbon ayakizi analizi yapıldığında, en önemli adım proses şemasının belirlenip hangi işlemin daha fazla emisyonla sahip olduğunun belirlenmesi hedeflenmiştir. Şekil 2.7 atıksu arıtma tesislerinde emisyon faktörlerini vermektedir. İncelenen her iki tesiste yapılan analizlere göre çamur yönetimi, elektrik tüketimi gibi dolaylı ve atıksu arıtımından kaynaklanan doğrudan emisyonların toplam karbon ayakizini etkileyen en efektif parametrelerdir.

Çalışma ile, arıtma tesislerinde elektrik kullanımından kaynaklanan karbon emisyon miktarının toplam emisyon miktarının %38-%50'sini oluşturduğu ve bu olumsuz etkinin yenilenebilir enerji kaynakları ile kısmen azaltılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Biyogaz enerji geri kazanımıyla bu emisyon miktarının yaklaşık %30 oranında azaltılabileceği ve ayrıca anaerobik olarak stabilize edilmiş çamurun kompost hale getirilip kullanılması ile karbon emisyonunun %7-%8'lik bir kısmının daha azaltılabilmesi mümkündür (Maktabifard ve ark., 2019).



Şekil 2.7. Atıksu Arıtma Tesisinde Emisyon Faktörleri (Maktabifard ve ark., 2019)

Aktif çamur prosesi atıksu arıtımında sık kullanılan bir prosestir. Reaktör konfigürasyonuna göre; aerobik, anoksik ve anaerobik şartlarda gerçekleşir. Özellikle havalı proseslerde hem amonyağın nitrifikasyon süreci hem de havalandırma sürecinde harcanan enerji karbon emisyon miktarında önemli bir paya sahiptir. Portekiz’de bir atıksu arıtma tesisinde aktif çamur prosesinin havalandırma periyotlarına bağlı enerji tüketimi üzerinde deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneysel süreci boyunca atıksu kalite standartlarını korumak adına BOİ, KOİ, TN, TP verileri izlenmiştir. Denitrifikasyon ve nitrifikasyon için havalandırılmış ve havalandırılmamış süreçleri optimize edecek şekilde ayarlanmıştır. Havalandırma kontrol sistemi standart optimizasyon verileri aynı olan geçmiş yıllarla karşılaştırıldığında spesifik enerji tüketiminde %13’lük bir azalma, karbon emisyon miktarında ise 1,2 ton CO<sub>2</sub>’lik bir azalma belirlemişlerdir (Silva ve ark., 2021).

Atıksu arıtma tesisleri; havalandırma tankları, kanalizasyon pompa istasyonları ve çamur ekipmanlarının mevcut olmasından dolayı biyolojik proseslerde yüksek güç tüketimine sahiptir. Romanya’da iki atıksu arıtma tesisinin verilerinin karşılaştırılmasına yönelik çalışma yapılmış; yüksek güç tüketiminin olası nedenlerini belirlemek için ishikawa (balık kılıcı) diyagramı kullanılmış daha sonrada emisyon azaltımına yönelik önerilerde bulunmuştur. Karbon emisyonlarının

hesaplanmasında CO<sub>2</sub>-eş baz alınmıştır. Teçhizat ve ekipman seçiminde verimliliğe dikkat etmenin, atıksu prosesinin izlenmesi ve denetlenmesi gerektiği, SCADA yazılımını kullanmanın yararlı olacağı, AAT enerji talebine katkıda bulunması adına anaerobik çürütme sonucunda elde edilen biyogazın değerlendirilmesi ve yenilenebilir kaynakların kullanılması gerektiği, UV dezenfeksiyonu, verimli reaktiflerin kullanılıp otomatik dozlanması ve tesiste çalışan teknik ekibin eğitilmesinin önemli olduğu sonucuna varılmıştır (Presura ve Robescu, 2017).

Avrupa Birliğinin 2015 yılında döngüsel ekonomiye yönelik eylem planında sürdürülebilir ekonominin önemi vurgulanmış, enerji tasarrufuna katkı sağlayacak kaynakların zararını minimuma indirmek hedeflenmiştir. Atıksu arıtma tesislerindeki negatif etkileri en aza indirmek için enerji dönüşümüne odaklanma yararlı olacaktır. Biyogaz üretiminin yoğunlaştırılması, kaynak geri kazanımı ve enerji üretimi tesisin enerji verimliliğine önemli oranda katkıda bulunabilecektir (Kalemba, 2020).

Atıksu arıtma tesislerinin muhasebe ve raporlama standartlarına göre yapılan bir çalışma atıksu arıtma tesisi kaynaklı sera gazı emisyonu analizini içermektedir (Lin, 2020). Yapılan çalışmada emisyon kaynakları doğrudan, dolaylı ve diğer dolaylı emisyonlar olarak kategorize edilmiştir. Doğrudan emisyon kaynakları; kanalizasyon arıtma sürecinde; organik maddelerin aerobik, anaerobik, denitrifikasyon gibi süreçler sonunda ortaya çıkan CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ve N<sub>2</sub>O emisyonlarıdır. Tesisin endüstriyel kirliliğe sahip olması da organik yükü artırması sebebiyle doğrudan emisyonu da artırmaktadır. Sulak alanlar inşaa edip ekolojik sürece katkıda bulunarak emisyon geri kazanımına katkıda bulunulabileceği belirtilmiştir. Dolaylı emisyonlar; tesiste bulunan üfleyiciler, havalandırıcılar, pompalar gibi ekipmanların çalışması ve işletme adımlarından kaynaklanan elektrik emisyonlarıdır. Diğer dolaylı emisyonlar; atıksu arıtma tesislerinde proses ve işletme tipine bağlı olarak kimyasal arıtma aşamalarında kullanılan elektrotlar; koagülantlar, flokülantlar, dezenfektanlar, anti-foamingler, nütrient ayırıcılar iletkenlik artırıcı kimyasallar, pH dengeleyici ilaçlar, hammaddelerden ve tesis işletme sürecinde kullanılan yakıttan kaynaklanan emisyonlardır (Lin, 2020).

Yunanistan'da eşdeğer nüfus verileri 10000-4000000 arasında olan 10 adet atıksu arıtma tesisi üzerinde bir çalışma yapılmıştır. Çalışmanın amacı arıtmanın enerji tüketim kapasitesini, arıtma sürecine göre enerji verimliliğini gösteren veriler elde etmek, en fazla enerji harcayan proses adımlarını belirlemek ve enerji verimliliği sürecine katkıda bulunmaktır (Mamais ve ark., 2015).

Tesislerin yıllık enerji tüketim değerleri 15 kWsa/NE 86 kWsa/NE arasında değişmektedir. Tesislerin en yüksek enerji tüketicileri %40-75 bir oranla havalandırma üniteleridir. Havalandırma ünitelerinin enerji kapasitesi; hem arıtma türüne hem de arıtma kapasitesine bağlıdır. Tesislere ait giriş- çıkış debileri, BOİ, KOİ, TP, TN, TAKM, varsa biyogaz kullanımı gibi veriler mevsimsel olarak toplanmıştır. AAT'lerin yıllık emisyon değerleri 61-161 kg CO<sub>2</sub>/NE arası değişmektedir. En yüksek emisyon değerine sahip olan tesis uzun havalandırma sistemine, en düşük emisyon değeri ise aktif çamur sistemine aittir. Yaz aylarında daha yüksek endojen solunum nedeniyle havalandırma için harcanan enerji ortalama 42,3 kWsa/ NE, kış aylarında ise ortalama 34,5 kWsa/NE değere sahiptir. Yunanistan'ın AAT'lerinde yıllık ortalama sera gazı emisyon değeri 94 kCO<sub>2</sub>/NE olarak hesaplanmıştır (Mamais ve ark., 2015).

2013 yılında Çin'de 3513 adet atıksu arıtma tesisi bulunmakta idi ve bunlar yıllık toplam 17,5 milyar kWsa ile Çin'de toplam elektrik tüketiminin %0,4'üne karşılık gelmekte idi. Ulusal sera gazı envanterine göre atıksu arıtma tesisleri; metan emisyonuna katkıda bulunması adına 6. ve nitrozoksit emisyonu açısından 3. en büyük paya sahiptir (Chai ve ark., 2015).

Çinde günlük debisi ortalama 20000 m<sup>3</sup>/gün olan 3 ayrı atıksu arıtma alternatifi; anaerobik- anoksik- oksik (A-A-O), ardışık kesikli reaktör (AKR), oksijen hendeği (OH) ve 4 farklı çamur arıtma tekniğinden; doğrudan depolama, aerobik fermantasyon, anaerobik çürütme ve fermantasyon yakmadan oluşan ülkede yaygın olarak kullanılan 12 farklı senaryo değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmelerde bu tesislerden hiçbirinin karbon nötr olmadığı, atıksuyun arıtımda kullanılan enerjinin, içerdiği enerjiden çok fazla olduğu tespit edilmiştir. Karbon ayakizi verileri ise 5817

tCO<sub>2</sub>/yıl- 9928 tCO<sub>2</sub>/yıl aralığında değişmektedir. Çamurun anaerobik ve kombine enerji ve güç, kojenerasyon yoluyla enerji kazanımı yapan AKR en düşük karbon ayakizine (5817 tCO<sub>2</sub>/yıl), çamur depolama alanına sahip A-A-O ise en yüksek karbon ayakizine sahiptir (Chai ve ark., 2015).

Çamurun anaerobik çürütülmesi ve biyogaz kullanımı, çamur depolama prosesine göre karbon ayakizinin; A-A-O' da %37, AKR'de %34 ve OH' de ise %24'lük bir azalmaya neden olmuştur. Fermantasyon, doğrudan çöp depolamaya kıyasla daha az sera gazı emisyonu salmış ve enerjiden yaklaşık 10 kWsa/t tasarruf sağlanmıştır (Chai ve ark., 2015).

Chetty ve Pillay (2014) su şebekesi ve atıksu arıtma tesisi karbon ayakizini tahmin etmek için excel tabanlı bir veri analiz sistemi geliştirmiştir. Karbon ayakizi IPCC yönergelerini temel alan sera gazı protokolüne göre hesaplanmıştır. Hesaplayıcı; girdi ve çıktı verileri, dönüşümler, emisyon faktörleri, bireysel ve entegre raporları kullanarak yapılan bir işin karbon eşdeğerini hesaplamakta, emisyon değerini azaltmak için stratejileri geliştirmek için öneriler sunmaktadır. Bu çalışmada ise atıksu arıtma tesisindeki karbon ayakizinin azaltılmasına yönelik; biyogazdan yeşil enerji üretimini, proses tasarımı ve enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik operasyonel önerilerde bulunmaktadır. Basınçlı hava sistemleri, havalandırma motorları yerine havalandırıcı üfleyiciler, akıllı yönetim sistemleri, trijenerasyon ünitelerinin yaygınlaştırılması, artırılmış farkındalık, tüketici davranışlarındaki bilincin önemi vurgulanmıştır.

2013 yılında bir atıksu arıtma tesisinin operasyonel süreçleri incelenerek yapılan bu çalışmada emisyonlar; %33 atıksuyun arıtılmasından, %4,7 atıksuyun deşarjından, %14 biyogaz yakılmasından, %45,7 elektrik tüketiminden kaynaklanmıştır. Aktif çamur tesisindeki enerji tüketimi aylık ortalama 480000 kWsa/ay olup tesisin toplam enerji tüketiminin yaklaşık %70'ine karşılık gelmektedir (Chetty ve Pillay, 2014).

Kumar ve ark., (2021) tarafından yapılan bir çalışmada anaerobik reaktör, CH<sub>4</sub> yakma tesislerinde enerji tüketimi ve arıtma aşamasında CO<sub>2</sub> değerinde önemli

farklılıklar değerlendirilmiştir. CH<sub>4</sub> emisyonunun %75'i çamur taşıma hattı ünitelerinden kaynaklanmakta, N<sub>2</sub>O emisyonu ototrofik ve heterotrofik bakteriler aracılığıyla nitrifikasyon ve denitrifikasyon aşamalarında gerçekleşmektedir. AAT'deki amonyak ve nitrit konsantrasyonları yüksek SRT (çamur bekletme süresi)'de işlenirse N<sub>2</sub>O emisyonunun azaltılabileceği ayrıca yüksek SRT'ye sahip AAT'lerde endojen solunum yoluyla daha fazla CO<sub>2</sub> emisyonu ve daha az çamur üretimi gerçekleşmektedir. SRT'nin 10 günden 30 güne çıkarılması %7,6'lık bir CO<sub>2</sub> artışına sebep olmaktadır. Aralıklı havalandırma stratejisinin organik kirliliği daha iyi uzaklaştırabilmesi adına ortaya atılmış bir arıtma yöntemi olduğu, yapılan deneysel çalışmalarda performans artışının yanı sıra %10-30 enerji tasarrufu sağlandığı ve dolaylı emisyon değerinde azalmaya etkisi olduğu belirtilmiştir.

Karakaş (2021) Erzurum ilinde ileri biyolojik atıksu arıtması bulunan bir tesisinin iki yıllık verilerini incelemiştir. Tesisin karbon emisyon değerinin hesaplanması için tesise ait 2018 ve 2019 yıl envanter verileri kullanılmış olup buna göre; 2018 yılı için doğrudan emisyon miktarı 11949 ton CO<sub>2</sub>-e, dolaylı emisyon miktarı ise 5287 ton CO<sub>2</sub>-e; 2019 yılı için doğrudan emisyon miktarı 55723 ton CO<sub>2</sub>-e, biyogaz kaynaklı karbon emisyon miktarı hesaplanmadığı için 0 kabul edilmiş ve dolaylı emisyon miktarı 3906 ton CO<sub>2</sub>-e olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda en çok sera gazı emisyonu yapan ünitenin anaerobik stabilizasyon havuzu olduğu belirlenmiştir. Tesisin yıllık m<sup>3</sup> atıksu başına hesaplanan emisyon miktarları ise 2018 yılı için 0,59 kgCO<sub>2</sub>-e/ m<sup>3</sup> ve 2019 yılı için ise 2,2 kgCO<sub>2</sub>-e/ m<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır.

Atık yönetimiyle ilgili yapılan bir başka çalışmada atıksu arıtma tesisleri ve katı atık yönetim sistemleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında; atıksu arıtma, biyometanizasyon, kompostlaştırma, anaerobik stabilizasyon havuzu, aktif çamur prosesi ve ileri atıksu arıtmadan kaynaklanan sera gazı emisyonları hesaplanıp karşılaştırılmıştır. Atıksu arıtımıyla ilgili yapılan senaryolarda ilk olarak anaerobik stabilizasyon havuzları, ikincil olarak biyolojik arıtma, üçüncül olarak da ileri atıksu arıtma prosesleri değerlendirilmiştir. Atıksu arıtma tesisi kapsamında yapılan envanter çalışmaya göre 2,072,000 tCO<sub>2</sub>e değeri ile anaerobik stabilizasyon havuzları en yüksek sera gazı emisyonu yapan proses olarak tespit edilmiştir.

Biyolojik arıtma da; 1323000 tCO<sub>2</sub>e, ıleri atıksu arıtmada ise 424000 tCO<sub>2</sub>e değerleri gözlenmiştir. IPCC (2006) ya göre yapılan hesaplamalarda ve Research Triangle Institue tarafından yayınlanan Chadran (2010) teknikleri kullanılmış ve bu tekniklerde kendi içinde değerlendirilmiştir. Tesisten kaynaklanan nitrözoksit emisyonunun değarjdan kaynaklanan nitrözoksit emisyonuna göre daha fazla olduğu; Chadran tekniğine göre sera gazı emisyon değerinin 209000 tCO<sub>2</sub>e, IPCC tekniğine göre emisyon değeri 57000 tCO<sub>2</sub>e olarak hesaplanmış; Chadran tekniği IPCC tekniğine göre daha gerçekçi sonuçlar vermiştir (Erdoğan, M., 2015).

Muğla-Menteşe'de evsel atıksu arıtma tesisinin karbon emisyon hesaplaması yapılmıştır. Hesaplama CCALC<sub>2</sub> ve NGA (2014) programlarıyla emisyonlar hesaplanmış; atıksu, elektrik enerjisi, akaryakıt tüketimi ve çamur bertarafından kaynaklı veriler değerlendirilmiştir. 2015 yılı için evsel atıksudan; 77300 tCO<sub>2</sub>-e, akaryakıt kaynaklı; 122,83 tCO<sub>2</sub>-e, elektrik tüketim kaynaklı; 865,91 tCO<sub>2</sub>-e, kimyasal tüketim kaynaklı; 95,71 tCO<sub>2</sub>-e, arıtma çamuru kaynaklı 74,5 tCO<sub>2</sub>-e ve biyogazdan 1654 tCO<sub>2</sub>-e emisyon hesaplanmıştır. 2016 yılı için evsel atıksudan; 81600 tCO<sub>2</sub>-e, akaryakıt kaynaklı; 44,40 tCO<sub>2</sub>-e, elektrik tüketim kaynaklı; 1069,49 tCO<sub>2</sub>-e, kimyasal tüketim kaynaklı; 49,5 tCO<sub>2</sub>-e, arıtma çamuru kaynaklı 68,4 tCO<sub>2</sub>-e emisyon hesaplanmıştır (Güller, 2018).

İstanbul'da aynı eşdeğer nüfusa sahip 9 adet büyük ölçekli biyolojik atıksu arıtma tesisi için IPCC (2006) rehberine ve GPS-X modellemesine göre belirli şartların stabil tutulduğu (debi, nüfus, sıcaklık, anaerobik reaktör çözünmüş oksijen konsantrasyonu) proses tipine göre kategorize edilip envanter çalışması yapılmıştır. IPCC tekniğine göre CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O ve genel toplam emisyon miktarları; 6779, 218593, 225372 tCO<sub>2</sub>e/yıl; GPS-X tekniğine göre 690114, 37429 ve 687357 tCO<sub>2</sub>e/yıl olarak hesaplanmıştır. İki yöntem değerlendirildiğinde verilerin oldukça farklı olduğu gözlemlenmiştir. Bu farklılığın sebebi ise IPCC kılavuzuna göre N<sub>2</sub>O emisyon faktörünün biyolojik besin giderimi yapmayan tesisler için belirlendiğini ve dolayısıyla azot gideriminden kaynaklı N<sub>2</sub>O emisyonunun dikkate alınmamasından kaynaklı değerin düşük çıktığı belirtilmiştir. (Gülhan, 2017).

Yapılan bir başka değerlendirmeye göre AAT kaynaklı sera gazı emisyon hesabı değerlendirmesinin seçilen bölgenin nüfus ve ekonomik yapısına, tesisin debisine, proses seçimine, atıksu kirlilik yüküne, işletme koşulları ve işletme teknolojisine, KOI/TKN oranına, azot giderim verimine bağlı olduğu belirtilmiştir. İşletme koşullarına göre sera gazı emisyon miktarının yüksek seviyelerden ihmal edilebilir seviyeler arasında değişebileceği gözlenmiştir. Özellikle azot giderimi yapan tesisler üzerinde yapılacak çalışmalarla bu oranların kaynağında düşürülebileceği, metan emisyon miktarının kanal hattı ve çamur rtme aşamasında emisyon yaydığı, karbondioksitin biyolojik süreçler ve enerji tüketimine bağlı ortaya çıktığı belirtilmiştir (Gülhan ve ark., 2018).

Wu ve arkadaşları (2022) tarafından yapılan bir başka kapsamlı araştırma çeşitli atıksu arıtma tesisi konfigürasyonlarının çok farklı karbon ayakizlerine sahip olabileceğini ve bazı süreçlerin AAT'lerin karbon ayakizini azaltmak için diğerlerinden daha uygun olduğunu göstermiştir. Söz konusu alışma AAT'nin karbon ayakizinin, en yüksek sera gazı emisyonlarının, en düşük sera gazı emisyonlarına göre yaklaşık 4 kat daha yüksek olduğu, arıtma konfigürasyonlarına büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermiştir. Kapsam 2 ve 3 emisyonlarının uygun proseslerin seçilmesiyle azaltılabileceğini gösteren bu çalışma spesifik olarak, anaerobik atıksu arıtma teknolojilerinin uygulanması, znmş CH<sub>4</sub> sıyırma nedeniyle artan Kapsam 1 emisyonlarına rağmen, yüksek enerji verimliliği ve enerji geri kazanımı (kapsam 2 emisyon dengelemesi) nedeniyle toplam AAT karbon ayakizini önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermiştir. Anaerobik rtme yoluyla çamur stabilizasyonu aynı zamanda kapsam 2 ve 3 emisyonlarını da azaltabilirken, aerobik çamur rtme genel karbon ayakizini artırabilir. Karbon ayakizleri AAT'lerin arıtma konfigürasyonlarına büyük ölçüde bağlıdır. Farklı senaryoların toplam sera gazı emisyonları, 411 ile 1775 kg CO<sub>2</sub>e/mL-atıksu/gün arasında büyük farklılıklar göstermiştir. İlk üç yüksek emisyon (1649–1775 kg CO<sub>2</sub>e/mL-atıksu/gün) konfigürasyonunda aerobik nütrient giderimi, aerobik rtme ve uzun süreli çamur kurutma kombinasyonu hakimdir. En düşük 3 sera gazı emisyon konfigürasyonu, anaerobik atıksu arıtma (yukarı akışlı anaerobik çamur yatağı, anaerobik rtme, çamur kurutma ve kısa süreli depolama) kullanan kombinasyonlardır ve toplam sera

gazı emisyonları 411–520 kg CO<sub>2</sub>e/mL-atıksu/gün dır. Genel karbon ayakizindeki büyük değişiklik, bir AAT'nin tasarım aşamasında veya tesisin iyileştirilmesi sırasında farklı konfigürasyonlar veya süreçler seçerek karbon ayakizini azaltma fırsatlarının bulunduğunu göstermektedir. Biyolojik nitrojen giderme işlemleri kaçınılmaz olarak N<sub>2</sub>O emisyonlarına yol açmakta ve konfigürasyon seçimiyle önemli ölçüde azaltım sağlanamamaktadır. Doğrudan N<sub>2</sub>O emisyonları muhtemelen atıksu arıtma tesislerinin karbon nötrlüğüne ulaşmasında gelecekte karşılaşılaacağı zorluk olacaktır.

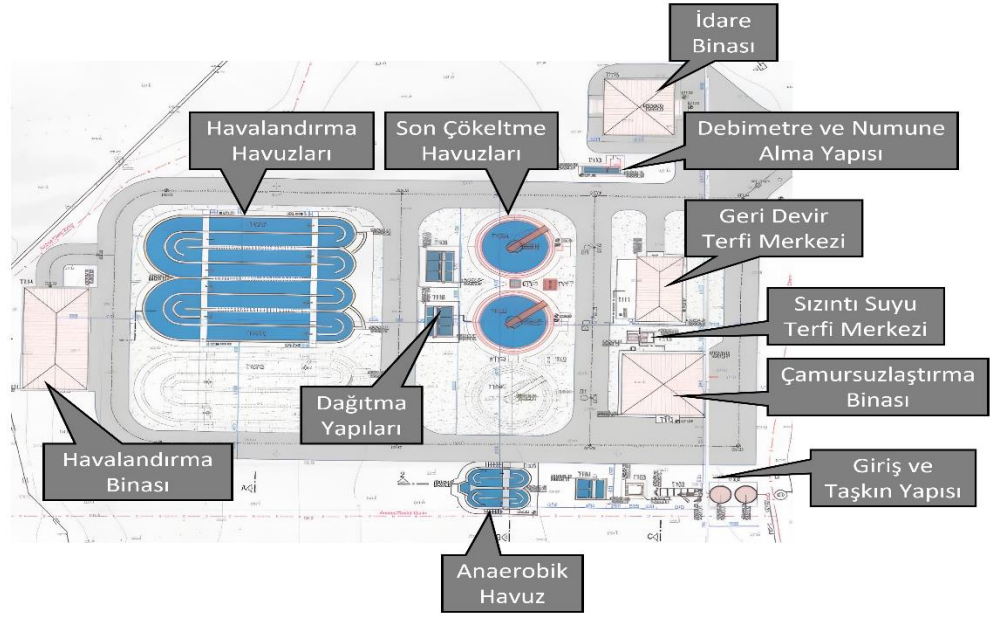


## BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

### 3.1. Seçilen İleri Atıksu Arıtma Tesisi Bileşenleri

Seçilen atıksu arıtma tesisi Marmara Bölgesi'nin güney kesiminde yer alan bir ilçede yer almakta olup ilçe yaklaşık 430 km<sup>2</sup>'lik bir alanı kaplamaktadır. Arazi yapısı oldukça engebeli olan ilçenin rakımı 253 metredir. İlçenin en dağlık kesimleri doğu ve kuzeyde yer almaktadır.

İlçenin atıksularının arıtılması amacıyla projelendirilen atıksu arıtma tesisi için hedeflenen nüfus 2035 yılı için 15000 ve 2050 yılı için 20000 kişidir. 54 kilometre boru hattı ve 1875 muayene bacasından oluşan kanalizasyon şebekesi inşa edilmiştir. Tesisin toplam inşaat alanı 10000 m<sup>2</sup>'dir. 2020 yılında analiz edilen 3678 m<sup>3</sup>/gün debiye sahip olan atıksuyun arıtımı ileri biyolojik arıtmanın kullanıldığı, kaba ve ince ızgaralar ve ardından anaerobik fosfor tankları içeren ileri aktif çamur proses teknolojisine dayanmaktadır. Organik karbon gideriminin yanı sıra nitrifikasyon-denitrifikasyon işlemleri de yapılmakta olup, tanklardaki anoksik-oksik koşulların izlenmesi amacıyla redoks metre ve oksijen ölçüm cihazları kullanılmaktadır. Son çökeltme tanklarından elde edilen çamur, mekanik susuzlaştırma ekipmanları kullanılarak susuzlaştırılmaktadır. Susuzlaştırma ünitelerinin optimum şartlandırılması için çamur şartlandırıcı olarak katyonik polielektrolitler kullanılmaktadır. Alıcı ortama deşarj edilmeden önce UV dezenfeksiyonu uygulanmaktadır. Şekil 3.1 tesisin genel yerleşim planını göstermektedir.



Şekil 3.1. Tesisin Genel Yerleşim Planı (Büyükşehir Belediyesi, 2015)

### 3.1.1. Izgaralar

Atıksu arıtımındaki temel amaç suyun doğal arıtım sürecini hızlandırmaktır. İlk olarak ön arıtım aşaması ile tesise giriş yapan büyük parçaların eliminasyonu ve tesisten uzaklaştırılması hedeflenir. Bu maddelerin ayrışması hem arıtma için hem de teknik ekipmanın kullanımında, işletmede problem yaşanmaması açısından önemlidir (Bey ve ark., 2020).

Izgaralar mekanik temizlemeli olarak tercih edilmiştir. Izgaralar 1m genişliklerindeki açık kanal üzerine 2 adet (1 asıl+1 yedek) olarak yerleştirilerek yatayla 70 derecelik açı yapmaktadır. İnce ızgaralar mekanik temizlemelidir. Izgara çubukları arasındaki maksimum hız 1,2 m/s dir. Tutulan süzüntü miktarı ortalama 20 L/1000 m<sup>3</sup> olup kaba ızgarada tutulan madde miktarı 42,91 L/gündür. İnce ızgarada tutulan band konveyörü ile atık arabalarına aktarılır ve çöp konteynerlere alınarak uzaklaştırılır (Büyükşehir Belediyesi, 2015).

### **3.1.2. Kum Tutucular**

Kum tutucular atıksuda bulunan kum ve yağdan kaynaklanan sorunların eliminasyonu için kullanılan bir proses adımıdır. Kum olarak tanımlanan maddeler; kum, taş, cam, cüruf, gibi yoğunluğu veya çökme hızı, biyolojik arıtımda parçalanabilen organik maddelere kıyasla daha yüksek olan maddelerdir (Öztürk, 2017).

Tesiste kullanılan kum tutucu tipi kombine mekanik ön arıtma ünitesi tipidir. Mekanik paket kum tutucu tipi kullanılmıştır. Kum miktarı ortalama olarak  $100 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^3$  debi olarak alınıp günlük kum miktarı  $0,173 \text{ m}^3/\text{gün}$  dür.

### **3.1.3. Anaerobik Fosfor Havuzları**

Havuzda anaerobik şartların devamlılığını izlemek amacıyla her bir havuza yerleştirilen redoks metrelerle oksijen redox potansiyeli ölçülmektedir. Aynı zamanda, havuz girişinde oksijen konsantrasyonunun sıfır olması istenmektedir. Girişteki oksijen konsantrasyonunu ölçmek amacıyla her bir havuzda bir adet oksijen metre kullanılmaktadır. Havuz tasarımı ilkelerine göre havuzlarda (proje debisi + geri devir debisi) bekletme süresi 0,50 – 0,75 saat arasındadır. Ayrıca havuzlarda sedimentasyonu önlemek için dalgıç karıştırıcılar kullanılmıştır. Anaerobik havuzlara gelen atıksuların çökmesini önlemek amacıyla havuz tabanından 30 cm yukarı seviyede atıksu akış hızını 0,30 m/sn sağlaması için pompa kullanılmaktadır (Büyükşehir Belediyesi, 2015).

### **3.1.4. Havalandırma Havuzları**

Seçilen sistemde organik karbonla birlikte nitrifikasyon-denitrifikasyon süreçleriyle azot giderimi sağlanmaktadır. Havuz çıkışlarındaki savak tipi çalışan kapaklarla havuzdaki su seviyesi ayarlanmaktadır. Havalandırma havuzlarında difüzör üstü su derinliği oksijen çözünme verimini doğrudan etkilediğinden, havuz su yüksekliğinin değişen debilere göre sabit tutulması, havalandırma veriminin de sabit tutulmasını

sağlamaktadır. Ayrıca havuzlarda çökelmeyi ve çökmeye oluşacak ölü bölgeler nedeniyle hacim kayıplarını önlemek, istenilen akım karakteristiğini sağlamak amacıyla, havuz tabanında yer alan dalgıç difüzörlerin 25 cm üzerinde 0,3 m/s hız sağlayacak dalgıç mikserler kullanılmıştır. Havuzlarda anoksik-oksik şartları izlemek amacıyla, havuzlarda redoks metreler ve oksijen metreler kullanılmıştır. Oksijen metrelerle ölçülen oksijen konsantrasyonuna göre üfleyicilerden verilen hava otomatik olarak kontrol edilmektedir. Böylelikle oksijene ihtiyaç duyulduğunda hızla müdahale edilerek veya ihtiyaç fazlası olduğunda hava miktarı azaltılarak enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Ayrıca redoks potansiyeli ölçülerek, istenilen bölgede elektron alıcısı olarak nitrattaki oksijenin kullanıldığı ve denitrifikasyon prosesinin gerçekleşmesi anlık izlenmekte ve gerektiğinde anoksik-oksik hacim ayarlaması yapılmaktadır. Oksijen ihtiyacı karbon kökenli organik madde giderimi ve azot giderimi (nitrifikasyon-denitrifikasyon prosesi) için gerekli oksijen miktarının toplamıdır (Büyükşehir Belediyesi, 2015).

### 3.1.5. Çökeltme Havuzları

Çökeltme havuzlarında, havalandırma havuzlarından su ile birlikte gelen aktif çamur, tasarım bekletme süresinde çöktürülerek, arıtılmış sudan ayrılmaktadır. Çökeltme tanklarının çevresinde tek taraflı V savakla arıtılmış sular mevcut kolektör hattına verilmektedir. Çöken çamur gezer köprüye monteli sıyrıcılar vasıtasıyla 1/12 eğimli havuz tabanından sıyrılmaktadır. Havuz tabanından alınan çamurlu su geri devir ve çamur pompalarının olduğu hazneye gönderilmektedir. Tablo 3.1 çökeltme havuzu tasarım kriterlerini vermektedir (Büyükşehir Belediyesi, 2015).

Tablo 3.1. Çökeltme havuzu tasarım kriterleri.

Çap (D)	Max 60 m
Çamur Hacim İndeksi (SVI)	75-120 lt/kg
Çamur Hacminin Yüzeysel Yüklenmesi	<500 lt/m <sup>2</sup> -saat
Bekletme Süresi	2-2,5 saat
Geri Devir Oranı	0,75
Max debide yüzeysel Yüklenme	0,6- 1,2 m/ sa

### 3.1.6. Çamur Susuzlaştırıcı

Son çökeltme tankından alınan çamur mekanik susuzlaştırıcı kullanılarak susuzlaştırılmaktadır. Mekanik susuzlaştırıcıdan, sistemden uzaklaştırılmak üzere çökeltme tankından alınan çamurun kuru katı oranı %25 dir. Tablo 3.2 çamur arıtma ünitesi tasarım kriterlerini vermektedir (Büyükşehir Belediyesi, 2015).

Tablo 3.2. Çamur arıtma ünitesi tasarım kriterleri.

Karbon gideriminden oluşan çamur	529,72 kg/gün
Fosfor gideriminden oluşan çamur	24,30 kg/gün
Toplam oluşan çamur	554,03 kg/gün
Çamur	58,31 m <sup>3</sup> /gün
Kullanılan susuzlaştırıcı kapasitesi	10,00 m <sup>3</sup> /gün
Susuzlaştırıcı çalışma süresi	5,83 saat/gün
Susuzlaştırıcıdan alınan çamur hacmi	2,33 m <sup>3</sup> /gün
Süzüntü suyu miktarı	10 m <sup>3</sup> /saat

Susuzlaştırma ünitelerinin optimum olarak kullanılmasında yeterli çamur şartlandırılması anahtar faktördür. Susuzlaştırıcılar için çamur şartlandırıcı olarak katyonik polielektrolit kullanılmaktadır. Polielektrolit miktarı ton başına 6 kg olup kullanılan polielektrolit miktarı 3,32 kg/gün dür. 3000 L kapasiteli fiberglas malzemedan yapılmış su tankı çamur susuzlaştırma binası içinde yer almakta olup gerekli basıncın sağlanması için 1 adet hidrofor bulunmaktadır.

### 3.1.7. Elektrik Tüketimi

AAT işletme giderlerinin ortalama %25-40 enerji tüketiminden kaynaklanmaktadır. Bu da karbon emisyon hesabında enerji tüketiminin yadsınamaz bir yeri olduğunu göstermektedir. Maliyet proses tipine bağlı olarak m<sup>3</sup> başına değişkenlik göstermektedir. AAT enerji tüketimi yıllık olarak nüfus eşdeğer birimi (kWsa/EN) ya da deşarj suyunun hacmi (kWsa/m<sup>3</sup>) baz alınarak raporlanır. Enerji tüketiminin yoğun olduğu bölümler; kanal hattı, birincil-ikincil çöktürme, havalandırma, çamur susuzlaştırma aşamalarıdır. Pompa ve havalandırma bölümlerinde yapılacak düzenlemeler işletme maliyetinde %30'a varan bir tasarruf sağlayabilmektedir (Türkmenler, 2017).

## 3.2. Seçilen İleri Atıksu Arıtma Tesisi Faaliyetlerinden Kaynaklı Emisyon Hesapları

### 3.2.1. Metan Emisyon Hesabı

CH<sub>4</sub> emisyonlarının hesaplanması, evsel atıksudaki organik olarak parçalanabilir malzemenin tahmin edilmesi, evsel atıksu için metan emisyon faktörünün belirlenmesi ve ardından CH<sub>4</sub> emisyonlarının tahmin edilmesi dahil olmak üzere çeşitli adımları içerir.

Doğrudan metan emisyonlarının miktarı, atıksu ve çamurda bulunan bozunabilir karbon miktarı ve emisyon faktöründen etkilenir. Denklem 3.1 ((IPCC, 2006)'nın Denklem 6.2'sinden türetilmiştir), emisyon faktörünün (EF) maksimum CH<sub>4</sub> üretim potansiyeline (B<sub>0</sub>) ve metan düzeltme faktörüne (MCF) bağlı olduğu bu ilişkiyi göstermektedir. ±%30 belirsizlik aralığı ve 0,05 MCF değeri ile 0,6 kg CH<sub>4</sub>/kg BOİ giderme B<sub>0</sub> değerinin kullanılması IPCC tarafından tavsiye edilmektedir.

Her bir evsel atıksu arıtma/deşarj yolu veya sistemi için CH<sub>4</sub> emisyon faktörü;

$$EF_j = B_0 \times MCF_j \quad (3.1)$$

EF<sub>j</sub> = Emisyon faktörü, (kg CH<sub>4</sub>/kg BOİ)

j = Her bir arıtma/deşarj yol veya sistem

B<sub>0</sub> = Maksimum CH<sub>4</sub> üretme kapasitesi, (kg CH<sub>4</sub>/kg BOİ)

MCF<sub>j</sub> = Metan düzeltme faktörü 0,05 kabul edilmiştir

2020 yılı TOW tahmini (envanter yılında atıksudaki toplam organik madde, kg BOİ/yıl olarak ifade edilir) insan nüfusuna ve kişi başına BOİ üretimine dayanmaktadır. TOW denklem 3.2 kullanılarak hesaplanabilir (evsel atıksudaki toplam organik olarak bozunabilir malzemenin miktarını belirleyen ((IPCC, 2006), Denklem 6.3'ten türetilmiştir).

Evsel atıksudaki toplam organik olarak parçalanabilir madde denklem 3.2 ye göre hesaplanmıştır;

$$TOW = P \times BOİ \times 0,001 \times I \times 365 \quad (3.2)$$

TOW = Envanter yılında atıksudaki toplam organikler, (kg BOİ/yıl)

P = Envanter yılındaki ülke nüfusu (kişi)

BOİ = Envanter yılında ülkeye özgü kişi başına BOİ, (g/kişi/gün)

0,001 = Gram BOİ 'den kg BOİ 'ye dönüşüm

I = Kanalizasyona boşaltılan ek endüstriyel BOİ için düzeltme faktörü (toplanan için varsayılan 1,25; toplanmayan için varsayılan 1,00'dir)

Q<sub>endüstriyel</sub> olmadığı için I=1,00 alınır.

Evsel atıksudan kaynaklanan toplam CH<sub>4</sub> emisyonları denklem 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$CH_4 \text{ emisyonları} = [\sum(U_j \times T_{ij} \times EF_j)] \times (TOW - S) - R \quad (3.3)$$

CH<sub>4</sub> emisyonları = Envanter yılındaki CH<sub>4</sub> emisyonları (kg CH<sub>4</sub> /yıl)

TOW = Envanter yılındaki atıksu toplam organik madde (kg BOİ/yıl)

EF<sub>j</sub> = Emisyon faktörü (kg CH<sub>4</sub> / kg BOİ)

S = Envanter yılında çamur olarak uzaklaştırılan organik bileşen (kg BOİ/yıl)

U<sub>i</sub> = Envanter yılında gelir grubu i'deki nüfusun oranı

T<sub>ij</sub> = i envanter yılında her bir gelir grubu fraksiyonu için arıtma /deşarj yolu veya sisteminin kullanım derecesi, j

i = Gelir grubu: kırsal, kentsel yüksek gelir ve kentsel düşük gelir

j = Her bir arıtma /deşarj yolu veya sistemi

R = Envanter yılında geri kazanılan CH<sub>4</sub> miktarı (kg CH<sub>4</sub> /yıl)

### 3.2.2. Diazot Monoksit Emisyon Hesabı

Atıksudaki nitrojenin tahmin edilmesi ve emisyon faktörünün belirlenmesi ve atıksudan dolayı N<sub>2</sub>O emisyonlarının belirlenmesi, N<sub>2</sub>O emisyonlarının hesaplanmasında tamamlayıcı adımlardır. Bu emisyonlar, atıksudaki nitrojen bileşiklerinin mikrobiyal dönüşümüyle ilişkilidir ya arıtma tesislerinden ya da atıksuların su kütlelerine, göllere veya denize deşarjından meydana gelir. Evsel atıksu nitrojen çıkışı için emisyon faktörü tipik olarak 0,005 olarak alınır; ki bu, IPCC tarafından önerilen varsayılan değere karşılık gelir (IPCC, 2006). Kg N<sub>2</sub>O–N'yi kg N<sub>2</sub>O'ya dönüştürmek için 44/28 faktörü uygulanır. Basitleştirilmiş bir denklem Denklem 3.5'te verilmektedir. N<sub>2</sub>O emisyon faktörleri, AAT'nin girişindeki nitrojen yükleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Atıksudaki toplam azot denklem 3.4 ile hesaplanır (IPCC, 2006).

Atıksudaki toplam azot miktarı;

$$N_{\text{ÇIKIŞ}} = (P \times \text{Protein} \times F_{\text{NPR}} \times F_{\text{T}} \times F_{\text{E}}) - N_{\text{ÇAMUR}} \quad (3.4)$$

$N_{\text{ÇIKIŞ}}$	= Atıksu çıkışındaki toplam yıllık nitrojen miktarı (kgN/yıl)
$P$	= İnsan nüfusu
$\text{Protein}$	= Kişi başına yıllık protein tüketimi (kg/kişi/yıl)
$F_{\text{NPR}}$	= Proteindeki nitrojen fraksiyonu, varsayılan= 0,16 (kg N/kg protein)
$F_{\text{T}}$	= Atıksuya eklenen tüketilmeyen protein faktörü
$F_{\text{E}}$	= Kanalizasyon sistemine endüstriyel ve ticari olarak ortak boşaltılan protein faktörü
$N_{\text{ÇAMUR}}$	= Çamurla uzaklaştırılan nitrojen (varsayılan= sıfır), (kg N/yıl)

Atıksu çıkışından kaynaklanan N<sub>2</sub>O emisyonları denklem 3.5 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$N_2O_{Emisyonu} = N_{\text{ÇIKIŞ}} \times EF_{\text{ÇIKIŞ}} \times 44/28 \quad (3.5)$$

$N_2O_{Emisyonu}$  = Envanter yılındaki  $N_2O$  emisyonları (kg  $N_2O$ /yıl)

$N_{\text{ÇIKIŞ}}$  = Su ortamlara boşaltılan atıksudaki azot (kgN/yıl)

$EF_{\text{ÇIKIŞ}}$  = Atıksuya boşaltılan  $N_2O$  emisyonları için emisyon faktörü, (kg $N_2O$ -N/kgN)

44/28 = 44/28 faktörü, kg  $N_2O$ -N 'un kg  $N_2O$ 'ya dönüştürülme oranıdır

### 3.2.3. Karbondioksit Emisyon Hesabı

Atıksu arıtma tesislerinden  $CO_2$  üretimine katkıda bulunan iki temel faktör, arıtma prosesinin türü ve elektrik tüketimidir. Anaerobik arıtma sırasında, atıksudaki  $BOI_5$  ya  $CO_2$  ve  $CH_4$ 'e dönüştürülür ya da biyokütleyle dahil olur. Bir kısım biyokütle daha sonra içsel solunum yoluyla  $CO_2$  ve  $CH_4$ 'e dönüştürülür. Çamur çürütücülerden ve çürütme gazının yakılmasından kaynaklanan ilave karbondioksit emisyon kaynaklarıdır. Aerobik işlemlerde, organik maddelerin ayrışması yoluyla  $CO_2$  üretilir. Atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan  $CO_2$  emisyonları doğası gereği biyogenik olduğundan, ulusal toplam emisyonların dışında tutulur ve IPCC Kılavuzlarında dikkate alınmaz. Biyogenik kökenleri, doğal karbon döngüsünün bir parçası olduklarını ve bitkilerden hayvanlara ve insanlara geçen besin zincirinden veya doğal atmosferik  $CO_2$  kaynaklarından kaynaklandıklarını ima eder (Taşeli, 2020).

### 3.2.4. Elektrik Kullanımı Kaynaklı Emisyon Hesabı

Elektrik kullanımından kaynaklanan sera gazı emisyonları, AAT tarafından yıllık olarak kullanılan toplam MWsa ve IPCC (2006), tarafından önerilen emisyon faktörü 0,91 t $CO_2e$ /MW çarpılarak hesaplanır. Aylık ortalama elektrik tüketimi = 1351777 kWsa olarak tesisin 2020 yılı elektrik faturalarının ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

### 3.3. Seçilen İleri Atıksu Arıtma Tesisi Gömülü Karbon Emisyon Hesapları

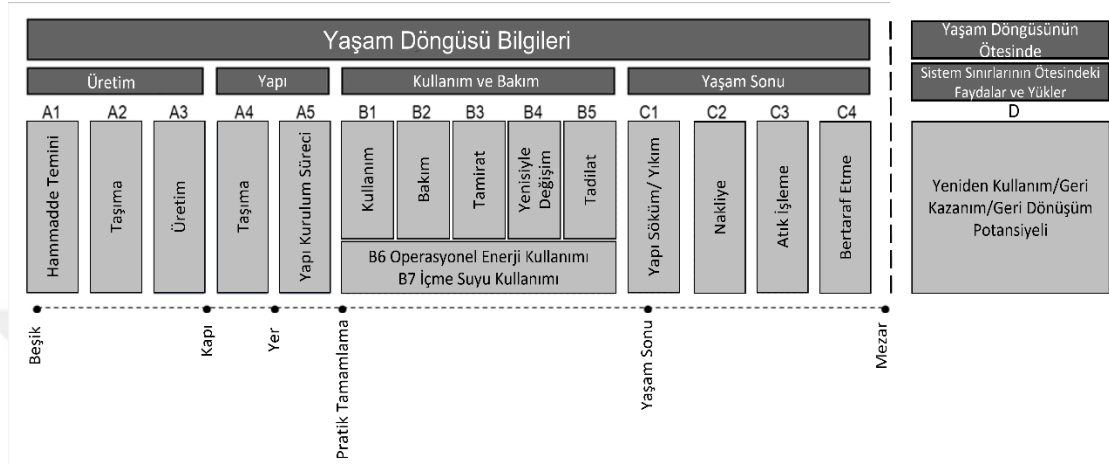
Çalışma bölgesi olarak Türkiye'nin Marmara Bölgesi'nin güney kesiminde yer alan ileri atıksu arıtma tesisi seçilmiştir. Seçilen atıksu arıtma tesisi 10000 m<sup>2</sup> alan üzerine inşaa edilmiştir. AAT'nin inşaaasında kullanılan malzemelerin türleri ve miktarları tesisin nihai raporundan alınmıştır (Büyükşehir Belediyesi, 2015) ve Tablo 3.3'te ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 3.3. Atıksu arıtma tesisindeki malzeme miktarları.

Malzeme tipi	Malzemenin adı	Birim	Tüketim
Beton	C8/10 basınç dayanımına sahip beton	m <sup>3</sup>	175
Beton	C30/37 basınç dayanımına sahip beton	m <sup>3</sup>	1888
Beton	Kontrplaklı düz betonarme kalıp	m <sup>2</sup>	15213
Çelik	İnce nervürlü döşeme	ton	58
Çelik	Kalın nervürlü döşeme	ton	160
Badana	Katranlı badana	m <sup>2</sup>	1207
Badana	Kireç badana	m <sup>2</sup>	298
Boyama	Solvent bazlı epoksi boya	m <sup>2</sup>	389
Boyama	İpek mat boya	m <sup>2</sup>	771
PVC	PVC kapı, pencere	kilogram	1708
PVC	Boru	m	74
Tuğla	Tuğla	m <sup>2</sup>	627
Fayans	Fayans	m <sup>2</sup>	506
Seramik	Seramik zemin ve duvar kaplaması	m <sup>2</sup>	503
Yalıtım	Polimer bitüm kaplama ile su yalıtımı	m <sup>2</sup>	3361
Derz	İnşaat derzi	m <sup>2</sup>	572
Demir	Çeşitli demir imalatı	ton	3
Odun	Odun	m <sup>2</sup>	593
Cam	Cam	m <sup>2</sup>	80
Şap	Şap	m <sup>2</sup>	947
Çelik boru	Paslanmaz çelik boru	kilogram	71147
Çelik flanş	Paslanmaz çelik flanş	kilogram	638

Gömülü karbonun belirlenmesi, bir ürünün veya malzemenin tüm yaşam döngüsü boyunca üretimi, nakliyesi, imalatı ve imhasıyla ilişkili karbon emisyonlarının

hacminin ölçülmesini gerektirir. Bir varlığın çevresel etkisini açıklamak için, yaşam döngüsü, Gibbons ve arkadaşları (2022) tarafından belirtildiği gibi binalar için BS EN 159785'te tanımlanan spesifikasyonlara göre aşamalara ve modüllere bölünmüştür. Şekil 3.2 yaşam döngüsü aşamalarını göstermektedir.



Şekil 3.2. Yaşam döngüsü aşamaları (Gibbons ve ark., 2022)

Bir Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) bu aşamaların bir veya daha fazlasını kapsayabilmektedir. YDD'de gerekli olan minimum aşamalar hedeflerine bağlı olup Beşikten Mezara değerlendirme, üretimden imhaya (A-C) kadar uzanmaktadır. Beşikten Kapıya üretim sürecini değerlendirmektedir (A1-A3). Bina inşaatına uygulandığında, beşikten kapıya tipi değerlendirme, ön karbon, sermaye karbonu veya beşikten uygulamaya kadar tamamlama olarak da bilinen A4 ve A5 aşamalarını da içermektedir. Beşikten Beşiğe, bertaraf yönteminin geri dönüşüm olduğu, beşikten mezara bir YDD gerektirmektedir. Kapıdan Kapıya, inşaat aşaması gibi yaşam döngüsünün yalnızca bir bölümünü kapsayan bir YDD içerirken bir ürünün tüm yaşam karbonu tüm aşamalarını (A-D) içermektedir (Gibbons ve ark., 2022).

**[A1–A3] Üretim aşaması:** Bu aşama beşikten kapıya işlemlere (ham madde tedariki, taşıma ve imalat) atfedilebilen karbon emisyonlarıyla ilgilenmektedir. [A1–A3] kapsamındaki işlemler sıklıkla, bileşenlerin üretildiği ve daha sonra bir sisteme monte edilmek üzere başka bir üretim tesisine nakledildiği birkaç adımda gerçekleşmektedir. Tüm yaşam karbon değerlendirmesine dahil edilen öğelerin ürün

aşamasına [A1–A3] atfedilebilen karbon emisyonları, verilen temel malzeme miktarlarına uygun gömülü karbon faktörleri atanarak hesaplanır. Denklem 3.6 ve 3.7 bu durumu açıklamaktadır.

$$[A1–A3] = \text{Malzeme miktarı (a)} \times \text{Malzemenin içerdiği karbon faktörü (b)} \quad (3.6)$$

Değerlendiricinin (a) ve (b)'nin aynı ölçüte göre ölçüldüğünden emin olması gerekir; kg başına ve buna göre ayarlanır; Gerekliğinde malzeme yoğunlukları; yoğunluk verileri, kullanılan ilgili çevresel ürün beyanı veya ürün tedarikçisi tarafından sağlanan teknik belgelerden alınmalıdır. Spesifik yoğunluk bilgisi mevcut değilse, öğenin türünü temsil eden ortalama veriler, kaynakları açıkça belirtilmek suretiyle kullanılmalıdır. Gerekirse malzeme varsayımlarının açıklığa kavuşturulması için yapı mühendisi, maliyet danışmanı vb. gibi proje ekibi üyelerine danışılmalıdır (RICS, 2017).

$$EC_{A13} = \sum_{i=1}^n [Q_i (ECF_{A13,i})] \quad (3.7)$$

$Q_i$ 'nin  $i$ 'inci malzemenin ağırlığı olduğu durumda,  $(ECF)_{(A13,i)}$ ,  $i$ 'inci malzemeyle ilişkili yapılandırılmış karbon faktörüdür (ECF).

**[A4 ve A5] İnşaat süreci aşaması:** Modüller [A4] ve [A5] sırasıyla malzeme ve bileşenlerin fabrika kapısından proje sahasına taşınması ve bunların bir binaya montajı ile ilgili emisyonları göstermektedir.

**[A4] Taşımacılık emisyonları:** Nakliye emisyonları, depolama alanları ve/veya dağıtım merkezlerindeki ara duraklar dikkate alınarak, ürünlerin son üretim tesisinden proje sahasına kadar yola çıkmasını takip eden yolculuğunun tüm aşamalarını içermektedir. Taşımacılık emisyonları denklem 3.8 ve 3.9'a göre hesaplanmaktadır:

$$[A4] = \text{Malzeme veya sistem kütlesi (a)} \times \text{taşıma mesafesi (b)} \times \text{karbon dönüşüm faktörü (c)} \quad (3.8)$$

Malzeme veya sistem kütlesi (a): Kabul edilebilir kaynaklardan elde edilerek mümkün olan her yerde taşıma sırasında oluşabilecek maddi kayıplar hesaba katılmaktadır. Taşıma mesafesi (b): Üretim yeri ile proje sahası arasındaki mesafeye göre hesaplanır ve her kalem için öngörülen tedarik zinciri rotasına tabidir. Spesifik kaynak kullanımı bilgisi mevcut olmadığında, tüm yaşam karbon değerlendirmelerinde Tablo 3.4’de ki taşıma senaryoları kullanılmaktadır. Karbon dönüşüm faktörü (c): Seçilen taşıma moduna bağlı olarak uygun karbon dönüşüm faktörlerini göstermektedir. (RICS, 2017).

Tablo 3.4. Avrupa hesaplamalarındaki nakliye senaryoları

Taşıma senaryosu Avrupa bağlamında	Karayoluyla mesafe (km)	Deniz yoluyla mesafe (km)
Yerli üretim	50	-
Milli üretim	300	-
Avrupa üretimi	1500	-
Küresel üretim	200	10000

$$ECF_{A4/C2,j} = \Sigma(TD_{mod} \times TEF_{mod}) \quad (3.9)$$

$ECF_{A4/C2,j}$ , j’inci malzeme için sahaya/sahadan taşımanın karbon faktörünü temsil ettiğinde,  $TD_{mod}$ , her bir taşıma modu için taşıma mesafesidir ve  $TEF_{mod}$ , dikkate alınan her taşıma modu için taşıma emisyon faktörüdür.

**[A5] İnşaat – kurulum süreci emisyonları:** Saha içi veya saha dışı inşaatla ilgili faaliyetlerden kaynaklanan karbon emisyonları [A5]’te dikkate alınır. Bu, saha konaklaması, tesis kullanımı için her türlü enerji tüketimini ve inşaat süreci, işlenmesi ve bertarafı sırasında üretilen atıklarla ilgili etkileri içerir. Denklem 3.10, 3.11 ve 3.12 ile hesaplanmaktadır.

$$ECF_{A5} = ECF_{A5w} + EC_{A5a} \quad (3.10)$$

$$ECF_{A5w,k} = WF_k \times (ECF_{A13,k} + ECF_{A4,k} + ECF_{C2,k} + ECF_{C34,k}) \quad (3.11)$$

Burada  $ECF_{A5w,k}$ , kth malzeme için inşaat atığı içeren karbon faktörüdür,  $WF_k$  kth malzeme için atık faktörüdür,  $ECF_{A13,k}$  kth malzeme için [A1–A3] için yapılandırılmış karbon faktörüdür,  $ECF_{A4,k}$  kth malzeme için sahaya nakliye için

yapılandırılmış karbon faktörüdür  $ECF_{C2,k}$  sahadan uzaklaştırma karbon faktörüdür,  $ECF_{C34,k}$  atık işleme ve bertarafı içeren karbon faktörüdür.

$$EC_{A5a} = CAEF \times PC/100000 \quad (3.12)$$

$EC_{A5a}$ 'nın inşaat sahası faaliyetlerinden ( $A_{5a}$ ) oluşan karbon olduğu durumlarda, CAEF yalnızca üst yapı ve altyapı için 700 kgCO<sub>2</sub>e/100000 £ veya tüm bina için 1400 kgCO<sub>2</sub>e/100000 £ inşaat faaliyetleri emisyon faktörüdür ve PC proje maliyetidir.

**[B1–B7] Kullanım aşaması:** Kullanım aşaması, inşa edilen varlığın fiili olarak tamamlanmasından hizmet ömrünün sonuna kadar tüm yaşam döngüsü boyunca işletilmesiyle ilişkili karbon emisyonlarını içermektedir. Bu, operasyonel enerji ve su kullanımıyla ilgili emisyonların yanı sıra her türlü gömülü karbonu da içermektedir. Bina bileşenlerinin bakımı, onarımı, değiştirilmesi ve yenilenmesiyle ilgili etkileri içermektedir.

**[B1] Kullanım sırasındaki emisyonlar:** Kullanımdaki modül [B1] bir binanın ömrü boyunca bileşenlerinden kaynaklanan emisyonları yakalar; Binanın ömrü boyunca bina bileşenlerinden yayılan herhangi bir karbon [B1]'de rapor edilmektedir. Yapı elemanlarından salınan karbon emisyonları ve potansiyel karbon emiliminin etkisi hesaba katılmaktadır. Projenin yaşam döngüsü boyunca soğutucu akışkanlardan, yalıtım şişirici maddelerden, boyalardan vb. kaynaklanan emisyonlara özellikle dikkat edilmektedir.

**[B2] Bakım emisyonları:** İnşaa edilmiş varlıklar, sürekli verimlilik, iyi görünüm ve garantilerin geçerliliğini sağlamak için düzenli bakım gerektirmektedir. Bu tekrarlanan faaliyetlerin tümü enerji ve/veya ürünlerin kullanımını içermektedir. Bunlar modül [B2]'de hesaba katılır. Modül [B2], temizlik ve kullanılan ürünler de dahil olmak üzere bakım süreçleriyle ilgili tüm faaliyetlerden kaynaklanan karbon emisyonlarını hesaba katar. Ayrıca bu faaliyetlerle ilişkili enerji ve su kullanımından kaynaklanan emisyonları da içermektedir.

**[B3] Emisyonların onarımı:** Bu modülün [B3] bakım rejiminin ötesinde öngörülemeyen hasarların onarılması için makul bir pay sağlaması amaçlanmaktadır. Bu nedenle bakım emisyonlarıyla aynı yapı elemanı kategorilerine uygulanabilir. Modül [B3], onarım süreçleri ve kullanılan ürünlerle ilgili tüm faaliyetlerden kaynaklanan karbon emisyonlarını dikkate almaktadır.

**[B4] Yenisiyle değiştirme emisyonları:** Bir binanın hizmet ömrü boyunca, bina hizmetleri ekipmanı, pencereler ve kaplamalar, çatı yüzeyleri, iç kaplamalar vb. gibi öğelerin değiştirilmesinden kaynaklanan karbon etkileri olacaktır. Bunlar, orijinal spesifikasyona ve karşılık gelenlere bağlı olarak farklı döngülerde meydana gelir. Modül [B4], yenisiyle değiştirme sürecinden kaynaklanan emisyonlar da dahil olmak üzere, bina bileşenlerinin öngörülen değiştirilmesiyle ilişkili her türlü karbon emisyonunu dikkate alınmaktadır.

**[B5] Yenileme emisyonları:** Yenileme, yenisiyle değiştirmeden farklı olarak, binanın başlangıçta tanımlanan ve ölçülen gelecekteki istenen işlevi karşılama amacıyla binanın fiziksel özelliklerinde planlı bir değişiklik veya iyileştirme olarak tanımlanmaktadır. Bu genellikle projenin hizmet ömrü boyunca bir noktada önceden belirlenmiş bir kullanım değişikliğini ve ayrıca binanın çeşitli kısımlarında büyük miktarda çalışmayı içermektedir. Modül [B5], yenileme faaliyetlerinden kaynaklanan emisyonlar da dahil olmak üzere, yenilemede kullanılan herhangi bir bina bileşeniyle ilişkili her türlü karbon emisyonunu dikkate alır. Kullanılan bileşenlerin üretiminden, sahaya taşınmasından ve kurulumundan kaynaklanan tüm emisyonlar dahil edilmektedir.

**[B6] Operasyonel enerji kullanımı:** Bu modül, proje ömrü boyunca binadaki teknik sistemlerin işletilmesinden kaynaklanan enerji kullanımından kaynaklanan emisyonları kapsamaktadır. Projenin yaşam döngüsü boyunca öngörülen ve/veya ölçülen binaya entegre sistemlerin enerji kullanımından kaynaklanan operasyonel karbon emisyonları, modül [B6] kapsamında raporlanmaktadır.

**[B7] İşletme suyu kullanımı:** Bu bölüm, binanın işletimi sırasında su kullanımıyla ilişkili karbon etkilerini kapsar. Binanın yaşam döngüsü boyunca su temini ve atıksu arıtımıyla ilgili tüm karbon emisyonları (başka bir yerde rapor edilen bakım, onarım, değiştirme ve yenileme sırasındaki su kullanımı hariç) modül [B7] kapsamında raporlanır. Suyla ilgili sistemlerden harcanan enerjiyle ilişkili emisyonlar; kullanım sıcak suyu vb. sağlanması modül [B6] altında ele alınır. Su kullanımı ve arıtımı için yerel su tedarikçisi tarafından yayınlanan karbon dönüşüm faktörleri kullanılmaktadır.

**[C] Kullanım Ömrü Sonu aşaması:** Kullanım Ömrü Sonu aşaması, inşa edilen varlık ömrünün sonuna ulaştığında ve artık kullanılmayacağına başlar. Tüm yaşam boyu karbon değerlendirmesinin amaçları doğrultusunda, bunun binanın referans çalışma döneminin sonunda gerçekleşeceği varsayılmaktadır. Hizmetten çıkarma, sökme ve yıkım işlemlerinin yanı sıra projenin kullanım ömrünün sonunda malzemelerin taşınması, işlenmesi ve imha edilmesinden kaynaklanan emisyonlar, modül [C]'de hesaba katılır. Saha temizlenip yer düzlemine düzleştirildiğinde ve daha fazla kullanıma hazır olduğunda, tüm yaşam karbon değerlendirmesi kapsamında Kullanım Ömrü Sonu aşaması tamamlanmış sayılır. Çelik, alüminyum ve bakır gibi inşaatta kullanılan metallerin çoğu, kalitelerinde önemli bir bozulma olmaksızın birçok kez yüksek oranda geri dönüştürülebilmektedir.

**[C1] Yıkım emisyonları:** Yıkım, değerlendirilen inşa edilmiş varlığın sökülmesi, yeniden yapılandırılması ve/veya yıkılması için gereken tüm saha bazlı faaliyetleri kapsar. Sahada konaklama ve tesis kullanımı için enerji tüketimi de dahil olmak üzere saha içi veya saha dışı yıkım ve yıkım faaliyetlerinden kaynaklanan karbon emisyonları [C1]'de dikkate alınır. Denklem 3.13 ile hesaplanır. Daha spesifik bilgilerin bulunmadığı durumlarda, toplu verilere dayalı ortalama 3,4 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup> oranı kullanılır.

$$EC_{C1} = \sum_j (Q_{mac,k} \times ECF_{mac,k}) + (Q_{enerji,e} \times ECF_{enerji,e}) \quad (3.13)$$

$EC_{C1}$ , sahadaki makinelerin çalıştırılması ve yıkım için enerji tüketimiyle ilişkili karbon emisyonları olduğunda,  $Q_{mac,k}$ , k tipi makinelerin çalışma süresi ve  $Q_{(enerji,e)}$ , 'e' tipi enerji miktarıdır.

**[C2] Taşıma emisyonları:** Yapisöküm ve yıkımdan kaynaklananların, ara istasyonlar da dahil olmak üzere uygun bertaraf sahasına taşınmasıyla ilişkili her türlü karbon emisyonu, modül [C2] kapsamında ele alınır. Atılan maddelere ilişkin nakliye emisyonları denklem 3.14 ile hesaplanır:

$$[C2] = \text{Taşınacak atık kütlesi (a)} \times \text{Taşıma karbon faktörü (b)} \times \text{Bertaraf alanına uzaklık (c)} \quad (3.14)$$

**[C3] Yeniden kullanım, geri kazanım veya geri dönüşüm emisyonları için atık işleme:** Malzemelerin ve/veya bileşenlerin, inşa edilmiş varlığın ömrünün bitiminden sonra geri kazanılması ve yeniden kullanılması veya geri dönüştürülmesi amaçlandığında, bunların bertaraf edilmesinden önce işlenmesi ve işlenmesiyle ilişkili her türlü karbon emisyonu atık sonu durumuna ulaşılması modül [C3]'e dahil edilir. Denklem 3.15 ile hesaplanır.

$$EC_{C3} = \sum_l (Q_{wap,l} \times ECF_{C3,l}) \quad (3.15)$$

Burada  $Q_{wap,l}$  atık işleme için 'l' tipi malzemenin miktarıdır.

**[C4] Bertaraf emisyonları:** Modül [C4], bertaraf öncesinde gereken herhangi bir işlemde ve çöp depolama alanlarına atılan malzemelerin bozulmasından ve/veya yakılmasından kaynaklanan emisyonları kapsar. Bu, yeniden kullanım ve/veya geri dönüşüm için geri kazanılmayan öğeler içindir. Geri kazanılması ve yeniden kullanılması beklenmeyen, ancak depolama veya yakma yoluyla nihai olarak bertaraf edilmesi amaçlanan öğeler için, bunların bertaraf edilmesinden kaynaklanan emisyonlara ilişkin bir tahsisat [C4]'e dahil edilir. Bertaraf verilerinin mevcut olmadığı veya '0' olarak belirtildiği durumlarda, inorganik maddelerin [C4]

emisyolları için genel bir varsayım kullanılmalıdır. Önerilen varsayılan rakam 0,013 kgCO<sub>2</sub>e/kg atıktır. Denklem 3.16 ile hesaplanır.

$$EC_{C4} = \sum_m(Q_{dis,m} \times ECF_{C4,m}) \quad (3.16)$$

Burada Q<sub>(dis,m)</sub>, bertaraf edilecek 'm' tipi malzemenin miktarıdır.

Modern atık depolama sahaları genellikle organik maddenin ayrışmasından kaynaklanan metan (CH<sub>4</sub>) ve karbondioksit (CO<sub>2</sub>) gazlarını yakalamak için teknikler kullanır. Organik atıkların yakılmasından ve/veya depo gazının yakılmasından elde edilen potansiyel enerji geri kazanımı, modül [D] kapsamında rapor edilir. Organik maddeler doğal hammadde enerjisi taşır ve bunların ayrışması aynı zamanda büyük miktarda EoL emisyonuyla birlikte CO<sub>2</sub>'nin yanı sıra CH<sub>4</sub>'e de yol açmaktadır.

**Modül [D] Sistem sınırlarının ötesindeki faydalar ve yükler:** Modül [D], inşa edilmiş varlıktan atılan elemanların yeniden kullanılmasından veya projenin yaşam döngüsü sonrasında bunlardan geri kazanılan enerjiden kaynaklanan her türlü fayda veya yükü kapsamaktadır. Modül [D], bileşenlerinin başka amaçlara yönelik olarak kullanıldığında, yani geri kazanıldığında, yeniden kullanıldığında ve/veya geri dönüştürüldüğünde gelecekteki potansiyelini hesaba katarak bir Projenin çevresel etkilerinin daha geniş bir resmini sağlamayı amaçlamaktadır. Modül [D], birincil malzemelerin yerine başka amaçlarla kullanılan öğelerin kullanılmasından kaynaklanan önlenen emisyonları (veya potansiyel yükleri) kapsar. Modül [D] döngüsellığı ölçmek ve gelecekteki kaynak verimliliğini değerlendirmek için bir ölçüm olarak kullanılmaktadır. Modül [D], proje ömrünün ötesinde malzeme ve bileşenlerin potansiyel çevresel faydalarını veya yüklerini içerir. Modül [D] ayrı olarak raporlanır ve beşikten mezara modüller [A-C] ile bir araya getirilmez. Modül [D], incelenmekte olan projenin yaşam döngüsünün ötesinde meydana geldiğinden ve aynı zamanda bina bileşenlerinin gelecekteki işlemlerine ilişkin doğası gereği yüksek düzeyde belirsizlik taşıdığından ayrı olarak iletilmektedir. Bununla birlikte, inşa edilmiş bir projenin çevresel etkilerine ilişkin bütünsel bir anlayış elde etmek için modül [D] rakamlarını beşikten mezara [A-C] rakamlarıyla birlikte

değerlendirilmektedir. Yeniden kullanım/geri dönüşüm faaliyeti, bir ögenin tamamen yeniden kullanılmasından (örneğin, tutulan yapısal çerçeve) bireysel bileşenlerin yeniden kullanımına (örneğin, çelik kesitler, kaplama modülleri, vb.) veya malzemenin geri dönüşümüne (örneğin, atılan pencerelerden cam kırıntıları, ezilmiş beton) kadar değişebilmektedir (RICS, 2017).

Bu araştırma için sistem sınırı; üretim aşaması (A1-A3), nakil aşaması (A4) ve inşaat kurulum aşaması (A5) olarak tanımlanmıştır. A1-A3 aşamaları, hammaddelerin imalatı (A1), üretim ve montaj (A2) ve üreticinin sahasına nakliyesi (A3) ile ilgilidir.

Yaşam döngüsü değerlendirme analizlerinin gerçekleştirilmesi için çeşitli araçlar, yazılımlar ve programlar geliştirilmiştir. Bunlar ya paketleme hesaplamaları için COMPASS ve Paket Modelleme, inşaat hizmetleri için TM65 hesaplama aracı, beton karışımlarının gömülü karbonunun hesaplanması için ICE Çimento, Harç ve Beton aracı gibi belirli kullanımları ele almak üzere tasarlanmışlardır (Speck ve ark., 2016; Harnot ve George, 2022). Bunlardan ikincisi, 90'ların başında geliştirilen SimaPro ve GaBi, kullanılan araçların başında gelmektedir. 2015 ve 2016 yıllarında yapılan çalışmalarda, yaygın olarak kullanılan dört malzeme (Alüminyum, Oluklu Mukavva, Cam ve Polietilen tereftalat (PET)) için bu iki yazılımın kullanılmasıyla üretilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalar, incelenen tüm çevresel etki kategorilerinin neredeyse yarısında minimum %20'lik bir fark gözlemlenmiş ve farklılıkların farklı veri tabanlarının kullanımından ve yazılımın ayarlanamayan sınır varsayımlarından kaynaklandığı sonucuna varmıştır (Herrmann ve Moltesen, 2015; Speck ve ark., 2016). Bu tutarsızlıklar bir çalışmanın sonuçlarını çarpıtacak kadar önemli olabilir.

Bunun aksine, 2006 yılında geliştirilen OpenLCA yazılımı, açık kaynaklı bir tasarımla oluşturulmuş olup kullanıcıların kendi değerlendirme yöntemlerini oluşturmalarına ve kamuya açık veritabanlarını kullanmalarına olanak tanımıştır. 2001 yılında SimaPro ve GaBi'ye benzer yapılara sahip Planetary LCA geliştirilmiştir. 2020 yılında Birleşik Krallık Yeşil Bina Konseyi (UKGBC) ile ortaklaşa, A1-A3, A4 ve A5 aşamaları için GWP'yi değerlendiren, kullanımı ücretsiz bir sürüm olan LCA Planetary bu tez çalışmasında kullanılmıştır (UKGBC, 2020).

## BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 4.1. Seçilen Atıksu Arıtma Tesisinin Faaliyetleri Kaynaklı Emisyon Sonuçları

#### 4.1.1. İleri Atıksu Arıtma Tesisi Kaynaklı Metan Emisyonu

Denklem 3.1 ile 3.3 evsel atıksu için varsayılan maksimum CH<sub>4</sub> üretim kapasitesi (B<sub>0</sub>) ile birlikte 0,6 kg CH<sub>4</sub>/kg BOİ, (IPCC, 2006)'te ana hatlarıyla belirtildiği gibi AAT'den kaynaklanan metan emisyonlarının hesaplanmasında kullanılmıştır. Ayrıca hesaplama sürecinde IPCC'nin "Kentleşme için önerilen değerler ve seçilen ülkeler için her gelir grubu için arıtma/ deşarj yolu veya yönteminden yararlanma derecesi (T<sub>i,j</sub>)" Tablo 6.5'te verilen (T<sub>i,j</sub>) değerleri kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalar neticesinde AAT girişindeki toplam organik madde Tablo 4.1'de verildiği üzere 157668 kgBOİ/yıl olarak bulunmuştur.

Tablo 4.1. Evsel atıksudaki organik bozunabilen maddeler.

Nüfus (a)	Bozunabilir organik madde (kg/BOD/kişi/yıl) (b)	Düzeltilme faktörü (c)	AAT ne giren toplam organik madde (kgBOD/yıl) (d=a*b*c)
10094	15,62	1,00	157668

(c) Varsayılan değer 1,00'dir.

Tablo 4.1.'de evsel atık sudaki tahmini organik olarak bozunabilir malzeme verilmektedir. Evsel atıksu için metan emisyon faktörü ve evsel atıksudan kaynaklanan tahmini emisyonlar sırasıyla Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.2. Evsel atıksu için metan emisyon faktörü.

Maks. metan üretim kapasitesi, B <sub>0</sub> (kgCH <sub>4</sub> / kgBOİ) (a)	Metan düzeltme faktörü (MCF) (b)	Emisyon faktörü (EF <sub>j</sub> ) (kgCH <sub>4</sub> /kgBOİ) (c=a*b)
0,6	0,05	0,03

Tablo 4.3. Evsel atıksudan kaynaklanan metan emisyonları.

Gelir grubu	Nüfus gelir grubu fraksiyonu (U) (a)	Kullanım derecesi fraksiyonu (T <sub>ij</sub> ) (b)	Emisyon faktörü (EF <sub>j</sub> ) (kgCH <sub>4</sub> /kgBOİ) (c)	TOW (kgBOİ /yıl), (d)	Uzaklaştırılan çamur (S) (kgBOİ /yıl) (e)
Kırsal	0,32	0,58			
Kentsel yüksek gelir	0,68	0,96	0,03	157668	0
Kentsel düşük gelir	0,00	Yok			
Toplam	1	0,77			
Gei kazanılan ve yakılan metan (R) (kg/CH <sub>4</sub> /yıl) (f)	Net metan emisyonları (kg/CH <sub>4</sub> / yıl) g=[(a*b*c)*(de)]-f	Metan GWP (h)	Toplam CO <sub>2</sub> e (kgCO <sub>2</sub> e/yıl) i=g*h	Toplam CO <sub>2</sub> e (tCO <sub>2</sub> e/yıl) (j)	
0	3642	25	91053,27	91,05	

Tablo 4.3'ün ilk sütununda gelir grupları kırsal, kentsel yüksek gelir ve kentsel düşük gelir olarak 3 ana başlık altında toplanmıştır. Bunlara karşılık gelen nüfus gelir fraksiyonları ise IPPC (2006) klavuzunda verildiği üzere sırasıyla 0,32, 0,68 ve 0 dır. Toplam fraksiyon ise 1 dir. Maksimum metan üretim kapasitesi, B<sub>0</sub> (kgCH<sub>4</sub> / kgBOİ) ve metan düzeltme faktörü (MCF)'nün çarpımı ile hesaplanan emisyon faktörü 0,03 (kgCH<sub>4</sub>/kgBOİ) olarak hesaplanıp 3. Sütunda gösterilmiştir. Tablo 4.1 'de hesaplanan TOW ise 4. Sütuna yerleştirilmiştir. 5. Sütunda verilen S ise envanter yılında çamur olarak uzaklaştırılan organik bileşeni (kg BOİ/yıl) vermektedir. Atıksu arıtma tesisleri anaerobik proses adımlarını içerebilir. Bu tür tesislerde üretilen CH<sub>4</sub>, bir alev veya enerji cihazında geri kazanılıp yakılabilir. Enerji kullanımı için yakılan veya geri kazanılan CH<sub>4</sub> miktarı, ayrı bir CH<sub>4</sub> geri kazanım parametresi kullanılarak toplam emisyonlardan çıkarılır. Geri kazanılan CH<sub>4</sub> miktarı R olarak ifade edilir ve Tablo 4.3'de 6.sütun olarak verilmiştir. Yalnızca birkaç ülkede çamur giderme verileri ve CH<sub>4</sub> geri kazanım verileri bulunur. Çamur giderme için varsayılan değer sıfırdır. CH<sub>4</sub> geri kazanım için varsayılan değer sıfırdır.

CO<sub>2</sub> emisyonları biyojenik kökenli olduğundan ve CH<sub>4</sub> ve N<sub>2</sub>O emisyonları çok küçük olduğundan, atık sektöründeki iyi uygulamalar bunların tahminini

gerektirmediğinden, yakmadan kaynaklanan emisyonlar önemli değildir. Buna göre hesaplanan net metan emisyonları 3642 (kg/CH<sub>4</sub> / yıl) olarak hesaplanıp tablonun 7. sütununda verilmiştir. Sonuç olarak 2020 yılında seçilen atıksu arıtma tesisinden kaynaklanan toplam metan gaz emisyonu 91,05 tCO<sub>2e</sub> olarak hesaplanmış ve tablonun son sütununda verilmiştir.

#### 4.1.2. İleri Atıksu Arıtma Tesisi Kaynaklı Nitröz Oksit Emisyonu

N<sub>2</sub>O emisyon hesaplamaları için Tablo 4.4 de verilen değerlerin yanı sıra denklem 3.4 ve 3.5'ten yararlanılmıştır (IPCC, 2006). Tablo 4.5 ise atıksudaki hesaplanan N miktarını vermektedir.

Tablo 4.4. N<sub>2</sub>O için varsayılan veriler.

	Tanım	Varsayılan değer	Menzil
EF <sub>ÇIKIŞ</sub>	Emisyon faktörü (kg N <sub>2</sub> O-N/kg-N)	0,005	0,0005-0,25
P	Ülkedeki kişi sayısı	Ülkeye özgü	±%10
Protein	Kişi başına yıllık protein tüketimi	Ülkeye özgü	±%10
F <sub>NPR</sub>	Proteindeki nitrojen oranı	0,16	0,15-0,17
F <sub>T</sub>	Tüketilmeyen protein düzeltme faktörü	1,1 çöp imhası olmayan ülkeler için 1,4 çöp imhası olan ülkeler için	1,0-1,5
F <sub>E</sub>	Endüstriyel nitrojenin kanalizasyona ortak deşarj faktörü. Önemli balık işleme tesislerine sahip ülkeler için daha yüksektir.	1,25	1,0-1,5

Tablo 4.5. Atıksudaki azot tahmini.

Nüfus (a)	Kişi başına		F <sub>T</sub> (d)	F <sub>E</sub> (e)	Çamurla	
	yıllık protein tüketimi (kg/kişi/yıl) (b)	F <sub>NPR</sub> (kgN/kgprotein) (c)			birlikte uzaklaştırıla n azot (N <sub>çamur</sub> ) (f)	Toplam çıkış N (kgN/yıl) g =(a*b*c*d*e)-f
10094	0,052	0,16	1,4	1,25	0	146,97

Azot oksit ( $N_2O$ ) emisyonları, arıtma tesislerinden doğrudan emisyonlar veya atıksuyun su yollarına, göllere veya denize boşaltılmasından sonra atıksudan dolayı emisyonlar olarak ortaya çıkabilmektedir. Atıksu arıtma tesislerinde nitrifikasyon ve denitrifikasyondan kaynaklanan doğrudan emisyonlar küçük bir kaynak olarak değerlendirilmektedir. Tipik olarak, bu emisyonlar atıksudan kaynaklanan emisyonlardan çok daha küçüktür ve yalnızca ağırlıklı olarak nitrifikasyon ve denitrifikasyon adımları olan gelişmiş merkezi atıksu arıtma tesislerine sahip olanlar için önemlidir.

Evsel atıksu nitrojen çıkışından kaynaklanan  $N_2O$  emisyonları için varsayılan IPCC emisyon faktörü 0,005 (0,0005 - 0,25) kg  $N_2O$ -N/kg N'dir (Tablo 4.4). Bu emisyon faktörü sınırlı saha verilerine ve nehirlerde nitrifikasyon ve denitrifikasyonun meydana gelmesine ilişkin spesifik varsayımlara dayanmaktadır. İlk varsayım nitrojenin tamamı atıksu ile birlikte boşaltılır. İkinci varsayım ise nehirlerde ve haliçlerdeki  $N_2O$  üretiminin nitrifikasyon ve denitrifikasyonla ve dolayısıyla nehre boşaltılan nitrojenle doğrudan ilişkili olduğudur.  $N_2O$  emisyonlarını tahmin etmek için gerekli olan faaliyet verileri, atıksu çıkışındaki nitrojen içeriği, ülke nüfusu ve kişi başına düşen ortalama yıllık protein üretimidir (kg/kişi/yıl). Kişi başına protein üretimi, temin edilen alım (tüketim) ile kanalizasyon sistemine boşaltılan endüstriyel protein ve ilave 'tüketilmemiş' proteini hesaba katacak faktörlerle çarpılır. Tüketilmeyen yiyecekler (atıklar) kanalizasyona akabilir (örneğin bazı gelişmiş ülkelerde çöp öğütücülerinin kullanılması sonucunda) ve ayrıca banyo ve çamaşır suyunun nitrojen yüklemesine katkıda bulunması beklenebilir. Çöp bertarafı kullanan gelişmiş ülkeler için atıksu yollarına boşaltılan tüketilmeyen proteinin varsayılan oranı 1,4 iken (Tablo 4.5), gelişmekte olan ülkeler için bu oran 1,1'dir. Endüstriyel veya ticari kaynaklardan kanalizasyona boşaltılan atıksular için bu oran 1,25'tir.

Tablo 4.6'da atıksudan kaynaklanan dolaylı  $N_2O$  emisyonlarının emisyon faktörü ve emisyonlarının tahminleri verilmektedir.

Tablo 4.6. Atıksudan kaynaklanan dolaylı N<sub>2</sub> o emisyonlarının emisyon faktörü ve emisyonlarının tahmini.

Çıkış azot (kgN/yıl) (a)	Emisyon faktörü (kg N <sub>2</sub> O N/kgN) (b)	Dönüşüm oranı (44/28) (c)	AAT'lerden kaynaklanan emisyon (varsayılan sıfırdır) (d)	Toplam N <sub>2</sub> O emisyonu/yıl $e=a*b*c$	CO <sub>2</sub> için GW (f)	Toplam CO <sub>2</sub> e (kg CO <sub>2</sub> e /yıl) $g=e*f$	Toplam CO <sub>2</sub> e (t CO <sub>2</sub> e /yıl) (h)
146,97	0,005	1,57	0	1,1537	298	343,8	0,344

2020 yılı atıksu arıtma tesisinin faaliyetlerinden kaynaklı toplam toplam N<sub>2</sub>O emisyonu çıkış azot 146,97 (kgN/yıl), emisyon faktörü 0,005 (kg N<sub>2</sub>O N/kgN) ve dönüşüm oranı (44/28) çarpılarak 1,1537 olarak bulunmuş ve Tablo 4.6'nın 5. sütunu olarak verilmiştir. Toplam tCO<sub>2</sub>e ise CO<sub>2</sub> için GWP değeri 298 ve toplam N<sub>2</sub>O emisyonu çarpılarak hesaplanmış ve son sütun olarak 0,344 tCO<sub>2</sub>e olarak bulunmuştur.

#### 4.1.3. Elektrik tüketimi kaynaklı emisyonlar

Elektrik tüketiminden kaynaklanan sera gazı emisyonları, tesisin 2020 yıllık ortalama elektrik faturaları ve Tablo 4.7'de sunulduğu gibi 0,91 tCO<sub>2</sub>e/MW emisyon faktörü kullanılarak hesaplanmıştır (IPCC, 2006).

Tablo 4.7. Atıksu arıtma tesisinin elektrik tüketimi kaynaklı emisyonu.

Yıllık kullanılan toplam Mwh (a)	Emisyon faktörü CO <sub>2</sub> e/Mwh (b)	Emisyon tCO <sub>2</sub> e (c=a*b)
16,70	0,91	15,20

Dolaylı sera gazı emisyonları ağırlıklı olarak elektrik kullanımından kaynaklanmaktadır ve seçilen tesisi için 15,20 tCO<sub>2</sub>e olarak hesaplanmıştır. Atıksu arıtma tesisi, öncelikle iki nedenden dolayı nispeten daha düşük enerji tüketimi göstermiştir. Birincisi, yerçekimine dayalı atıksu toplamanın yapılması ile enerji pompalama ihtiyacının ortadan kaldırılması ve ikinci olarak da arıtma tesislerinde ıslak kuyu pompalamanın bulunmamasıdır.

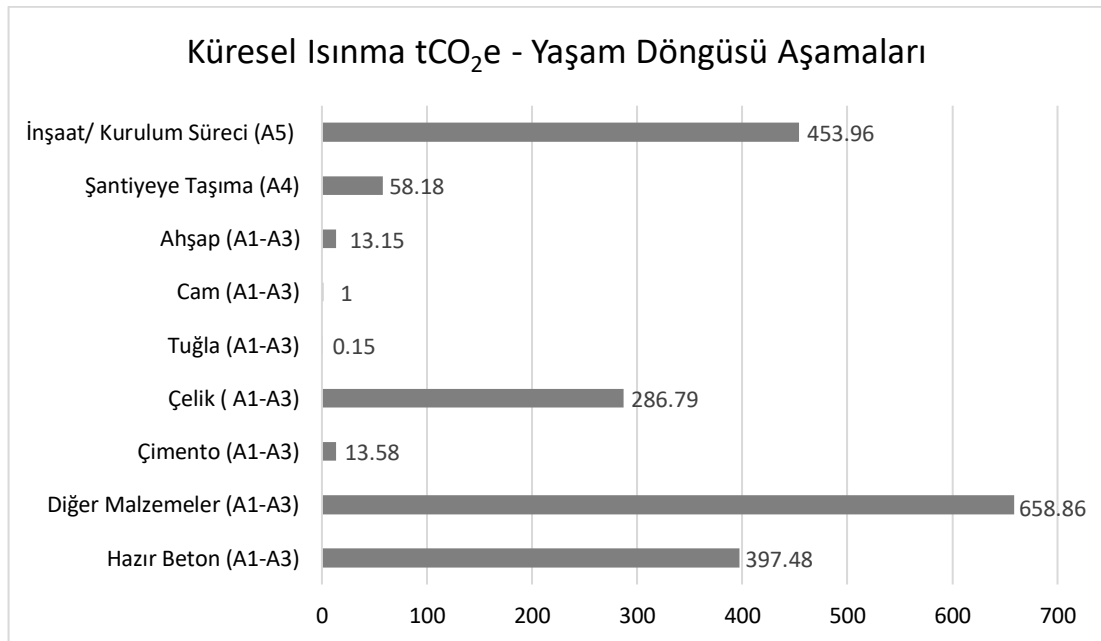
Tesisin kümülatif sera gazı emisyonları (doğrudan ve dolaylı emisyonların birleşimiyle) Tablo 4.8'de verildiği gibi 107 tCO<sub>2</sub>e olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.8. Seçilen bir atıksu arıtma tesisinin işletimi kaynaklı toplam karbon emisyonları.

Yıl	CH <sub>4</sub> (tCO <sub>2</sub> e)	N <sub>2</sub> O (tCO <sub>2</sub> e)	Elektrik kullanımı (tCO <sub>2</sub> e Mwh <sup>-1</sup> )	TOPLAM (tCO <sub>2</sub> e)
2020	91,05	0,344	15,20	107

#### 4.2. Seçilen Atıksu Arıtma Tesisinin Gömülü Karbon Emisyon Sonuçları

Bu çalışmada Yaşam Döngüsü Değerlendirme sisteminin sınırları üretim aşamasını (A1-A3), nakliye aşamasını (A4) ve inşaat kurulum aşamasını (A5) kapsayacak şekilde çizilmiştir. Beşikten kapıya (A1-A3) analiz, inşaat sahasına gönderilmek üzere hazırlanan bir malzeme veya ürünün etkilerini kapsar ve hammadde çıkarma, nakliye ve üretim emisyonları gibi faktörleri içerir. Open LCA modeli kullanılarak yapılan analizler sonucunda seçilen tesisin yaşam döngüsü aşamaları tCO<sub>2</sub>e cinsinden küresel ısınma potansiyeli Şekil 4.1.'de sunulmuş ve Tablo 4.9.'da özetlenmiştir.



Şekil 4.1. Küresel ısınma potansiyeli tCO<sub>2</sub>e yaşam döngüsü aşamaları

Tablo 4.9. Malzeme türüne göre gömülü karbon ve malzeme kullanımı.

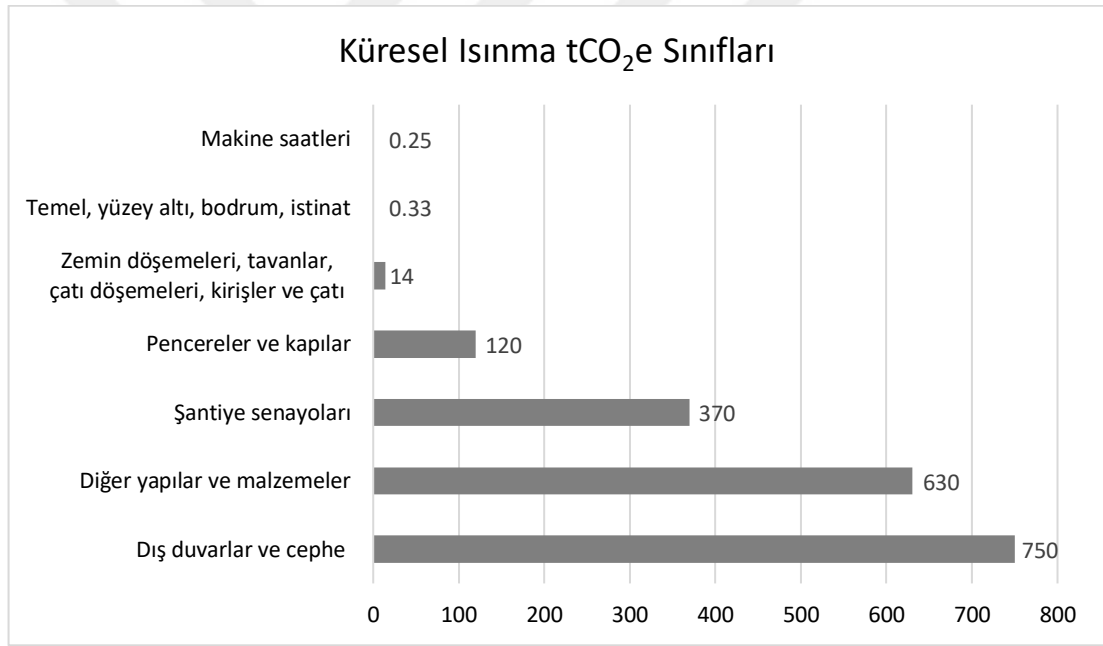
Sonuç kategorisi	Küresel ısınma(tCO <sub>2</sub> e)	Küresel ısınma (kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup> )	Yüzde (%)	Hammadde kütlesi (t)
Hazır beton (A1-A3)	397,48	39,75	21,11	4951,2
Çimento (A1-A3)	13,58	1,36	0,72	14
Çelik (A1-A3)	286,79	28,68	15,23	71,45
Tuğla(A1-A3)	0,15	0,01	0,01	0,63
Cam (A1-A3)	1	0,1	0,05	0,8
Ahşap (A1-A3)	13,15	1,31	0,7	27,92
Diğer malzemeler (A1-A3)	658,86	65,89	34,99	462,32
İnşaat malzemeleri (A1-A3)	1371,01	137,1	-	5528,32
Şantiyeye nakliye (A4)	58,18	5,82	3,09	-
İnşaat/kurulum süreci (A5)	453,96	45,4	24,11	241,14
Toplam (A1-A3) + A4+A5	1883	188	-	-

Sonuçların incelenmesi ile hazır beton ve çeliğin sırasıyla yaklaşık 397,48 ve 286,79 tCO<sub>2</sub>e ile en yüksek miktarda gömülü karbona katkıda bulunduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.1'de gösterildiği gibi, en yüksek gömülü karbon oranını inşaat malzemeleri aşaması (A1-A3) oluşturmakta (1371,01 tCO<sub>2</sub>e), bunu inşaat/kurulum aşaması A5 (453,96 tCO<sub>2</sub>e) ve şantiyeye nakliye aşaması A4 aşaması (58,18 tCO<sub>2</sub>e) takip etmektedir (Tablo 4.9).

Şekil 4.2 ve Tablo 4.10'da vaka çalışmamızın yapı bileşenlerinde gömülü karbonun oranını göstermektedir. Gömülü karbon emisyonlarına en büyük katkıyı sağlayan, toplam karbonun %39,83'ünü oluşturan ve 750 tCO<sub>2</sub>e yayan dış duvarlar ve cephedir. Diğer yapı malzemeleri gömülü emisyonlarda 630 tCO<sub>2</sub>e emisyonu yaymakta ve toplam karbonun %33,54 sını oluşturmaktadır. Atıksu arıtma tesisinde pencereler ve kapılar sınırlı sayıda olup 120 tCO<sub>2</sub>e emisyon yaymaktadır. Zemin döşemeleri, tavanlar, çatı döşemeleri, kirişler ve çatı ise 14 tCO<sub>2</sub>e emisyonuna sahiptir.

Tablo 4.10. Küresel ısınma tCO<sub>2</sub>e sınıfları.

Öge	Değer	Birim	Yüzde (%)
Dış duvarlar ve cephe	750	tCO <sub>2</sub> e	39,83
Diğer yapılar ve malzemeler	630	tCO <sub>2</sub> e	33,54
Şantiye senaryoları	370	tCO <sub>2</sub> e	19,64
Pencereler ve kapılar	120	tCO <sub>2</sub> e	6,23
Zemin döşemeleri, tavanlar, çatı döşemeleri, kirişler ve çatı	14	tCO <sub>2</sub> e	0,73
Temel, yüzey altı, bodrum ve istinat duvarları	0,33	tCO <sub>2</sub> e	0,02
Makine saatleri	0,25	tCO <sub>2</sub> e	0,01

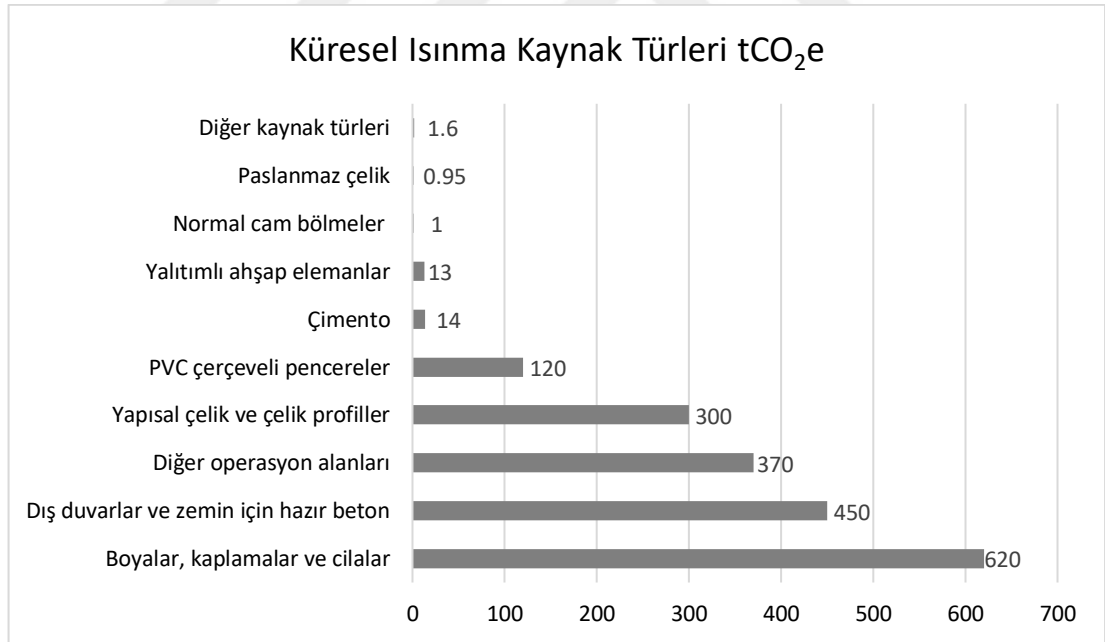


Şekil 4.2. Küresel ısınma potansiyeli tCO<sub>2</sub>e sınıflandırmalar

Yüksek gömülü karbon seviyelerinin nedenini belirlemek için bu bileşenler, hangi malzemelerin en fazla gömülü karbonu içerdiğini belirlemek üzere analiz edildi. Kaynak türleri için tCO<sub>2</sub>e cinsinden gömülü karbon ve küresel ısınma potansiyeline ilişkin bilgiler Şekil 4.3'te sunulmakta ve Tablo 4.11'de özetlenmektedir.

Tablo 4.11. Küresel ısınma tCO<sub>2</sub>e - kaynak türleri.

Öge	Değer	Birim	Yüzde (%)
Boyalar, kaplamalar ve cilalar	620	tCO <sub>2</sub> e	32,73
Dış duvarlar ve zeminler için hazır beton	450	tCO <sub>2</sub> e	24,08
Diğer site operasyonu	370	tCO <sub>2</sub> e	19,64
Yapısal çelik ve çelik profiller	300	tCO <sub>2</sub> e	15,74
PVC çerçeveli pencereler	120	tCO <sub>2</sub> e	6,16
Çimento	14	tCO <sub>2</sub> e	0,76
Yalıtımlı ahşap elemanlar	13	tCO <sub>2</sub> e	0,7
Normal cam bölmeler	1	tCO <sub>2</sub> e	0,05
Paslanmaz çelik	0,95	tCO <sub>2</sub> e	0,05
Diğer kaynak türleri	1,6	tCO <sub>2</sub> e	0,09



Şekil 4.3. Küresel ısınma potansiyeli tCO<sub>2</sub>e kaynak türleri

Kaynak türünün gömülü karbon emisyonlarına en büyük katkıyı toplam karbonun %32,73 sini oluşturan ve 620 tCO<sub>2</sub>e emisyon yayan boyalar, kaplamalar ve cilalar yapmaktadır. Bunu toplam karbonun %24,08'ini oluşturan ve 450 tCO<sub>2</sub>e emisyon

yayan dış duvarlar ve zeminler için hazır betonlar izlemektedir. Yine Şekil 4.3'den görüleceği üzere yapısal çelik ve çelik profiller 300 tCO<sub>2</sub>e emisyon yaymaktadır. PVC çerçeveli pencereler 120 tCO<sub>2</sub>e emisyon yaymakta ve toplam karbonun %6,6'sını oluşturmaktadır.

Seçilen ileri atıksu arıtma tesisinin inşaat malzeme üretim aşaması (A1-A3), en yüksek gömülü karbon oranını oluşturmakta olup (1371,01 tCO<sub>2</sub>e), bunu inşaat/kurulum aşaması A5 (453,96 tCO<sub>2</sub>e) ve tesise nakil A4 aşaması (58,18 tCO<sub>2</sub>e) takip etmektedir. Tesisin toplam gömülü karbon emisyonu 1883 tCO<sub>2</sub>e dir.



## BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Karbon ayakizi, atıksu arıtma tesislerinin iklim değışikliği üzerindeki çevresel etkisinin değlendirilmesini kolaylaştıran hayati bir sürdürülebilirlik göstergesi olarak hizmet vermektedir. Karbon ayakizi analizinin yaygın biçimde benimsenmesi, küresel karbon nörlüğü hedefleri doğrultusunda bu tesislerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının ele alınmasının aciliyetini vurgulamaktadır.

Atıksu arıtma tesislerinin iklim değışikliği üzerindeki etkisi değlendirilirken hem gömülü karbon hem de sera gazı emisyonları önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Her iki karbon emisyonu türü de atıksu arıtma tesislerinin genel karbon ayakizini etkiler. Gömülü karbonun inşaat ve kurulum aşamalarında belirgin bir etkisi olma eğilimindeyken, operasyonel karbonun etkisi tesisin operasyonel ömrü boyunca uzanmaktadır. Dolayısıyla her iki emisyon türü de iklim değışikliğini etkilemede önemli rol oynamaktadır.

İnşaat sektörü uzun süredir operasyonel karbon emisyonlarına odaklanmış durumdadır ve binaların geri kalan yaşam döngüsü aşamalarıyla ilgili emisyonlara çok daha az önem verilmektedir. Küresel ısınmayı azaltacak bilinçli kararlar almak için mühendislerin, mimarların ve geliştiricilerin tüm yaşam boyu karbon emisyonlarını benimsemeleri gerekmektedir. Bu terim, bir binanın imalatı, nakliyesi, inşaatı, işletimi, onarımı ve bakımından binanın yapısının bozulmasına ve atıkların işlenmesine kadar hem operasyonel hem de gömülü karbon emisyonlarını ifade eder. Bütün bunlar yaşam döngüsü değlendirmeleri aracılığıyla ölçülebilir.

Çevresel ürün beyanları (EPD'ler), bir ürünün yaşam döngüsü aşamaları boyunca gömülü karbon ve diğer çevresel etkileri ifade etmenin standartlaştırılmış bir yoludur. Bununla birlikte, çok az sayıda MEP (mekanik, elektrik ve halk sağlığı) ürünü

üreticisi, temel olarak MEP ürünlerinin ve tedarik zincirlerinin karmaşıklığı nedeniyle ve aynı zamanda piyasadan ve mevzuattan gelen teşviklerin eksik olması nedeniyle çevresel ürün beyanları sunmaktadır. Bu nedenle, inşaat hizmetleri sektöründe MEP ürünlerinin içerdiği karbon miktarı ve bunun farklı sistem ve ürünler arasında nasıl değiştiği hakkında kapsamlı bilgi eksikliği bulunmaktadır.

Operasyonel emisyonlar ve yeniden kullanım, geri kazanım veya geri dönüşümden kaynaklanan faydalar veya yükler dışındaki tüm yaşam döngüsüyle ilişkili, küresel ısınmadan sorumlu atmosfere salınan sera gazı emisyonlarını ifade eder. Yaşam döngüsüne ilişkin BS EN 15978:2011 yaklaşımını takiben, gömülü karbon, A1–A3 (ürün), A4–A5 (inşaat), B1–B5 (kullanımda) ve C1–C4 (kullanım sonu) ile ilgili sera gazı emisyonları olarak tanımlanır.

Binanın operasyonel ömrü boyunca binanın enerji (B6) ve su (B7) kullanımının bir sonucu olarak yayılan sera gazlarıdır. Tipik olarak ısıtma, sıcak su, soğutma, havalandırma ve aydınlatma sistemlerinin yanı sıra pişirme, ekipman ve asansörlerde kullanılan enerjiyle ilgili emisyonları da içerir. Ayrıca içme suyu temini ve atıksu arıtımı gibi su kullanımıyla ilişkili emisyonları da içerir.

Tüm yaşam karbonu, gömülü karbonu, operasyonel karbonun yanı sıra yapı malzemelerinin bina ömründen (D) sonra yeniden kullanılması, geri kazanılması veya geri dönüştürülmesiyle ilişkili karbon faydalarını veya yüklerini içerir. Tüm yaşam karbonu kavramını kullanmanın amacı, tüm ömrü boyunca en düşük karbon emisyonunu üreten bir binaya veya ürüne doğru ilerlemektir. Aynı zamanda 'beşikten beşiğe' olarak da bilinir.

Mevcut tez çalışması, ileri aktif çamur proses teknolojisine dayalı bir atıksu arıtma tesisinin işletilmesiyle (hem elektrik kullanımından hem de genel tesis faaliyetlerinden kaynaklanan emisyonları) bağlantılı sera gazı emisyonlarını ve atıksu arıtma tesisinin inşaatı ve devam eden operasyonları için kullanılan malzemelerin içerdiği gömülü karbon emisyonu incelemektedir. Seçilen atıksu arıtma

tesisinin faaliyetlerinden kaynaklanan doğrudan ve dolaylı sera gazı emisyonları hesabı için Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli tarafından belirlenen metodoloji kullanılmıştır. Ek olarak, atıksu arıtma tesisinin inşaatı ve devam eden operasyonları için kullanılan malzemelerin içerdiği gömülü karbon emisyonu doğruluk ve uygunluk sağlamak amacıyla ülkeye özgü verilerden yararlanılarak yaşam döngüsü değerlendirmesi modeli kullanılarak hesaplanmıştır.

Bu tez çalışmasının birinci kısmı, ileri atıksu arıtma tesisinin faaliyetlerinden kaynaklı sera gazı emisyonlarına ilişkin veriler sunmaktadır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin öngördüğü yöntemler ile hesaplamalar yapılmıştır. Çalışmanın ikinci kısmını oluşturan atıksu arıtma tesisinin gömülü karbon miktarı ise yaşam döngüsü analizi kullanılarak hesaplanmıştır.

Karakaş (2021) Erzurum ilinde ileri biyolojik atıksu arıtması bulunan bir tesisin karbon emisyon değerinin hesaplanması için tesise ait 2018 ve 2019 yıl envanter verilerini kullanılmış olup buna göre; 2018 yılı için doğrudan emisyon miktarı 11949 ton CO<sub>2</sub>-e, dolaylı emisyon miktarı ise 5287 ton CO<sub>2</sub>-e; 2019 yılı için doğrudan emisyon miktarı 55723 ton CO<sub>2</sub>-e ve dolaylı emisyon miktarı 3906 ton CO<sub>2</sub>-e olarak hesaplanmıştır. Araştırmamıza konu olan tesis orta ölçekli biyolojik azot arıtımı yapan tesistir. CH<sub>4</sub> emisyonları anaerobik tanklarda meydana gelen metanojenik aktiviteden kaynaklanmakta, nitrifikasyon ve nitrifikasyon bakterileri ise tanklardaki denitrifikasyon-nitrifikasyon prosesi sırasında N<sub>2</sub>O emisyonları üretmektedir. Tesis, 91,05 tCO<sub>2</sub>e CH<sub>4</sub> gazı ve 0,344 tCO<sub>2</sub>e N<sub>2</sub>O gazı emisyonuna sahiptir. Emisyon hesapları atıksu arıtma tesislerinin sadece proses tipine göre değişmemekte tesise giren suyun karakteri, debisi ve hizmet ettiği nüfus gibi özellikleri ile doğrudan ilişkili olduğundan tam bir karşılaştırma yapmak mümkün olmamaktadır.

2019 yılında Maktabifard ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada kuzey Polonya'da bulunan 2 adet atıksu arıtma tesisinde karbon ayakizi değerlendirilmesi yapılmıştır. Çalışma yapılan tesisler orta ölçekli biyolojik azot arıtımı yapan tesislerdir. Ayrıca iki tesiste de biyogaz dönüşümü olmayıp tüm enerji şehir

şebekesinden temin edilmektedir. Söz konusu araştırmada atıksu arıtma tesislerinde elektrik kullanımından kaynaklanan karbon emisyon miktarı toplam emisyon miktarının %38-%50'si olarak hesaplanmıştır. Araştırmamıza konu olan tesis de orta ölçekli biyolojik azot arıtımı yapan tesistir ve dolaylı sera gazı emisyonları ağırlıklı olarak elektrik kullanımından kaynaklanmaktadır ve 15,20 tCO<sub>2</sub>e'dir. Tesisin kümülatif sera gazı emisyonları (doğrudan ve dolaylı emisyonların birleşimiyle) 107 tCO<sub>2</sub>e dir ve tesisin elektrik tüketimi kaynaklı karbon emisyonu toplam emisyonun %14,2'sidir.

Tez çalışması kapsamında incelenen ileri atıksu arıtma tesisinin yapısının incelenmesi sonucunda hazır beton ve çelik sırasıyla yaklaşık 397,48 ve 286,79 tonCO<sub>2</sub>e ile en yüksek miktarda gömülü karbona katkıda bulunmaktadır. Gömülü karbon emisyonlarına en büyük katkıyı sağlayan, dış duvarlar ve cepher ve bu da atıksu arıtma tesisinin toplam karbon emisyonlarının %39,83'ünü oluşturmakta ve 750 tCO<sub>2</sub>e emisyon yaymaktadır. Kaynak türünün gömülü karbon emisyonlarına etkisi araştırıldığında ise en büyük katkıyı %32,73 ve 620 tCO<sub>2</sub>e emisyon ile boyaların kaplamaların ve cilaların verdiği ve bunu %24,08 ve 450 tCO<sub>2</sub>e ile dış duvarlar ve zeminler için hazır betonun yaydığı emisyon takip etmektedir. İnşaat malzeme üretim aşaması (A1-A3), en yüksek gömülü karbon oranını oluşturmakta olup (1371,01 tCO<sub>2</sub>e), bunu inşaat/kurulum aşaması A5 (453,96 tCO<sub>2</sub>e) ve tesise nakil A4 aşaması (58,18 tCO<sub>2</sub>e) takip etmektedir. Tesisin toplam gömülü karbon emisyonu 1883 tCO<sub>2</sub>e dir.

Binalardaki karbondioksit miktarının azaltılması, ulusal ve küresel karbon azaltma hedeflerine ulaşmak için çok önemlidir. Keyhani ve arkadaşları (2023) tarafından yapılan bir araştırma, 'düşük karbonlu malzemeler' stratejisi kullanmanın toplam gömülü karbon üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bunun için çevresel ürün beyanları, ICE veri tabanı ve RICS kılavuzuyla birlikte YDA metodolojisini kullanılmıştır. Çevresel ürün beyanları her zaman ilk tercih olmakla birlikte mevcut olmadıklarında ICE veritabanı ve RICS kılavuzu kullanılmaktadır. Binaların gömülü karbonunu azaltmak için çeşitli stratejiler mevcuttur ve bu çalışma, düşük karbonlu malzeme stratejisinin binanın toplam gömülü karbonu üzerindeki etkisini

araştırmıştır. Sonuçlar, gömülü karbon emisyonlarına en büyük katkıyı sağlayanların, toplam emisyonların sırasıyla %35 ve %30'unu oluşturan duvarlar ve zeminler olduğunu ortaya çıkarmıştır. Duvarlarda ve zeminlerde gömülü karbonun yüksek değeri metal ve beton malzemelerin kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Bizim çalışmamıza paralel olarak bina malzemelerinin yaşam döngüleri boyunca gömülü karbon değerlendirmesi, Ürün Aşamasının (A1-A3) binanın ömrünün diğer aşamalarına kıyasla gömülü karbona en büyük katkıyı sağladığını ve toplam emisyonların %80'inden fazlasını ürettiğini göstermiştir. Binanın gömülü karbonunu azaltmak için işlenmemiş metallerin yerine geri dönüştürülmüş metaller kullanılması durumunda gömülü karbon %47 oranında azalmıştır. Ayrıca, çimentonun uçucu kül ve öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu ile kısmen değiştirilmesine yönelik çeşitli senaryolar ile %50 çimento ve %50 öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu kombinasyonunun, gömülü karbonu %43 oranında azaltma konusunda en büyük potansiyele sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Küresel karbon nötrlüğü bağlamında acil bir endişe kaynağıdır. Sera gazı emisyonlarını hedefleyen azaltma stratejileri, havalandırma yoğunluğu, çözünmüş oksijen (DO) konsantrasyonu, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ)/nitrojen oranı (KOİ/N), çamur tutma süresi (SRT), sıcaklık ve pH gibi operasyonel parametrelerin düzenlenmesi ve kontrol edilmesine odaklanır. Ek olarak, N<sub>2</sub>O güçlü bir sera gazı olduğundan, atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan nitroz oksit (N<sub>2</sub>O) emisyonlarının azaltılması, karbon ayakizinin azaltılması açısından çok önemlidir.

Etkili N<sub>2</sub>O azaltım stratejileri sahaya özgü izlemeyi, üretim yollarının belirlenmesini, operasyonel parametrelerin düzenlenmesini, modellerin pilot ölçekte doğrulanmasını ve sonuçların sahada doğrulanmasını içerir. Özellikle, N<sub>2</sub>O üretimindeki %1'lik mütevazı bir azalma bile, atıksu arıtma süreçlerinin karbon ayakizinde %30'luk önemli bir azalma sağlayabilir. Çalışmalar, A/O (anaerobik/oksik), A<sub>2</sub>O (anaerobik-anoksik-oksik) ve SBR (sıralı kesikli reaktör) gibi prosesleri kullanan bazı atıksu arıtma tesislerinde N<sub>2</sub>O emisyonlarının toplam karbon ayakizinin yarısını aşabileceğini göstermiştir. Bu nedenle N<sub>2</sub>O emisyonlarının ele alınması, atıksu

arıtma süreçlerinin karbon ayakizinde önemli azalmalar elde etmek için kritik öneme sahiptir.

Operasyonel karbon aşağıdaki tekniklerle azaltılabilir;

1. Enerji Verimliliği: Yenilikçi teknolojiler ve uygulamalarla tesislerdeki ekipman ve süreçlerin enerji verimliliğinin artırılması, elektrik ve ısı tüketimini azaltarak operasyonel karbon emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olabilir.
2. Yenilenebilir Enerji Kullanımı: Tesislerin enerji ihtiyacını karşılamak için güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi veya biyogaz gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması operasyonel karbon emisyonlarını azaltabilir.
3. Proses Optimizasyonu: Verimliliği artırmak için arıtma proseslerinin optimize edilmesi, operasyonel karbon emisyonlarının azaltılmasına yol açabilir. Bu, atıksu arıtımında daha az enerji ve kimyasal kullanılmalarını içerebilir.

Öte yandan, gömülü karbon aşağıdaki tekniklerle azaltılabilir;

1. Sürdürülebilir Malzeme Kullanımı: Arıtma tesislerinin inşaatı ve genişletilmesi sırasında sürdürülebilir malzemelerin tercih edilmesi, yerleşik karbon emisyonlarını azaltabilir. Bunlar düşük karbonlu betonu, geri dönüştürülmüş malzemeleri veya yerel kaynaklı malzemeleri içerebilir.
2. Nötr Karbon Yöntemleri: İnşaat ve işletme süreçleri sırasında oluşan karbon emisyonlarını dengelemek veya absorbe etmek için karbon nötr veya karbon negatif teknolojilerin kullanılması, yerleşik karbonun azaltılmasına yardımcı olabilir. Örneğin, ağaç dikme programları veya karbon emisyonlarını azaltan biyolojik süreçlerin teşvik edilmesi.
3. Atık Yönetimi ve Geri Dönüşüm: İnşaat ve işletme sırasında oluşan atıkların azaltılması, geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanılması, gömülü karbon emisyonlarını azaltabilir. Bu, atık yönetimi planlarının geliştirilmesi ve atıkların azaltılmasına yönelik en iyi uygulamaların benimsenmesi yoluyla başarılabılır.

Portekiz'deki bir atıksu arıtma tesisinde aktif çamur prosesinin havalandırma periyotlarına bağlı enerji tüketimi üzerine deneysel bir çalışma yapılmıştır. Deneysel süreç boyunca, atıksu kalite standartlarını korumak için biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ), kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), toplam nitrojen (TN) ve toplam fosfor (TP) verileri izlenmiştir. Denitrifikasyon ve nitrifikasyon için havalandırma periyotları hem havalandırılmalı hem de havalandırmasız olarak optimize edilmiştir. Havalandırma kontrol sistemi, aynı standart optimizasyon verileriyle önceki yıllara kıyasla spesifik enerji tüketiminde %13'lük bir azalma ve 1,2 ton CO<sub>2</sub> emisyonunda azalma göstermiştir (Silva ve ark., 2021).

Araştırma, atıksuyun yeniden kullanımının hem gömülü enerji hem de sera gazı (GHG) emisyonlarını etkili bir şekilde dengeleyebileceğini öne sürmektedir. Arıtma tesislerinde sürdürülebilirliğin sağlanması, büyük ölçüde, yerinde çalışma koşullarına göre parametreleri optimize edebilen vasıflı personel gerektiren verimli kaynak geri kazanım işlemlerine bağlıdır. Arıtma tesislerinin işletilmesi büyük ölçüde bu insan kaynaklarına bağlı olduğundan, atıksu altyapısının kurulması yetkin teknisyen ve işçilere ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle, personeli biyolojik süreçlere ilişkin kapsamlı bir anlayışla donatmak ve arıtma tesislerini ve kaynak geri kazanım tesislerini etkili bir şekilde işletmek için sezgisel yeteneklerini geliştirmek için yeterli eğitim programlarının sağlanması çok önemlidir (Silva ve ark., 2021).

Wu ve arkadaşları (2022) tarafından yapılan bir başka kapsamlı araştırma çeşitli atıksu arıtma tesisi konfigürasyonlarının çok farklı karbon ayakizlerine sahip olabileceğini ve bazı süreçlerin AAT'lerin karbon ayakizini azaltmak için diğerlerinden daha uygun olduğunu göstermiştir. Söz konusu çalışma AAT'nin karbon ayakizinin, en yüksek sera gazı emisyonlarının, en düşük sera gazı emisyonlarına göre yaklaşık 4 kat daha yüksek olduğu, arıtma konfigürasyonlarına büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermiştir.

Kapsam 2 ve 3 emisyonlarının uygun proseslerin seçilmesiyle azaltılabileceğini gösteren bu çalışma spesifik olarak, anaerobik atıksu arıtma teknolojilerinin

uygulanması, çözülmüş CH<sub>4</sub> sıyırma nedeniyle artan Kapsam 1 emisyonlarına rağmen, yüksek enerji verimliliği ve enerji geri kazanımı (kapsam 2 emisyon dengelemesi) nedeniyle toplam AAT karbon ayakizini önemli ölçüde azaltabileceğini göstermiştir. Anaerobik çürütme yoluyla çamur stabilizasyonu aynı zamanda kapsam 2 ve 3 emisyonlarını da azaltabilirken, aerobik çamur çürütme genel karbon ayakizini artırabilir. Karbon ayakizleri AAT'lerin arıtma konfigürasyonlarına büyük ölçüde bağlıdır. Farklı senaryoların toplam sera gazı emisyonları, 411 ile 1775 kg CO<sub>2</sub>e/mL-atıksu/gün arasında büyük farklılıklar göstermiştir. İlk üç yüksek emisyon (1649–1775 kg CO<sub>2</sub>e/mL-atıksu/gün) konfigürasyonunda aerobik nütrient giderimi, aerobik çürütme ve uzun süreli çamur kurutma kombinasyonu hakimdir. En düşük 3 sera gazı emisyon konfigürasyonu, anaerobik atıksu arıtma (yukarı akışlı anaerobik çamur yatağı, anaerobik çürütme ve çamur kurutma ve kısa süreli depolama) kullanan kombinasyonlardır ve toplam sera gazı emisyonları 411–520 kg CO<sub>2</sub>e/mL-atıksu/gün dür. Genel karbon ayakizindeki büyük değişiklik, bir AAT'nin tasarım aşamasında veya tesisin iyileştirilmesi sırasında farklı konfigürasyonlar veya süreçler seçerek karbon ayakizini azaltma fırsatlarının bulunduğunu göstermektedir. Biyolojik nitrojen giderme işlemi kaçınılmaz olarak N<sub>2</sub>O emisyonlarına yol açmakta ve konfigürasyon seçimiyle önemli ölçüde azaltım sağlanamamaktadır. Doğrudan N<sub>2</sub>O emisyonları muhtemelen atıksu arıtma tesislerinin karbon nötrlüğüne ulaşmasında gelecekte karşılaşılabilecek zorluk olacaktır.

Bu tez çalışmasının atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan gömülü karbon emisyonlarının iklim değişikliği üzerindeki etkilerine ilişkin bilgi boşluğunu doldurarak mevcut literatüre önemli bir katkıda bulunacağı düşünülmektedir. Atıksu arıtma tesislerinin operasyonel faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonları yabancı ve yerli akademisyenler tarafından yaygın bir şekilde çalışılmakla birlikte atıksu arıtma tesislerinin gömülü karbon emisyonları üzerine literatürde bir çalışmaya ulaşılamamıştır. Bu bağlamda bu tez çalışması özgün değere sahip olup literatüre katkı sağlayacaktır.

## KAYNAKLAR

- Atlı, E., Dilsizoğlu, N., Akarsu, C., Hancı, T., Başa, Ş. 2023. Yeşil Mutabakat Çerçevesinde Atıksu Yönetimi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6(Ek Sayı): 606-623.
- Avrupa Komisyonu, 2024. Methane emissions. [https://energy.ec.europa.eu/topics/oil-gas-and-coal/methane-emissions\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/oil-gas-and-coal/methane-emissions_en) (Erişim Tarihi: Nisan, 2024).
- Azkur, H.S., Canan, F. 2022. Farklı Taşıyıcı Sistemlerin Gömülü Enerji ve Gömülü Karbon Değerlerinin Müstakil Konutlar Bağlamında Karşılaştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 26(1): 35-46.
- Barın, B. 2019. Evsel Atıksu Arıtma Tesisinin Sera Gazı Salımı ve İklim Değişikliğine Etkisi: Muğla Ortaca Örneği. Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Bilimleri ABD, Yüksek Lisans Tezi.
- BS EN ISO, 2020. Çevre yönetimi -Yaşam döngüsü değerlendirmesi -İlkeler ve çerçeve. İngiliz Standartları Enstitüsü. 14040:2006+A1:2020
- Büyükşehir Belediyesi, 2015. Su ve Kanal İdaresi Genel Müdürlüğü Atıksu Arıtma Tesisi Kesin Proje Raporu Piramit Müt. ve Müh. A.Ş, Türkiye .
- Chai, C., Zhang, D., Yu, Y., Feng, Y., Wong, M.S. 2015. Carbon Footprint Analyses of Mainstream Wastewater Treatment Technologies under Different Sludge Treatment Scenarios in China. Water, 7(3): 918-938.
- Chen, W., Yang, S., Zhang, X., Jordan, ND, Huang, J. 2022. Embodied energy and carbon emissions of building materials in China. Building and Environment; 207, 108434.
- Chetty, S., Pillay, K. 2014. Application of the DIY Carbon Footprint Calculator to A Wastewater Treatment Works. Water SA, 41(2): 263-272.
- CLF (Carbon Leadership Forum), 2020. Embodied Carbon 101. <https://carbonleadershipforum.org/embodied-carbon-101/> (Erişim Tarihi: Nisan, 2024).
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2024. <https://www.mgm.gov.tr/genel/ozonveuv.aspx?s=5> (Erişim Tarihi: Nisan, 2024).
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024. Montreal Protokolü. <https://iklim.gov.tr/montreal-protokolu-i-38> (Erişim Tarihi: Nisan, 2024).
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2024. Paris Anlaşması. <https://iklim.gov.tr/paris-anlasmasi-i-34> (Erişim Tarihi: Nisan, 2024).
- Dışişleri Bakanlığı, 2024. Viyana Sözleşmesi ve Montreal Protokolü. <https://www.mfa.gov.tr/viyana-sozlesmesi-ve-montreal-protokolu.tr.mfa> (Erişim Tarihi: Nisan, 2024).

- Dixit, M.K. 2017. Embodied energy analysis of building materials: An improved IO-based hybrid method using sectoral disaggregation. *Energy*, 124: 46–58.
- Easterbrook, D.J. 2016. Chapter 9-Greenhouse Gases. *İçinde: Evidence-Based Climate Science Data Opposing CO<sub>2</sub> Emissions as the Primary Source of Global Warming*. 2. Baskı. 163-173.
- Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. 2006. IPCC The National Greenhouse Gas Inventories Programme, The Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Eijo-Río, E., Petit-Boix, A., Villalba, G., Suárez-Ojeda, M.E., Marin, D., Amores, M.J., Aldea, X., Rieradevall, J., Gabarrell, X. 2015. Municipal sewer networks as sources of nitrous oxide, methane and hydrogen sulphide emissions: A review and case studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(3): 2084-2094.
- EPA, 2024. Overview of Greenhouse Gases. <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases> (Erişim Tarihi: Nisan, 2024).
- Erdoğan, M. 2015. Çevresel Tesislerden Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonunun Hesaplanması, İstanbul Teknik Üniversitesi; Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği ABD, Yüksek Lisans Tezi.
- Ersoy, A.E. 2017. Türkiye'nin hayvansal gübre kaynaklı sera gazı emisyonları durumu ve biyogaz enerjisi potansiyeli. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği ABD, Yüksek Lisans Tezi.
- Esau, R., Jungclaus, M., Olgyay, V., Rempfer, A. 2021. Reducing Embodied Carbon in Buildings, Rocky Mountain Institute.
- Gallego-Schmid, A., Tarpani, R.R.Z. 2019. Life cycle assessment of wastewater treatment in developing countries: A review. *Water Research*, 153: 63–79.
- Gibbons, O.P., Orr, J.J., Archer-Jones, C., Arnold, W., Green, D. 2022. How to Calculate Embodied Carbon. Londra, Birleşik Krallık: Yapı Mühendisleri Enstitüsü. 2. Baskı.
- Gillingham, K., Stock, J. H. 2018. The cost of reducing greenhouse gas emissions. *Journal Of Economic Perspectives*, 32(4): 53-72
- Gülhan, H. 2017. Evsel Atıksu Arıtma Tesislerinden Kaynaklanan Sera Gazı Salımının Tahmini, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği ABD, Yüksek Lisans Tezi.
- Gülhan, H., Özgün, H., Erşahin, M.E., Dereli, R. K., vd. 2018. İstanbul'daki Biyolojik Atıksu Arıtma Tesislerinin Sera Gazı Emisyonunun Modelleme Metodu ile Tahmini. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(1): 59-67.
- Güller, S. 2018 Muğla Evsel Atıksu Arıtma Tesisi Karbon Ayakizi Değerlendirmesi, Muğla Sıtkı Kocaman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Bilimleri ABD, Yüksek Lisans Tezi.
- Harnot, L., George, C.B. 2021. TM65 Embodied carbon in building services: A calculation methodology. London: The Chartered Institution of Building Services

- Engineers. Available at: <https://www.cibse.org/knowledge-research/knowledge-portal/embodied-carbon-in-building-services-a-calculation-methodology-tm65> (Erişim Tarihi: Mayıs 2024).
- Held, İ.M., Soden, B.J. 2000. Water Vapor Feedback and Global Warming. Annual Review of Environment and Resources, 25: 441-475.
- Hellweg, S., Milà i Canals, L. 2014. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. Science, 344: 1109-1113.
- Herrmann, I.T., Moltesen, A. 2015. Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? – a comparative assessment of SimaPro and GaBi. Journal of Cleaner Production, 86: 163-169.
- Hong Y., Xinyu G., Jingbo G., Hui W., Liang Z., Liru F., Fangxu J., Jianhua G., Yongzhen P. 2022. Contribution of nitrous oxide to the carbon footprint of full-scale wastewater treatment plants and mitigation strategies- a critical review. Environmental Pollution, 314: 120295.
- IPCC, 2006. Ulusal sera gazı envanterleri için kılavuzlar. İçinde: Eggleston, HS, Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (Eds.), Ulusal Sera Gazı Envanterleri Programı, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli.
- IPCC, 2014. İklim Değişikliğinin Azaltılması. Cambridge University Press, New York.
- IPCC, 2018. IPCC Special Report on Global Warming of 1,5°C. <https://www.ipcc.ch/sr15/> (Erişim Tarihi: Nisan, 2024).
- IPCC, 2024. About the IPCC. <https://www.ipcc.ch/about/> (Erişim Tarihi: Nisan, 2024).
- IPCC. 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <https://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/> Erişim Tarihi: (Nisan,2024).
- IPCC: TCW., Pachauri, RK, Meyer, L. (Ed.) 2014. AR5 Sentez Raporu: İklim Değişikliği 2014. IPCC, Kopenhag, Danimarka.
- 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: Nisan, 2024).
- Jeong, H., Minne, E., Crittenden, J.C. 2015. Life cycle assessment of the City of Atlanta, Georgia's centralized water system. The International Journal of Life Cycle Assessment, 20(6): 880–891.
- Kalemba, K. 2020. Circular Economy in Wastewater Treatment Plant. Architecture, Civil Engineering, Environment, 13(4): 93-97.
- Karakaş, A. 2021. İklim Değişikliğinde Atıksu Arıtma Tesislerinin Etkisi: İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisinde Karbon Ayakizi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği ABD, Yüksek Lisans Tezi.
- Keyhani, M., Bahadori-Jahromi, A., Mylona, A., Janbey, A., Godfrey, P. B. & Taşeli, B. 2023. Measuring and mitigating embodied carbon in educational buildings: A case study in the UK. Engineering Future Sustainability, 1(2).

- Koç, İ., Duru, M.O., Dinçer, S.G. 2022. Yapılarda Gömülü ve Kullanım Enerjisi Kavramlarının Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) Metodolojisiyle İrdelenmesi. Bab Journal of FSMVU Faculty of Architecture and Design, 3(1): 55-69.
- Koyuncu, İ., Öztürk, İ., Aydın, A., Alp, K., Arıkan, O., İnel, G., Altınbaş, M., Özüdoğru, A. 2013. Atıksu Arıtma Tesisleri Tasarım Rehberi.
- Kumar, A. 2018. Global Warming, Climate Change and Greenhouse Gas Mitigation. İçinde: Biofuels: Greenhouse Gas Mitigation and Global Warming. Springer: 1–16.
- Kumar, A., Thanki, A., Padhiyar, H., Singh N.K., Pandey, S., Yadav, M., Yu, Z.G. 2021. Greenhouse Gases Emission Control in WWTS Via Potential Operational Strategies: A Critical Review. Chemosphere, 273: 129694.
- Li, L., 2021. Integrating climate change impact in new building design process: A review of building life cycle carbon emission assessment methodologies. Cleaner Engineering and Technology, 5: 100286.
- Li, Y., Luo, X., Huang, X., Wang, D., Zhang, W. 2013. Life Cycle Assessment of a municipal wastewater treatment plant: a case study in Suzhou, China. Journal of Cleaner Production, 57: 221–227.
- Lin, L. 2020. Carbon Emission Assessment of Wastewater Treatment Plant Based On Accounting Perspective. E3S Web of Conferences, 194: 5.
- Maktabifard, M., Zaborowska, E., Makinia, J. 2019. 1. Evaluating the effect of different operational strategies on the carbon footprint of wastewater treatment plants – case studies from northern Poland. Water Science Technology, 79 (11): 2211–2220.
- Mamais, D., Noutsopoulos, A., Dimopoulou, A., Stasinakis, A., Lekkas, T.D. 2015. Wastewater Treatment Process Impact On Energy Savings And Greenhouse Gas Emissions. Water Science Technology, 71 (2): 303–308.
- Myhre G., Shindell D., Bréon F.M., Collins W., Fuglestvedt J., Huang J., Koch D., Lamarque J.F., Lee D., Mendoza B., Nakajima T., Robock A., Stephens G., Takemura T., Zhang H. 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Niu, K., Wu, J., Qi, L., Niu, Q. 2019. Energy intensity of wastewater treatment plants and influencing factors in China. Science of The Total Environment, 670: 961–970.
- Ozon Tabakasını İncelten Maddelerin Azaltılmasına İlişkin Yönetmelik, 2017. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2017/04/20170407-2.htm> (Erişim Tarihi: Nisan, 2024).
- Özçağ, M., Yılmaz, B., Sofuoğlu, E. 2017. Türkiye’de sanayi ve tarım sektörlerinde seragazı emisyonlarının belirleyicileri: indeks ayrıştırma analizi. Uluslararası İlişkiler Dergisi, 14(54): 175-195.
- Özışık, F. 2020. Türkiye’de Bir Kamu Politikası Olarak İklim Değişikliği: Tarihsel Gelişim, Uluslararası Müzakereler, Yapısal ve İdari Sorunlar Çerçevesinde Bir Değerlendirme. Marmara Üniversitesi Siyasal Bilimler Dergisi, 8(1): 66-96.

- Özmen, T. 2009. Sera Gazı, Küresel Isınma ve Kyoto Protokolü. THM-453/1: 42-46.
- Öztürk, İ. 2017. Atıksu Mühendisliği. Teknik Kitaplar Serisi İski: 89-99.
- Öztürk, M. 2018, Atıksuların Havasız Şartlarda Arıtımı Esasları, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- Öztürk, M., Öztürk, A. 2019. BMİDÇS'den Paris Anlaşması'na: Birleşmiş Milletler'in İklim Değişikliğiyle Mücadele Çabaları. Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 12(4): 527-541.
- Pai, V., Elzarka, H. 2021. Whole building life cycle assessment for buildings: A case study ON HOW to achieve the LEED credit. Journal of Cleaner Production, 297:126501.
- Presura, E., Robescu, L.D. 2017. Energy Use And Carbon Footprint For Potable Water And Wastewater Treatment. Proceedings of the International Conference on Business Excellence, 17: 191-198.
- Ravishankara, A.R., Daniel, J.S. ve Portmann, R.W. 2009. Nitrous Oxide (N<sub>2</sub>O): The Dominant Ozone-Depleting Substance Emitted in the 21st Century. Science, 326: 123-125.
- RICS, (2017) Royal Institution of Chartered Surveyors, Whole life carbon assessment for the built environment, 1st edition. [www.rics.org/guidanceISBN978178321208](http://www.rics.org/guidanceISBN978178321208) (Erişim Tarihi: Mayıs, 2024).
- Sadioğlu, U., Ağıralan, E. 2020. İklim Değişikliği Çerçevesinde 25. Taraflar Konferansı (COP25). Kafkas Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 11(Ek Sayı-1): 361-385.
- Samsunlu, A. 2011. Çevre Mühendisliği Kimyası, 7. Baskı, Birsen Yayınları, İstanbul 402s.
- Silva, M.M., Cristovão, L., Marinho, D., Esteves, E., Fraqueza, G., Martins, A. 2021. Reduction of Carbon Emissions in a Mediterranean Urban Wastewater Treatment Plant. Water and Society VI, 251: 87-94.
- Singh, P., Kansal, A., Carliell-Marquet, C. 2016. Energy and carbon footprints of sewage treatment methods. Journal of Environmental Management, 165: 22-30.
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., Smith, J. 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. philosophical transactions of the royal society. Biological Sciences, 363(1492): 789-813
- Sönmez, A., 2011. Farklı Azot Yüklemelerinin Anammox Reaktör Başlangıcı Üzerine Etkileri. Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- Speck, R., Selke, S., Auras, R., Fitzsimmons, J. 2016. Life Cycle Assessment Software: Selection Can Impact Results. Journal of Industrial Ecology, 20(1): 18-28.

- Szatyłowicz, E., Skoczko, I., Puzowski, P. 2021. Proceeding Paper Method of Estimating the Carbon Footprint of Wastewater Treatment Plants. *Environmental Sciences Proceedings*, 9: 103390.
- Taşeli B.K. 2020. Atıksu arıtma tesislerinin sürdürülebilirlik değerlendirmesi. *Su Kimyası*. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.88338> (Erişim Tarihi: Mayıs, 2024).
- Teng, Y., Li, K., Pan, W. Ng, T. 2018. Reducing building life cycle carbon emissions through prefabrication: Evidence from and gaps in empirical studies. *Building and Environment*, 132: 125-136.
- Ticaret Bakanlığı Yeşil Mutabakat Eylem Planı, 2021. <https://ticaret.gov.tr/> (Erişim Tarihi: Nisan, 2024).
- Ticaret Bakanlığı, 2023. Yeşil Mutabakat. <https://ticaret.gov.tr/dis-iliskiler/yesil-mutabakat> (Erişim Tarihi: Nisan, 2024).
- Türkmenler, H. 2017. Atık Su Arıtma Tesislerinde Enerji Verimliliği. *Politeknik Dergisi*, 20(2): 495-502.
- UKGBC, 2020 LCA Planetary, UKGBC-UK Green Building Council. <https://www.ukgbc.org/ukgbc-work/lca-planetary/> (Erişim Tarihi: Mayıs 2024).
- UNFCCC, 2023. COP 28: What Was Achieved and What Happens Next? <https://unfccc.int/cop28/5-key-takeaways> (Erişim Tarihi: Nisan, 2024).
- Waldman, B., Huang, M. & Simonen, K. 2020. Embodied carbon in construction materials: a framework for quantifying data quality in EPDs. *Buildings and Cities*, 1(1): 625-636.
- Wanjiru, E., Xia, X. 2017. Optimal energy-water management in urban residential buildings through grey water recycling. *Sustainable Cities and Society*, 32, 654–668.
- Wu, Z., Duan, H., Li, K., Ye, L. 2022. A comprehensive carbon footprint analysis of different wastewater treatment plant configurations. *Environmental Research*, 214: 113818.
- Xu, J., Luo, P., Lu, B., Wang, H., Wang, X., Wu, J., Yan, J. 2018 Energy-water nexus analysis of wastewater treatment plants (WWTPs) in China based on statistical methodologies. *Energy Procedia*, 152: 259–264.
- Yang, H., Tung, K.K. 1998. Water Vapor, Surface Temperature, and the Greenhouse Effect—A Statistical Analysis of Tropical-Mean Data. *Journal of Climate*, 11(10): 2686–2697
- Yapıcıoğlu, P. 2018. Atıksu Arıtma Tesislerinin Sera Gazı Emisyonlarının Minimizasyonu. Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği ABD, Yüksek Lisans Tezi.
- Zhang, Q., Liu, S., Wang, T., Dai, X., Baninla, Y., Nakatani, J., Moriguchi, Y. 2019. Urbanization impacts on greenhouse gas (GHG) emissions of the water infrastructure in China: Trade-offs among sustainable development goals (SDGs). *Journal of Cleaner Production*, 232: 474–486.

## ÖZGEÇMİŞ

Büşra ÇAYIR Liseyi Nermin Mehmet Çekiç Anadolu Lisesinde okudu. 2011 yılında lisans eğitimine Kırıkkale Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde başladı ve 2015 yılında tamamladı. 2020 yılında Konya Teknik Üniversitesi İş Güvenliği Tezsiz Yüksek Lisans Programına başladı, Kamu Hastanesinde Risk Değerlendirmesi ve Kontrolü üzerine uygulama projesi hazırlayıp 2021 yılında bölümü tamamladı. 2022 yılı ocak ayında B Sınıfı İş Güvenliği Uzmanlığı Sertifikasını aldı. 2021 yılında Giresun Üniversitesi Çevre Mühendisliği bölümünde lisansüstü eğitime başladı. 2021 yılında Kalyon-Lodos Grubu Kemberburgaz RES projesinde taşeron şantiye şefi olarak görev yaptı 2021-2022 yılı içerisinde Habibler Taşoluk TM. İstanbul Grand Airport GIS E.İ.H. projesinde saha mühendisi olarak çalıştı. 2022 yılında Etlik Entegre Şehir Kampüsü Projesinde B sınıfı İş güvenliği uzmanı olarak görev yaptı. 2023 yılında Ankara'da Asce Kanyon1 Rezidans projesine İş Güvenliği Bölümü birim şefi olarak göreve başlamış ve hala çalışmaya devam etmektedir.