

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**ATIKSU ARITMA TESİSLERİNDE KARBON AYAK İZİ
DEĞERLENDİRMESİ**

Gökber YAVUZ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2024

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**ATIKSU ARITMA TESİSLERİNDE KARBON AYAK İZİ
DEĞERLENDİRMESİ**

Gökber YAVUZ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2024

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIKSU ARITMA TESİSLERİNDE KARBON AYAK İZİ
DEĞERLENDİRMESİ

Gökber YAVUZ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2024

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ATIKSU ARITMA TESİSLERİNDE KARBON AYAK İZİ
DEĞERLENDİRMESİ

Gökber YAVUZ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 17 / 07 /2024 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Aslı Seyhan ÇIĞGIN (Danışman)
Prof. Dr. Nevzat Özgü YİĞİT
Doç. Dr. İbrahim Ethem KARADİREK

ÖZET

ATIKSU ARITMA TESİSLERİNDE KARBON AYAK İZİ DEĞERLENDİRMESİ

Gökber YAVUZ

Yüksek Lisans Tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Aslı Seyhan ÇİĞGIN

Temmuz 2024; 73 sayfa

İklim değişikliği farkındalığının artmasıyla son yıllarda evsel atıksu arıtma tesislerinin (AAT) enerji verimli hale gelmesi ve karbon ayak izlerinin (KAİ) azaltılmasına yönelik çalışmalar yaygınlaşmıştır. Yürütülen uluslararası ölçekli çalışmalarda enerji tüketimi ve KAİ birlikte incelenmekte ve KAİ azaltım stratejileri değerlendirilmektedir. Ancak, AAT'lerden kaynaklanan KAİ'lerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar ülkemizde yaygın değildir. Bu doğrultuda bu tez çalışmasının amacı, uluslararası ölçekte yaygınlaşan AAT KAİ azaltımı değerlendirmesinin ulusal ölçekte uygulanmasıdır.

Bu çalışma kapsamında farklı debilere sahip dört AAT'ye ait bilgiler toplanmıştır. AAT'lere ait KAİ'lerinin hesaplanması amacıyla 2014 yılında İsveç AAT'lerinde KAİ'nin hesaplanması amacıyla yürütülen proje kapsamında geliştirilen Karbon Ayak İzi Hesaplama Aracı (CFCT) esas alınmıştır. Tez çalışması kapsamında CFCT aracı KAİ hesaplanmasında kullanılan güncel bilgilere göre revize edilmiştir. Böylece oluşturulan MS Excel tabanlı hesaplama aracıyla dört AAT'den kaynaklanan sera gazı emisyonları belirlenmiş ve tesis özelinde sera gazı emisyonlarının azaltılabilmesi için uygulanabilecek senaryolar incelenmiştir.

Yapılan hesaplamalar sonucunda AAT'lerde sera gazı emisyonlarının en önemli kaynakları atıksu arıtımı ve enerji tüketimi olarak belirlenmiştir. Ayrıca çamur yakma uygulanan tesislerde çamur yönetiminin önemli bir emisyon kaynağı olduğu tespit edilmiştir. Oluşturulan senaryolar için KAİ hesapları sonucunda, AAT'lerde enerji kaynağının %15'inin rüzgâr enerjisinden elde edilmesi, çamurun tarım arazisinde kullanılarak bertaraf edilmesi, biyogazın tümünün elektrik enerjisi üretimi için kullanımı, çamur süzöntü sularının ayrı olarak anammox prosesi ile arıtımı ve kum atıklarının tekrar kullanımı durumunda KAİ'nde azaltım sağlanabileceği belirlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELE: Atıksu arıtma tesisi, Karbon ayak izi, Karbon emisyonu azaltımı, Sera gazı emisyonları.

JÜRİ: Prof. Dr. Aslı Seyhan ÇİĞGIN

Prof. Dr. Nevzat Özgü YİĞİT

Doç. Dr. İbrahim Ethem KARADİREK

ABSTRACT

CARBON FOOTPRINT ANALYSIS EVALUATION IN WASTEWATER TREATMENT PLANTS

Gökber YAVUZ

MSc. Thesis in Environmental Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Aslı Seyhan ÇİĞGIN

July 2024; 73 pages

With the increasing awareness of climate change, studies on making domestic wastewater treatment plants (WWTPs) energy efficient and reducing their carbon footprints (CF) have become widespread in recent years. In international scale studies, energy consumption and CF are examined together, and CF reduction strategies are evaluated. However, studies on the determination of CFs caused by WWTPs are not common in our country. In this regard, the aim of this thesis is to implement the WWTP CF reduction assessment, which has become widespread internationally, on a national scale.

Within the scope of this study, information about four WWTPs with different flow rates was collected. In order to calculate the CFs of WWTPs, the Carbon Footprint Calculation Tool (CFCT) developed within the scope of the project carried out in 2014 to calculate the CFs of Swedish WWTPs was taken as basis. Within the scope of the thesis study, the CFCT tool was revised according to the current information used in calculating CF. Thus, with the MS Excel-based calculation tool created, greenhouse gas emissions from four WWTPs were determined and scenarios that could be applied to reduce greenhouse gas emissions specific to the facility were examined.

As a result of the calculations, the most important sources of greenhouse gas emissions in WWTPs were determined as wastewater treatment and energy consumption. Additionally, it has been determined that sludge management is an important source of emissions in facilities where sludge incineration is applied. As a result of the CF calculations for the created scenarios, 15% of the energy source in WWTPs is obtained from wind energy, the sludge is disposed of by using it on agricultural land, the entire biogas is used for electrical energy production, the sludge filtrate is treated separately with the anammox process and the reuse of sand waste. It has been determined that a reduction in CF can be achieved in this case.

KEYWORDS: Carbon footprint, Carbon emission reduction, Greenhouse gas emissions, Wastewater treatment plant.

COMMITTEE: Prof. Dr. Aslı Seyhan ÇİĞGIN

Prof. Dr. Nevzat Özgü YİĞİT

Assoc. Prof. Dr. İbrahim Ethem KARADİREK

ÖNSÖZ

Yapmış olduğum çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgilerini benimle paylaşan, mesleki anlamda bana her zaman yeni bilgiler öğreten, kendisine ne zaman danışsam zamanını ayırıp sabırla ve büyük bir ilgiyle bana faydalı olabilmek için elinden gelenden fazlasını sunan her sorun yaşadığımda yanına çekinmeden gidebildiğim, güler yüzünü ve samimiyetini esirgemedi ve gelecekteki mesleki hayatımda da bana verdiği değerli bilgilerden faydalanacağımı düşündüğüm kıymetli ve danışman statüsünü hakkıyla yerine getiren Prof. Dr. Aslı Seyhan ÇİĞGIN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Yüksek lisans yaparken beni, yürütmekte olduğu Tübitak projesinde çalışmam için kabul edip, bana değerli bilgiler öğreten, beni daha disiplinli ve çalışkan hale getiren hem mesleki anlamda hem de kültürel bilgi anlamında bana değerli bilgiler veren, mesleki hayatımda ufku genişletmiş olan Doç. Dr. İbrahim Ethem KARADİREK'e teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca kıymetli zamanını hazırlamış olduğum yüksek lisans tezindeki verilere ulaşmamı sağlayan Engin MIHOĞLU'na teşekkürü borç bilirim.

Yüksek lisans yaparken birlikte çalışmış olduğum ekip arkadaşlarım Yusuf ESER'e ve Mustafa Batuhan OKUMUŞ'a çalışma hayatlarında başarılar diler ve birlikte geçirdiğimiz güzel günler için teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman ve her durumda yanımda olan, dürüstlüğü ilke edinmemi sağlayan, yıllar boyu süren ve sürececek olan karşılıksız destek ve rehberliğin yanı sıra inancımı ve kararlılığımı da asla kaybetmemi sağlayan sevgili annem Kıymet YAVUZ ve sevgili babam Yalçın YAVUZ'a sonsuz teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
AKADEMİK BEYAN	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	3
2.1. AAT’lerde Sera Gazı Emisyonları	3
2.2. AAT Enerji Tüketimi	5
2.3. Atıksu Arıtım Aşamalarında Enerji Tüketimi	6
2.3.1. Birincil arıtma.....	10
2.3.2. İkincil arıtma.....	10
2.3.3. Üçüncül arıtma.....	12
2.3.4. Çamur arıtımı.....	13
2.4. AAT’lerde Enerji Verimliliği Sağlama Yöntemleri	15
2.4.1. Mekanik cihazlarda enerji tüketiminin azaltılması.....	15
2.4.2. Azot gidermenin yeni yolları	16
2.4.3. Enerji geri kazanımı sağlayan yöntemler	18
2.5. AAT’lerde Enerji Verimliliğinin için Yürütülen Çalışmalar	22
2.6. AAT’lerde Sera Gazı Emisyonlarının Belirlenmesi.....	26
2.6.1. Karbon ısı enerjisi analizi tesisi değerlendirme aracı (CHEApet).....	29
2.6.2. Karbon ayak izi hesaplama aracı (CFCT)	29
3. MATERYAL VE METOT	31
3.1. KAİ hesaplamaları yapılan AAT’ler	31
3.2. CFCT Aracı	32
3.3. Karbon Ayak İzi Hesaplamaları	34
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	37
4.1. Atıksu Arıtma Tesisleri Karbon Ayak İzleri	37

4.1.1. AAT'lerden kaynaklanan kapsam 1 emisyonları	37
4.1.2. AAT'lerden kaynaklanan kapsam 2 emisyonları	39
4.1.3. AAT'lerden kaynaklanan kapsam 3 emisyonları	40
4.1.4. AAT'lerin toplam karbon ayak izleri	44
4.2. AAT'lerin KAI'lerinin Karşılaştırılması.....	47
4.3. AAT'lerde Enerji Tüketimi ve KAI'lerinin Azaltılmasına Yönelik Stratejiler ..	50
5. SONUÇLAR	56
6. KAYNAKLAR.....	57
7. EKLER	67
ÖZGEÇMİŞ	



AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Atıksu arıtma tesislerinde karbon ayak izi değerlendirmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

17/07/2024

Gökber YAVUZ



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

°C	: Santigrat
CH ₄	: Metan
CO	: Karbon monoksit
CO ₂	: Karbondioksit
CO ₂ e	: Karbondioksit eşdeğeri
Gt	: Gigaton
GW-sa	: Gigavat saat
kg	: Kilogram
kW-sa	: Kilovat saat
L	: Litre
m	: Metre
m ³	: Metreküp
mg	: Miligram
Mj	: Megajoule
MW-sa	: Megavat saat
N	: Azot
N ₂	: Azot gazı
N ₂ O	: Nitröz oksit
NH ₃	: Amonyak
NO ₃ ⁻	: Nitrat
P	: Fosfor
T	: Sıcaklık
UOK	: Uçucu organik karbon
V	: Hacim

Kısaltmalar

A ² /O	: Anaerobik-anoksik-aerobik
AAT	: Atıksu arıtma tesisi
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AÇ	: Aktif çamur
AD	: Anaerobik çürütme
AnMBR	: Anaerobik membran biyoreaktör
BNR	: Biyolojik nütrient giderimi
BOİ ₅	: Biyolojik oksijen ihtiyacı
BSM	: Kıyaslama simülasyon modeli
CFCT	: Karbon ayak izi hesaplama aracı
CHEApet	: Karbon ısı enerjisi analizi tesisi değerlendirme aracı
CHP	: Birleşik ısı ve enerji
ÇO	: Çözünmüş oksijen
ECAM	: Enerji performansı, karbon emisyonları değerlendirme ve izleme aracı
EF	: Emisyon faktörü
IPCC	: Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli
IWA	: Uluslararası Su Birliği
KAI	: Karbon ayak izi
KM	: Katı madde
KOI	: Kimyasal oksijen ihtiyacı
KPI	: Enerji performans göstergesi
MBR	: Membran biyoreaktör
NE	: Nüfus eşdeğeri
PV	: Fotovoltaik
sKAI	: Spesifik karbon ayak izi
TN	: Toplam Azot
TO	: Ters ozmoz
UV	: Ultraviyole

Bu tezde ondalık ayıracı olarak virgül (,) kullanılmıştır.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Yıllara göre değişen hava sıcaklığı (NASA 2023)	3
Şekil 2.2. Atmosferdeki CO ₂ derişimi (NASA 2024).....	4
Şekil 2.3. AAT'lerden salınan sera gazları.....	4
Şekil 2.4. AAT'lerde aşamalara göre enerji tüketimi (Longo vd. 2016)	8
Şekil 2.5. İkincil arıtma proseslerinin ortalama enerji tüketimleri (Yang vd. 2010)	12
Şekil 2.6. AÇ prosesi bileşenlerinin enerji kullanımı oranları (Gu vd. 2017)	12
Şekil 2.7. Azot döngüsünde proseslerin karşılaştırılması a) Geleneksel azot giderimi b) nitritasyon/denitritasyon c) deammonifikasyon (Soliman ve Eldyasti 2016)	17
Şekil 3.1. KAİ emisyon hesaplamalarında göz önüne alınan işlem ve prosesler	33
Şekil 4.1. AAT'lerde atıksuların arıtılması sırasında açığa çıkan emisyonlar.....	37
Şekil 4.2. Atıksuların alıcı ortama deşarjı sırasında açığa çıkan emisyonlar.....	38
Şekil 4.3. AAT'lerde açığa çıkan kapsam 3 KAİ'leri ve kaynakları (a) AAT-1, (b) AAT-2, (c) AAT-3, (d) AAT-4	41
Şekil 4.4. AAT'lerde açığa çıkan çamur yönetimi emisyonlarının kaynakları (a) KAİ (tonCO ₂ e/yıl), (b) KAİ (tonCO ₂ e/tonKM)	44
Şekil 4.5. AAT KAİ'lerinin emisyon kapsamına göre değerlendirilmesi (tonCO ₂ e/yıl) (a) AAT-1, (b) AAT-2, (a) AAT-3, (a) AAT-4.....	45
Şekil 4.6. AAT'lerde açığa çıkan emisyonların kaynakları	46
Şekil 4.7. AAT'lerde açığa çıkan emisyonların (a) giderilen KOİ, (b) giderilen azot, (c) debi, (d) nüfus eşdeğeri (NE) açısından değerlendirilmesi	47
Şekil 4.8. Azaltılan KAİ miktarları (tonCO ₂ e/yıl)	51
Şekil 4.9. Farklı çamur bertaraf yöntemlerinin KAİ'ne etkileri	52
Şekil 4.10. AAT-2'de biyogazın farklı amaçlarla kullanımının KAİ'ne etkisi	53
Şekil 4.11. Senaryo 4'te oluşan KAİ değerleri	54
Şekil 4.12. AAT'lerin mevcut durumu ve en iyi senaryo KAİ değerleri.....	55

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. AAT'lerde sera gazı kaynakları (McGuckin vd. 2013).....	5
Çizelge 2.2. AAT'lerin enerji yoğunlukları ve ulusal enerji tüketimindeki payları	6
Çizelge 2.3. AAT'ler için bildirilen çeşitli temel performans göstergeleri	7
Çizelge 2.4. Atıksu arıtma tesislerinde spesifik enerji tüketimleri ve ana enerji tüketicileri	9
Çizelge 2.5. Farklı ülkelerde AAT'lerde birincil arıtmada enerji tüketimleri	10
Çizelge 2.6. AAT'lerde ikincil arıtma proseslerinde enerji tüketimleri	11
Çizelge 2.7. İkinci arıtma proseslerinde enerji tüketimleri (Bodik ve Kubaska 2013)... ..	11
Çizelge 2.8. İtalya'da bulunan AAT'nin ünitelerinde tüketilen enerji miktarları.....	13
Çizelge 2.9. AAT'de kullanılan ekipmanların enerji verileri (Longo vd. 2016)	14
Çizelge 2.10. Farklı havalandırma kontrol stratejilerinin özeti	16
Çizelge 2.11. AAT'lerde enerji optimizasyonuna yönelik çalışmalar-1.....	23
Çizelge 2.12. AAT'lerde enerji optimizasyonuna yönelik çalışmalar-2.....	24
Çizelge 2.13. Enerjide kendi kendine yeterli AAT'ler (Shen vd. 2015).....	26
Çizelge 2.14. AAT'lerde enerji ve sera gazları optimizasyonu için kullanılan yöntemler.....	27
Çizelge 2.15. Mevcut KAI modelleri (Marinelli vd. 2021)	28
Çizelge 3.1. KAI hesaplamaları için kullanılan veriler.....	31
Çizelge 3.2. Çalışmada değerlendirilen AAT'lere ait genel bilgiler	32
Çizelge 3.3. Doğrudan emisyonların hesaplanmasında kullanılan EF'ler	34
Çizelge 3.4. Dolaylı emisyonların hesaplanması için kullanılan EF'ler.....	35
Çizelge 4.1. AAT'lerde giriş, çıkış ve giderilen KOİ ve azot konsantrasyonları	38
Çizelge 4.2. AAT'lerin çıkış KOİ ve azot yükleri	39
Çizelge 4.3. AAT'lerde tüketilen elektrik ve kapsam 2 KAI'leri.....	40
Çizelge 4.4. AAT'lerde kullanılan kimyasalların miktarları	42
Çizelge 4.5. AAT'lerde taşıma ile ilgili bilgiler	42

Çizelge 4.6. Taşıma aşamasında açığa çıkan emisyon miktarları.....	43
Çizelge 4.7. A ² /O konfigürasyonuna sahip AAT’lerde hesaplanan KAI’leri.....	48
Çizelge 4.8. A ² /O konfigürasyonlu AAT’lerde KAI’lerine kapsamların katkısı.....	49
Çizelge 4.9. AAT’lerde KAI’nin iyileştirilmesi için oluşturulan senaryolar.....	50
Çizelge 4.10. Senaryo 1 kapsamında hesaplanan yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılanacak enerji yüzdeleri ve miktarları	50
Çizelge 4.11. Arıtma çamurlarının farklı yöntemlerle bertarafının KAI’leri	52
Çizelge 4.12. Izgara atıklarının ve kumun farklı bertaraf yöntemlerindeki KAI’leri	54



1. GİRİŞ

Küresel ortalama hava sıcaklıklarında son 30 yılda gözlenen artışın, geçen 1000 yıla kıyasla daha yüksek olduğu ve bu artışın karbondioksit (CO₂) başta olmak üzere, sera etkisi gösteren gazların artmasıyla ilişkili olduğu bilinmektedir. Paris İklim Anlaşması'na göre belirlenen sıfır emisyon hedefi, karbon emisyonlarını azaltacak tedbirlerin alınmasını içermektedir. Sanayi devriminden sonra, insanların tüketim alışkanlıkları değişmeye başlamış, kentsel alanlardaki nüfusun hızla artması, ekonomik büyüme ve insanların tüketim alışkanlıklarındaki değişimlerden dolayı içme suyuna olan talep artmıştır (Boldrin vd. 2022). Tüketilen içme suyu miktarındaki artış, ortaya çıkan atıksu miktarının ve bunun sonucunda atıksu arıtma tesislerinin (AAT) sayısında da artışa neden olmuştur. AAT'lerde, atıksuların arıtılması ve çeşitli kaynakların tüketilmesi sonucunda CO₂, metan (CH₄) ve nitröz oksit (N₂O) gibi sera gazı emisyonları açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan sera gazları ve iklim değişikliği sonucunda, şiddetli yağışlar ve kuraklıklar gibi hava olaylarının sayısı ve sıklığında artış gözlenmektedir (Bassin vd. 2021). Zaman içerisinde iklimin değişmesiyle oluşan su baskınları, yoğun yağışlar ve deniz seviyesinin yükselmesi gibi iklim faktörleri AAT'lerin performansını doğrudan etkileyebilmektedir (Karakas vd. 2024). Dolayısıyla AAT'ler tükettikleri enerji ve saldıkları sera gazlarıyla hem iklim değişikliğine katkı sağlamakta hem de iklim değişikliğinden etkilenmektedir.

Yoğun enerji gereksinimi nedeniyle evsel atıksu arıtımı yüksek maliyetli şehir altyapı hizmetlerinden biridir. Atıksu arıtımı sırasında yüksek miktarda enerji tüketimi sürecin yüksek maliyetli olmasının yanı sıra yüksek miktarda sera gazı emisyonu açığa çıkmasına da sebep olmaktadır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'ne (IPCC) göre, atık ve atıksu arıtımı küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %3'ünden sorumludur (IPCC 2014). Avrupa Birliği tarafından ise evsel atıksu arıtımının atık sektörünün toplam sera gazı emisyonlarının %13'ünü oluşturduğu bildirilmiştir (AÇA 2020). İklim değişikliği sorunları, enerji tasarrufu, enerji verimliliği ve alternatif enerji kaynaklarının aranması konularını da beraberinde getirmektedir (Friedrich vd. 2009). Özellikle, enerji ihtiyaçlarının fosil yakıtlardan elektrik üretimi ile karşılanması su sektöründeki sera gazı emisyonlarında önemli bir artışa yol açmaktadır (Molinos-Senante vd. 2014; Hao vd. 2015). Tipik bir AAT'de açığa çıkan doğrudan sera gazı emisyonları karbondioksitten sırasıyla 273 ve 27-29 kat daha güçlü olan nitröz oksit ve metan gazlarıdır (IPCC 2021). Günümüzde, enerji performanslarının ve çevresel sürdürülebilirliklerini yönetmek ve iyileştirilmesini sağlamak kritik öneme sahip olduğu için AAT'lerin işletilmesi önemli bir konudur.

Son yıllarda AAT'lerde açığa çıkan sera gazı emisyonlarının belirlenmesi amacıyla karbon ayak izi (KAİ) hesaplamalarının yapılması yaygınlaşmaktadır. KAİ AAT'lerin iklim değişikliğini hangi yönde ve ne kadar etkilediğini hesaplamak için kullanılan bir analiz yöntemidir (Maktabifard vd. 2020). AAT'lerde açığa çıkan sera gazı emisyonları doğrudan, dolaylı iç ve dolaylı dış emisyonlar olmak üzere üç kategoride incelenmektedir. AAT'lerden kaynaklanan doğrudan emisyonlar ya da Kapsam 1 emisyonlar olarak adlandırılan emisyonlar; mikrobiyal solunum sonucu açığa çıkan CO₂ emisyonları, nitrifikasyon-denitrifikasyon sırasında açığa çıkan N₂O emisyonları ve anaerobik çürütmeden kaynaklanan CH₄ emisyonlarından oluşmakta olup, biyolojik süreçlerle ilgilidir. Kapsam 2 emisyonları olarak adlandırılan dolaylı iç emisyonlar kullanılan elektrik enerjisinin tüketimi ile ilgili olurken, dolaylı dış emisyonlar (Kapsam 3), üçüncü taraflar tarafından arıtma çamurlarının taşınması, kimyasalların üretimi ve

bunların tesise taşınması gibi AAT içinde doğrudan kontrol edilemeyen emisyon kaynakları ile ilgilidir (Mannina vd. 2016). KAİ analizleri ile her bir kapsamda oluşan sera gazı emisyonlarının ayrı ayrı belirlenmesiyle yüksek sera gazı emisyonuna sebep olan kaynaklar da ortaya koyulabilmekte ve böylece, her bir kapsam için sera gazı emisyonlarını azaltılmasına yönelik stratejilerin geliştirilmesi mümkün olabilmektedir.

İklim değişikliği farkındalığının artmasıyla son yıllarda evsel AAT’lerde KAİ’nin hesaplanması ve azaltılmasına yönelik olarak uluslararası ölçekte çok çeşitli çalışmalar yürütülmüş ve çeşitli hesaplama araçları geliştirilmiştir. KAİ hesaplama araçlarının bir kısmı program tabanlı olarak geliştirilirken, bazıları MS Excel tabanlı olarak geliştirilmiştir. Bu doğrultuda, AAT’lerin KAİ’lerinin belirlenmesi için çeşitli ücretli ve ücretsiz hesaplama aracına ulaşılabilmektedir. Bu hesaplama araçlarından AAT’lere özel Karbon Ayak İzi Hesaplama Aracı (CFCT) AAT’lerde açığa çıkan doğrudan ve dolaylı emisyonlardan kaynaklanan KAİ’nin hesaplanması amacıyla “İsveç AAT’lerinin KAİ’nin Hesaplanması (SVU 12- 120)” (Gustavsson ve Tumlin 2013) adlı proje kapsamında geliştirilen MS Excel tabanlı bir araçtır (Maktabifard vd. 2019). CFCT AAT’lerin KAİ’nin hesaplamanın yanı sıra, AAT’lerin KAİ’ni azaltabilecek stratejilerin değerlendirilmesi için de kullanılmaktadır. Bu araçta, AAT’ler için ayrıntılı sonuçlar, KAİ hesaplamaları, çeşitli girdi parametreleri kategorilerini dikkate alan ampirik modeller ile yapılmaktadır (Maktabifard vd. 2020). Sera gazı emisyonlarından olan, CO₂, CH₄ ve N₂O emisyonları, küresel ısınma potansiyellerine (IPCC, 2014) göre CO₂ eş değerleri (CO₂e) cinsinden ifade edilmektedir.

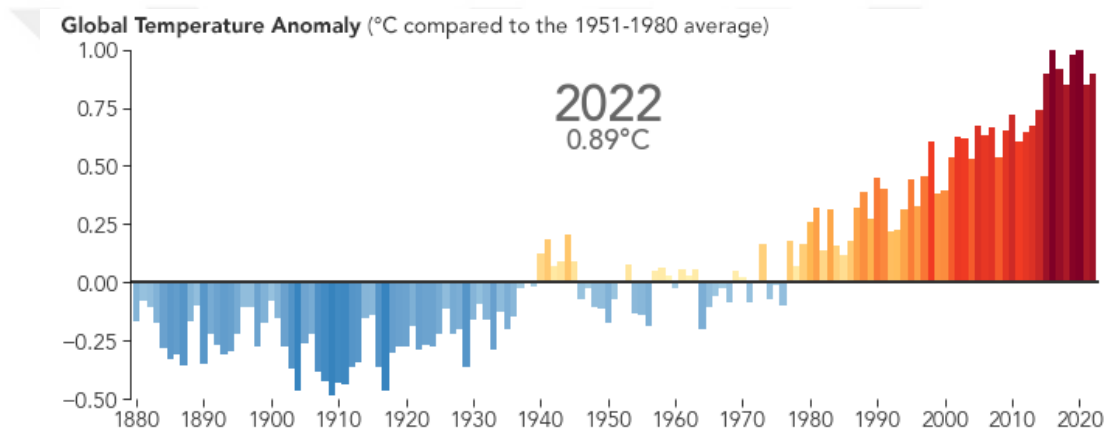
AAT’lerin enerji tüketimleri ve dolayısıyla açığa çıkacak sera gazı emisyonları, tesisin konumuna, büyüklüğüne, arıtma prosesinin tipine, kullanılan havalandırma sistemine, deşarj standartlarına, tesisin yaşına ve operatörlerin bilgi ve becerilerine bağlıdır (Longo vd. 2016). Bu doğrultuda, farklı ülkelerde AAT’lerin KAİ’lerinin belirlenmesi ve iyileştirme stratejilerinin geliştirilmesi için çeşitli çalışmalar yürütülmüştür. Ancak, ülkemizde bulunan AAT’lerin KAİ’nin hesaplandığı ve değerlendirildiği çalışmalar kısıtlı sayıdadır. Bu doğrultuda bu tez çalışmasının amacı, uluslararası ölçekte yaygınlaşan AAT KAİ azaltımı değerlendirmelerinin ulusal ölçekte uygulanmasıdır.

Tez çalışması kapsamında ilk olarak; AAT’lerin KAİ hesaplamaları için CFCT hesaplama aracı mevcut gelişmelere göre güncellenmiştir. Bu amaçla, Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından hazırlanan raporlara göre CFCT aracı kapsam 1, 2, 3 emisyonlarını ayrı ayrı değerlendirecek şekilde revize edilmiş ve araca güncel emisyon faktörleri eklenmiştir. Ardından, AAT’lerin KAİ’lerinin hesaplanması için gerekli veriler belirlenerek bir AAT veri talep tablosu oluşturulmuştur. Bu veri talep tablosu ülkemizde bulunan çeşitli AAT’lerine gönderilerek gerekli bilgiler temin edilmiştir. CFCT aracının revizyonu ile geliştirilen karbon ayak izi hesaplama aracı kullanılarak veri temin edilen farklı debilere sahip dört AAT’nin karbon ayak izleri hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Tez çalışmasının son aşamasında ise, AAT’lerin mevcut durumdaki karbon ayak izlerinin başlıca sebeplerine göre sera gazı emisyonlarının azaltılabilmesi için uygulanabilecek senaryoların KAİ’ne etkileri incelenmiştir. Böylece, ulusal ölçekte, evsel AAT’lere ait KAİ’lerinin azaltmak amacıyla uygulanabilecek stratejilerin ortaya koyulması hedeflenmiştir.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. AAT'lerde Sera Gazı Emisyonları

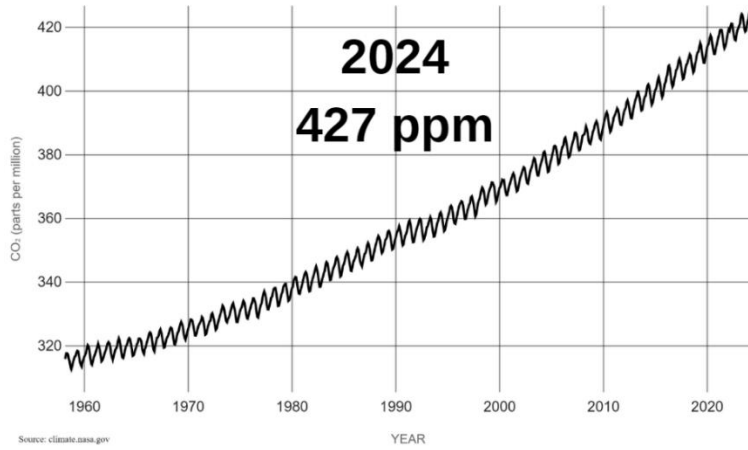
Son yıllarda, yağış rejimlerinin değişmesiyle oluşan sel ve kuraklık gibi hava olaylarının artması beraberinde iklim değişikliğinden söz edilmesine neden olmuştur. Dünya'nın gündeminde olan iklim değişikliği hakkında paneller, konferanslar düzenlenmiş ve bilimsel makaleler üretilmiştir. Bu sayede iklim değişimine olan farkındalık artmaktadır. Küresel ortalama sıcaklıklar son 10 bin yılda sürekli bir değişim içerisinde olmuştur. Sanayi devrimi öncesi küresel ortalama sıcaklıklara göre yaklaşık 1 °C üzerinde sıcaklığın artmasıyla iklim değişikliğine olan araştırmalar daha yaygın hale gelmiştir (Shrestha vd. 2022). Eğer iklim değişikliği için herhangi bir önlem alınmaz ise küresel ortalama sıcaklığın artışı 2030-2052 yılları arasında yaklaşık olarak 1,5 °C'ye ulaşılacağı öngörülmektedir (IPCC 2018). Şekil 2.1'de 1880'den günümüze kadar NASA tarafından sürekli ölçülen hava sıcaklıkları görülmektedir (NASA 2023).



Şekil 2.1. Yıllara göre değişen hava sıcaklığı (NASA 2023)

Küresel ortalama sıcaklığın 1 °C artması çok önemli gibi gözükmesine de oldukça önemli bir artıştır. Geçmişte, küresel ortalama sıcaklığın 2 °C azalmasıyla 1300-1850 yılları arasında küçük buzul çağı gözlemlenmiştir (NASA 2023). Sera gazlarının yüksek ısı tutma kapasiteleri nedeniyle, sıcaklığın artması, karbondioksit (CO₂) başta olmak üzere, sera etkisi gösteren gazların artmasıyla doğrudan ilişkilidir (Çağatan 2011). Şekil 2.2'de, 1958'den günümüze kadar NASA tarafından sürekli ölçülen CO₂ konsantrasyonları görülmektedir (NASA 2024).

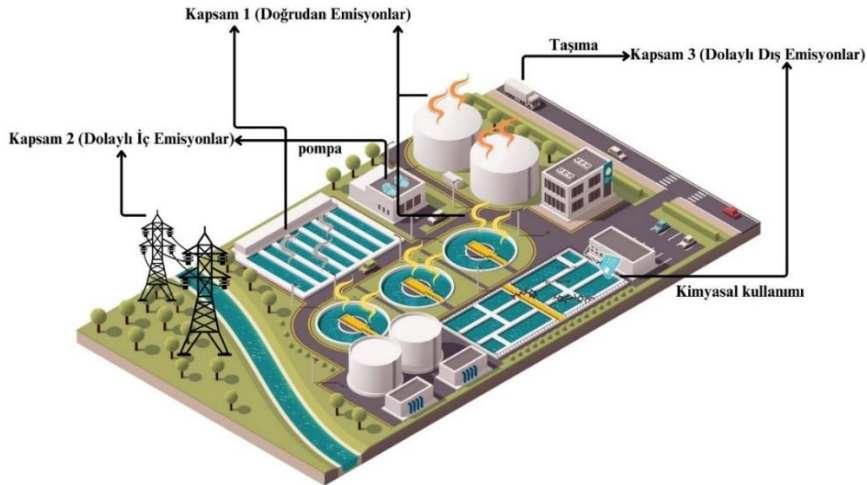
Sanayi devriminden sonra, insanların tüketim alışkanlıkları değişmeye başlamıştır. Bu doğrultuda, fosil yakıtların yakılması, ormanlık alanların yok edilmesi ve sanayi süreçlerindeki artışlar gibi çeşitli antropojenik etkilerle atmosfere salınan sera gazlarının miktarlarında sürekli bir artış gözlenmiştir. Atıksu arıtma tesisleri (AAT) önemli sera gazı emisyon kaynaklarından biridir (Mannina vd. 2016). AAT'lerde atıksuların arıtılması amacıyla uygulanan farklı prosesler ve süreçler sonucu atmosfere nitroz oksit (N₂O), karbon dioksit (CO₂) ve metan (CH₄) gazları başta olmak üzere çeşitli gazlar salınabilmektedir (Kampschreur vd. 2009).



Şekil 2.2. Atmosferdeki CO₂ derişimi (NASA 2024)

AAT'lerden kaynaklanan sera gazları doğrudan, dolaylı iç ve dolaylı dış emisyonlar olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadır (Şekil 2.3). Bu kategoriler aynı zamanda Kapsam 1, 2 ve 3 emisyonları olarak da adlandırılmaktadır (Mannina vd. 2016):

- Doğrudan emisyonlar (Kapsam 1), atıksu arıtmayla ilgili faaliyetlerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını ifade eder. Bu emisyonlar mikrobiyal solunum sonucu açığa çıkan CO₂ emisyonları, biyolojik azot giderme (BNR) prosesleri sırasında açığa çıkan N₂O emisyonları ile anaerobik atıksu ve çamur arıtımından kaynaklanan CH₄ emisyonlarını içermektedir.
- Dolaylı iç emisyonlar (Kapsam 2), atıksu ve çamurun karıştırılması, havalandırılması, pompalanması, susuzlaştırılması ve taşınması gibi enerji tüketiminden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını içermektedir.
- Son olarak, dolaylı dış emisyonlar (Kapsam 3), üçüncü taraf tarafından arıtma çamurlarının taşınması, kimyasalların üretimi ve bunların tesise taşınması gibi AAT içinde doğrudan kontrol edilemeyen emisyon kaynakları ile ilgilidir.



Şekil 2.3. AAT'lerden salınan sera gazları

AAT’lerde bulunan farklı ünite ve proseslerden kaynaklanan kapsam 1, 2 ve 3 sera gazı emisyonları Çizelge 2.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. AAT’lerde sera gazı kaynakları (McGuckin vd. 2013)

Kaynaklar	Sera Gazları	Kapsam		
		1	2	3
Terfi İstasyonu	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	Yakıt kullanımı Kanalizasyondan CH ₄ emisyonu	Elektrik kullanımı	Bakım
Izgaralar	CH ₄	Atıksudan CH ₄ emisyonu	-	Bakım
Ön Arıtma	CH ₄	Atıksudan CH ₄ emisyonu	-	Bakım
Aktif Çamur	CO ₂ , N ₂ O	Havalandırma üniteleri (Yakıt ile çalışıyorsa) BNR prosesleri	Havalandırma için elektrik kullanımı	Bakım
Filtreler	N ₂ O	BNR prosesleri	-	-
Ozonlama	N ₂ O	Arıtmada N ₂ O emisyonu	-	-
Klorlama	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	Yakıt kullanımı	Elektrik kullanımı	Bakım
UV	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	Yakıt kullanımı	Elektrik kullanımı	Bakım
Çamurun depolanması	CH ₄	Atık bertarafı (AAT içinde)	-	Atık bertarafı (AAT dışında)
Çamurun yakılması	CH ₄ , N ₂ O	Kaçak emisyon	-	-
Çamurun gübre olarak kullanılması	CH ₄ , N ₂ O	-	-	Atık bertarafı
Çamurun kompostlaştırılması	CH ₄ , N ₂ O	Atık bertarafı (AAT içinde)	-	Atık bertarafı (AAT dışında)
Çamurun Susuzlaştırılması	CH ₄	Kaçak emisyon	-	-
AD	CH ₄	Kaçak emisyon	-	-
Biyogazın Yakılması	CH ₄ , N ₂ O	Kaçak emisyon	-	-
Kombine ısı ve güç (CHP) üretimi	CH ₄ , N ₂ O	Kaçak emisyon	-	-

2.2. AAT Enerji Tüketimi

AAT’ler belediyeler tarafından yönetilen diğer sektörlerle göre en fazla enerji tüketen hizmetlerden biri olmaktadır. Geleneksel bir AAT’de işletme maliyetlerinin yaklaşık olarak %25-40’ı enerji tüketiminden kaynaklanmaktadır (Panepinto vd. 2016). Atıksuyun arıtılması ve AAT’ye kanalizasyon sistemleriyle taşınması ABD’de üretilen elektrik enerjisinin yaklaşık %4’ünü tüketmektedir (Xu vd. 2017). Avrupa’da tüketilen toplam elektrik enerjisinin %1’inin AAT’lerden kaynaklandığı bildirilmiştir (Haslinger vd. 2016). Almanya’daki AAT’lerin ise, ülkenin toplam elektrik enerjisinin tüketiminin yaklaşık olarak %0,7’sini oluşturduğu tespit edilmiştir (Maktabifard vd. 2018). İspanya’da ise evsel ve endüstriyel AAT’lerin toplam elektrik enerjisinin tüketiminin %2-3’ünü oluşturduğu bildirilmiştir (Longo vd. 2016). Farklı ülkelerdeki AAT’lerle tüketilen enerji yoğunluğu ve ulusal enerji tüketimine oranları Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. AAT'lerin enerji yoğunlukları ve ulusal enerji tüketimindeki payları

Ülkeler	Enerji Yoğunlukları (kW-sa/m ³)	Ulusal enerji tüketimindeki payı (%)	Kaynak
ABD	0,52	0,6	Wang vd. (2016)
Çin	0,31	0,25	Wang vd. (2016)
Almanya	0,40-0,43	0,7	Wang vd. (2016)
Güney Afrika	0,079-0,41	-	Wang vd. (2016)
Japonya	0,304	-	Yang vd. (2010)
Kore	0,243	0,5	Chae ve Kang (2013)
İsveç	0,42	1	Olsson (2012)
İsviçre	0,52	-	Hernandez-Sancho vd. (2011)
İspanya	0,53	-	Hernandez-Sancho vd. (2011)

ABD'deki AAT'lerinin elektrik tüketimi 0,52 kW-sa/m³ ve ABD'nin yıllık elektrik tüketiminin yaklaşık %0,6'sı olarak belirlenmiştir (Wang vd. 2016). Çin, Japonya ve Kore gibi Asya ülkelerinin ABD ile karşılaştırıldığında, atıksu arıtımı için daha düşük enerji yoğunluğuna sahip oldukları belirlenmiştir. Çin'de elektrik tüketimi 0,31 kW-sa/m³ (Wang vd. 2016), Japonya'da elektrik tüketimi 0,304 kW-sa/m³ (Yang vd. 2010) ve Kore'de 0,243 kW-sa/m³ (Chae ve Kang 2013) olarak belirlenmiştir. Çin'deki AAT'lerin ulusal düzeyde tüketilen enerji miktarında AAT'lerin payının düşük olmasının diğer enerji kaynaklı endüstrilerin yüksek enerji tüketmesinden kaynaklandığı bildirilmiştir (Gu vd. 2017). Bir diğer çalışmada ise, AAT'lerde enerji tüketiminin, ulusal düzeye göre düşük bir paya sahip olmasının ülkede yetersiz atıksu arıtımı yapıldığını gösterdiği bildirilmiştir (Wang vd. 2016).

Enerji yoğunluğundaki oluşan farklılıklar, ülkelerdeki AAT'lerin farklı hedef atıksu deşarj standartlarından ve farklı atıksu arıtma stratejilerinden kaynaklanmaktadır. Örneğin; Güney Afrika'daki AAT'lerin enerji yoğunluğu 0,079-0,41 kW-sa/m³ arasında olmasının sebebi atıksu arıtımında en yaygın kullanılan proseslerin, lagün ve damlatma filtreler gibi düşük enerji yoğunluklu prosesler olmasıdır (Wang vd. 2016). Çizelge 2.2'de görüldüğü gibi Avrupa ülkelerindeki AAT'lerin enerji yoğunluğu 0,42-0,53 kW-sa/m³ arasında değişmektedir. Bu değerlere göre Avrupa ülkelerindeki deşarj limitlerinin daha düşük olması nedeniyle gelişmiş arıtma teknolojilerinin ve proseslerinin yaygın olarak kullanıldığı çıkarımı yapılmıştır (Hernandez-Sancho vd. 2011).

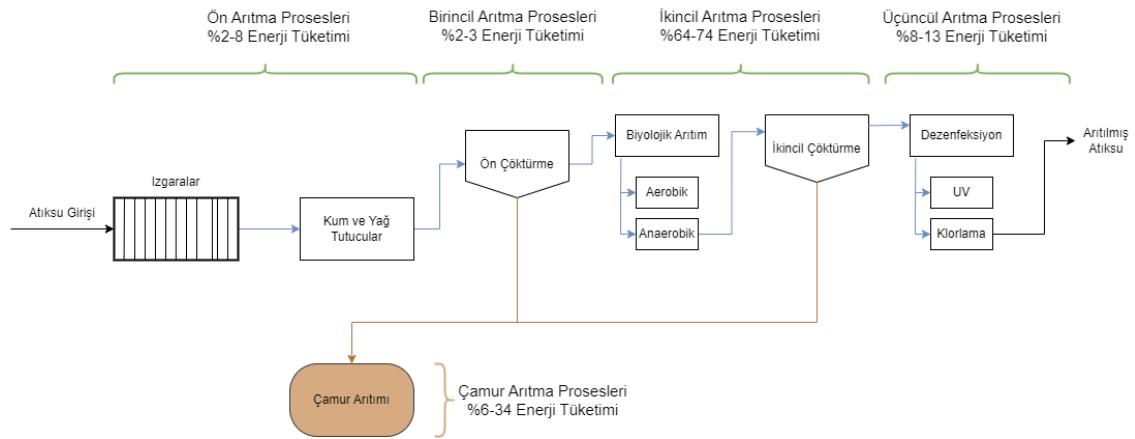
2.3. Atıksu Arıtım Aşamalarında Enerji Tüketimi

AAT'lerin enerji performansını değerlendirmek için kullanılan en yaygın birim olarak kullanılan kW-sa/m³'e ek olarak, yapılan çalışmalar sonucunda üç temel enerji performans göstergesi (KPI) belirlenmiştir. Literatürde enerji tüketimini ifade etmek için en sık kullanılan ikinci gösterge, yıllık nüfus eşdeğerine (NE) (kW-sa/NE.yıl) göre enerji tüketimidir. Ayrıca, atıksudan uzaklaştırılan kirleticilerin miktarına göre, enerji tüketimleri giderilen BOİ₅ (kW-sa/kgBOİ₅giderilen) ve KOİ (kW-sa/kgKOİgiderilen) olarak da rapor edilmektedir (Maktabifard vd. 2018). Literatürde bulunan çalışmalarda AAT'lerin enerji tüketimi için en sık kullanılan KPI'lara göre bildirilen AAT enerji tüketimleri Çizelge 2.3'te listelenmiştir.

Çizelge 2.3. AAT'ler için bildirilen çeşitli temel performans göstergeleri

KPI	Tesisler	Enerji Tüketimi	Nüfus Eşdeğeri (NE) (×1000)	Açıklamalar	Kaynak
kW-sa/ NE.yıl	Rzeszow (Polonya)	48,2	400	İleri biyolojik AAT	Maktabifard vd. (2018)
	Kronso (Polonya)	59,1	117	İleri biyolojik AAT	
	Slupsk (Polonya)	16	205	İleri biyolojik AAT	
	Bochum-Ölbachtal (Almanya)	23	213	Modifikasyonlardan önce	Marner vd. (2016)
	Bochum-Ölbachtal (Almanya)	12	213	Modifikasyonlardan sonra	
	Avusturya	28,4	>100	16 Avusturya AAT	Haslinger vd. (2016)
	Avusturya	33,6	50 -100	7 Avusturya AAT	
	Avusturya	36,8	20 – 50	55 Avusturya AAT	
	Avusturya	48,2	10 – 50	24 Avusturya AAT	
	Burg (Almanya)	15,3	120	Geleneksel AAT	Torregrossa vd. (2016)
	Stuttgart-Mühlhausen (Almanya)	41,5	1200	İleri biyolojik AAT	Zettl (2015)
kW-sa/ kgKOİg	Rzeszow (Polonya)	0,49-0,68	400	İleri biyolojik AAT	Maktabifard vd. (2018)
	Çeşitli ülkeler	0,69	>100	43 AAT	Longo vd. (2016)
	Çeşitli ülkeler	0,82	50 – 100	35 AAT	
	Çeşitli ülkeler	1,02	10 – 50	89 AAT	
	Changi WRP (Singapur)	1,88	-	İleri biyolojik AAT	Yeshi (2015)
	Valensiya (İspanya)	1,68	-	400 m ³ /gün	Hernandez-Sancho vd. (2011)
	Jurong (Singapur)	0,58	990	İleri biyolojik AAT	NEWRI (2009)
	Pekin Gaobeidian (Çin)	0,75	2400	İleri biyolojik AAT	Maktabifard vd. (2018)
kW-sa/ kgBOİsg	Rzeszow (Polonya)	1,03-1,57	400	İleri biyolojik AAT	
	Slupsk (Polonya)	0,75	250	İleri biyolojik AAT	Zaborowska vd. (2017)

AAT’lerde enerji tüketimi birçok faktörden etkilenmektedir. AAT’lerin enerji tüketimi, özellikle, deşarj standartları ve uygulanan arıtma prosesleriyle güçlü bir şekilde ilişkilidir. AAT’lerde atıksuyun arıtımı ve çamur bertarafıyla ilgili tüm proseslerde enerji tüketimi söz konusudur. AAT’lerin enerji tüketimleri, tesisin konumuna, büyüklüğüne, arıtma prosesinin tipine, kullanılan havalandırma sistemine, deşarj standartlarına, tesisin yaşına ve operatörlerin bilgi ve becerilerine bağlı olmaktadır (Longo vd. 2016). Genel olarak enerji tüketimi, tesisin her bir aşamasında geniş aralıklarda değişmektedir. Bunun sebebi AAT’ler aynı arıtma aşamalarına sahip olsalar bile farklı tipte ekipmanlara sahip olmaları nedeniyle enerji tüketimlerinin farklı olmasıdır (Longo vd. 2016). Ön arıtma prosesleri ızgaralar ile kum ve yağ tutucudan oluşmaktadır. Birincil arıtma prosesleri olarak, çöktürme, flotasyon ve kimyasal arıtma uygulanabilmektedir. İkincil arıtma prosesleri olarak ise, organik madde giderimi amacıyla aktif çamur (AÇ) sistemi veya membran prosesler uygulanabilmektedir. İkincil arıtma proseslerinde atıksulardan azotun en fazla %20-30’u giderilebilmektedir. Daha yüksek azot ve fosfor giderimi için üçüncül (ileri) arıtma prosesleri kullanılmaktadır. Bu prosesler farklı aralıklarda enerji tüketmektedir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. AAT’lerde aşamalara göre enerji tüketimi (Longo vd. 2016)

AAT’lerde ön arıtma ve birincil arıtmada diğer aşamalara göre daha az enerji tüketimi söz konusudur. İkincil atıksu arıtma prosesleri ise en fazla enerji tüketen proseslerdir. Bunun sebebi AÇ proseslerinde birden fazla havalandırma ünitesinde sürekli havalandırma için enerji harcanmasıdır (Gu vd. 2017). AÇ prosesi kullanan çoğu orta ve büyük AAT’de, havalandırma toplam enerji tüketiminin yaklaşık %64-74’ünü kullanırken, çamur arıtımı %6-34’ünü ve üçüncül arıtma sistemi ise %8-13’ünü kullanmaktadır (Mamais vd. 2015).

Çizelge 2.4’te AAT’lerde spesifik enerji tüketimi ve ana enerji tüketen birimler özetlenmiştir. Spesifik enerji tüketimleri incelendiğinde, AAT’lerin enerji tüketimlerinde ülkeler arasında çok büyük farklılıklar olmamasına rağmen, AAT’lere tek tek bakıldığı zaman, AAT’ler arasında büyük farklılıklar olduğu görülmektedir (Hernandez-Sancho vd. 2011). Enerji tasarruflu önlemlere sahip İleri Biyolojik AAT’lerde kullanılan enerji tüketimi en düşük 0,25 kW-sa/m³ (Ho vd. 2014), en yüksek enerji tüketimi ise yaklaşık olarak 1 kW-sa/m³ (Gu vd. 2017) olarak belirlenmiştir.

Çizelge 2.4. Atıksu arıtma tesislerinde spesifik enerji tüketimleri ve ana enerji tüketicileri

Kaynak	Spesifik enerji Tüketimi (kW-sa/m ³)	Enerji Tüketimleri				Açıklamalar
		Havalandırma (%)	Çamur arıtma (%)	Pompa (%)	Diğer (%)	
Maktabifard vd. (2018)	0,26	57	5	—	38	Çin’de (Pekin) 2,4 milyon NE İleri Biyolojik AAT
Nouri vd. (2006)	0,30	77	7	11	7	İran’daki (Tebriz) AAT
Panepinto vd. (2016)	0,30	51	29	—	20	İtalya’da (Torino) 2,7 milyon NE İleri Biyolojik AAT
Jonasson (2007)	0,30	70	13	4	13	Avusturya’daki İleri Biyolojik AAT
Jonasson (2007)	0,32	57	13	9	21	Avusturya’da 250 bin NE İleri Biyolojik AAT (Strass)
Mizuta ve Shimada (2010)	0,32	48	29	15	8	Japonya’da geleneksel AAT (Kuzey Kumamoto)
Gu vd. (2017)	0,37-1,6	60	12	12	16	Singapur’da bulunan MBR arıtma
Jonasson (2007)	0,48	48	14	9	29	İsveç’te (Stockholm) 500 bin NE konvansiyonel AAT
Zaborowska vd. (2017)	0,48	53	—	30	17	Polonya’da (Slupsk) 250 bin NE İleri Biyolojik AAT
Yeshi (2015)	0,89	13	9	24	54	Singapur’da (Changi) 800 m ³ /gün İleri Biyolojik AAT
NEWRI (2009)	—	50	30	15	5	Tipik bir konvansiyonel AAT
Aymerich vd. (2015)	—	42	31	20	7	İspanya’da (Girona) 115 k NE İleri Biyolojik AAT
Henriques ve Catarino (2016)	—	53	—	12	35	14 Portekiz AAT’sinde kıyaslama çalışması
Marner vd. (2016)	—	67	11	5	17	Almanya’daki AAT’lerin ortalama enerji dağılımı
Xie ve Chengwen (2012)	—	52	9	18	21	Çin’de bulunan bir AAT
Zaborowska vd. (2017)	—	53	—	30	17	Polonya’da 200 k NE kapasiteli BNR AAT
Cardoso vd. (2020)	—	54	13	—	33	Portekiz’de 2 geleneksel AAT (19.3- 21 bin NE)
Mamais vd. (2015)	—	66	8	—	26	Yunanistan’da 4 farklı AAT 13.500-3.900.000 NE

AAT'ler arasında karşılaştırmayı kolaylaştırmak ve belirli bir tesisin gerçek performansını teşhis etmek ve iyileştirme stratejilerini değerlendirmek için tek tip prosedürler kullanılmaktadır (Maktabifard vd. 2018). Farklı konumlardaki ve farklı konfigürasyonlara sahip AAT'ler arasındaki karşılaştırmaların doğru bir şekilde yapılabilmesi için ortak bir KPI belirlenmesi önerilmektedir (Foladori vd. 2015). Ama bunun için ilk olarak AAT'lerde kullanılan ekipmanların enerji tüketimini belirlemek gerekmektedir. AAT'lerdeki enerji tüketen ekipmanların belirlenmesinin amacı, her bir ekipmanın enerji tüketimine ilişkin verilerin belirlenmesidir. Enerji tüketim verileri için, blowerlar, mikserler, pompalar ve havalandırma sistemleri gibi başlıca enerji tüketen cihazların ayrı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir (Longo vd. 2016).

2.3.1. Birincil arıtma

Birincil arıtma fiziksel işlemlerle inorganik askıda katı maddeleri ve atıksudaki yüzen katıları gidermek amacıyla uygulanmaktadır. Genel olarak, birincil arıtmada pompalama dışındaki aşamalar AAT'lerin toplam elektrik enerjisi tüketiminin küçük bir kısmından sorumludur (Longo vd. 2016). Birincil arıtmada en fazla enerji tüketimi kum tutuculardan toplanan kumun ve birinci çöktürmeden çöken çamurun pompalanmasından kaynaklanır (Plappally ve Lienhard 2012). Birincil arıtmada AKM'nin yaklaşık %60'ı ve BOİ'nin %30'u giderilmektedir. AAT'lerde birincil arıtmada enerji tüketimi Kanada'da 0,02-0,1 kW-sa/m³, Macaristan'da 0,045-0,14 kW-sa/m³, Avusturalya'da 0,1-0,37 kW-sa/m³ (Bodik ve Kubaska 2013), Kaliforniya'da 0,002-0,04 kW-sa/m³ (Wakeel vd. 2016), Çin'de 0,044-0,076 kW-sa/m³ (Li vd. 2017) olarak bildirilmiştir (Çizelge 2.5).

Çizelge 2.5. Farklı ülkelerde AAT'lerde birincil arıtmada enerji tüketimleri

Yer	Enerji Tüketimi (kW/m ³)	Kaynak
Kanada	0,02-0,1	Bodik ve Kubaska (2013)
Macaristan	0,045-0,14	Bodik ve Kubaska (2013)
Avusturalya	0,1-0,37	Bodik ve Kubaska (2013)
Kaliforniya	0,002-0,04	Wakeel vd. (2016)
Çin	0,044-0,076	Li vd. (2017)

2.3.2. İkincil arıtma

İkincil arıtmada atıksu içerisinde bulunan proteinler gibi koloidal organik kirleticiler ve karbonhidratlar gibi çözünmüş organik maddeler arıtılmaktadır. İkincil arıtmanın gerçekleştiği biyoloji arıtma proseslerinde, atıksu içerisinde bulunan taneciklerin askıda kalması önemlidir. Bu yüzden mekanik veya yüzey havalandırma sistemleri kullanılarak yeterli oksijen ihtiyacının sağlanması gerekmektedir. Havalandırma üniteleri, ortama oksijen sağlamanın yanı sıra biyolojik arıtmayı gerçekleştiren mikroorganizmaların atıksuya ulaşmasını da sağlamaktadır (Plappally ve Lienhard 2012).

Havalandırma havuzlarında yeterli oksijenin sağlanabilmesi için tüketilen enerji miktarı 0,19-0,8 kW-sa/m³ arasında olmaktadır (Longo vd. 2016). Havalandırma üniteleri, AAT'lerin çoğunda önemli bir süreç olmakta ve AAT'lerin enerji tüketimlerinin yaklaşık %60-65'i bu prosesten kaynaklanmaktadır. Bu nedenle havalandırma havuzları

AAT'lerin enerji maliyetlerinin en büyük kısmını oluşturmaktadır (Bodik ve Kubaska 2013). AAT'lerde ikincil arıtmada enerji tüketimi Japonya'da 0,34 kW-sa/m³, İsveç'te 0,42 kW-sa/m³, Çin'de 0,29 kW-sa/m³ (Wakeel vd. 2016), Amerika'da 0,2 kW-sa/m³, Avusturalya'da 0,305 kW-sa/m³ (Soares vd. 2017), Çin'de 0,131-0,229 kW-sa/m³ (Li vd. 2017) gibi farklı değerler olarak belirlenmiştir (Çizelge 2.6).

Çizelge 2.6. AAT'lerde ikincil arıtma proseslerinde enerji tüketimleri

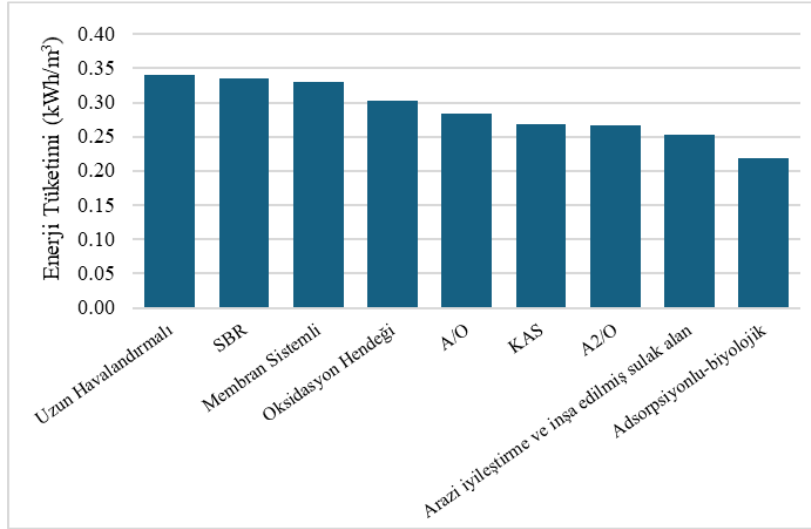
Yer	Enerji Tüketimi (kW-sa/m ³)	Kaynak
Japonya	0,34	Wakeel vd. (2016)
İsveç	0,42	Wakeel vd. (2016)
Çin	0,29	Wakeel vd. (2016)
Amerika	0,2	Soares vd. (2017)
Avusturalya	0,305	Soares vd. (2017)
Çin	0,131-0,229	Li vd. (2017)

Enerji tüketimleri biyolojik arıtma amacıyla uygulanan prosese büyük oranda bağlı olup, AÇ proseslerinde enerji tüketimleri, Japonya'da 0,30-1,89 kW-sa/m³, Avusturalya'da 0,46 kW-sa/m³, Amerika'da 0,33-0,60 kW-sa/m³, Çin'de 0,269 kW-sa/m³ olmaktadır. Oksidasyon hendeği prosesinde tüketilen enerji miktarı ise Avusturalya'da 0,5-1,0 kW-sa/m³, Çin'de 0,302 kW-sa/m³, Japonya'da 0,43-2,07 kW-sa/m³ enerji tükettiği belirlenmiştir (Bodik ve Kubaska 2013) (Çizelge 2.7).

Çizelge 2.7. İkinci arıtma proseslerinde enerji tüketimleri (Bodik ve Kubaska 2013)

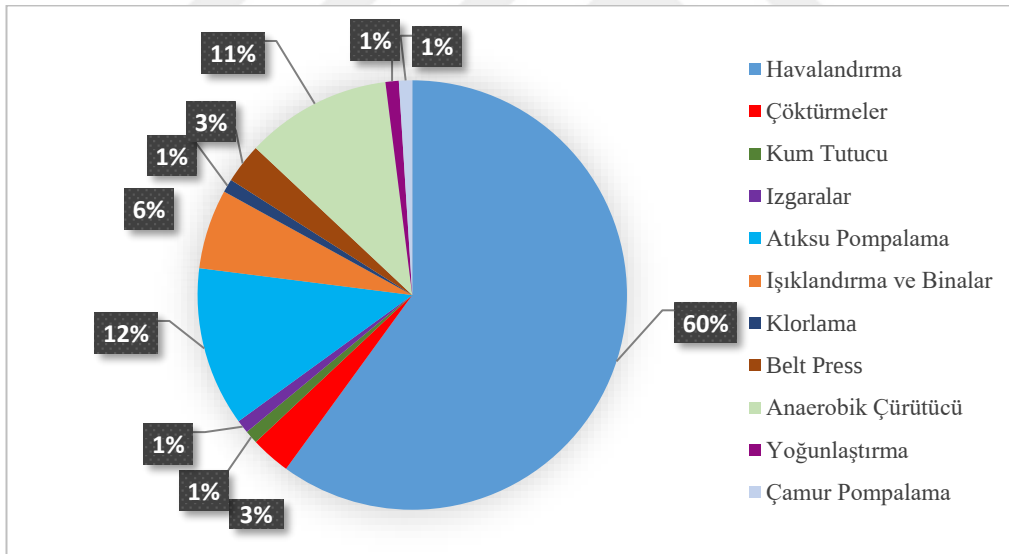
Arıtma Prosesi	Avusturalya	Çin	Amerika	Japonya
Lagünler	-	0,253	0,09-0,29	-
KAÇ	0,46	0,269	0,33-0,60	0,30-1,89
Oksidasyon Hendeği	0,5-1,0	0,302		0,43-2,07
Membran Biyoreaktör	0,10-0,82	0,33	0,49-1,5	-

Yang vd. (2010) yapmış oldukları çalışmada Çin'de farklı ikincil arıtma teknolojilerine sahip AAT'lerin ortalama enerji tüketimlerini bulmuşlardır. Şekil 2.5'te görüldüğü üzere, enerji tüketimleri uzun havalandırma sistemlerine sahip 13 AAT için 0,340 kW-sa/m³, ardışık kesikli reaktörlere sahip 103 AAT için 0,336 kW-sa/m³, membran sistemli 36 AAT için 0,330 kW-sa/m³, oksidasyon hendeği sistemli 170 AAT için 0,302 kW-sa/m³, anoksik-oksik prosesli 48 AAT için 0,283 kW-sa/m³, AÇ prosesli 36 AAT için 0,269 kW-sa/m³, anaerobik-anoksik-oksik prosesli 87 AAT için 0,267 kW-sa/m³, arazi iyileştirme ve inşa edilmiş sulak alanlı 10 AAT için 0,253 kW-sa/m³ ve adsorpsiyonlu-biyolojik sistemli 17 AAT için 0,219 kW-sa/m³ olarak belirlenmiştir. Bu çalışma sonuçlarına göre, biyolojik arıtma konfigürasyonu benzer olan AAT'lerdeki enerji tüketimlerinin benzer olduğu ortaya koyulmuştur (Yang vd. 2010).



Şekil 2.5. İkincil arıtma proseslerinin ortalama enerji tüketimleri (Yang vd. 2010)

Bir diğer çalışmada ise, AÇ prosesinin farklı aşamalarında enerji kullanımlarının oranı Şekil 2.6’da gösterildiği gibi belirlenmiştir (Gu vd. 2017). AÇ prosesi içerisinde bulunan havalandırma ünitelerinin, arıtma sisteminin en yüksek enerji tüketen bileşeni olduğu belirlenmiştir.



Şekil 2.6. AÇ prosesi bileşenlerinin enerji kullanımı oranları (Gu vd. 2017)

2.3.3. Üçüncül arıtma

İleri atıksu arıtma prosesleri, nütrient giderme prosesleri içermesi nedeniyle oldukça yüksek enerji tüketimi söz konusudur. Bu proseslerin Japonya’da 0,39-3,74 kW-sa/m³ enerji gerektirdiği gösterilirken, ABD’deki evsel AAT’lerinde ileri atıksu arıtma proseslerinin tipik olarak 0,43 kW-sa/m³ enerji tükettiği belirlenmiştir (Gu vd. 2017). Enerji tüketimi Tayvan’daki AAT’lerde ise 0,41 kW-sa/m³ olarak hesaplanmış olup ABD’deki AAT’lere benzemektedir. İleri atıksu arıtma proseslerinin Macaristan’da 0,45-

0,75 kW-sa/m³, Yeni Zelanda’da ise 0,49 kW-sa/m³ enerji tükettiği belirlenmiştir (Gu vd. 2016). Enerji tüketimleri, AAT’de kullanılan teknolojilere bağlı olarak değişmektedir. UV dezenfeksiyonu kullanan AAT’ler için $4,5 \times 10^{-2}$ -0,11 kW-sa/m³ olurken, kimyasalların dozajı için gereken mekanik ekipman için $9,0 \times 10^{-3}$ - $1,5 \times 10^{-2}$ kW-sa/m³, üçüncül filtreleme için $7,4 \times 10^{-3}$ - $2,7 \times 10^{-3}$ kW-sa/m³ arasında olmaktadır (Longo vd. 2016). Gu vd. (2017), içme suyu kaynakları için atıksuyun membranlar ve ters ozmoz (TO) yoluyla arıtılmasındaki önemli enerji tüketimi söz konusu olduğundan bahsetmektedir. TO prosesleri, yüksek enerji tüketmesine rağmen atıksu arıtımında etkili bir prostestir (Gu vd. 2017). TO ile ilgili yapılan araştırmalarda İspanya’da 0,8 kW-sa/m³, Suudi Arabistan’da ise 1,6 kW-sa/m³ enerji tüketimi olduğu ortaya koyulmuştur (Wakeel vd. 2016). Bir başka çalışmada ise Singapur’da evsel atıksulardan içme suyu üretmek için 0,72–0,92 kW-sa/m³ enerji tüketildiği belirlenmiştir (Bodik ve Kubaska 2013).

2.3.4. Çamur arıtımı

Arıtmanın farklı aşamalarında ve çamurun nihai bertarafında tüketilen enerji miktarı, genel elektrik dengesinin önemli bölümünü temsil etmektedir (Longo vd. 2016). Çamur arıtımı AAT’lerde enerji gereksiniminin fazla olduğu proseslerden oluşmaktadır. Mamais vd. (2015) Yunanistan’daki 10 AAT’ye odaklanan araştırmalarında, çamur arıtma proseslerinin AAT’lerin toplam enerji tüketiminin yaklaşık %8’ini oluşturan önemli enerji tüketimine sahip olduğunu göstermişlerdir. Fransa, Danimarka, Almanya ve Belçika’da bulunan AAT’lerde oluşan çamurların %14’ünden fazlası enerji elde etmek için yakılırken, ABD’de bu durum %25 Japonya’da ise %50’nin üzerindedir (Arnold ve Merta 2011). Mizuta ve Shimada (2010) AÇ prosesine sahip 985 Japon evsel AAT’sinde çamurun yakılıp yakılmaması ile ilgili yaptıkları çalışmada, kuru çamurun yakıldığı tesislerde enerji tüketiminin 0,38–1,49 kW-sa/m³ arasında, kuru çamurun yakılmadığı AAT’lerde ise 0,39–3,74 kW-sa/m³ arasında olduğunu belirlemişlerdir. Buradan da anlaşıldığı gibi çamurun yakılması ile elde edilen enerji, enerji tüketimini önemli ölçüde etkilemektedir. İtalya’da bulunan bir AAT’de atıksu arıtımı için kullanılan her bir sistem için elektrik enerjisi tüketimi Çizelge 2.8’de gösterildiği gibi belirlenmiştir (Panepinto vd. 2016). Genel elektrik enerjisi tüketimini tahmin etmek için, her bir ekipmanın çalışma süresi AAT verilerinden elde edilmiş ve hesaplamalar ekipmanların bir saatte tükettikleri enerjiden yola çıkarak yapılmıştır.

Çizelge 2.8. İtalya’da bulunan AAT’nin ünitelerinde tüketilen enerji miktarları

Ekipman/Proses	kW-sa/gün	%	Ekipman/Proses	kW-sa/gün	%
Izgara Sistemi-1	485	0,27	Ön Susuzlaştırma	4629	2,53
Izgara Sistemi-2	446	0,24	AD	25682	14,04
Kum ve Yağ Tutucu	1929	1,05	Son Susuzlaştırma	54	0,03
Ön Çöktürme	1665	0,91	Çamur		
Denitrifikasyon	14498	7,92	Şartlandırma	951	0,52
Konveyör	13581	7,42	Filtre presleri	3780	2,07
Blowerlar	92102	50,34	Santrifüj	10880	5,9
İkinci Çöktürme	518	0,28	Kurutma	2256	1,40
Fosfor Giderimi	59	0,03	Koku Giderme	16088	0,88
Filtrasyon	921	0,50	Boiler	785	0,43
Atıksu Kontrol Sistemi	3230	1,77	CHP santrali	2160	1,42
Toplam				182951	100

En fazla enerji tüketen ekipmanın havalandırma olduğu belirlenmiştir. Bu doğrultuda, AAT’lerde enerji verimliliğine yönelik çalışmalarda havalandırma ünitelerinin optimizasyonun önemli olduğu vurgulanmıştır. Longo vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada ise, AAT’lere ait literatür çalışması sonrasında AAT’lerde kullanılan ekipmanlara göre enerji tüketimleri Çizelge 2.9’da görüldüğü gibi belirlenmiştir.

Çizelge 2.9. AAT’de kullanılan ekipmanların enerji verileri (Longo vd. 2016)

Kapasite	NE<2k	2 k<NE<10 k	10k<NE<50k	50k<NE<100k	NE>100k
AAT Sayısı	3	6	18	13	36
Ortalama Debi (m ³ /gün)	102	1303	4966	18,713	188,464
<i>Birincil Arıtma</i>					
Pompalama		2,2x10 ⁻²	3,9x10 ⁻²	4,2x10 ⁻²	4,1x10 ⁻²
Mikro Izgaralar			0,023		4,2x10 ⁻³
Izgaralar	1,2x10 ⁻²	3,8x10 ⁻³	1,4x10 ⁻³	1,0x10 ⁻⁴	2,9x10 ⁻⁵
Öğütücüler			3,9x10 ⁻³		
Kırma		1,1x10 ⁻⁵	6,6x10 ⁻³	5,4x10 ⁻³	2,7x10 ⁻³
Ön Çöktürme			7,1x10 ⁻³	4,8x10 ⁻³	4,3x10 ⁻³
<i>İkincil Arıtma</i>					
İkincil Arıtım					
Damlatma Filtresi			8,0x10 ⁻²	0,14	0,18
Anoksik Karıştırıcı		5,3x10 ⁻¹	6,8x10 ⁻²	7,0x10 ⁻²	0,16
Çamur geri devri		1,0 x10 ⁻²		4,7x10 ⁻²	
Blowerlar	0,8	0,21	0,18	0,22	0,19
Son Çöktürme		1,2x10 ⁻²	5,5x10 ⁻³	7,1x10 ⁻³	8,4x10 ⁻³
Çamur Devridaimi	0,23	7,9x10 ⁻²	2,9x10 ⁻²	1,1x10 ⁻²	7,9x10 ⁻³
Biyofiltrasyon			7,1x10 ⁻²	6,9x10 ⁻²	5,5x10 ⁻³
MBR			0,63	0,72	0,38
SBR			0,22	0,29	0,15
<i>Üçüncül Arıtma</i>					
Kimyasallar			1,1x10 ⁻²	1,5x10 ⁻²	9,0x10 ⁻³
Klor			2,0x10 ⁻⁴	2,7x10 ⁻⁴	8,8x10 ⁻⁴
Üçüncü Filtrasyon (Pompalama)			2,9x10 ⁻²	5,9x10 ⁻²	1,4x10 ⁻²
Üçüncü Filtrasyon			2,7x10 ⁻²	1,3x10 ⁻²	7,4x10 ⁻³
Ultraviyole Lambalar			4,5x10 ⁻²	6,2x10 ⁻²	0,11
<i>Çamur Arıtımı</i>					
Birinci Çamur Çöktürücü			1,7x10 ⁻⁴		1,8x10 ⁻⁴
Fazla Çamur Pompası		1,6x10 ⁻²	4,5x10 ⁻³		7,3x10 ⁻⁴
Yer Çekimli Susuzlaştırma	9,2 x 10 ⁻³	3,7x10 ⁻³	2,7x10 ⁻³	2,1x10 ⁻³	1,9x10 ⁻³
Santrifüj Susuzlaştırma			1,6x10 ⁻²	1,5x10 ⁻²	1,8x10 ⁻²
Yüzeysel yoğunlaştırma			1,4x10 ⁻²		3,5x10 ⁻²
Aerobik Çürütme (Karıştırıcı)		2,6x10 ⁻²			
Aerobik Çürütme (Blower)	0,53	4,5x10 ⁻²	0,17	0,15	2,4x10 ⁻²
Anaerobik Çürütme (AD)				2,9x10 ⁻²	3,2x10 ⁻²
Motor Gazı Devridaimi			1,9x10 ⁻²		3,1x10 ⁻³
Çamur Isıtma			3,5x10 ⁻³		2,4x10 ⁻³
Vakum Filtre			1,5x10 ⁻²		9,8x10 ⁻³
Yakma			1,2x10 ⁻²		0,7x10 ⁻³
Santrifüj susuzlaştırma		1,8x10 ⁻²	2,0x10 ⁻²	2,3x10 ⁻²	2,7x10 ⁻²
Belt Filter				1,2x10 ⁻²	1,0x10 ⁻³
Belt Pres			4,0x10 ⁻³	4,8x10 ⁻³	4,9x10 ⁻³
Fermantasyon			3,0x10 ⁻²	9,5x10 ⁻³	1,6x10 ⁻⁴

2.4. AAT’lerde Enerji Verimliliği Sağlama Yöntemleri

Enerji, genellikle AAT’nin işletme ve yönetim bütçesinde önemli paya sahiptir. Enerjinin azaltılması, yalnızca potansiyel maliyetlerin düşürülmesine fayda sağlamakla kalmaz, aynı zamanda karbon ayak izinin azaltılmasını ve işletmenin sürdürülebilirliğinin artırılmasını sağlar (Van Horne vd. 2012). AAT’lerde enerji tüketimi azaltma yöntemleri iki ana başlık altında toplanmaktadır. İlk yöntem AAT’de uygulanan farklı süreçlerde kullanılan ekipmanların geliştirilmesine odaklanırken, ikinci yöntem geleneksel arıtma teknolojilerinin yenilikçi arıtma teknolojileri ile değiştirilmesiyle enerji tüketiminin azaltılmasına odaklanmaktadır (Maktabifard vd. 2018). Şu ana kadar yapılmış çalışmalarda AAT’lerdeki enerji verimliliği sonuçları, AAT’lerin enerji tasarrufu potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Elde edilen enerji tasarrufları %20-40 arasında değişebilmekte olup, bazı geliştirilen proseslerle %75 enerji tasarrufunun elde edildiği örnekler de mevcuttur (Panepinto vd. 2016).

2.4.1. Mekanik cihazlarda enerji tüketiminin azaltılması

AAT’lerin büyüklüğünden bağımsız olarak, enerji tüketimlerinin %50-60’ı biyolojik arıtma aşamasında havalandırma uygulanmasından kaynaklanmaktadır (Çizelge 2.4). Bu nedenle, AAT’lerde en fazla enerji tasarrufu havalandırma ünitelerinden sağlanabilmektedir. Literatürde havalandırma ünitelerinde enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik birçok çalışma bulunmaktadır. Boncescu ve Robescu (2017), yaptıkları çalışmada mekanik yüzey havalandırıcılar dahil olmak üzere farklı havalandırma üniteleri üzerinde laboratuvar ölçekli bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. 416 m³ hacimli suyun havalandırılması için, yüzey havalandırıcıların kullanımı sonucu %2,3 oksijen verimi ile 25 kW-sa enerji tüketimi gerçekleşirken, ince kabarcıklı havalandırıcılar kullanıldığında %23 oksijen verimi ile 8,2 kW-sa enerji tüketimi olmuştur. Böylece, ince kabarcıklı havalandırıcılar ile daha yüksek oksijen verimi sağlanırken daha az enerji tüketildiği ortaya koyulmuştur. Füreder vd. (2017) yaptıkları çalışmada havalandırma tankında farklı geometriler deneyerek, havalandırma ve karıştırıcı konumu açısından uygun koşullar altında karıştırma enerjisinin 24 Wh/m³gün’ün altına düşürülebileceğini belirlemişlerdir. Havalandırma süreçlerinin otomatik kontrolünün yapılması, reaktör içindeki dinamik koşullara hızla uyum sağlayarak önemli miktarda enerji tasarrufu sağlayan önemli enerji tasarrufu önlemlerinden biri olmaktadır (Maktabifard vd. 2018).

Biyolojik proseslerin gerçekleşebilmesi için gerekli olan oksijen miktarı, giren organik yük ile doğru orantılıdır. Bu nedenle gerekli olan çözünmüş oksijen (ÇO) miktarı gecenin ortasında azalırken, sabah ve akşam zirveye ulaşmaktadır (Maktabifard vd. 2018). Maksimum gerekli ÇO ihtiyacının, minimum ÇO ihtiyacına oranı tipik olarak 2:1 olmaktadır (Maktabifard vd. 2018). ÇO konsantrasyonlarının debinin az geldiği zamanlarda azaltılması havalandırma için gereken enerji miktarının daha düşük olmasını sağlamaktadır. Bu uygulama ile önemli ölçüde enerji tasarrufunun yanı sıra sera gazı emisyonlarının azalmasının sağlanabileceği varsayılmaktadır (Mamais vd. 2015). Ama ÇO ayar noktalarının aşırı düşürülmemesi gerekmektedir. Çünkü bu durum daha yüksek N₂O oluşmasına yol açmakta ve dolayısıyla enerjiyle ilgili sera gazı emisyonlarının artmasına sebep olmaktadır (Maktabifard vd. 2018). AAT’lerde mevcut olarak kullanılan havalandırma sistemlerinde enerji verimliliğini arttırmak için ÇO kontrol yöntemlerinin yeniden yapılandırılması, değiştirilmesi ve AAT model tabanlı ÇO optimizasyonu gibi

yöntemlerin uygulanması önerilmektedir (Pittoors vd. 2014). Çizelge 2.10’da AAT’lerde enerji tüketimini azaltmaya yardımcı olan çeşitli havalandırma kontrol stratejileri özetlenmektedir.

Çizelge 2.10. Farklı havalandırma kontrol stratejilerinin özeti

Kontrol Yöntemi	Açıklama	Kaynaklar
Ayarlanmış bir ÇO ile hava kontrolü	Manuel olarak kontrol edilen sistemlere kıyasla %20–40 enerji tasarrufu	Amand vd. (2013)
Aralıklı havalandırma	Geleneksel sisteme kıyasla %10–15 enerji tasarrufu, iyileştirilmiş TN/TP giderme verimliliği (pilot ölçek)	Liu ve Wang (2017), Sanchez vd. (2018)
ABAC	Amonyak ve/veya nitrat sensörleri ile ileri beslemeli ve/veya geri beslemeli kontrolörler kullanarak amonyak bazlı havalandırma kontrolü	Rieger vd. (2014)
AVN	NH ₄ -N/NO _x -N biyoreaktör çıkışında kontrol	Regmi vd. (2014)
BIOS	Giriş sıcaklığı, akış hızı, NH ₄ -N, NO ₃ -N ve KM’nin çevrimiçi ölçümlerine dayalı ileri beslemeli havalandırma optimizasyonu	Ho vd. (2014)

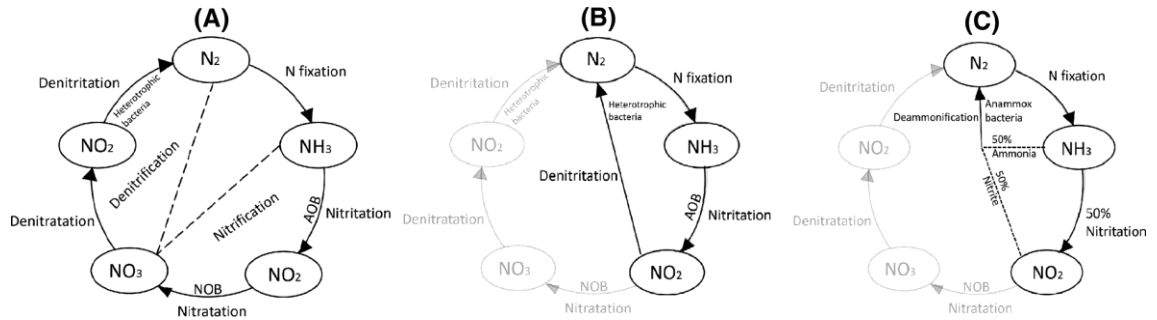
AAT’lerde önemli enerji tüketicilerinden biri de pompalama üniteleridir. Pompalama üniteleri enerji tüketimi açısından çoğu durumda havalandırma ünitelerinden sonra ikinci sırada yer almaktadır (WEF 2009, Saghafi vd. 2016). Pompalama ünitelerinin iyileştirilmesi, AAT’lerde uygulanan geleneksel bir enerji tasarrufu yöntemidir. Bu sebeple pompalama ünitelerindeki motorların daha verimli hale getirilmesi ve bakımlarına dikkat edilmesi önerilmektedir (Jenkins ve Wanner 2014). Ayrıca, karıştırıcılar, tasarım kapasitesine bağlı olarak AAT’lerinin toplam enerjisinin yaklaşık %5-20’sini kullanmaktadır. Güç yoğunluğunun ve günlük çalışma süresinin azaltılması, karıştırıcıların tükettiği enerjiyi azaltmak için başlıca yapılması gerekenler olarak bildirilmiştir (Füreder vd. 2017).

2.4.2. Azot gidermenin yeni yolları

Amonyakın azot gazına dönüştürülmesi, öncelikle nitrifikasyon prosesleri için yüksek oksijen gereksinimi nedeniyle enerji tüketen proseslerden biri olmaktadır. Azot giderme prosesleri arasında nitritasyon/denitritasyon ve deammonifikasyon (kısmi nitritasyon/anammox) prosesleri, enerji tasarrufu açısından en yenilikçi prosesler arasında yer almaktadır (Maktabifard vd. 2018). Şekil 2.7’de azot gidermenin farklı yolları gösterilmiştir (Soliman ve Eldyasti 2016).

2.4.2.1. Nitritasyon/Denitritasyon uygulanarak enerji tüketimin azaltılması

Geleneksel nitrifikasyon/denitrifikasyon prosesinde nitrifikasyon yüksek miktarda oksijen gerektirirken, denitrifikasyon organik karbon gerektirmektedir. Zorlukların üstesinden gelmek ve azot giderimi için gereken enerjiyi azaltmak için nitritasyon/denitritasyon (nitrite shunt) adı verilen kısayol biyolojik azot giderimi geliştirilmiştir (Maktabifard vd. 2018).



Şekil 2.7. Azot döngüsünde proseslerin karşılaştırılması **a)** Geleneksel azot giderimi **b)** nitritasyon/denitrifikasyon **c)** deammonifikasyon (Soliman ve Eldyasti 2016)

Nitrit, hem nitrifikasyon hem de denitrifikasyonda bir ara bileşik olduğundan, nitritasyon/denitrifikasyon prosesi, nitriti nitrate oksitlemek yerine, nitrifikasyonun ilk adımında üretilen nitritin heterotrofik bakteriler yardımıyla doğrudan azot gazına dönüştürülmesine dayanmaktadır (Soliman ve Eldyasti 2016). Bu amaca ulaşmak için nitrit oksitleyici bakteriler inhibe edilerek nitrat oluşumu engellenmektedir (Miller vd. 2015).

Nitritasyon/denitrifikasyon prosesi kullanılarak, nitritin nitrate oksidasyonunun atlanmasından dolayı oksijen tüketimi %25 oranında azalmaktadır. Bunun sonucu olarak da havalandırma üniteleri için harcanan enerji %60 oranında azalmaktadır (Maktabifard vd. 2018). Bunlara ek olarak nitritasyon/denitrifikasyon prosesinde nitratın nitrite indirgenmesinin atlanmasından dolayı organik karbon kullanımında %40 ve çamur üretiminde %35-55 oranında önemli bir azalma sağlanmaktadır. Ancak bu prosesin en büyük dezavantajı nitrit oksitleyici bakterileri inhibe etmek için yüksek sıcaklıklar ve hassas pH ayarları uygulanması gereklisidir.

2.4.2.2. Deammonifikasyon uygulanarak enerji tüketimin azaltılması

Amonyak açısından zengin olan atıksular, organik karbon kaynağı gerekli olmaksızın, geleneksel nitrifikasyon-denitrifikasyon proseslerinde kullanılan havalandırma enerjisinden daha azını gerektiren ototrofik deammonifikasyon prosesleriyle de arıtılabilmektedir (Siegrist vd. 2008). Deammonifikasyon prosesi atıksuda bulunan amonyağın yarısının nitrite oksitlendiği kısmi nitritasyon prosesi ile ardından uygulanan anammox prosesini içermektedir. Anammox (anaerobik amonyum oksidasyonu) prosesi amonyağın anaerobik koşullar altında azot gazına indirgendiği bir azot giderme prosesisidir (Kartal vd. 2011). Ham atıksudaki nitritin sınırlı bir kaynak olduğu göz önünde bulundurulduğunda, kısmi nitritasyon anammox prosesinin ön prosesini oluşturmaktadır (Gao ve Xiang 2021). Böylece deammonifikasyon prosesi iki aşamalı bir azot giderme prosesisidir. İlk aşama olan kısmi nitritasyon prosesinde 0,5 mol amonyumu nitrite indirgenmekte ve ardından, ikinci adım olan anammox prosesinde kalan 0,5 mol amonyum indirgenen nitrit elektron alıcısı olarak kullanılarak azot gazına dönüşmektedir (Kartal vd. 2011). Azot giderimi için nitrifikasyon/denitrifikasyon prosesi yerine deammonifikasyon prosesi kullanıldığında, %62,5 oksijen verimliliği ve neredeyse %100 karbon verimliliği elde edilebilmektedir (Lackner vd. 2014). Bu nedenle, deammonifikasyon prosesi, araştırmaların odak noktası haline gelmiştir.

Jonasson (2007) tarafından Avusturya’da bulunan Strass AAT’nde nitrifikasyon/denitrifikasyon prosesi deammonifikasyon ile değiştirilmiş ve bu sayede enerji tüketimi %12 oranında azaltılmıştır. Deammonifikasyonun bir diğer faydası ise ototrofik mikroorganizmalar kullanıldığı için, geleneksel nitrifikasyon/denitrifikasyon prosesine kıyasla az çamur oluşmasıdır. Deammonifikasyon prosesinde organik karbon kullanılmadığı için anaerobik çürütme (AD) ile elde edilen biyogazdaki metan içeriğinin %59’dan %62’ye yükseldiği belirlenmiştir (Jonasson 2007). Kartal vd. (2010) yaptıkları çalışmada enerji tüketimi ve üretimine dayalı tam ölçekli geleneksel AAT ve anammox ile optimize edilmiş AAT’yi karşılaştırmışlardır. Anammox ile optimize edilmiş olan tesisin enerji tüketimi 17 kW-sa/NE.yıl, geleneksel arıtmada enerji tüketimi ise 30 kW-sa/NE.yıl olarak belirlenmiştir. Anammox teknolojisi kullanılarak enerji tüketiminde %44’lük bir azalma elde edilmiştir. Anammox teknolojisiyle optimize edilmiş olan AAT’dan AD kullanılarak 26 kW-sa/NE.yıl enerji üretimi elde edilmiştir. Geleneksel AAT’de ise AD ile 14 kW-sa/NE.yıl enerji üretimi olmuştur. Böylece, AAT’lerin enerji tüketen AAT yerine anammox teknolojisi kullanılarak yılda 9 kW-sa/NE enerji üreten AAT haline getirilebileceği ortaya koyulmuştur.

Anammox prosesi az enerji ihtiyacı nedeniyle büyük avantajlar sunsa da dezavantajları da mevcuttur. En önemli dezavantajı anammox bakterilerinin çok yavaş çoğalması ve işletme koşullarına oldukça hassas olmalarıdır (Kartal vd. 2010). Bu durum, Anammox prosesinin klasik nitrifikasyon/denitrifikasyon prosesine kıyasla çok daha kontrollü işletme ve uzun bekletme süreleri gerektirmesine sebep olmaktadır.

2.4.3. Enerji geri kazanımı sağlayan yöntemler

AAT’lerde enerjiyi geri kazanmak için çeşitli teknolojiler ve metotlar bulunmaktadır. Enerji geri kazanımı için, anaerobik çürütme ile enerji üretimi ve ayrıca termal enerji, güneş enerjisi ve hidro enerji ile enerji geri kazanımına yönelik çalışmalar yürütülmüştür.

2.4.3.1. Anaerobik çürütme ile enerji geri kazanımı

Anaerobik çürütmede (AD) arıtma çamurlarından üretilen biyogaz, küçük konsantrasyonlarda azot, hidrojen, sülfür ve diğer bileşenlerle birlikte esas olarak yaklaşık %60-67 metan ve %30-40 karbon dioksitten oluşmaktadır. Metan enerji ihtiyacı için doğalgazın yerine kullanılabilir alternatif bir gazdır (Tyagi ve Lo 2011; Bachmann vd. 2015). Metanın (CH₄) 25°C’deki enerji değeri yaklaşık 10 kW-sa/m³ olmaktadır. Biyogazın metan içeriği çürütülen atıklara göre değişim gösterse de ortalama hacimce %65 olduğu için AAT’lerde elde edilen biyogazın ısı değeri 6,5 kW-sa/m³ olmaktadır (Maktabifard vd. 2018). AD prosesi ile enerji üretimi arıtma çamuru oluşumu fazla olan, yaklaşık 22.000 m³/gün’den daha büyük kapasiteye sahip AAT’ler için verimli olan bir yöntemdir (Maktabifard vd. 2018). AD’dan elde edilen enerji sayesinde AAT’lerin enerji gereksiniminin karşılanıp, enerji tüketimleri önemli ölçüde azaltılabilmektedir.

Mevcut AAT’lerde enerji gereksinimlerini azaltmak için en kolay uyarlanabilir yaklaşım, kombine ısı ve güç (CHP) santrallerinde kojenerasyon yoluyla geleneksel AD’dan üretilen CH₄’ün tam olarak kullanılmasını sağlamaktır (McCarty vd. 2011; Lee vd. 2017). ABD’de AD kullanan 544 AAT’nin AD prosesinin CHP santraline bağlanması halinde, enerji azaltımının yaklaşık 430.000 arabanın emisyonlarını ortadan kaldırmaya

eşdeğer olacağı tahmin edilmiştir (Bastian vd. 2011). Soda vd. (2010) yaptıkları çalışmada, bir model geliştirerek Japonya-Osaka'da bulunan bir AAT'nin enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarının tahmininin yanı sıra AD tarafından elde edilen enerji potansiyelini değerlendirmişlerdir. Ekonomik ve çevre dostu yaklaşımı belirlemek için AD enerji geri kazanımı ile farklı arıtma konfigürasyonu oluşturulmuştur ve enerji ihtiyaçları hesaplanmıştır. Enerji ihtiyacının %50'sine kadar karşılanabilmesini sağlayan yüksek AD yükleme oranına sahip arıtma konfigürasyonu en uygun alternatif olarak bulunmuştur. Ancak AD'den kısmen çürütülmüş çamurun düzenli olarak depolanmasının, çevreye yüksek CH₄ ve N₂O salınımı riski taşıdığı rapor edilmiştir. Stillwell vd. (2010) yaptıkları çalışmada, Amerika Teksas'taki AAT'lerde AD ve yakma teknikleriyle çamurdan enerji geri kazanım durumunu analiz etmişlerdir. Çalışma sonucunda biyogazdan elde edilen enerjiyle AAT'nin enerji ihtiyacının %2,1 ila %26 arasında, arıtma çamurların yakılması ile ise %2,5 ila %27 arasında karşılanabileceğini tespit etmişlerdir. Ayrıca AD ve yakma kombinasyonu ile Teksas'taki AAT'lerde enerji ihtiyacının karşılanmasıyla şehrin elektrik enerjisi tüketiminin %4,7-83 azaltılabileceği belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, aynı zamanda ABD'deki bazı AAT'lerin üretilen biyogazı verimli kullanmadığı ve atmosfere saldıgını da belirlenmiştir.

Silvestre vd. (2015) yaptıkları çalışmada, İspanya'da bulunan beş AAT'yi enerji açısından incelenmiştir. AAT'lere ait mevcut bilgilere göre, biyogazla çalışan bir CHP motoru tarafından elektrik enerjisi üretim miktarı tahmin edilmiştir. AAT'lerin konfigürasyonuna ve işletimine bağlı olarak toplam üretilen elektrik enerjisinin %39-76'sının üretilen biyogazdan sağlanabileceğini tespit etmişlerdir. Grasham vd. (2019) yaptıkları çalışmada, AAT'lerde katı oksit yakıt hücresi sisteminin yanı sıra yeni bir amonyak geri kazanım sistemi geliştirmişlerdir. Tüm proseslerin modellenmesi sonucunda, elektrik enerjisi üretimi %45 oranında artarken, AAT'nin tükettiği enerjide %6 oranında azalmanın mümkün olduğu belirlenmiştir. Önerilen sistemle sera gazı emisyonlarında kişi başına 3,4 kgCO₂/yıl bir azalmanın da olabileceği rapor edilmiştir.

Organik atıkların evsel atıksuyla birlikte çürütülmesi AAT'lerin enerji geri kazanımını önemli ölçüde arttırabilmektedir (Maktabifard vd. 2018). Ham çamurun gıda atıklarıyla birlikte çürütülmesiyle daha yüksek metan üretim verimi ve hızı elde edilebilmektedir (Koch vd. 2015). Organik atıklarının çürütülmesi, çamurun çürütülmesine kıyasla yaklaşık 3 kat daha yüksek biyogaz üretim verimi sağlamaktadır (Weiland 2010). AD'nin organik atıkların arıtılması için kullanılması, ekonomik olduğu kadar çevresel yönleri de içeren çeşitli nedenlerden dolayı cazip olmaktadır (Lettinga 2001; Barton vd. 2008). Enerji bağımsızlığı açısından, yüksek enerji içeriğine sahip gıda atıklarından enerji elde etmek daha önemli hale gelmiştir (Ho vd. 2014).

Nowak vd. (2014) yaptıkları çalışmada, Avusturya'daki iki evsel AAT'de arıtma çamurlarına organik atıklar eklenerek toplam enerji tüketiminin, AD ile üretilen enerjiden daha az olmasını sağlamışlardır Koch vd. (2016) yaptıkları çalışmada, AAT'lerin kendi kendine yeterliliği için arıtma çamuruna %10 oranında organik atık eklemişler ve böylece biyogaz üretiminin iki katına çıktığını tespit etmişlerdir. Biyogaz üretiminin iki katına artmasının sebebinin arıtma çamuruna organik atıkların eklenmesiyle C/N oranının daha uygun bir orana ulaşması olduğu bildirilmiştir. Gıda atıklarının eklenmesiyle AAT'nin karşılanan enerji ihtiyacının %25'ten %78'e kadar çıkarılması sağlanmıştır. Almanya'da bulunan 176 AAT'nin karşılaştırılmasının yapıldığı bir çalışmada AAT'lerin %44'ünde yardımcı karbon kaynaklarının kullanılması sayesinde enerji nötrlüğü elde edildiği rapor

edilmiştir (Koch vd. 2016). Whiting ve Azapagic (2014) yaptıkları çalışmada, AD prosesinde tarımsal atıkların arıtma çamurları ile birlikte çürütülmesi ve ardından CHP santrali ile ısı ve enerji elde edilmesini içeren sistemin yaşam döngüsü analizini (YDA) değerlendirmiştir. Yapılan YDA sonucunda, küresel ısınma potansiyelinin fosil yakıt alternatifleriyle karşılaştırıldığında %50'ye kadar azaltılabileceği belirlenmiştir. Maalouf ve El-Fadel (2020) yaptıkları çalışmada, AAT'nin karbon emisyonlarını ve maliyetini en aza indirmek için entegre bir atık yönetimi aracı olan katı atık ve atıksu yönetim sistemi geliştirmişlerdir. Kentsel katı atık kombinasyonu ile birlikte AD ve yakma kullanılarak enerji geri kazanımı sağlanmıştır. Sonuçlar, organik atıklarının çamurla birlikte AD'de çürütülmesiyle hem enerji geri kazanımı yoluyla en iyi sonuç elde edilebileceğini hem de %93'e kadar emisyon azaltımı sağlanabileceğini göstermiştir.

2.4.3.2. Termal enerjiyle enerji geri kazanımı

AAT'lerde elde edilen termal enerji, gelen atıksuyun sıcaklığına göre değişkenlik göstermektedir. Atıksudaki her 10 °C sıcaklık farkı için mevcut termal enerji 41,9 MJ/m³ olup, bu enerji ısı pompası kullanılarak geri kazanılabilmektedir (Gude 2015). Hao vd. (2015) tarafından yapılan araştırmada, su kaynaklı ısı pompalarının 1 m³ atıksu -272,15 °C soğutulduğunda 0,26 kW-sa net elektrik eşdeğeri sağlayabileceği belirlenmiştir.

Atıksudan elde edilen termal enerji, yeterli termal enerjinin gerekli olduğu alanları ısıtabilir veya soğutabilir. Diğer geleneksel ısı pompası kaynaklarına (yeraltı suyu, jeotermal ısı, dış hava vb.) kıyasla atıksu veya gri su, bulaşık makinesi, duş ve endüstriyel tesisler gibi sıcak kaynaklardan geldiği için nispeten sıcaktır. Atıksu sıcak olduğu durumlarda, düşük sıcaklıkta olan çamurun kurutulması gibi prosesler için de kullanılabilir (Chae ve Kang 2013). Avusturya'da Avrupa Enerji Verimliliği Direktifi'nin uygulanması, atıksudan ısı geri kazanımını nihai enerji tüketimini azaltmanın bir yolu olarak tanımlamaktadır (EU 2012). İsviçre ve Almanya gibi birkaç Avrupa ülkesinde, atıksuyun termal enerjisi kullanılarak enerji elde edilmesine dair uygulamalar enerji politikalarına dahil edilmiştir (Neugebauer vd. 2015). Atıksudan enerji geri kazanımı sağlayabilmek için ısı eşanjörleri ve ısı pompaları kullanılabilir (Cornel vd. 2011). Termal enerjiyle enerji geri kazanımı, çevre dostu olmasının yanı sıra, ekonomik olarak da rekabetçi olmaktadır. Avusturya'da bu yöntem kullanılarak, oda ısıtması için harcanan sera gazı emisyonlarının %17'ye kadar azaltılabileceği belirlenmiştir (Culha vd. 2015).

2.4.3.3. Hidroelektrik enerjisiyle enerji geri kazanımı

Atıksuyun debisi ve basıncı, bir hidroelektrik santrali tasarımında iki temel parametre olmaktadır (Maktabifard vd. 2018). AAT'lerde gelen suyun debisi mevsimsel olarak çeşitli faktörlerden etkilenir ve debide önemli farklılıklar oluşturmaktadır. Chae ve Kang (2013) yaptıkları çalışmada, Kore'de bulunan AAT'de, atıksu deşarjına 10 kW-sa'lık küçük bir hidroelektrik santrali kurmuşlardır. Ancak, çok az miktarda enerji üretimi ile AAT'nin enerji tüketimine yaklaşık %1'lik bir katkı sağlanabileceği belirlenmiştir. Bununla birlikte, bir hidroelektrik santralinin AAT'ne dahil edilmesinin, tüm yıl boyunca işletilebildiği için her zaman kazançlı olabileceğini vurgulamışlardır.

Power vd. (2014) yaptıkları çalışmada, İrlanda'da ve İngiltere'de bulunan AAT'lerin atıksu deşarjlarında hidroelektrik türbinleri kurularak enerji geri kazanımı

açısından sektörün sürdürülebilirliğinde iyileştirme potansiyeli olduğunu göstermişlerdir. İrlanda ve İngiltere’de bulunan 100’den fazla AAT’den atıksu deşarj debileri ve basma yüksekliği verileri toplanmıştır. Hem kısa vadede hem de uzun vadede (demografik ve iklim değişikliklerinden dolayı) deşarj debisi değişiminin türbin seçimi ve türbin verimliliği üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu bulmuşlardır. 2010 yılında Kore hükümeti, nispeten daha yüksek net düşüye (>2 m) ve yeterli günlük akışa (>20.000 m³) sahip 15 AAT’nin yıllık olarak işletilebilir hidroelektrik potansiyeli miktarı olarak 11 GW-sa’lik bir tahmininde bulunmuştur (Chae vd. 2015). Avusturya Viyana’da bulunan AAT’de hidroelektrik enerji geri kazanımı gerçekleştirilmiştir. AAT’nin işletilmesi için gereken enerji ihtiyacı 480 kW-sa/yıl olarak belirlenmiştir. 560.000 m³/gün debiye sahip artırılmış atıksu, tesis çıkışından 5 m yükseklikten Tuna Nehri’ne kot düşümü ile deşarj edilmektedir. Böylece, AAT’ye kurulan dikey eksenli türbin sayesinde yılda 1,5 milyon kW-sa enerji üretilebilmektedir (Gude 2015).

AAT’lerde hidroelektrik sistemlerinden enerji geri kazanımına yönelik fazla basma yüksekliği eksikliği ve debi değişimleri gibi engeller bulunmaktadır (McNabola vd. 2014). AAT yüksek debiye sahip olmadıkça veya devlet teşvikleri olmaksızın, AAT’lere hidroelektrik türbini kurmak ekonomik olarak uygun olmamaktadır (Maktabifard vd. 2018).

2.4.3.4. Güneş enerjisiyle enerji geri kazanımı

Fotovoltaik (PV) paneller, 2010 yılında küresel anlamda üretilen elektrik enerjisinin yaklaşık olarak yalnızca %0,1’ine katkı sağlarken bu durumun 2030’da %5’e, 2050’de ise %11’e kadar artış sağlayacağı ve PV panellerin daha fazla rağbet görüleceği öngörülmektedir. PV panel uygulamasıyla birlikte 2050 yılında 2,3 GtCO₂ salınımının azaltılacağı öngörülmektedir (Frankl vd. 2010).

Yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda, Güney Kore’deki AAT’de yalnızca çatı alanlara kurulan 96 kW’lık bir PV sisteminin 150,7 MW-sa’ye kadar elektrik enerjisi üretebileceği tahmin edilmektedir (Chae ve Kang 2013). Xu vd. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada teorik olarak Çin’de bulunan bir AAT’ye monokristal hücreler kullanan PV sistemi kurulursa elektrik ihtiyacının neredeyse %80’inin üretilebileceği hesaplanmıştır. Avustralya’da bulunan Doğu Lismore AAT’nde ise bir taşma havuzunun (overflow pond) yüzeyinde yeni bir güneş enerjisi santrali uygulanmasıyla tesisin toplam enerji tüketiminin %12’sini kapsayan yılda 180.000 kW-sa elektrik üretebildiği rapor edilmiştir (Harper 2017).

Hindistan’daki AAT’lerde çamur kurutma için güneş ısısı kullanılması nedeniyle 0,14 kW-sa/m³ enerji tüketimi olduğu rapor edilmiştir (Singh vd. 2016). Nguyen vd. (2020) yaptıkları çalışmada, AAT’ler için hibrit yenilenebilir enerji ve enerji depolama sisteminin optimum boyutlandırılması için bir güç yönetimi modeli geliştirilmiştir. Model sonucunda belirlenen optimum yenilenebilir enerji konfigürasyonu 5 rüzgâr türbini ve 165 adet PV içermekte olup, ekonomik ve çevresel talepler dikkate alındığında AAT’nin toplam enerji ihtiyacının %85’inin bu sistem ile sağlanabileceği belirlenmiştir.

Han vd. (2013) yaptıkları çalışmada, güneş enerjisi PV panellerden elektrik enerjisi üretimiyle AAT’lerin çevresel sürdürülebilirliğini daha iyi hale getirmeye çalışmışlardır. Pil depoları oldukça maliyetli olduğundan dolayı kurulan sistemi daha

ekonomik hale getirebilmek için pil deposu kullanılmamıştır. Tesisin biyolojik ünitesi aerobik-anoksik-anaerobik süreçleri içeren bir oksidasyon hendeğinden oluşmaktadır. Pil deposu olmadan gerçekleştirilen bu sistemde oksidasyon hendeği geceleri yani enerji eldesinin az olduğu veya hiç olmadığı zamanlarda anaerobik ve anoksik koşullarda çalıştırılırken, gündüzleri yani PV panellerden enerji eldesi olduğu zamanlarda aerobik koşullarda çalıştırılmıştır. AAT'ye gelen organik madde yükleri gündüzleri daha fazla olduğu için bu uygulama atıksudaki azotun ve fosfatın giderimi için son derece elverişli olmuştur. Bu proses ile %88 KOİ, %98 amonyak, %70 toplam azot ve %83 toplam fosfor gibi yüksek giderim verimleri sağlanmıştır.

Hao vd. (2015), Çin'in Pekin şehrinde bulunan anoksik-anaerobik-aerobik arıtma içeren bir evsel AAT'de, karbon nötrlüğünü sağlamak ve enerji geri kazanımı için AD ve ısı pompaları kullanılmıştır. Yenilenebilir enerji üretimi ise kullanılan PV panellerle değerlendirmişlerdir. AAT'nin enerji gereksiniminin yaklaşık olarak %50'si çamurun anaerobik çürütülmesinden ve ısı pompası kullanılmasından geri kazanılmıştır. AAT'nin enerji gereksiniminin %10'u ise PV panellerden elde edilen yenilenebilir enerji ile karşılanmıştır. Manal ve Rashed (2017) tarafından Filistin'de bulunan Nablus, Al-Bireh ve Altira'daki AAT'lerin enerji verimliliğini arttırmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır. Atıksuyun arıtılması amacıyla çamur arıtımı için AD içeren, uzun havalandırmalı ve membran biyoreaktörlü (MBR) AÇ prosesi kullanılmıştır. Atıksuyun arıtımından elde edilen veriler üç farklı tesisin ortalaması olarak hesaplanmış ve BOİ'nin %98'inin giderildiği rapor edilmiştir. Bu proseslerde harcanan enerjinin geri kazanılması için çamurun anaerobik çürütülmesinden yararlanılmış ve tesise kurulan PV'den enerji sağlanmıştır. PV'den gelen güç kaynağı, pompa istasyonundaki elektrik kesintileri gibi acil durumlarda kullanılmak için tasarlanmıştır. Yang vd. (2020) yaptıkları çalışmada, Çin'deki AAT'lerin nötr enerjiye ulaşabilmesi için enerji tüketim modeli geliştirmişlerdir. Bu çalışmaya göre, 200-400 mg/L giriş KOİ'sine ve 55.000 m³/gün debiye sahip AAT'lerin enerji açısından kendi kendine yeterlilik elde etme olasılığının daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. AAT'nin bir yılda tükettiği enerjinin, termal enerji kullanılarak minimum %35'i maksimum %253,5'i geri kazanılmıştır. AAT'ye kurulan PV paneller bir yıldaki enerji ihtiyacının minimum %12,2'ini, maksimum %19,3'ünü karşılamıştır. Çamur su içeriği %57'nin altında olan AAT'ler için çamur yakma fizibilitesi önerilmiştir.

2.5. AAT'lerde Enerji Verimliliğinin için Yürütülen Çalışmalar

AAT'lerde kullanılan pompaların, optimizasyonun yapılması veya son teknoloji ile değiştirilmesi durumunda toplam enerji tüketimi %5-30 azaltılabilmektedir (Panepinto vd. 2016). AAT içerisindeki borularda gerçekleşen sızma, kırılma veya kaçakların zamanında tespiti yapıldıktan sonra olası tamiri veya değişiminin sağlanması ile mali tasarruflarla birlikte enerji azaltımı da mümkün olmaktadır (Nakkasunchi vd. 2021). Evsel atıksuların arıtılması için en yaygın uygulanan biyolojik arıtma prosesi olan AÇ prosesinde havalandırma için otomatik kontrol sisteminin kurulması ve enerji tasarruflu havalandırma ekipmanlarına geçiş yapılması durumunda yaklaşık %20-50 enerji tasarrufu sağlanabilmektedir (Nakkasunchi vd. 2021). Ayrıca, aerobik arıtmanın anaerobik arıtma ile değiştirilmesi ile CO₂ emisyonlarının %60'a kadar azaltılması mümkün olabilmektedir (Keller ve Hartley 2003). Enerji verimliliğini arttırmak için uygulanan yaklaşımlar Çizelge 2.11 ve Çizelge 2.12'de sunulmaktadır.

Çizelge 2.11. AAT’lerde enerji optimizasyonuna yönelik çalışmalar-1

AAT	Sistem konfigürasyonu	Enerji Tüketimi			Enerji Verimi (%)	Optimizasyon Çalışmasının İçeriği	Kaynaklar
		Önce	Sonra	Birim			
Bochum-Ölbachtal (Almanya)	213.000 NE BNR AAT, kademeli besleme	23	12	kW-sa/PE	97	Karıştırma işleminin optimize edilmesi, RAS pompalama enerji tüketiminin azaltılması	Marner vd. (2016)
Stuttgart-Mühlhausen (Almanya)	1.200.000 NE BNR AAT	58,5	43	MW-sa/gün	26	Hava dağıtım kontrol sistemine (ADC) geçiş	Zettl (2015)
Slupsk (Polonya)	200.000 NE BNR AAT	16	13	kW-sa/PE	73	Önerilen yan akım arıtma hattında deamonifikasyon, kimyasal olarak geliştirilmiş birincil arıtma, CHP motorları	Zaborowska vd. (2017)
Changi (Singapur)	800.000 m ³ /gün, A/O ile AD	-	0,89	kW-sa/m ³	17	Çevrimiçi ÇO kontrolü ve üfleyicilerin verimliliği ile havalandırma enerji tüketimi azaltılması.	Yeshe (2015)
Valley Creek (ABD)	386.000 m ³ /gün, AD’li 2 kademeli KAÇ	24,500	18,500	MW-sa/yıl	24	Atıksunun %50’si ilk havalandırma havuzuna, 50’si ikinci havalandırma havuzuna ayrılmış, AD geliştirilmiş, yan akım arıtma durdurmuş	Van Horne vd. (2012)
Strass (Avusturya)	90.000–200.000 NE, 2 aşamalı AÇ	-	0,32	kW-sa/m ³	109	%38 verimliliğe sahip CHP, %12 azaltılmış deamonifikasyon	Jonasson (2007)
Philadelphia (ABD)	950.000 m ³ /gün, arıtma çamurları geri kazanımı	139,7	5,3	MW-sa/gün	54	Üretilen biyogaz arttırılmış, CHP motorları ile kojenerasyon kullanılmıştır.	Tarallo vd. (2015)
Los Angeles (ABD)	2.318.500 m ³ /gün, 11 su geri kazanım tesisi	383,2	23	MW-sa/gün	51	Yeni yüksek hızlı santrifüjler kullanılmıştır.	Tarallo vd. (2015)
Melbourne (Avusturalya)	N-giderimi için 3 lagün, 600.000 m ³ /gün iki AAT	203,3	48,7	MW-sa/gün	76	Enerji üretimi için AD inşa edilmiştir.	Tarallo vd. (2015)
Kansas (ABD)	66.000 m ³ /gün BNR AAT ve biyosolid üretimi	42	24,3	MW-sa/gün	21	AD ve ortak üretim birimleri kullanılmış.	Tarallo vd. (2015)
Turin (İtalya)	2,7 milyon NE A/O, kimyasal P giderimi	-	24,7	kW-sa/PE	42	CHP motorları için yakıt olarak biyogaz kullanılarak çamur ısıtma ve susuzlaştırma yapılmıştır.	Panepinto vd. (2016)

Çizelge 2.12. AAT’lerde enerji optimizasyonuna yönelik çalışmalar-2

AAT’nin Yeri	AAT Prosesleri	Kazanılan Enerji (%)	Açıklama	Kaynaklar
Avrupa	AD	50-80	Energy Online System enerji denetimi programını geliştirerek, çamur arıtma için pompaları, blowerları ve AD’leri optimize etmek için kullanılmıştır.	Torregrossa vd. (2016)
Malezya	Havalandırmalı lagünler ve AÇ	2,33	Yapay sinir ağı kullanarak AAT ekipmanını ve makinelerini optimize etmek için bir tahmin modeli geliştirmişlerdir. Bu çalışmanın temel amacı, enerji talebini bir ay önceden tahmin ederek AAT’nin enerji talebini en aza indirmektir.	Ramli ve Hamid (2018)
-	BNR	10	Bu çalışmanın amacı ise başta azot olmak üzere kirleticilerin verimli bir şekilde giderilmesi için aktif çamur prosesini geliştirmek, enerji tüketimini ve çamur oluşumunu azaltmaktır. Enerji tüketimini optimize etmek ve çamur oluşumunu azaltmak için tek bir tankta aerobik ve anoksik arıtma yapılmıştır.	Holenda vd. (2007)
Hırvatistan	AÇ	20-25	Aerobik atıksu arıtma prosesinin arıtma ve enerji verimliliğini geliştirmek için bir matematiksel model geliştirilmişlerdir. Bu model, aerobik bir biyoreaktördeki gereken oksijenin optimize edilmesini içermektedir.	Novak ve Horvat (2012)
Orta Doğu Ülkelerinde	-	5-30	TIAM-FR modeli üzerinden yapılan çalışmada, Orta Doğu ülkeleri (Arap Yarımadası, Kafkaslar, İran ve Doğu’ya yakın diğer bölgeler) gibi şiddetli su kıtlığı altındaki bölgelerde su sektörünün gelecekteki enerji talebini optimize etmeyi amaçlanmıştır.	Dubreuil vd. (2013)
Çin	Anoksik ve aerobik arıtma	40<	Online Sequential Extreme Learning Machine kullanarak bir model geliştirdi. Bu modelin temel amacı, giriş ve çıkış atıksuyunun kalitesi gibi çeşitli faktörleri göz önünde bulundurarak arıtma bölgelerine çözünmüş oksijen (ÇO) tedarikini iyileştirmektir.	Cao ve Yang (2020)
Meksika	-	20,2<	Arıtma tesislerinin maliyet ve enerji talebini etkileyen çeşitli faktörlerin analizinde Mixedinteger lineer olmayan programlama, yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmanın amacı, sürdürülebilir AAT’lerin tasarlanması için AAT’lerin toplam maliyetinin ve enerji tüketiminin en aza indirilmesi için optimizasyon çalışmalarının yapılmasıdır.	Padrón-Páez vd. (2020)

Enerji optimizasyonuna yönelik çalışmalarda en yaygın uygulanan yaklaşımlar; havalandırma ve pompalama ekipmanlarının optimizasyonu ile enerji geri kazanımı için AD ile üretilen biyogazın iyileştirilmesi ve CHP santralinde değerlendirilmesidir. Khiewwijit vd. (2015) yaptıkları çalışmada, MS Excel tabanlı bir simülasyon modeli geliştirmişlerdir. Bu modeli geliştirebilmek için Hollanda'da bulunan 29 AAT'den ve laboratuvar ölçekli deneylerden elde edilen bilgiler kullanılmıştır. Modelde dikkate alınan arıtma teknolojileri AÇ, AD, mikro alg yoluyla fosfor geri kazanımı, kimyasal çöktürme ve azot geri kazanımı için anammox proseslerini içermektedir. Model beş adımdan oluşmaktadır. İlk adımda performans göstergesi belirlenmiştir. İkinci adım verimli arıtma teknolojilerinin ve enerji geri kazanım teknolojileri seçilmiştir. Üçüncü adımda seçilen tüm teknolojileri entegre ederek senaryolar oluşturulmuştur. Dördüncü adımda kararlı durum simülasyonu ve son adımda geliştirilen modelin hassasiyet analizleri yapılmıştır. Modelleme sonuçları AD, anammox ve kimyasal çöktürmeyle biyolojik fosfor geri kazanımı içeren üç aşamadan oluşan bir AAT konfigürasyonu önermiştir. Model çıktısı olarak kendi kendine yeten bir AAT olmasının yanı sıra 0,24 kW-sa/m³ enerji üretimi ve karbon emisyonlarında %35 azalma gözlemlenmiştir.

Sarpong vd. (2019) yaptıkları çalışmada, Gresham (ABD) ve Strass'da (Avusturya) uygulanan farklı AAT konfigürasyonlarının enerji geri kazanım teknolojileriyle birlikte kombinasyonlarını inceleyerek küçük ölçekli AAT'lerin enerji açısından kendi kendine yeterliliğini değerlendirmişlerdir. Temel, orta ve gelişmiş olarak sınıflandırılan üç farklı AAT konfigürasyonunun enerji pozitif atıksu arıtma senaryoları karşılaştırılmıştır. Temel AAT konfigürasyonu, enerji tüketimini en aza indirmek için ekipmanların değiştirilmesi veya onarılmasını ve birlikte anaerobik çürütme yoluyla ek biyogaz üretimiyle enerji geri kazanımını içermektedir. Orta AAT konfigürasyonu, deammonifikasyon işleminin ardından AÇ prosesi ve AD kullanılarak enerji tüketiminin azaltmayı hedeflemiştir. Gelişmiş AAT konfigürasyonu ise, birincil çöktürme ünitesinde katıların gelişmiş şekilde ayrılması ve ardından ileri biyolojik arıtım için biyolojik filtrasyonu takip eden bir sistemden oluşmaktadır. Daha yüksek azot konsantrasyonu AAT'lerin enerji gereksinimlerini arttırdığından, azot giderimi için deammonifikasyon prosesinin uygulanmasının enerji gereksinimlerini büyük ölçüde azalttığı tespit edilmiştir.

Sun vd. (2020) yaptıkları çalışmada, dört farklı atıksu arıtma konfigürasyonunun sürdürülebilirliğini değerlendirmiş ve bu konfigürasyonları atıksuyun çıkış kalitesi, tüketilen enerji, yıllık toplam maliyetler ve karbon emisyonları gibi parametreler açısından karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada kullanılan atıksu arıtım konfigürasyonları; i) AÇ prosesine dayalı merkezi su geri kazanım tesisi, ii) membran biyoreaktörlü (MBR) merkezi su geri kazanım tesisi, iii) AD ve damlatma filtrelerine sahip merkezi olmayan su geri kazanım tesisleri ve iv) merkezileştirilmiş-merkezi olmayan hibrit tesisten oluşmaktadır. Sonuçlar, merkezi olmayan ve hibrit sistemlerin, enerji ve gübre hasadı nedeniyle karbon emisyonuna ve ötrofikasyona diğer proseslere göre daha az katkıda bulunduğunu ve ortalama %7-17'lik daha az maliyetlere sahip olduğunu göstermektedir.

Ayrıca merkezi olmayan ve hibrit sistemler daha dayanıklı olup, doğal afetlerle sürekli karşı karşıya kalan ülkeler için daha geçerli olabilmektedir. Çünkü yıkılmalar söz konusu olduğunda diğer proseslere göre çevresel etkilerin daha az olacağı tespit edilmiştir. AD ve damlatma filtrelere sahip merkezi olmayan atıksu arıtma prosesi en iyi

yaklaşım olarak önerilmiştir. Buna karşılık, MBR alternatifi, sürdürülebilirlik açısından düşük olarak değerlendirilen atıksu yönetimi alternatifi olmuştur (Sun vd. 2020).

Wang vd. (2016) yaptıkları çalışmada, ABD, Almanya, Çin ve Güney Afrika dahil olmak üzere dört ülkedeki AAT'lerin tükettikleri enerjileri ve karbon emisyonlarını karşılaştırmışlardır. Enerji verimliliğini arttırarak ve atıksudan enerji elde ederek enerji açısından %100 kendi kendine yeten AAT'lerin uygulanabilir olduğu vurgulanmıştır. ABD ve Almanya'da işletilen birkaç AAT'nin neredeyse enerji açısından kendi kendine yeten ve enerji üreten AAT'ler olduğu belirlenmiştir. Shen vd. (2015) tarafından, Kuzey Amerika ve Avrupa'da bulunan enerjide kendi kendine yeterli tam ölçekli AAT'ler belirlenmiştir (Çizelge 2.13).

Çizelge 2.13. Enerjide kendi kendine yeterli AAT'ler (Shen vd. 2015)

Yer	AAT Adı	AAT Debisi (m ³ /gün)	Enerji kendine yeterlilik (%)
Almanya	Grevesmuhlen	15000	100
Avusturya	Wolfgangsee-Ischl	19000	100
Avusturya	Strass im Zillertal	22700	100
ABD	Gloversville-Johnstown Joint	41700	100
ABD	Sheboygan Regional	41700	100
ABD	Gresham	49000	100
Çek Cumhuriyeti	Prague Central	158000	94
İsviçre	Zürich Werdhölzli	254000	100
ABD	East Bay Municipal Utiliy District	265000	100
ABD	Point Loma	662000	100
İngiltere	Davyhulme	757000	96
ABD	Joint Water Pollution Control Plant	1135600	97

2.6. AAT'lerde Sera Gazı Emisyonlarının Belirlenmesi

AAT'lerin inşaat aşamasından işletilme aşamasına kadar olan süreçlerin hepsinde sera gazı emisyonları açığa çıkmaktadır. Bu sera gazı emisyonları arasında AAT'lerden açığa çıkan başlıca sera gazları CO₂, CH₄ ve N₂O gazlarıdır. CH₄ CO₂'den 28 kat daha fazla zararlı iken N₂O emisyonu ise CO₂'den 265 kat daha zararlıdır (IPCC 2019). Atıksu arıtımının doğası sürdürülebilirliğe doğru ilerledikçe, çevresel etkilerin değerlendirilmesi, AAT optimizasyonu açısından bir zorunluluk haline gelmiştir.

Ülkemizde AAT'lerden kaynaklanan sera gazlarının belirlenmesine yönelik kısıtlı sayıda çalışma yürütülmüştür. Külah (2013) tarafından İzmir'de bulunan bir gıda fabrikasına ait endüstriyel AAT'nin sera gazı emisyonları değerlendirilmiştir. AAT'de proseslerden açığa çıkan ve enerji tüketiminden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını hesaplayabilmek için ISO14064-I standartına göre Sera Gazı Protokolü seçilmiştir. Çalışma sonucunda, AAT'de proseslerden dolayı açığa çıkan sera gazı emisyonları yılda 2178,35 tonCO₂e, elektrik enerjisi kullanımından kaynaklı olan sera gazı emisyonları ise yılda 903,37 tonCO₂e tahmin edilmiştir. Gülhan vd. (2018) yaptıkları çalışmada, İstanbul'da bulunan 9 adet ileri biyolojik AAT'nin sera gazı emisyonlarını hesaplayabilmek amacıyla General Purpose Simulator modelini kullanmışlardır. Model

sonuçlarına göre 9 AAT'nin mevcut durumdaki sera gazı emisyonun yılda 697,182 tonCO₂e olduğu tahmin edilmiştir. CH₄ gazı emisyonu yılda 45,497 tonCO₂e, N₂O gazı emisyonu ise yılda 697,942 tonCO₂e olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, AAT'lerde proseslerin açığa çıkardığı emisyonların AAT'lerin sera gazı emisyonu açısından belirleyici faktör olduğu belirlenmiştir. Yapıcıoğlu (2018) tarafından 2 AAT'nin sera gazı emisyon değerlendirmesi yapılmıştır. AAT'lerden birine evsel atıksu gelirken, diğerine endüstriyel atıksu gelmektedir. AAT'lerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını hesaplamak için iki farklı model kullanmıştır. AAT'lerde sistem optimizasyonu için Monte Carlo simülasyonu kullanırken, sera gazı emisyonunu hesaplamak için kapalı çember metodu kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, evsel AAT'de oluşan sera gazı emisyonları yılda 8,514 tonCO₂e, endüstriyel AAT'de ise yılda 356,882 tonCO₂e olarak hesaplanmıştır.

Uluslararası ölçekte ise, AAT'lerde sera gazı emisyonlarının meydana gelme süreçleri anlaşılmasına çalışılmış (Foley vd. 2010), sera gazı emisyonlarını ölçmek için çeşitli yaklaşımlar tanımlanmış (Peng vd. 2014) ve sera gazı emisyonları üretimleri tahmin edilip kontrol edilmeye çalışılmıştır (Flores-Alsina vd. 2011; Corominas vd. 2012; Ni vd. 2013). IPCC tarafından AAT'lerdeki sera gazı emisyonlarını ölçebilmek için bazı yöntemler önerilmiştir. Bu tarz sera gazı ölçüm yöntemleri, sabit emisyon faktörleri kullandıkları ve emisyon faktörlerinin değiştiğini göz önüne almadıkları için belirsizlikler içermektedir (Daelman vd. 2015). Bu nedenle, sera gazı ölçüm yöntemlerin AAT'ye özgü olması önerilmektedir (Mannina vd. 2016). AAT'ler için enerji ile ilgili konularda karar vermeyi destekleyen gelişmiş ve karmaşık yöntemler önerilmiştir (Çizelge 2.14).

Çizelge 2.14. AAT'lerde enerji ve sera gazları optimizasyonu için kullanılan yöntemler

Metot	Tanımlama	Kaynaklar
Ekonomik Verimlilik Analizi	AAT'lerdeki ilk yatırım ve işletme maliyetleri ile ekonomik faydaya dayanmaktadır. Enerji geri kazanımını ve maliyetlerin düşürülmesi için gelişmiş kontrol sistemlerini kullanarak ekonomik faydanın artırılmasıyla ilgilenmektedir.	Piao vd. (2016); Guerrini vd. (2018)
Karbon Ayak izi Analizi (KAİ)	AAT'ler tarafından açığa çıkan sera gazlarını hesaplamak için kullanılır. Havalandırma verimliliğini artırmak ve enerji geri kazanımı ile enerji tüketimini azaltmak, AAT'lerdeki karbon ayak izini azaltmaya yardımcı olacaktır.	Mamais vd. (2015); Wang vd. (2016)
Yaşam Döngüsü Analizi	AAT'lerdeki çevresel etkileri analiz etmek için uygulanır. Mevcut AAT konfigürasyonları ve ileriye dönük farklı proseslerin çevresel etkilerini hesaplamak için de kullanılabilir.	Molinos-Senante vd. (2014); Polruang vd. (2018)
Veri Zarflama Analizi	Eko verimlilik değerlendirmesi için uygulanır. AAT'lerin eko-verimliliğini yorumlamak için artırma süreçleri sırasındaki ekonomik maliyet, enerji tüketimi, kirlenici madde giderimi ve küresel ısınma etkisi entegre edilmiştir.	Hernandez-Sancho vd. (2011); Molinos-Senante vd. (2014)
Tesis ölçekli modelleme	AAT'lerin performansını tahmin etmeye ve giriş ve çıkış suyu kalitesiyle enerji tüketimi açısından ayrıntılı bilgileri analiz etmek için uygulanır. Modelleme aynı zamanda enerji açısından nötr duruma ulaşmak için farklı stratejilerin karşılaştırılmasını sağlar.	Flores-Alsina vd. (2014); Zaborowska vd. (2017)

Son yıllarda, AAT'lerde sera gazının tahmin edilebilmesi için sera gazıyla ilgili biyolojik süreçler ile diğer bileşiklerin oluşumunu, dönüşümünü ve bozunmasını açıklamaya çalışan matematiksel modeller yaygınlaşmaktadır. Sera gazları için geliştirilen matematiksel modeller, sera gazlarını değerlendirmek ve farklı azaltım

alternatiflerini sahada uygulamadan önce değerlendirip en iyi seçenekleri belirlemek için faydalı bilgiler sunmaktadır (Mannina vd. 2016). Sera gazı modelleri ile farklı AAT konfigürasyonlarına sahip AAT'ler için sera gazı emisyonları tahmin edilebilmekte ve çeşitli işletme koşullarının etkileri değerlendirilebilmektedir. Sera gazı modellemelerine ek bir özellik olarak karbon ayak izinin de dahil edilmesi önerilmiştir (Flores-Alsina vd. 2011; Corominas vd. 2012). Bu doğrultuda, AAT'lerde sera gazı emisyonlarının tahmin edilmesi amacıyla son yıllarda karbon ayak izi (KAİ) tahminine yönelik matematiksel modeller ve araçlar geliştirilmiştir (Mannina vd. 2016). Aktif çamur modeli ve kıyaslama simülasyon modeli (BSM) gibi esas olarak biyolojik süreçlerden açığa çıkan emisyonları hesaplamak için simülasyon modelleri (DEEM, ASMN, BSM2G ve BSM2-e) uygulanırken, AAT'nin (CFCT, CF-TOOL CTRL, ve CHEApet), içme suyu ve atıksu hizmetlerinin (WESTWeb, ECAM, ve WEEECarb) KAİ'ni belirlemek için özel araçlar ve modeller kullanılmaktadır. Literatürde bulunan ve AAT'lerin KAİ'ni hesaplamak için kullanılan çeşitli modeller Çizelge 2.15'te karşılaştırılmaktadır.

Çizelge 2.15. Mevcut KAİ modelleri (Marinelli vd. 2021)

Model	Sera Gazı Emisyonları	Emisyonlar Kaynakları						Emisyon Faktörü (EF)
		Doğrudan Sera Gazı	Çözülmüş Sera Gazı	Çamur Bertarafı	Enerji	Kimyasal maddeler	Taşıma	
CFCT	CH ₄ , N ₂ O, CO ₂	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CF-TOOL CTRL	N ₂ O, CO ₂	✓		✓	✓	✓		
CHEApet	CH ₄ , N ₂ O, CO ₂	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
WESTWeb	CH ₄ , N ₂ O, CO ₂ , NO _x	✓		✓	✓	✓		
WEEECarb	CH ₄ , N ₂ O, CO ₂	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ECAM	CH ₄ , N ₂ O, CO ₂	✓		✓	✓			✓
ASMN	N ₂ O	✓						
BSM2G	CH ₄ , N ₂ O, CO ₂	✓		✓	✓	✓		
BSM2-e	CH ₄ , N ₂ O, CO ₂	✓		✓	✓	✓		

Mevcut araç/modellerdeki doğrudan emisyonlar, esas olarak biyolojik süreçlerinden ve biyogaz üretiminden kaynaklanmaktadır. Avrupa Komisyonu'nun son raporunda (JRC, 2020), atıksu şebekeleri, AAT'lerde kullanılan teknolojiler ve arıtılmış atıksuyun deşarjı dahil tüm süreçlerin sera gazı yaydığı ve bu nedenle önemli oldukları vurgulanmıştır. Emisyon kaynakları AAT'lerin fiziksel sınırlarının dışında (Kapsam 2-3 emisyonları) bile, kesinlikle atıksu hizmeti yönetimi seçenekleriyle ilişkilidir (Marinelli vd. 2021). Bu nedenle, atıksu KAİ değerlendirmesinde enerji tüketimi, kimyasal dozlama, nakliye ve çamur bertarafından kaynaklanan dolaylı etkilerin de dikkate alınması önerilmektedir (Brown vd. 2010). Bu doğrultuda, tüm sera gazı emisyon kaynaklarını göz önüne alan modeller (CFCT, CHEApet, WEEECarb) öne çıkmaktadır. Bu modeller arasında açık kaynaklı olan CFCT ve CHEApet modellerinin özellikleri aşağıda açıklanmıştır.

2.6.1. Karbon ısı enerjisi analizi tesisi değerlendirme aracı (CHEApet)

Karbon ısı enerjisi analizi tesisi değerlendirme aracı (CHEApet) hesaplama motoru olarak MS Excel kullanılarak kararlı durumdaki bir AAT'nin simülatörü olarak geliştirilmiştir (Johnson vd. 2010). CHEApet bireysel birim süreç seviyesinde bilgi sağlayan ve aynı zamanda tüm tesis süreçler (hem atıksu hem de çamur arıtma) ile bina ısıtma ve aydınlatma gereksinimleri gibi enerji tüketen üniteleri entegre eden öngörü senaryoları oluşturmak için kullanılmaktadır. Model tahminleri ile enerji tüketimi ve böylece maliyetleri azaltmak için çeşitli senaryolar oluşturulmaktadır CHEApet kullanıcı tarafından sağlanan operasyonel verileri, yapıyı ve ekipman boyutlarını kullanarak tüm süreçlerin ve tesis atıklarının performansını tahmin etmektedir. Simüle edilen tesis performansı, hesaplanan kütle dengesi ve kullanıcı tarafından girilen spesifik tesis verilerinin kombinasyonu, CHEApet içindeki kalorifik, termal ve elektrik enerjisi modüllerini beslemek için gerekli bilgileri sağlamaktadır (Johnson vd. 2010).

2.6.2. Karbon ayak izi hesaplama aracı (CFCT)

Karbon ayak izi hesaplama aracı (CFCT) AAT'lerin farklı proseslerden açığa çıkan doğrudan ve dolaylı emisyonlarının KAI'nin hesaplanmasını kolaylaştıran, İsveç AAT'lerinin KAI'nin Hesaplanması (SVU 12- 120) (Gustavsson ve Tumlin 2013) adlı projede geliştirilen MS Excel tabanlı bir araçtır. AAT'lerin KAI'lerinin hesaplanmasının ardından AAT'lerin iklim etkisini azaltmak için hedefler belirlemesini sağlayan kullanıcı dostu bir araç olarak geliştirilmiştir. Tam ölçekli tesisler için ayrıntılı sonuçlar, KAI hesaplamaları, çeşitli girdi parametreleri kategorilerini dikkate alan ampirik modellere dayanmaktadır (Maktabifard vd. 2020). CFCT geliştirildiğinden beri çok çeşitli çalışmalarda AAT'lerin KAI'ni belirlemek ve azaltmak için kullanılmıştır.

Maktabifard vd. (2019) yaptıkları çalışmada, Polonya'da bulunan 2 AAT'nin KAI'ni belirlemek amacıyla CFCT aracını kullanılmış olup, gerekli veriler yıllık rutin çalışma verilerinden elde edilmiştir. Doğrudan emisyonlar gibi bazı veriler bulunamamıştır ve literatürde bulunan EF'lere dayalı olarak hesaplanmıştır. Slupsk AAT, biyogazdan enerji üretiminden yararlanan 24.000 m³/gün kapasiteye ve BNR prosesine sahip bir tesis iken, Starogard'da bulunan AAT 8.400 m³/gün kapasiteye sahip daha küçük ölçekli bir başka BNR tesisidir. AAT'lerde gerekli elektriğin tamamı şehir şebekesinden sağlanmaktadır. Duyarlılık analizlerinden sonra, sera gazı emisyonlarına önemli ölçüde katkıda bulunan prosesler belirlenmiştir. Ayrıca, çamur yönetimi için çamurun AD sonrasında kullanım alternatifleri değerlendirilmiştir. Çamurun yönetilmesi için beş farklı senaryo varsayılmıştır. Bunlar tarım arazisi, yakma, depolama, gübreleme ve kompostlama olmaktadır. Senaryoların etkilerini, varsayılan EF'lere dayalı olarak hesaplanmıştır. AAT'lerin toplam spesifik KAI Slupsk'da bulunan AAT'de 17,2 kgCO₂e/NE, Starogard'da bulunan AAT'de ise 38,8 kgCO₂e/NE olarak tahmin edilmiştir. İki AAT'de de çamurun yönetilmesi, enerji tüketimi ve atıksuyun arıtılmasından dolayı açığa çıkan emisyonların KAI'ni önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir. Toplam KAI'nin önemli bir kısmının, öncelikle enerji tüketiminden kaynaklı dolaylı emisyonlardan kaynaklandığı belirlenmiştir. Enerji tüketiminden kaynaklanan KAI'ni azaltabilmek için yenilenebilir enerji kaynaklarının daha fazla kullanılması önerilmiştir. CHP santrali ile biyogazdan enerji geri kazanımı ile toplam KAI'nde %30'un üzerinde bir azalma sağlanabileceği belirlenmiştir. Tarım arazileri ve kompostlaştırma sonrası tarım arazilerinin çamur yönetimi için en uygun stratejiler olduğu belirlenmiştir. Sabit

emisy on faktörlerine dayalı KAI tahminindeki yüksek belirsizlik nedeniyle, atıksu arıtımından kaynaklanan N₂O emisyonlarının güvenilir ölçümlerinin yapılması önerilmiştir.

Maktabifard vd. (2020) tarafından Polonya ve Finlandiya’da bulunan altı farklı AAT’nin KAI’ni karşılaştırmak için CFCT aracı kullanılmıştır. AAT’lerin KAI’leri 23-100 kgCO₂e/NE aralığında tahmin edilmiştir. En düşük KAI değeri C tesisinde 23,7 kgCO₂e/kişi olarak, en yüksek KAI değeri ise 99,7 kgCO₂e/kişi olarak E tesisi için hesaplanmıştır. AAT’lerde KAI’nin en fazla atıksu arıtımından kaynaklı olarak açığa çıktığı belirlenmiştir. Yalnızca E ve F tesislerinde enerji tüketimi daha fazla KAI açığa çıkarmıştır. Toplam KAI’nde, biyogazdan enerji geri kazanımı olan tesisler yaklaşık %62-74 doğrudan emisyonu sebep olan, en yüksek doğrudan sera gazı emisyonuna sahip tesisler olmuştur. Tamamen elektrik şebekesine bağlı tesislerde ise, enerji tüketiminden kaynaklanan dolaylı emisyonlar toplam KAI’nin yaklaşık %69-72’ini oluşturmuştur. Farklı çamur bertaraf senaryoları oluşturmak için farklı EF’ler kullanılmıştır. Tarım arazilerine serme, kompostlaştırma (sonradan tarım arazilerine serme), depolama, yakma ve kurutmadan sonra gübreye dönüştürme gibi beş farklı çamur bertaraf senaryosu değerlendirilmiştir. C, D ve F tesislerinde susuzlaştırılmış çamur tarım arazilerine serilmekte olup, bu yaklaşımın KAI açısından en iyi senaryo olduğu belirlenmiştir. Çamur bertarafı için diğer bir iyi senaryo olarak ise AD ile stabilize edilmiş olan çamurun kompostlaştırılması tavsiye edilmiştir. Çamurun düzenli depolama alanlarında depolanması ise en elverişsiz stratejilerden biri olarak bulunmuştur. Tarım arazisi senaryosunu uygulanmasıyla yaklaşık 200-250 mgCO₂e/yıl emisyon tasarrufu sağlanabileceği belirtilmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. KAİ hesaplamaları yapılan AAT'ler

Büyük ölçekli AAT'lere (>100.000 nüfus eşdeğeri) kıyasla küçük ve orta ölçekli tesislerde (<100.000 nüfus eşdeğeri) enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarının daha fazla olduğu belirlenmiştir (Kiselev vd. 2021). Eşdeğer nüfus ve dolayısıyla arıtılan atıksu miktarı enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarında farklılıklara sebep olacağı için, tez kapsamında farklı eşdeğer nüfuslara sahip AAT'lerden KAİ hesaplamaları için gerekli veriler temin edilmiştir. Bu amaçla, ilk olarak AAT'lere ait karbon ayak izlerinin hesaplanabilmesi için temin edilmesi gereken veriler belirlenmiştir. Gerekli verileri elde edebilmek için AAT'lerden sorumlu olan yetkililere MS Excel formatında hazırlanan veri talep tabloları gönderilmiştir. Tez çalışmalarında kullanılan verilerin kısa bir hali Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. KAİ hesaplamaları için kullanılan veriler

Veriler	Birim
Giriş atıksu verileri	
AAT'ye gelen atıksuyu debisi	m ³ /gün
Giriş BOİ, KOİ, Azot ve Fosfor yükü	ton/yıl
Çıkış BOİ, KOİ, Azot ve Fosfor yükü	ton/yıl
Birincil (fiziksel arıtma)	
Izgarada ve kum tutucuda tutulan atık miktarı	ton/yıl
Izgarada ve kum tutucuda tutulan atıkların nihai bertaraf yöntemi (yakma, düzenli depolama, çürütme vb.)	-
Izgarada ve kum tutucuda tutulan atıkların nihai bertaraf yerinin AAT'ye mesafesi	km
Enerji tüketimi	
AAT'de tüketilen enerji	kW/yıl
AAT'de üretilen enerji	kW/yıl
AAT'de yenilenebilir kaynaklardan (rüzgar/güneş) üretilen elektrik	kW/yıl
AAT'de biyoyakıtlardan üretilen elektrik	kW/yıl
Isı kullanımı	
Toplam ısı kullanımı	-
AAT'de üretilen ısı miktarı	-
Atıksu ısı eşanjörü için ısı faktörü	-
Isı eşanjörleri tarafından toplam ısı üretimi	-
Çamur oluşumu	
Oluşan çamur miktarı	ton/yıl
Çamurun katı madde içeriği	%
Çamura uygulanan işlemler (susuzlaştırma, kurutma vb.)	-
Çamurun nihai bertaraf yöntemi (yakma, düzenli depolama vb.)	-
Motorlar/pompalar	
Motorlarda/pompalarda kullanılan yakıt miktarı ve cinsi	m ³ /yıl
Motorlarda/pompalarda tüketilen enerji	kW/yıl
Çamurun transferi	
Çamur transferi sırasında kullanılan yakıt miktarı	m ³ /yıl
Çamurun nihai bertaraf yerinin AAT'ye mesafesi	km
Kullanılan kimyasal maddeler	
Kullanılan kimyasal maddelerin AAT'ye taşınma mesafesi	km

Tez çalışması kapsamında KAİ değerlendirmesi için veri temin edilen 4 AAT AAT-1, AAT-2, AAT-3 ve AAT-4 olarak adlandırılmış olup, bu AAT'lere ait genel bilgiler Çizelge 3.2'de özetlenmiştir.

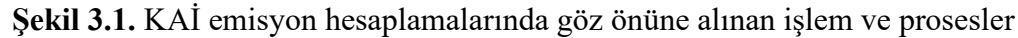
Çizelge 3.2. Çalışmada değerlendirilen AAT'lere ait genel bilgiler

Bilgiler	AAT-1	AAT-2	AAT-3	AAT-4
Bulunduğu Bölge	Akdeniz	Ege	Marmara	Marmara
İşletmeye alınma Yılı	2015	2012	2018	2015
Hizmet edilen nüfus (kişi)	200.000	76.340	40.000	22.200
Atıksu debisi (m ³ /gün)	57.358	9.520	5.350	4.500
Biyolojik arıtma proses tipi	A ² /O	A ² /O	A ² /O	A ² /O
Giderilen KOİ (mg/L)	474,20	676,01	183,61	160,13
Giderilen Azot (mg/L)	23,45	25,90	15,53	25,11
Alıcı ortam	Dere	Sulama suyu	Deniz	Göl
Çamur arıtma yöntemi	Susuzlaştırma	Susuzlaştırma + Biyogaz	Susuzlaştırma	Susuzlaştırma
Çamur bertaraf yöntemi	Düzenli Depolama	Düzenli Depolama	Yakma	Yakma

Çizelge 3.2'de görüldüğü üzere tez çalışması kapsamında KSi'leri hesaplanan AAT'ler Akdeniz, Ege ve Marmara bölgelerinde bulunmakta olup, farklı atıksu debilerine ve eşdeğer nüfuslara sahiptir. Tesislerin ortak özelliği hepsinin biyolojik atıksu arıtımı amacıyla anaerobik-anoksik-aerobik (A²/O) BNR prosesi uygulamasıdır. AAT-2'de arıtılmış olan atıksu sulamada kullanıldığı ve ayrıca tesiste arıtma çamurlarından biyogaz üretimi gerçekleştirildiği için AAT-2 diğer AAT'lerden farklı ünite ve prosesler içermektedir. AAT-1 ve AAT-2'de çamurun bertaraf yöntemi olarak düzenli depolama tercih edilmişken, AAT-3 ve AAT-4'te yakma işlemi uygulanmaktadır. Bu tesisler içerisinde bir yakma ünitesi bulunmayıp, tesislerde susuzlaştırılan arıtma çamurları yakma işlemine tabi tutulmak için anlaşılmalı kurumlara gönderilmektedir. Tüm tesislerde oluşan ızgara ve kum tutucu atıkları düzenli depolamaya gönderilmektedir. AAT'lerin KAİ hesaplamalarında kanalizasyon altyapısından kaynaklanan KAİ emisyonları çalışmaya dahil edilmemiş olup, sadece AAT'lerin işletilmesinden kaynaklanan KAİ'ler hesaplanmıştır.

3.2. CFCT Aracı

CFCT aracı, IPCC kılavuzuna bağlı olarak geliştirilen ücretsiz ve açık kaynaklı MS Excel programı yardımıyla kullanılan bir araçtır. KAİ azaltmanın ilk adımı olan AAT'lerdeki mevcut durumu hesaplayıp, farklı senaryolar üretmeye imkan sağlamaktadır. Bu aracın detaylı olarak incelenmesi sonucunda MS Excel tabanlı olmasından dolayı bazı hatalar ve güncel olmayan kabuller içerdiği belirlenmiştir. Bu doğrultuda, bu araçta çeşitli güncellemeler yapılmış ve EF'ler güncellenmiştir. Yapılan güncellemeler sonucunda elde edilen modifiye KAİ hesaplama aracında Kapsam 1, 2 ve 3 emisyonlarının ayrı ayrı hesaplanabilmesi için kullanılan denklemler EK-1'de sunulmuştur. Şekil 3.1'de, KAİ hesaplamalarında göz önüne alınan işlem ve prosesler gösterilmektedir. Şekil 3.1'de atmosfere yayılan emisyonlar ve bu emisyonların türleri kırmızı ile yazılırken, emisyon azaltımı sağlayan süreçler yeşil ile yazılmıştır.



3.3. Karbon Ayak İzi Hesaplamaları

KAİ hesaplamalarında kullanmak üzere esas alınan İsveç AAT'lerinde KAİ'nin Hesaplanması amacıyla yürütülen projede geliştirilmiş olan AAT'lere özel Karbon Ayak İzi Hesaplama Aracı (CFCT) detaylı olarak incelenmiş ve bu araç Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından hazırlanan raporlara göre revize edilmiştir. Revize edilen hesaplama aracında KAİ hesaplamalarını güncel ve yerel koşullara uyarlayabilmek için gerekli emisyon faktörleri (EF'ler) literatürden temin edilmiştir. AAT'lerde KAİ hesaplamalarında genel olarak AAT içerisinde gerçekleşen biyolojik proseslerden, enerji tüketiminden, arıtma çamurlarının taşınmasından, kimyasal madde üretimi ile taşınmasından ve çamurun bertarafından dolayı açığa çıkan Kapsam 1, 2 ve 3 emisyonları ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Doğrudan emisyonlar (Kapsam 1), atıksuyu arıtılması, çamur süzöntü sularının arıtılması ve arıtılmış atıksularına alıcı ortama deşarjı sırasında açığa çıkan N_2O ve CH_4 gazlarından kaynaklanmaktadır. KAİ hesaplama aracında atıksuların ve çamur süzöntü sularının arıtılması amacıyla farklı proseslerin uygulanması mümkün olmaktadır. Mevcut AAT'lerde çamur süzöntü suları ana biyolojik üniteye geri devrettirildiği için bu tür bir ayırım yapılmamıştır. Bu çalışmada kapsam 1 emisyonlarının hesaplanmasında kullanılan EF'ler Çizelge 3.3'te görülmektedir. AAT'lerde atıksuların arıtılması sonucu oluşan metan (CH_4) ve nitröz oksit (N_2O) emisyonlarının CO_2 eşdeğeri olarak hesaplanaması için IPCC tarafından önerilen güncel emisyon faktörleri olan $28 \text{ kgCO}_2\text{e/kgCH}_4$ ve $265 \text{ kgCO}_2\text{e/kgN}_2\text{O}$ değerleri kullanılmıştır (IPCC 2019).

Çizelge 3.3. Doğrudan emisyonların hesaplanmasında kullanılan EF'ler

Proses	EF	Kaynak
<i>Açığa çıkan CH_4 emisyonları için kullanılan EF'ler</i>		
Merkezi, aerobik, arıtma tesisi ($\text{kgCH}_4/\text{kgKOİ}$)	0,0075	IPCC (2019)
Deşarjın denize yapılması ($\text{kgCH}_4/\text{kgKOİ}$)	0,009	IPCC (2006)
Deşarjın rezervuar veya göle yapılması ($\text{kgCH}_4/\text{kgKOİ}$)	0,048	IPCC (2006)
<i>Açığa çıkan N_2O emisyonları için kullanılan EF'ler</i>		
Merkezi, aerobik, arıtma tesisi ($\text{kgN}_2\text{O-N/kgN}$)	0,016	IPCC (2019)
Deşarjın rezervuar veya göle yapılması ($\text{kgN}_2\text{O-N/kgN}$)	0,005	Arnell vd. (2017)
Deşarjın denize yapılması ($\text{kgN}_2\text{O-N/kgN}$)	0,003	Foley ve Lant (2008)

Dolaylı iç emisyonlar (kapsam 2) enerji kullanımından kaynaklı sera gazı emisyonlarını içermektedir. Bu çalışma kapsamında Türkiye'deki elektrik santrallerinin ortalama elektrik üretimi başına salınan $CO_2\text{e}$ verileri Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının Ocak 2024 verilerinden elde edilmiş olup (ETKB 2024a), kapsam 2 emisyonlarının hesaplanması için EF $0,440 \text{ kgCO}_2\text{e/kW-sa}$ olarak kabul edilmiştir.

Dolaylı dış emisyonlar (kapsam 3) ise arıtma çamurlarının nihai bertarafı ve kullanılan kimyasal maddelerin yanı sıra çamurun ve kimyasal maddelerin taşınmasından kaynaklanan sera gazı emisyonlarını içermektedir. Dolaylı dış emisyonlardaki EF'ler hem genel faktörler hem de AAT'ye özgü faktörlere bağlıdır. Genel faktörler, CH_4 ve N_2O 'nun

kaçak emisyonları ve kimyasal üretimi sırasında açığa çıkan emisyonlardan kaynaklanmaktadır. AAT'ye özgü faktörler ise, AAT'lerdeki motorlarda ve taşımada kullanılan yakıtlara bağlı olarak AAT'ler arasında değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada incelenen AAT'lerden kaynaklanan kapsam 3 emisyonları kimyasalların üretimi sırasında açığa çıkan emisyonlar, ızgara atıklarının, kumun ve çamurun bertarafı sırasında açığa çıkan emisyonlar ile taşıma sırasında açığa çıkan emisyonlardan oluşmaktadır. Taşımadan kaynaklı emisyonlar kimyasalların tesise taşınması ile ızgara atıkları, kum ve arıtma çamurlarının ilgili bertaraf tesisine taşınması sırasında açığa çıkan emisyonları içermektedir. Taşınan her bir yan ürün için tesislerden miktar, taşıma mesafesi ve taşıma için kullanılan araç bilgileri temin edilmiştir. Araç kapasitelerine göre taşımadan kaynaklı KAI'leri hesaplanmıştır. Kimyasal üretimi sırasında açığa çıkan ve kimyasalların ve atıkların taşınması sırasında açığa çıkan Kapsam 3 emisyonlarının hesaplanması için kullanılan EF'ler literatürden temin edilmiş olup, bu EF'ler Çizelge 3.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Dolaylı emisyonların hesaplanması için kullanılan EF'ler

Kategori	Değer	Birim	Kaynak
Enerji EF	0,440	kgCO ₂ e/kW-sa	ETKB (2024)
≤7,5 ton yük taşıyan araçlar	0,31	kgCO ₂ e/km	EEA (2023)
7,5-16 ton yük taşıyan araçlar	0,47	kgCO ₂ e/km	EEA (2023)
16-32 ton yük taşıyan araçlar	0,64	kgCO ₂ e/km	EEA (2023)
≥32 ton yük taşıyan araçlar	0,77	kgCO ₂ e/km	EEA (2023)
Hidroklorik asit	890	kgCO ₂ e/ton	SEWPCC (2011)
Sodyum hipoklorit	1155	kgCO ₂ e/ton	Güller ve Balcı (2018)
Polielektrolit	1182	kgCO ₂ e/ton	Güller ve Balcı (2018)
Katyonik polimer	805,20	kgCO ₂ e/ton	Afridana (2012)

Atık yönetimi olarak belirtilen ızgara atıkları ve kumun bertarafı sırasında açığa çıkan emisyonlar bertaraf yönetimine göre belirlenen EF'ler kullanılarak hesaplanmıştır. Tüm tesislerde ızgara ve kuma atıkları düzenli depolamaya gönderilerek bertaraf edildiği için bu atıkların düzenli depolanması sırasında açığa çıkan emisyonlar düzenli depolamada kullanılan elektrik miktarı olarak 21,67 kW-sa/tonKM (Manfredi vd. 2011) esas alınarak hesaplanmıştır.

Çamur yönetimine ilişkin KAI'leri ise arıtma çamurlarının tesis içinde susuzlaştırılmasının ardından çamurun bertaraf yöntemine bağlı olarak uygulanan işlemlere göre hesaplanmıştır. Tez çalışması kapsamında incelenen AAT'lerde uygulanan nihai bertaraf yöntemleri olan düzenli depolama ve yakma işlemlerinin her ikisinde de enerji geri kazanımı gerçekleştiği kabul edilmiştir. Enerji geri kazanımına ilişkin olarak literatürden temin edilen bilgilere göre, düzenli depolamada geri kazanılan CH₄ miktarının 348 m³/tonUKM olduğu (Davidsson vd. 2007), geri kazanılan gazın %58'inin toplandığı (CCME 2009), üretilen biyogazdan %30 oranında elektrik ve %45 oranında ısı elde edildiği (Manfredi vd. 2011) kabul edilmiştir. Yakma işleminden geri kazanılan enerjinin hesaplanmasında ise çamurun enerji içeriğinin 3500 MJ/ton olduğu (IPCC 2006), kurutma işlemi sonrasında çamur KM içeriğinin %90 olduğu, arıtma çamurlarından %19 elektrik ve %78 ısı elde edildiği (Frøergergaard ve Astrup 2011) kabul edilmiştir. Ek olarak düzenli depolamada düzenli depolama alanına serilen çamurda

bulunan karbon miktarı başına 0,1 kg karbonun tutulduğu Foley vd. (2010) kabul edilmiştir.

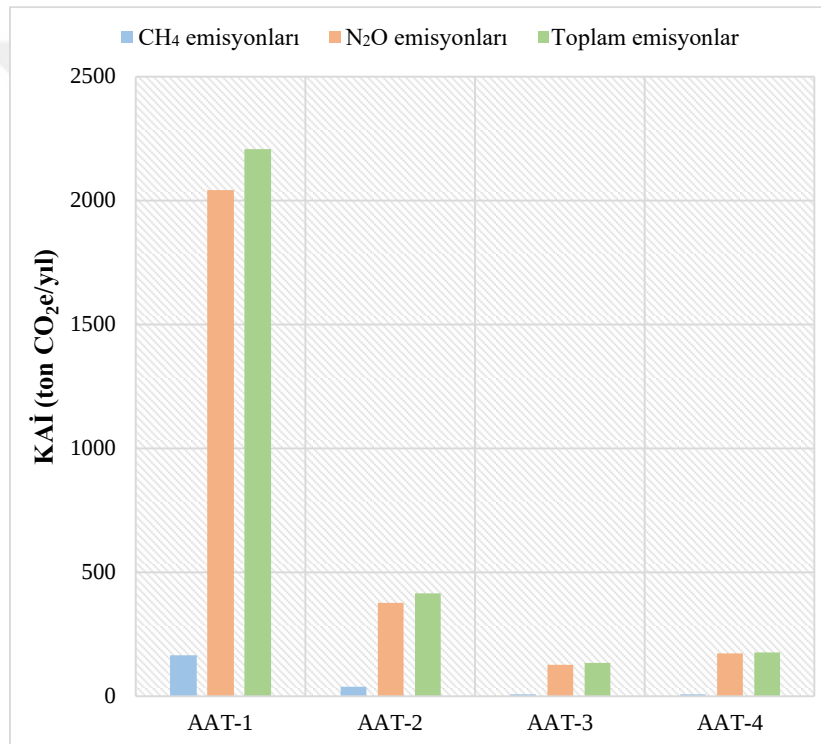
Düzenli depolamadan kaynaklanan emisyonların hesaplanmasında N_2O için emisyon faktörü 0,0082 kg N_2O /kgN (de Haas vd. 2008), CH_4 için emisyon faktörü ise 0,0175 kg CH_4 /kgUAKM (Davidsson 2007) kabul edilmiştir. Yakma işlemi sırasında açığa çıkan emisyonlar ise yakma amacıyla kullanılan enerji miktarına bağlı olarak 290 kW-sa/tonKM (Chang vd. 2022) değerine göre hesaplanmıştır. KAI hesaplama aracının geliştirilmesinde esas alınan CFCT aracında kurutma işleminden kaynaklı emisyonlar yakma işlemine benzer şekilde enerji tüketimine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Ancak, çalışma grubumuz tarafından yürütülen güncel bir çalışmada arıtma çamurlarının kurutulması için tüketilen elektrik ve ısı enerjisi miktarları ile üretilen emisyonlar detaylı olarak belirlenmiştir (Erkaya 2024). Bu doğrultuda, KAI hesaplama aracı geliştirilirken, hesaplamalara kurutma türüne bağlı olarak detaylı hesaplamalar eklenmiştir. Bu doğrultuda, kurutma işleminin tüm tesislerde bant kurutucu ile gerçekleştirildiği kabulüyle elektrik enerjisi tüketimi 0,07 kW-sa/kg buharlaşan su ve termal enerji tüketimi 0,65 kW-sa/kg buharlaşan su olarak kabul edilmiştir (Erkaya 2024, Karadirek vd. 2024). Kurutma sırasında açığa çıkan sera gazlarının hesaplanmasında ise CH_4 emisyonları için 7,22 kg CH_4 /tonKM (Peregrina vd. 2006), karbon monoksit (CO) için 24,06 kgCO/tonKM (Karadirek vd. 2024) ve uçucu organik karbon (UOK) için 0,572 kgUOK/tonKM (Gomez-Rico vd. 2008) değerleri kullanılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Atıksu Arıtma Tesisleri Karbon Ayak İzleri

4.1.1. AAT'lerden kaynaklanan kapsam 1 emisyonları

Kapsam 1 emisyonları atıksuların arıtılması sırasında açığa çıkan emisyonlar, biyogaz üretimi sırasında açığa çıkan emisyonlar ve arıtılmış atıksuyun alıcı ortama bertarafı sırasında açığa çıkan emisyonlardan oluşmaktadır. AAT'lerde atıksuların arıtılması sırasında CH_4 emisyonları KOİ giderimi sırasında, N_2O emisyonları ise azot giderimi sırasında açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan metan (CH_4) ve nitröz oksit (N_2O) emisyonları ile bu emisyonların IPCC tarafından önerilen güncel emisyon faktörleri olan $28 \text{ kgCO}_2\text{e/kgCH}_4$ ve $265 \text{ kgCO}_2\text{e/kgN}_2\text{O}$ değerleri ile çarpılması sonucu belirlenen karbon dioksit eşdeğeri emisyonlar Şekil 4.1'de sunulmuştur.



Şekil 4.1. AAT'lerde atıksuların arıtılması sırasında açığa çıkan emisyonlar

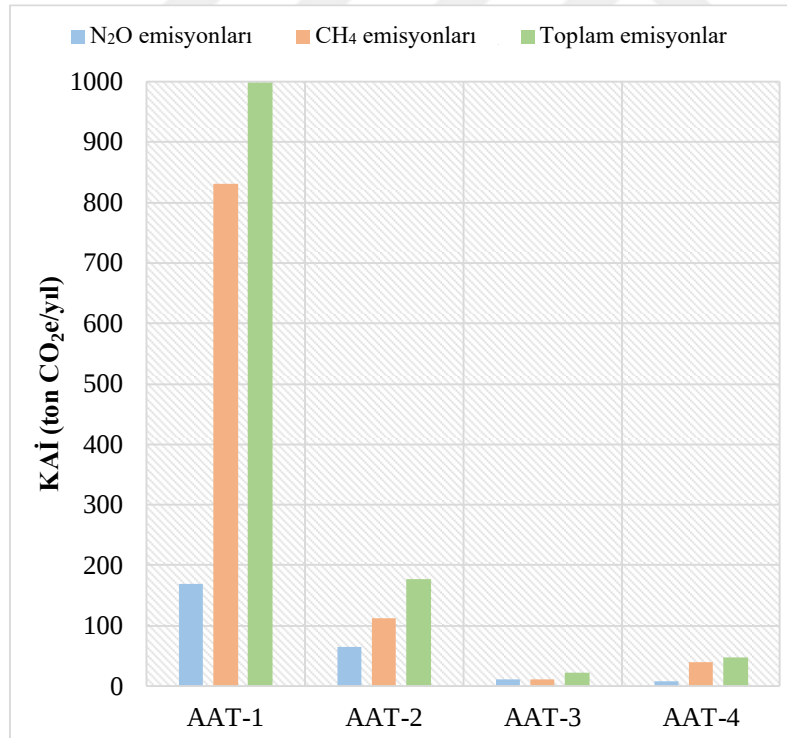
Şekil 4.1'den görüleceği üzere CH_4 emisyonlarının N_2O emisyonlarından daha az olduğu tespit edilmiştir. Bunun atıksu arıtma tesislerinde uygulanan biyolojik arıtma prosesi olan A^2/O prosesi için CH_4 emisyonları EF değerinin $0,000455 \text{ kgCH}_4/\text{kgKOİ}$ iken, N_2O emisyonları EF değerinin $0,0157 \text{ kgN}_2\text{O}/\text{kgN}$ olmasından kaynaklandığı belirlenmiştir. Bu nedenle, atıksuyun arıtımında azotu gidermek için uygulanan A^2/O prosesinin yüksek miktarda N_2O emisyonuna sebep olduğuna sonucuna varılmıştır. Atıksuyun arıtımı sırasında en fazla emisyon açığa çıkan tesis AAT-1 ($2209,48 \text{ tonCO}_2\text{e/yıl}$), en az emisyon açığa çıkaran tesis ise AAT-3 ($132,72 \text{ tonCO}_2\text{e/yıl}$) olarak hesaplanmıştır. Bunun sebebi, AAT'lerin farklı atıksu debilerine ve farklı miktarlarda giderilen KOİ ve azot yüklerine sahip olmasıdır. Çizelge 4.1'de görüldüğü üzere AAT-

2'nin giriş KOİ ve azot konsantrasyonları AAT-1'e göre daha yüksek olup, çıkış KOİ ve azot konsantrasyonları benzerdir. Ancak debi değerlerindeki farklılıktan dolayı AAT-1'de giderilen KOİ ve azot yüklerinin AAT-2'ye göre daha fazla olduğu görülmektedir. Giderilen KOİ ve azot yüklerinin miktarı ne kadar fazla olursa atıksuyun arıtımı sırasında açığa çıkan kapsam 1 KAI'de bir o kadar fazla olmaktadır. Bunun yanı sıra, AAT-3 ve AAT-4'te giderilen KOİ ve azot yüklerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Atıksu arıtımından kaynaklanan KAI AAT-3 için 132,72 tonCO₂e/yıl, AAT-4 için 177,87 tonCO₂e/yıl olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak giderilen KOİ ve azot yüklerinin atıksu arıtımı sırasında açığa çıkan emisyonlarla doğrudan bir ilişkisi olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.1. AAT'lerde giriş, çıkış ve giderilen KOİ ve azot konsantrasyonları

AAT	Giriş KOİ (mg/L)	Çıkış KOİ (mg/L)	Giriş N (mg/L)	Çıkış N (mg/L)	Giderilen KOİ (ton/yıl)	Giderilen N (ton/yıl)	Debi (m ³ /gün)
AAT-1	503 ± 20	29 ± 2	29 ± 2	6 ± 1	9927 ± 100	490 ± 50	57358
AAT-2	699 ± 20	23 ± 2	40 ± 2	14 ± 1	2349 ± 100	90 ± 5	9520
AAT-3	204 ± 20	20 ± 2	22 ± 2	7 ± 1	358 ± 20	30 ± 5	5350
AAT-4	177 ± 20	17 ± 2	28 ± 2	3 ± 1	263 ± 20	41 ± 5	4500

Kapsam 1 emisyonlarını oluşturan bir diğer emisyon kaynağı olan arıtılmış atıksuların alıcı ortama deşarjı sonucu açığa çıkan CH₄, N₂O ve CO₂ emisyonları Şekil 4.2'de sunulmuştur.



Şekil 4.2. Atıksuların alıcı ortama deşarjı sırasında açığa çıkan emisyonlar

Şekil 4.2'den görüldüğü üzere arıtılmış atıksuların alıcı ortama deşarjı ile ilgili en fazla KAI'ne sahip tesis AAT-1 (999,5 tonCO₂e/yıl), en az KAI'ne sahip tesis ise AAT-

3 (21,214 tonCO₂e/yıl) olarak hesaplanmıştır. AAT-1 ve AAT-3 aralarındaki emisyon farkının sebebi farklı alıcı ortam tiplerine deşarj yapmaları ve deşarj edilen arıtılmış atıksuyun farklı KOİ ve azot yüklerini içermesidir. Çizelge 4.2’de görüldüğü üzere AAT-1’in deşarj yaptığı arıtılmış atıksuyun KOİ ve azot yükleri diğer AAT’lere göre oldukça fazladır. Deşarj edilen arıtılmış atıksuyun içerdiği KOİ ve azot yüklerinin alıcı ortama deşarj ile ilgili KAİ ile doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir. Çıkış KOİ ve azot konsantrasyonları yakın olsalar bile debilerdeki farklılıklar AAT’lerin farklı çıkış KOİ ve azot yüklerine sahip olmalarına sebep olmuştur.

Çizelge 4.2. AAT’lerin çıkış KOİ ve azot yükleri

AAT’ler	Çıkış KOİ yükü	Çıkış Azot yükü
AAT-1	618 ± 20	127 ± 20
AAT-2	83 ± 20	49 ± 20
AAT-3	40 ± 20	13 ± 20
AAT-4	29 ± 20	5 ± 20

AAT-3 ve AAT-4’ün benzer çıkış KOİ ve azot yüklerine sahip olmalarına rağmen, AAT-4’ün KAİ 46,84 tonCO₂e/yıl, AAT-3’ün KAİ ise 21,21 tonCO₂e/yıl olarak hesaplanmıştır. Bu durum, alıcı ortamlarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. AAT-4’te arıtılmış atıksu göle deşarj edilirken, AAT-3’te denize deşarj edilmektedir. Arıtılmış atıksuyun göle ve denize deşarjındaki fark ilgili CH₄ emisyonu EF’lerinden kaynaklanmaktadır (Çizelge 3.3). N₂O emisyonlarının hesaplanmasında deniz deşarjı için kullanılan EF 0,003 kgN₂O/kgN, göl deşarjı için kullanılan EF 0,005 kgN₂O/kgN’dır. İki EF arasındaki fark 0,002’lik az bir farktır. Ancak, CH₄ emisyonlarının hesaplanmasında deniz deşarjı için kullanılan EF 0,009 kgCH₄/kgKOİ, göl deşarjı için kullanılan EF ise 0,048 kgCH₄/kgKOİ’dir. CH₄ emisyonları arasındaki fark azımsanmayacak seviyededir. Bu verilere göre, alıcı ortam türünün farklı olması N₂O emisyonlarında bir fark yaratmazken, CH₄ emisyonlarında bir değişikliğe sebep olmaktadır. Bu nedenle, denize deşarj yapılmasının daha az CH₄ emisyonuna ve dolayısıyla daha az KAİ’ne sebep olduğu sonucuna varılmıştır.

4.1.2. AAT’lerden kaynaklanan kapsam 2 emisyonları

Kapsam 2 emisyonları AAT’lerin sahibi olduğu veya kontrol ettiği ekipman veya işlemlerde tüketilen, satın alınan elektrik, ısı veya buhardan kaynaklanan emisyonları içermektedir. KAİ hesaplama aracının geliştirilmesinde esas alınan CFCT aracında AAT’de ısıtma ve soğutma gibi hesaplamalar ayrıntılı olarak yer almaktadır. Ancak, ülkemizde AAT’lerde ısıtma ve soğutma gibi işlemler öncelikli enerji geliri/gideri olarak değerlendirilmemektedir. Bu doğrultuda, incelenen tesislere ilişkin olarak sadece elektrik enerjisi tüketimi olduğu bildirilmiş, tesis yetkilileri tüm tesislerde ısıtma ve soğutma uygulanmadığını belirtmiştir. Tesislerden tüketilen elektrik enerjisinden kaynaklanan kapsam 2 emisyonları hesaplanırken, öncelikle tüketilen elektrik miktarlarından ülkemizdeki elektrik üretimindeki yenilenebilir enerjinin payı olan %23 (ETKB 2024b) çıkarılmış ve kalan miktarlar Türkiye için elektrik enerjisi tüketimine yönelik EF olan 440 tonCO₂e/GW-sa ile çarpılarak Kapsam 2 KAİ’leri hesaplanmıştır (Çizelge 4.3).

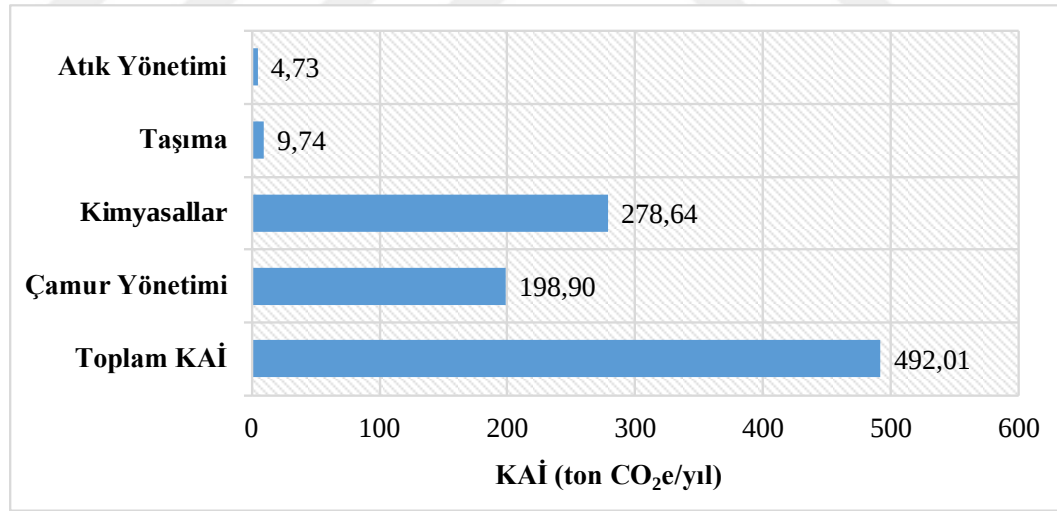
Çizelge 4.3. AAT’lerde tüketilen elektrik ve kapsam 2 KAİ’leri

AAT	Elektrik Tüketimi (MW-sa/yıl)	KAİ (kgCO ₂ /yıl)
AAT-1	6793,38	2301,60
AAT-2	2215,69	750,68
AAT-3	383,96	130,09
AAT-4	1865,76	632,12

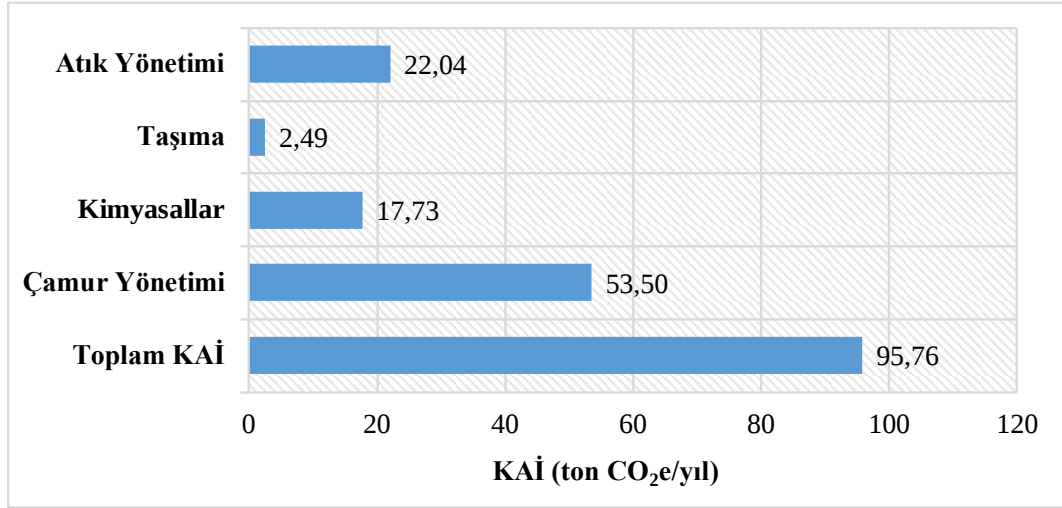
Beklendiği gibi en yüksek kapasiteli AAT-1’de en yüksek enerji tüketimi gerçekleşmekte olup, bunun sonucunda en yüksek kapsam 2 KAİ hesaplanmıştır. AAT-4 incelenen en düşük kapasiteli tesis olmasına rağmen, tesis içinde biyolojik ünite sonrasında çamur ayrımının son çöktürme yerine membranlar kullanılarak uygulanması enerji tüketiminin ve kapsam 2 KAİ’nin yüksek olmasına sebep olmuştur.

4.1.3. AAT’lerden kaynaklanan kapsam 3 emisyonları

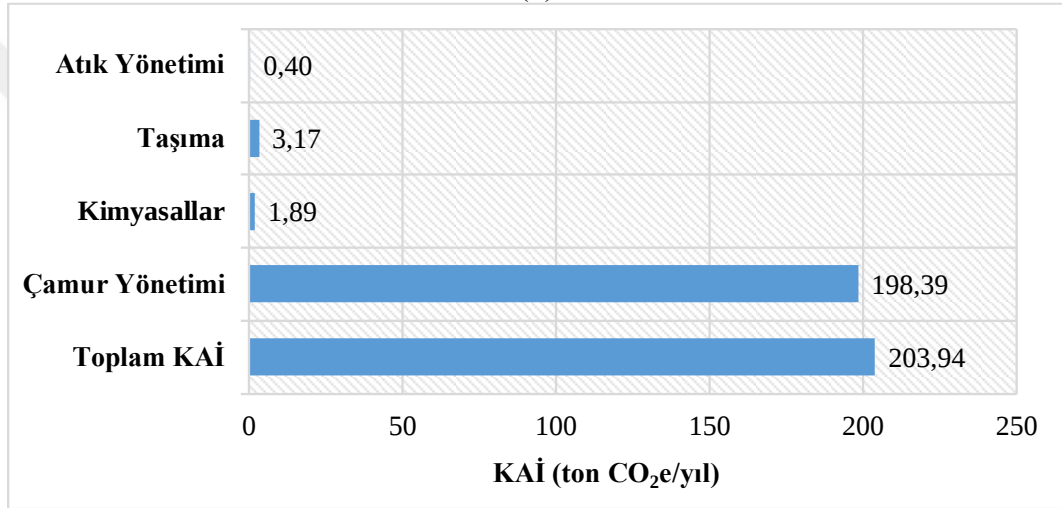
Kapsam 3 emisyonları, AAT’lerin sınırlarının bir nevi dışında kalan, AAT’ler tarafından doğrudan kontrol edilemeyen emisyonları içerir. Bu doğrultuda, kapsam 3 emisyonları kimyasalların üretimi sırasında açığa çıkan emisyonlar, ızgara atıklarının, kumun ve çamurun bertarafı sırasında açığa çıkan emisyonlar ile kimyasalların ve atıkların taşınımı sırasında açığa çıkan emisyonlardan oluşmaktadır. AAT’ler için hesaplanan kapsam 3 emisyonları Şekil 4.3’te verilmiştir.



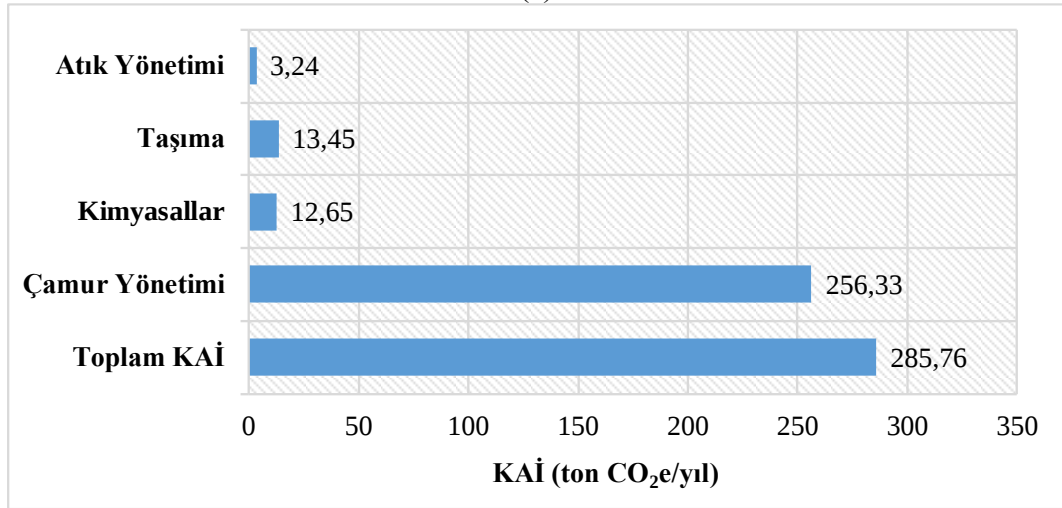
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.3. AAT'lerde açığa çıkan kapsam 3 KAI'leri ve kaynakları (a) AAT-1, (b) AAT-2, (c) AAT-3, (d) AAT-4

AAT-1 hariç tesislerde en fazla kapsam 3 emisyonuna çamur yönetimi sebep olmuştur (Şekil 4.3). AAT-1’de en fazla kapsam 3 emisyonu kullanılan kimyasallardan kaynaklanmıştır. AAT-1’de kimyasalların ardından KAI’ne katkı sağlayan süreçler yüksekte düşüğe doğru sırasıyla çamur yönetimi, taşıma ve atık yönetimi olmuştur. AAT-2’de çamur yönetiminin ardından KAI’ne katkı sağlayan süreçler yüksekte düşüğe doğru sırasıyla atık yönetimi, kimyasallar ve taşıma olmuştur. AAT-3 ve AAT-4’te ise kapsam 3 emisyonuna katkı sağlayan süreçlerin büyüklüğü benzer olmuş ve çamur yönetiminden sonra sırasıyla taşıma, kimyasallar ve atık yönetimi KAI’lerine katkı yapmıştır.

AAT’lerde çöktürmeye yardımcı olmak için polielektrolit veya katyonik polimerler ile klor kaynağı olarak sodyum hipoklorit (NaOCl) veya hidroklorik asit (HCl) kullanılmaktadır. Diğer AAT’lerden en az 6 kat yüksek debiye sahip olan AAT-1’de atıksuyun dezenfeksiyonu amacıyla NaOCl tüketimi ve çamur çökmesini iyileştirmek için kullanılan polielektrolit miktarının fazla olması kimyasalların en yüksek kapsam 3 KAI’ne sahip süreç olmasına sebep olmuştur (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4. AAT’lerde kullanılan kimyasalların miktarları

AAT	Sodyum Hipoklorit (ton/yıl)	Polielektrolit (ton/yıl)	Katyonik Polimer (ton/yıl)	HCl (ton/yıl)
AAT-1	162,46	76,99	-	-
AAT-2	-	15	-	-
AAT-3	-	-	2,35	-
AAT-4	6	-	6,79	0,28

Taşıma sürecinden kaynaklanan KAI’leri ise bu çalışma içerisindeki AAT’lerde oldukça farklılık göstermektedir. Bu taşınan yük miktarları ve taşıma mesafelerinden kaynaklanmaktadır. AAT’lerde taşınan yükler, bu yüklerin taşıma mesafeleri ve bu yüklerin taşınması için kullanılan araçların yükleri Çizelge 4.5’te özetlenmiştir. Kimyasalların taşınması ile ilgili mesafeler kullanılan kimyasal miktarına bağlıdır. Izgara ve kum atıklarının taşınma mesafelerindeki farklılıklar ise bu atıkların bertaraf edildiği depolama alanlarına olan mesafe ile ilişkilidir. AAT-1, AAT-2, AAT-3 ve AAT-4’ün atıklarının bertaraf edildikleri düzenli depolama alanlarına uzaklığı sırasıyla, 16 km, 12 km, 50 km ve 70 km olarak bildirilmiştir.

Çizelge 4.5. AAT’lerde taşıma ile ilgili bilgiler

AAT	Kimyasalların taşınması		Izgara atıkları ve Kumun taşınması		Çamurun taşınması	
	Mesafe (km/yıl)	Araç Kapasitesi (ton)	Mesafe (km/yıl)	Araç Kapasitesi (ton)	Mesafe (km/yıl)	Araç Kapasitesi (ton)
AAT-1	12035	7,5-16	640	<7,5	5840	7,5-16
AAT-2	902,7	7,5-16	1260	<7,5	2184	16-32
AAT-3	624	7,5-16	400	<7,5	3741	16-32
AAT-4	1350	7,5-16	1120	<7,5	3600	16-32

Benzer değerlendirme çamurların taşınması için de yapılmış olup AAT-1 ve AAT-2 çamurlarının taşındığı düzenleme depolama alanlarının uzaklıkları sırasıyla 16 km ve 12 km olarak bildirilmiştir. AAT-3 ve AAT-4'te oluşan arıtma çamurlarının nihai bertarafının gerçekleştirildiği yakma tesislerinin AAT'lere uzaklıkları sırasıyla 41 km ve 80 km olarak bildirilmiştir. Bu doğrultuda, AAT-1'de tüketilen yüksek miktardaki kimyasal taşımadan kaynaklı emisyonlara en büyük katkıyı sağlarken, AAT-3 ve AAT-4'te miktarları diğer tesislerden az olsa da çamurların ve diğer atıkların uzak mesafelerdeki nihai bertaraf alanlarına taşınması yüksek KAI'lerine sebep olmaktadır (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.6. Taşıma aşamasında açığa çıkan emisyon miktarları

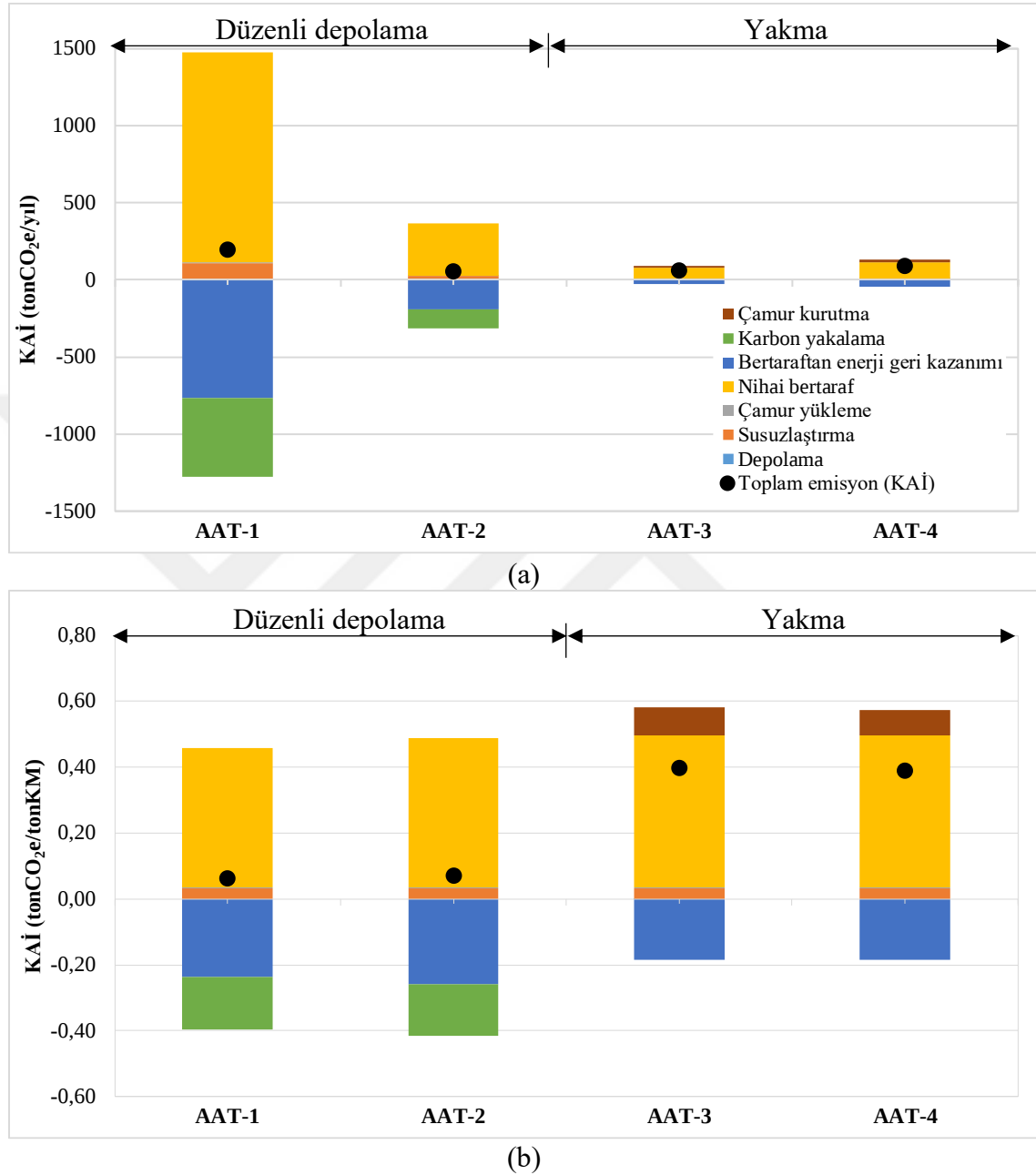
AAT	Kimyasallar (tonCO ₂ e/yıl)	Çamur (tonCO ₂ e/yıl)	Izgara atıkları (tonCO ₂ e/yıl)	Kum (tonCO ₂ e/yıl)	Toplam (tonCO ₂ e/yıl)
AAT-1	6,41	3,11	0,16	0,06	9,74
AAT-2	0,48	1,58	0,24	0,20	2,49
AAT-3	0,33	2,70	0,017	0,03	3,08
AAT-4	0,72	2,60	0,21	0,16	3,70

Çamur yönetimi ile ilgili kapsam 3 emisyonları her bir emisyon kaynağı ve emisyon kazanımı açısından değerlendirilmiştir (Şekil 4.4). Tüm AAT'lerde çamur susuzlaştırılmakta ve ardından nihai bertaraf alanına gönderilmektedir. AAT 3'te diğer AAT'lerden farklı olarak arıtma çamurları 1 gün süreyle depolanmaktadır. Çamur yükleme ise yüksek miktardaki çamurun nihai bertaraf alanına taşınmak için kamyonlara yüklenmesi için dizel harcanmasından kaynaklanan emisyonları ifade etmektedir. Depolama, susuzlaştırma ve yükleme ilgili emisyonlar doğrudan çamur katı madde (KM) içeriğine bağlı olarak hesaplanmaktadır.

Nihai bertaraf yöntemi olarak AAT-1 ve AAT-2'de oluşan arıtma çamurlarına düzenli depolama uygulanırken, AAT-3 ve AAT-4'te açığa çıkan arıtma çamurları yakılmaktadır. Düzenli depolama ve yakma işlemlerinin her ikisinde de enerji geri kazanımı gerçekleştirildiği kabul edilmiştir. Ek olarak düzenli depolama alanına serilen çamurda bulunan karbon miktarı başına 0,1 kg karbonun tutulduğu Foley vd. (2010) kabulü sonucunda düzenli depolama ile karbon emisyonlarında ek bir azaltım olmuştur. Şekil 4.4a'da AAT-1'de çamur yönetimi sonucu daha fazla CO₂ emisyonu açığa çıktığı görülmektedir. Ancak, çamur yönetiminden kaynaklanan emisyonların bertaraf edilen çamur miktarına göre değerlendirilmesi sonucunda bertaraf edilen katı madde başına yakma uygulanmasıyla daha fazla emisyon açığa çıktığı belirlenmiştir (Şekil 4.4b).

AAT'lerde salınan emisyonlar değerlendirildiğinde arıtma çamurlarının düzenli depolanmasından kaynaklanan emisyonlar 0,46-0,49 tonCO₂e/tonKM olarak hesaplanırken, arıtma çamurlarının yakılmasından kaynaklanan emisyonlar 1,3-1,4 tonCO₂e/tonKM olarak hesaplanmıştır. Emisyon azaltımlarının da göz önüne alınmasıyla hesaplanan net emisyonlar değerlendirildiğinde ise; arıtma çamurlarının düzenli depolanmasının 0,062-0,071 tonCO₂e/tonKM, kurutulması ve ardından yakılmasının ise 1,12-1,24 tonCO₂e/tonKM emisyonu sebep olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre düzenli depolanmanın daha az KAI'ne sebep olan çamur bertaraf yöntemi olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak, mevcut yasal düzenlemeler arıtma çamurlarının düzenli

depolanmasının azaltılmasını ve enerji geri kazanımının artırılmasını gerektirmektedir. Bu doğrultuda, tesislerin KAİ'lerinin azaltılmasında diğer çamur bertaraf yöntemlerinin de değerlendirilmesi önem arz etmektedir.

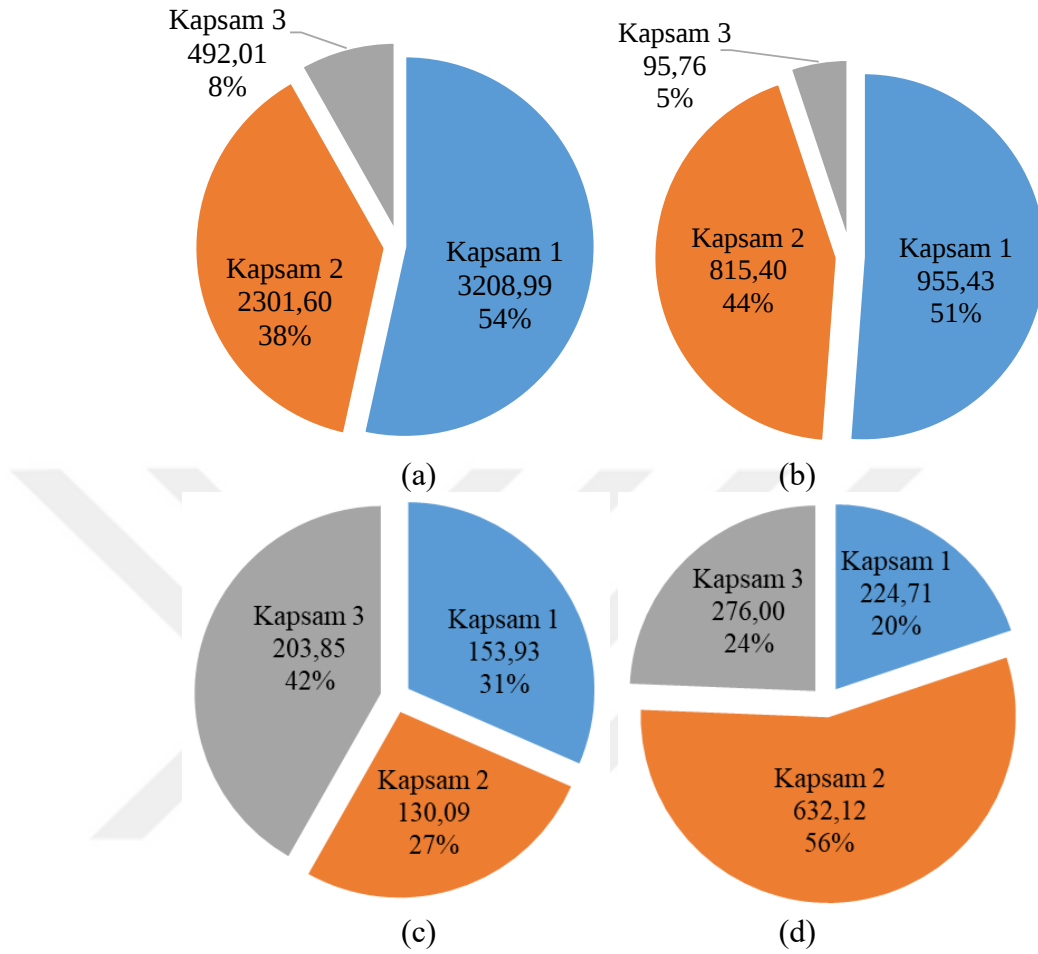


Şekil 4.4. AAT'lerde açığa çıkan çamur yönetimi emisyonlarının kaynakları (a) KAİ (tonCO₂e/yıl), (b) KAİ (tonCO₂e/tonKM)

4.1.4. AAT'lerin toplam karbon ayak izleri

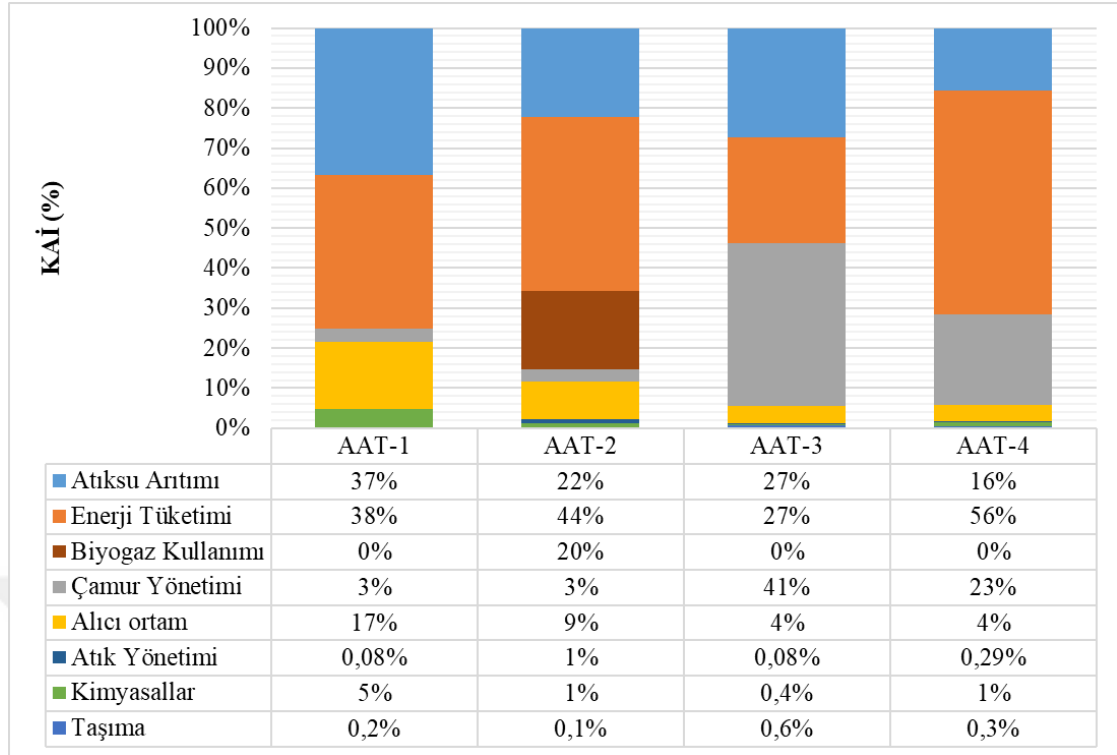
AAT'lerden kaynaklanan toplam KAİ'leri AAT-1, AAT-2, AAT-3 ve AAT-4 için sırasıyla, 6002,60 tonCO₂e/yıl, 1866,59 tonCO₂e/yıl, 487,86 tonCO₂e/yıl ve 1132,83 tonCO₂e/yıl olarak hesaplanmıştır. Kapsam 1, 2, ve 3 emisyonlarının AAT'lerin toplam KAİ'lerine katkıları Şekil 4.5'te verilmiştir. AAT-1 ve AAT-2'de en yüksek emisyon kaynakları sırasıyla, %54 ve %51 ile kapsam 1 emisyonları olurken, AAT-3 için en

yüksek emisyon kaynağı %42 ile kapsam 3 emisyonları, AAT-4 için ise en yüksek emisyon kaynağı %56 ile kapsam 2 emisyonları olmuştur.



Şekil 4.5. AAT KAI'lerinin emisyon kapsamına göre değerlendirilmesi (tonCO₂e/yıl)
(a) AAT-1, (b) AAT-2, (c) AAT-3, (d) AAT-4

AAT-4'ün kapsam 2 emisyonlarının fazla olması tesis içerisinde membran filtrasyon ünitesinin fazla enerji tüketiminden kaynaklanmıştır. AAT-1 ve AAT-2 benzer arıtma sistemlerine ve çamur bertaraf yöntemlerine sahip oldukları için emisyon çıktıları benzerlik göstermektedir. AAT-3'ün kapsam 3 emisyonlarının fazla olmasının sebebi çamurun bertarafı için uygulanan yakma prosesidir. Yakma prosesi öncesinde uygulanan çamur kurutma işleminde yüksek enerji tüketimi sonucunda yüksek miktarda sera gazı emisyonu açığa çıkmaktadır. AAT-4'te de çamur bertarafı için yakma prosesi uygulanmakla birlikte, enerji tüketiminden kaynaklı kapsam 2 emisyonlarının fazla olması nedeniyle, çamurun yakılmasını içeren kapsam 3 emisyonları 2. en yüksek emisyon kaynağı olmuştur. AAT'lerin toplam KAI'lerine her bir sürecin katkısı Şekil 4.6'da görülmektedir. AAT'lerin KAI'lerine en büyük katkıyı atıksuların arıtımı ve enerji tüketimi yapmıştır. Bu iki aşamanın en fazla emisyon açığa çıkarması beklenen bir durumdur. Literatürde bulunan bilgilere göre AAT'lerde en fazla enerji tüketimi havalandırma ve pompa ünitelerinde gerçekleştiği için atıksuyun arıtılması ve enerji tüketimi birbiriyle orantılı olmaktadır.

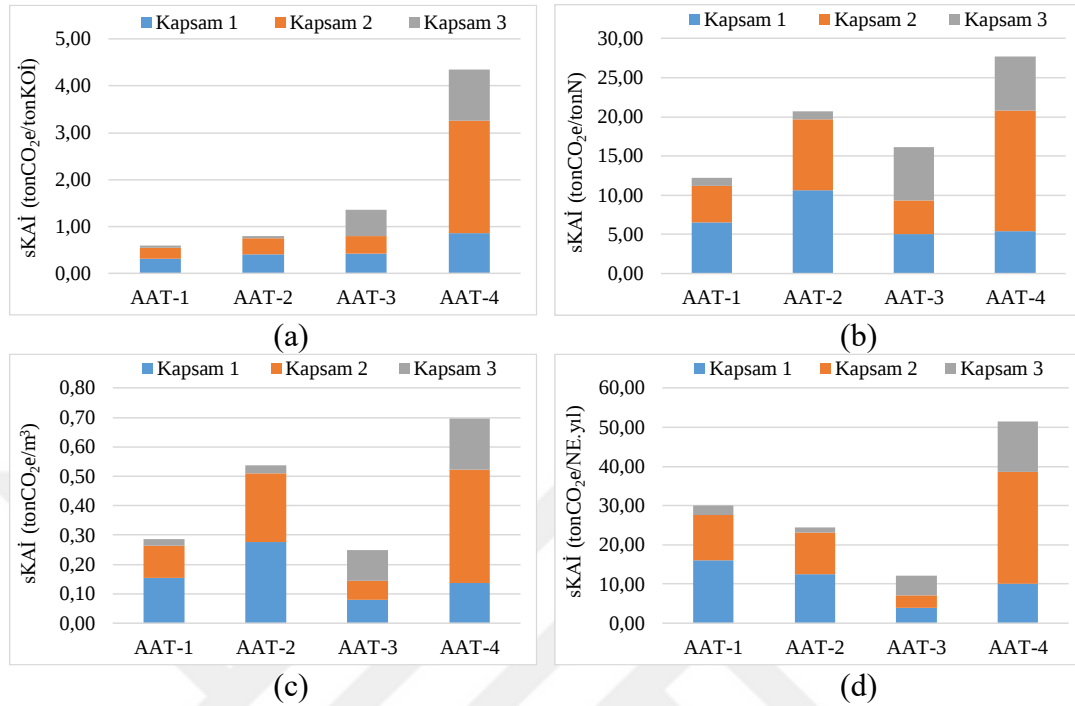


Şekil 4.6. AAT’lerde açığa çıkan emisyonların kaynakları

AAT-1 ve AAT-3’te atıksuyun artıtımı ve enerji tüketimi kaynaklı KAI’lerinin benzer oranda olduğu belirlenirken, AAT-2 ve AAT-4’te farklı oranlara sahip olup, enerji tüketiminden dolayı oluşan KAI yüzdelерinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. AAT-2’de arıtılmış atıksuların sulama suyu olarak kullanılması amacıyla ultraviyole (UV) disk filtre dezenfeksiyon uygulanması, AAT-4’te ise çamur ayırımının son çökeltme tankı yerine membran filtrasyon ile gerçekleştirilmesi daha fazla enerji tüketimine sebep olmuştur. AAT-2’yi diğer tesislerden ayıran bir diğer özellik tesisin içerisinde biyogaz elde edilmesi ve kullanılmasıdır. Biyogazın kullanımından dolayı oluşan KAI’nin neredeyse atıksu artıtımından dolayı oluşan KAI’ne yakın olduğu bulunmuştur. AAT-3 ve AAT-4’te yakma uygulandığı için yakma ve öncesinde uygulanan kurutma işlemlerinin yüksek enerji tüketimi sebebiyle çamur yönetimi toplam KAI’ne AAT-1 ve AAT-2’ye kıyasla daha yüksek katkı yapmıştır.

AAT’lerin spesifik KAI’leri (sKAI) tesislerde giderilen KOİ ve azot yükleri ile tesis debisi ve tüketilen elektrik miktarı açısından değerlendirilmiştir (Şekil 4.7). Şekil 4.7a incelendiğinde, tesislerde giderilen KOİ başına açığa çıkan sera gazı emisyonlarının 0,6-4,34 tonCO₂e/tonKOİ arasında farklılık gösterdiği ve en yüksek orana en az KOİ giderilen AAT-4’ün sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, özellikle AAT-4’te arıtma çamurlarının arıtılmış sudan ayrılması amacıyla son çöktürme tankı yerine membran filtrasyon uygulanmasından dolayı kapsam 2 emisyonlarının diğer tesislere kıyasla yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. AAT’lerden giderilen KOİ açısından sadece kapsam 1 emisyonları incelendiğinde, giderilen KOİ yükü azaldıkça açığa çıkan kapsam 1 emisyonlarının arttığı belirlenmiştir (Şekil 4.7a). AAT’lerin KAI’lerinin giderilen azot yükü açısından değerlendirilmesi sonucunda ise (Şekil 4.7b), yine elektrik tüketiminden

kaynaklı emisyonların belirleyici olduğu ve giderilen azot yükü başına emisyonların 12,23-27,70 tonCO₂e/tonN arasında olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.7. AAT'lerde açığa çıkan emisyonların (a) giderilen KOİ, (b) giderilen azot, (c) debi, (d) nüfus eşdeğeri (NE) açısından değerlendirilmesi

Şekil 4.7c incelendiğinde ise; AAT'lerde uygulanan farklı birim işlemler nedeniyle debi ile KAİ arasından doğrudan bir ilişkisi olmadığı belirlenmiştir. En yüksek debiye sahip olan AAT-1 ile oldukça düşük debili AAT-3 için oldukça yakın 0,25-0,29 kgCO₂e/m³ emisyon değerleri belirlenmiştir. Hizmet edilen nüfus açısından değerlendirildiğinde, tesis kapasitesi azaldıkça emisyon miktarlarının azaldığı belirlenirken, AAT-4'teki yüksek enerji tüketiminden kaynaklı emisyonlar elde edilen sonuçların diğer AAT'lerden farklı olmasına sebep olmuştur (Şekil 4.7d).

4.2. AAT'lerin KAİ'lerinin Karşılaştırılması

Literatürde bu tez çalışmasında esas alınan CFCT aracı veya farklı yöntemler kullanılarak KAİ hesaplamalarının yapıldığı çalışmalar incelenmiştir. Çeşitli ülkelerde, farklı biyolojik arıtma konfigürasyonuna sahip AAT'ler için KAİ hesaplamaları yapılmış olmakla birlikte, bu tez çalışmasında incelenen AAT'ler A²/O konfigürasyonuna sahip olduğu için literatürde bulunan çalışmalardan A²/O konfigürasyonuna sahip AAT'ler için belirlenen KAİ'leri incelenmiştir. Bu doğrultuda, A²/O konfigürasyonuna sahip AAT'ler için hesaplanan KAİ'leri ve nüfus eşdeğeri, debi, giderilen KOİ ve giderilen N'e göre hesaplanan spesifik KAİ'leri (sKAİ) Çizelge 4.7'de özetlenmiştir. Çizelge 4.7'de verilen KAİ'leri incelendiğinde, AAT'lerde eşdeğer nüfus başına sKAİ'nin ortalama 34,98 tonCO₂e/NE.yıl olmakla birlikte 12,20-99,70 tonCO₂e/NE.yıl arasında çok geniş aralıkta değiştiği görülmektedir.

Çizelge 4.7. A²/O konfigürasyonuna sahip AAT'lerde hesaplanan KAI'leri

Ülke	Çamur arıtma Yöntemi	Biyogaz üretimi	Nüfus	Debi (m ³ /gün)	KAI (tonCO ₂ e/yıl)	sKAI (kgCO ₂ e/Ne.yıl)	sKAI (kgCO ₂ e/m ³)	sKAI (tonCO ₂ e/tonKOİ)	sKAI (tonCO ₂ e/tonN)	Kaynaklar
Polonya	Kompost	Var	200000	23000	4740	25,80	0,6	0,5	7,9	Maktabifard vd. (2020)
	Tarım	Var	80000	8700	2055	42,10	0,6	0,6	13,1	
	Düzenli depolama	Yok	70000	9600	6026	99,70	1,7	1,7	25,9	
	Tarım	Yok	60000	8500	2350	38,80	0,8	1,0	11,5	
İtalya	Kompost	Var	73000		3033,4	24,45		1,7	18,2	Marinelli vd. (2021)
	Kompost	Var	40000		1375,4	32,06		1,1	23,7	
	Kompost	Var	32000		4454,3	36,42		3,8	49,1	
	Kompost	Yok	3000		211,2	16,82		4,2	27,9	
	Kompost	Yok	4500		240,3	19,22		2,8	23,6	
Polonya	Kompost	Var	250000	24000	4338	17,20	0,50		6,90	Maktabifard vd. (2019)
	Tarım	Yok	60000	8400	2350	38,80	0,80		11,50	
İsveç	Tarım		25000	4728	522	38,5	0,3	0,7	4,7	Alden (2020)
Çin	Yakma+ tarım		168000	71336	5868,41	34,93	0,23	1,82	18,07	Wang vd. (2023)
	Yakma+ tarım		112000	41766	6648,86	59,36	0,44	2,41	24,81	
Çin				70000	23787,05		0,93	2,4	18,6	Zeng vd. (2017)
				75000	30961,125		1,13	2,1	32,3	
				40000	23914,8		1,64	2,3	46,8	
Türkiye	Düzenli depolama	Yok		65394	17715,64		1,64	1,8	24,0	Çankaya ve Pekey (2023)
AAT-1	Düzenli depolama	Yok	200000	57358	6002,60	30,01	0,29	0,6	12,2	Bu çalışma
AAT-2	Düzenli depolama	Var	76340	9520	1866,59	24,45	0,54	0,8	20,7	Bu çalışma
AAT-3	Yakma	Yok	40000	5350	487,95	8,44	0,25	1,4	16,1	Bu çalışma
AAT-4	Yakma	Yok	22200	4500	1142,59	42,54	0,70	4,3	27,7	Bu çalışma

Arıtma çamurundan biyogaz üretimi KAI'ni önemli ölçüde etkilediği için tesisler biyogaz üretimine göre ayrı ayrı değerlendirilirse, biyogaz üretimi olan tesislerde nüfus başına sKAI 17,20-59,36 tonCO₂e/NE.yıl arasında değişirken, biyogaz üretimi olmayan tesislerde nüfus başına sKAI'nin 8,44-99,70 tonCO₂e/NE.yıl arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu tez çalışması kapsamında incelenen ve biyogaz üretimi içeren tek tesis olan AAT-2 için nüfus başına sKAI 24,45 tonCO₂e/NE.yıl olarak hesaplanmış olup, bu değer biyogaz üretimi gerçekleştirilen tesisler içinde en küçük ikinci değer olmuştur. Bu tez çalışmasında incelenen biyogaz üretimi olmayan AAT-1, AAT-3 ve AAT-4 için nüfus başına sKAI sırasıyla 30,01, 12,20 ve 51,47 tonCO₂e/NE.yıl olarak hesaplanmış olup AAT-3 için hesaplanan sKAI'nin incelenen tüm tesisler arasında en düşük sKAI'ye sahip olduğu belirlenmiştir. İncelenen tesislerin bazıları enerji ihtiyaçlarını büyük ölçüde yenilenebilir enerji kaynaklarında karşılamakla birlikte, AAT-3'te en düşük sKAI elde edilmesinin arıtma çamurlarının yakılması ile enerji geri kazanımından kaynaklı KAI azaltımı olduğu sonucuna varılmıştır.

Giderilen m³ atıksu başına sKAI değerleri incelendiğinde, ortalama 0,77 kgCO₂e/m³ olmakla birlikte 0,23-1,70 kgCO₂e/m³ arasında değerler belirlenmiştir. Bu çalışmada belirlenen m³ atıksu başına sKAI değerleri 0,25-0,70 arasında olup AAT-4 dışındaki tesislerde belirlenen m³ atıksu başına sKAI değerlerinin literatürde bulunan değerlere benzer olduğu görülmektedir. Benzer şekilde giderilen KOİ ve giderilen azot başına sKAI değerleri incelendiğinde, bu çalışmada incelenen AAT'lerin düşük sKAI değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Literatürde bulunan çalışmalardan KAI'lerinin kapsamlara göre değerlendirildiği çalışmalar Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. A²/O konfigürasyonlu AAT'lerde KAI'lerine kapsamların katkısı

Ülke	Kapsam 1 (%)	Kapsam 2 (%)	Kapsam 3 (%)	Kaynaklar
Polonya	62	23	15	Maktabifard vd. (2020)
	74	21	5	
	26	69	5	
	34	72	-6	
Polonya	72	26	2	Maktabifard vd. (2022)
Finlandiya	67	18	15	
İtalya	45	29	26	Marinelli vd. (2021)
	24	41	34	
	76	14	10	
	79	18	3	
	68	29	3	Shahid vd. (2023)
Kore	41	53	6	
AAT-1	53	38	8	Bu çalışma
AAT-2	51	44	5	
AAT-3	32	27	42	
AAT-4	20	55	25	

Çalışmalar incelendiğinde kapsam 1, 2 ve 3 emisyonların katkısının sırasıyla ortalama %51,5, %36,1 ve %12,4 olduğu görülmektedir. Enerji ihtiyacının yenilenebilir enerjiden sağlandığı tesislerde kapsam 2 emisyonlarının önemli ölçüde azaltılabildiği belirlenmiştir. Kapsam 3 emisyonlarının az olarak belirlendiği tesislerde ise arıtma çamurlarının tarım arazisinde kullanımı ve ızgara ile kum atıklarının geri kazanıldığı

belirlenmiştir. Çalışmaların büyük çoğunluğunda, atıksu arıtımından kaynaklanan emisyonların oldukça fazla olduğu ve özellikle N₂O emisyonlarının azaltılmasına yönelik çalışmaların yapılması önerilmektedir.

4.3. AAT’lerde Enerji Tüketimi ve KAI’lerinin Azaltılmasına Yönelik Stratejiler

Tez çalışmasının son aşamasında, incelenen AAT’lerin KAI’nin azaltılmasına yönelik senaryolar geliştirilmiştir. AAT’lerin KAI’ne en yüksek katkıları sağladığı belirlenmiş olan atıksu arıtımına ilişkin olarak çamur süzöntü suyunun ayrı olarak arıtılması, enerji tüketiminden kaynaklı emisyonların azaltılması için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, biyogaz üretimi olan AAT 2’de mevcut durumda elektrik ve ısı ihtiyacı için kullanılan biyogazın farklı amaçlarla kullanımı ile atık ve çamurların farklı yöntemlerle bertaraf edilmesine yönelik senaryolar geliştirilmiştir (Çizelge 4.9).

Çizelge 4.9. AAT’lerde KAI’nin iyileştirilmesi için oluşturulan senaryolar

Senaryolar	Açıklama
Senaryo 1	Enerji kaynağına yenilenebilir enerji kaynaklarının eklenmesi
Senaryo 2	Çamur bertaraf yönteminin değiştirilmesi
Senaryo 3	AAT-2’de biyogazın farklı amaçlar için kullanılması
Senaryo 4	Çamur süzöntü suyunun ayrı arıtılması
Senaryo 5	Atık bertaraf yönteminin değiştirilmesi

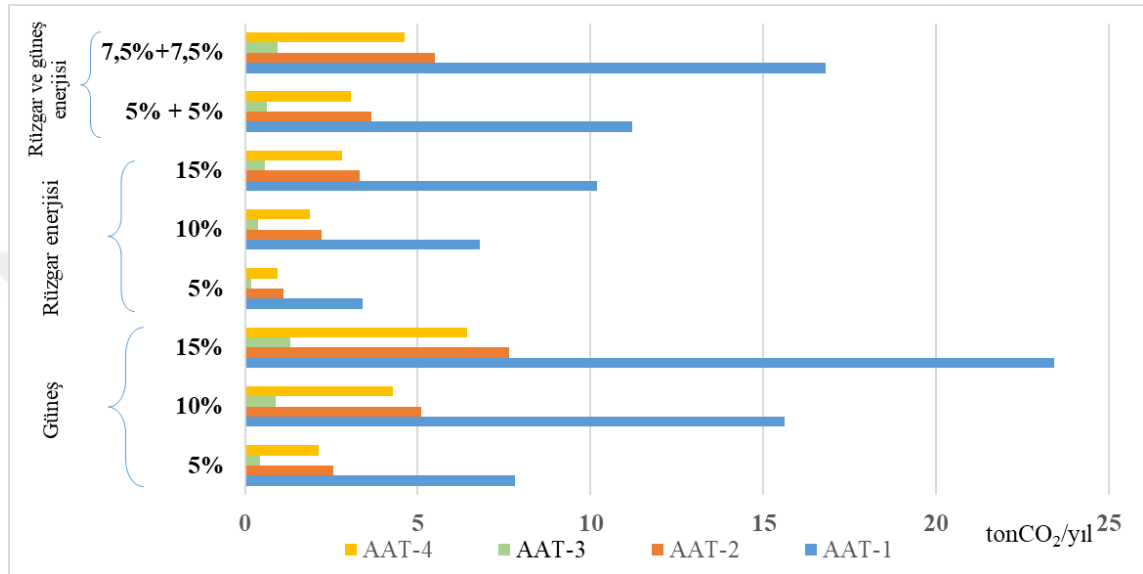
Çizelge 4.9’da gösterildiği üzere 5 farklı senaryo belirlenmiştir. Senaryo 1’de AAT’lerin enerji tüketim kaynaklarına yenilenebilir enerji kaynakları eklenmesiyle KAI’deki değişimlerden incelenmiştir. Senaryo 2’de AAT’lerde oluşan arıtma çamurlarına farklı çamur bertaraf yöntemleri uygulanmasının KAI’ne etkileri belirlenmiştir. Senaryo 3’te AAT-2’de elektrik ve ısı olarak kullanılan biyogazın farklı amaçlarla kullanılması sonucu KAI’deki değişim incelenmiştir. Senaryo 4’te çamur süzöntü suyunun ayrı olarak farklı prosesle arıtılması durumunda KAI’deki değişimler değerlendirilmiştir. Senaryo 5’te ise AAT’lerde açığa çıkan ızgara atıkları ve kumun farklı yöntemler ile bertaraf edilmesi durumunda oluşan KAI değerleri hesaplanmıştır.

Senaryo 1’de AAT’lerin enerji ihtiyacının bir kısmının güneş veya rüzgâr enerjisinden elde edilmesi durumu değerlendirilmiş olup, ilk olarak enerji ihtiyacının %5-15 oranında yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması durumlarında kullanılan elektrik enerjisinin ne kadar azaltılabileceği hesaplanmıştır (Çizelge 4.10).

Çizelge 4.10. Senaryo 1 kapsamında hesaplanan yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılanacak enerji yüzdeleri ve miktarları

Enerji Geri Kazanımı	AAT-1	AAT-2	AAT-3	AAT-4	Birim
5%	339,67	110,78	19,19	93,28	MW-sa
7,5%	509,5	166,18	28,79	139,93	MW-sa
10%	679,34	221,57	38,39	186,58	MW-sa
15%	1019	332,35	57,59	279,86	MW-sa

Çalışma kapsamında yenilenebilir enerjinin enerji ihtiyacının en fazla %15 oranında karşılayabileceği kabulüyle (Hao vd. 2015, Harper 2017, Manal ve Rashed 2017), güneş veya rüzgâr enerjisinin farklı oranlarda kullanımı ve ayrıca her iki yenilenebilir enerji kaynağının birlikte aynı oranda kullanımı sonucu AAT'lerde azaltılabileceği hesaplanan KAI miktarları Şekil 4.8'de görülmektedir. Rüzgâr enerjisi kullanımına ilişkin EF 10 tonCO₂e/GW-sa ve güneş enerjisi kullanımına ilişkin EF 23 tonCO₂e/GW-sa olarak kabul edilmiştir (Erdoğan vd. 2020).



Şekil 4.8. Azaltılan KAI miktarları (tonCO₂e/yıl)

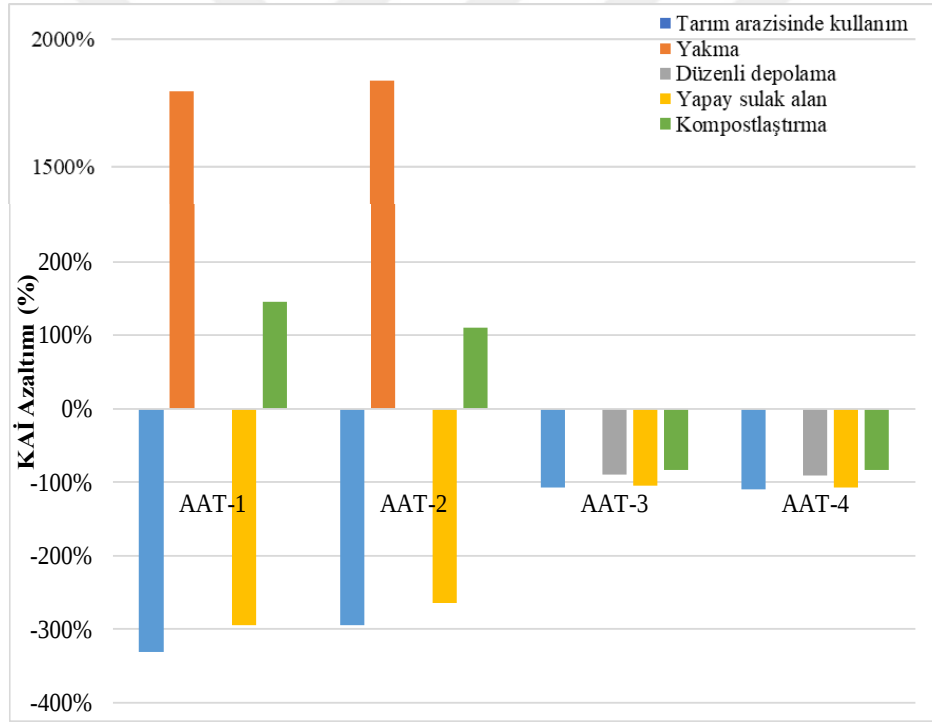
Daha düşük EF'ye sahip olduğu için beklendiği gibi; rüzgâr enerjisinin kullanımı KAI'nin daha fazla azaltılmasını sağlamıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde enerji ihtiyacının %15 oranında güneş enerjisinden karşılanması durumunda KAI'nde %13,98 oranında azaltım sağlanırken, rüzgâr enerjisinden karşılanması durumunda %14,56 azaltım sağlanmaktadır. Enerji ihtiyacının %7,5 oranında güneş enerjisi ve %7,5 oranında rüzgâr enerjisinden karşılanması durumunda ise KAI'nde azaltım %14,27 olmuştur. Bu doğrultuda, AAT'lerin kapsam 2 emisyonlarını azaltmak için yenilenebilir enerji kaynağı olarak tesisin konum ve coğrafyasına göre rüzgâr veya güneş enerjisinin kullanımının etkili olacağı sonucuna varılmıştır. Ancak, AAT'lerin rüzgâr ve/veya güneş enerjisi sağlamak için uygun bölgede olup olmadığı ve teorik olarak elde edilen sonuçların sahada da aynı enerji geri kazanımları sağlayıp sağlamadıkları belirsizdir. Bir sonraki çalışmalarda daha detaylı hesaplamalar yapılması önerilmektedir.

Senaryo 2 kapsamında AAT'lerde oluşan arıtma çamurların bertaraf yöntemi olarak tarım arazisinde kullanım, yakma, düzenli depolama, yapay sulak alanda kullanım ve kompostlaştırma yöntemlerinin uygulanması halinde KAI'nde sağlanabilecek azaltımlar hesaplanmıştır. Çizelge 4.11'de farklı çamur bertaraf yöntemlerinin KAI değerleri verilmiş, Şekil 4.9'da ise mevcut çamur bertaraf yöntemine kıyasla farklı çamur bertaraf yöntemleri uygulanmasının KAI'nin hangi yönde değiştiği değerlendirilmiştir. En düşük KAI'leri arıtma çamurlarının susuzlaştırılmanın ardından tarım alanlarında veya yapay sulak alanlarda kullanımı ile elde edilmiştir. Arıtma çamurlarının tarım

arazisinde kullanımı sentetik gübre kullanımını azaltarak, yapay sulak alanlar diğer çamur bertaraf yöntemlerine kıyasla daha yüksek karbon yakalama sağlayarak çamur yönetiminden kaynaklanan KAI'nin azaltılmasını sağlamaktadır. Arıtma çamurlarının bertarafı için yapay sulak alanların kullanımı ülkemizde yaygın olmamakla birlikte, çeşitli çalışmalarda arıtma çamurlarının yönetiminden kaynaklı sera gazı emisyonlarının azaltılması için elverişli bir yöntem olarak önerilmektedir (Uggetti vd. 2012; Olsson vd. 2014).

Çizelge 4.11. Arıtma çamurlarının farklı yöntemlerle bertarafının KAI'leri

Senaryolar	AAT-1	AAT-2	AAT-3	AAT-4	Birim
Mevcut durum	202,014	55,072	201,091	258,924	tonCO ₂ e/yıl
Tarım arazisinde kullanım	-465,81	-107,21	-13,39	-24,29	tonCO ₂ e/yıl
Yakma	3829,20	1067,72	201,09	258,92	tonCO ₂ e/yıl
Düzenli depolama	202,01	55,07	21,32	24,86	tonCO ₂ e/yıl
Yapay sulak alan	-392,58	-90,22	-9,77	-19,14	tonCO ₂ e/yıl
Kompostlaştırma	496,42	116,02	34,36	43,32	tonCO ₂ e/yıl

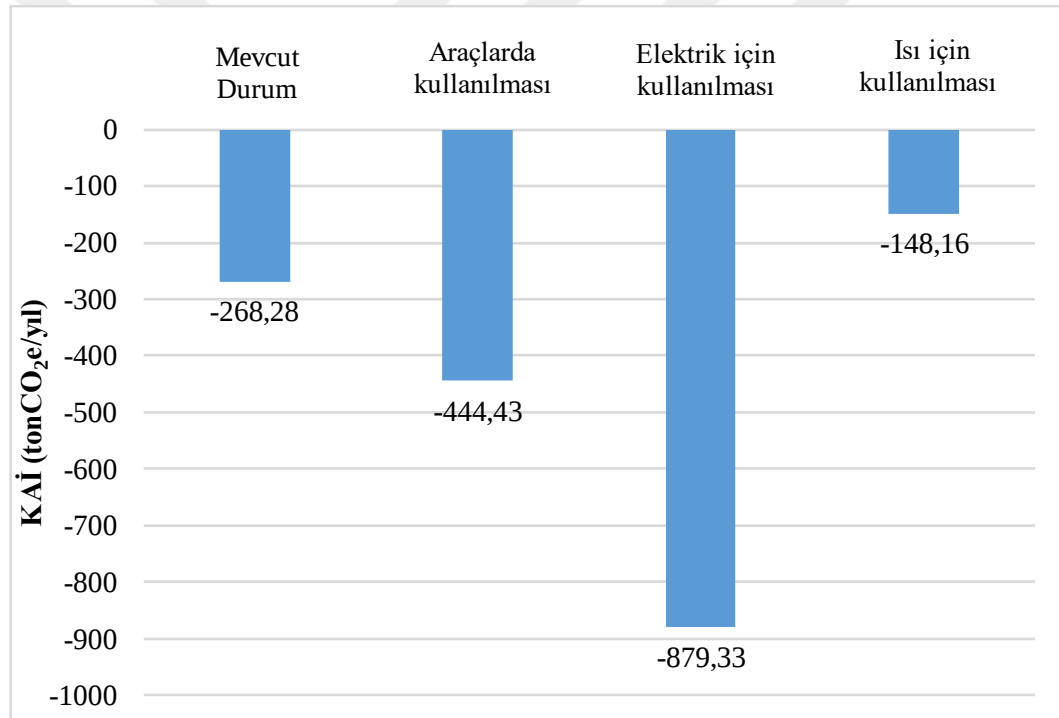


Şekil 4.9. Farklı çamur bertaraf yöntemlerinin KAI'ne etkileri

Şekil 4.9'da görüleceği üzere, öncesinde çamur kurutma uygulanması zorunlu olan yakma halihazırda çamur yönetimi amacıyla düzenli depolama uygulanan AAT-1 ve AAT-2'nin KAI'nin artmasına sebep olmuştur. Benzer şekilde AAT-1 ve AAT-2'de açığa çıkan arıtma çamurlarının düzenli depolama yerine kompostlaştırma ile bertarafı KAI'lerinin artmasına sebep olmuştur. Bu sonuçlara göre, arıtma çamurlarında bulunan ağır metal gibi toksik maddelerin kontrolünün mümkün olduğu durumlarda arıtma çamurlarının tarım arazisinde kullanımı KAI açısından en uygun çözüm olarak

belirlenmiştir. Yakma prosesinde oluşan karbon emisyonlarının yaklaşık %71,6-78'i çamur kurutma işleminden kaynaklanmıştır. Günümüzde yaygın olarak uygulanan yakma prosesinin ise kurutma için gerekli enerji ihtiyacının azaltılması halinde KAİ açısından uygulanabilir bir proses olmasının sağlanabileceği düşünülmektedir.

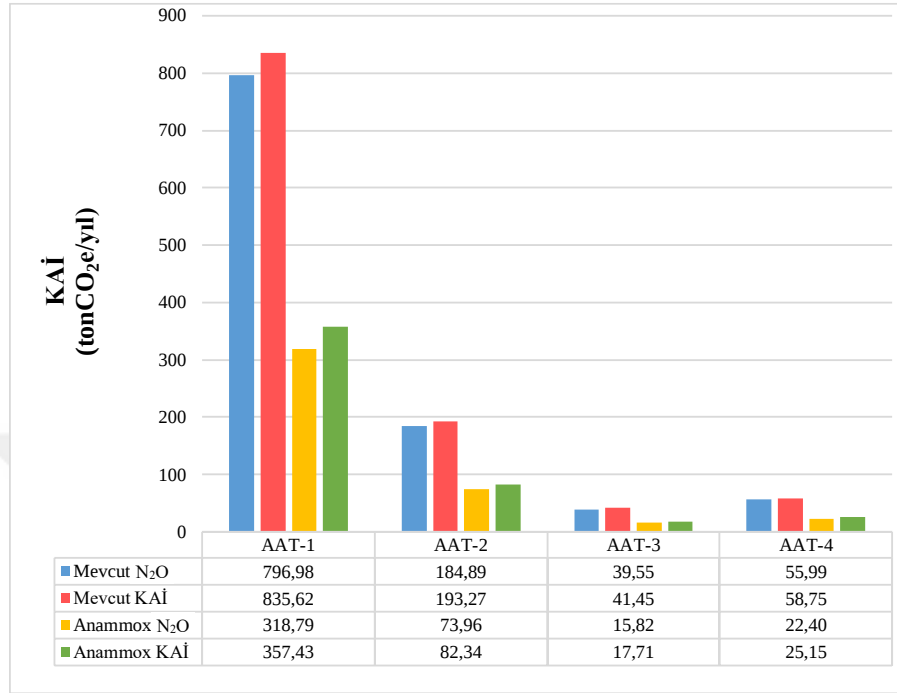
Senaryo 3'te AAT-2'de oluşan biyogazın elektrik ve ısı için kullanılması yerine sadece elektrik veya sadece ısı üretimi için kullanımı ile araç yakıtı olarak kullanılması senaryoları değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Biyogazın ısı üretimi için kullanılması durumunda daha az emisyon azaltımı sağlanabileceği, tamamının elektrik enerjisi üretimi amacıyla kullanımı sırasında ise en yüksek sera gazı azaltımının sağlanabileceği belirlenmiştir. Mevcut durumda biyogazdan elektrik ve ısı elde edilmesiyle KAİ'de 268,28 tonCO₂e/yıl'lık bir azaltım sağlanmaktadır. AAT-2'de üretilen biyogazın tamamının elektrik üretimi amacıyla kullanımı, mevcut enerji kaynağının yerine geçecek 2019,81 MW-sa enerji üretilmesini sağlayabilmekte ve böylece KAİ'de elde edilecek azaltım 879,33 tonCO₂e/yıl'a ulaşabilmektedir.



Şekil 4.10. AAT-2'de biyogazın farklı amaçlarla kullanımının KAİ'ne etkisi

Senaryo 4'te çamur süzöntü suyunun anammox prosesi kullanılarak ayrı arıtılmasından dolayı oluşan KAİ değeri hesaplanılmıştır. Şekil 4.11'den görüldüğü üzere çamur susuzlaştırma sırasında açığa çıkan çamur süzöntü suyunun biyolojik ünitenin başına gönderilmesi yerine ayrı olarak anammox prosesinde arıtılması atıksuyun arıtılmasından kaynaklanan Kapsam 1 emisyonlarının neredeyse yarı yarıya azalmasını sağlamıştır. Bunun sebebi halihazırda AAT'lerde uygulanan BNR prosesinde atıksu arıtılırken giderilen azot başına açığa çıkan N₂O miktarı 0,0157 kgN₂O/kgN olurken (Foley vd. 2008), anammox prosesinde giderilen azot başına açığa çıkan N₂O miktarının 0,006 kgN₂O/kgN olmasıdır (Joss vd. 2009). Çamur süzöntü suyunun ayrı arıtılması

salınımı organik madde miktarına bağlı olan CH₄ emisyonlarında herhangi bir değişiklik sağlamadığı için, senaryo 4 sonuçları toplam emisyon ve N₂O emisyonları açısından değerlendirilmiştir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. Senaryo 4’te oluşan KAI değerleri

CFCT aracında ızgara atıklarının yakma ve düzenli depolama ile bertarafına yönelik, kumun ise düzenli depolama ve yeniden kullanım ile değerlendirilmesine yönelik seçenekler bulunmaktadır. Senaryo 5 kapsamında ızgara atıklarının ve kumun farklı bertaraf yöntemleri ile bertarafının KAI’ne etkileri hesaplanmıştır (Çizelge 4.12).

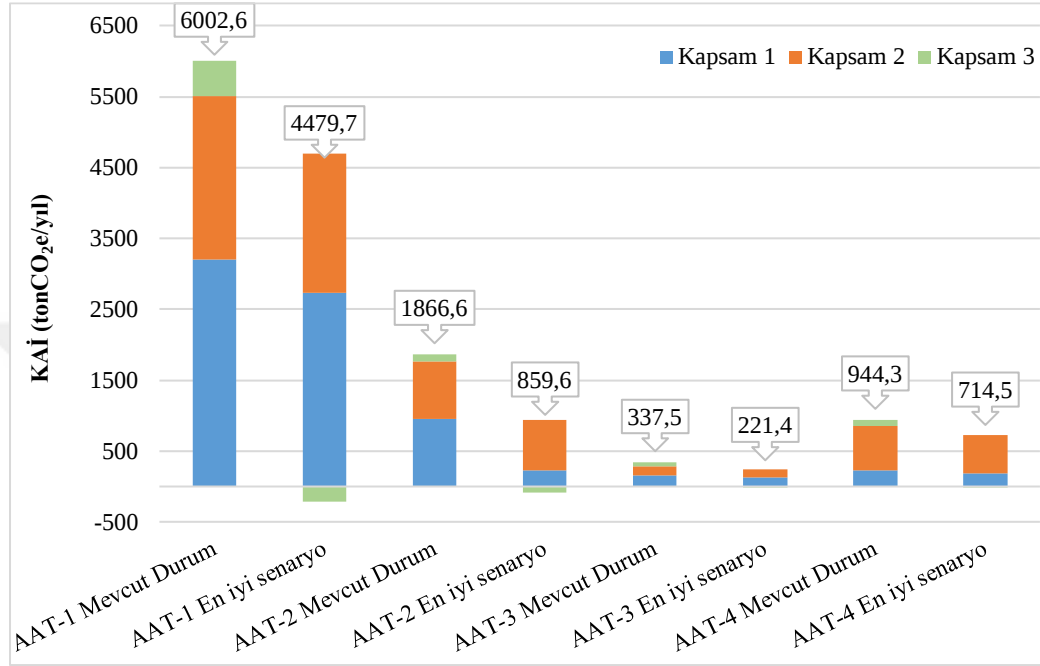
Çizelge 4.12. Izgara atıklarının ve kumun farklı bertaraf yöntemlerindeki KAI’leri

Atıklar	Bertaraf yöntemleri	AAT-1	AAT-2	AAT-3	AAT-4	Birim
Izgara atıkları	Yakma	50,88	100,42	0,71	16,10	tonCO ₂ e/yıl
	Düzenli depolama	2,44	11,95	0,03	1,91	tonCO ₂ e/yıl
Kum	Düzenli depolama	2,28	10,08	0,36	1,32	tonCO ₂ e/yıl
	Yeniden kullanma	1,39	6,17	0,22	0,81	tonCO ₂ e/yıl

Çizelge 4.12’de görüldüğü üzere AAT’lerde ızgara atıklarının yakılmasının düzenli depolamaya gönderilmelerine kıyasla daha fazla KAI’ne sebep olacağı tespit edilmiştir. Bunun sebebi AAT’lerdeki oluşan ızgara atıklarının az olması nedeniyle değerlendirebilecek miktarda elektrik enerjisi ve ısıнын üretilmemesidir. Bu yüzden ızgara atıklarının düzenli depolamaya gönderilmesinin en uygun seçenek olduğu belirlenmiştir. Diğer yandan, kum atıklarının düzenli depolamaya gönderilmek yerine yeniden kullanımının KAI’nin azaltılmasına katkı sağladığı belirlenmiştir.

Oluşturulan 5 senaryo sonucunda en uygun seçenekler olarak belirlenen enerji kaynağının %15’inin rüzgar enerjisinden elde edilmesi (Senaryo 1), çamurun tarım

arazisinde kullanılarak bertaraf edilmesi (Senaryo 2), AAT-2’de üretilen biyogazın tümünün elektrik enerjisi üretimi için kullanımı (Senaryo 3), çamur süzöntü sularının ayrı olarak anammox prosesi ile arıtımı (Senaryo 4) ve ızgara atıklarının düzenli depolamaya gönderilmesi ve kum atıklarının tekrar kullanımı (Senaryo 5) senaryolarının birlikte uygulanması durumunda AAT’lerin KAİ’lerinde elde edilen azaltımlar Şekil 4.12’de verilmektedir.



Şekil 4.12. AAT’lerin mevcut durumu ve en iyi senaryo KAİ değerleri

Şekil 4.12’de görüldüğü üzere, AAT’lerin belirlenen senaryoların uygulanması durumunda KAİ’lerinde önemli azaltımlar sağlanabilmektedir. AAT-1, AAT-2, AAT-3 VE AAT-4 için sırasıyla; %24,64; %53,35; %30,90 ve %23,11 KAİ azaltımı sağlanmıştır. AAT-2’deki %53 KAİ azaltım sebebi biyogazın elektrik üretimi için kullanılmasından kaynaklanmaktadır. AAT’lerde en fazla KAİ azaltımı kapsam 3 emisyonlarında sağlanmıştır.

5. SONUÇLAR

İklim değişikliği farkındalığının artmasıyla son yıllarda her sektörde olduğu gibi su ve atıksu sektörlerinde de sera gazı emisyonlarının azaltılması önemli bir konu haline gelmiştir. Atıksu arıtma tesislerinden (AAT'lerden) kaynaklanan sera gazlarının belirlenmesi ve azaltımına yönelik çalışmalarda karbon ayak izi (KAİ) kavramı çerçevesinde çeşitli model ve araçlar geliştirilmiştir. Bu araçlardan biri olan CFCT MS Excel tabanlı açık kaynaklı bir araçtır. Bu araç kullanılarak birçok ülkede AAT'lerden kaynaklanan KAİ'lerinin azaltılmasına yönelik çalışmalar yürütülmüştür. Bu çerçevede, bu tez çalışmasının amacı, ülkemizde faaliyet gösteren AAT'lerin KAİ'lerini revize edilen CFCT aracı ile hesaplamak ve AAT'lerin KAİ'lerini azaltmak için stratejiler geliştirmektir.

Tez çalışması kapsamında, ilk olarak farklı debilere ve eşdeğer nüfusa sahip 4 A²/O konfigürasyonuna sahip ileri biyolojik AAT'ye ait veriler temin edilmiş ve CFCT aracı güncel bilgilere göre kapsam 1, 2 ve 3 emisyonlarını ayrı ayrı hesaplayacak şekilde revize edilmiştir. Tez çalışması kapsamında KAİ belirlenen en yüksek debili tesis olan AAT-1 ve ikinci en yüksek debiliye sahip AAT olan AAT-2'de atıksuların arıtılması ve alıcı ortama deşarjından oluşan kapsam 1 emisyonları KAİ'ne en yüksek katkıyı yaparken, enerji tüketimini ifade eden kapsam 2 emisyonları ikinci en büyük emisyon kaynağı olmuştur. Nispeten düşük debili AAT-3 ve AAT-4'te ise arıtma çamurlarına nihai bertaraf yöntemi olarak yakma uygulanması kapsam 3 emisyonlarının KAİ'ne katkısının daha fazla olmasına sebep olmuştur. AAT-3'te en yüksek KAİ kaynağı kapsam 3 emisyonları olurken, AAT-4'te son çöktürme amacıyla membran filtrasyon uygulanması enerji tüketiminin artmasına ve dolayısıyla kapsam 2 emisyonlarının en büyük KAİ kaynağı olmasına sebep olmuştur.

Çalışma sonuçlarının literatürde bulunan benzer çalışmalar ile karşılaştırılması sonucunda, bu tez çalışmasına benzer şekilde büyük tesislerde atıksu arıtımından kaynaklı emisyonların KAİ'nde büyük paya sahip olduğu ve arıtma çamurlarından biyogaz üretilen tesislerin ayrı olarak değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

AAT'lerin KAİ'lerinin belirlenmesinin ardından mevcut KAİ'lerinin azaltılmasına çeşitli proses değişikliklerinin etkisini araştırmak için çeşitli senaryolar geliştirilmiştir. Oluşturulan senaryoları için KAİ hesapları sonucunda, AAT'lerde enerji kaynağının %15'inin rüzgar enerjisinden elde edilmesi, çamurun tarım arazisinde kullanılarak bertaraf edilmesi, biyogazın tümünün elektrik enerjisi üretimi için kullanımı, çamur süzöntü sularının ayrı olarak anammox prosesi ile arıtımı ve kum atıklarının tekrar kullanımı durumunda KAİ'de azaltım sağlanabileceği belirlenmiştir. Bu süreç değişikliklerinin uygulanması durumunda KAİ'de %23-53 arasında azaltım sağlanabilmesinin mümkün olacağı belirlenmiştir.

Tez çalışması sonucunda revize edilerek geliştirilen KAİ hesaplama aracı ile ulusal ölçekte daha fazla AAT'nin KAİ'nin hesaplanması ülkemizde bulunan AAT'lerden kaynaklı KAİ'lerinin azaltımı için en uygun stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayacak potansiyele sahip olduğu için benzer çalışmaların yaygınlaşması önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Alden, N. 2020. Potential for mitigating GHG emissions at a Swedish wastewater treatment plant – a life cycle approach. Yüksek Lisans Tezi, Stockholm University, Stockholm, 49 p.
- Amand, L., Olsson, G., Carlsson, B. 2013. Aeration control - a review. *Water Sci. Technol.*, 67(11): 2374-2398.
- Arnell, M., Rahmberg, M., Oliveira, F., Jeppsson, U. 2017. Multi-objective performance assessment of wastewater treatment plants combining plant-wide process models and life cycle assessment. *J. Water Clim. Chang.*, 8(4): 715-729.
- Arnold, M.E., Merta, E.S. 2011. Towards energy self-sufficiency in wastewater treatment by optimized sludge treatment. *Water Pract. Technol.*, 6(4): wpt20110069.
- Aymerich, I., Rieger, L., Sobhani, R., Rosso, D., Corominas, L. 2015. The difference between energy consumption and energy cost: Modelling energy tariff structures for water resource recovery facilities. *Water Res.*, 81: 113-123.
- Bachmann, N., Jansen, J., Baxter, D., Bochmann, G., Montpart, N. 2015. Sustainable biogas production in municipal wastewater treatment plants. International Energy Agency (IEA). Technical Brochure.
- Barton, J., Issaias, I., Stentiford, E.I. 2008. Carbon-making the right choice for waste management in developing countries. *Waste Manag.*, 28(4): 690-698.
- Bassin, J.P., Castro, F.D., Valerio, R.R., Santiago, E P., Lemos, F.R., Bassin, I.D. 2021. Chapter 16 - The impact of wastewater treatment plants on global climate change. *In: Water Conservation in the Era of Global Climate Change*. Elsevier, 367-410.
- Bastian, R., Cuttica, J., Fillmore, L. 2011. Opportunities for combined heat and power at wastewater treatment facilities: market analysis and lessons from the field combined heat and power partnership. Çevre Koruma Ajansı (EPA), ABD.
- Bodik, I., Kubaska, M. 2013. Energy and sustainability of operation of a wastewater treatment plant. *Environ. Prot. Eng.*, 39: 15-24.
- Boldrin, M.T.N., Formiga, K.T.M., Pacca, S.A. 2022. Environmental performance of an integrated water supply and wastewater system through life cycle assessment - A Brazilian case study. *Sci. Total Environ.*, 835: 155213.
- Boncescu, C., Robescu, L.D. 2017. Experimental Researches on Aeration Equipment Used in Biological Wastewater Treatment. *17. International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM2017*, 17(52): 359-366.
- Brown, S., Beecher, N., Carpenter, A. 2010. Calculator tool for determining greenhouse gas emissions for biosolids processing and end use. *Environ Sci. Technol.*, 44(24): 9509-9515.
- Çağatan, K. 2011. İstanbul atatürk havalimanı için uçak emisyonlarının belirlenmesi ve çevresel etkileri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Çankaya, T.S., Pekey, B. 2023. Biyolojik ve ileri biyolojik atıksu arıtma tesislerinin karbon ayak izinin yaşam döngüsü temelinde belirlenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 11(4): 1847-1860.
- Cao, W., Yang, Q. 2020. Online sequential extreme learning machine based adaptive control for wastewater treatment plant. *Neurocomputing*, 408: 169-175.
- Cardoso, B.J., Gaspar, A.R., Gomes, A. 2020. Energy audits and energy efficiency in small wastewater treatment plants: A case study. *INCReaSE 2019*, pp. 766-777.

- CCME 2009. The Biosolids Emissions Assessment Model (BEAM): A Method for Determining Greenhouse Gas Emissions from Canadian Biosolids Management Practices. Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME), Kanada.
- Chae, K.-J., Kang, J. 2013. Estimating the energy independence of a municipal wastewater treatment plant incorporating green energy resources. *Energy Convers. Manag.*, 75: 664-672.
- Chae, K.-J., Kim, I.-S., Ren, X., Cheon, K.-H. 2015. Reliable energy recovery in an existing municipal wastewater treatment plant with a flow-variable micro-hydropower system. *Energy Convers. Manag.*, 101: 681-688.
- Chang, H., Zhao, Y., Zhao, S., Damgaard, A., Christensen, T.H. 2022. Review of inventory data for the thermal treatment of sewage sludge. *Waste Manage.*, 146: 106-118.
- Chaouali, S., dos Muchangos, L., Ito, L., Tokai, A. 2022. Prediction of greenhouse gas emissions from wastewater treatment and biogas production in Tunisia. *J. Sustain. Dev.*, 15(4): 49-62.
- Cornel, P., Meda, A., Bieker, S. 2011. Wastewater as a source of energy, nutrients, and service water. In: *Treatise on Water Science*, Elsevier, pp. 337-375.
- Corominas, L., Flores-Alsina, X., Snip, L., Vanrolleghem, P.A. 2012. Comparison of different modeling approaches to better evaluate greenhouse gas emissions from whole wastewater treatment plants. *Biotechnol. Bioeng.*, 109(11): 2854-2863.
- Culha, O., Gunerhan, H., Biyik, E., Ekren, O., Hepbasli, A. 2015. Heat exchanger applications in wastewater source heat pumps for buildings: A key review. *Energy Build.*, 104: 215-232.
- Daelman, M.R.J., van Voorthuizen, E.M., van Dongen, U., Volcke, E.I.P., van Loosdrecht, M.C.M. 2015. Seasonal and diurnal variability of N₂O emissions from a full-scale municipal wastewater treatment plant. *Sci. Total Environ.*, 536: 1-11.
- Davidsson, A., Gruvberger, C., Christensen, T.H., Hansen, T.L., Jansen, J.C. 2007. Methane yield in source-sorted organic fraction of municipal solid waste. *Waste Manage.*, 28: 406-414.
- de Haas, D., Foley, J. Barr, K. 2008. Greenhouse gas inventories from WWTPs – the trade-off with nutrient removal. In: *Proceedings of Sustainability 2008 Green Practices for the Water Environment*, Maryland, ABD.
- Dubreuil, A., Assoumou, E., Bouckaert, S., Selosse, S., Maizi, N. 2013. Water modeling in an energy optimization framework – The water-scarce middle east context. *Appl. Energy*, 101: 268-279.
- EEA 2023. Annual European Union Greenhouse Gas Inventory 1990–2020 and Inventory Report 2020. European Environment Agency (EEA).
- Erdoğan, S., 2020. Enerji, çevre ve sera gazları. *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 10(1): 277-303.
- Erkaya, O., 2024. Arıtma çamuru kurutma yöntemlerinin yaşam döngüsü analizi ile karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 64 s.
- ETKB 2024a. Türkiye elektrik üretimi ve elektrik tüketim noktası emisyon faktörleri. <https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-elektrik-uretim-tuketim-emisyon-faktorleri>. [Son erişim tarihi: 18.06.2024].
- ETKB 2024b. Türkiye elektrik enerjisi tüketimi 2023. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>. [Son erişim tarihi: 18.06.2024].

- EU 2012. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing directives 2004/8/EC and 2006/32/EC.
- Farago, M., Damgaard, A., Rebsdorf, M., Nielsen, P.H., Rygaard, M. 2022. Challenges in carbon footprint evaluations of state-of-the-art municipal wastewater resource recovery facilities. *Environ. Manage.*, 320: 115715.
- Flores-Alsina, X., Corominas, L., Snip, L., Vanrolleghem, P.A. 2011. Including greenhouse gas emissions during benchmarking of wastewater treatment plant control strategies. *Water Res.*, 45(16): 4700-4710.
- Flores-Alsina, X., Arnell, M., Amerlinck, Y., Corominas, L., Gernaey, K.V., Guo, L., Lindblom, E., Nopens, I., Porro, J., Shaw, A., Snip, L., Vanrolleghem, P.A., Jeppsson, U. 2014. Balancing effluent quality, economic cost and greenhouse gas emissions during the evaluation of (plant-wide) control/operational strategies in WWTPs. *Sci. Total Environ.*, 466-467: 616-624.
- Foladori, P., Vaccari, M., Vitali, F. 2015. Energy audit in small wastewater treatment plants: methodology, energy consumption indicators, and lessons learned. *Water Sci. Technol.*, 72(6): 1007-1015.
- Foley, J., Lant, P. 2008. Fugitive greenhouse gas emissions from wastewater systems. *Water J. Aust. Water Assoc.*, WSAA Literature Review, 01.
- Foley, J., de Haas, D., Yuan, Z., Lant, P. 2010. Nitrous oxide generation in full-scale biological nutrient removal wastewater treatment plants. *Water Res.*, 44(3): 831-844.
- Frankl, P., Nowak, S., Gutschner, M., Gnos, S., Rinke, T. 2010. Technology roadmap: solar photovoltaic energy. International Energy Association.
- Friedrich, E., Pillay, S., Buckley, C.A. 2009. Environmental life cycle assessments for water treatment processes – A South African case study of an urban water cycle. *Water SA*, 35(1): 73-84.
- Fruergaard, T., Astrup, T. 2011. Optimal utilization of waste-to-energy in an LCA perspective. *Waste Manage.*, 31(3): 572-582.
- Füreder, K., Svandal, K., Frey, W., Kroiss, H., Krampe, J. 2017. Energy consumption of agitators in activated sludge tanks – actual state and optimization potential. *Water Sci. Technol.*, 77(3): 800-808.
- Gao, D., Xiang, T. 2021. Deammonification process in municipal wastewater treatment: Challenges and perspectives. *Bioresour. Technol.*, 320: 124420.
- Gomez-Rico, M.F., Fullana, A., Font, R., 2008. Volatile organic compounds released from thermal drying of sewage sludge. *WIT Trans. Ecol. Environ.*, 111: 425–433.
- Grasham, O., Dupont, V., Camargo-Valero, M.A., García-Gutierrez, P., Cockerill, T. 2019. Combined ammonia recovery and solid oxide fuel cell use at wastewater treatment plants for energy and greenhouse gas emission improvements. *Appl. Energy*, 240: 698-708.
- Gu, Y., Dong, Y.-N., Wang, H., Keller, A., Xu, J., Chiramba, T., Li, F. 2016. Quantification of the water, energy and carbon footprints of wastewater treatment plants in China considering a water–energy nexus perspective. *Ecol. Indic.*, 60: 402-409.
- Gu, Y., Li, Y., Li, X., Luo, P., Wang, H., Robinson, Z.P., Wang, X., Wu, J., Li, F. 2017. The feasibility and challenges of energy self-sufficient wastewater treatment plants. *Appl. Energy*, 204: 1463-1475.

- Gude, V.G. 2015. Energy and water autarky of wastewater treatment and power generation systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 45: 52-68.
- Guerrini, A., Romano, G., Leardini, C. 2018. Economies of scale and density in the Italian water industry: A stochastic frontier approach. *Util. Policy*, 52: 103-111.
- Gülhan, H., Özgün, H., Erşahin, M.E., Dereli, R.K., Öztürk, İ. 2018. İstanbul'daki biyolojik atıksu arıtma tesislerinin sera gazı emisyonunun modelleme metodu ile tahmini. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi*, 30(1): 59-67.
- Gustavsson, D.J.I., Tumlin, S. 2013. Carbon footprints of Scandinavian wastewater treatment plants. *Water Sci. Technol.*, 68(4): 887-893.
- Han, C., Liu, J., Liang, H., Guo, X., Li, L. 2013. An innovative integrated system utilizing solar energy as power for the treatment of decentralized wastewater. *J. Environ. Sci. (China)*, 25(2): 274-279.
- Hao, X., Liu, R., Huang, X. 2015. Evaluation of the potential for operating carbon neutral WWTPs in China. *Water Res.*, 87: 424-431.
- Harper, D. 2017. Australia's first floating solar farm soon to be buoyant in Lismore. <https://www.abc.net.au/news/2017-11-16/australias-first-floating-solar-farm-will-be-buoyant-in-lismore/9157878> [Son erişim tarihi: 29.02.2024].
- Haslinger, J., Lindtner, S., Krampe, J. 2016. Operating costs and energy demand of wastewater treatment plants in Austria: benchmarking results of the last 10 years. *Water Sci. Technol.*, 74(11): 2620-2626.
- Henriques, J., Catarino, J. 2016. Sustainable value – An energy efficiency indicator in wastewater treatment plants. *J. Clean. Prod.*, 142, 323-330.
- Hernandez-Sancho, F., Molinos-Senante, M., Sala-Garrido, R. 2011. Energy efficiency in Spanish wastewater treatment plants: a non-radial DEA approach. *Sci. Total Environ.*, 409(14): 2693-2699.
- Ho, S.W., Cheung, K.K., Fung, W.C. 2014. Sustainable wastewater treatment – ways to achieve energy neutrality. *HKIE Transactions*, 21(4), 240-252.
- Holenda, B., Domokos, E., Redey, A., Fazakas, J. 2007. Aeration optimization of a wastewater treatment plant using genetic algorithm. *Optim. Control. Appl. Methods*, 28(3): 191-208.
- IPCC 2006. Intergovernmental Panel on Climate Change. *In: National Greenhouse Gas Inventory Programme. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.*
- IPCC 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. In: Team, Core Writing, Pachauri, R.K., Meyer, L.A. (Eds.), Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC 2018. Summary for Policymakers in Global warming of 1.5° C. Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. Geneva, İsviçre, pp. 32.
- IPCC 2019. 2019 refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- IPCC 2021. Summary for policymakers. *In: Climate Change 2021: The physical science basis.* Cambridge University Press, New York, ABD.
- Jenkins, D., Wanner, J. 2014. Activated sludge–100 years and counting. IWA Publishing. London, UK.
- Jonasson, M. 2007. Energy benchmark for wastewater treatment processes - A comparison between Sweden and Austria. Yüksek Lisans tezi, Lund Üniversitesi, İsveç, 60 s.

- Johnson, T., Wilner, H., Crawford, G., Johnson, B., Krause, T., Fillmore, L., Kennedy, S. 2010. CHEApet: A comprehensive energy analysis tool for WWTPs. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2010(13): 3416-3445.
- Joss, A., Salzgeber, D., Eugster, J., König, R., Rottermann, K., Burger, S., Fabijan, P., Leumann, S., Mohn, J., Siegrist, H. 2009. Full-scale nitrogen removal from digester liquid with partial nitrification and anammox in one SBR. *Environ. Sci. Tech.*, 43(14): 5301-5306.
- Kampschreur, M.J., Temmink, H., Kleerebezem, R., Jetten, M.S., van Loosdrecht, M.C.M. 2009. Nitrous oxide emission during wastewater treatment. *Water Res.*, 43(17): 4093-4103.
- Karadirek, I.E., Erkaya, O., Ciggin, A.S. 2024. Optimizing environmental impacts of sewage sludge drying: a comparative life cycle assessment. *Hakem değerlendirmesinde*.
- Karakas, A., Tozum-Akgul, S., Komesli, O.T., Kaplan-Bekaroglu, S.S. 2024. Carbon footprint analysis of advanced biological wastewater treatment plant. *J. Water Process Eng.*, 61: 105254.
- Kartal, B., Kuenen, J.G., van Loosdrecht, M.C.M. 2010. Sewage treatment with anammox. *Science*, 328(5979): 702-703.
- Kartal, B., Maalcke, W.J., de Almeida, N.M., Cirpus, I., Gloerich, J., Geerts, W., Op den Camp, H.J.M., Harhangi, H.R., Janssen-Megens, E.M., Francoijs, K.-J., Stunnenberg, H.G., Keltjens, J.T., Jetten, M.S.M., Strous, M. 2011. Molecular mechanism of anaerobic ammonium oxidation. *Nature*, 479(7371): 127-130.
- Keller, J., Hartley, K. 2003. Greenhouse gas production in wastewater treatment: process selection is the major factor. *Water Sci. Technol.*, 47(12): 43-48.
- Khiewwijit, R., Temmink, H., Rijnaarts, H., Keesman, K.J. 2015. Energy and nutrient recovery for municipal wastewater treatment: How to design a feasible plant layout? *Environ Model Softw.*, 68: 156-165.
- Kiselev, A., Magaril, E., Panepinto, D., Rada, E.C., Ravina, M., Zanetti, M.C. 2021. Sustainable energy management benchmark at wastewater treatment plant. *Sustainability*, 13(22): 12885.
- Koch, K., Helmreich, B., Drewes, J.E. 2015. Co-digestion of food waste in municipal wastewater treatment plants: Effect of different mixtures on methane yield and hydrolysis rate constant. *Appl. Energy*, 137: 250-255.
- Koch, K., Plabst, M., Schmidt, A., Helmreich, B., Drewes, J.E. 2016. Co-digestion of food waste in a municipal wastewater treatment plant: Comparison of batch tests and full-scale experiences. *Waste Manag.*, 47: 28-33.
- Külah, S. 2013. Greenhouse gas inventory for an industrial wastewater treatment plant. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 82 s.
- Lackner, S., Gilbert, E.M., Vlaeminck, S.E., Joss, A., Horn, H., van Loosdrecht, M.C.M. 2014. Full-scale partial nitrification/anammox experiences – An application survey. *Water Res.*, 55: 292-303.
- Lee, S., Esfahani, I.J., Ifaei, P., Moya, W., Yoo, C. 2017. Thermo-enviro-economic modeling and optimization of an integrated wastewater treatment plant with a combined heat and power generation system. *Energy Convers. Manag.*, 142: 385-401.
- Lettinga, G. 2001. Digestion and degradation, air for life. *Water Sci. Technol.*, 44(8): 157-176.

- Li, W., Li, L., Qiu, G. 2017. Energy consumption and economic cost of typical wastewater treatment systems in Shenzhen, China. *J. Clean. Prod.*, 163: S374-S378.
- Liu, G., Wang, J. 2017. Enhanced removal of total nitrogen and total phosphorus by applying intermittent aeration to the Modified Ludzack-Ettinger (MLE) process. *J. Clean. Prod.*, 166: 163-171.
- Longo, S., d'Antoni, B.M., Bongards, M., Chaparro, A., Cronrath, A., Fatone, F., Lema, J.M., Mauricio-Iglesias, M., Soares, A., Hospido, A. 2016. Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement. *Appl. Energy*, 179: 1251-1268.
- Maalouf, A., El-Fadel, M. 2020. A novel software for optimizing emissions and carbon credit from solid waste and wastewater management. *Sci. Total Environ.*, 714: 136736.
- Maktabifard, M., Zaborowska, E., Makinia, J. 2018. Achieving energy neutrality in wastewater treatment plants through energy savings and enhancing renewable energy production. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, 17(4): 655-689.
- Maktabifard, M., Zaborowska, E., Makinia, J. 2019. Evaluating the effect of different operational strategies on the carbon footprint of wastewater treatment plants - case studies from northern Poland. *Water Sci. Technol.*, 79(11): 2211-2220.
- Maktabifard, M., Zaborowska, E., Makinia, J. 2020. Energy neutrality versus carbon footprint minimization in municipal wastewater treatment plants. *Bioresour. Technol.*, 300: 122647.
- Maktabifard, M., Awaitey, A., Merta, E., Haimi, H., Zaborowska, E., Mikola, A., Makinia, J. 2021. Comprehensive evaluation of the carbon footprint components of wastewater treatment plants located in the Baltic Sea region. *Sci. Total Environ.*, 806: 150436.
- Mamais, D., Noutsopoulos, C., Dimopoulou, A., Stasinakis, A., Lekkas, T.D. 2015. Wastewater treatment process impact on energy savings and greenhouse gas emissions. *Water Sci. Technol.*, 71(2): 303-308.
- Manal, T., Rashed, A.-S. 2017. Potential application of renewable energy sources at urban wastewater treatment facilities in Palestine – three case studies. *Desalination Water Treat.*, 94: 64-71.
- Manfredi, S., Tonini, D., Christensen, T. 2011. Environmental assessment of different management options for individual waste fractions by means of life-cycle assessment modelling. *Resour. Conserv. Recy.*, 55: 995-1004.
- Mannina, G., Ekama, G., Caniani, D., Cosenza, A., Esposito, G., Gori, R., Garrido-Baserba, M., Rosso, D., Olsson, G. 2016. Greenhouse gases from wastewater treatment - A review of modelling tools. *Sci. Total Environ.*, 551-552: 254-270.
- Marinelli, E., Radini, S., Foglia, A., Lancioni, N., Piasentin, A., Eusebi, A. L., Fatone, F. 2021. Validation of an evidence-based methodology to support regional carbon footprint assessment and decarbonisation of wastewater treatment service in Italy. *Water Res.*, 207: 117831.
- Marner, S.T., Schröter, D., Jardin, N. 2016. Towards energy neutrality by optimising the activated sludge process of the WWTP Bochum-Ölbachtal. *Water Sci. Technol.*, 73(12): 3057-3063.
- McCarty, P.L., Bae, J., Kim, J. 2011. Domestic Wastewater Treatment as a Net Energy Producer—Can This be Achieved? *Environ Sci. Technol.*, 45(17): 7100-7106.

- McGuckin, R., Oppenheimer, J., Badruzzaman, M., Contreras, A., Jacangelo, J. 2013. Toolbox for water utility energy and greenhouse gas emission management. Water Research Foundation, Denver, ABD.
- McNabola, A., Coughlan, P., Williams, A.P. 2014. Energy recovery in the water industry: an assessment of the potential of micro-hydropower. *Water Environ. J.*, 28(2): 294-304.
- Miller, M., Regmi, P., Murthy, S., Wett, B., Bott, C. 2015. Combining high-rate activated sludge and shortcut nitrogen removal for efficient carbon and energy utilization. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2015(2): 1-11.
- Mizuta, K., Shimada, M. 2010. Benchmarking energy consumption in municipal wastewater treatment plants in Japan. *Water Sci. Technol.*, 62(10): 2256-2262.
- Molinos-Senante, M., Hernández-Sancho, F., Mocholí-Arce, M., Sala-Garrido, R. 2014. Economic and environmental performance of wastewater treatment plants: Potential reductions in greenhouse gases emissions. *Resour. Energy Econ.*, 38: 125-140.
- Nakkasunchi, S., Hewitt, N.J., Zoppi, C., Brandoni, C. 2021. A review of energy optimization modelling tools for the decarbonisation of wastewater treatment plants. *J. Clean. Prod.*, 279: 123811.
- NASA 2023. World of Change: Global Temperatures. <https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/global-temperatures> [Son erişim tarihi:12.06.2023].
- NASA 2024. Carbon Dioxide. <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/> [Son erişim tarihi:28.05.2024].
- Neugebauer, G., Kretschmer, F., Kollmann, R., Narodoslawsky, M., Ertl, T., Stoeglehner, G. 2015. Mapping Thermal Energy Resource Potentials from Wastewater Treatment Plants. *Sustainability*, 7(10): 12988-13010.
- NEWRI 2009. Water & energy in the urban water cycle - Improving energy efficiency in municipal wastewater treatment. In: *Nanyang environment & water research institute in collaboration with PUB Singapore & global water research coalition*, 1-18.
- Nguyen, H.T., Safder, U., Nhu Nguyen, X.Q., Yoo, C. 2020. Multi-objective decision-making and optimal sizing of a hybrid renewable energy system to meet the dynamic energy demands of a wastewater treatment plant. *Energy*, 191: 116570.
- Ni, B.-J., Ye, L., Law, Y., Byers, C., Yuan, Z. 2013. Mathematical Modeling of Nitrous Oxide (N₂O) Emissions from Full-Scale Wastewater Treatment Plants. *Environ. Sci. Technol.*, 47(14): 7795-7803.
- Nouri, J., Jafarinia, M., Naddafi, K., Nabizadeh, R., Mahvi, A.H., Nouri, N. 2006. Energy Recovery from Wastewater Treatment Plant. *J. Biol. Sci. (Faisalabad)*, 9(1): 3-6.
- Novak, M., Horvat, P. 2012. Mathematical modelling and optimisation of a waste water treatment plant by combined oxygen electrode and biological waste water treatment model. *Appl. Math. Model.*, 36(8): 3813-3825.
- Nowak, O., Enderle, P., Varbanov, P. 2014. Ways to optimize the energy balance of municipal wastewater systems: lessons learned from Austrian applications. *J. Clean. Prod.*, 88: 125-131.
- Olsson, G. 2012. ICA and me-a subjective review. *Water Res.*, 46(6): 1585-1624.
- Olsson, L., Dam Larsen, J., Ye, S., Brix, H. 2014. Emissions of CO₂ and CH₄ from sludge treatment reed beds depend on system management and sludge loading. *Environ. Manage.*, 141: 51-60.

- Padron-Paez, J.I., Almaraz, S.D.-L., Román-Martínez, A. 2020. Sustainable wastewater treatment plants design through multiobjective optimization. *Comput. Chem. Eng.*, 140: 106850.
- Panepinto, D., Fiore, S., Zappone, M., Genon, G., Meucci, L. 2016. Evaluation of the energy efficiency of a large wastewater treatment plant in Italy. *Appl. Energy*, 161: 404-411.
- Parravicini, V., Nielsen, P.H., Thornberg, D., Pistocchi, A. 2022. Evaluation of greenhouse gas emissions from the European urban wastewater sector, and options for their reduction. *Sci. Total Environ.*, 838: 156322.
- Peng, L., Ni, B.J., Erler, D., Ye, L., Yuan, Z. 2014. The effect of dissolved oxygen on N₂O production by ammonia-oxidizing bacteria in an enriched nitrifying sludge. *Water Res.*, 66: 12-21.
- Peregrina, C.A., Lecomte, D., Arlabosse, P., Rudolph, V. 2006. Life Cycle Assessment (LCA) applied to the design of an innovative drying process for sewage sludge. *Trans IChemE, Part B, Process Saf. Environ. Protect.*, 84 (B4): 270–279.
- Piao, W., Kim, Y., Kim, H., Kim, M., Kim, C. 2016. Life cycle assessment and economic efficiency analysis of integrated management of wastewater treatment plants. *J. Clean. Prod.*, 113: 325-337.
- Pittoors, E., Guo, Y., Van Hulle, S. 2014. Modeling Dissolved Oxygen Concentration for Optimizing Aeration Systems and Reducing Oxygen Consumption in Activated Sludge Processes: A Review. *Chem. Eng. Commun.*, 201(8): 983-1002.
- Plappally, A.K., Lienhard, V.J.H. 2012. Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation, and disposal. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 16(7): 4818-4848.
- Polruang, S., Sirivithayapakorn, S., Talang, R.P.N. 2018. A comparative life cycle assessment of municipal wastewater treatment plants in Thailand under variable power schemes and effluent management programs. *J. Clean. Prod.*, 172: 635-648.
- Power, C., McNabola, A., Coughlan, P. 2014. Development of an evaluation method for hydropower energy recovery in wastewater treatment plants: Case studies in Ireland and the UK. *Sustain. Energy Technol. Assess.*, 7: 166-177.
- Ramli, N.A., Hamid, M.F.A. 2018. Data based modeling of a wastewater treatment plant by using machine learning methods. *J. Eng. Technol.*, 6: 14-21.
- Regmi, P., Miller, M.W., Holgate, B., Bunce, R., Park, H., Chandran, K., Wett, B., Murthy, S., Bott, C.B. 2014. Control of aeration, aerobic SRT and COD input for mainstream nitrification/denitrification. *Water Res.*, 57: 162-171.
- Rieger, L., Jones, R.M., Dold, P.L., Bott, C. B. 2014. Ammonia-based feedforward and feedback aeration control in activated sludge processes. *Water Environ. Res.*, 86(1): 63-73.
- Saghafi, S., Hendy, G.R.N.B., Aminirad, H. 2016. Estimating the electrical energy in different processes for Nasir Abad industrial wastewater treatment plant with emphasis on COD removal. *J. Environ. Stud.*, 42(1): 19-31.
- Sanchez, F., Rey, H., Viedma, A., Nicolas-Perez, F., Kaiser, A.S., Martinez, M. 2018. CFD simulation of fluid dynamic and biokinetic processes within activated sludge reactors under intermittent aeration regime. *Water Res.*, 139: 47-57.
- Sarpong, G., Gude, V.G., Magbanua, B.S. 2019. Energy autarky of small scale wastewater treatment plants by enhanced carbon capture and codigestion – A quantitative analysis. *Energy Convers. Manag.*, 199: 111999.

- SEWPCC 2011 Process selection report. Winnipeg sewage treatment program. https://legacy.winnipeg.ca/finance/findata/matmgt/documents/2012/682-2012/682-2012_Appendix_H-WSTP_South_End_Plant_Process_Selection_Report/PSR_rev%20final.pdf. [Son erişim tarihi: 18.06.2024].
- Shen, Y., Linville, J.L., Urgan-Demirtas, M., Mintz, M.M., Snyder, S.W. 2015. An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs. *Renew. Sustain Energy. Rev.*, 50: 346-362.
- Shrestha, A., Bhattarai, T.N., Ghimire, S., Mainali, B., Treichel, H., Paudel, S.R. 2022. Estimation of greenhouse gases emission from domestic wastewater in Nepal: A scenario-based analysis applicable for developing countries. *Chemosphere*, 300: 134501.
- Siegrist, H., Salzgeber, D., Eugster, J., Joss, A. 2008. Anammox brings WWTP closer to energy autarky due to increased biogas production and reduced aeration energy for N-removal. *Water Sci. Technol.*, 57(3): 383-388.
- Silvestre, G., Fernandez, B., Bonmati, A. 2015. Significance of anaerobic digestion as a source of clean energy in wastewater treatment plants. *Energy Convers. Manag.*, 101: 255-262.
- Singh, P., Kansal, A., Carliell-Marquet, C. 2016. Energy and carbon footprints of sewage treatment methods. *J. Environ. Manage.*, 165: 22-30.
- Soares, R.B., Memelli, M.S., Roque, R.P., Roque, R.P. 2017. Comparative Analysis of the Energy Consumption of Different Wastewater Treatment Plants. *Int. J. Archit. Arts Appl.*, 3(6): 79-86.
- Soda, S., Iwai, Y., Sei, K., Shimod, Y., Ike, M. 2010. Model analysis of energy consumption and greenhouse gas emissions of sewage sludge treatment systems with different processes and scales. *Water Sci. Technol.*, 61(2): 365-373.
- Soliman, M., Eldyasti, A. 2016. Development of partial nitrification as a first step of nitrite shunt process in a Sequential Batch Reactor (SBR) using Ammonium Oxidizing Bacteria (AOB) controlled by mixing regime. *Bioresour. Technol.*, 221: 85-95.
- Stillwell, A., Hoppock, D., Webber, M. 2010. Energy Recovery from Wastewater Treatment Plants in the United States: A Case Study of the Energy-Water Nexus. *Sustainability*, 2(4): 945-962.
- Sun, Y., Garrido-Baserba, M., Molinos-Senante, M., Donikian, N.A., Poch, M., Rosso, D. 2020. A composite indicator approach to assess the sustainability and resilience of wastewater management alternatives. *Sci. Total Environ.*, 725: 138286.
- Tarallo, S., Shaw, A., Zamenski, E., Kohl, P., Eschborn, R., Beecher, N. 2015. Demonstrated energy neutrality leadership: a study of five champions of change. IWA Publishing, Volume 14.
- Torregrossa, D., Schutz, G., Cornelissen, A., Hernandez-Sancho, F., Hansen, J. 2016. Energy saving in WWTP: Daily benchmarking under uncertainty and data availability limitations. *Environ. Res.*, 148: 330-337.
- Tyagi, V.K., Lo, S.-L. 2011. Application of physico-chemical pretreatment methods to enhance the sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: an up to date review. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, 10(3): 215-242.
- Uggetti, E., Ferrer, I., Arias, C., Brix, H., Garcia, J. 2012. Carbon footprint of sludge treatment reed beds. *Ecol. Eng.*, 44: 298-302.

- Van Horne, M.P., Rohrbacher, J., Pitt, P. 2012. Coming Full Circle: Moving Wastewater Treatment Plants Towards Energy Neutrality. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2012(7):7646-7663.
- Wakeel, M., Chen, B., Hayat, T., Alsaedi, A., Ahmad, B. 2016. Energy consumption for water use cycles in different countries: A review. *Appl. Energy*, 178: 868-885.
- Wang, H., Yang, Y., Keller, A.A., Li, X., Feng, S., Dong, Y.-N., Li, F. 2016. Comparative analysis of energy intensity and carbon emissions in wastewater treatment in USA, Germany, China and South Africa. *Appl. Energy*, 184: 873-881.
- Wang, J., Zhang, N., Xu, S., Shao, Z., Jiang, C., Yuan, H., Wang, C., Zheng, X., Chi, Y., Zhang, W., Wang, D., Zhuang, X. 2023. Carbon footprint analysis and comprehensive evaluation of municipal wastewater treatment plants under different typical upgrading and reconstruction modes. *Sci. Total. Environ.*, 880: 163335.
- WEF 2009. Energy conservation in water and wastewater facilities. WEF Press.
- Weiland, P. 2010. Biogas production: current state and perspectives. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 85(4): 849-860.
- Whiting, A., Azapagic, A. 2014. Life cycle environmental impacts of generating electricity and heat from biogas produced by anaerobic digestion. *Energy*, 70: 181-193.
- Xie, T., Chengwen, W. 2012. Energy Consumption in Wastewater Treatment Plants in China. In: *World Congress on Water, Climate and Energy*, Dublin, İrlanda.
- Xu, J., Li, Y., Wang, H., Wu, J., Wang, X., Li, F. 2017. Exploring the feasibility of energy self-sufficient wastewater treatment plants: a case study in eastern China. *Energy Procedia*, 142: 3055-3061.
- Yang, L., Zeng, S., Chen, J., He, M., Yang, W. 2010. Operational energy performance assessment system of municipal wastewater treatment plants. *Water Sci. Technol.*, 62(6): 1361-1370.
- Yang, X., Wei, J., Ye, G., Zhao, Y., Li, Z., Qiu, G., Li, F., Wei, C. 2020. The correlations among wastewater internal energy, energy consumption and energy recovery/production potentials in wastewater treatment plant: An assessment of the energy balance. *Sci. Total Environ.*, 714: 136655.
- Yapıcıoğlu, P. 2018. Atıksu arıtma tesislerinin sera gazı emisyonlarının minimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye.
- Yeshi, C. 2015. Measured data based mass balance and energy efficiency of an 800,000 m³/day water reclamation plant in Singapore. In: *12th IWA specialised conference on design, operation and economics of large wastewater treatment plants*, 93-99.
- Zaborowska, E., Czerwionka, K., Makinia, J. 2017. Strategies for achieving energy neutrality in biological nutrient removal systems – a case study of the Slupsk WWTP (northern Poland). *Water Sci. Technol.*, 75(3): 727-740.
- Zeng, S., Chen, X., Dong, X., Liu, Y. 2017. Efficiency assessment of urban wastewater treatment plants in China: Considering greenhouse gas emissions. *Resour. Conserv. Recy.*, 120: 157-165.
- Zettl, U. 2015. WWTP stuttgart—Mühlhausen—changeover to air distribution control system (ADC). In: *12th IWA specialised conference on design, operation and economics of large wastewater treatment plants*, 108-110.

7. EKLER



EK-1. Kapsam 1, 2 ve 3 emisyonlarının denklemleri

No	Sera gazı emisyon kaynağı	Eşitlik
1	Çamur süzöntü suyundaki besinler	Çamur TS miktarı x Depolamadan sonra N, P, K, C miktarları
2	Çamur süzöntü suyu debisi	Üretilen çamur miktarı x Aktif çamurun yoğunluğu
3	AAT'de açığa çıkan doğrudan emisyonlar	Eşitlik 4 + Eşitlik 5 + Eşitlik 6 + Eşitlik 7
4	N ₂ O atıksu arıtımı	N ₂ O EF (arıtma) x N ₂ O emisyonu (GWP) x (N _{giriş} + N _{çıkış} - (N _{içeriği} x Çamur TS miktarı))
5	N ₂ O çamur süzöntü suyu arıtımı	Giderilen azot miktarı x Azot giderme prosesi EF x N ₂ O Emisyonu (GWP)
6	CH ₄ atıksu arıtımı	CH ₄ EF (arıtmada) x CH ₄ EF (GWP) x KOİ _{giriş}
7	CH ₄ çamur süzöntü suyu arıtımı	Çamur süzöntü suyu debisi x Çözünmüş CH ₄ x CH ₄ emisyonu (GWP)
8	Biyogaz kullanımı N₂O Emisyonları	Eşitlik 9 + Eşitlik 10 + Eşitlik 11 + Eşitlik 12
9	Araçlarda kullanımı	İyileştirilmiş biyogaz miktarı x CH ₄ içeriği x CH ₄ yoğunluğu x N ₂ O EF (biyogaz yakılması) x N ₂ O EF (GWP)
10	Torch kullanımı	Torch'da kullanılan biyogaz x CH ₄ içeriği x CH ₄ yoğunluğu x Yakma kaynaklı N ₂ O EF x N ₂ O EF (GWP)
11	Gaz motorunda kullanımı	Gaz motorunda kullanılan biyogaz x CH ₄ içeriği x CH ₄ yoğunluğu x Yakma kaynaklı N ₂ O EF x N ₂ O EF (GWP)
12	Gaz kazanında kullanımı	Gaz kazanında kullanılan biyogaz x CH ₄ içeriği x CH ₄ yoğunluğu x Yakma kaynaklı N ₂ O EF x N ₂ O EF (GWP)
13	Biyogaz kullanımı CH₄ Emisyonları	Eşitlik 14 + Eşitlik 15 + Eşitlik 16 + Eşitlik 17
14	Araçlarda kullanımı	İyileştirilmiş biyogaz x CH ₄ içeriği x CH ₄ yoğunluğu x N ₂ O EF (biyogaz yakılması) x CH ₄ EF (GWP)
15	Torch kullanımı	Torch'da kullanılan biyogaz x CH ₄ içeriği x CH ₄ yoğunluğu x Yakma kaynaklı CH ₄ EF x CH ₄ EF (GWP)
16	Gaz motorunda kullanımı	Gaz motorunda kullanılan biyogaz x CH ₄ içeriği x CH ₄ yoğunluğu x Yakma kaynaklı CH ₄ EF x CH ₄ EF (GWP)
17	Gaz kazanında kullanımı	Gaz kazanında kullanılan biyogaz x CH ₄ içeriği x CH ₄ yoğunluğu x Yakma kaynaklı CH ₄ EF x CH ₄ EF (GWP)
18	Biyogaz Kullanımı ve Dağıtımı	Eşitlik 19 + Eşitlik 20 + Eşitlik 21 + Eşitlik 22 + Eşitlik 23
19	Enerji kullanımının iyileştirilmesi	Elektrik üretiminden kaynaklı emisyon x İyileştirmek için toplam enerji kullanımı
20	Şebeke Enjeksiyonu için enerji kullanımı ve propanın dozajı	(Şebeke enjeksiyonu (araç yakıtı) x CH ₄ içeriği x Propan dozajı x Elektrik üretiminden kaynaklı emisyon) + (Şebeke enjeksiyonu (araç yakıtı) x CH ₄ içeriği x Propan emisyon faktörü x Propan dozajı (enjeksiyon))
21	Biyogaz yakma (propan kullanılıyorsa)	Eklenen propan miktarı x Propanın yakılmasından kaynaklanan emisyonlar x Propan yoğunluğu
22	Biyogaz yakma (propan kullanılmıyorsa)	Şebeke enjeksiyonu (araç yakıtı) x CH ₄ içeriği x Propan dozajı (enjeksiyon) x Propanın yakılması kaynaklı EF
23	Araçlarda taşınmak üzere biyogazın sıkıştırılmasında enerji kullanımı	Elektrik üretimi EF x CH ₄ içeriği x Araç yakıtı olarak kullanım oranı x İyileştirilmiş biyogazın sıkıştırılması
24	Biyogaz kullanımı kaynaklı emisyonlar	Eşitlik 25 + Eşitlik 26 + Eşitlik 27
25	Biyogazın araç yakıtı olarak kullanımı	Dizel üretimi ve kullanımı x CH ₄ enerji içeriği x CH ₄ içeriği x İyileştirilmiş biyogaz miktarı
26	Biyogazın elektrik için kullanımı	Biyoyakıtlardan (çamur hariç) enerji üretim miktarı x Elektrik üretimi EF
27	Biyogazın ısı için kullanımı	Satın alınan ısı x Isıtmadan kaynaklı EF

(Devamı Arkada)

EK-1'in devamı

28	Biyogaz kaynaklı Emisyonlar	Eşitlik 29 + Eşitlik 30 + Eşitlik 31
29	Salınan biyogaz	Açığa çıkan biyogaz miktarı x CH ₄ İçeriği x CH ₄ yoğunluğu x CH ₄ EF (GWP)
30	Biyogaz slip	CH ₄ emisyon yüzdesi x Üretilen biyogaz miktarı x CH ₄ İçeriği x CH ₄ yoğunluğu x CH ₄ EF (GWP)
31	Biyogaz slip – İyileştirme	Oluşan CH ₄ Miktarı x CH ₄ yoğunluğu x CH ₄ EF (GWP)
32	Alıcı Ortam	Eşitlik 33 + Eşitlik 34 + Eşitlik 35 + Eşitlik 36
33	Deniz N ₂ O emisyon miktarı	N ₂ O EF (deniz) x N ₂ O EF (GWP) x Deşarj edilen N miktarı
34	Göl ve haliç N ₂ O emisyon miktarı	N ₂ O EF (göl ve haliç) x N ₂ O EF (GWP) x Deşarj edilen N miktarı
35	Deniz CH ₄ emisyon miktarı	CH ₄ EF (deniz) x CH ₄ EF (GWP) x Deşarj edilen KOİ miktarı
36	Göl ve haliç CH ₄ emisyon miktarı	CH ₄ EF (göl ve haliç) x CH ₄ EF (GWP) x Deşarj edilen KOİ miktarı
37	Kapsam 1 emisyon miktarı	Eşitlik 3 + Eşitlik 8 + Eşitlik 13 + Eşitlik 18 + Eşitlik 28 + Eşitlik 32
38	Elektrik tüketimi	Elektrik üretimi EF x (Tüketilen elektrik x (1- AAT'de yenilenebilir enerjiden elektrik)) x (1- Yenilenebilir enerji oranı)
39	Elektrikten kaynaklı toplam emisyonlar	Eşitlik 40 + Eşitlik 41 + Eşitlik 42 + Eşitlik 43
40	Rüzgar enerjisinden elektrik üretimi emisyonları	Rüzgar enerjisinin elektrik üretimi EF x Üretilen enerji miktarı
41	Güneş enerjisinden elektrik üretimi emisyonları	Güneş enerjisinin elektrik üretimi EF x Üretilen enerji miktarı
42	Biyoyakıtlardan (çamur hariç) elektrik üretimi emisyonları	Biyoyakıt enerjisinin elektrik üretimi EF emisyon x Üretilen enerji miktarı
43	Petrolde elektrik üretimi emisyonları	Petrolde elektrik üretimi EF x Üretilen enerji miktarı
44	Isıtmadan kaynaklı toplam emisyonlar	Eşitlik 45 + Eşitlik 46 + Eşitlik 47 + Eşitlik 48 + Eşitlik 49
45	Kullanılan ısıdan kaynaklı emisyonlar	Satın alınan ısı miktarı x Yerel ısınma EF
46	Biyoyakıtlardan ısı üretimi emisyonları	Biyoyakıt enerjisinin ısı üretimi EF x Üretilen enerji miktarı
47	Rüzgar/güneş enerjisinden ısı üretimi emisyonları	Rüzgar/güneş enerjisinin ısı üretimi EF x Üretilen enerji miktarı
48	Doğalgazdan ısı üretimi emisyonları	Doğalgazdan ısı üretimi EF x Üretilen enerji miktarı
49	Petrolde ısı üretimi emisyonları	Petrolde ısı üretimi EF x Üretilen enerji miktarı
50	Soğutmadan kaynaklı toplam emisyonlar	Eşitlik 51 + Eşitlik 52
51	Kullanılan soğutmadan kaynaklı emisyonlar	Kullanılan enerji miktarı x Elektrik üretimi EF
52	üretile soğutmadan kaynaklı emisyonlar	Üretilen enerji miktarı x Elektrik üretimi EF
53	Kapsam 2 emisyon miktarı	Eşitlik 39 + Eşitlik 44 + Eşitlik 50

(Devamı Arkada)

EK-1'in devamı

54	Çamur Depolama	Eşitlik 55 + Eşitlik 56
55	Depolamadan kaynaklı N ₂ O emisyonları	N ₂ O EF (depolama) x N içeriği x Depolanan gün sayısı x Çamur Miktarı x TS içeriği x N ₂ O EF (GWP)
56	Depolamadan kaynaklı CH ₄ emisyonları	CH ₄ EF (depolama) x Depolanan gün sayısı x Çamur VS Miktarı x Metan yoğunluğu x CH ₄ EF (GWP)
57	Çamur susuzlaştırma	Eşitlik 57.1
57.1	Elektrik enerjisi kullanımı	Çamur TS miktarı x Enerji kullanımı (susuzlaştırma için) x Elektrik üretimi EF
57.2	Çamur kurutma	Eşitlik 57.3 + Eşitlik 57.4
57.3	Elektrik enerjisi kullanımı	(Kurutmaya buharlaşan su hacmi x Enerji kullanımı (kurutma için) x Elektrik üretimi EF) + (Kurutmaya buharlaşan su hacmi x Termal enerji kullanımı (kurutma için) x Yerel ısınma EF)
57.4	Dolaylı CO ₂ emisyonları	(CH ₄ EF (çamur kurutma) x CO ₂ EF (çamur kurutma) x NMVOC emisyonları (çamur kurutma) x Çamur TS miktarı
58	Çamur Yükleme	Çamur TS miktarı x Toplam CO ₂ emisyonu (yükleme)
59	Depolamadan sonra N, P, K, C Miktarları	Çamur TS miktarı x N, P, K, C (çamur)
60	Araziye serme kaynaklı emisyonlar	Eşitlik 61 + Eşitlik 62 + Eşitlik 63 + Eşitlik 64 + Eşitlik 65 + Eşitlik 66 + Eşitlik 67
61	Çamuru serme	(Çamur TS miktarı x Toplam CO ₂ emisyonu (Araziye Yayma)) – ((N+P+K) x Sentetik gübre EF (CO ₂))
62	Azaltılan sentetik gübre (N)	– N EF (sentetik gübre) x Depolamadan sonra N miktarı x Çamurdaki N oranı
63	Azaltılan sentetik gübre (P)	– P EF (sentetik gübre) x Depolamadan sonra P miktarı x Çamurdaki P oranı
64	Azaltılan sentetik gübre (K)	– K EF (sentetik gübre) x Depolamadan sonra K miktarı x Çamurdaki K oranı
65	Doğrudan N ₂ O emisyonları	N miktarı x N ₂ O EF (GWP) x ((Doğrudan N ₂ O EF x Çamurdaki N oranı – (Doğrudan N ₂ O EF (sentetik gübre)))
66	CH ₄ emisyonları	CH ₄ EF x Çamur TS miktarı x CH ₄ EF (GWP)
67	Dolaylı N ₂ O emisyonları	N miktarı x N ₂ O EF (GWP) x ((NH ₃ – NO ₃ EF (çamurdaki) x Dolaylı N ₂ O EF x Çamur N oranı) – (NH ₃ – NO ₃ EF (sentetik gübre) x Dolaylı N ₂ O EF x NH ₃ emisyonlarından kaynaklanan N ₂ O EF (sentetik gübre ve çamur))
68	Çamurun yakılması	Eşitlik 69 + Eşitlik 70 – Eşitlik 71 - Eşitlik 72 + Eşitlik 73
69	N ₂ O emisyonları	(N ₂ O EF (çamur yakma) x N ₂ O EF (GWP) x Çamur miktarı) + (N ₂ O EF (çamur yakma) x N ₂ O EF (GWP) x çamur miktarı)
70	CH ₄ emisyonları	(CH ₄ EF (çamur yakma) x CH ₄ EF (GWP) x Çamur miktarı) + (CH ₄ EF (çamur yakma) x CH ₄ EF (GWP) x çamur miktarı)
71	Elektrik enerjisi elde edilmesi	((Çamur TS miktarı x Enerji geri kazanım oranı x Çürütülmüş çamur enerji içeriği) + (çamur TS miktarı x Enerji geri kazanım oranı x çamur enerji içeriği)) x Elektrik üretimi EF
72	Isı enerjisi elde edilmesi	((Çamur TS miktarı x Isı geri kazanım oranı x Çürütülmüş çamur enerji içeriği) + (çamur TS miktarı x Enerji geri kazanım oranı x çamur enerji içeriği)) x Yerel ısınma EF
73	Elektrik enerjisi kullanımı	Çamur TS miktarı x Enerji kullanımı (yakma için) x Elektrik üretimi EF

(Devamı Arkada)

EK-1'in devamı

74	Düzenli Depolama	Eşitlik 75 + Eşitlik 76 + Eşitlik 77 – Eşitlik 78 + Eşitlik 79 + Eşitlik 80
75	N ₂ O emisyonları	N ₂ O EF (düzenli depolama) x N ₂ O EF (GWP) x Çamurdaki içeriğindeki N oranı x Depolamadan sonra N içeriği
76	CH ₄ emisyonları	CH ₄ EF (düzenli depolama) x CH ₄ EF (GWP) x Çamur VS miktarı
77	Elektrik enerjisi kullanımı	Çamur TS miktarı x Enerji kullanımı (düzenli depolama için) x Elektrik üretimi EF
78	Elektrik enerjisi elde edilmesi	(Çamur VS miktarı x CH ₄ üretimi x gazdan elektrik üretimi oranı x CH ₄ enerji içeriği x Elektrik üretimi EF) + (Çamur VS miktarı x CH ₄ üretimi x gazdan ısı üretimi oranı x CH ₄ enerji içeriği x Yerel ısınma EF)
79	Çöp gazının yakılmasından açığa çıkan N ₂ O emisyonları	Çamur VS miktarı x CH ₄ üretimi x CH ₄ toplanan x CH ₄ yoğunluğu x Gaz motorlarında/gaz kazanında biyogazın yakılmasından kaynaklanan N ₂ O EF x N ₂ O EF (GWP)
80	Çöp gazının yakılmasından açığa çıkan CH ₄ emisyonları	Çamur VS miktarı x CH ₄ üretimi x CH ₄ toplanan x CH ₄ yoğunluğu x Gaz motorlarında/gaz kazanında biyogazın yakılmasından kaynaklanan CH ₄ EF x CH ₄ Emisyonu (GWP)
81	Çamurun gübre olarak kullanılması	Eşitlik 82 + Eşitlik 83 + Eşitlik 84 + Eşitlik 85 – Eşitlik 86 – Eşitlik 87 – Eşitlik 88
82	Elektrik enerjisi kullanımı	Çamur TS miktarı x Enerji kullanımı (kurutma işlemleri için) x Elektrik üretimi EF
83	CH ₄ emisyonları	CH ₄ EF x çamur miktarı x TS içeriği x CH ₄ EF (GWP)
84	Doğrudan N ₂ O emisyonları	Çamur TS miktarı x N miktarı x N ₂ O EF (GWP) x (1- kurutma sırasında N kaybı) x (Doğrudan N ₂ O EF - Doğrudan N ₂ O EF (sentetik gübre))
85	Dolaylı N ₂ O emisyonları	Çamur TS miktarı x N miktarı x N ₂ O EF (GWP) x (1- kurutma sırasında N kaybı) x (NH ₃ – NO ₃ EF (çamur) x Dolaylı N ₂ O EF) – (NH ₃ – NO ₃ EF (sentetik gübre) x NH ₃ emisyonlarından kaynaklanan N ₂ O EF (sentetik gübre ve çamur))
86	Azaltılan sentetik gübre (N)	(1- kurutma sırasında N kaybı) x Sentetik gübre üretimi EF (N) x çamur TS miktarı x N miktarı
87	Azaltılan sentetik gübre (P)	Sentetik gübre üretimi EF (P) x Çamur TS miktarı x P miktarı x Kompostta P miktarı
88	Azaltılan sentetik gübre (K)	Sentetik gübre üretimi EF (K) x Çamur TS miktarı x K miktarı x Kompostta K miktarı
89	Kompost	Eşitlik 90 + Eşitlik 91 + Eşitlik 92 + Eşitlik 93
90	Doğrudan N ₂ O emisyonları	N miktarı x N ₂ O EF (GWP) x N ₂ O EF (kompost) x Kompostla kaybedilen N x Çamur N oranı x Çamur TS miktarı
91	Dolaylı N ₂ O emisyonları	N miktarı x N ₂ O EF (GWP) x Kompostla kaybedilen N x Kompostla kaybedilen NH ₃ x Dolaylı N ₂ O EF (kompost) x Çamur TS miktarı x Çamur N oranı
92	CH ₄ emisyonları	CH ₄ EF (kompost) x CH ₄ EF (GWP) x Çamur TS miktarı x Depolamadan sonra C miktarı
93	Elektrik enerjisi kullanımı	Çamur TS miktarı x Enerji kullanımı (kompost işlemleri için) x Elektrik üretimi EF
94	Kompostun tarım arazisinde kullanımı	– Eşitlik 95 – Eşitlik 96 – Eşitlik 97 + Eşitlik 98 + Eşitlik 99 + Eşitlik 100
95	Azaltılan sentetik gübre (N)	Sentetik gübre üretimi EF (N) x Depolamadan sonra N miktarı x Kompost sırasında kaybedilen N x Kompostta N miktarı
96	Azaltılan sentetik gübre (P)	Sentetik gübre üretimi EF (P) x Depolamadan sonra P miktarı x Kompostta P miktarı
97	Azaltılan sentetik gübre (K)	Sentetik gübre üretimi EF (K) x Depolamadan sonra K miktarı x Kompostta K miktarı

(Devamı Arkada)

EK-1'in devamı

98	Doğrudan N ₂ O emisyonları	((1- N kaybı (kompost) x Doğrudan N ₂ O EF (farmland) x Kompostta N varlığı – Doğrudan N ₂ O EF (sentetik gübre)) x N ₂ O EF (GWP) x Depolamadan sonra N miktarı
99	Dolaylı N ₂ O emisyonları	((1- N kaybı (kompost) x NH ₃ - N ₂ O EF (çamur) x Dolaylı N ₂ O EF (farmland) x N ₂ O EF (GWP) x Kompostta N varlığı) – (NH ₃ - N ₂ O EF (sentetik gübre) x Dolaylı N ₂ O EF (sentetik gübre) x N ₂ O EF (GWP)) x Depolamadan sonra N içeriği
100	CH ₄ emisyonları	(CH ₄ EF - CH ₄ EF (sentetik gübre)) x Çamur TS miktarı x CH ₄ EF (GWP)
101	Kompostun düzenli depolamada kullanımı	Eşitlik 102 + Eşitlik 103 + Eşitlik 104
102	Doğrudan N ₂ O emisyonları	N miktarı x (1- N kaybı (kompost)) x Kompostta N varlığı x N ₂ O EF (düzenli depolama) x N ₂ O EF (GWP)
103	Dolaylı N ₂ O emisyonları	N miktarı x (1- N kaybı (kompostta)) x Kompostta N varlığı x NH ₃ EF (düzenli depolama) x Dolaylı N ₂ O EF (farmland) x N ₂ O EF (GWP)
104	CH ₄ emisyonları	(CH ₄ EF - CH ₄ EF (sentetik gübre)) x Çamur TS miktarı x CH ₄ EF (GWP)
105	Kompost sonrasında düzenli depolama	Eşitlik 106 + Eşitlik 107 + Eşitlik 108 + Eşitlik 109 + Eşitlik 110 + Eşitlik 111 + Eşitlik 112
106	Doğrudan N ₂ O emisyonları	N miktarı x N ₂ O EF (düzenli depolama) x (1- N kaybı (kompost) x N ₂ O EF (GWP)
107	Dolaylı N ₂ O emisyonları	N miktarı x (1- N kaybı (kompost) x NH ₃ EF (kompost) x Dolaylı N ₂ O EF (kompost) x N ₂ O EF (GWP)
108	CH ₄ emisyonları	C miktarı x CH ₄ EF (kompost) x (1- C kaybı (kompost)) x CH ₄ EF (GWP)
109	Elektrik enerjisi kullanımı	Eşitlik 77 x Kompost sırasında ağırlık azalım oranı
110	Elektrik enerjisi elde edilmesi	Eşitlik 78 x Kompost sırasında ağırlık azalım oranı
111	Çöp gazının yakılmasından açığa çıkan N ₂ O emisyonları	Eşitlik 79 x Kompost sırasında ağırlık azalım oranı
112	Çöp gazının yakılmasından açığa çıkan CH ₄ emisyonları	Eşitlik 80 x Kompost sırasında ağırlık azalım oranı
113	Karbon yakalama ile tutulan toplam CO₂ emisyonları	Eşitlik 114 x CO ₂ -C için düzeltme faktörü
114	Karbon yakalama ile tutulan CO ₂	Çamur TS miktarı x TS Depolamadan sonra C miktarı x Karbon tutma oranı
115	Izgara Atıkları	Eşitlik 118 + Eşitlik 119 + Eşitlik 120
116	Yakmadan elde edilen elektrik enerjisi	Izgarada tutulan atık miktarı x Isı içeriği x Elektrik üretim yüzdesi
117	Yakmadan elde edilen ısı enerjisi	Izgarada tutulan atık miktarı x Isı içeriği x Isı enerjisi geri kazanım yüzdesi
118	Yakmadan elde edilen toplam enerji	-(Eşitlik 116 x Elektrik üretimi EF) – (Eşitlik 117 x Yerel ısınma EF)
119	Yakmadan kaynaklı emisyonlar	Izgarada tutulan atık miktarı x TS içeriği (yakma için) x Izgara atıkları EF
120	Düzenli depolamadan kaynaklı emisyonlar	Izgarada tutulan atık miktarı x TS içeriği (genel) x Düzenli depolamada kullanılan elektrik enerjisi x Elektrik üretimi EF

(Devamı Arkada)

EK-1'in devamı

121	Kum Atıkları	Eşitlik 122 + Eşitlik 123
122	Düzenli depolamadan kaynaklı emisyonlar	Tutulan kum miktarı x Düzenli depolamada kullanılan elektrik enerjisi x Elektrik üretimi EF
123	Geri dönüşüm	Tutulan kum miktarı x Geri kazanım EF
124	Kimyasalların veya çamurun taşınımı	Yılda taşıma için gidilen mesafe x Km başına açığa çıkan EF
125	Kimyasal madde üretimi kaynaklı emisyonlar	Kullanılan kimyasal miktarı x Kimyasal üretimi EF
126	Kimyasal maddelerin AAT'de kullanımı sırasında açığa çıkan emisyonlar	Kullanılan kimyasal miktarı x Kimyasal üretimi EF

ÖZGEÇMİŞ

Gökber YAVUZ

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2022 – 2024	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2017 – 2022	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Antalya

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

1- Bostancı, S., Yavuz, G., Okumuş, M.B., Çığgın, A.S. (2022). Otomotiv Endüstrisi Atıksularının Fenton Bazlı Oksidasyon Prosesleri ile Arıtılabilirliğinin Araştırılması. TURKAY 2022 Türkiye’de Katı Atık Yönetimi ve Çevre Sorunları Sempozyumu, 24 - 26 Ekim 2022, İstanbul, Türkiye (Tam Metin Bildiri).

Görev alınan projeler

1- “Otomotiv Endüstrisi Atıksularının Biyolojik Arıtma Öncesi Fenton Oksidasyonu ile Ön Arıtımı” TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı, 20 Kasım 2021 – 26 Haziran 2022. (Proje yürütücüsü)

2 - “Su Dağıtım Sistemlerinde İdari Su Kayıplarının Yönetimi İçin En Uygun Sayaç Değişimi Periyodunun Belirlenmesi” TÜBİTAK 1001 – Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı, 08 Mart 2023 – 08 Mart 2024. (Araştırmacı)