

İleri biyolojik atıksu arıtma tesislerinde işletme parametrelerinin doğrudan sera gazı emisyon miktarı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi

Effects of operating parameters on direct greenhouse gas emission in advanced biological wastewater treatment plants

Hazal GÜLHAN^{1*}, Recep Kaan DERELİ², Hale ÖZGÜN³, Mustafa Evren ERŞAHİN⁴, İzzet ÖZTÜRK⁵

^{1,2,3,4,5}Çevre Mühendisliği Bölümü, İnşaat Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
gulhan@itu.edu.tr, derelir@itu.edu.tr, ozgunha@itu.edu.tr, ersahin@itu.edu.tr, ozturkiz@itu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 01.05.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 03.10.2017
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2017.30806
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Küresel ısınmaya karşı alınan önlemlerin başında, farklı ekonomik sektörler için sera gazı emisyonu kontrolü gelmektedir. Türkiye'nin de taraf olduğu Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne göre taraflar ekonomik sektörlerden salınan sera gazı miktarlarını yıllık olarak raporlamakla yükümlüdürler. Atık sektörü, insan kaynaklı sera gazı emisyonunun %3'ünü, atıksu arıtımı ise atık sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonunun %20'sini oluşturmaktadır. Bu çalışmada, eşdeğer nüfusu 2344000 olan, biyolojik besi maddesi giderimi yapılan ve çamurun anaerobik olarak çürütüldüğü bir evsel atıksu arıtma tesisinde sera gazı emisyonunu etkileyen faktörler, GPS-X 6.5 model yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Bu amaçla, çamur yaşı ve çözülmüş oksijen parametreleri ele alınmıştır. Çamur yaşı için 2, 5, 9, 13 ve 18 gün değerleri test edilmiş ve sırasıyla 0, 618508, 565961, 565681 ve 554684 t CO₂ eşd/yıl doğrudan emisyon miktarı tahmin edilmiştir. Beş günün üzerinde, artan çamur yaşıyla emisyon miktarının azaldığı görülmüştür. Çözülmüş oksijen konsantrasyonu parametresi için 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0 mg/L değerleri incelenmiştir ve sırasıyla 1455632, 999243, 719380, 583603, 503275 ve 449997 t CO₂ eşd/yıl doğrudan emisyon miktarı tahmin edilmiştir. Havalandırma tankında artan çözülmüş oksijen konsantrasyonu ile doğrudan sera gazı emisyonunun azaldığı görülmüştür. Duyarlılık analizi ile sera gazı emisyonuna çözülmüş oksijen parametresinin, çamur yaşı parametresinden daha fazla etkisi olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Atıksu arıtma, Çamur yaşı, Çözülmüş oksijen, Modelleme, Nutrient giderimi, Sera gazı emisyonu

Abstract

The major measure taken on global warming is to control greenhouse gas emission for different economic sectors. Within the context of the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), to which Turkey is party, parties are obliged to report annual greenhouse gas emissions from each economic sector. Greenhouse gas emissions from the waste sector account for approximately 3% of global human-induced greenhouse gas emissions, while wastewater treatment accounts for 20% of the greenhouse gas emissions from waste sector. In this study, factors effecting direct greenhouse gas emission in a wastewater treatment plant with an equivalent population of 2344000 were investigated by using GPS-X 6.5 software. Biological nutrient removal was conducted and sludge was digested under anaerobic conditions in the wastewater treatment plant. Both sludge age and dissolved oxygen parameters were investigated. 2, 5, 9, 13, and 18 days of sludge age were tested, and direct emissions of 0, 618508, 565961, 565681 and 554684 t CO₂ eq/year were calculated, respectively. Direct emission amount decreased with increasing sludge age over five days. Dissolved oxygen emissions of 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, and 3.0 mg/L were tested, and direct emissions of 1455632, 999243, 719380, 583603, 503275 and 449997 t CO₂ eq/year were calculated, respectively. Direct emission amount decreased with increasing dissolved oxygen concentration in the aeration tank. Considering sensitivity analysis, dissolved oxygen parameter is more effective on greenhouse gas emissions in comparison to the sludge age parameter.

Keywords: Wastewater treatment, Sludge age, Dissolved oxygen, Modelling, Nutrient removal, Greenhouse gas emission

1 Giriş

Sanayi Devrimi ile birlikte insan faaliyetleri sonucu atmosfere salınan sera gazları önemli miktarda artmıştır. Bu gazlar yağış rejimi değişiklikleri, kuraklık, taşkın ve kasırga gibi atmosferik olayların gözlenme sıklığındaki artış ile gözlenebilen bölgesel ve küresel iklim değişikliğine neden olmaktadır. Fosil yakıt kullanımı ve endüstriyel prosesler, insan kaynaklı sera gazı emisyonlarının en büyük kaynağıdır. Ayrıca arazi kullanımındaki değişiklikler de iklim sistemini önemli ölçüde etkilemektedir. Artan nüfus, üretim ve tüketim sonucu ivmelenen insan kaynaklı sera gazı emisyonu aynı oranda artmaya devam ederse, çevre üzerinde geri dönülemez etkilerinin olacağı tahmin edilmektedir [1]. Bu nedenle uluslararası platformlarda küresel ısınmaya karşı önlemler alınmaya çalışılmaktadır. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (Çerçeve Sözleşme) kapsamında hazırlanan Paris Antlaşması, 178 ülke ile Avrupa Birliği

tarafından 2016 yılında imzalanmıştır. Paris Antlaşması'nın hedefleri;

- 2100 yılı küresel ortalama sıcaklığının, Sanayi Devrimi öncesi dönemdeki küresel ortalama sıcaklıktan azami 2 °C fazla olması ve,
- 2030 yılında salınan insan kaynaklı sera gazı emisyonu miktarının, 1990 yılı emisyon miktarına göre en az %40 azaltılmasıdır [2].

Bahsedilen hedeflerin gerçekleştirilebilmesi, her ekonomik sektörün, artan teknolojik olanakları kullanarak, emisyon azaltma hedeflerini yerine getirmesini gerektirmektedir. Çerçeve Sözleşme kapsamında, Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından yapılan çalışmalar sonucu belirlenen ekonomik sektörler; enerji, endüstriyel prosesler ve ürün kullanımı, tarım, ormancılık ve diğer arazi kullanımı ile atık sektörüdür [3]. Çerçeve Sözleşme tarafları ekonomik sektörlerle ait yıllık sera gazı emisyon miktarını raporlamakla yükümlüdürler.

Atık sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonu, küresel ölçekte insan kaynaklı emisyon miktarının ~%3'ünü, atıksu arıtımı ise atık sektörünün %20'sini oluşturmaktadır. Tesis sınırları içinde atıksu arıtımından kaynaklanan ve biyojenik olmayan sera gazı emisyonları, tesisten doğrudan salınan sera gazı emisyonu olarak Kapsam 1 çerçevesinde raporlanmaktadır. Kapsam 2'de, tesiste kullanılmak üzere dışarıdan alınan enerjiye bağlı sera gazı emisyonu, Kapsam 3'te ise dışarıdan satın alınan bütün malzemelerin üretiminden, üretilen ürünün kullanımından, çalışanların ve tedarik zincirindeki ulaşım faaliyetlerinden kaynaklı sera gazı emisyonu değerlendirilmektedir. Evsel atıksu arıtma tesislerinden salınan sera gazı emisyonu miktarı, IPCC tarafından belirlenen emisyon faktörlerini içeren IPCC (2006) Ulusal Sera Gazı Envanteri Rehberi ile büyük ölçekli emisyon tahminlerine uygun olarak hesaplanabilmektedir. Bunun dışında, matematiksel modeller ve bilgisayar simülasyonları ile tesise özgü koşullar dikkate alınarak tesislerden kaynaklanan doğrudan sera gazı emisyonu daha hassas tahmin edilebilmektedir [4].

Biyolojik atıksu arıtma tesislerinden salınan sera gazları karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve nitroz oksit (N₂O)'tir. Sera gazı emisyonları CO₂ eşdeğeri olarak raporlanır, yani diğer sera gazları CO₂ eşdeğerine çevrilerek toplam emisyon hesaplanır. 2013'te yayımlanan IPCC İklim Değişikliği raporuna göre CH₄ ve N₂O için çevrim faktörleri sırasıyla 28 ve 265 olarak bildirilmiştir [5]. Biyolojik arıtma sırasında mikroorganizma faaliyetleri sonucu ortaya çıkan CO₂ gazı, biyojenik kökenli olduğu için net emisyona dahil edilmemektedir [3]. CO₂ emisyonunun en önemli kaynağı evsel atıksu içerisindeki organik maddelerin önemli oranda giderildiği aktif çamur havuzlarıdır. Atıksu arıtma tesislerinde CH₄ emisyonunun en önemli kaynakları giriş yapısı (kanalizasyonda üretilen CH₄ gazı büyük oranda burada emisyon olarak salınır), anaerobik/anoksik biyolojik tanklar, çamur çürütücü ve diğer çamur arıtma birimleridir (yoğunlaştırma, susuzlaştırma, depolama) [6]. Bu kaynaklar arasında anaerobik çamur çürütücüler metan emisyonunun en önemli kaynağıdır. Anaerobik çürütücülerde, atıksu arıtma tesislerinde oluşan birincil çamur (ön çökeltim) ve ikincil çamur (fazla aktif çamur) içerisindeki organik maddeler oksijenin olmadığı şartlarda CO₂ (%30-40) ve CH₄ (%60-70)'e dönüştürülür. Anaerobik çürütme sonunda oluşan gaz karışımı (biyogaz) yüksek enerji içeriği nedeniyle yakılarak enerji (ısı ve/veya elektrik) geri kazanılabilir [7]. Tesis içerisinde biyogazdan enerji elde edildiğinde, enerji üretiminde kullanılan CH₄'ün CO₂ eşdeğeri net sera gazı emisyonundan çıkarılmaktadır. Ancak yine de, üretilen biyogazın yakılması sırasında biyogaz hatlarındaki kaçaklar nedeniyle önemli miktarda CH₄ atmosfere salınabilmektedir. Ayrıca, çamur çürütücülerin çıkışında suda çözünmüş olarak bulunabilen CH₄, üst akımla tesisin başına geri döner. Çözünmüş CH₄, aktif çamur tankında biyolojik olarak CO₂'ye dönüşmekte veya havalandırmanın etkisiyle sudan sıyrılıp atmosfere salınmaktadır [8]. Biyolojik azot giderimi yapılan evsel atıksu arıtma tesislerinde N₂O emisyonunun kaynağı aktif çamur reaktörleridir. N₂O, biyolojik azot döngüsünde bir ara ürün olup, üretiminde üç temel mekanizma etkilidir. Bu mekanizmalar; nitrifikasyonun birinci kademesinde hidroksilamin oksidasyonu ara ürünlerinin bozunması, amonyum oksitleyici bakteri (AOB)'lerin

gerçekleştirdiği denitrifikasyon ve heterotrofik denitrifikasyon olarak sıralanabilir [9]-[11]. Azot gideriminin farklı aşamalarında ortaya çıkan ve suda çözünmüş halde bulunan N₂O özellikle havalandırma havuzlarındaki yüksek türbülans ve karışım nedeniyle emisyon olarak atmosfere salınır [12].

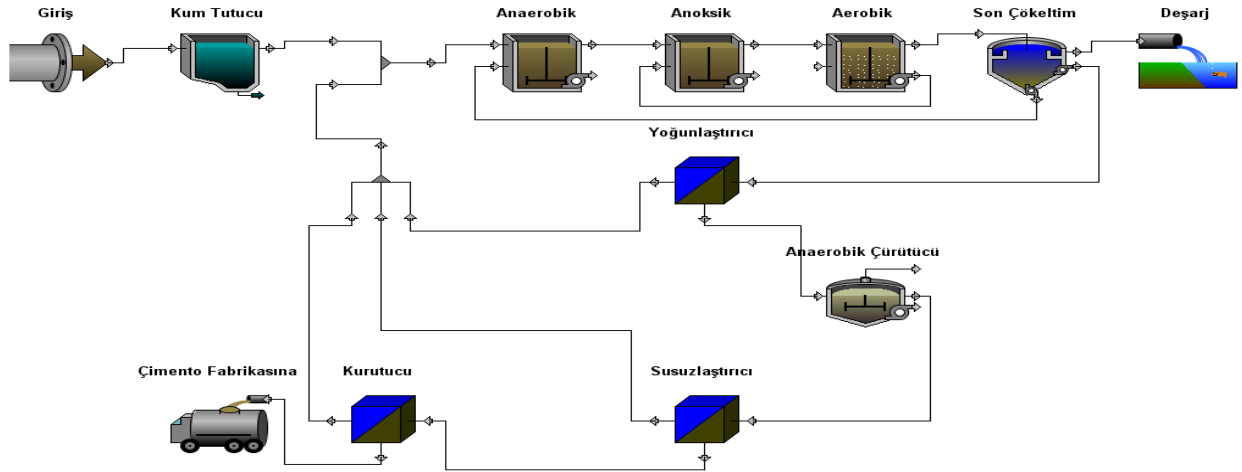
Atıksu arıtma tesislerinin proses seçimi, tasarımı ve işletme koşulları tesislerin sera gazı üretim potansiyelini önemli derecede etkilemektedir [12]. Özellikle doğrudan N₂O emisyonunda anaerobik prosesler aerobik proseslere göre daha avantajlıdır [13]. Aerobik proseslerde havalandırma amacıyla kullanılan enerjinin de fosil yakıtlardan elde edildiği dikkate alındığında; özellikle konsantre atıksuların arıtımında anaerobik proseslerin kullanımı ön plana çıkmaktadır [14]. Nitrifikasyon-denitrifikasyon ile azot giderimi yapan tesislerde, havalı ve anoksik bölmelerde düşük O₂ konsantrasyonu ve nitrit birikimi olması halinde N₂O emisyonları artmaktadır [15]. Biyolojik azot giderimi yapan aktif çamur tesislerinin kararlı koşullarda işletilememesi ve havalandırma düzensizlikleri N₂O emisyonlarını arttırmaktadır [16]. İşletme koşullarının atıksu arıtma tesislerinin sera gazı emisyonlarına etkilerini belirleyebilmek için yapılan matematiksel modelleme çalışmalarında, tesisin çamur yaşı ve reaktördeki oksijen konsantrasyonu parametrelerinin sera gazı emisyonu miktarını ciddi ölçüde etkilediği ortaya çıkmıştır [17].

Bu çalışmanın amacı, evsel atıksu arıtma tesislerinde oluşan doğrudan sera gazı emisyonu miktarının model bazlı hesaplanması ve sera gazı emisyon miktarını etkileyen faktörlerin değerlendirilmesidir. Bu kapsamda, ileri biyolojik besi maddesi giderimi yapan tam ölçekli bir atıksu arıtma tesisi incelenmiş ve GPS-X 6.5 modelleme yazılımı kullanılarak sera gazı emisyon miktarları hesaplanmıştır. İncelenen tesis farklı çamur yaşları ve çözünmüş oksijen konsantrasyonları için simule edilerek, bu parametrelerin ileri biyolojik atıksu arıtma tesisinden salınan sera gazı emisyonu üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur.

2 Materyal ve metot

2.1 İncelenen tesisin tanıtımı

Çalışma kapsamında eşdeğer nüfusu 2344000 olan bir ileri biyolojik atıksu arıtma tesisi incelenmiştir. Tesisin GPS-X 6.5 yazılımında oluşturulan akım şeması Şekil 1'de verilmiştir. Tesis biyolojik azot ve fosfor gideriminin yapıldığı A²O konfigürasyonunda işletilmektedir. Atıksu, anaerobik biyofosfor havuzundan sonra anoksik ve aerobik havuzlara aktarılmaktadır. Reaktör hacimleri sırasıyla 43720, 152000 ve 238000 m³ olup, V_D/V oranı ~0.40'tır. Aerobik havuzdan anoksik havuza iç geri devir söz konusudur. Biyolojik havuzlardan geçen atıksu daha sonra son çökeltim tankına ulaşmaktadır. Son çökeltim tankından biyofosfor havuzu girişine aktif çamur geri devir yapılmaktadır. Tesisin çamur yaşı 9 gündür. Tesiste üretilen fazla biyolojik çamur dekantörde yoğunlaştırıldıktan sonra anaerobik olarak çürütülmekte ve biyogaz elde edilmektedir. Elde edilen biyogaz susuzlaştırılan çamurun kurutulmasında kullanılmaktadır. Kurutulan çamur çimento fabrikasında yakıt olarak değerlendirilmektedir. Tesise ait tasarım parametreleri ve atıksu karakterizasyonu Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1: İleri biyolojik atıksu arıtma tesisi akım şeması.

Tablo 1: İleri biyolojik atıksu arıtma tesisi tasarım parametreleri ve atıksu karakterizasyonu.

Debi	m ³ /gün	m ³ /sa.
Q _{ort}	600000	25000
Q _{maks}	780000	32500
Giriş Atıksu Karakterizasyonu		
Askıda Katı Madde	350 mg/L	210000 kg/gün
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	600 mg/L	360000 kg/gün
Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ ₅)	266 mg/L	156000 kg/gün
Toplam Kjeldahl Azotu	54 mg/L	32400 kg/gün
Toplam Fosfor (TP)	10 mg/L	6000 kg/gün

2.2 Emisyon hesapları

Çalışma kapsamında, ileri biyolojik atıksu arıtma tesisinden salınan sera gazı emisyon miktarı GPS-X 6.5 yazılımı kullanılarak Kapsam 1 çerçevesinde hesaplanmıştır ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sera Gazı Protokolü Kapsam 1 çerçevesinde, biyojenik CO₂ emisyon miktarı net sera gazı emisyon miktarına dahil edilmemektedir. GPS-X 6.5 yazılımında net emisyon miktarı, tesiste arıtma faaliyetleri sonucu oluşan doğrudan CH₄ ile N₂O emisyonlarını, arıtma çamurunun anaerobik çürütülmesiyle tutulan CH₄ emisyonunu ve anaerobik çürütmede üretilen biyogazın enerji üretiminde kullanılması ile tasarruf edilen fosil yakıt kullanımına bağlı tutulan CO₂ emisyonunu dikkate almaktadır.

İşletme parametrelerinin ileri biyolojik atıksu arıtma tesisinden salınan sera gazı emisyonuna etkilerini belirleyebilmek amacıyla iki farklı senaryo çalışılmıştır. Senaryo 1'de çamur yaşının (SRT), Senaryo 2'de ise havalandırma tanklarındaki çözünmüş oksijen konsantrasyonunun (ÇO) sera gazı emisyon miktarına etkisi araştırılmıştır. Senaryo 1 çerçevesinde, işletme parametrelerinden yalnızca çamur yaşı değiştirilerek deşarj suyu kalitesi incelenmiş ve sera gazı emisyon miktarı hesaplanmıştır. Çamur yaşı 2, 5, 9, 13 ve 18 gün olacak şekilde farklı koşullar altında simülasyonlar yapılmıştır. Bu simülasyonlarda tesisin havalandırma tanklarındaki çözünmüş oksijen konsantrasyonu 2 mg/L olarak sabit tutulmuştur. Senaryo 2 kapsamında tesisin çamur yaşı değiştirilmeden (9 gün), aerobik tanktaki çözünmüş oksijen konsantrasyonunun 0.5, 1.0, 1.5, 2, 2.5 ve 3.0 mg/L olduğu durumlar için deşarj suyu kalitesi incelenmiş ve sera gazı emisyonları hesaplanmıştır. Çamur yaşı ve çözünmüş oksijen konsantrasyonu parametrelerinin sera gazı emisyonu üzerindeki etkilerinin

birbiriyle kıyaslanması açısından duyarlılık analizi uygulanmıştır.

2.3 Simülasyon platformu ve matematiksel model

GPS-X 6.5 yazılımı Kanada menşeli Hydromantis Firması tarafından, biyolojik atıksu arıtma tesislerinin matematiksel olarak modellenmesi amacıyla geliştirilmiştir. Yazılımda kararlı durum ve dinamik koşullar için simülasyonlar yapılabilmekte olup; içerisinde standart biyokinetik modeller (ASM1, ASM2d, ASM3 ve Mantis2) ön tanımlı olarak bulunmaktadır. Mantis2 modelinde 56 proses tanımlanmış olup, bu prosesler adsorpsiyon, heterotrofik mikroorganizmalar, ototrofik mikroorganizmalar, fosfor biriktiren mikroorganizmalar, metilotroflar, anaerobik mikroorganizmalar, anaerobik ototrofik mikroorganizmalar (Anammox), kimyasal çökeltme ve gaz-sıvı transferi ile ilgilidir [18]. GPS-X 6.5 sürümünde, Mantis2 modelinden türetilen ve arıtma tesislerinin karbon ayakizi tahmini yapılabilen Mantis3 modeli tanımlanmıştır. Mantis3 modeliyle, arıtma tesislerindeki havalı ve havasız reaktörlerden salınan doğrudan sera gazı emisyonları (CO₂, CH₄ ve N₂O) (Kapsam 1), tesiste kullanılan elektriğe, kimyasallara ve çeşitli materyallere bağlı dolaylı sera gazı emisyonları (Kapsam 2) ile tesis enerji tüketimi ve varsa üretimi (Kapsam 3) hesaplanabilmektedir [19],[20]. Anaerobik çürütücü içeren ileri biyolojik atıksu arıtma tesislerinin GPS-X 6.5 yazılımı kullanılarak incelendiği bir çalışmada, tesislere ait CH₄ emisyon faktörü ortalama %0.9 CH₄/KOİ_{giriş}, N₂O emisyon faktörü ise ortalama %9 N₂O-N/N_{giriş} olarak tahmin edilmiştir [4]. Hollanda Şehir, Bölge Planlama ve Çevre Bakanlığı tarafından, biyolojik besi maddesi giderimi yapan ve anaerobik çürütücü içeren tesisler için CH₄ emisyon faktörü %0.85 CH₄/KOİ_{giriş} olarak belirlenmiştir [8]. N₂O emisyon faktörü üzerine yapılan bir çalışmada ise biyolojik besi maddesi giderimi yapılan tesislerde N₂O emisyon faktörünün %0.003-25 N₂O-N/N_{giriş} aralığında değişebileceği sonucuna varılmıştır [11]. Bu bilgiler ışığında GPS-X 6.5 yazılımının gerçeğe uygun tahminler yaptığı görülmektedir. GPS-X 6.5 yazılımının karbon ayakizi tahmini özelliği, çalışmada bu yazılımının kullanılmasının başlıca sebebidir.

GPS-X 6.5'te N₂O emisyonu, aktif çamur reaktörlerinde heterotrofik ve ototrofik bakterilerin gerçekleştirdiği nitrifikasyon/denitrifikasyon proseslerinden kaynaklanmaktadır. CH₄ emisyonu ise, anaerobik çamur çürütücüde üretilen CH₄ gazının %10'u olarak

hesaplanmaktadır. Bu çalışma kapsamında Mantis3 modeli ön tanımlı biyokinetik parametreler ile çalıştırılmış olup, simülasyonlarda atıksu sıcaklığı 15 °C olarak kabul edilmiştir. Simülasyonlarda kararlı durum çözümlenmesi yapılmıştır.

3 Sonuçlar

3.1 Çamur yaşının etkisi

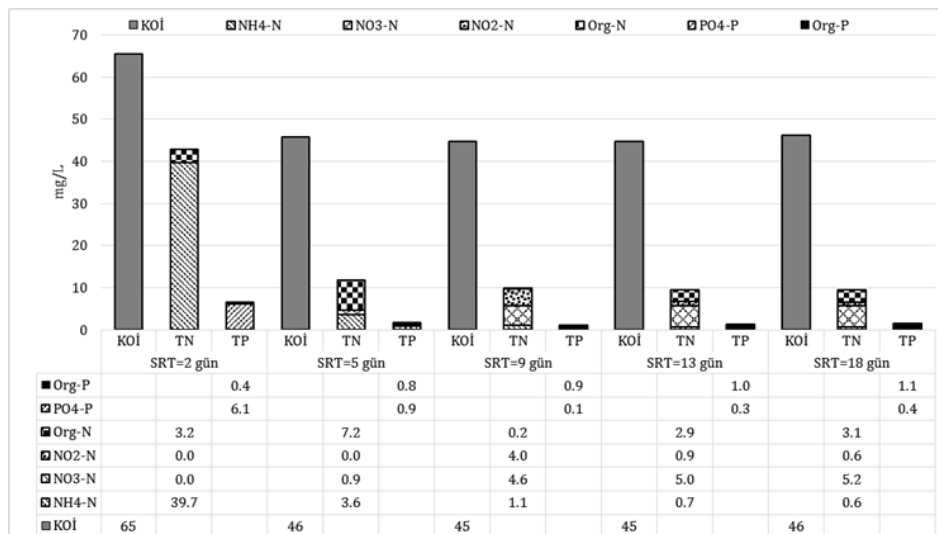
Laboratuvar ve tam ölçekli yapılan çalışmalarda atıksu arıtma tesislerinde biyolojik azot giderimi sırasında önemli miktarda N₂O emisyonunun ortaya çıktığı tespit edilmiştir [10],[15]. Denitrifikasyon kademesiyle karşılaştırıldığında, nitrifikasyon kademesinde daha fazla N₂O emisyonu meydana gelmektedir. AOB'ler N₂O emisyonu oluşumuna neden olan başlıca mikroorganizmalardır [10]. Özellikle nitritin (NO₂-N) N₂O emisyonunda önemli bir parametre olduğu rapor edilmiştir [15]. Yüksek NO₂-N konsantrasyonları denitrifikasyon hızını düşürmekte ve azot oksit ile N₂O birikmesine sebep olmaktadır [21],[22]. Çamur yaşı, NO₂-N birikimi açısından son derece önemli bir işletme parametresi olup, N₂O emisyonları üzerinde önemli etkiye sahiptir.

Senaryo 1'de çamur yaşı değişiminin, incelenen ileri biyolojik atıksu arıtma tesisinde arıtılmış su kalitesi (Şekil 2) ve doğrudan N₂O emisyonu (Şekil 3) üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çamur yaşı 2 gün olduğunda tesiste azot giderim veriminin çok düşük seviyede (%21) kaldığı görülmektedir. 2 günlük çamur yaşında azotun sadece heterotrofik mikroorganizmaların çoğalması için kullanıldığı, nitrifikasyon/denitrifikasyon proseslerinin gerçekleşmediği ve buna bağlı olarak N₂O emisyonunun olmadığı belirlenmiştir. Çamur yaşı 5 gün iken nitrifikasyon ve denitrifikasyonun proseslerinin tam olarak gerçekleşmemesi sebebiyle atıksudaki azotun önemli bir kısmının ara ürün olan N₂O gazına dönüştüğü ve ardından emisyon olarak sistemden salındığı görülmektedir. Çamur yaşı 9 gün seçildiğinde N₂O emisyonunun azaldığı ancak sistemde nitrit (NO₂-N) konsantrasyonunun yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum nitrifikasyonun 1. basamağının gerçekleştiği ancak çamur yaşının 2. basamak nitrifikasyon bakterileri için yeterli olmadığına işaret etmektedir. 13 ve 18 günlük çamur yaşları için yapılan simülasyonlarda, 9 günlük çamur yaşına göre azot gideriminde ciddi seviyede bir artış görülmüştür. Ancak NO₂-N birikimi olmaması nedeniyle tam nitrifikasyonun sağlandığı

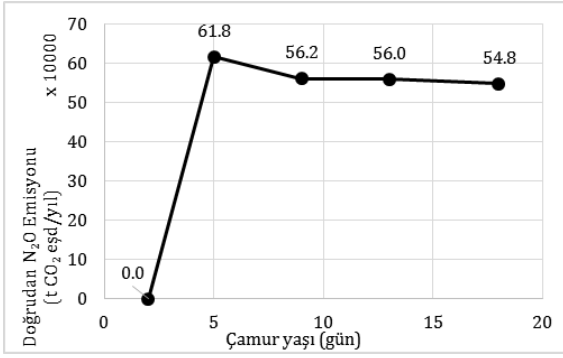
görülmektedir. Ototrofik nitrifikasyon bakterilerinin çoğalma hızı karbon giderimi yapan heterotrofik bakterilerinkine göre daha yavaş olduğundan, azot gideriminin etkin şekilde gerçekleşebilmesi için çamur yaşının nitrifikasyon bakterilerine göre belirlenmesi gerekmektedir. Buna bağlı olarak çamur yaşı arttıkça sistemin azot giderim verimi de artmaktadır. Bu bilgiler ışığında artan çamur yaşı ile tamamlanan nitrifikasyon prosesi ile NO₂-N'in birikimi önlendiğinde, doğrudan N₂O emisyonu da azalması beklenmektedir [15]. Çamur yaşı 5 gün iken doğrudan N₂O emisyonu ~618000 t CO₂ eşd/yıl olarak, çamur yaşı 18 gün alındığında doğrudan N₂O emisyonu ~548000 t CO₂ eşd/yıl olarak hesaplanmıştır (Şekil 3). Elde edilen sonuçlara göre, çamur yaşı arttırıldığında, artan azot giderimiyle N₂O emisyonunun azaldığı görülmektedir.

Senaryo 1 kapsamında, çamur yaşının atıksu arıtma tesisinden kaynaklanan doğrudan CH₄ emisyonuna etkisi incelendiğinde (Şekil 4), artan çamur yaşı ile doğrudan CH₄ emisyonunun azaldığı görülmektedir. Doğrudan CH₄ emisyonu miktarı, çamur yaşının artması ile azalan fazla çamur miktarıyla orantılı olarak düşmektedir. Çamur yaşı 2 gün iken doğrudan CH₄ emisyonu ~51000 t CO₂ eşd/yıl, çamur yaşı 13 gün iken ~17000 t CO₂ eşd/yıl'dır. Çalışmada, üretilen CH₄'ün tesis içinde enerji kaynağı olarak kullanıldığı ve buna bağlı tasarruf edilen fosil yakıt miktarının karşılığı kadar CO₂'in tutulduğu kabul edilmiştir. Tutulan CO₂ emisyon miktarı, toplam sera gazı emisyonu miktarından çıkartıldığından, bu değer Şekil 4'te negatif olarak verilmiştir. Çamur yaşı 2 gün iken tutulan CO₂ miktarı ~55000 t CO₂ eşd/yıl, 18 gün iken ~11000 t CO₂ eşd/yıl'dır (Şekil 4). Çamur yaşının artmasıyla tutulan CO₂ miktarı da tasarruf edilen fosil yakıt miktarına bağlı olarak azalmaktadır.

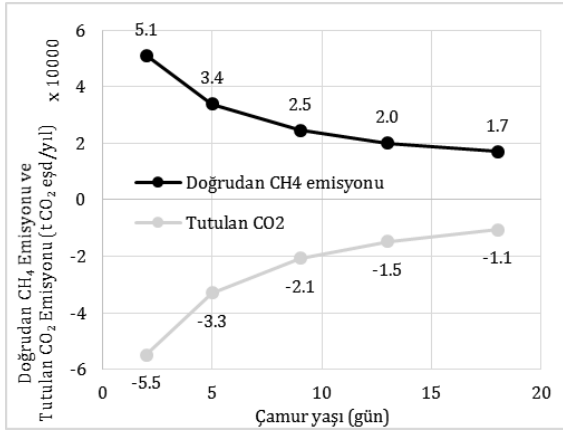
Şekil 5'te çamur yaşının, doğrudan N₂O ve CH₄ emisyonlarından tutulan CO₂ miktarının çıkarılması ile elde edilen net sera gazı emisyonuna etkisi verilmiştir. Tesis 2 günlük çamur yaşı ile işletildiğinde, doğrudan net sera gazı emisyonunun oluşmadığı hesaplanmıştır. Bunun nedeni N₂O emisyonunun olmaması ve anaerobik çürütücü kaynaklı CH₄ emisyonunun tutulan CO₂ emisyonu ile dengelenmesidir. Ancak bu durumda tesis azot ve fosfor deşarj standartlarını (TN<10 mg/L ve TP<1 mg/L) sağlamamaktadır (Şekil 2) [25].



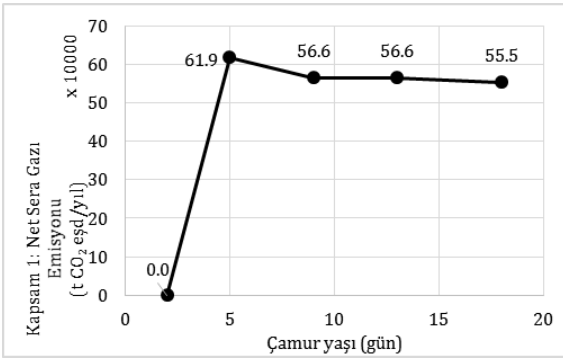
Şekil 2: Çamur yaşının arttırılmış su kalitesi üzerindeki etkileri.



Şekil 3: Çamur yaşının doğrudan N₂O emisyonu üzerindeki etkisi.



Şekil 4: Çamur yaşının doğrudan CH₄ emisyonu ve tutulan CO₂ emisyonu üzerindeki etkisi.



Şekil 5: Çamur yaşının Kapsam 1 net sera gazı emisyonu üzerindeki etkisi.

Çamur yaşı 5 gün olduğunda tesisten N₂O emisyonu gerçekleşmektedir ve net sera gazı emisyonu 618508 t CO₂ eşd/yıl'dır. Çamur yaşı arttıkça net sera gazı emisyonu azalmakta, çamur yaşı 18 gün olduğunda emisyon miktarı 554684 t CO₂ eşd/yıl olmaktadır. 9 günün üzerindeki çamur yaşlarında tesiste nitrifikasyonun tamamlandığı ve arıtma veriminin tüm parametreler için benzer olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 2).

3.2 Çözünmüş oksijen konsantrasyonunun etkisi

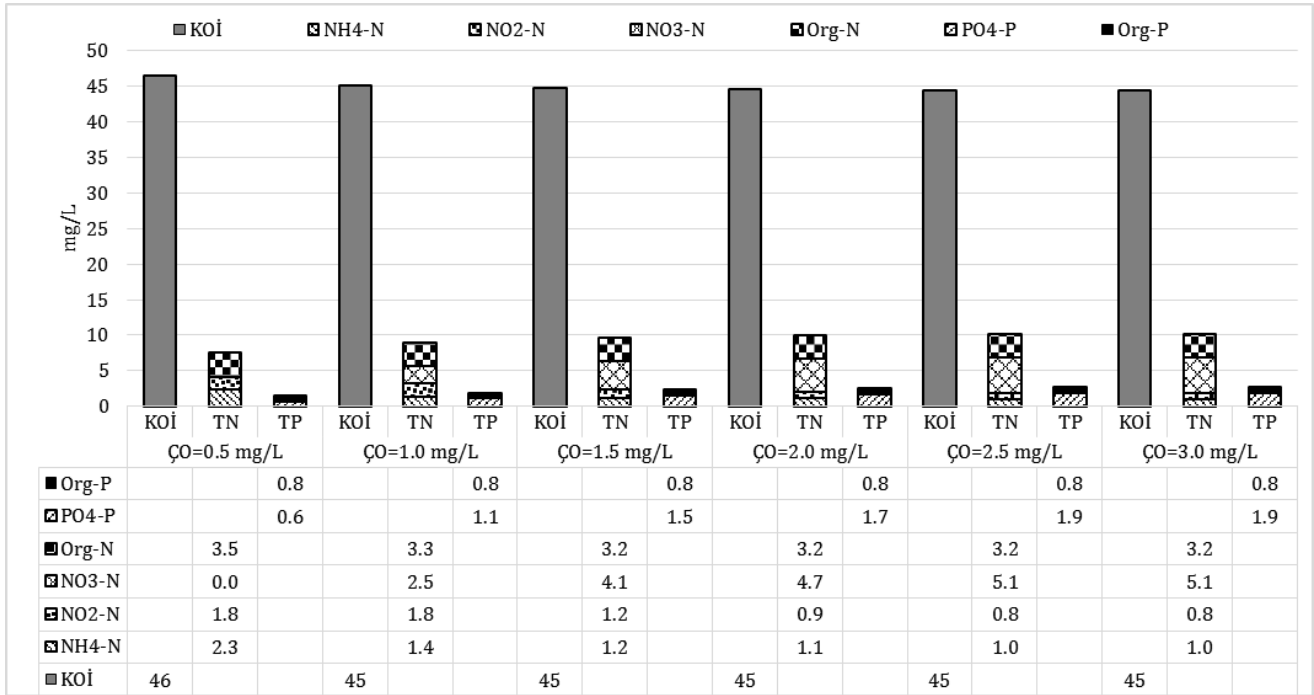
Biyolojik azot gideriminin yapıldığı atıksu arıtma tesislerinde, nitrifikasyon ve denitrifikasyon ünitelerindeki çözünmüş oksijen konsantrasyonunun N₂O gazı üretimine etkisi oldukça fazladır. Bu tesislerde N₂O emisyonundan çoğunlukla AOB'lerin sorumlu olduğu bilinmektedir [9]. AOB'ler, aerobik koşullarda

nitrifikasyon reaksiyonuyla amonyumu (NH₄-N) NO₂-N'e oksitlerken enerji elde ederler ve bu reaksiyon zincirinde N₂O ara ürün olarak oluşur. Nitrifikasyonda AOB'ler tarafından üretilen N₂O miktarı, yüksek NH₄-N ve düşük NO₂-N konsantrasyonuyla artmaktadır. Ortamda düşük çözünmüş oksijen konsantrasyonu ve yeterince NO₂-N olduğunda, AOB'ler NO₂-N'i elektron alıcı olarak kullanıp kısmi denitrifikasyon yapmaktadırlar [24]. AOB'lerin bünyesinde N₂O indirgeyici enzim bulunmadığından, bu tür denitrifikasyonda N₂O'nun son ürün olduğu söylenebilir [10],[26]. Gereğinden çok havalandırma ise suda çözünürlüğü fazla olan N₂O gazının sıyrılarak atmosfere salınmasına neden olur. Yapılan çalışmalarda, nitrifikasyon bölgelerinde havalandırılan yüzeylerden N₂O emisyonunun havalandırılmayan bölgelere göre 2-3 kat daha fazla olduğu ortaya konulmuştur [23]. Denitrifikasyon prosesinde ise oksijen, denitrifikasyon enzimlerini inhibe etmektedir ve özellikle N₂O redüktaz enzimi oksijene karşı diğer denitrifikasyon enzimlerinden daha hassas olduğundan N₂O birikimi olabilmektedir [10]. Senaryo 2 kapsamında çözünmüş oksijen konsantrasyonundaki değişimin artırılmış su kalitesi üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur (Şekil 6). Ayrıca havalandırma tankındaki çözünmüş oksijen konsantrasyonundaki değişimin biyolojik tanklarda oluşan sera gazı emisyonuna etkisi (Şekil 7) ve atıksu arıtma tesisinden çıkan toplam sera gazı emisyonuna etkisi belirlenmiştir (Şekil 8).

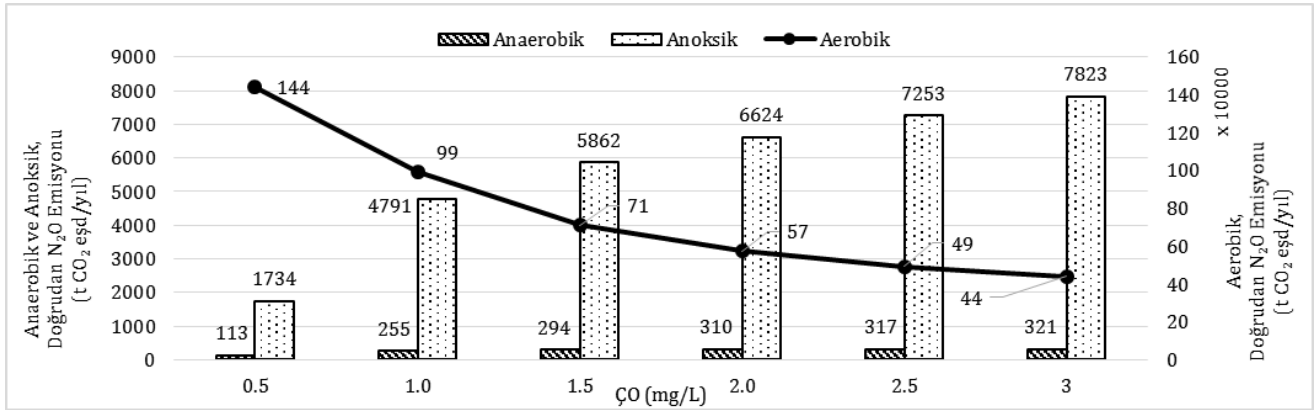
Şekil 6 incelendiğinde, aerobik tanktaki çözünmüş oksijen konsantrasyonunun 0.5 mg/L'den 3.0 mg/L'ye artmasıyla tesis deşarjında NO₃-N konsantrasyonunun 0.0 mg/L'den 5.1 mg/L'ye yükseldiği görülmektedir. Bunun nedeni, geri devir sonucu anaerobik ve anoksik tanka oksijen girişiyle denitrifikasyonun kısmen inhibe edilmesidir. Oksijen konsantrasyonunun artması, denitrifikasyona benzer şekilde fosfor giderimini de olumsuz etkilemiş, tesis çıkışında orto-fosfat konsantrasyonu 0.6 mg/L'den 1.9 mg/L'ye yükselmiştir.

Şekil 7'de görüldüğü üzere, havalandırma tankındaki çözünmüş oksijen konsantrasyonu 0.5 mg/L'den 3.0 mg/L'ye yükseldiğinde, aerobik nitrifikasyon havuzunda artan nitrifikasyon nedeniyle doğrudan N₂O emisyonu ~1444000 t CO₂ eşd/yıl'dan ~44000 t CO₂ eşd/yıl'a inmiştir. Burada havalandırmaya bağlı artan çözünmüş oksijen konsantrasyonu, çamur geri devri nedeniyle anaerobik ile anoksik tanklarda çözünmüş oksijen konsantrasyonunun yükselmesine ve bu tanklarda kısmi nitrifikasyonun gerçekleşmesine neden olmaktadır. Dolayısıyla bu tanklardan salınan doğrudan N₂O emisyonu miktarı artmıştır (anaerobik tank için ~113 t CO₂ eşd/yıl'dan ~321 t CO₂ eşd/yıl'a, anoksik tank için ise ~1734 t CO₂ eşd/yıl'dan ~7823 t CO₂ eşd/yıl'a artış tahmin edilmiştir). Anoksik tankta N₂O emisyonunun artmasının bir başka nedeni ise, tankta çözünmüş oksijen konsantrasyonunun artması ile denitrifikasyonda N₂O indirgeyici enzimlerin inhibe olmasıdır.

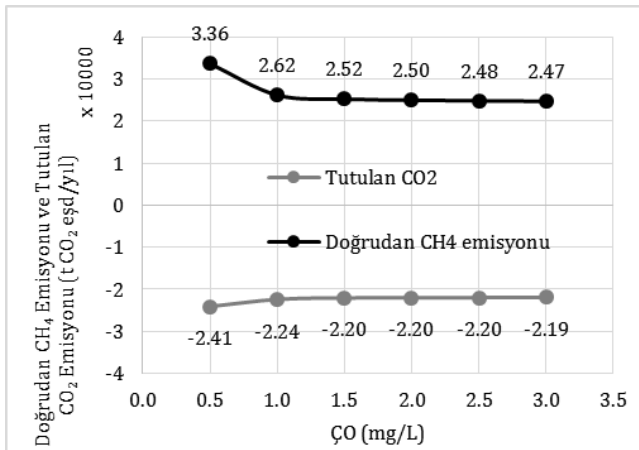
Şekil 8'de havalandırma tankında artan çözünmüş oksijen konsantrasyonuyla doğrudan CH₄ emisyonu ve tutulan CO₂ emisyonu ilişkisi verilmiştir. Tutulan CO₂ emisyonu toplam sera gazı emisyonu miktarından çıkarıldığından negatif olarak gösterilmiştir. Havalandırma tankında çözünmüş oksijen konsantrasyonu 0.5 mg/L iken doğrudan CH₄ emisyonu ~33600 t CO₂ eşd/yıl, tutulan CO₂ emisyonu ~24100 t CO₂ eşd/yıl'dır. Çözünmüş oksijen konsantrasyonu 3 mg/L olduğunda bu değerler sırasıyla ~24700 ve ~21900 t CO₂ eşd/yıl'a düşmektedir.



Şekil 6: Havalandırma tankı çözünmüş oksijen konsantrasyonunun artılmış su kalitesi üzerindeki etkileri.



Şekil 7: Havalandırma tankındaki çözünmüş oksijen konsantrasyonunun biyolojik tanklarda doğrudan N₂O emisyonuna etkisi.

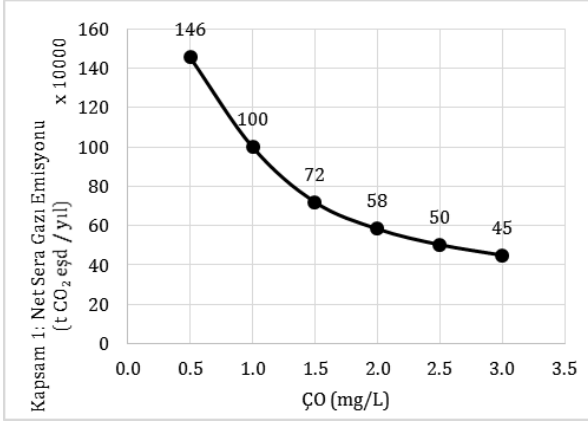


Şekil 8: Havalandırma tankı çözünmüş oksijen konsantrasyonunun doğrudan CH₄ emisyonu ve tutulan CO₂ emisyonu üzerindeki etkisi.

Çalışmada, havalandırma tankında artan çözünmüş oksijen konsantrasyonuyla anaerobik çürütücünden salınan doğrudan CH₄ emisyonunun ve tutulan CO₂ emisyonunun bir miktar azalsa da önemli oranda değişmediği belirlenmiştir (Şekil 8). Havalandırma tankındaki oksijen konsantrasyonunun artması anaerobik çamur çürütücüye gönderilen organik madde miktarını önemli ölçüde değiştirmemekte olup çürütücüde üretilen metan gazı miktarı sabit kalmaktadır.

Şekil 9'da çözünmüş oksijen konsantrasyonu arttıkça, atıksu arıtma tesisinden salınan toplam sera gazı emisyonunun azaldığı görülmektedir. Havalandırma havuzundaki çözünmüş oksijen konsantrasyonu 0.5 mg/L iken net sera gazı emisyonu 1455632 t CO₂ eşd/yıl, 3.0 mg/L iken 449997 t CO₂ eşd/yıl'dır. Bunun nedeni en yüksek N₂O emisyonunun gerçekleştiği aerobik tanktaki emisyonun azalmasıdır. Aerobik nitrifikasyon bölgesinden sera gazı emisyonunu azaltmak için, tankta AOB denitrifikasyonunu engelleyecek kadar çözünmüş oksijen konsantrasyonunun olması önemlidir. Ancak gereğinden fazla havalandırma, denitrifikasyon yapan heterotrofik

bakterilerinin inhibisyonuna ve ardından kısmi denitrifikasyonda indirgenememiş çözünmüş N₂O gazının aerobik tanka taşınarak, havalandırma yardımıyla atmosfere salınmasına sebep olabilir. Ayrıca fazla havalandırma sonucu geri devir ile anaerobik biyofosfor tankına iletilen çözünmüş oksijen, fosfor giderimini de olumsuz etkileyecektir. Bu nedenle biyolojik besi gideriminin yapıldığı tesisler, aerobik bölgede çözünmüş oksijen konsantrasyonu optimum olacak şekilde (<3 mg/L) işletilmelidir.



Şekil 9: Havalandırma tankı çözünmüş oksijen konsantrasyonunun Kapsam 1 net sera gazı emisyonu üzerindeki etkisi.

Atıksu arıtma tesislerinde sera gazı emisyonları azaltılırken alınacak önlemlerin ve uygulanacak işletme koşullarının tesisin arıtma performansı üzerine etkisi iyi incelenmeli ve deşarj standartlarının sağlanması öncelikli olarak değerlendirilmelidir.

3.3 Duyarlılık analizi

Duyarlılık analizinde, çamur yaşının 2 gün olduğu durum, tesiste nitrifikasyonun gerçekleşmemesi sonucu deşarj standartlarının sağlamaması ve sera gazı emisyonunun olmaması nedeniyle analize dahil edilmemiştir. Bu durumda duyarlılık analizinde nitrifikasyonun gerçekleştirildiği koşullar için çamur yaşı ve çözünmüş oksijen konsantrasyonundaki değişimlerin incelenen tesiste doğrudan sera gazı emisyonu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 8'deki duyarlılık analizi

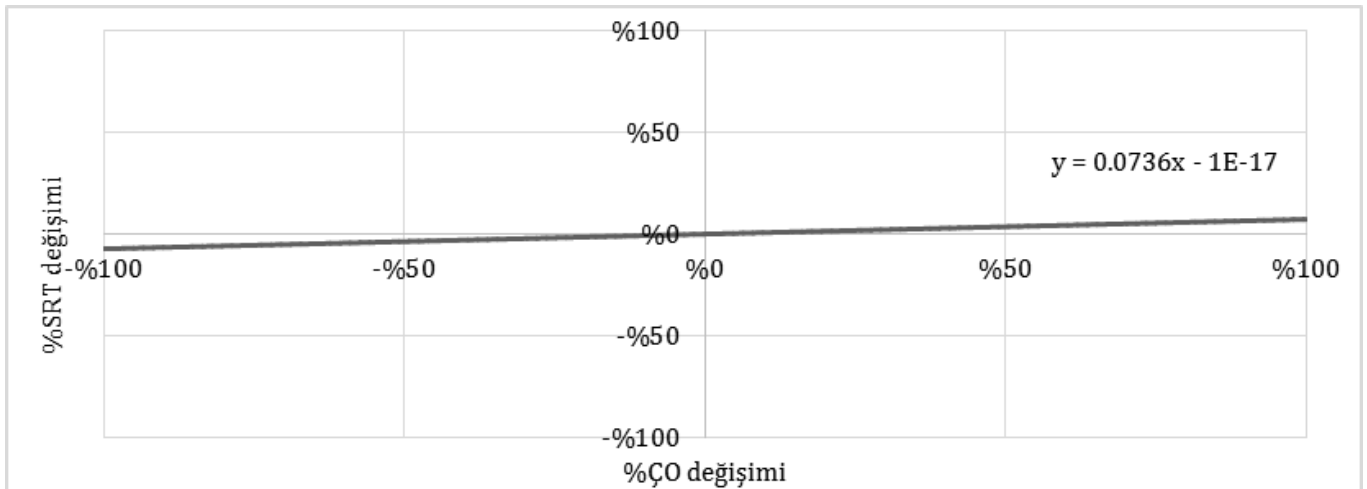
grafiğinden elde edilen denkleme göre, çözünmüş oksijen parametresindeki %10'luk artışa bağlı olarak doğrudan sera gazı emisyonundaki azalma, ancak çamur yaşında %136'lık bir artış ile sağlanabilmektedir. İncelenen iki parametre duyarlılık analizi ile karşılaştırıldığında (Şekil 10), çözünmüş oksijen konsantrasyonundaki değişimin tesisten doğrudan sera gazı emisyonu üzerinde, çamur yaşındaki değişimden daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

3.4 Genel değerlendirme

Bu çalışmada eşdeğer nüfusu 2344000 olan ileri biyolojik atıksu arıtma tesisinden salınan doğrudan sera gazı emisyonunu etkileyen çözünmüş oksijen konsantrasyonu ve çamur yaşı parametreleri incelenmiştir. Çalışmada, doğrudan salınan N₂O emisyon miktarının, doğrudan salınan CH₄'ten oldukça fazla olduğu ve net emisyon miktarında belirleyici olduğu ortaya konulmuştur.

Çalışma sonucunda, artan çamur yaşı ile nitrifikasyonun tamamlanmasına bağlı olarak tanktaki NO₂-N'un birikmesi önlenmediğinden, doğrudan N₂O emisyonunun azaldığı görülmüştür. Sonuçlar değerlendirildiğinde; atıksu arıtma tesislerinde doğrudan sera gazı emisyonunu azaltmak için çamur yaşının nitrifikasyonun tamamlanmasını sağlayacak seviyede (>9 gün) seçilmesi gerekmektedir. Çamur yaşının artması, fazla biyolojik çamur miktarını azaltarak, anaerobik çürütücüde üretilen CH₄ ile kaçak olarak salınan CH₄ gazı miktarının azalmasına neden olmaktadır. Ancak sistemden atılan çamur miktarının az olması, anaerobik çürütücü hacmini azalttığı ve çamur yönetimini kolaylaştırdığı için faydalı olabilmektedir.

İncelenen ileri biyolojik atıksu arıtma tesisinde, havalandırma tankındaki çözünmüş oksijen konsantrasyonu arttıkça, nitrifikasyon havuzundaki AOB denitrifikasyonu ve doğrudan N₂O emisyonunun azaldığı görülmektedir. Nitrifikasyon bölgesinden sera gazı emisyonunu azaltmak için, tankta AOB denitrifikasyonunu engelleyecek kadar çözünmüş oksijen konsantrasyonunun olması önemlidir. Ancak gereğinden fazla havalandırma ile denitrifikasyon prosesi kısmen inhibe edilmekte ve ardından kısmi denitrifikasyonda indirgenemeyen çözünmüş N₂O gazı aerobik tanka taşınarak, atmosfere salınmaktadır.



Şekil 10: Çamur yaşı ve çözünmüş oksijen konsantrasyonu parametrelerinin sera gazı emisyonu üzerine etkilerinin duyarlılık analizi ile karşılaştırılması.

Ayrıca gereğinden fazla havalandırma sonucu geri devir ile anaerobik biyofosfor tankına iletilen çözünmüş oksijenin, fosfor giderimini de olumsuz etkilemesi beklenmektedir. Bu nedenle atıksu arıtma tesisleri aerobik bölgede oksijen seviyesi optimum olacak şekilde (<3 mg/L) işletilmelidir. Duyarlılık analizine göre çözünmüş oksijen konsantrasyonundaki değişimin sera gazı emisyonunu çamur yağındaki değişime göre daha fazla etkilediği sonucuna varılmıştır.

4 Kaynaklar

- [1] IPCC. "Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the IPCC". Geneva, Switzerland, Synthesis Report, 2014.
- [2] Liobikiene G, Butkus M. "The European union possibilities to achieve targets of Europe 2020 and Paris agreement climate policy". *Renewable Energy*, 106, 298-309, 2017.
- [3] IPCC. "2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Emissions Inventories". Institute for Global Environmental Strategies, Japan, 2006.
- [4] Gülhan, H. Eysel Atıksu Arıtma Tesislerinden Kaynaklanan Sera Gazı Salımının Tahmini. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2017.
- [5] Myhre G, Shindell D, Bréon FM, Collins W, Fuglestedt J, Huang J, Koch D, Lamarque JF, Lee D, Mendoza B, Nakajima T, Robock A, Stephens G, Takemura T, Zhang H. "Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change". Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.
- [6] GWRC. "N₂O and CH₄ Emission From Wastewater Collection And Treatment Systems: Technical Report". London, United Kingdom, Global Water Research Coalition Technical Report, 2011.
- [7] Erşahin ME, Dereli RK, Özgün H, Akmırza-Aynur Z, Öztürk İ. "Atıksu arıtma tesislerinde enerji verimliliğinin incelenmesi". *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 380-387, 2017.
- [8] Daelman M, van Voorthuizen E, van Dongen U, Volcke E, van Loosdrecht M. "Methane emission during municipal wastewater Treatment". *Water Research*, 46(11), 3657-3670, 2012.
- [9] Wrage N, Velthof G, van Beusichem M, Oenema O. "Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide". *Soil Biology & Biochemistry*, 33(12-13), 1723-1732, 2001.
- [10] Wunderlin P, Mohn J, Joss A, Emmenegger L, Siegrist H. "Mechanisms of N₂O production in biological wastewater treatment under nitrifying and denitrifying conditions". *Water Research*, 46(4), 1027-1037, 2012.
- [11] Law Y, Ye L, Pan Y, Yuan Z. "Nitrous oxide emissions from wastewater treatment processes". *Philosophical Transactions of The Royal Society*, 367(1593), 1265-1277, 2012.
- [12] Yoshida H, Mønster J, Scheutz C. "Plant-integrated measurement of greenhouse gas emissions from municipal wastewater treatment plant". *Water Research*, 61, 108-118, 2014.
- [13] Shahabadi BM, Yerushalmi L, Haghghat F. "Impact of process design on greenhouse gas (GHG) generation by wastewater treatment plants". *Water Research*, 43(10), 2679-2687, 2009.
- [14] Cakir FY, Stenstrom MK. "Greenhouse gas production: A comparison between aerobic and anaerobic wastewater treatment technology". *Water Research*, 39(17), 4197-4203, 2005.
- [15] Kampschreur MJ, Temmink H, Kleerebezem R, Jetten MSM, van Loosdrecht MCM. "Nitrous oxide emission during wastewater treatment". *Water Research*, 43(17), 4093-4103, 2009.
- [16] Rodriguez-Caballero A, Aymerich I, Poch M, Pijuan M. "Evaluation of process conditions triggering emissions of green-house gases from a biological wastewater treatment system". *Science of the Total Environment*, 493, 384-391, 2014.
- [17] Flores-Alsina X, Corominas L, Snip L, Vanrolleghem PA. "Including greenhouse gas emissions during benchmarking of wastewater treatment plant control strategies". *Water Research*, 45(16), 4700-4710, 2011.
- [18] Hydromantis. "GPS-X Technical Reference-V.6.5.". Hydromantis Environmental Software Solutions, Inc., Canada, 2016.
- [19] Hydromantis. "Webinar: Introduction to GPS-X Greenhouse Gas (GHG) and Carbon Footprint (CF) module". Educational video from Hydromantis Youtube Channel, https://www.youtube.com/watch?v=6OZ2_kb840k&list=PLhan9pNnjFlyt4HUgin5xVmUMihWea1E8&t=1711s&index=37, (07.08.2017).
- [20] WRI & WBCSD. "The GHG Protocol for Project Accounting". World Resources Institute (WRI) and World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) Protocol, Washington, USA, 2005.
- [21] Schulthess RV, Kuehni M, Gujer W. "Release of nitric and nitrous oxides from denitrifying activated sludge". *Water Research*, 29(1), 215-226, 1995.
- [22] Colliver BB, Stephenson T. "Production of nitrogen oxide and dinitrogen oxide by autotrophic nitrifiers". *Biotechnology Advances*, 18(3), 219-232, 2000.
- [23] Ahn JH, Kim S, Park H, Rahm B, Pagilla K, Chandran K. "N₂O Emissions from activated sludge processes, 2008-2009: results of a national monitoring survey in the United States". *Environmental Science and Technology*, 44(12), 4505-4511, 2010.
- [24] Talleca G, Garnier J, Billen G, Gossiaux M. "Nitrous oxide emissions from secondary activated sludge in nitrifying conditions of urban wastewater treatment plants: Effect of oxygenation level". *Water Research*, 40(15), 2972-2980, 2006.
- [25] T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı. "Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği". Ankara, Türkiye, Resmi Gazete Sayısı: 26047, 2006.
- [26] Goreau T, Kaplan W, Wofsy S, McElroy M, Valois F, Watson S. "Production of NO₂ and N₂O by nitrifying bacteria at reduced concentrations of oxygen". *Applied and Environmental Microbiology*, 40(3), 526-532, 1980.