





Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Biyolojik ve İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesislerinin Karbon Ayak İzinin Yaşam Döngüsü Temelinde Belirlenmesi

 Simge ÇANKAYA ^{a,*},  Beyhan PEKEY ^b

^a Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, TÜRKİYE

^b Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: simge.taner@kocaeli.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1242081

ÖZ

Atıksuda bulunan kirleticileri gidererek temiz çıkış suyu üretmek için tasarlanan ve inşa edilen atıksu arıtma tesisleri (AAT), kentsel sistemler için temel gereksinimdir. Söz konusu tesisler ham atıksuyun alıcı ortamlara deşarjı nedeniyle oluşabilecek çevresel etkilerin azaltılmasını sağlamaktadır. Buna karşılık, faaliyetleri sürecinde gerek kaynak tüketimleri (su, elektrik gibi) gerek emisyon oluşturmaları (metan, nitroz oksit gibi) nedeniyle bu tesislerin çevresel açıdan sürdürülebilirliklerinin değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Bu çalışmada, farklı özellikler taşıyan bir adet biyolojik (klasik aktif çamur prosesi) ve bir adet ileri biyolojik (A2/O prosesi) atıksu arıtma tesisinin işletilmesi sürecinin karbon ayak izi yaşam döngüsü yaklaşımı ile hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Karbon ayak izi, yaşam döngüsü değerlendirme (YDD)'nde küresel ısınma potansiyelinin (KIP) bir göstergesidir. Çalışma kapsamında SimaPro 9.2 yazılımı ve IPCC 2013(100a) etki değerlendirme metodu kullanılmıştır. Gerçekleştirilen etki değerlendirme sonucunda, A2/O prosesine sahip atıksu arıtma tesisinin küresel ısınma potansiyeli 1,64 kg CO₂ eşd/m³.atıksu, klasik aktif çamur prosesine sahip atıksu arıtma tesisinin küresel ısınma potansiyeli ise 1,23 kg CO₂ eşd/m³.atıksu olarak hesaplanmıştır. Envanter analizi sonuçları araştırıldığında, değerlendirmenin yapıldığı atıksu arıtma tesislerine bağlı ortaya çıkan KIP etkisinin metan (CH₄) ve nitroz oksit (N₂O) emisyonları ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Arıtma tesisi ünitelerinin KIP üzerindeki etkileri karşılaştırıldığında, biyolojik arıtma ünitesinin KIP üzerindeki katkısının en yüksek olduğu belirlenmiştir. Atıksu arıtma tesislerinin işletilmesi sürecindeki proseslerin (su geri kazanımı, arıtma çamuru bertarafı, direkt sera gazı oluşumu, arıtılmış atıksuyun alıcı ortama deşarjı, kimyasal madde tüketimi, nakliye ve elektrik tüketimi) etkileri değerlendirildiğinde ise arıtma çamuru bertarafı için seçilen yöntemin ve elektrik tüketiminin küresel ısınma potansiyeli etki kategorisi üzerinde önemli ve belirleyici olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Atıksu arıtma tesisi, Karbon ayak izi, Küresel ısınma potansiyeli, Yaşam döngüsü değerlendirme

LCA-based Carbon Footprint of Biological and Advanced Biological Wastewater Treatment Plants

ABSTRACT

Wastewater treatment plants (WWTP), designed and built to produce clean effluent by removing pollutants from wastewater, are the basic requirement for urban systems. These plants reduce the environmental impacts that may occur due to the discharge of raw wastewater into receiving environments. On the other hand, it is important to evaluate the environmental sustainability of them due to consumption of resources (such as water, electricity) and emitting emissions (such as methane, nitrous oxide) during their activities. In this study, the carbon footprint of the one biological (classical activated sludge process) and one advanced biological (A2/O process) wastewater

treatment plant with different characteristics was calculated and compared with the life cycle approach. Carbon footprint is an indicator of global warming potential (GWP) in life cycle assessment (LCA). Within the scope of this study, SimaPro 9.2 software and IPCC 2013(100a) impact assessment method were used. As a result of the impact assessment the GWP of the wastewater treatment plant with the A2/O process was calculated as 1.64 kg CO₂ eq/m³.wastewater, and the GWP of the wastewater treatment plant with the classical activated sludge process was calculated as 1.23 kg CO₂ eq/m³.wastewater. When the results of the inventory analysis were investigated, it was determined that the GWP impact category was related to the methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) emissions in wastewater treatment plants. When the contribution of treatment plant units on GWP impact category were compared, the contribution of the biological treatment unit was determined as the highest. Considering the impacts of the processes (water recovery, sewage sludge disposal, direct greenhouse gas emissions, discharge of treated wastewater to the receiving environment, chemical consumption, transportation and electricity consumption) during operational stage of wastewater treatment plants, it was determined that the method chosen for treatment sludge disposal and electricity consumption are important and decisive on the GWP impact category.

Keywords: Wastewater treatment, Carbon footprint, Global warming potential, Life cycle Assessment.

I. GİRİŞ

Sürdürülebilir kalkınma, gelecek kuşakların ihtiyaçlarını karşılayabilme olanağından ödün vermeksizin günümüz kuşaklarının ihtiyaçlarını karşılayabilecek bir kalkınma modeli olarak 20. yüzyıl sonlarına doğru dünya gündemine girmiş ve 1990'lı yıllarda imzalanan uluslararası antlaşmalarla küresel bir uygulama planı haline gelmiştir [1]. 2015 yılında ise Birleşmiş Milletler Genel Kurulu, yoksulluğu ortadan kaldırmak, gezegenimizi korumak, eşitsizlik ve adaletsizlikle mücadele etmek amacıyla 2030 yılında tamamlanan bir yol haritası olan ve 17 evrensel hedeften oluşan Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarını (SKA) yayınlamıştır [2]. İklim eylemleri, temiz su ve sıhhi koşullar, erişilebilir ve temiz enerji gibi çevresel hedeflerin de yer aldığı sürdürülebilir kalkınma amaçları doğrultusunda, çevreye en az zarar verecek üretim ve hizmetlerin tercih edilmesi giderek bir zorunluluk haline gelmekte ve çevre sorunları karar vermede daha önemli faktörlerden biri olarak kabul edilmektedir. Fakat birçok farklı çevresel etki kategorisinin varlığı, birden fazla geri kazanım ve performans iyileştirme alternatifleri arasında bütünsel karşılaştırmaları zorlaştırmaktadır. Örneğin, bir senaryo kimyasal kullanımının azalmasıyla sonuçlanabilirken, başka bir senaryo enerji taleplerini önemli ölçüde azaltabilmektedir. Dolayısıyla olabilecek tüm alternatifler arasındaki dengeler sağlam, bütüncül ve şeffaf değerlendirme metodolojilerini gerektirmektedir [3]. Yaşam Döngüsü Değerlendirme (YDD), bir ürünün yaşam döngüsü boyunca (hammadde temininden başlayarak o ürünün üretimi, kullanımı ve kullanım sonrası atık yönetimi aşamalarında) kullanılan kaynakları ve ortaya çıkması muhtemel çevresel etkileri kapsamlı bir şekilde değerlendirmek için kullanılan bir çevresel karar verme aracı olarak tanımlanmaktadır. [4, 5]. Atık su arıtma tesisleri (AAT), arıtılmamış suyun alıcı su ortamına deşarjının çevresel etkisini en aza indirecek şekilde tasarlanan sistemler olmakla birlikte; inşası, işletilmesi ve kullanım sonrası yıkımı süreçlerinde gerek kaynak tüketimi (su, beton, vb.) gerekse emisyon oluşturmaları nedeniyle (sera gazı emisyonları, arıtma çamurları, vb.) çeşitli çevresel sorunlara yol açmaktadır. Dolayısıyla, çevresel sürdürülebilirlik göz önüne alındığında, atık su arıtma sistemlerinin hedeflerinin insan sağlığının ve yüzey sularının korunmasının ötesine geçerek, kaynak tüketimini ve atık oluşumunu minimize etmesi ve nütrient geri dönüşümüne imkan sağlaması gerekmektedir [6]. Yaşam döngüsü değerlendirme ile atıksu arıtma sistemlerinin çevresel performansı mevcut en iyi bilimsel bilgilere dayanarak, standartlaştırılmış ve şeffaf bir yaklaşımla ortaya koyulabilmektedir [7]. Bu metod ile hem doğrudan atıksu arıtma tesislerinin kendilerinde meydana gelen hem de tedarik zincirleriyle ilişkili olan emisyonların (örn. elektriği sağlayan elektrik santrallerinden gelen etki) envanterlenerek olası etkilerin kapsamlı ve bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi mümkündür [8]. Ayrıca YDD, farklı atıksu arıtma teknolojilerinin çevresel etkilerinin daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını, karşılaştırılmasını ve sürdürülebilir arıtma teknolojilerinin seçimini sağlaması açısından da yararlı bir karar destek aracıdır [9].

Gömülü enerji, karbon ayak izi ve ötrofikasyon potansiyeli, atık su yönetimi çözümlerinin ve kaynak geri kazanım stratejilerinin su-enerji-karbon-besin ilişkisi ile ilgili temel çevresel sürdürülebilirlik etki

katgorileri arasında yer almaktadır [10]. Karbon ayak izi, YDD'deki küresel ısınma etkisi kategorisinin göstergesidir ve belirli bir süreçle ilişkili (örneğin, ulaşım, enerji tüketimi veya gerekli kimyasalların üretimi yoluyla) yaşam döngüsü sera gazı emisyonlarını (karbondioksite normalize edilmiş) karakterize etmektedir [11]. Bu süreçler en genel şekliyle doğrudan (Kapsam 1) emisyonlar (örn. CH₄ ve N₂O), dolaylı (Kapsam 2) emisyonlar (örn. elektrik üretimi) ve diğer dolaylı (Kapsam 3) emisyonlardan oluşmaktadır [10]. Karbondioksit (CO₂) eşdeğer kütlesi olarak ölçülen karbon ayak izini hesaplamak için IPCC tarafından geliştirilen karakterizasyon modellerinden elde edilen karakterizasyon faktörleri ve emisyon verileri kullanılmaktadır [11].

Literatürde atıksu arıtma tesislerinin karbon ayak izi konusunda çeşitli çalışmalar bulunmakla birlikte, yaşam döngüsü bazlı karbon ayak izi ile ilgili çalışmalar sınırlı sayıdadır [12, 13]. İspanya'da yapılmış bir çalışmada, bir atıksu arıtma tesisinde metan ve nitroz oksit emisyonlarının ölçüm sonuçlarını içeren sahaya özgü veriler kullanılarak yaşam döngüsü değerlendirmesi yöntemi ile karbon ayak izi hesaplanmıştır. Çalışmada arıtma tesisine bağlı olarak net karbon ayak izinin 0,15 kg CO₂ eşd. (t/atıksu) olduğu; karbon ayak izinin en çok direkt sera gazı emisyonlarından etkilendiği (toplam zararın %44'ü) belirlenmiştir. Kalan kısmın (%66) ise temel olarak enerji tüketimi, kullanılan kimyasallar ve atık suların ve biyokatıların araziye uygulanmasından kaynaklanan emisyonlarla ilişkili olduğu ortaya konmuştur [12]. Kolombiya'da gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise 50.000 nüfuslu Pamplona şehrinin (Kolombiya) su arıtma, kanalizasyon ve sanitasyon hizmetlerinin sera gazı potansiyelinin yaşam döngüsü değerlendirmesi metoduyla değerlendirilmesi amaçlanmıştır; dolayısıyla bu bağlamda yalnız küresel ısınma potansiyeli etkisine odaklanılmıştır. Söz konusu çalışmada fonksiyonel birim olarak "Kolombiya'nın 50.000 nüfuslu Pamplona şehrinde 2017 yılı boyunca su arıtma, kanalizasyon ve sanitasyon kamu hizmetlerinin kullanımı" olarak seçilerek sonuçlar kişi başı sera gazı eşdeğeri cinsinden hesaplanmıştır. Sonuçlar, üç hizmetin işletilmesi ile kişi başına ve yılda 1,07E+01 kg CO₂ eşd salındığını, su arıtımı ile ilişkili küresel ısınma potansiyeli emisyonlarının en etkili olduğunu ve tüm KIP'nin %66'sını oluşturduğunu göstermiştir. Kanalizasyondan yayılan CO₂'nin toplamın %20'sini, sanitasyondan kaynaklanan CO₂'nin ise toplamın %14'ünü oluşturduğu ortaya konmuştur [13]. Bu çalışmada, farklı arıtma konfigürasyonuna sahip (A2/O ve KAS) iki atıksu arıtma tesisinin karbon ayak izi yaşam döngüsü yaklaşımı ile belirlenmiş, arıtma üniteleri ve prosesler dikkate alınarak karşılaştırılmıştır.

II. MALZEME VE YÖNTEM

A. ATIKSU ARITMA TESİSLERİNE AİT BİLGİLER

Çalışma kapsamında seçilen biyolojik ve ileri biyolojik atıksu arıtma tesislerine ait işletme bilgileri Tablo 1'de verilmektedir. İleri biyolojik atıksu arıtma tesisi (AAT-1), azot ve fosfor gideriminin sağlandığı A2/O prosesi ile çalışmaktadır. Tesiste günlük maksimum 10.000 m³ kapasiteli, filtrasyon ve dezenfeksiyon kademelerinden oluşan atıksu geri kazanım ünitesi bulunmakta, bu üniteye ileri arıtma tabi tutulan sular yeşil alan sulamada ve sanayide kullanılmaktadır. Biyolojik atıksu arıtma tesisi (AAT-2) ise karbon gideriminin sağlandığı klasik aktif çamur prosesi ile çalışmaktadır.

Tablo 1. Çalışma kapsamında seçilen atıksu arıtma tesislerine ait genel bilgiler.

AAT adı	Giriş debisi*	Kirlenici konsantrasyonu (mg/L)		Arıtma teknolojisi	Çamur bertarafı	Su geri kazanımı
		Giriş	Çıkış			
AAT-1	65394 m ³ /gün	BOİ ₅ : 211	BOİ ₅ : <10	A2/O	Düzenli depolama	Var
		KOİ: 439	KOİ: 16,7			
		TN: 35,8	TN: 4,84			
		TP: 3,8	TP: 0,61			
		AKM: 216	AKM: 7,49			

AAT-2	25782 m ³ /gün	BOİ ₅ : 352	BOİ ₅ : 12,5	KAS**	Enerji amaçlı geri kazanım	Yok
		KOİ: 778	KOİ: 33,5			
		TN: 22,6	TN: 7,8			
		TP: 2,54	TP: 0,93			
		AKM: 420	AKM: 13,3			

* 2018 yılı için geçerli ortalama debidir.

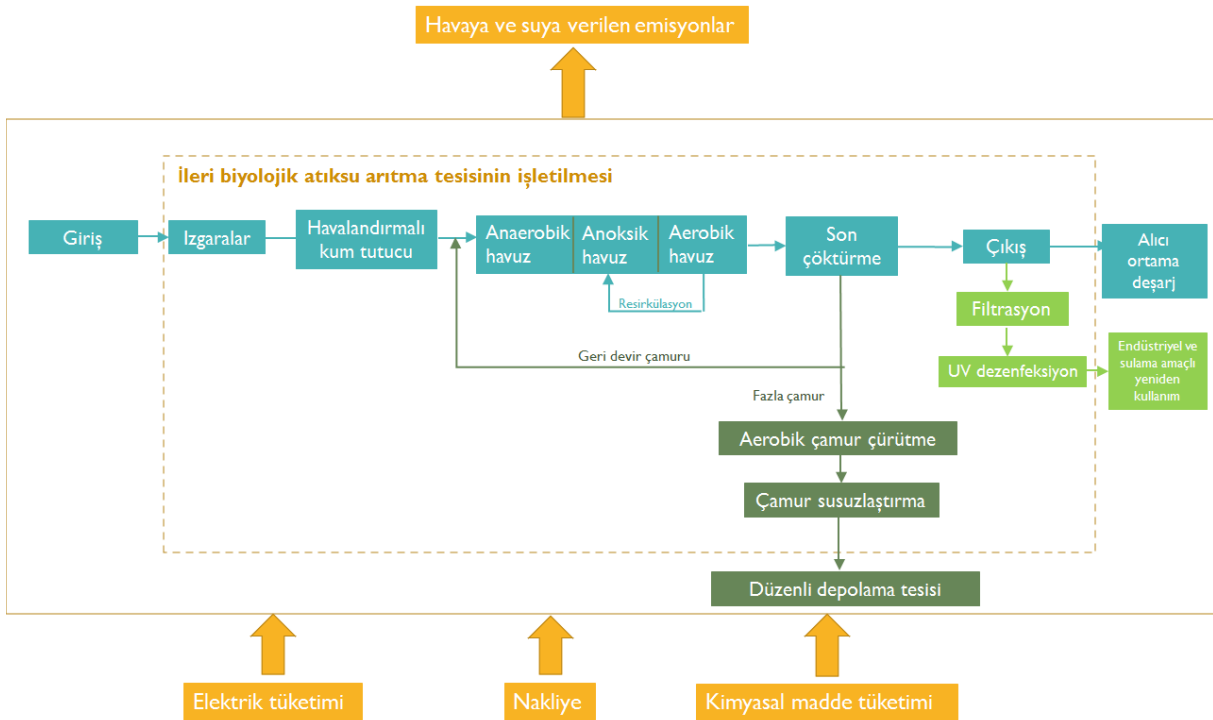
**Klasik aktif çamur sistemi

B. YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, farklı arıtma konfigürasyonlarına sahip (biyolojik ve ileri biyolojik) iki atıksu arıtma tesisinin karbon ayak izleri yaşam döngüsü temelinde değerlendirilmiştir. Yaşam döngüsü değerlendirme TS EN ISO 14040 ve TS EN ISO 14044 standartları temel alınarak dört aşamada gerçekleştirilmiştir: (1) Amaç ve kapsamın belirlenmesi, (2) Envanter analizi, (3) Etki değerlendirme ve (4) Yorumlama [14], [15].

B. 1. Amaç ve Kapsamın Belirlenmesi

Yaşam döngüsü değerlendirmenin ilk aşaması olan amaç ve kapsamın belirlenmesi aşamasında, çalışmanın amacı, kapsamı, sistem sınırları ve fonksiyonel birim belirlenmektedir. Bu YDD çalışmasının amacı, bir biyolojik ve bir ileri biyolojik atıksu arıtma tesisinin karbon ayak izinin yaşam döngüsü temelinde değerlendirilmesidir. Çalışmanın kapsamı, “beşikten kapıya” olarak seçilmiştir. Bu YDD çalışmasının sistem sınırları, atıksu arıtma tesisinin işletilmesi sürecini kapsamaktadır. Dolayısıyla, atıksu arıtımında kullanılan kimyasallar ve bu kimyasalların tesise nakliyesi, atıksu arıtılması sürecindeki elektrik tüketimi, oluşan atıkların bertaraf tesisine nakliyesi ve bertaraf edilmesi (düzenli depolama veya enerji amaçlı geri kazanım), arıtılan atıksuyun bir kısmının geri kazanımı ve kalan kısmının alıcı ortama deşarjı bu YDD çalışmasının sistem sınırları içindedir. AAT-1 için gerçekleştirilen YDD çalışmasının sistem sınırları Şekil 1’de, AAT-2 için gerçekleştirilen YDD çalışmasının sistem sınırları ise Şekil 2’de gösterilmektedir.

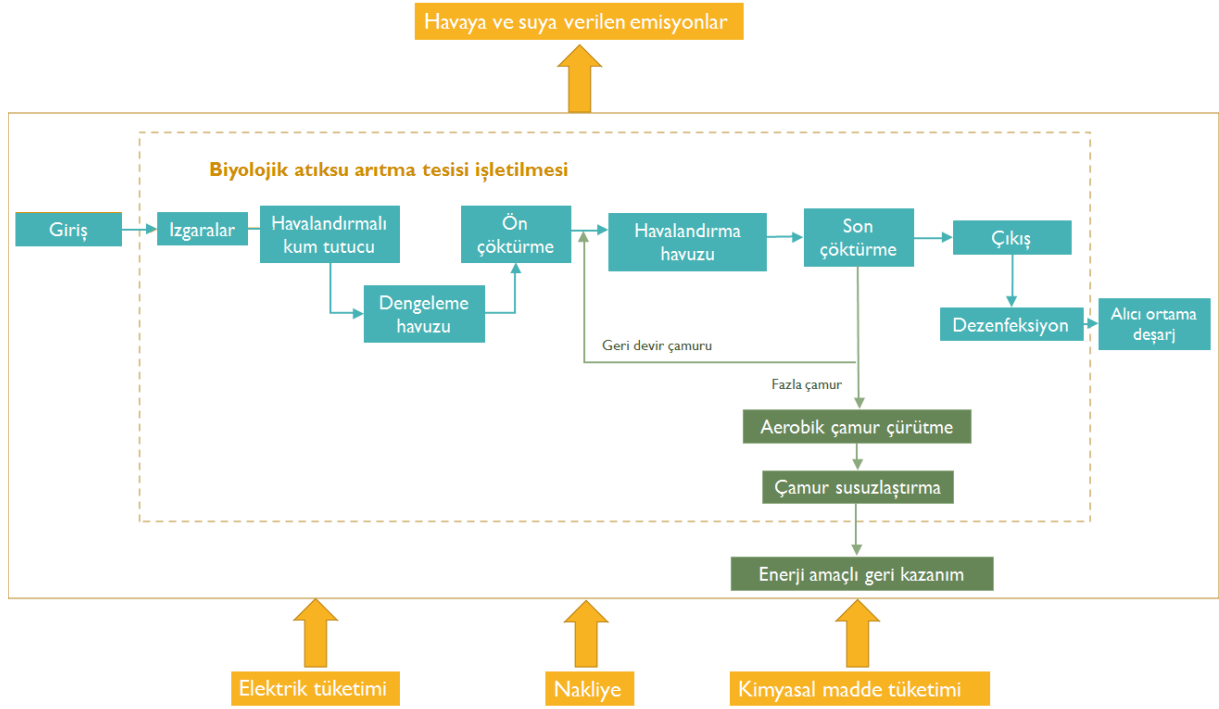


Şekil 1. AAT-1 için gerçekleştirilen YDD çalışmasının sistem sınırları.

Çalışma kapsamında seçilen AAT-1’de tesise giren atıksular kaba ve ince ızgaralardan geçirilerek kum tutucuya gelmekte olup ileri azot ve fosfor giderimine olanak sağlayan A2/O konfigürasyonunda biyolojik olarak arıtılmaktadır (Şekil 1). Bu konfigürasyon anaerobik, anoksik ve aerobik havuz ile son çökeltim havuzu ve son çökeltim havuzundan anaerobik havuz girişine gönderilen çamur geri devri bağlantısından oluşmaktadır. İnce ızgaralar ve kum tutuculardan gelen atıksu, biyolojik fosfor gideriminin sağlandığı anaerobik havuza iletilmektedir. Azot (N) giderimi ise nitrifikasyon (havalandırılmalı bölge) ve denitrifikasyon (anoksik bölge) adımlarıyla gerçekleştirilmektedir. Bunu sağlamak amacıyla oksik bölgeden anoksik bölgeye içsel atıksu döngüsü (resirkülasyon) yapılmaktadır.

Çalışma kapsamında seçilen AAT-2 ise biyolojik atıksu arıtma tesisidir ve klasik aktif çamur sistemi ile çalışmaktadır. AAT-2’de tesise gelen atıksular ızgaralardan geçirildikten sonra havalandırılmalı kum tutucu, dengeleme havuzu ve ön çöktürme havuzuna gelmekte olup, karbon giderimine olanak sağlayan klasik aktif çamur sisteminde biyolojik olarak arıtılmaktadır (Şekil 2).

Her iki AAT’nde de havalandırma havuzundan çıkan atıksular, arıtılmış suyun içindeki bakterilerin arıtılmış sudan ayrılması için son çöktürme havuzlarına iletilmektedir. Çöktürme havuzlarında, yoğun katı madde içeren çamur dibe çöklerken arıtılmış atıksu savaklanmaktadır. Savaklanan atıksu gerektiğinde klorlama yapılarak UV ünitesinden geçtikten sonra alıcı ortama deşarj edilmektedir. Dibe çöken çamur ise susuzlaştırıldıktan sonra nihai bertaraf için bertaraf tesislerine gönderilmektedir.



Şekil 2. AAT-2 için gerçekleştirilen YDD çalışmasının sistem sınırları.

Literatürde atıksu arıtma tesislerinin yaşam döngüsü değerlendirmesinin gerçekleştirildiği çalışmalarda tercih edilen fonksiyonel birim araştırıldığında, 1 eşdeğer nüfus, 1 ton kirletici (BOİ, KOİ) giderimi gibi çeşitli fonksiyonel birimlerin kullanıldığı görülmekle birlikte, en sık kullanılan fonksiyonel birimin hacimsel (1 m³ atıksu, 1000 m³ atıksu, gibi) olduğu dikkat çekmiştir [16]. Dolayısıyla, bu çalışmada da ortaya konan sonuçların literatür ile daha rahat kıyaslanabilir olması açısından fonksiyonel birim 1 m³ atıksuyun arıtılması olarak seçilmiştir.

B. 2. Yaşam Döngüsü Envanter Analizi

Yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmalarının en kritik süreçlerinden biri envanter analizi aşamasıdır. YDD çalışmasının ikinci adımı olan bu aşamada atıksu arıtma tesisi yetkilileri aracılığıyla, ilk aşamada

belirlenen sistem sınırları kapsamında atıksu arıtma tesislerine ait envanter analizi gerçekleştirilmiştir. Envanter analizi için 2018 yılı verileri kullanılmıştır. Her iki atıksu arıtma tesisi için fonksiyonel birim (1 m³ atıksuyun arıtılması) temel alınarak oluşturulan envanter verilerinin özeti Tablo 2’de verilmektedir.

Veri ulaşılabilirliği ve veri kalitesi bu aşamada karşılaşılan temel problemlerdendir. Envanter için gerekli verilerin bir kısmı (birincil veriler) atıksu arıtma tesisi yetkililerinden, diğer bir kısmı ise (ikincil veriler) SimaPro (v.9.2) yazılımı veri tabanlarından (Ecoinvent, USLCI, vb.) temin edilerek yazılıma girilmiş ve her bir atıksu arıtma tesisine özgü modeller oluşturulmuştur. Birincil veriler, AAT’lerinin işletilmesi esnasında kullanılan kimyasallara ait bilgileri (türü, miktarı, nereden temin edildiği), elektrik tüketimi, alıcı ortama verilen arıtılmış sudaki kirletici konsantrasyonları, direkt sera gazı emisyonları ve atık beyanlarına (tesiste oluşan atık miktarları ve bertaraf yöntemleri) ait bilgileri kapsamaktadır. İkincil veriler ise (kimyasal madde, yakıt ve elektrik üretimi gibi) SimaPro (v.9.2) yazılımında yer alan Ecoinvent ve USLCI yaşam döngüsü envanteri veri tabanlarından coğrafi, zamansal ve teknolojik uygunluk doğrultusunda seçilerek toplanmıştır. Envanter analizi aşamasında, her bir atıksu arıtma tesisinin giriş ve çıkış suyu karakteristikleri (BOİ₅, KOİ, TN, TP, AKM) ve genel tesis bilgilerine ait gerekli parametreler (ortalama debi, arıtma teknolojisi, atık bertarafı için seçilen yöntemler, vb.) kullanılmıştır. Sera gazlarından olan metan (CH₄) ve nitroz oksit (N₂O) gazı emisyonları çalışma kapsamında seçilen atıksu arıtma tesislerine özgü veriler kullanılarak IPCC (2019) kılavuzuna göre hesaplanmış ve YDD modeline eklenmiştir [17].

Tablo 2. AAT-1 ve AAT-2 için oluşturan envanter verileri.

Parametre	AAT-1	AAT-2
Girdiler:		
Temel proses üniteleri için arazi kullanımı (m²a)	0,00170	0,00005
Kimyasal Kullanımı (kg):		
Demir klorür	0,00465	-
Toz polimer	0,00165	0,00099
Klor (sıvı klor)	0,00028	-
Elektrik tüketimi (kWh)	0,26242	0,68853
Nakliye bilgileri (kgkm):		
Demir klorür	0,05580	-
Toz polimer	0,01975	0,240
Klor (sıvı klor)	0,00340	-
Arıtma çamuru	224,553	24,6900
Tehlikeli atıklar	0,00260	0,00058
Ambalaj atıkları	0,00022	0,00009
İnert atıklar	0,00231	0,01400
Çıktılar:		
Havaya verilen emisyonlar (kg):		
CH ₄	0,00328	0,00114
N ₂ O	0,00003	0,00011
Suya verilen emisyonlar (kg):		
BOİ ₅	0,00500	0,01249
KOİ	0,01672	0,03352
TN	0,00484	0,00781
TP	0,00061	0,00093
AKM	0,00749	0,01328
Bertarafa gönderilen atıklar (kg):		
Arıtma çamuru	0,68046	0,36415
Tehlikeli atıklar	3,72E-06	3,10E-05
Ambalaj atıkları	1,00E-05	1,20E-05
İnert atıklar	7,20E-05	7,30E-04

Ürün:	
Atıksu (m³)	1

B. 3. Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirme

Bu çalışmadaki yaşam döngüsü etki değerlendirme aşamasında, CH₄, N₂O ve CO₂(fosil) emisyonlarını içeren ve orta nokta etkilerinden biri olan küresel ısınma etki kategorisine odaklanılmıştır. Karbon ayak izi YDD'deki küresel ısınma etkisi kategorisinin bir göstergesidir. Envanter analizi aşamasında oluşturulan girdi ve çıktı parametreleri SimaPro (v.9.2) yazılımı ve IPCC 2013 (100a) etki değerlendirme metodu kullanılarak, YDD çalışmalarının üçüncü aşaması olan Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirme (YDED) adımı tamamlanmıştır. Bu metod ile iki farklı atıksu arıtma tesisinin karbon ayak izi yaşam döngüsü temelinde karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

B. 4. Yorumlama

Yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmasının son adımı olan yorumlama aşaması katkı analizleri ve hassasiyet analizlerini içermektedir. Katkı analizleri gerçekleştirilerek, üçüncü aşamada belirlenen etki kategorileri üzerinde önemli katkıya sahip prosesler ve kimyasal içerikler belirlenmiştir.

Hassasiyet analizleri kapsamında, atıksu arıtma tesislerinin çevresel yüklerine katkı sağlayan en önemli faktörlerden biri olan elektrik enerjisi kullanım verimliliğinin artırılmasının YDD sonuçları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla öncelikle ideal bir atıksu arıtma tesisinde olması gereken ideal spesifik elektrik tüketim değeri (16,6 kWh/kişi.yıl) baz alınarak [18] çalışma kapsamında seçilen AAT-1 ve AAT-2'deki spesifik elektrik tüketimi hesaplanmış ve ideal bir atıksu arıtma tesisinde olması gereken spesifik elektrik tüketim değeri ile karşılaştırılmıştır (Tablo 3). Ardından, çalışma kapsamında seçilen tesislerdeki elektrik tüketiminin fonksiyonel birim bazında yüzdesel olarak ne kadar düşürülmesi gerektiği hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda, AAT-1 için spesifik elektrik tüketiminin ideal spesifik elektrik tüketim değerine oldukça yakın olduğu belirlenmiş, bu nedenle hassasiyet analizlerine dahil edilmemiştir. AAT-2 için ise spesifik elektrik tüketim değeri, ideal spesifik elektrik tüketiminin neredeyse 2 katı olarak hesaplanmış (37,1 kWh/kişi.yıl) ve elektrik tüketiminin %55 azaltılması halinde YDD sonuçları üzerindeki olası etkilerinin ortaya konması için hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3. Hassasiyet Analizi için gerekli veriler

AAT Adı	Elektrik tüketimi (kWh/m ³ atıksu)	Spesifik elektrik tüketimi (kWh/kişi.yıl)	**İdeal spesifik elektrik tüketimi (kWh/kişi.yıl)	*Verimlilik artışı (%)	Verimlilik artışı sonrası elektrik tüketimi (kWh/m ³ atıksu)
AAT-1	0,26242	16,1	16,6	-	-
AAT-2	0,68853	37,1	16,6	55	0,3096

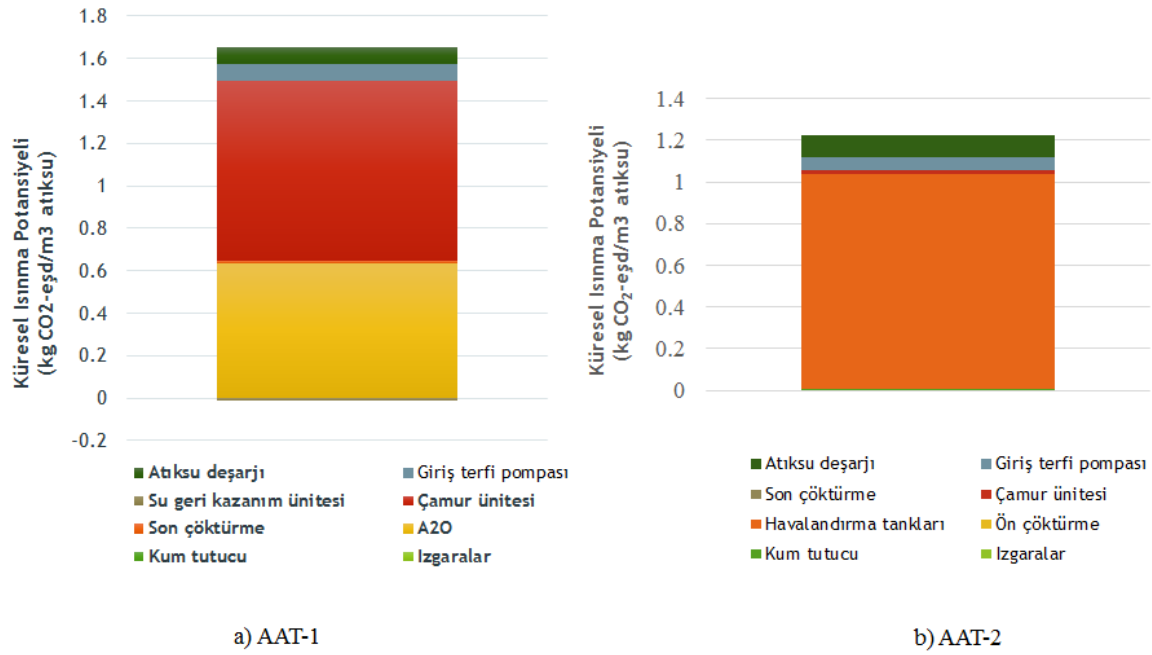
*İdeal spesifik elektrik tüketim değerine ulaşmak için gerekli olan azaltım (%)

**Referans: [18].

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

A. ARITMA ÜNİTELERİNE GÖRE KÜRESEL ISINMA POTANSİYELİ SONUÇLARI

İki farklı konfigürasyondaki atıksu arıtma tesisinin yaşam döngüsü temelli küresel ısınma potansiyelleri, arıtma ünitelerine göre Şekil 3'de verilmiştir. AAT-1 için incelenen arıtma üniteleri: Giriş terfi pompası, ızgaralar, kum tutucu, A2/O prosesi, son çöktürme, atıksu deşarjı su geri kazanım ünitesi ve çamur ünitesidir. AAT-2 için incelenen arıtma üniteleri: Giriş terfi pompası, ızgaralar, ön çöktürme, havalandırma tankları, son çöktürme, atıksu deşarjı ve çamur ünitesidir.



Şekil 3. AAT-1 ve AAT-2 arıtma ünitelerine göre hesaplanan KIP.

AAT-1’de günlük maksimum 10.000 m³ kapasiteli geri kazanım ünitesi bulunmakta, tesise gelen atıksuyun %15’i geri kazanım ünitesinde arıtılmakta ve kullanma suyu olarak kullanıma uygun hale getirilmektedir. AAT-2’de ise su geri kazanım ünitesi bulunmamakta, arıtılan atıksular dezenfeksiyon işleminden sonra alıcı ortama deşarj edilmektedir. Şekil 3 incelendiğinde, atıksu arıtılması sürecinde tercih edilen biyolojik arıtma konfigürasyonunun ve arıtma çamuru nihai bertaraf yönteminin küresel ısınma potansiyeli üzerinde belirleyici olduğu görülmektedir. A2/O prosesine sahip AAT-1’in küresel ısınma potansiyeli 1,64 kg CO₂ eşd/m³.atıksu bulunurken, konvansiyonel aktif çamur prosesi ile atıksuların arıtıldığı AAT-2’nin küresel ısınma potansiyeli 1,23 kg CO₂ eşd/m³.atıksu olarak hesaplanmıştır. Şekil 3’de de görüldüğü gibi AAT-1 için hesaplanan KIP’nin yaklaşık %51’i çamur ünitesi, %38’i ise A2/O prosesi ile ilişkilidir. Bunları sırasıyla giriş terfi pompaları (%5) ve atıksu deşarjı (%4,8) takip etmektedir. Su geri kazanım ünitesinin ise KIP üzerine %0,8’lik bir pozitif katkısı bulunmaktadır. AAT-2 için hesaplanan KIP’nin ise %84’ünün havalandırma tankları ile ilişkili olduğu dikkat çekmektedir. Bunu sırasıyla atıksu deşarjı (%8,6) ve giriş terfi pompaları (%5) takip etmektedir.

Çalışmanın gerçekleştirildiği atıksu arıtma tesislerinde giriş terfi pompaları, ızgaralar, kum tutucu, çöktürme tanklarının ve atıksu deşarjının KIP’ne katkısı birbirine yakın bulunmakla birlikte, çamur ünitesinin KIP değerine katkısı oldukça farklı bulunmuştur. Şekil 3 incelendiğinde AAT-1’de çamur ünitesinin KIP’ne katkısı 0,85 kg CO₂ eşd/m³.atıksu hesaplanırken, bu değer AAT-2 için 0,018 kg CO₂ eşd/m³.atıksu olarak hesaplanmıştır. Bu durumun arıtma çamurlarının nihai bertarafı için seçilen yöntem ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. AAT-1’de oluşan arıtma çamurları nihai bertaraf için düzenli depolama alanına gönderilirken, AAT-2’de oluşan arıtma çamurları yakın mesafede bulunan bir çimento üretim tesisine gönderilerek enerji geri kazanımı yapılan tesiste yakma yolu ile bertaraf edilmektedir. Bu sonucun detaylı değerlendirilmesi için SimaPro (v.9.2) yazılımında katkı analizleri gerçekleştirilerek sonuçlar Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4. Çamur ünitesi ve biyolojik arıtım ünitesi (A2O/KAS) için proses katkı analizleri (kg CO₂ eşd/m³.atıksu).

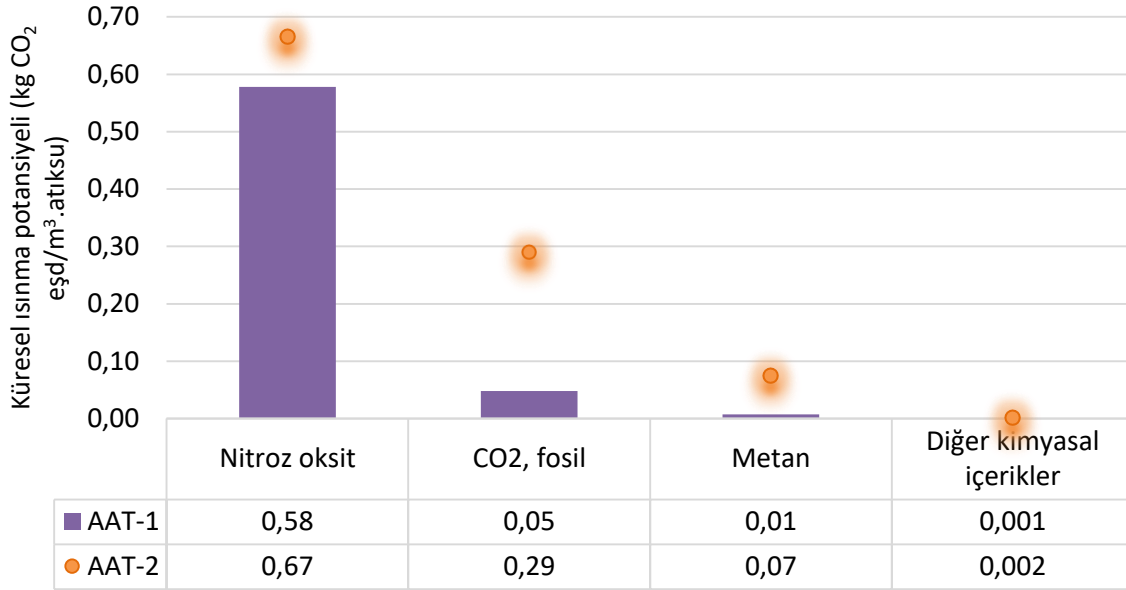
Proses	Çamur Ünitesi	
	AAT-1	AAT-2
Elektrik tüketimi	2.86E-02	8.30E-02
Nakliye	3.71E-02	4.11E-03

Tablo 4 (devam). Çamur ünitesi ve biyolojik arıtım ünitesi (A2O/KAS) için proses katkı analizleri (kg CO₂ eşd/m³.atıksu).

Toz polimer	4.76E-03	2.87E-03
Aritma çamuru düzenli depolama	7.78E-01	-
Enerji amaçlı geri kazanım	-	-7.20E-02
Diğer prosesler	7.82E-04	7.45E-06
Toplam	8.49E-01	1.80E-02
Proses	Biyolojik arıtım ünitesi	
	AAT-1 (A2/O)	AAT-2 (KAS)
Elektrik tüketimi	4.93E-02	3.01E-01
Havalandırma tankları (direkt sera gazı)	-	7.29E-01
A2/O prosesi (direkt sera gazı)	5.84E-01	-
Diğer prosesler	1.34E-03	4.21E-03
Toplam	6.34E-01	1.03E+00

Tablo 4’de verilen sonuçlar AAT-1 için değerlendirildiğinde, çamur ünitesinde KIP’ne katkısı en yüksek olan proses (0,78 kg CO₂ eşd/m³.atıksu) çamurun nihai bertarafıyla ilgili olan düzenli depolamadır. Bunu sırasıyla nakliye (0,0371 kg CO₂ eşd/m³.atıksu) ve elektrik tüketimi (0,0286 kg CO₂ eşd/m³.atıksu) takip etmektedir. Buna karşılık sonuçlar AAT-2 için değerlendirildiğinde çamur ünitesindeki elektrik tüketiminin KIP’ne katkısı AAT-1 için hesaplanan değer yaklaşık 3 katı olmakla birlikte, arıtma çamurunun enerji amaçlı geri kazanımı sayesinde KIP üzerinde 0,072 kg CO₂ eşd/m³.atıksu oluşumundan kaçınıldığı ortaya konmuştur. Bu çevresel kazanıma bağlı olarak çamur ünitesinin KIP’ne toplam katkısı AAT-2 için yaklaşık 0,02 kg CO₂ eşd/m³.atıksu hesaplanırken; AAT-1 için bu değer 0,85 kg CO₂ eşd/m³.atıksu olarak belirlenmiştir.

Her iki tesisteki biyolojik arıtım konfigürasyonunun KIP’ne katkısı araştırıldığında genel olarak etkili 2 prosesin olduğu dikkat çekmiştir: Elektrik tüketimi ve direkt sera gazı oluşumu. İleri biyolojik arıtım konfigürasyonuna sahip AAT-1’de A2/O prosesinin KIP’ne toplam katkısı 0,634 kg CO₂ eşd/m³.atıksu olarak belirlenmiş olup; bu değer yaklaşık %92’sinin atıksu arıtma tesislerindeki direkt sera gazı oluşumundan kaynaklandığı, %8’inin ise dolaylı bir etki olan elektrik tüketimiyle ilişkili olduğu ortaya konmuştur. Söz konusu durum AAT-2 için değerlendirildiğinde KAS prosesinin KIP’ne toplam katkısı 1,03 kg CO₂ eşd/m³.atıksu olarak hesaplanmış; bu değer yaklaşık %71’inin atıksu arıtma tesislerindeki direkt sera gazı oluşumu ile ilişkili olduğu, %29’unun ise elektrik tüketimi ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Biyolojik arıtım ünitelerinde (A2/O ve KAS) küresel ısınma potansiyeli üzerinde katkısı olan kimyasal içerikler araştırıldığında ise iki atıksu arıtma tesisi için de en yüksek katkıya sahip kimyasal içeriğin atıksu arıtılması sürecinde oluşan direkt sera gazlarından biri olan nitroz oksite bağlı olduğu dikkat çekmiştir (Şekil 4).

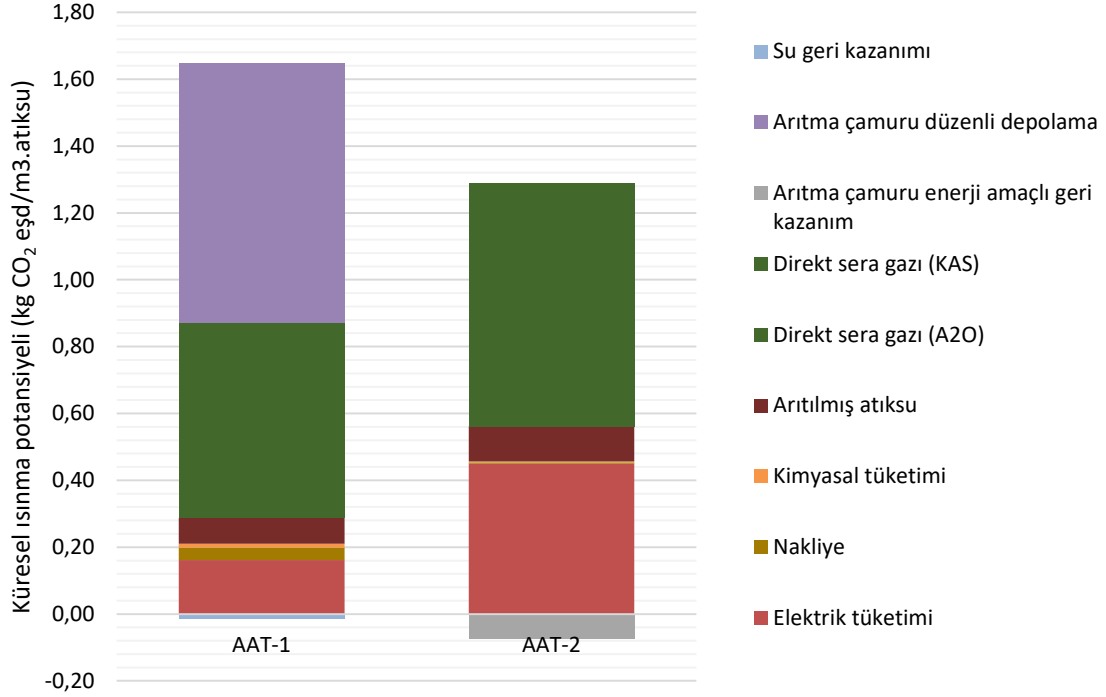


Şekil 4. Her iki tesisin biyolojik arıtım ünitelerinde KIP üzerinde etkili olan kimyasal içerikler.

Literatürde benzer çalışmaların sonuçları araştırıldığında, atıksu arıtma tesislerinde YDD temelli karbon ayak izinin hesaplandığı bir çalışmada direkt N₂O emisyonlarının genellikle diğer sera gazlarına göre daha yüksek olduğu tespit edilmiş ve dolayısıyla atıksu arıtma tesislerinde direkt N₂O emisyonlarının azaltılmasının önemine vurgu yapılmıştır [12]. Lorenzo-Toja ve diğ. (2016) de iki farklı İspanyol atıksu arıtma tesisinin karbon ayak izini hesapladıkları çalışmalarında, direkt sera gazı emisyonlarına katkısı en yüksek kimyasal içeriğin nitrozo oksit olduğunu belirlemişlerdir [19]. Benzer olarak, Gómez-Llanos ve diğ. (2020) nitrozo oksitin karbon ayak izine doğrudan katkıda bulunan temel kimyasal içerik olduğunu bulmuşlardır [11]. Şekil 4 incelendiğinde nitrozo oksit emisyonlarını atıksu arıtma tesislerinin dolaylı etkilerinden biri olan elektriğin üretilmesi aşamasında oluşan CO₂(fosil)'in takip ettiği görülmüştür. AAT-2'de elektrik tüketimi ile ilişkili olan CO₂(fosil) emisyonunun AAT-1'deki CO₂(fosil) emisyonunun yaklaşık 6 katı olduğu görülmektedir. AAT-2'de fonksiyonel birim başına tüketilen elektrik miktarının daha yüksek olması da bu sonucu doğrular niteliktedir (Tablo 2). Friedrich ve diğ. (2009), konvansiyonel aktif çamurun, CO₂ emisyonlarının %90'ının elektrik tüketimiyle ilişkili olduğu üçüncül arıtmayı da içeren bir arıtma sisteminden üç kat daha fazla CO₂'e katkıda bulunduğunu tespit etmiştir [20]. Daelman ve diğ. (2013) de gerçekleştirmiş oldukları çalışmada atıksu arıtma tesislerinde sahaya özgü N₂O emisyonlarının toplam karbon ayak izinin %78'ini, enerji tüketiminin ise toplam karbon ayak izinin %8'ini oluşturduğunu ortaya koymuştur [21]. Chai ve diğ. (2015) de gerçekleştirmiş oldukları çalışmada, elektrik tüketimine bağlı oluşan dolaylı emisyonların karbon ayak izi üzerinde önemli rol oynadığını belirtmiştir [22].

B. PROSESLERE GÖRE KÜRESEL ISINMA POTANSİYELİ SONUÇLARI

Çalışma kapsamında seçilen atıksu arıtma tesislerinde, atıksu arıtılması işlemine bağlı olası çevresel etkiler dokuz farklı prosese dikkate alınarak KIP üzerinde en önemli prosesler belirlenmeye çalışılmıştır (Şekil 5). Bu prosesler: Su geri kazanımı, arıtma çamuru bertarafı (düzenli depolama/enerji amaçlı geri kazanım), direkt sera gazı oluşumu (KAS/A2/O), arıtılmış atıksuyun alıcı ortama deşarjı, kimyasal madde tüketimi, nakliye ve elektrik tüketimidir.



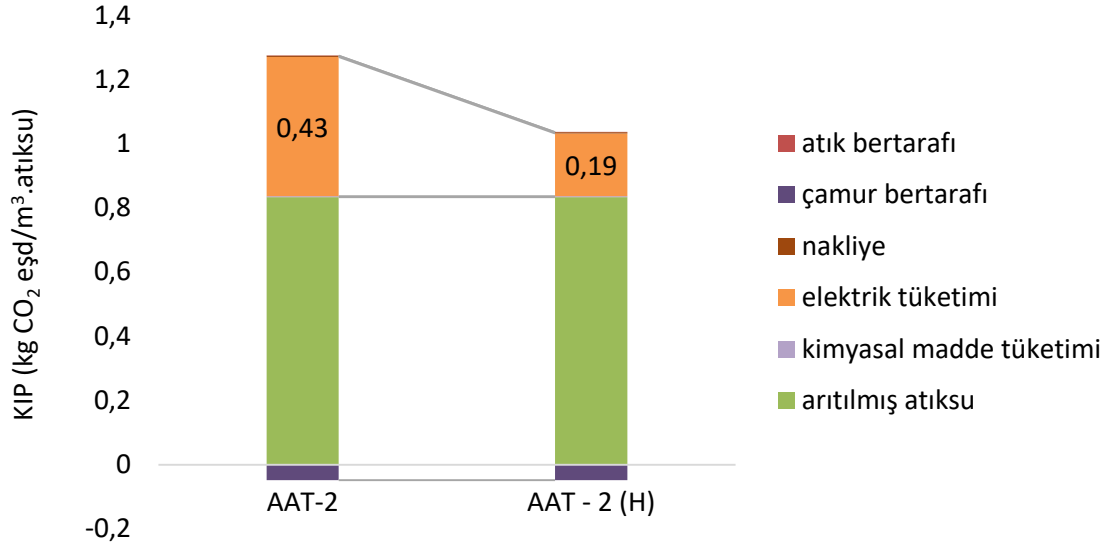
Şekil 5. Proseslere göre küresel ısınma potansiyeli sonuçları.

Yaşam döngüsü etki değerlendirme sonuçları prosesler bazında değerlendirildiğinde, AAT-1 için KIP üzerinde en etkili proseslerin arıtma çamurlarının düzenli depolama (0,78 kg CO₂ eşd/m³.atıksu) ile bertaraf edilmesi ve direkt sera gazı oluşumu (0,58 kg CO₂ eşd/m³.atıksu) olduğu dikkat çekmiştir (Şekil). Bu iki prosesi, elektrik tüketimi (0,16 kg CO₂ eşd/m³.atıksu) takip etmektedir. Şekil 5'deki sonuçlar AAT-2 açısından değerlendirildiğinde söz konusu tesiste direkt sera gazı oluşumu ve elektrik tüketiminin KIP üzerinde önemli katkıları olduğu görülmektedir. Klasik aktif çamur sistemi ile ilişkili direkt sera gazı oluşumunun KIP değeri 0,73 kg CO₂ eşd/m³.atıksu; elektrik tüketiminin KIP değeri ise 0,45 kg CO₂ eşd/m³.atıksu olarak bulunmuştur. Envanter verileri incelendiğinde de AAT-2'deki elektrik tüketiminin (0,68 kWh/m³.atıksu), AAT-1'deki elektrik tüketiminin yaklaşık 3 katı olduğu görülmektedir. AAT-2'de oluşan arıtma çamurları yakın mesafedeki bir çimento fabrikasına gönderilmektedir. Çimento fabrikasında öncelikle kurutma işlemine tabi tutulan çamurlar ardından döner fırında fosil yakıtlara alternatif olarak kullanılmakta olup, böylece enerji amaçlı geri kazanımı sağlanmış olmaktadır. Arıtma çamurlarının enerji amaçlı geri kazanımı, AAT-2'nin KIP etki kategorisine 0,07 kg CO₂ eşd/m³.atıksu çevresel kazanım sağlamaktadır. Arıtılmış atıksu prosesi, çıkış atıksuyunun alıcı ortama verilmesiyle ortama yayılan dolaylı sera gazlarını ifade etmektedir. Arıtılmış atıksuyun KIP değeri AAT-1 için 0,08 kg CO₂ eşd/m³.atıksu, AAT-2 için ise 0,01 kg CO₂ eşd/m³.atıksu olarak hesaplanmıştır.

C. HASSASİYET ANALİZLERİ

Hassasiyet analizleri kapsamında AAT-2'de elektrik tüketiminin fonksiyonel birim bazında %55 azaltılması halinde, bu azaltımın YDD sonuçları üzerindeki olası etkileri ortaya konmuş ve sonuçlar Şekil 6'da AAT-2(H) olarak sunulmuştur. AAT-2'de elektrik tüketiminin %55 azaltılması durumunda elektrik tüketimi prosesinin KIP değerine katkısı üzerinde de %55'lik bir düşüş olduğu belirlenmiştir. Mevcut durumda elektrik tüketimi prosesinin KIP değeri 0,43 kg CO₂ eşd/m³.atıksu olarak belirlenmiş iken, enerji tüketiminin azaltılması ile beraber KIP değeri 0,19 kg CO₂ eşd/m³.atıksu olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık beklenen bir durum olarak tesiste tüketilen elektrik enerjisinin azaltılması durumunda arıtılmış atıksu, kimyasal madde tüketimi, nakliye, çamur bertarafı ve atık bertarafı proseslerinin KIP değerine katkısında bir değişiklik olmadığı dikkat çekmiştir. Enerji tüketimindeki

%55 azaltımın AAT-2'nin toplam KIP değerine etkisi değerlendirildiğinde ise, bu değer mevcut duruma göre %19,5 azaldığı belirlenmiştir (0,988 kg CO₂ eşd/m³.atıksu).



Şekil 6. AAT-2 elektrik tüketimi hassasiyet analizi sonuçları.

IV. SONUC

Bu çalışmada iki farklı özellikteki biyolojik atıksu arıtma tesisinin işletilmesi sürecinde küresel ısınma potansiyeli etkileri karşılaştırmalı yaşam döngüsü değerlendirmesi ile belirlenmiştir. Atıksu arıtma tesislerinin küresel ısınma potansiyeli üzerine etkileri tesis üniteleri bazında karşılaştırıldığında AAT-1 için katkısı en yüksek olan arıtma üniteleri çamur ünitesi ve A2/O ünitesi (anaerobik, anoksik ve aerobik havuzlar) olarak belirlenirken; AAT-2 için havalandırma ünitesinin (aerobik havuzlar) katkısı en yüksek düzeydedir. Her iki tesiste de arıtma seviyelerine bağlı olarak, arıtılmış atıksuyun alıcı su ortamında yarattığı küresel ısınma potansiyeli ise AAT-2'de daha yüksek olarak bulunmuştur. AAT-2'de sadece karbon gideriminin yapıldığı, AAT-1'de ise karbon giderimine ek olarak azot ve fosfor gideriminin de yapıldığı dikkate alındığında bu durumun beklenen bir sonuç olduğu söylenebilir. Atıksuyun arıtma tesislerinde arıtılması sürecinde etkili olan prosesler karşılaştırıldığında ise AAT-1'de arıtma çamurlarının düzenli depolama alanlarında bertaraf edilmesinin KIP'ne katkısı en yüksek proses olduğu, bunu ise havalandırma havuzlarından kaynaklanan direkt sera gazı oluşumunun takip ettiği sonucuna varılmıştır. Söz konusu prosesler AAT-2 için değerlendirildiğinde ise KIP'ne katkısı en yüksek proses havalandırma havuzlarından kaynaklanan direkt sera gazı oluşumu olmakla birlikte, bunu elektrik tüketimi takip etmektedir. İdeal bir atıksu arıtma tesisinde olması gereken ideal spesifik elektrik tüketim değeri dikkate alınarak gerçekleştirilen hassasiyet analizleri sonucunda, AAT-2'de elektrik tüketiminde %55 verimlilik sağlanması halinde bu durumun KIP üzerinde yaklaşık %19,5'lik bir iyileşme sağlayacağı ortaya konmuştur. Mevcut çalışma, farklı konfigürasyonlardaki atıksu arıtma tesislerinin küresel ısınma potansiyeli etkisine katkılarının ortaya konması, söz konusu tesislerde sera gazı azaltımı konusunda yaşam döngüsü yaklaşımı ile alınabilecek iyileştirme önlemlerinin tespit edilmesi ve uygulanması açısından önem taşımaktadır. Dolayısıyla, bu çalışmada elde edilen sonuçların atıksu arıtma tesislerinin işletilmesi konusunda çalışan yöneticilere ve bilim insanlarına katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje no: FKA-2020-2087).

V. KAYNAKLAR

- [1] Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı, Strateji ve Bütçe Başkanlığı. (2023, 27 Ocak). *Sürdürülebilir Kalkınma Hakkında Temel Bilgiler* [Çevrimiçi]. Erişim: <http://www.surdurulebilirkalkinma.gov.tr/temel-tanimlar>.
- [2] Global Compact Network Türkiye. (2023, 26 Ocak). *Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları* [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.globalcompactturkiye.org/surdurulebilir-kalkinma-amaclari>.
- [3] T. van den Brand, and A.L. de Jong, “The environmental impacts of resource recovery,” in *Resource Recovery from Water: Principles and Application*. 1st ed., London, U.K: IWA Publishing, 2022, pp. 415-430.
- [4] G. Finnveden, M.Z. Hauschild, T. Ekvall, J. Guinée, R. Heijungs, S. Hellweg, & S. Suh, “Recent developments in life cycle assessment,” *Journal of Environmental Management*, vol. 91(1), pp. 1-21, 2009.
- [5] R.J. Plevin, R. J., M.A. Delucchi, & F. Creutzig, “Using attributional life cycle assessment to estimate climate-change mitigation benefits misleads policy makers,” *Journal of Industrial Ecology*, vol. 18(1), pp. 73-83, 2014.
- [6] J.C. Pasqualino, M. Meneses, M. Abella, & F. Castells, “LCA as a decision support tool for the environmental improvement of the operation of a municipal wastewater treatment plant,” *Environmental Science & Technology*, vol. 43(9), pp. 3300-3307, 2009.
- [7] E. Risch, C. Boutin, & P. Roux, “Applying life cycle assessment to assess the environmental performance of decentralised versus centralised wastewater systems,” *Water Research*, vol. 196, 116991, 2021.
- [8] S.M. Rahman, M.J. Eckelman, A. Onnis-Hayden, & A.Z. Gu, “Life-cycle assessment of advanced nutrient removal technologies for wastewater treatment,” *Environmental Science & Technology*, vol. 50(6), pp. 3020-3030, 2016.
- [9] G.R.A. Gongora, R.H. Lu, & A. El Hanandeh, “Comparative life cycle assessment of aerobic treatment units and constructed wetlands as onsite wastewater treatment systems in Australia,” *Water Science and Technology*, vol. 84(6), pp. 1527-1540, 2021.
- [10] P.K. Cornejo, “Environmental sustainability of wastewater treatment plants integrated with resource recovery: the impact of context and scale”, Ph.D. dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of South Florida, USA, 2015.
- [11] E. Gómez-Llanos, A. Matías-Sánchez, & P. Durán-Barroso, “Wastewater treatment plant assessment by quantifying the carbon and water footprint,” *Water*, vol. 12(11), pp. 3204, 2020.
- [12] A. Delre, M. ten Hoeve, & C. Scheutz, “Site-specific carbon footprints of Scandinavian wastewater treatment plants, using the life cycle assessment approach,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 211, pp. 1001-1014, 2019.
- [13] O.O. Ortiz-Rodriguez, G. Sonnemann, & R.A. Villamizar-G, “The carbon footprint of water treatment as well as sewer and sanitation utilities of Pamplona in Colombia”, *Environment, Development and Sustainability*, vol. 24(3), pp 3982-3999, 2022.
- [14] *Environmental Management. Life Cycle Assessment. Principles and Framework*. ISO 14040 Standard, 2006.

- [15] *Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines*. ISO 14044 Standard, 2006.
- [16] L. Corominas, D.M. Byrne, J.S. Guest, A. Hospido, P. Roux, A. Shaw, & M.D. Short, “The application of life cycle assessment (LCA) to wastewater treatment: A best practice guide and critical review,” *Water Research*, vol. 184, pp. 116058, 2020.
- [17] E. Calvo Buendia, K. Tanabe, A. Kranjc, A. J. Baasansuren, M. Fukuda, S. Ngarize, & S. Federici, “Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”, IPCC, Geneva, Switzerland, 2019.
- [18] MNE Proje. (2023, 6 Ocak). *Atıksu Arıtma Tesislerinin Enerji Verimli İşletilmesi* [Çevrimiçi]. Erişim: http://www.mneproje.com/public/website/news/aritma-tesislerinin-enerji-verimli-isletilmesi_20200607101337.pdf.
- [19] Y. Lorenzo-Toja, C. Alfonsín, M.J. Amores, X. Aldea, D. Marin, M.T. Moreira, & G. Feijoo, “Beyond the conventional life cycle inventory in wastewater treatment plants,” *Science of the Total Environment*, vol. 553, pp. 71-82, 2016.
- [20] E. Friedrich, S. Pillay, & C.A. Buckley, “Carbon footprint analysis for increasing water supply and sanitation in South Africa: a case study,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 17(1), pp. 1-12, 2009.
- [21] M.R.J. Daelman, E.M. van Voorthuizen, L.G.J.M. Van Dongen, E.I.P. Volcke, & M.C.M. Van Loosdrecht, “Methane and nitrous oxide emissions from municipal wastewater treatment—results from a long-term study,” *Water Science and Technology*, vol. 67(10), pp. 2350-2355, 2013.
- [22] C. Chai, D. Zhang, Y. Yu, Y. Feng, & M.S. Wong, “Carbon footprint analyses of mainstream wastewater treatment technologies under different sludge treatment scenarios in China,” *Water*, vol. 7(3), pp. 918-938, 2015.