

İstanbul'daki Biyolojik Atıksu Arıtma Tesislerinin Sera Gazı Emisyonunun Modelleme Metodu ile Tahmini

Hazal GÜLHAN*, Hale ÖZGÜN, M. Evren ERŞAHİN, R. Kaan DERELİ, İzzet ÖZTÜRK
İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul
*gulhan@itu.edu.tr

(Geliş/Received: 29.06.2017; Kabul/Accepted: 30.01.2018)

Özet

Atıksu arıtma tesislerinde oluşan sera gazı emisyonları son yıllarda küresel ölçekte önem kazanan bir konu haline gelmiştir. Özellikle nitröz oksit (N_2O), atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan en önemli sera gazlarından biridir. Sera gazı emisyonu miktarı, atıksu arıtma tesisinde uygulanan prosese ve işletme koşullarına bağlı olarak ihmal edilebilir seviyelerden önemli miktarlara kadar çıkabilmektedir. Bu çalışmanın amacı, İstanbul'da bulunan dokuz adet biyolojik atıksu arıtma tesisinin incelenmesi suretiyle, bu tesislerde oluşan sera gazı miktarlarının tahmin edilmesi ve tesislerinin sera gazı emisyonu miktarları bakımından karşılaştırılmasıdır. Böylece, atıksu karakterizasyonu ve proses konfigürasyonu gibi faktörlerin sera gazı emisyonu üzerine etkisi araştırılmıştır. Atıksu arıtma tesislerinin sera gazı emisyonları model bazlı hesaplanmış olup, bu amaçla General Purpose Simulator (GPS-X) sürüm 6.5 simülasyon programı kullanılmıştır. İstanbul'da bulunan ve toplam eşdeğer nüfusu 6.395.341 kişi olan dokuz biyolojik atıksu arıtma tesisinin 2020 yılı için net metan gazı (CH_4) emisyonu 45.497 tCO₂eşd/yıl ve net N_2O gazı emisyonu 697.942 tCO₂eşd/yıl olarak tahmin edilmiştir. Proses konfigürasyonunun, arıtma prosesinin gelişmişlik düzeyinin, atıksu KOİ/TKN oranının ve azot giderim veriminin atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan sera gazı oluşumunu etkilediği belirlenmiştir. Özellikle azot gideren proseslerin N_2O gazı emisyonu oluşumuna olan etkisi ve bu prosesleri etkileyen faktörler konusunda araştırma yapılması ihtiyacı mevcuttur. Gelecekte yapılacak bu araştırmalar ışığında N_2O gazı emisyonu oluşumunu azaltıcı tesis içi çözümlerin ve işletme stratejilerinin belirlenmesi mümkün olacaktır.

Anahtar kelimeler: Atıksu arıtma tesisi, biyolojik arıtma, nitröz oksit, sera gazı emisyonu

Estimation of Greenhouse Gas Emissions of Biological Wastewater Treatment Plants in Istanbul by Modelling

Abstract

Greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants have become a globally important issue. Especially nitrous oxide (N_2O) is one of the most important greenhouse gases emitted from wastewater treatment plants. Depending on the process configuration and operating conditions, the greenhouse gas emissions can vary from negligible to considerable levels. The aim of this study is to estimate and comparatively evaluate the greenhouse gas emissions from nine full scale municipal wastewater treatment plants located in Istanbul. The effects of wastewater characterization and process configuration on the emissions were also studied. The emissions of the plants were calculated by mathematical modelling and General Purpose Simulator (GPS-X) version 6.5 was used for modelling purposes. Net methane (CH_4) and N_2O emissions of nine wastewater treatment plants with a total population equivalent of 6.395.341 were estimated as 45.497 tCO₂eqv/year and 697.942 tCO₂eqv/year in 2020, respectively. It was determined that treatment level, COD/TKN ratio and nitrogen removal efficiency have a significant effect on emissions of the investigated plants. Especially N_2O emissions from treatment plants for nitrogen removal should be investigated in more detail. Thus, efficient operation conditions and in-plant measures can be taken in order to reduce the N_2O emissions of these plants.

Keywords: Wastewater treatment plant, biological treatment, nitrous oxide, greenhouse gas emission

1. Giriş

Atıksuların arıtılması sırasında metan (CH_4), karbondioksit (CO_2) ve nitröz oksit (N_2O) gibi sera gazları oluşmaktadır. CH_4 genellikle

kanalizasyon hatlarında ve çamur arıtımı esnasında ortaya çıkmaktadır. CO_2 arıtma tesislerinde biyolojik faaliyetler sonucu oluşmakta, ayrıca CO_2 emisyonu tesisin enerji kullanımına bağlı olarak değişebilmektedir. N_2O

ise genellikle biyolojik azot giderimi sırasında ortaya çıkmaktadır [1]. N₂O en önemli sera gazlarında biri olup, küresel ısınma çerçevesinde CO₂'den 300 kat daha kuvvetli bir etkiye sahiptir [2]. Bu sebeple, düşük miktarda da olsa, herhangi bir kaynaktan meydana gelen N₂O emisyonunun etkileri önemli seviyede olabilmektedir [3]. Atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan N₂O emisyonları ile ilgili ilk veriler Czepiel ve diğ. [4] tarafından yayınlanmıştır. Söz konusu çalışmayla birlikte atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan sera gazı emisyonları ile ilgili farkındalık oluşmuş ve bu konuya olan ilgi günümüze kadar artarak devam etmiştir. N₂O emisyonu oluşturan tüm insan kaynaklı faaliyetler dikkate alındığında, atıksu arıtma tesislerinin katkısı %3 civarındadır ve arıtma tesisleri N₂O emisyon oluşumuna en fazla katkı sağlayan altıncı sektör durumundadır. 2005 yılı baz alındığında, 2020 yılına kadar küresel ölçekte atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan N₂O emisyonunda %13'lük artış olması beklenmektedir [1]. Dolayısıyla, atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılması ve emisyon kontrolünü etkileyen faktörlerin belirlenmesi konusunda günümüzde önemli bir ihtiyaç bulunmaktadır [3].

Atıksuların arıtılması ve deşarjı sırasında oluşan sera gazı emisyonları birçok ülkede izlenmekte ve rapor edilmektedir. Avrupa Birliği ülkeleri içerisinde 2016 yılında atıksu arıtımı ve deşarjı kaynaklı kişi başı en yüksek sera gazı emisyonu 0,251 tCO₂eşd/kişi olup, bu değer Portekiz'de elde edilmiştir. Bu değer %90,4'ü CH₄ kaynaklı iken, %9,6'sı N₂O kaynaklıdır. Portekiz'i sırasıyla 0,139 tCO₂eşd/kişi, 0,128 tCO₂eşd/kişi ve 0,119 tCO₂eşd/kişi sera gazı emisyonu ile Bulgaristan, Letonya ve Yunanistan izlemektedir. Üç ülke için belirlenmiş olan sera gazı emisyonlarında CH₄'ün katkısı %74'ün üzerindedir. Kişi başı en düşük sera gazı emisyonu ise sırasıyla 0,014 tCO₂eşd/kişi, 0,016 tCO₂eşd/kişi ve 0,019 tCO₂eşd/kişi değeriyle Almanya, Hollanda ve Malta'ya aittir [5]. Almanya'da sera gazı emisyonunun %57,1'i CH₄ kaynaklı, %42,9'u ise N₂O kaynaklıdır. Hollanda sera gazı emisyonu oluşumunda N₂O'nun katkısı %25 iken, Malta'da %68,4'tür [5].

2016 yılı verilerine göre nüfusu 14.804.116 kişiye ulaşan İstanbul ülkemizin en kalabalık şehri olup, dünyada da önemli metropol

şehirlerden biridir [6]. Muhtelif kapasitelerde ve arıtma kademesinde toplam 80 adet atıksu arıtma tesisi bulunan İstanbul'da 2016 yılında 1,21 milyon m³ atıksu, arıtma işlemlerine tabi tutularak deşarj edilmiştir. Deşarj edilen suyun %64,4'ü ön arıtmaya (ızgara + kum tutucu + derin deniz deşarjı), %34,4'ü ileri biyolojik arıtmaya (karbon, azot ve fosfor giderimi) ve %1,2'si konvansiyonel biyolojik arıtmaya (kırsal yerleşimlerde sadece karbon giderimi yapılan atıksu arıtma tesisleri) tabi tutulmuştur [7].

Bu çalışmanın amacı; İstanbul'da eşdeğer nüfusu (EN) 100.000 ile 2.000.000 kişi arasında değişen dokuz adet biyolojik atıksu arıtma tesisinin sera gazı emisyon miktarını matematiksel modelleme ile hesaplamaktır. Bu kapsamda; beş farklı kategoriye ayrılan atıksu arıtma tesislerinin sera gazı emisyonları; konfigürasyon, tesis büyüklüğü ve atıksu karakterizasyonu açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Farklı atıksu arıtma tesislerinde oluşan sera gazı emisyon miktarlarının ve emisyonları etkileyen temel faktörlerin tahmin edilmesi, tesislerin mevcut durumlarının analiz edebilmelerine ve emisyon optimizasyonu sağlayarak iyileştirilmelerine imkan sağlayacaktır.

2. Materyal ve Metot

2.1. İncelenen tesislerin tanıtımı

Çalışma kapsamında beş kategoride dokuz farklı atıksu arıtma tesisi incelenmiştir. Her bir kategori ile ilgili genel bilgi Tablo 1'de yer almaktadır.

Tablo 1. Farklı kategoriler hakkında genel bilgi

Kategoriler	Arıtma Prosesi Tipi
A	Konvansiyonel arıtma (ön çökeltim ve anaerobik çamur çürütme mevcut)
B	A ² O (ön çökeltim yok, anaerobik çamur çürütme mevcut)
C	A ² O (ön çökeltim ve anaerobik çamur çürütme mevcut)
D	5 kademeli Bardenpho (ön çökeltim ve anaerobik çamur çürütme mevcut)
E	A ² O (ön çökeltim yok, çamur susuzlaştırma mevcut)

(A²O: Anaerobik-Anoksik-Oksik proses)

Çalışmada A, B, C ve D kategorilerinde birer arıtma tesisi yer almakta olup, bu tesisler sırasıyla

A, B, C ve D tesisi olarak adlandırılacaktır. E Kategorisi'nde yer alan beş tesis ise sırasıyla E1, E2, E3, E4 ve E5 olarak adlandırılacaktır. Tablo 2 ve Tablo 3'te incelenen 9 biyolojik atıksu arıtma

tesisinin atıksu karakterizasyonları ve işletme koşulları özetlenmekte olup, her bir kategoriye ait akım şemaları Şekil 1'de yer almaktadır

Tablo 2. İncelenen biyolojik atıksu arıtma tesislerinin atıksu karakterizasyonları

Parametre	Birim	A	B	C	D	E1	E2	E3	E4	E5
AKM	mg/L	610	350	610	320	261	351	315	293	351
KOİ	mg KOİ/L	840	600	840	600	600	600	600	600	600
BOİ ₅	mg O ₂ /L	380	266	376	309	283	309	324	252	309
TKN	mg N/L	65	54	65	60	60	60	70	50	60
NH ₄ -N	mg N/L	39	32	39	35	36	36	42	30	36
KOİ/TKN	-	12,9	11,1	12,9	10,0	10,0	10,0	8,6	12,0	10,0
TP	mg P/L	15	10	15	8	10	10	8	10	10
PO ₄ -P	mg P/L	10	8	10	6,8	8	8	6,8	8	8

Tablo 3. İncelenen biyolojik atıksu arıtma tesislerinin işletme koşulları

Parametre	Birim	A	B	C	D	E1	E2	E3	E4	E5
Sıcaklık	°C	15	15	15	15	15	15	15	15	15
pH	-	7	7	7	7	7	7	7	7	7
2020 EN	kişi	700.500	1.717.787	467.000	1.907.713	326.766	143.724	805.869	209.334	116.648
Debi	m ³ /gün	150.000	367.606	100.000	408.251	69.928	30.776	172.456	44.825	24.978
RC	-	-	4,10	4,50	4,29*	2,00**	4,80	4,80	4,50	4,50
R	-	-	0,75	1,00	0,83	0,75	0,75	0,80	0,75	0,75
V _D /V	-	-	0,4	0,4	0,4*	0,3**	0,3	0,3	0,4	0,4
Çamur yaşı	gün	8	9	8	10	20	10	8	11	20

*Aerobik-1 Anoksik-1 tankları için (Şekil 1), ** Aerobik-2 Anoksik-2 tankları için (Şekil 1)

RC: İçsel geri devir, R: Geri devir, V_D/V: Biyolojik havuzlarda anoksik hacmin toplam hacme oranı

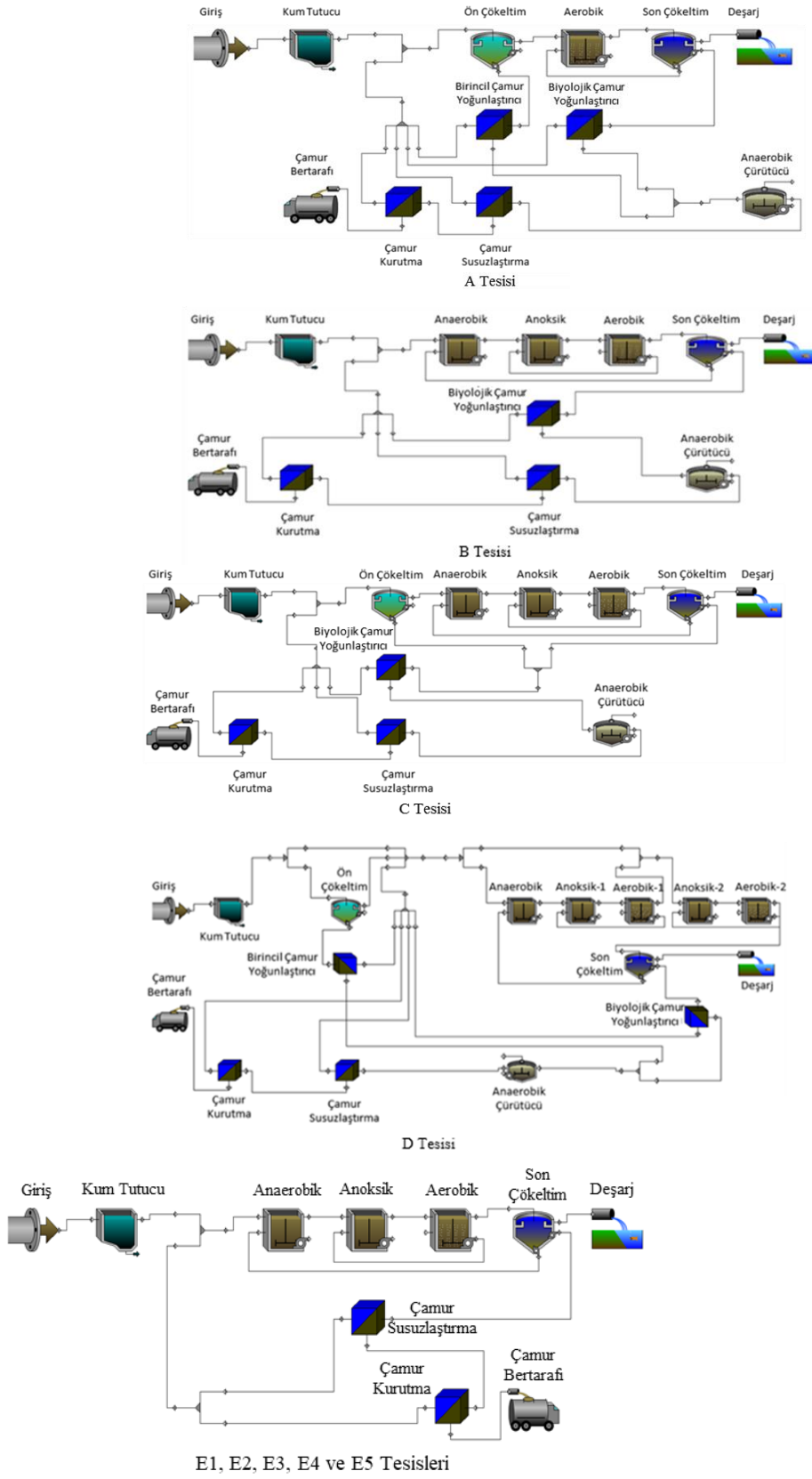
2.2. Simülasyon platformu ve matematiksel model

İncelenen atıksu arıtma tesislerinin matematiksel olarak modellenebilmesi için General Purpose Simulator (GPS-X) sürüm 6.5 kullanılmıştır [8]. Bu yazılım atıksu arıtma tesislerinde kullanılan temel fiziksel, kimyasal ve biyolojik prosesleri içeren görsel bir altyapı sunmakta olup, içerisinde bu proseslerin matematiksel olarak modellenebilmesine imkan veren model kütüphanelerini barındırmaktadır. Bu kütüphaneler arasında arıtma tesislerinin matematiksel modellenmesinde sıklıkla kullanılan standart aktif çamur modelleri (ASM1, ASM2d, ASM3) ve anaerobik çürütme modeli (ADM1) de bulunmaktadır [9, 10]. Bu çalışmada incelenen tesislerin proses akım şemaları, reaktör ve proses özellikleri (hacim, alan, debi, işletme parametreleri) yazılıma girildikten sonra, sera gazı emisyonlarının hesaplanabileceği bir matematiksel model olan Mantis3 modeli ile kararlı durum simülasyonları yapılmış ve emisyonlar hesaplanmıştır.

Mantis3 modeliyle, atıksu arıtma tesislerindeki biyolojik proseslerden salınan

doğrudan sera gazı emisyonları (CO₂, CH₄ ve N₂O) (Kapsam 1), tesislerde pompalama, havalandırma ve diğer amaçlar ile kullanılan elektrik enerjisi nedeniyle gerçekleşen emisyonlar (Kapsam 2) ve tesislerde kullanılan kimyasallar (polimer, kostik, koagülant vb.) ve materyaller (membranlar, yüzey artırıcı plastik malzemeler) kaynaklı emisyonlar (Kapsam 3) hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada, tesislerdeki biyolojik proses kaynaklı Kapsam 1 emisyonları 2020 yılı debi ve kirlilik yüklerine göre incelenmiş olup, tüm simülasyonlarda atıksu sıcaklığı 15°C ve aerobik reaktörlerde çözünmüş oksijen konsantrasyonu 2 mg/L alınmıştır. Tesislere ait 2020 yılı eşdeğer nüfus değerleri İSKİ'nin Arıtma Çamurları Yönetimi Master Planı'ndan alınmıştır ve tesislerin 2020 yılı debi ve kirlilik yükleri eşdeğer nüfusa göre hesaplanmıştır [11]. Anaerobik çürütücü bulunan atıksu arıtma tesislerinde, çürütücüde oluşan metan gazından enerji üretimi (elektrik ve ısı) sonucu geri kazanılan enerjinin karbon eşdeğeri toplam emisyonlardan düşülerek net emisyon hesaplanmıştır.

İstanbul'daki Biyolojik Atıksu Arıtma Tesislerinin Sera Gazı Emisyonunun Modelleme Metodu ile Tahmini



E1, E2, E3, E4 ve E5 Tesisleri

Şekil 1. Beş farklı kategoriye ayrılan atıksu arıtma tesislerinin akım şemaları

3. Sonuçlar

3.1. Toplam ve birim sera gazı emisyonu

GPS-X yazılımı ile 2020 yılı için tahmin edilen atıksu arıtma tesislerine ait emisyon miktarları Tablo 4'te verilmektedir. Atıksuyun biyolojik arıtımından kaynaklı CO₂ emisyonu, Sera Gazı Protokolü'ne göre biyojenik nitelikli olduğundan, Kapsam 1 raporlarına dahil edilmemekte ve net emisyon miktarından düşülmektedir [12]. Yapılan matematiksel modelleme çalışmasına göre 2020 yılında incelenen 9 tesisin toplam net sera gazı emisyonu 697.182 tCO₂eşd/yıl olarak tahmin edilmiştir.

Yapılan çalışmada, atıksu kanalizasyon sisteminde oluşan ve tesise ulaşan CH₄ gazının, tesislerdeki havalandırılmalı kum tutucu ve ön çökeltim havuzlarından atmosfere salınımını

ihmal edilmiştir. Bu nedenle 2020 yılında çamurdan enerji elde edilmeyen E kategorisindeki tesislerde atıksu arıtımına bağlı CH₄ emisyonu sıfır olarak alınmış ve net emisyon miktarı atıksuyun biyolojik arıtımından kaynaklı N₂O emisyonuna eşit olmuştur. Çamurun anaerobik çürütülmesiyle enerji elde edilen A, B, C ve D tesislerinde anaerobik çürütme sonucu üretilen CH₄ gazı tesis içinde enerji üretiminde kullanıldığından, geri kazanılan CH₄ miktarı net emisyon miktarından düşülmekte (üretilen miktarın ~%90'ı), üretilen CH₄ miktarının ~%10'luk bir kısmı ise kaçak emisyonla eklenmektedir. Anaerobik çürütücüde, CH₄ ve CO₂ emisyonu kazanımı haricinde anaerobik ortamda N₂O'nun N₂'ye indirgenmesi ile bir miktar N₂O emisyonu azaltımı da sağlanmakta olup, bu değer Tablo 4'te N₂O Ofset satırında verilmiştir.

Tablo 4. İncelenen biyolojik atıksu arıtma tesislerinin 2020 yılı için tahmin edilen emisyon miktarları

Parametre	Birim	A	B	C	D	E1	E2	E3	E4	E5	Toplam
CO ₂ Emisyonu	tCO ₂ eşd/yıl	45.074	102.234	31.146	119.046	22.062	8.625	47.136	10.837	7.552	393.711
CH ₄ Emisyonu	tCO ₂ eşd/yıl	127.258	74.483	71.421	145.082	0	0	0	0	0	418.244
N ₂ O Emisyonu	tCO ₂ eşd/yıl	97.468	174.432	46.299	191.507	38.513	17.750	98.860	20.068	13.189	698.085
CO ₂ Ofset	tCO ₂ eşd/yıl	60.180	108.934	39.184	135.458	22.062	8.625	47.136	10.837	7.552	439.968
CH ₄ Ofset	tCO ₂ eşd/yıl	113.661	66.556	63.884	128.645	0	0	0	0	0	372.746
N ₂ O Ofset	tCO ₂ eşd/yıl	44	26	25	49	0	0	0	0	0	143
Net CO ₂ Emisyonu	tCO ₂ eşd/yıl	-15.106*	-6.700*	-8.038*	-16.413*	0	0	0	0	0	-46.257*
Net CH ₄ Emisyonu	tCO ₂ eşd/yıl	13.597	7.926	7.537	16.438	0	0	0	0	0	45.497
Net N ₂ O Emisyonu	tCO ₂ eşd/yıl	97.424	174.407	46.275	191.457	38.513	17.750	98.860	20.068	13.189	697.942
Net	tCO ₂ eşd/yıl	95.915	175.632	45.774	191.482	38.513	17.750	98.859	20.068	13.189	697.182

* Çamurdan enerji elde eden tesislerde, fosil yakıt kullanımı azaltımına bağlı CO₂ emisyonu tasarrufu negatif olarak gösterilmiştir.

Şekil 2'de GPS-X simülasyon sonuçlarının tesis bazında karşılaştırılması görselleştirilmiştir. Şekil 2'de verilen birim sera gazı emisyonları incelendiğinde, çamurdan enerji elde edilen A, B, C ve D tesislerindeki CO₂ birim emisyon değerinin 0'ın altında olduğu görülmektedir. Bunun nedeni söz konusu 4 tesiste, çamurdan enerji üretimiyle tasarruf edilen tesis içi fosil yakıt kullanımı miktarına bağlı CO₂ gazı emisyonunun net emisyon miktarından düşülmesidir. Çamurdan enerji elde edilen tesislerin (A, B, C ve D) 2020 yılı için toplam birim sera gazı emisyonları karşılaştırıldığında (Şekil 2), A tesisinin en fazla emisyonla (137 kgCO₂eşd/yıl/kişi), C'nin ise en düşük emisyonla (98 kgCO₂eşd/yıl/kişi) sahip

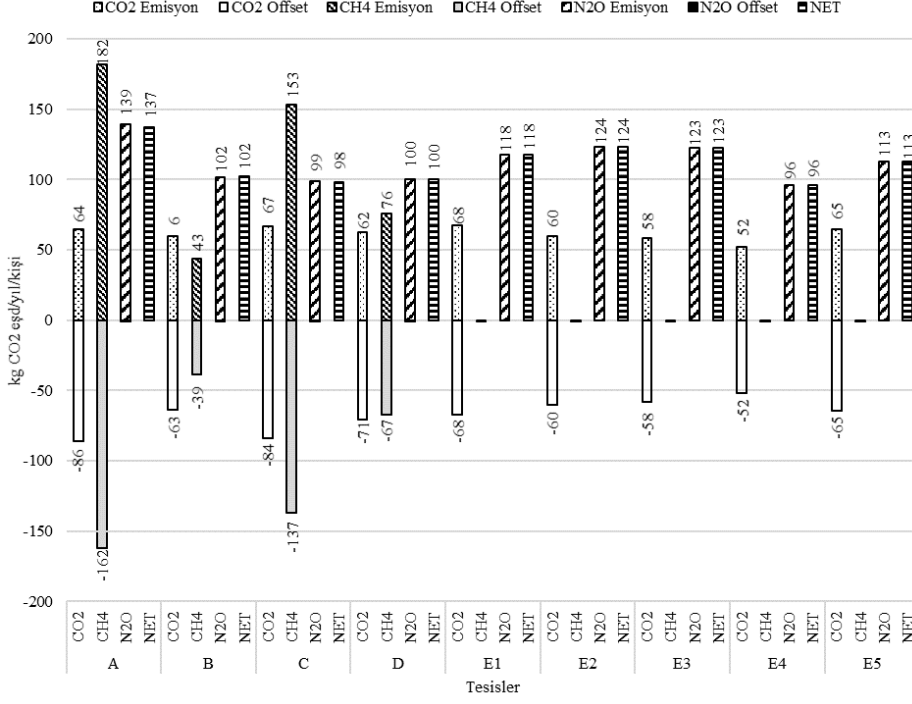
olduğu görülmektedir. B ve D tesislerinin toplam birim sera gazı emisyonları ise sırasıyla 102 ve 100 kgCO₂eşd/yıl/kişi'dir.

Çamurdan enerji elde edilmeyen E1, E2, E3, E4 ve E5 tesisleri sera gazı emisyonu yönünden karşılaştırıldığında, en düşük sera gazı emisyonunun E4 tesisine (96 kgCO₂eşd/yıl/kişi), en yüksek emisyonun ise E2 (124 kgCO₂eşd/yıl/kişi) tesisine ait olduğu görülmektedir.

Şekil 2'de kişi başı sera gazı emisyonları gazlara göre incelendiğinde, çamurdan enerji elde eden A, B, C ve D tesislerinde net CH₄ emisyonları sırasıyla 20, 4, 16 ve 9 kgCO₂eşd/yıl/kişi'dir. Biyolojik besi maddesi

giderimi yapılmayan A tesisinde N₂O birim emisyonu 139 kgCO₂eşd/yıl/kişi'dir. Biyolojik besi giderimi yapılan sekiz tesis arasından E4 ve

C tesisleri en düşük birim N₂O emisyonuna sahiptir (sırasıyla 96 ve 99 kgCO₂eşd/yıl/kişi).



Şekil 2. GPS-X simülasyon sonuçlarının tesis bazında karşılaştırılması

Tablo 5'te, tesislerin hesaplanan CH₄ gazı emisyon miktarının KOİ giriş yükü ve giderilen KOİ yüküne oranı ile N₂O gazı emisyon miktarının azot giriş yükü ve giderilen azot yüküne oranı verilmiştir. Bu yaklaşıma göre, çamurdan enerji elde edilen A, B, C ve D tesislerinde en fazla birim CH₄ emisyonu A tesisinde elde edilmiştir (10,6 g CH₄/kg KOİ_{giriş} ve 11,5 g CH₄/kg KOİ_{giderilen}). Bu tesisler arasında en düşük birim CH₄ emisyonu ise B tesisine aittir (3,5 g CH₄/kg KOİ_{giriş} ve 3,8 g CH₄/kg KOİ_{giderilen}).

Hollanda'da anaerobik çürütücü içeren evsel atıksu arıtma tesislerinin ortalama CH₄ emisyon faktörü olan 8,5 g CH₄/kg KOİ_{giriş} değeri [13], bu çalışmada hesaplanan CH₄ emisyon değerleri ile aynı mertebededir. İspanya'da anaerobik çürütücü içeren iki farklı atıksu arıtma tesisinde sahada yapılan CH₄ emisyon ölçümlerinde ise 10,5 ve 11,5 g CH₄/kg KOİ_{giriş} emisyon faktörleri elde edilmiştir [14]. Bu değerler de çalışmada elde edilen sonuçlar ile uyumludur.

Tablo 5. İncelenen biyolojik atıksu arıtma tesislerinin tahmin edilen birim emisyon miktarları

Parametre	Birim	A	B	C	D	E1	E2	E3	E4	E5
Giriş KOİ yükü başına CH ₄ emisyonu	g CH ₄ /kg KOİ _{giriş}	10,6	3,5	8,8	6,6	-	-	-	-	-
Giderilen KOİ başına CH ₄ emisyonu	g CH ₄ /kg KOİ _{giderilen}	11,5	3,8	9,4	7,1	-	-	-	-	-
Giriş N yükü başına N ₂ O emisyonu	N ₂ O/N _{giriş}	%9	%8	%7	%7	%8	%9	%8	%8	%8
Giderilen N başına N ₂ O emisyonu	N ₂ O/N _{giderilen}	%28	%10	%8	%8	%10	%10	%9	%10	%10

Tablo 5'te, incelenen biyolojik atıksu arıtma tesislerinde giriş azot yüküne göre en yüksek N₂O

emisyonu A tesisine (%9,2 N₂O/N_{giriş}), en düşük N₂O emisyonu ise C tesisine aittir (%6,5

N_2O/N_{giris}). Tesisler giderilen azot başına N_2O emisyonu oranı yönünden karşılaştırıldığında, atıksuyun konvansiyonel olarak arıtıldığı A tesisinde, azotun biyolojik olarak giderildiği diğer tesislere göre oldukça yüksek N_2O emisyonu tahmin edilmiştir (%27,8 $N_2O/N_{giderilen}$). Biyolojik azot giderimi yapılan diğer 8 tesiste ise en düşük birim N_2O emisyonunun C tesisinden kaynaklandığı görülmektedir (%7,9 $N_2O/N_{giderilen}$). Besi maddesi giderimi yapılan atıksu arıtma tesislerine ait N_2O emisyon faktörleri oldukça geniş bir aralığa sahip olabilmektedir. ABD’de besi maddesi giderimi yapan 12 farklı atıksu arıtma tesisinin sahada çevrimiçi ölçümle belirlenen doğrudan N_2O emisyonu %0,003-2,59 N_2O/N_{giris} aralığında değişirken, Avustralya’da besi maddesi giderimi yapan 7 adet atıksu arıtma tesisinin doğrudan emisyon faktörleri %0,6-25 N_2O/N_{giris} aralığındadır [1]. Bu çalışmada elde edilen N_2O emisyon faktörleri literatürde rapor edilen değerler ile benzer mertebededir.

3.2 Sera gazı emisyonunu etkileyen faktörler

Hesaplanan sera gazı emisyonu sonuçlarının değerlendirilmesinde, CH_4 ve N_2O emisyonları için farklı yaklaşımlar gerekmektedir. CH_4 gazı emisyonu miktarı çamur yönetimi (ön çökeltim yapılması, çamurun anaerobik şartlarda çürütülmesi veya çamurun yalnızca kurutulup bertaraf edilmesi) ile ilgiliyken, N_2O gazı emisyonu miktarı ise atıksu karakterizasyonu ve arıtma teknolojisine bağlı azot giderimi ile ilgilidir. İncelenen tesisler karşılaştırılırken, her bir tesise ait atıksu karakterizasyonu (Tablo 2), tesislerin işletme koşulları (Tablo 3) ve tesis performansını gösteren çıkış suyu karakterizasyonları (Tablo 6) göz önünde bulundurulmuştur.

Çamurdan enerji elde edilen A, B, C ve D tesislerinin birim CH_4 emisyonları incelendiğinde, eşdeğer nüfusu en yüksek olan B

ve D tesislerinin kişi başı birim emisyon miktarlarının en düşük olduğu görülmektedir (5 ve 9 $kgCO_2eşd/yıl/kişi$). Diğer taraftan tesislerde giderilen KOİ başına CH_4 emisyon miktarı incelendiğinde (Tablo 5), anaerobik çürütme verimi belirleyici faktör olmaktadır. Anaerobik çürütücü ile çamurdan enerji elde edilen tesislerde, ön çökeltim ile çöken birincil çamurun enerji içeriği, biyolojik çamurun enerji içeriğinden daha yüksek olduğundan, çürütücüde CH_4 üretimi görece daha fazladır [15]. Çamurun anaerobik çürütüldüğü A, B, C ve D tesislerinden yalnızca B tesisinde ön çökeltim bulunmamaktadır. Bu nedenle en düşük CH_4 gazı üretimi ve dolayısıyla emisyonu B tesisinden kaynaklanmaktadır. A, C ve D tesislerinin birim CH_4 emisyonundaki farklılıkların nedeni, tesislerin ön çökeltim ve anaerobik çürütücü verimlerinin birbirlerinden farklı olması ile açıklanabilmektedir. Ön çökeltim ile anaerobik çürütücü verimi yüksek olan tesislerde üretilen biyogaz ve dolayısıyla kaçak olarak salınan CH_4 gazı emisyonu miktarının daha fazla olması beklenir.

Tablo 6’da çalışma kapsamında incelenen tesislerin simülasyon sonuçlarına göre çıkış suyu karakterizasyonu ve giderim verimleri verilmiştir. Çalışma kapsamında incelenen tesisler N_2O emisyonu yönünden karşılaştırıldığında, biyolojik besi maddesi gideriminin yapılmadığı A tesisinde (azot giderim verimi %33), giderilen azot başına en fazla birim N_2O gazı emisyonu oluşmaktadır (%28 $N_2O/N_{giderilen}$). KOİ/TKN oranları aynı (10), çamur yaşları aynı (10 gün) ve azot giderim verimleri aynı (%85) olan D ve E2 tesisleri karşılaştırıldığında, 5-Kademeli Bardenpho ile işletilen D tesisinin, A^2O ile işletilen E2 tesisinden daha az birim N_2O gazı emisyonuna sebep olması (sırasıyla %8,5 ve %10,4 $N_2O/N_{giderilen}$), tesis konfigürasyonunun sera gazı emisyonu için önemini ve arıtma teknolojisi geliştirildiğinde sera gazı emisyonunun da azaldığını göstermektedir.

Tablo 6. İncelenen biyolojik atıksu arıtma tesislerinin simülasyon sonuçlarına göre çıkış suyu karakterizasyonu ve giderim verimleri

Parametre	Birim	A	B	C	D	E1	E2	E3	E4	E5
AKM	mg/L	19	7	15	11	3	4	8	5	5
KOİ	mg/L	65	41	57	46	36	37	41	33	37
KOİ giderim verimi	%	%92	%93	%93	%92	%94	%94	%93	%94	%94
TN	mgN/L	44	10	11	9	9	9	12	8	9
Azot giderim verimi	%	%33	%82	%83	%85	%84	%85	%83	%83	%85
TP	mgP/L	11	2	3	2	1	1	1	1	1
Fosfor giderim verimi	%	%28	%79	%77	%80	%93	%91	%92	%92	%92

Biyolojik besi maddesi gideriminin yapıldığı tesislerde, nitrifikasyon ve denitrifikasyonu etkileyen faktörler N₂O gazı emisyonunda da etkili olmakta, nitrifikasyon ve denitrifikasyon veriminin azalması ile N₂O emisyonu artmaktadır. Azalan KOİ/TKN oranı ile N₂O emisyonunun artması bu duruma örnektir. Atıksuda organik karbon kısıtlayıcı faktör olduğunda, nitrifikasyon ve denitrifikasyon enzimleri arasındaki rekabete bağlı olarak N₂O emisyonu artmaktadır [1, 16]. Aynı konfigürasyon (A²O), aynı çamur yaşı (8 gün) ve aynı azot giderim verimine (%83) sahip C ve E3 tesisleri karşılaştırıldığında, KOİ/TKN oranı 12,9 olan C tesisinin, KOİ/TKN oranı 8,6 olan E3 tesisinden daha az birim N₂O emisyonuna (sırasıyla %7,9 N₂O/N_{giderilen} ve %9,1 N₂O/N_{giderilen}) sahip olduğu görülmektedir.

3.3 Genel değerlendirme

Yapılan çalışmada, İstanbul'da yer alan ve toplam eşdeğer nüfusu 6.395.341 olan dokuz adet biyolojik atıksu arıtma tesisinin 2020 yılı için net CH₄ gazı emisyonu 45.497 tCO₂eşd/yıl ve net N₂O gazı emisyonu 697.942 tCO₂eşd/yıl olarak tahmin edilmiştir. Çamurdan enerji elde edilen dört tesiste fosil yakıt tasarrufu ile kazanılan CO₂ emisyonu miktarı 46.257 tCO₂/yıl'dır. Dokuz tesisin toplam sera gazı emisyonu ise 697.182 tCO₂eşd/yıl'dır.

İstanbul'daki dokuz biyolojik atıksu arıtma tesisinden kaynaklanan birim sera gazı emisyonları, 2020 yılı baz alınarak, CH₄ ve N₂O gazları için sırasıyla 49 ve 1.013 kgCO₂eşd/yıl/kişi olarak belirlenmiştir. Fosil yakıt tasarrufu ile kazanılan birim CO₂ emisyon miktarı 51 kgCO₂/yıl/kişi ve net sera gazı emisyonu ise 1.011 kgCO₂eşd/yıl/kişi olarak hesaplanmıştır.

Tesis konfigürasyonunun CH₄ gazı emisyon miktarına etkisi incelendiğinde, ön çökeltim ile birincil çamurun biyolojik çamurdan ayrılmasının biyogaz üretimini arttırdığı ve bu bakımdan net emisyonu azalttığı ancak aynı zamanda kaçak olarak salınan CH₄ emisyonunu arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Tesislerin N₂O emisyonları incelendiğinde, gelişen arıtma teknolojisi ile emisyon miktarının azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca nitrifikasyon ve denitrifikasyon verimini etkileyen KOİ/TKN

oranının ve azot giderim veriminin artması ile N₂O emisyonunun azalacağı tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının, proses konfigürasyonuna, arıtma prosesinin gelişmişlik düzeyine, atıksu KOİ/TKN oranına ve azot giderim verimine bağlı olduğu belirlenmiştir. Tesis optimizasyonları ile deşarj karakterizasyonunun ve tesislerden enerji eldesi veriminin iyileştirilmesiyle, atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan sera gazı emisyonunun azaltılabileceği sonucuna varılmıştır. Bu sayede tesislerin küresel ısınmaya katkıları azaltılabilecektir.

4. Kaynaklar

- 1.Law, Y., Ye, L., Pan, Y. and Yuan, Z. (2012). Nitrous oxide emissions from wastewater treatment processes. *Philosophical Transactions of The Royal Society*, **367** (1593), 1265-1277.
- 2.IPCC. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press, 94s.
- 3.Kampschreur, M.J., Temmink, H., Kleerebezem, R., Jetten, M.S.M. and van Loosdrecht, M.C.M. (2009). Nitrous oxide emission during wastewater treatment. *Water Research*, **43**(17), 4093-4103.
- 4.Czepiel, P., Crill, P. and Harriss, R. (1995). Nitrous oxide emissions from municipal wastewater treatment. *Environ. Sci. Technol.* **29**, 2352-2356.
- 5.EEA. (2015). European Environment Agency, <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>
- 6.Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2016). Yıllara göre il nüfusları, www.tuik.gov.tr
- 7.İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ). (2016). 2016 Yılı Faaliyet Raporu, İstanbul, 306s.
- 8.Hydromantis. (2016). GPS-X Technical Reference - V.6.5. Hydromantis Environmental Software Solutions, Inc., Canada.
- 9.Henze, M., Gujer, W., Mino, T. and Loosdrecht, M. (2000). *Activated Sludge Models ASM1, ASM2 and ASM3*. IWA Publishing, London.
- 10.Batstone, D.J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S.V., Pavlostathis, S.G., Rozzi, A., Sanders, W.T.M., Siegrist, H., Vavilin, V.A. (2002). The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). *Water Science and Technology* **45** (10) 65-73.
- 11.İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ). (2016). Arıtma Çamuru Yönetimi Master Planı, İstanbul, 134s.
- 12.WRI & WBCSD. (2005). *The GHG Protocol for Project Accounting*. Washington: World Resources Institute (WRI) and World Business Council for Sustainable Development (WBCSD).

13.Daelman, M., van Voorthuizen, E., van Dongen, U., Volcke, E. and van Loosdrecht, M. (2012). Methane emission during municipal wastewater treatment. *Water Research*, **46**, 3657-3670.

14.Lorenzo-Toja, Y., Alfonsin, C., Amores, M.J., Aldea, X., Marin, D., Moreire, M.T. and Feijo G. (2016). Beyond the conventional life cycle inventory in Wastewater treatment Plants. *Science of the Total Environment*, **553** (2016) 71–82.

15.Öztürk, İ. (2015). Atıksu Arıtma Çamurlarının İşlenmesi ve Bertarafı (El Kitabı). Türkiye Belediyeler Birliği, 2015, Ankara, 218s.

16.Gülhan, H. (2017). Eysel Atıksu Arıtma Tesislerinden Kaynaklanan Sera Gazı Salımının Tahmini. Yüksel Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 183s.