

## Hastane Atıksularının Membran Biyoreaktör’de (MBR) Farklı İşletme Koşullarında Arıtımının Yaşam Döngüsü Etki Analizi ile Karşılaştırılması

Recep PARTAL\*<sup>1</sup>, Selda MURAT HOCAOĞLU<sup>2</sup>, Nevzat Özgü YİĞİT<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, 41470, Kocaeli, Türkiye

<sup>2</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 32200, Isparta, Türkiye

(Alınış / Received: 22.06.2022, Kabul / Accepted: 08.12.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 25.04.2023)

### Anahtar Kelimeler

Eş zamanlı nitrifikasyon-denitrifikasyon,  
Hastane atıksuyu,  
Membran biyoreaktör,  
Ötrofikasyon,  
Yaşam döngüsü etki analizi

**Öz:** Bu çalışmada, tam aerobik ve düşük oksijen konsantrasyonlarında eş zamanlı nitrifikasyon-denitrifikasyon (SND) koşullarında, hastane atıksularını arıtan MBR sisteminin çevresel etkileri Yaşam Döngüsü Etki Analizi (YDEA) ile araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, her iki koşulda da en yüksek çevresel etki tuzlusu ötrofikasyonunda gerçekleşmiştir. Tam aerobik koşullardan SND şartlarına geçildiğinde tatlısu ve tuzlusu ötrofikasyonu için çevresel etkide sırasıyla %30 ve %31 azalma tespit edilmiştir. Enerji tüketiminde %25 azalma gözlenirken, SND şartlarında reaktörden kaynaklanan hava emisyonlarından dolayı küresel ısınma etkisinde %13 artış olabileceği tespit edilmiştir. Tüm etki kategorileri birlikte değerlendirildiğinde, tam aerobik koşullardan SND şartlarına geçişte çevresel etkilerde %30 azalma olacağı tahmin edilmiştir.

## Comparison of Treatment of Hospital Wastewater in Membrane Bioreactor (MBR) under Different Operating Conditions by Life Cycle Impact Analysis

### Keywords

Simultaneous nitrification-denitrification,  
Hospital wastewater,  
Membrane bioreactor,  
Eutrophication,  
Lifecycle impact analysis

**Abstract:** In this study, environmental impacts of the MBR system, which treats hospital wastewater under conditions of full aerobic and simultaneous nitrification-denitrification (SND) at low dissolved oxygen concentrations were investigated by Life Cycle Impact Analysis (LCIA). Our results showed that the highest environmental impact was determined in marine eutrophication in both conditions. The reduction of environmental impacts for freshwater eutrophication and marine eutrophication were calculated at %30 and %31, respectively when the condition changed from fully aerobic to SND. Furthermore, it was determined that a 25% decrease was observed in energy consumption while a 13% increase in the global warming effect was due to air emissions from the SND conditions. When all impact categories are considered together, it is estimated that there will be a 30% reduction in environmental impacts in the transition from fully aerobic condition to SND.

### 1. Giriş

Sağlık kuruluşları, verdikleri hizmete bağlı olarak farklı karakterlerde ve çok çeşitli kirleticiler içeren atıksuların olduğu kuruluşlar olarak ön plana çıkmaktadır. Bu atıksuların içerdikleri farklı kimyasallar, ağır metaller, mikro kirleticiler, dezenfektanlar, deterjanlar, ilaç etken maddeleri ve diğer asit/solventler sebebi ile [1,2], uygun bir şekilde arıtılıp alıcı ortama deşarj edilmeleri önemli bir çevresel konudur. Özellikle, hastane atıksularının doğrudan alıcı ortama deşarj edilmesi gerektiği durumlarda, potansiyel çevresel risklerin önlenmesi için etkin ve verimli arıtma proseslerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun yanı sıra,

deşarj edilen atıksulardaki azot ve fosfor gibi nütrientlerin (besi maddesi) alıcı ortamda ötrofikasyon gibi çevresel sorunlara sebep olması muhtemeldir.

Hastane atıksuları genel olarak Konvansiyonel Aktif Çamur (KAÇ) veya Membran Biyoreaktör (MBR) gibi biyolojik proseslerle arıtılmaktadır [3,4]. MBR teknolojisi, aktif çamur ve membran proseslerin bir kombinasyonu olarak, son yıllarda hastane atıksularının arıtılmasında üzerinde yaygın olarak çalışılan teknolojilerden bir tanesidir. Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) ve *E. coli* gibi bakterilerin yüksek oranda gideriminin yanı sıra, iyi derecede fiziksel dezenfeksiyon da sağlamaktadır. MBR ile

hastane atıksularının arıtılması üzerine yapılan bir çalışmada KOİ, NH<sub>4</sub>-N, bulanıklık ve *E. coli* giderim verimleri sırasıyla %80, %93, %83 ve %98 olarak rapor edilmiştir [5]. Konvansiyonel parametrelerin yanı sıra, ilaç etken maddelerin gideriminde de MBR teknolojisinin üstünlüğü birçok çalışmada vurgulanmıştır [6,7].

Alıcı ortama deşarj yapması ve bir arıtma teknolojisi kullanması muhtemel sağlık kuruluşları için en önemli kriterler arasında, alıcı ortam kalitesini etkilemeyecek seviyede arıtılmış atıksu deşarjı ve düşük enerji maliyetleri yer almaktadır. Atıksu arıtma tesislerinde (AAT) karbon giderimi önemli bir parametre iken, azot ve fosfor gideriminin hedeflenmesi proseslerinin daha kompleks hale gelmesine ve işletimin güçleşmesine yol açabilmektedir. Fakat özellikle düşük debilere sahip AAT'lerde, alıcı ortam bazlı kriter veya özel bir deşarj durumu olmaması halinde genellikle azot ve fosfor gibi nütrientler için bir limit değer bulunmamaktadır [8]. Ancak deşarj edilen nütrientler, alıcı ortamda ötrofikasyon açısından potansiyel bir tehlike oluşturmaktadır. Bu sebeple, nütrient konsantrasyonlarının arıtılmış suda belli limitlerin altına çekilmesi gerekliliği ön plana çıkmaktadır. Arıtılmış atıksu kalitesinin yanı sıra, AAT'ler için enerji tüketimi de önemli kriterlerdendir. AAT'lerde özellikle KAÇ ünitelerinde havalandırma ihtiyacına bağlı olarak önemli derecede enerji tüketimi gerçekleşmektedir. KAÇ proseslerinde olduğu gibi, MBR'de de hem mikrobiyal faaliyetin sürekliliği, hem de membran yüzeyinde sıyırma etkisi ile membran tıkanmasının önüne geçilmesi için havalandırma uygulanmaktadır. Bu sebeple, son yıllarda KAÇ'larda olduğu gibi, MBR'lerde de enerji tüketimini azaltmaya yönelik çalışmalar yürütülmektedir. Özellikle merkezi olmayan AAT'ler için iyi kalitede arıtılmış su deşarj ederken, enerji tüketimini de optimizasyonlarla iyileştirebilecek tekniklere ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun yanı sıra, yeni teknolojiler değerlendirilmeden önce, mevcut teknolojilerin optimizasyonu ve modifikasyonları ile bu gerekliliklerin sağlanması hedeflenmektedir [9].

Hem enerji tüketimini azaltmak hem de nütrient giderim performansını artırmak amacıyla uygulanan modifikasyonlardan bir tanesi Eş Zamanlı Nitrifikasyon ve Denitrifikasyon (Simultaneous Nitrification and Denitrification: SND) uygulamasıdır. Başlangıçta bu proses, bir reaktör içerisinde hem nitrifikasyonun hem de denitrifikasyonun yapılması olarak tanımlanmıştır [10]. Fakat daha sonra yapılan çalışmalarda, düşük oksijen konsantrasyonu uygulaması da bu sürece dâhil edilerek, düşük oksijen konsantrasyonlarında SND prosesi çalışmaları yürütülmeye başlamıştır.

Aktif çamur sistemlerinde yaygın olarak test edilen düşük ÇO konsantrasyonlarında SND prosesinin, son yıllarda MBR teknolojisi için uygulanabilirliği üzerine

çalışmalar sürmektedir [11,12]. SND uygulaması ile toplam azot gideriminin arttığı, enerji ve kimyasal gereksiniminin azaldığı, proses tek bir tankta gerçekleştiği için aerobik ve anoksik tanklara ihtiyaç duyulmadığı ve ek karbon ve alkanite ihtiyacı olmaması gibi avantajlar ön plana çıkarılmıştır [13]. Sandip ve Kalyanraman [14], aerobik bir reaktör içerisinde SND ile %80 üzeri azot giderimi gerçekleştirebileceğini raporlamışlardır. Düşük ÇO konsantrasyonlarında (0,30-0,35 mg/L) nütrient konsantrasyonları yüksek olan tuvalet atıksularının (siyah su) MBR ile arıtılması konusunda yapılan bir çalışmada, nitrifikasyon, denitrifikasyon ve toplam azot giderim verimleri sırasıyla %76, %84 ve %70 olarak gerçekleşmiştir. Çalışmada yüksek denitrifikasyon oranlarının sağlanması ile TN giderim verimi de artış göstermiştir [15]. Düşük çözünmüş oksijen (ÇO) konsantrasyonlarında SND prosesinin MBR'de uygulanması ile havalandırma ihtiyacı azalması bir avantaj olarak öne çıkarken, azalan sıyırma etkisi ile membran tıkanma eğiliminin artması bir dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır. Bunun yanı sıra, çıkış nütrient konsantrasyonlarının düşmesi ile alıcı ortam açısından deşarj edilen su kalitesi iyileştirilirken, aerobik/anoksik reaksiyonlardan kaynaklı hava emisyonu kaynakları olan CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ve N<sub>2</sub>O seviyeleri de değişebilecektir. Tüm avantaj ve dezavantajlar dikkate alındığında, tam aerobik koşullardan SND prosesine geçişte muhtemel çevresel fayda ve zararların karşılaştırılması için bir yöntem ihtiyacı duyulmaktadır. Bu yöntemler arasında en sık kullanılan araç ise Yaşam Döngüsü Analizi (YDA)'dir.

YDA, dünya çapında proses, süreç veya ürünün yanı sıra, atıksu arıtma tesislerinin çevresel performansını değerlendirmek için de geçerli bir araç olarak kullanılmaktadır. Bir tesisin inşaat ömrü boyunca, tüm süreçlerini veya proses özelinde bazı süreçlerini ele alarak çevresel etkilerini değerlendiren bu yaklaşım, arıtma verimi ve deşarj standartları arasında ilişkiler kurmaya ve değerlendirmeye olanak tanır. YDA metodolojisi, kullanılan hammaddeleri, tüketilen kimyasalları, arıtılmış atık su kalitesini, oluşan çamuru, hava emisyonlarını analiz ederek birbiri ile ilişkilendirebilmektedir. YDA çalışması ISO 14040/14044'te tanımlanan aşamalar ile gerçekleştirilmektedir [16]. YDA'nın aşamalarından biri olan Yaşam Döngüsü Etki Analizi (YDEA), çalışmanın kapsamına göre seçilen ve çevresel etkileri belirlenmesi için kullanılan bir YDA aşamasıdır [17].

Bu çalışmada, hastane atıksularının arıtıldığı laboratuvar ölçekli bir MBR sistemi, birisi tam aerobik diğeri ise SND koşullarını sağlayacak şekilde 2 farklı oksijen konsantrasyonunda işletilmiş ve çevresel etkileri karşılaştırılmıştır. İlk aşamada (Faz-1), reaktör ÇO konsantrasyonu >5mg/L, ikinci aşamada ise (Faz-2) SND koşullarında ÇO=0,3 mg/L şartlarında işletim gerçekleştirilmiştir. Her fazda,

arıtılmış suda KOİ, toplam azot, amonyum azotu, nitrit azotu ve nitrat azotu konsantrasyonları analiz edilmiştir. Özellikle alıcı ortamda ötrofikasyona sebep olan azot ve KOİ gibi parametrelerin, standart işletim koşullarından SND'ye geçiş ile analiz edilen konsantrasyonlarına göre hesaplanan çevresel etkileri, YDEA'da yer alan tatlısu ötrofikasyonu ve tuzlusu ötrofikasyonu etki kategorilerinde değerlendirilmiştir. Buna ek olarak, SND koşullarına geçişte enerji tüketimi ile ilgili de literatür verileri göz önüne alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Enerji tüketimi ve nütrient deşarjının yanı sıra, küresel ısınmaya katkı veren hava emisyonlarının oluşması dikkate alınarak Faz-1 ve Faz-2'nin çevresel etkileri, bütüncül bir yaklaşımla, YDA'nın üçüncü aşaması olan YDEA ile gerçekleştirilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında, bir devlet hastanesi atıksuyundan numuneler alınarak, MBR'de birisi tam aerobik diğeri ise SND koşullarını sağlayacak şekilde iki farklı işletme koşulunda deneysel çalışmalar yürütülmüştür. YDA metodolojisi ile çevresel etkilerin değerlendirilmesi amacıyla, tatlısu ve tuzlusu ötrofikasyonu etki kategorisi için MBR çıkış suyunda analiz edilen azotlu bileşikler ve KOİ analiz sonuçları kullanılmış, küresel ısınma ve enerji tüketimi etki kategorisi için veriler literatürdeki çalışmalardan derlenerek hesaplanmıştır.

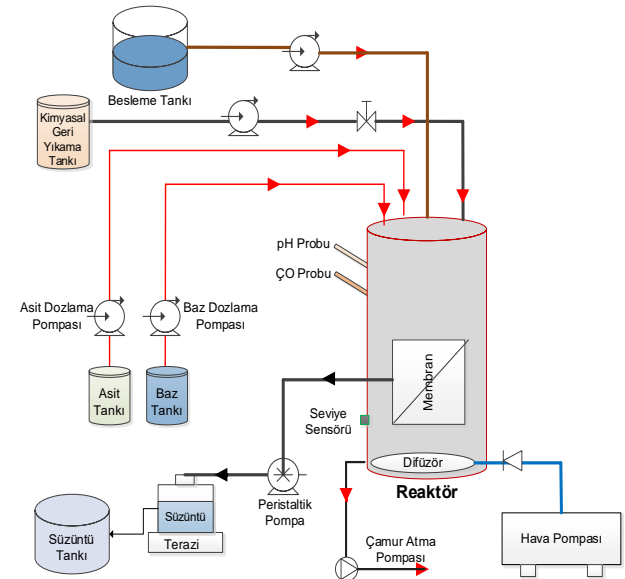
### 2.1. Atıksu numunesi ve analitik parametreler

MBR besleme atıksu numunesi, 201 yataklı, yıl genelindeki yatak doluluk oranı %65 seviyesinde olan bir devlet hastanesi atıksularının toplandığı rögar bağlantı noktasından (kanalizasyon hattına karışmadan önce) 24 saatlik kompozit numune şeklinde alınmıştır. Hastanenin ortalama su tüketimi 135 m<sup>3</sup>/gün civarındadır. Hastanede oluşan atıksular, poliklinik hastaları, çalışanlar, yatan hastalar tarafından insani faaliyetler sonucu oluşan atıksular ve mutfak/çamaşırhane, ameliyathane, tanı/teşhis birimleri ve endoskopi gibi bölümlerin yanı sıra, sterilizasyon ve yüzey temizleme işlemlerinde yıkama vb. amaçlı su kullanımı sonucunda oluşturmaktadır.

Çalışma kapsamında MBR reaktörü, giriş atıksuyu ve arıtılmış atıksuda analizler gerçekleştirilmiştir. pH ve ÇO parametreleri HACH HQ40d multimetre ile takip edilmiştir. Askıda Katı Madde (AKM), Uçucu Askıda Katı Madde (UAKM), bulanıklık, Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ<sub>5</sub>) parametreleri Standart Metotta ilgili yöntemlere göre gerçekleştirilmiştir [18]. Toplam Kjeldahl Azotu (TKN) ve Amonyum Azotu (NH<sub>4</sub>-N) distilasyon ve titrimetrik yöntem ile Standart Metot'a göre gerçekleştirilmiştir. Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ), Nitrit Azotu (NO<sub>2</sub>-N) ve Nitrat Azotu (NO<sub>3</sub>-N) Merck Prove 600 spektrofotometresinde Cell Test kiti ve metodu kullanılarak yapılmıştır.

## 2.2. Membran biyoreaktör (MBR) ve işletme koşulları

Çalışmada, laboratuvar ölçekli MBR sistemi besleme tankı, reaktör, karıştırıcı, membran yıkama pompaları ve tankları, arıtılmış su tankı ve terazisi ile kontrol ünitesinden oluşmuştur (Şekil 1). SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) ile kontrol edilen MBR sistemi, reaktör içerisindeki pH probu ve çözülmüş oksijen probu, reaktör su yüksekliğini (seviyesini) ölçen sensör, trans membran basıncını (TMP) ölçen sensör sisteme ilgili tüm bilgileri bilgisayar üzerinden eşzamanlı (online) olarak aktarmakta ve tam otomasyon ile kontrol imkânı sunmaktadır. Tüm pompaların çalışması ve havalandırma SCADA yazılımı vasıtasıyla otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Bunun yanı sıra, reaktörde hedeflenen ÇO konsantrasyonunun sabit tutulabilmesi için yazılımla kontrol sağlanmıştır. Reaktördeki oksijen probu, Hava Debisi Kontrol Cihazları ile (Mass Flow Controller, MFC) iletişim kurmakta, bu sayede hedeflenen oksijen konsantrasyonuna göre, MFC sistemleri hava debisini kademeli ve kontrollü olarak azaltıp yükseltebilmektedir. Oksijen seviyesindeki salınımların azaltılması ve düzeltilmesi için Proportional Integral Derivative Controller (PID controller), Türkçe karşılığı ile Oransal-İntegral-Türevsel denetleyici kontrol döngüsü kullanılmıştır.



Şekil 1. Laboratuvar ölçekli MBR sistemi planı

Çalışma kapsamında MBR iki farklı koşulda işletilmiştir. 1.Faz'da, >5 mg/L ÇO koşullarında tam aerobik olarak, 2. Faz 'da ise 0,3-0,4 mg/L düşük ÇO konsantrasyonlarında işletim gerçekleştirilerek, azotlu bileşiklerin giderim performansları değerlendirilmiştir. Her iki fazda da çamur yaşı (SRT) 60 gün ve hedef akı 12-15 L/m<sup>2</sup>-h (lmh) olarak seçilmiştir. Her iki işletim koşulunda da reaktöre günlük aynı miktarda (20 L) atıksu beslenmiştir.

Sistemde toplam 0,04 m<sup>2</sup> yüzey alanına sahip, polietersülfon (PES) malzemeden üretilmiş, 0,24 µm gözenek çapına sahip membran modülü kullanılmıştır. Uygulanan işletim döngüsü 9 dakika filtrasyon 1 dakika dinlendirme modundan oluşmuştur. Fazlar arasında membran için kimyasal temizlik prosedürü uygulanmıştır.

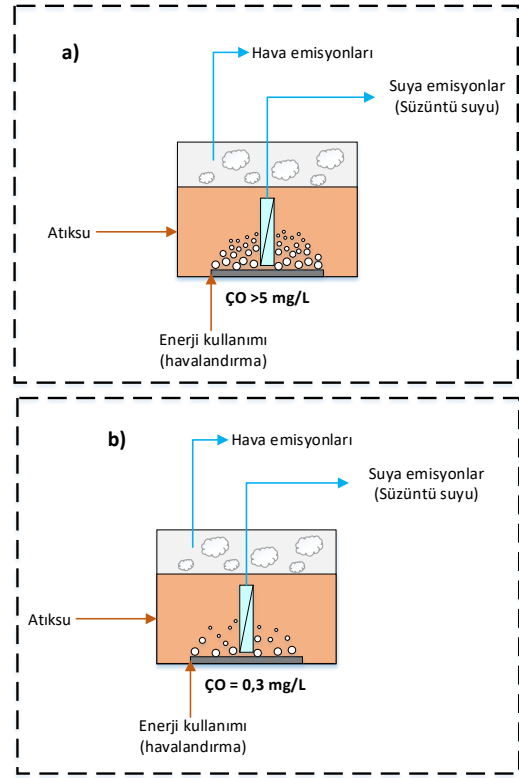
Reaktörün ilk işletmeye alınması aşamasında kullanılacak aşı çamuru, kentsel atıksu arıtma tesisinden alınmıştır. Tesis seçilirken, evsel, endüstriyel ve hastane atıksuyunun karıştığı bir atıksu arıtma tesisi tercih edilmiş ve aşı çamuru arıtma tesisinin son çökeltim havuzu geri devir hattından temin edilmiştir. Reaktör, doğrudan yüksek MLSS konsantrasyonlarında başlayacak şekilde aşı çamuru ile beslenmiştir. Ardından aklımasyon sağlanabilmesi için hastane atıksuyu reaktöre beslenmiş ve reaktörün dengeye gelmesi için 30 gün süre ile reaktörde MLSS konsantrasyonları takip edilmiştir. Reaktörün dengeye gelmesi sonrasında, önce Faz-1, sonrasında Faz-2 koşullarında sistem çalıştırılmıştır. Faz 2'ye geçişte kararlı koşulların sağlanması için sistem 60 gün süre ile düşük ÇO konsantrasyonlarında işletilmiş ve reaktörde MLSS takibi yapılmıştır.

### 2.3. Yaşam döngüsü analizi (YDA)

Çalışmada, çevresel etkilerin karşılaştırılması, ISO 14040'ta tanımlanan YDA'nın, YDEA aşaması kullanılarak gerçekleştirilmiştir [16]. Çalışma kapsamında proses bazında değerlendirme yapılmış ve sistem sınırları "kapıdan kapıya" seçilmiştir. Bu çalışmada YDA kullanılmasının amacı, enerji tüketimi, sucul ortama yapılan kirlilik yükleri ve hava emisyonlarının birlikte karakterize edilip, toplam etkilerin belirlenmesi ve çevresel etkilerin karşılaştırmasının yapılabilmesidir. YDA, amaç ve kapsamın belirlenmesi, envanter analizi, etki değerlendirme ve yorumlama olarak 4 aşamadan oluşmaktadır. Çalışmanın aşamaları, etki kategorileri ve karakterizasyon faktörleri (KF) ile envanter analizi detayları aşağıda sunulmuştur.

#### 2.3.1. Amaç ve kapsam

Çalışmanın amacı, farklı koşullarda işletilen MBR'nin çevresel etkilerinin karşılaştırılmasıdır. Tek bir proses dikkate alındığı için sistem sınırları "kapıdan kapıya" olarak tanımlanmıştır. Fonksiyonel birim 1 m<sup>3</sup> arıtılmış su olarak belirlenmiştir. Belirlenen kirlenici konsantrasyonları (mg/L türünden), fonksiyonel birimde tanımlanan 1 m<sup>3</sup> arıtılmış atıksu için oluşan kirlilik yükünün hesaplanabilmesi açısından, kg-yük birimine dönüştürülmüştür (kg KOİ/m<sup>3</sup>, kg NH<sub>4</sub>/m<sup>3</sup> vb.). Çalışmanın sistem sınırları Şekil 2'de gösterilmiştir. İnşaat, nakliye ve membranların değişimi gibi detay arka plan prosesleri bu çalışma kapsamı dışında tutulmuştur.



Şekil 2. YDA sistem sınırları a) Faz-1: ÇO > 5 mg/L b) Faz-2: ÇO = 0,3 mg/L koşulları

#### 2.3.2. Envanter Analizi

Tatlısu ve tuzlusu ötrofikasyonu etki kategorilerinin hesaplanabilmesi için MBR çıkış suyu konsantrasyonları (azotlu bileşikler ve toplam azot, KOİ gibi parametreler) atıksu analizleri ile tespit edilmiştir. Ölçülemeyen fakat etki değerlendirmede kullanılan enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları etki kategorisi için literatür verileri ve bazı hesaplamalar kullanılmıştır. MBR'de enerji tüketimlerinin işletme ve konfigürasyona bağlı olarak 0,4-1,3 kWh arasında değiştiği belirtilmiştir [19-21]. Bu çalışma kapsamında, MBR'de tam aerobik (ÇO > 5 mg/L) koşullarda enerji tüketimi, literatür ortalaması olarak 0,71 kWh/m<sup>3</sup> olarak seçilmiş, bununla birlikte alt sınır ve üst sınır değerleri (0,4 ve 1,3 kWh/m<sup>3</sup>) kullanılarak enerji tüketimi etki kategorisi diğer çevresel etki kategorileri ile karşılaştırılmıştır. Düşük ÇO konsantrasyonlarında SND şartlarında ise enerji tüketimlerinin tam aerobik koşullara göre %25-30 civarında azalabildiği gözlenmiştir [22,23]. Bu çalışmada, SND prosesine geçiş ile %25 enerji tasarrufu sağlanabileceği kabul edilerek, enerji tüketimi etkisi değerlendirilmiştir.

Sera gazı emisyonu etki kategorisinin hesaplanması için hava emisyonlarından CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ve N<sub>2</sub>O dikkate alınmıştır. CH<sub>4</sub> ve N<sub>2</sub>O verileri, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından yayınlanan Türkiye Sera Gazı Envanteri Raporu'ndan temin edilmiştir [24]. CO<sub>2</sub> emisyonunun hesaplanmasında, kg KOİ oksidasyonu sonucu oluşan yaklaşık 0,08 kg CO<sub>2</sub>

emisyonu değeri dikkate alınmıştır [25,26]. Böylece, bu çalışmada tespit edilen KOİ kirlilik yükü verisi ile oluşabilecek CO<sub>2</sub> miktarı hesaplanmıştır. Ayrıca enerji tüketiminden kaynaklı CO<sub>2</sub> miktarı da hesaba dahil edilerek, 1 kWh elektrik enerjisi üretimi için yaklaşık 0,58 kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri emisyon oluşacağı dikkate alınmıştır [27]. CH<sub>4</sub> için ise, kg KOİ oksidasyonu sonucu yaklaşık 0,15 kg CH<sub>4</sub> oluştuğu raporlanmıştır. N<sub>2</sub>O parametresi ise yüksek ve düşük ÇO konsantrasyonlarında en çok değişkenlik gösteren ve küresel ısınma etkisine KF olarak CO<sub>2</sub>'den 296 kat daha fazla katkıda bulunan bir parametredir. Bu emisyonun tahmini için Denklem 1'deki bağıntı kullanılmıştır [24].

$$N_2O_{emisyon} = N_{çıkış} \times EF_{çıkış} \times 44/28 \quad (1)$$

N<sub>2</sub>O<sub>emisyon</sub>: Oluşacak N<sub>2</sub>O emisyonu, kg N<sub>2</sub>O/yıl  
N<sub>çıkış</sub>: Sucul ortama deşarj edilen azot konsantrasyonu, kg N/yıl  
EF<sub>çıkış</sub>: Atıksuya deşarj edilen N<sub>2</sub>O için emisyon faktörü, kg N<sub>2</sub>O-N/kg N  
44/28: N<sub>2</sub>O-N'in N<sub>2</sub>O dönüşüm faktörü

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) dokümanından yararlanılarak, emisyon faktörünün (EF) 0,005 kg N<sub>2</sub>O-N/kg-N olarak seçildiği belirtilmiştir. Bu çalışmada da bu değer ile hesaplamalar yapılmıştır [24].

**Tablo 1.** Etki kategorileri ve karakterizasyon faktörleri

Enerji Tüketimi	Karakterizasyon Faktörü (KF)	Karakterize Etki (KE) Birimi	Etki Değerlendirme Metodu
<b>Elektrik Enerjisi</b>	1	TEP	Kaynak tüketimi/Genel
<b>Tatlısu Ötrofikasyonu</b>			
PO <sub>4</sub>	1		
KOİ	0,022		
NH <sub>4</sub>	0,35	kg PO <sub>4</sub> -eşdeğer	CML 2001
NO <sub>2</sub>	0,1		
NO <sub>3</sub>	0,1		
TN	0,42		
<b>Tuzlusu Ötrofikasyonu</b>			
TN	1		
KOİ	0,05		
NH <sub>4</sub>	0,78	kg N-eşdeğer	TRACI 2.1
NO <sub>2</sub>	0,3		
NO <sub>3</sub>	0,23		
<b>Küresel Isınma</b>			
CO <sub>2</sub>	1		
CH <sub>4</sub>	25	kg CO <sub>2</sub> -eşdeğer	IPCC 2007-GWP100a
N <sub>2</sub> O	296		

Bu çalışmada, Türkiye nüfusu dikkate alınarak, NR'ler Denklem 2 ile hesaplanmıştır.

$$NR_i = \frac{\sum_1^m m_i \times EF_i}{N} \quad (2)$$

NR<sub>i</sub>: i etki kategorisi için normalizasyon referansı, kg eşdeğer bileşen /kişi-yıl  
m<sub>i</sub>: bileşenin emisyon miktarı, kg/yıl  
EF<sub>i</sub>: bileşenin karakterizasyon faktörü  
N: Nüfus, kişi

### 2.3.3. Etki değerlendirme

Etki değerlendirme kapsamında, MBR'nin farklı işletme koşullarında oluşturacağı çevresel etkilerin karşılaştırılması için 4 farklı etki kategorisi seçilmiştir. Bunlar; deşarj edilen atıksudaki nütrientlerin sebep olduğu tatlısu ötrofikasyonu ve tuzlusu ötrofikasyonu, kaynak kullanımı (enerji tüketimi) ve küresel ısınma-100 yıl'dır. Enerji tüketimi etkisi küresel-bölgesel-yerel olarak, ötrofikasyon etkileri yerel olarak ve küresel ısınma etkisi küresel ölçekte seçilmiştir. Çevresel etki kategorilerini oluşturan parametreleri, etki kategorilerinin birimlerine dönüştürmek amacıyla KF'ler kullanılmıştır. Bu faktörler, ReCiPe, CML, IPCC, TRACI gibi etki değerlendirme metodlarında tanımlanmıştır. Etki kategorileri ve kullanılan KF'ler Tablo 1'de verilmiştir.

Her bir çevresel etki kategorisinin kendi içerisinde hesaplanan karakterize etkilerinin (KE) rakamsal boyutları birbirinden farklılık gösterdiğinden, farklı etki kategorilerini aynı ölçekte gösterebilmek için, KE'ler Normalizasyon Referansları (NR) ile çarpılarak Normalize Etkilere (NE) dönüştürülmüş ve bu çalışmaya özgü NE'ler hesaplanmıştır. İlgili etki kategorisi oluşturan parametrelere ait toplam KE, bir bölge, ülke veya dünya nüfusuna bölünerek NF'ler hesaplanmaktadır.

Tatlı ve tuzlu su ötrofikasyonu için NR'ler hesaplanırken, belediyelere bağlı AAT'lerden tatlısu ve tuzlu sulara deşarj edilen atıksu miktarları dikkate alınmıştır [28]. Etki kategorilerini oluşturan her parametre için Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY) Tablo 2'si, Tablo 2'de yer almayan parametreler için SKKY Tablo 1'deki limit değerler seviyesinde deşarj yapıldığı kabul edilmiştir [8]. Dolayısıyla "KF x SKKY limit değer x deşarj edilen atıksu miktarı" hesabı, ilgili parametrenin KE'sinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Her parametrenin

KE'si toplanarak toplam nüfusa bölünmüş ve NR'ler hesaplanmıştır. Enerji tüketimi (elektrik enerjisi) için NR, Türkiye'deki biyolojik olarak arıtılan atıksu miktarı [28] ve literatürden derlenen AAT'lerdeki KAÇ spesifik enerji tüketimi verisi (ortalama 0,5 kWh/m<sup>3</sup>) dikkate alınarak hesaplanmıştır. Biyolojik olarak arıtılan yıllık atıksu miktarı ile spesifik enerji tüketimi çarpılarak, yıllık enerji tüketimi belirlenmiştir. AAT'lerde tüketilen yıllık elektrik enerjisi değeri nüfus değerine bölünerek, enerji tüketimi etki kategorisi için NR hesaplanmıştır. Küresel ısınma etkisinin, sadece arıtma sırasında biyolojik reaktörden salınan emisyonlardan kaynakladığı kabul edilmiştir. Hava emisyonları ile ilgili olarak, Türkiye'de kentsel AAT'lerden 2018 yılında salınan CH<sub>4</sub> ve N<sub>2</sub>O emisyonu miktarları [24] ile KF çarpılarak KE'ler belirlenmiştir. AAT'lerden yıllık salınan CO<sub>2</sub> hesabında, kg KOİ oksidasyonu ile oluşacak CO<sub>2</sub> miktarı (0,08 kg), biyolojik olarak yıllık arıtılan atıksu miktarı, kentsel AAT ortalama giriş KOİ konsantrasyonu (500 mg/L kabul edilmiştir) verileri hesaplamalarda kullanılmıştır. Bu veriler yardımıyla yıllık okside edildiği tahmin edilen KOİ yükü ve buna bağlı olarak oluşacak CO<sub>2</sub> emisyonu hesaplanmıştır.

### 2.3.4. Yorumlama

Hesaplanan NE'ler ile çevresel etkiler kendi içerisinde ve birbirleri ile kıyaslanarak karşılaştırılmıştır. Bu sayede enerji, su ve hava emisyonları birbiri ile aynı ölçekte karşılaştırılabilir ve etkilerin boyutları tespit edilmiştir. Envanter analizinde yer almayan kriterler için öneriler sunulmuş ve mevcut verilerin etki değerlendirme süreci üzerinde etkileri tartışılmıştır.

## 3. Bulgular

Bu çalışmada, hastane atıksu karakterizasyonu ve MBR performansı değerlendirilerek, ardından birisi tam aerobik diğeri SND koşullarında işletimin çevresel etkileri karşılaştırılmıştır.

### 3.1. Atıksu karakterizasyonu ve MBR performansının değerlendirilmesi

MBR sisteminin her iki koşulda işletimi süresince giriş atıksuyunun fizikokimyasal karakterizasyonu için ortalama değerler literatür ile karşılaştırmalı olarak Tablo 2'de verilmiştir. Her iki işletim koşulunda da konvansiyonel parametreler açısından yüksek farklılıklar gözlenmemiştir. Tespit edilen değerler, çoğunlukla literatürde verilen değer aralıklarında yer almaktadır. İki işletim koşulu karşılaştırıldığında, her iki durumda da KOİ giderim verimi >%90 mertebelerindedir. Bu bulgu, tam aerobik ve SND koşullarından bağımsız olarak, KOİ gideriminin yüksek seviyelerde gerçekleştiğini göstermektedir. Düşük ÇO şartlarında KOİ giderim verimlerinin, aerobik koşullardaki giderim verimlerine benzer olduğu yapılan çalışmalarda raporlanmıştır [11]. Tam aerobik koşullarda NH<sub>4</sub>-N giderim verimi %92 iken, SND koşullarında geçişte ÇO konsantrasyonlarının düşmesi ile giderim verimleri %65'e gerilemiştir. Toplam azot parametresinde ise tam aerobik koşullarda giderim verimi %15 iken, SND koşullarına geçişte %51 seviyesine yükselmiştir. Bu sonuçlar, SND koşullarına geçişte deşarj edilen atıksudaki TN konsantrasyonunun düştüğüne işaret etmektedir. SND'ye geçişte gözlenen bir diğer bulgu ise, NO<sub>3</sub>-N konsantrasyonlarıdır. Tam aerobik koşullarda çıkışta NO<sub>3</sub>-N konsantrasyonu 40 mg/L iken, SND koşullarında 11 mg/L seviyelerine düşmüştür. SND prosesine geçişte azalan oksijen konsantrasyonu ile nitrifikasyon performansı düşmüş, buna bağlı olarak da ortaya çıkan NO<sub>3</sub>-N konsantrasyonu düşüş göstermiştir. Bu durum aynı zamanda TN konsantrasyonlarına da yansımıştır. Sonuç olarak nitrifikasyon performansı düşüş gösterirken, arıtılan atıksudaki TN konsantrasyonu da düşüş göstermiş, bu durum deşarj edilen azot yükünü azaltmıştır.

**Tablo 2.** Hastane atıksuyunun konvansiyonel parametreler açısından karakterizasyonu

	Faz-1: ÇO >6 mg/L		Faz-2: ÇO=0,3 mg/L		Ham Hastane atıksuyu- Literatür	Kaynak
	Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış		
KOİ, mg/L	524	27	506	44	263-2325	[29]
NH <sub>4</sub> -N, mg/L	47	3,8	54	19	53-155	[29]
NO <sub>2</sub> -N, mg/L	0,15	0,4	0,25	0,28	0,1-0,58	[30]
NO <sub>3</sub> -N, mg/L	1,15	40	0,47	11	0-16,4	[30]
NH <sub>4</sub> , mg/L	61	4,9	69	24	68-2976	[29]
NO <sub>2</sub> , mg/L	0,49	1,31	0,82	0,92	0,1-0,6	[31]
NO <sub>3</sub> , mg/L	5,1	176	2,1	50	1-2	[31]
TKN, mg/L	53	5,9	61	21	38-105	[29]
TN, mg/L	54	46	62	31	60-230	[31]

### 3.2. Çevresel etkilerin değerlendirilmesi ve karşılaştırılması

Arıtılabilirlik çalışmasında tespit edilen çıkış suyu konsantrasyonları dikkate alınarak, YDEA metodolojisine göre her iki işletme koşulunun çevresel etkileri farklı etki kategorilerinde karşılaştırılmıştır. Envanter verileri için kullanılan

kaynaklar Tablo 3'te özetlenmiştir. Tatlısu ve Tuzlusu Ötrofikasyonu etki kategorilerine katkı veren parametreler MBR çalışmasının hem Faz-1 hem de Faz-2'sinde analizler ile tespit edilmiştir. Enerji tüketimi ve küresel ısınma etki kategorisi için değerler literatür verilerinden ve hesaplamalar ile belirlenmiştir.

**Tablo 3.** Envanter analizinde kullanılan parametrelere ait açıklamalar

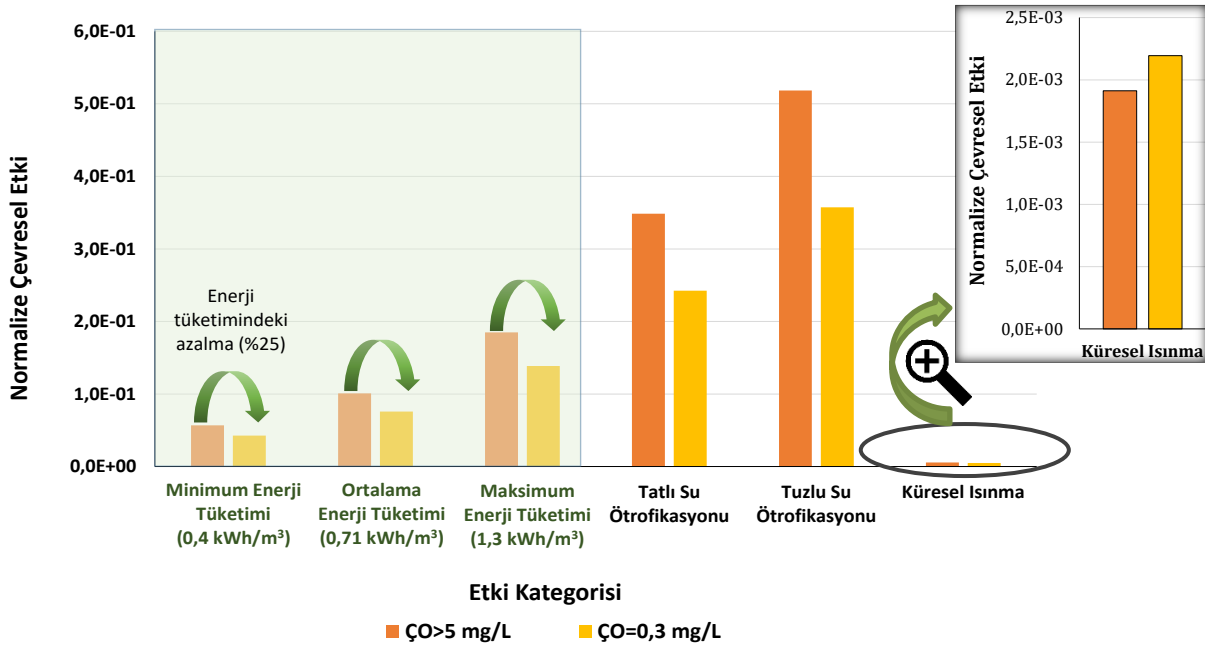
Etki Kategorisi	Parametre	Veri Kaynağı	Açıklama	Değer	Kaynak
<b>Enerji Tüketimi</b>	Elektrik Enerjisi	Literatür	MBR sistemlerinde enerji tüketimleri değişkenlik göstermekle birlikte, literatürde tespit edilen rakamlar 0,4-1,3 kWh/m <sup>3</sup> aralığında değişkenlik göstermektedir.	kWh/m <sup>3</sup>	
				0,65	[34]
				0,8-1,1	[19]
				0,6-1,3	[20]
				0,5	[35]
0,4-0,6	[21]				
<b>Tatlısu Ötrofikasyonu</b>	KOİ NH <sub>4</sub> NO <sub>2</sub> NO <sub>3</sub> TN	Faz-1 ve Faz-2 MBR çıkış suyu analiz sonuçları	İşletim süresince, ÇO>5 mg/L ve ÇO=0,3 mg/L koşullarında çıkış suyunda analiz edilen parametrelerdir.	mg/L (Faz-1 - Faz-2)	
				26,5-44	
				4,9-24,4	Bu çalışma sonuçları
				1,31-0,92	
				176-50	
46-30,5					
<b>Tuzlusu Ötrofikasyonu</b>	TN KOİ NH <sub>4</sub> NO <sub>2</sub> NO <sub>3</sub>	Faz-1 ve Faz-2 MBR çıkış suyu analiz sonuçları	İşletim süresince, ÇO>5 mg/L ve ÇO=0,3 mg/L koşullarında çıkış suyunda analiz edilen parametrelerdir.	mg/L (Faz-1 - Faz-2)	
				46-30,5	
				26,5-44	Bu çalışma sonuçları
				4,9-24,4	
				1,31-0,92	
176-50					
<b>Küresel Isınma</b>	CO <sub>2</sub> CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O	Tez ve literatür verileri ile hesaplama	KOİ oksidasyonundan kaynaklı CO <sub>2</sub> emisyonu, kg CO <sub>2</sub> /kg KOİ olarak çalışmalarda belirtilmiştir. CH <sub>4</sub> için emisyon faktörü, kg CH <sub>4</sub> /kg BOİ veya kg KOİ üzerinden hesaplanabilir. Çıkış suyunda analiz edilen ve sucul ortama deşarj edilen N konsantrasyonuna bağlı olarak, TÜİK (2020) raporunda verilen hesaplama yöntemi ile tespit edilmiştir.	0,08	[25,26]
				0,15	[24]
				ÇO konsantrasyonuna göre değişken	[24]

Bir sonraki adım, tespit edilen konsantrasyonların ve değerlerin karakterize edilerek çevresel etki kategorilerinin birimlerine dönüştürülmesidir. Çalışmada belirlenen karakterize çevresel etkiler ve normalize çevresel etkiler Tablo 4'te özetlenmiştir. Tatlısu ötrofikasyonu etki kategorisinin karakterize çevresel etkisi kg PO<sub>4</sub>-eşdeğer/kg birimi ile ifade edildiği için, KF'si 1'dir. PO<sub>4</sub>'ün düşük ÇO konsantrasyonlarında gideriminin, aerobik koşullara göre çok değişkenlik göstermediği kabul edilerek, her iki işletim koşulunda da PO<sub>4</sub>'ün benzer seviyelerde giderileceği varsayılmıştır. Bu sebeple, iki farklı koşulda deşarj edilen atıksudaki PO<sub>4</sub> konsantrasyonunun değişmeyeceği dikkate alınarak, bu parametre kapsam dışı tutulmuştur. Enerji tüketimi etki kategorisinin hesaplanması için kWh değeri Ton Eşdeğer Petrol (TEP) birimine dönüştürülmüştür ve Faz-2'de havalandırma ihtiyacının azalmasına bağlı olarak elektrik enerjisi

tüketiminin %25 azalacağı kabul edilmiştir. Tam aerobik koşullardan, düşük ÇO şartlarında SND prosesine geçiş ile enerji tüketimi azalırken, suya verilen NH<sub>4</sub> konsantrasyonu bir miktar artmakta ve NO<sub>3</sub> konsantrasyonu azalmaktadır. SND mekanizmasından dolayı toplam azot konsantrasyonunda azalma tespit edilmiştir. Bu sebeple, farklı parametrelerdeki değişimlerin toplam çevresel etkiler üzerinde yarattığı eğilimler gözlemlenmiştir. Her iki fazda, normalize edilmemiş durumda KE'lerin büyüklük sıralaması küresel ısınma>tuzlusu ötrofikasyonu>tatlısu ötrofikasyonu>enerji tüketimi şeklindedir. Ancak normalize edilen değerlere bakıldığında sıralama, tuzlusu ötrofikasyonu> tatlısu ötrofikasyonu> enerji tüketimi> küresel ısınmadır (Tablo 4). Bu farklılıkların nedeni, hesaplanan NR'lerdir. Küresel ısınma için gerekli NR hesabı yapılırken Türkiye'deki AAT'lerden kaynaklı emisyonlar dikkate alınmıştır.

Bu bulgular, YDEA çalışmalarında bölgesel veya yerel bir değerlendirme yapıldığında NR'lerin önemini göstermektedir. Mevcut durumda dört etki kategorisinde normalize çevresel etkiler karşılaştırıldığında, en yüksek çevresel etki tuzlusu ötrofikasyonu kategorisindedir. Bu sırayı, tatlısu ötrofikasyonu, enerji tüketimi ve küresel ısınma etkileri takip etmiştir (Şekil 3). En yüksek etkinin tuzlusu ötrofikasyonunda gözlenmesinin sebebi, deşarj edilecek olan azotlu bileşiklerin karakterize çevresel etkilerinin yüksek seviyelerde olmasıdır. Bu tespit, Lopes vd. [17] bulguları ile de uyumludur. Tam aerobik koşullardan SND koşullarına geçişte, arıtılmış suda TN konsantrasyonu düştüğünden, SND şartlarında tüm etki kategorilerinde azalma gözlenmiştir.

Enerji tüketiminin etkisini net olarak belirlemek amacıyla, MBR teknolojisi için literatürde tespit edilen ve Tablo 3'te verilen minimum, ortalama ve maksimum enerji tüketim değerleri (0,4 kWh/m<sup>3</sup>, 0,71 kWh/m<sup>3</sup>, 1,3 kWh/m<sup>3</sup>) ile hesaplanan normalize çevresel etkiler Şekil 3'te gösterilmiştir. Buna göre maksimum enerji tüketiminde dahi, MBR'de tam aerobik koşullarda tespit edilen NE 1,85E-01'dir. Bu değer, tatlısu ötrofikasyonu için tam aerobik koşullarda tespit edilen 3,48E-01 değerinden 1,9 kat daha düşüktür. Dolayısıyla, maksimum enerji tüketimlerinde dahi, enerji tüketiminin etkisi tatlı ve tuzlusu ötrofikasyonu etkisinden düşük, küresel ısınma etkisinden büyüktür.



Şekil 3. Faz-1 ve Faz-2'nin normalize çevresel etkilerinin karşılaştırılması

Tam aerobik koşullardan SND şartlarına geçişte, enerji tüketimi ve tatlı/tuzlusu ötrofikasyonu etkilerinde azalma tespit edilirken, küresel ısınma etkisinde negatif yönde bir eğilim gözlenmiştir. Bu durum, düşük ÇO şartlarında artan N<sub>2</sub>O konsantrasyonlarında ve N<sub>2</sub>O'nun CO<sub>2</sub>'den 296 kat daha küresel ısınmaya katkı vermesinden kaynaklanmaktadır. Düşük ÇO şartlarında N<sub>2</sub>O'nun arttığı daha önceki bilimsel çalışmalarda raporlanmıştır [32,33]

Her bir etki kategorisinde tespit edilen NE'lerin toplam değeri, toplam çevresel etki olarak ifade edilebilmektedir. Tam aerobik işletim koşullarından düşük ÇO şartlarında SND prosesine geçildiğinde hesaplanan çevresel etkilerin toplam değerleri ve aerobik koşullardan SND koşullarına geçişte belirlenen azalma ve artış oranları Tablo 5'te verilmiştir. Buna göre, Enerji tüketiminde %25 (kabul edilen azalma oranı kadar), tatlısu ve tuzlusu ötrofikasyonunda sırasıyla %30 ve %31

azalma olabileceği tahmin edilmektedir. Bunun yanı sıra küresel ısınma etkisinde %13 oranında bir artış olacağı gözlenmiştir. Bütüncül bir değerlendirme ile toplam çevresel etkinin %30 oranında azalacağını söylemek mümkündür (Tablo 5).

Bu çalışmadaki YDEA kapsamında, konvansiyonel parametreler dikkate alınarak çevresel etkiler karşılaştırılmıştır. MBR'lerin konvansiyonel parametrelerde olduğu kadar, mikrokirleticilerin gideriminde etkili olduğu dikkate alınarak, deşarj edilen atıksudaki kimyasallar ve mikrokirleticiler gibi diğer parametrelerin YDEA kapsamında değerlendirilmesi ile insan sağlığı, toksisite ve sucul toksisite gibi farklı etki kategorileri için hesaplamalar yapılabilir. Bu durumda, genişleyen sistem sınırları ile daha temsil edici sonuçlar almak mümkündür.



**Tablo 4.** Hesaplanan normalizasyon referansları ve normalize çevresel etkiler

Etki Kategorisi	E/T ÇO>5	E/T ÇO=0,3	KF	KE Birimi	ÇO> 5 mg/L koşulları				ÇO=0,3 mg/L koşulları				
					KE	KE Toplam	NR	NE	KE	KE Toplam	NR	NE	
<b>Enerji Tüketimi</b>	<b>TEP</b>												
Elektrik Enerjisi	6,12E-05	4,59E-05	1	TEP	6,12E-05	6,12E-05	0,001	<b>1,01E-01</b>	4,59E-05	4,59E-05	0,001	<b>7,57E-02</b>	
<b>Tatlısu Ötrofikasyonu</b>	<b>kg</b>												
PO <sub>4</sub>	-	-	1		-				-				
KOİ	0,0265	0,044	0,022	kg PO <sub>4</sub> -eşdeğer/kg	5,83E-04	3,94E-02	0,113	<b>3,48E-01</b>	9,68E-04	2,74E-02	0,113	<b>2,42E-01</b>	
NH <sub>4</sub>	0,0049	0,0245	0,35		1,71E-03				8,56E-03				
NO <sub>2</sub>	0,0013	0,0009	0,1		1,31E-04				9,20E-05				
NO <sub>3</sub>	0,1760	0,0496	0,1		1,76E-02				4,96E-03				
TN	0,0461	0,0305	0,42		1,93E-02				1,28E-02				
<b>Tuzlusu Ötrofikasyonu</b>	<b>kg</b>												
TN	0,0461	0,0305	1	kg N-eşdeğer/kg	4,61E-02	9,21E-02	0,178	<b>5,18E-01</b>	3,05E-02	6,35E-02	0,178	<b>3,57E-01</b>	
KOİ	0,0265	0,0440	0,05		1,33E-03				2,20E-03				
NH <sub>4</sub>	0,0049	0,0245	0,78		3,82E-03				1,91E-02				
NO <sub>2</sub>	0,0013	0,0009	0,3		3,94E-04				2,76E-04				
NO <sub>3</sub>	0,1760	0,0496	0,23		4,05E-02				1,14E-02				
<b>Küresel Isınma</b>	<b>kg</b>												
CO <sub>2</sub>	2,12E-03	3,52E-03	1	kg CO <sub>2</sub> -eşdeğer/kg	2,12E-03	2,09E-01	109,1	<b>1,91E-03</b>	3,52E-03	2,39E-01	109,1	<b>2,19E-03</b>	
CH <sub>4</sub>	3,98E-03	6,60E-03	25		9,94E-02				1,65E-01				
N <sub>2</sub> O	3,62E-04	2,40E-04	296		1,07E-01				7,09E-02				
<b>TOPLAM ETKİ</b>								<b>9,70E-01</b>	<b>TOPLAM ETKİ</b>				<b>6,78E-01</b>
E/T: Emisyon/tüketim	KF: Karakterizasyon faktörü	KE: Karakterize etki	NR: Normalizasyon referansı	NE: Normalize etki									

**Tablo 5.** Normalize çevresel etkiler

Etki Kategorisi	Karakterize Etkinin Birimi	Normalize Etkiler		% Değişim
		ÇO>5 mg/L	ÇO=0,3 mg/L	
Enerji Tüketimi	kg eşdeğer petrol	1,01E-01	7,57E-02	25 Azalma
Tatlısu Ötrofikasyonu	kg PO <sub>4</sub> -eşdeğer/kg	3,48E-01	2,42E-01	30 Azalma
Tuzlusu Ötrofikasyonu	kg N-eşdeğer/kg	5,18E-01	3,57E-01	31 Azalma
Küresel Isınma	kg CO <sub>2</sub> -eşdeğer/kg	1,91E-03	2,19E-03	13 Artış
<b>TOPLAM ETKİ</b>		9,70E-01	6,78E-01	<b>30 Azalma</b>

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, hastane atıksularının yerinde arıtılması gerektiği durumlarda, MBR teknolojisinin tam aerobik ve SND prosesi ile işletilmesinin çevresel etkileri Yaşam Döngüsü Etki Analizi (YDEA) metodolojisi ile karşılaştırılmıştır. SND prosesine geçişte azalan enerji tüketimleri ve deşarj edilen toplam azot yükünün azalması ile çevresel etkilerde önemli bir azalma gözlenirken, bazı hava emisyonlarının etkileri sebebi ile negatif yönde de çevresel etkiler tespit edilmiştir. Tam aerobik işletim koşullarından SND şartlarına geçildiğinde enerji tüketiminde %25, tatlısu ve tuzlusu ötrofikasyonunda sırasıyla %30 ve %31 azalma gözlenirken, küresel ısınma etkisinde %13 oranında bir artış olacağı hesaplanmıştır. Bu artış, düşük ÇO şartlarında aerobik reaktörde konsantrasyonu artması muhtemel N<sub>2</sub>O'dan kaynaklanmaktadır. Toplam çevresel etkide ise %30 oranında azalma sağlanacağı tahmin edilmiştir. Çalışma kapsamında sistem sınırları "kapıdan kapıya" konseptinde, sadece proses bazında değerlendirmeye alınmıştır. "Beşikten mezara" yaklaşımı uygulandığında, prosese giren her bir girdinin üretimine ait YDA verisi de (arka plan prosesleri) dahil olacağı için çevresel etkilerin boyutlarında farklılıklar gözlenebilir. Tüm bu bulgular değerlendirildiğinde, kurulacak bir arıtma sisteminin çevresel etkilerinin YDA yazılımları ve veritabanları yardımıyla bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesi farklı çevresel etkilerin karşılaştırılmasına olanak vermekte ve karar verme sürecinde oldukça faydalı görülmektedir. Bunun yanı sıra, MBR prosesinin önüne veya sonrasına herhangi bir proses eklenmesi durumunda da (ön denitrifikasyon gibi) etki seviyelerinde değişiklikler gözlenebilir.

#### Etik Beyanı

*Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.*

#### Kaynakça

- [1] Verlicchi, P., Aukidy, M. Al., Galletti, A., Petrovic, M., Barceló, D. 2012. Hospital effluent: Investigation of the concentrations and distribution of pharmaceuticals and environmental risk assessment. *Science of the Total Environment*, 430, 109–118.
- [2] Carraro, E., Bonetta, S., Bertino, C., Lorenzi, E., Bonetta, S., Gilli, G. 2016. Hospital effluents management: Chemical, physical, microbiological risks and legislation in different countries, *Journal of Environmental Management*, 168, 185–199.
- [3] Chonova, T., Keck, F., Labanowski, J., Montuelle, B., Rimet, F., Bouchez, A. 2016. Separate treatment of hospital and urban wastewaters: A real scale comparison of effluents and their effect on microbial communities. *Science of the Total Environment*, 542, 965–975.
- [4] Alrhoun, M., Carrion, C., Casellas, M., Dagot, C. 2014. Hospital Wastewater Treatment by Membrane Bioreactor: Performance and Impact on the Biomasses. *International Conference on Civil and Environmental Engineering (BCEE-2014)*, March 17-18, 95–101.
- [5] Wen, X., Ding, H., Huang, X., Liu, R. 2004. Treatment of hospital wastewater using a submerged membrane bioreactor. *Process Biochemistry*, 39, 1427–1431.
- [6] Tambosi, J.L., de Sena, R.F., Favier, M., Gebhardt, W., José, H.J., Schröder, H.F. 2010. Removal of pharmaceutical compounds in membrane bioreactors (MBR) applying submerged membranes. *Desalination*, 261(1-2), 148–156.
- [7] Shojaee Nasirabadi, P., Saljoughi E., Mousavi, S.M. 2016. Membrane processes used for removal of pharmaceuticals, hormones, endocrine disruptors and their metabolites from wastewaters: a review, *Desalination and Water Treatment*, 3994, 1–30.
- [8] ÇŞB (Mülga Çevre ve Şehircilik Bakanlığı). 2004. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği. <https://cygm.csb.gov.tr/yonetmelikler> (Erişim Tarihi 1.11.2020).

- [9] TÜBİTAK-MAM. 2018. Enerji Verimli ve Enerji Pozitif Atıksu Arıtma Tesislerinin Geliştirilmesi Projesi. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 5178602, 320.
- [10] Metcalf and Eddy (Ed. ). 1991. Wastewater Engineering: Treatment Disposal Reuse. 3rd edition. McGraw-Hill, New York (N.Y.), 1334p.
- [11] Hocaoglu, S.M., Insel, G., Cokgor, U.U., Orhon, D. 2011. Effect of low dissolved oxygen on simultaneous nitrification and denitrification in a membrane bioreactor treating black water. *Bioresource Technology*, 102, 4333–4340.
- [12] Insel, G., Erol, S., Övez S. 2014. Effect of simultaneous nitrification and denitrification on nitrogen removal performance and filamentous microorganism diversity of a full-scale MBR plant. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 37, 2163–2173.
- [13] Sager, A.E. 2016. Experimental Studies of Simultaneous Nitrification Denitrification and Phosphorus Removal at Falkenburg Advanced Wastewater Treatment Plant. University of South Florida, Department of Civil and Environmental Engineering, Master Thesis, 88p, Florida.
- [14] Sandip, M., Kalyanraman, V. 2017. Existing biological nitrogen removal processes and current scope of advancement. *Research Journal of Chemistry and Environment*, 21, 43–53.
- [15] Hocaoglu, S.M. 2010. Mechanisms and Modelling of Segregated Household Wastewater Treatment by Membrane Bioreactor. Istanbul Technical University, Environmental Engineering, Ph.D. Thesis, 270p, İstanbul.
- [16] ISO (International Organization for Standardization). 2006. ISO 14040: Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework. Geneva, Switzerland.
- [17] Lopes, T.A. de S., Queiroz, L.M., Kiperstok, A. 2018. Environmental performance of a full-scale wastewater treatment plant applying Life Cycle Assessment. *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science (AMBIAGUA)*, 13, 1.
- [18] APHA. 2012. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th Edition, American Public Health Association, 1216, Washington.
- [19] Krzeminski, P., van der Graaf, J.H.J.M., van Lier, J.B. 2012. Specific energy consumption of membrane bioreactor (MBR) for sewage treatment. *Water Science and Technology*, 65, 380–392.
- [20] Barillon, B., Ruel, S.M., Langlais C., Lazarova, V. 2013. Energy efficiency in membrane bioreactors. *Water Science and Technology*, 67, 2685–2691.
- [21] Xiao, K., XU, Y., Liang, S., LEI, T., Sun, J., Wen X. et al. 2014. Engineering application of membrane bioreactor for wastewater treatment in China: current state and future prospect. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 8, 805–819.
- [22] Keene, N.A., Reusser, S.R., Scarborough, A.L., Grooms, M. J., Seib, M., Santo Domingo, D.R., Noguera, J. 2017. Pilot plant demonstration of stable and efficient high rate biological nutrient removal with low dissolved oxygen conditions, *Water Resource*, 121, 72–85.
- [23] Shi, C.Y. 2011. Mass Flow and Energy Efficiency of Municipal Wastewater Treatment Plants. IWA Publishing. London, 105p.
- [24] TÜİK. 2020. Turkish Greenhouse gas inventory report 1990–2018, Türkiye İstatistik Kurumu, 568s.
- [25] Metz, B., Kuijpers, L., Solomon, S., Andersen, S.O., Davidson, O., Pons, J. et al. 2005. Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System: Issues Related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons, Report No:-, 478p.
- [26] Campos, J.L., Valenzuela-Heredia, D., Pedrouso, A., Val Del Río, A., Belmonte M., Mosquera-Corral, A. 2016. Greenhouse Gases Emissions from Wastewater Treatment Plants: Minimization, Treatment, and Prevention. *Journal of Chemistry*, 3796352, 1-12.
- [27] Ecoinvent. 2012. Electricity Production Mix, APOS, U - TR, Ecoinvent Apos Unit Process. <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/sectors/electricity/> (Erişim Tarihi: 5.11.2020).
- [28] TÜİK. 2018. Atıksu İstatistikleri, Türkiye İstatistik Kurumu, Çevre ve Enerji İstatistikleri, Belediye Atıksu Göstergeleri.
- [29] Hocaoglu, S.M., Celebi, M.D., Basturk I., Partal, R. 2021. Treatment-based hospital wastewater characterization and fractionation of pollutants, *Journal of Water Process Engineering*. 43, 102205.
- [30] Al-Hashimia, M.A.I., and Jasema, Y.I. 2013. Performance of Sequencing Anoxic / Anaerobic Membrane Bioreactor (Sam) System in Hospital Wastewater Treatment and Reuse. *European Scientific Journal* 9 (15), 169–180.
- [31] Verlicchi, P. ed. 2018. Hospital Wastewaters - Characteristics, Management, Treatment and Environmental Risks. Springer, Italy, 243p.

- [32] Tumendelger, A., Alshboul, Z., Lorke, A. 2019. Methane and nitrous oxide emission from different treatment units of municipal wastewater treatment plants in Southwest Germany. PLoS One, 14 (1), 1–17.
- [33] Kampschreur, M.J., Temmink, H., Kleerebezem, R., Jetten, M.S.M., van Loosdrecht, M.C.M. 2009. Nitrous oxide emission during wastewater treatment. Water Research, 43(17), 4093–4103.
- [34] Brepols, C., Drensla, K., Janot, A., Schafer, H. 2020. Energy reduction at a large-scale MBR: the Nordkanal experience. <https://www.thembrsite.com/features/energy-reduction-at-a-large-scale-mbr-the-nordkanal-experience> (Erişim Tarihi: 1.11.2020).
- [35] Buer, T., and Cumin, J. 2010. MBR module design and operation. Desalination, 250(3), 1073–1077.