



BİR ATIKSU ARITMA TESİSİNİN SUYUN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİNE KATKISININ GRİ SU AYAK İZİ İLE BELİRLENMESİ

Filiz Nuran ACAR^{1*}, Gülsüm Merve GÜNEŞ²

¹Ataturk University, Faculty of Engineering, Department of Environmental Engineering, 25240, Erzurum, Türkiye

Özet: İnsan yaşamını destekleyen, gelişen ekonomi ve sağlıklı bir ekosistem için vazgeçilmez bir doğal kaynak olan suya, artan nüfus ve gelişmişlikle bağlantılı olarak daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır. Tarımsal, endüstriyel su tüketiminin haricinde özellikle kentlerde evsel su tüketimi beraberinde daha fazla atık su üretilmesine neden olmaktadır. Dünyada, oluşan atık suların büyük bir oranı arıtılmadan alıcı ortama verilmektedir. Bu durum su kaynaklarının sürdürülebilirliği ve tatlı su taleplerinin sağlıklı ve yeterli düzeyde karşılanabilmesi üzerinde endişe oluşturmaktadır. Kentlerde suyun sürdürülebilir yönetiminin en önemli unsurlarından biri atık su arıtma tesisleridir. Atık su arıtma tesisleri (AAT)'nin suyun sürdürülebilirliğine katkısı ölçeklendirmenin yollarından biri su ayak izlerini hesaplamaktır. Bu çalışmada, Kuzey Doğu Anadolu Bölgesinde bir ilçede bulunan, evsel ve zaman zaman endüstriyel nitelikli atık suların arıtıldığı bir atık su arıtma tesisi için gri su ayak izi değerlendirmesi yapılmıştır. Gri su ayak izi, bir kirlenici seviyesini alıcı ortam konsantrasyonlarına düşürmek için gerekli tatlı su hacmi olarak tanımlanmaktadır. Tesise ait 2023 yılı atık su biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ₅), kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) verileri dikkate alınarak, arıtılmaması ve arıtma yapılması durumları için gri su ayak izi değerleri aylık olarak Su Ayak İzi Ağı Metodolojisine göre değerlendirilmiştir. Arıtılmaması durumunda kirlenici parametrelerin alıcı ortamda asimile olmaları için önemli miktarda tatlı su gerektiği görülmüştür. Birim atık su başına ortalama olarak BOİ₅ giderimi ile 4,92 kat, KOİ giderimi ile 4,28 kat taze suyun asimile olmaktan korunduğu hesaplanmış ve bu hesaplamalarla AAT'nin su döngüsüne olan katkısı teyit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Sürdürülebilir su yönetimi, Su ayak izi, Gri su ayak izi, Atık su arıtma tesisleri

Determination of the Contribution of a Wastewater Treatment Plant to Water Sustainability through Grey Water Footprint

Abstract: Water, an indispensable natural resource for human life, a developing economy and a healthy ecosystem, is needed more in connection with the increasing population and development. Agricultural and industrial water consumption, as well as domestic water consumption, particularly in cities, leads to increased wastewater production. A large portion of wastewater produced worldwide is discharged untreated into the receiving environment. This raises concerns about the sustainability of water resources and the ability to meet freshwater demand at a healthy and adequate level. Wastewater treatment plants (WWTP) are one of the most important elements of sustainable water management in cities. One way to measure the contribution of wastewater treatment plants to water sustainability is to calculate their water footprint. In this study, a greywater footprint assessment was conducted for a wastewater treatment plant located in a district in the Northeastern Anatolia Region, which treats domestic and occasionally industrial wastewater. The greywater footprint is defined as the volume of freshwater required to reduce pollutant levels to the concentrations in the receiving environment. Considering the plant's 2023 wastewater biochemical oxygen demand (BOD₅) and chemical oxygen demand (COD) data, greywater footprint values were assessed monthly according to the Water Footprint Network Methodology for both non-treated and treated conditions. It was determined that without treatment, a significant amount of freshwater is required for the assimilation of pollutant parameters into the receiving environment. On average, BOD₅ removal was calculated to protect 4.92 times more freshwater from assimilation per unit of wastewater, while COD removal protected 4.28 times more freshwater from assimilation. These calculations confirm the contribution of WWTP to the water cycle.

Keywords: Sustainable water management, Water footprint, Grey water footprint, Wastewater treatment plant

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Ataturk University, Faculty of Engineering, Department of Environmental Engineering, 25240, Erzurum, Türkiye

E mail: facar@atauni.edu.tr (F.N. ACAR)

Filiz Nuran ACAR



<https://orcid.org/0000-0002-8743-4666>

Gülsüm Merve GÜNEŞ



<https://orcid.org/0000-0002-2672-6649>

Gönderi: 24 Temmuz 2025

Kabul: 16 Ağustos 2025

Yayınlanma: 15 Kasım 2025

Received: July 24, 2025

Accepted: August 16, 2025

Published: November 15, 2025

Cite as: Acar FN, Güneş GM. 2025. Determination of the contribution of a wastewater treatment plant to water sustainability through grey water footprint. BSJ Eng Sci, 8(6): 1680-1688.

1. Giriş

Kentler küresel ekonomik güçlerin merkezidir ve günümüzde dünya nüfusunun yaklaşık yarısının yaşam alanıdır (Van Vliet, 2002; Paterson vd., 2015). 2050 yılına kadar dünyanın üçte ikisinin şehirlerde yaşayacağı tahmin edilmektedir (UN-Habitat, 2016). Kentleşme,

sosyoekonomik fırsatların artmasına katkı sağlarken çevresel sorunları da beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla iklim değişikliği, biyo çeşitlilik kaybı, su kaynakları ve destekledikleri ekosistemler üzerinde stres oluşması söz konusudur. Gelişmekte olan ve yükselen ekonomilerde kentleşen yerleşimlerin çoğunda temiz su,



gıda, enerji ve sanitasyon gibi temel toplumsal ihtiyaçları destekleyecek altyapı eksiklikleri mevcuttur. Kentleşmedeki bu hızlı büyüme ve yaklaşan ekolojik etkiler beklentisiyle, Birleşmiş Milletler '2030 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri' (SDG) oluşturulmuş ve 2030 yılına kadar yoksulluk yok, sıfır açlık, iyi sağlık ve refah, temiz enerji, temiz su ve sanitasyon ve diğer konu başlıklarıyla toplam 17 temel Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi ve bu temel hedeflerle ilişkili 169 hedef belirlenmiştir (United Nations, 2020; Delenka-Pedige vd., 2021).

Su, insanların sağlığı ve hayatta kalması, gezegenin refahı ve sürdürülebilirliği için merkezi ve kritik öneme sahip olduğundan ve ayrıca kalkınma için bir ön koşul olduğundan, SDG'lerin birçoğu doğrudan veya dolaylı olarak su ve atık su altyapısıyla ilişkilidir. SDG 6 için belirlenen hedefler arasında su kalitesinin iyileştirilmesi; atık su arıtımı ve güvenli yeniden kullanım; su kullanım verimliliğinin artırılması, tatlı su kaynaklarının korunması ve sağlıklı temini; suyun yeniden kullanım yönetimlerinin uygulanması ve suyla ilgili ekosistemlerin korunması ve restore edilmesi yer almaktadır (United Nations, 2020; Delenka-Pedige vd., 2021; Obaideen vd., 2022). Dünya genelinde 770 milyondan fazla insanın içme ve kullanma için temiz ve güvenli suya erişiminin olmadığı tahmin edilmektedir (Villarín ve Merel, 2020; Silva, 2023). Diğer taraftan su kıtlığıyla karşı karşıya olanların sayısının 2025 yılına kadar yaklaşık 1,8 milyara çıkacağı öngörülmektedir. Sürdürülebilir bir su kaynağı olmadan, dünyada akut su kıtlığı ve kirli suyla ilişkili hastalık riskleri söz konusudur (Awad vd., 2019; Silva, 2023). İklim değişikliğinin etkileri de dikkate alındığında atık su arıtımı da dahil olmak üzere erken önlemler almak, içme, tarım veya endüstriyel kullanım için temiz ve güvenli su olmadan yaşamın yıkıcı etkilerini tersine çevirmeye yardımcı olabilecektir (Silva, 2023). Sürdürülebilir su kaynağı sistemleri, ekolojik, çevresel ve hidrolojik bütünlüğünü korurken, toplumun mevcut ve gelecekteki hedeflerine tam anlamıyla katkıda bulunmak üzere tasarlanan ve yönetilen sistemler olarak tanımlanmaktadır (Malakar ve Lu, 2021; Fallahi vd., 2024). Dolayısıyla suyun sürdürülebilir yönetimi çevresel, toplumsal ve ekonomik olarak son derece önemli ve elzemdir (Ercin ve Hoekstra, 2014; Cucek vd., 2015). Bu nedenle çevresel sürdürülebilirliği metrik olarak ifade edebilmek çevresel sistemleri yönetmek için karar alma, planlama gibi süreçlerde kolaylık sağlayacaktır. Çevre üzerindeki insan baskısını izlemek için tüketime dayalı bir bakış açısıyla karakterize edilen bir dizi gösterge olarak tanımlanan ayak izi göstergeleri birçok işlevi yerine getirmektedir. Göstergeler bilgileri basitleştirerek açıklar ve kullanılabilir hale getirerek daha iyi kararlar ve daha etkili eylemler için yol açar (Galli vd., 2012; Cucek vd., 2015). Son yıllarda sürdürülebilir su yönetimini çalışmalarını desteklemek ve ölçeklendirebilmek için "Su Ayak İzi" göstergesi geliştirilmiştir. Su ayak izini ölçme ihtiyacı tatlı su güvenliği ve kirliliğinin metrik olarak ifade edilmesi içindir. Bu nedenle, ayak izi değerlendirmesi ve

en aza indirilmesi sürdürülebilirlik için önceliklerdir. Ayak izini sürdürülebilir bir düzeye düşürmek, artan nüfusa rağmen tüketim değişiklikleriyle mümkündür (Ercin ve Hoekstra, 2014; Cucek vd., 2015). Su ayak izi (WF) kavramı, 2002 yılında, Hollanda Twente Üniversitesi'nde Arjen Hoekstra tarafından, mal ve hizmetlerin tüm tedarik zinciri boyunca üretilmesi için tüketilen ve kirletilen su miktarını ölçmek için bir ölçüt olarak ortaya atılmıştır. Su ayak izi sadece musluktan akan, kaynaktan tarlaya verilen su gibi görünen su olarak nitelendirilen suyu ifade etmemektedir. Suyla ilgili doğrudan ve dolaylı; iç ve dış bütün tüketimleri temsil eden bir göstergedir. Birim zaman veya işlevsel birim başına tüketilen (buharlaştırılan veya ürüne dahil edilen) ve kirletilen su hacimleri açısından ölçülen (Galli vd., 2012; Dong vd., 2013; Zhang vd., 2013) WF, sürdürülebilir su yönetiminde en önemli unsurdur (Mekonnen ve Hoekstra, 2011; Stejskalová vd., 2021). Su hacmini ifade etmesinin yanı sıra kullanılan suyun türünü ne zaman ve nerede kullanıldığını da göstermekte olan çok yönlü bir gösterge olarak ifade edilmekte olup su verimliliği ile ilişkilendirilmektedir. WF, su kullanımını ve kirliliği tüm tedarik zinciri boyunca entegre eder (Galli vd., 2011). Mavi, yeşil ve gri sular gibi farklı türlerdeki su kullanımını ölçer. Ayrıca su kullanımlarını belirli yerlere ve zamanlara bağlar ve bir sistemin hidrolojik sürdürülebilirliğini değerlendirir (Cucek vd., 2015).

Atık su arıtma tesisleri (AAT) sürdürülebilir su yönetiminin önemli bir unsurudur. Atık su arıtımı ile daha fazla suyun kullanıma hazır hale getirilmesi ve doğal su kaynakları üzerindeki baskının azaltılması hedeflenmektedir. Su kıtlığı, artan evsel, endüstriyel ve tarımsal su talepleri ve kuraklık etkileri nedeniyle atık su arıtımı suyun sürdürülebilirliğini artırmak için en uygulanabilir seçeneklerden biridir (Villarín ve Merel, 2020; Silva, 2023). AAT'ler için WF'nin belirlenmesi ile ilgili çalışmalar henüz çok yenidir. Atık su alıcı ortama verilmeden önce arıtıldığında, nihai atıktaki kirlleticilerin konsantrasyonu azaldığı için WF_{gri}'nin de azalacağı, bir prosesin gri su ayak izinin, arıtmadan önceki kaliteye değil, nihai olarak çevreye atıldığı andaki atık suyun kalitesine bağlı olduğunun unutulmaması gerektiği, atık su arıtımı ile WF_{gri}'nin sıfıra indirebileceği ilk defa Hoekstra vd. (2011) tarafından vurgulanmıştır. WF'nin hesaplanması AAT verimliliğini ve sürdürülebilirliğini değerlendirmek için bir fırsat sunar. Bir AAT'nin WF ilk defa Shao ve Chen (2013) tarafından AAT'nin tesisin yapım ve işletme aşamalarında Su ayak İzi Ağı yöntemi esas alınarak sadece mavi WF hesaplanmıştır. Sonrasında AAT'nin su ayak izi değerlendirmesi yoluyla göstergeler üreterek çevreye katkısını değerlendirmeyi, AAT'lerin hidrolojik döngü, enerji kaynakları ve iklimle nasıl etkileşime girdiğini anlamak, korunan suyun miktarını hesaplamak amacıyla WF metodolojisi ile ve su-enerji bağlantısına dayanarak daha kapsamlı bilgi elde etmeyi amaçlayan çalışmalar yapılmıştır (Gu vd., 2016; Morera vd., 2016; Gomez-Llanos vd., 2018; Stejskalová vd., 2021; Çankaya 2023; Kalya ve Alver, 2023; Varol vd., 2024).

Bu çalışmanın amacı bir atık su arıtma tesisi örneğinde WF_{gri} 'nin hesaplanarak ilgili AAT'nin çevre üzerindeki rolünün önemini ifade etmek, AAT'nin verimliliğini gözlemlemek, alıcı ortamda korunan su hacmini tespit ederek sürdürülebilir su yönetimi için metrik sonuçlar ile değerlendirme yapmaktır.

2. Materyal ve Yöntem

Atık su Arıtma Tesisi

Çalışmada izlenen AAT Kuzeydoğu Anadolu Bölgesin de bir ilçede yer almaktadır. AAT ilgili yerleşimin evsel atık sularını ve zaman zaman bölgede bulunan bazı işletmelerin endüstriyel atık sularını arıtmaktadır. Tesise ait akım şeması Şekil 1'de verilmiştir.

Gri Su ayak izi Hesaplamaları

Bu çalışmada WF_{gri} , Su Ayak İzi metodolojisine göre hesaplanmıştır. Hesaplamalar iki senaryo için gerçekleştirilmiştir. Birincisi atık suyun arıtılmaması, ikincisi atık suyun mevcut AAT'de arıtılması durumudur. Senaryoların şematik gösterimi Şekil 2'de gösterilmiştir.

WF_{gri} aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir (Morera vd.,2016):

$$WF_{gri} = \frac{L}{C_{deşarj\ limit} - C_{doğal}} \quad (1)$$

L, kirletici yükü, debi ile konsantrasyonun çarpımı şeklinde tanımlanmaktadır. Yukarıda belirtilen senaryolara göre kütle denkliği yapılarak her iki durum için WF_{gri} hesaplamaları şu şekildedir (Eşitlik 2-7):

Senaryo 1- Arıtma olmaması durumu

$$Q_{giriş} \times C_{giriş} + WF_{grisenaryo1} \times C_{doğal} = (Q_{giriş} + WF_{grisenaryo1}) \times C_{deşarj\ limit} \quad (2)$$

$$WF_{grisenaryo1} = \frac{Q_{giriş} \times (C_{giriş} - C_{deşarj\ limit})}{C_{deşarj\ limit} - C_{doğal}} \quad (3)$$

$$WF_{grisenaryo1} = \frac{Q_{giriş} \times (C_{giriş} - C_{deşarj\ limit})}{C_{deşarj\ limit}} \quad (4)$$

Senaryo 2- Arıtma olması durumu

$$Q_{giriş} \times C_{giriş} + WF_{grisenaryo2} \times C_{doğal} = (Q_{giriş} + WF_{grisenaryo2}) \times C_{deşarj\ limit} \quad (5)$$

$$WF_{grisenaryo2} = \frac{Q_{giriş} \times (C_{giriş} - C_{deşarj\ limit})}{C_{deşarj\ limit} - C_{doğal}} \quad (6)$$

$$WF_{grisenaryo2} = \frac{Q_{giriş} \times (C_{giriş} - C_{deşarj\ limit})}{C_{deşarj\ limit}} \quad (7)$$

$Q_{giriş}$, AAT giriş debisi; $C_{giriş}$, AAT giriş kirletici konsantrasyonu; $C_{deşarj\ limit}$, alıcı ortam su kalite sınıf limit değerleri; $C_{doğal}$, AAT deşarjından önce alıcı ortam doğal su kütleindeki kirlilik konsantrasyonu (ihmal edilebilir seviyede olduğundan bu değer sıfır alınmaktadır). $WF_{grisenaryo1}$, atık suyun arıtılmaması durumunda gri su ayak izi; $WF_{grisenaryo2}$, arıtma yapılması durumunda gri su ayak izidir.

Yukarıda belirtilen iki farklı senaryoya göre hesaplanan WF değerleri arasındaki fark Eşitlik 8'deki gibidir:

$$\Delta WF_{gri} = WF_{grisenaryo1} - WF_{grisenaryo2} \quad (8)$$

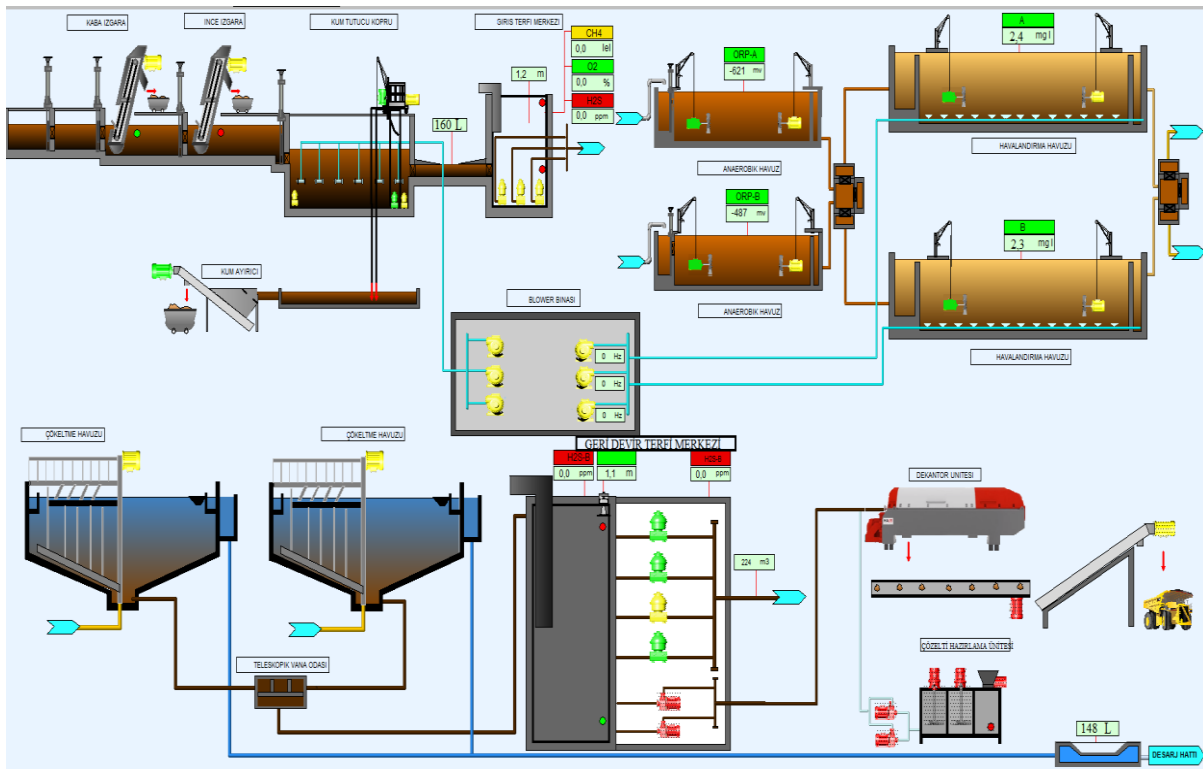
ΔWF_{gri} , AAT'nin performansını ifade etmektedir.

Tesisten alınan bilgiler doğrultusunda giriş ve çıkış debileri eşittir. AAT $Q_{giriş} = Q_{çıkış} = 414.720 \text{ m}^3/\text{ay}$ değerindedir.

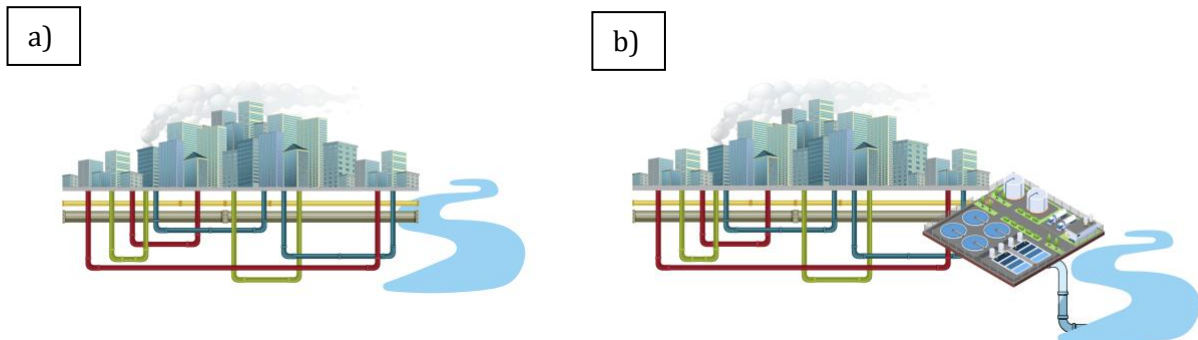
3. Bulgular ve Tartışma

Bir AAT'nin WF_{gri} değerinin hesaplanması için kirletici parametrelerle ilgili verilere gereksinim vardır. Evsel kaynaklı atık suların takibinde önemli iki kirletici biyokimyasal oksijen ihtiyacı ($BOİ_5$) ve kimyasal oksijen ihtiyacı ($KOİ$) parametreleridir. Bu çalışmada, WF_{gri} hesaplamaları $BOİ_5$ ve $KOİ$ kirlilik parametreleri için kurgulanmıştır. Şekil 3'de 2023 yılında aylara göre $BOİ_5$ ve $KOİ$ giriş çıkış konsantrasyonları görülmektedir.

İncelen AAT'de, tesisten alınan bilgiler doğrultusunda, giriş $BOİ_5$ konsantrasyonu maksimum ve minimum olarak sırasıyla 85 mg/L ve 21 mg/L'dir. Dolayısıyla giriş $BOİ_5$ konsantrasyonu değerleri tipik evsel atık suyun özellikleri dikkate alındığında zayıf özellikte olarak nitelendirilebilir. Çıkış $BOİ_5$ konsantrasyonu maksimum değeri 23,36 mg/L iken minimum değeri 10 mg/L'dir. 12 ayın ortalaması olarak $BOİ_5$ ortalama giriş konsantrasyonu 54,08 mg/L iken ortalama çıkış konsantrasyonu 14,75 mg/L olarak hesaplanmıştır. AAT'de, ortalama olarak $BOİ_5$ giderim veriminin %72,73 olduğu görülmektedir. $KOİ$ için ise ortalama giriş ve çıkış konsantrasyonları sırasıyla 254,75 mg/L ve 40,99 mg/L değerlerindedir. Buna göre $KOİ$ giderim veriminin 2023 yılı aylık ortalama değeri %83,91'dir.



Şekil 1. İlgili AAT'nin proses akım şeması.



Şekil 2. WF_{gri} değerlendirmeleri için senaryolar, (a) Arıtılmaması durumu, (b) Mevcut tesiste arıtma olması durumu.

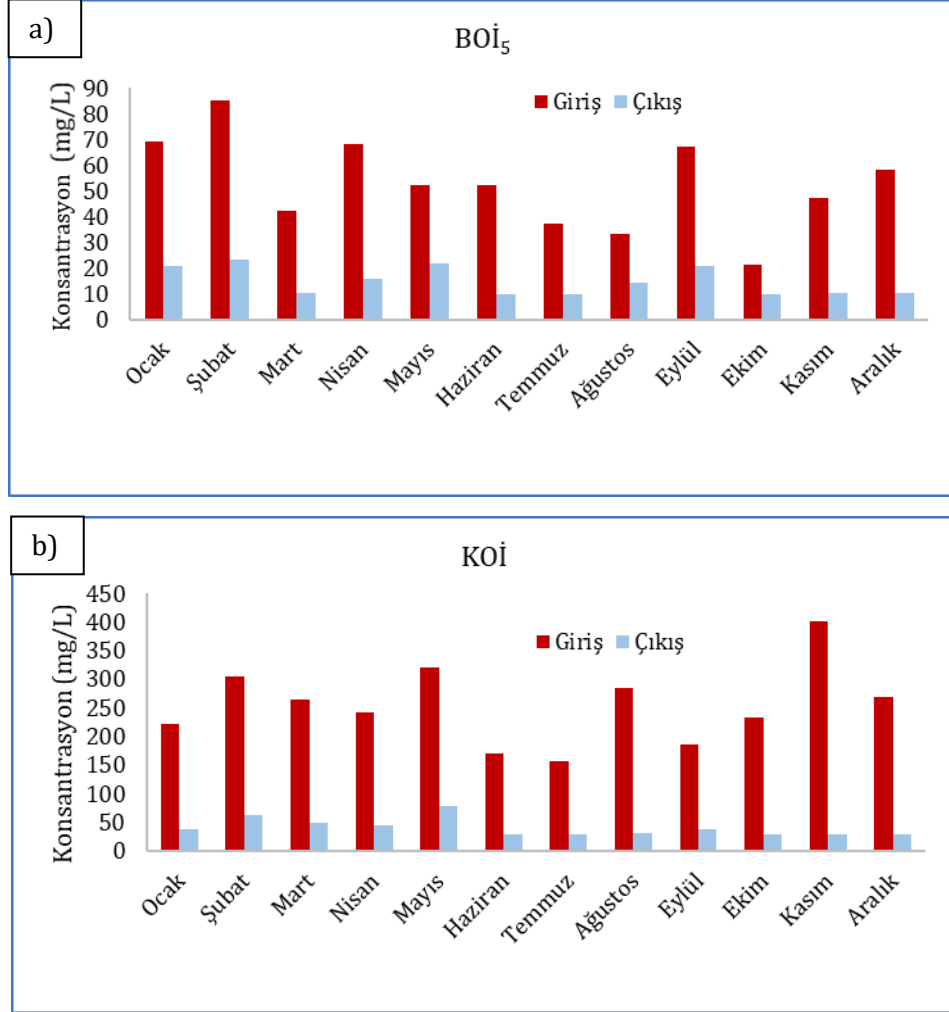
Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliğinde (YSKY) (Tablo 2)'de Kıtaçi Yerüstü Su Kaynaklarının Genel Kimyasal ve Fizikokimyasal Parametreler Açısından Sınıflarına Göre Kalite Kriterleri toplam 17 kirlilik parametresi ile değerlendirilmektedir. Bu tabloya göre kalite sınıflarına göre suların kullanım maksatları I. (çok iyi) II. (iyi) ve III. (orta) sınıf olarak ifade edilmektedir. Bu çalışma için YSKY'de belirtilen BOİ₅ ve KOİ değerleri dikkate alınmıştır. İncelemesi yapılan AAT'nin 2023 yılı aylık minimum, maksimum, ortalama giriş-çıkış BOİ₅ ve KOİ konsantrasyon değerleri ile ilgili kirleticilerin YSKY'ne göre sınıflandırma kriter değerleri Tablo 1'de verilmiştir (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2021).

BOİ5 parametresinin arıtma sonrası yıllık ortalama çıkış konsantrasyonu 14,75 mg/L'dir ve YSKY'ne göre sınıflandırmasına göre 8 mg/L'nin üzerinde olduğundan III. sınıf su kalitesinde deşarj yapılmaktadır. KOİ için ise yıllık ortalama çıkış konsantrasyonu 40,99 mg/L

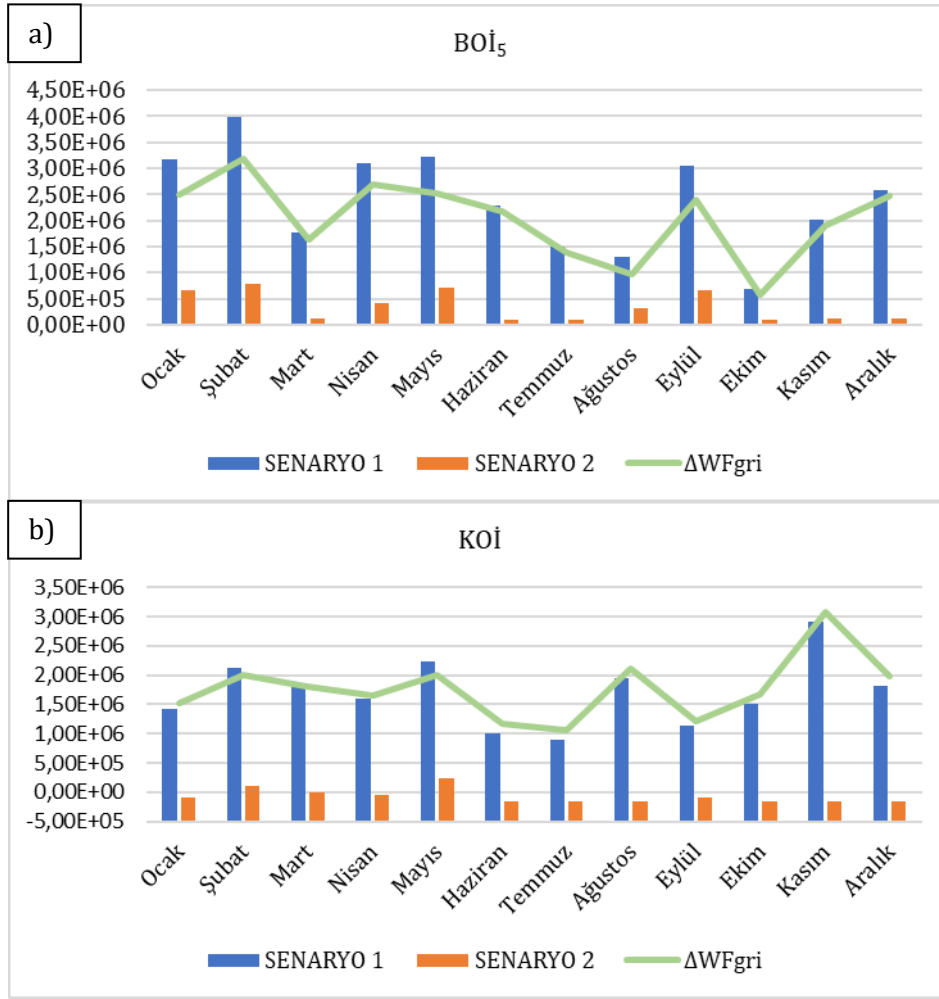
olduğundan II. sınıf su kalitesinde deşarj söz konusudur. Bu AAT için bulunduğu konum dikkate alınarak II. sınıf yani iyi olarak tabir edilen su kalitesini sağlaması gerektiği düşünülerek WF_{gri} hesaplamalarında deşarj limit konsantrasyon değerleri BO_5 için 8 mg/L, KO_5 için 50 mg/L kabul edilmiştir. II. sınıf kalitesindeki su içme suyu olma potansiyeli olan yerüstü suları, rekreasyonel maksatlar için kullanılabilir nitelikte su, alabalık dışında balık üretimi için kullanılabilir nitelikte su, sulama suyu olarak kalite kriterlerini sağlamak şartıyla sulama suyu olarak açıklanmaktadır. Bu limit değerlere göre arıtılmaması durumunda (Senaryo 1) ve mevcut AAT'nin verilerine göre arıtma yapılması (Senaryo 2) durumu ve her iki durumun arasındaki fark ile AAT'nin alıcı ortama sağladığı katkı ile ilgili aylık hesaplamalar BO_5 ve KO_5 için Şekil 4'de gösterilmiştir.

Tablo 1. WFgri hesaplama verileri

Parametre	BOİ ₅ (mg/L)	KOİ (mg/L)
Konsantrasyon		
GirişOrtalama	54,08	254,75
ÇıkışOrtalama		
Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği Limitleri (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2021)		
Su kalite sınıfları		
I. Sınıf (Çok iyi)	<4	<25
II.Sınıf (İyi)	8	50
III.Sınıf (Orta)	>8	>50



Şekil 3. 2023 yılı aylık AAT giriş- çıkış konsantrasyonları, (a) BOİ₅ konsantrasyonları, (b) KOİ konsantrasyonları.



Şekil 4. BOİ₅ ve KOİ parametreleri için 2023 yılı aylık WFGri ve ΔWFGri değerleri, a= BOİ₅ için WFGri (m³/ay) ve ΔWFGri ((m³/ay), b= KOİ için WFGri (m³/ay) ve ΔWFGri (m³/ay).

BOİ₅ için mevcut arıtma tesisinin Sınıf II kalite stardatlarını sağlayamamasına rağmen yine de alıcı su ortamlarının korunması için önemli katkı sunduğu görülmektedir. Senaryo 1'e göre BOİ₅'in arıtılmadan alıcı ortama dışarı halinde, alıcı ortam konsantrasyonuna asimile edilmesi için ortalama 2.388.960 m³/ay tatlı suya gereksinim vardır. Oysa Senaryo 2 yani mevcut AAT arıtma ile ortalama BOİ₅ asimile edilmesi için gereken tatlı su miktarındaki ortalama azalma değeri 349.833,60 m³/ay' dır. Bu sonuç, alıcı ortamın daha az kirletildiği olarak açıklanabilir. KOİ için ise 1.698.278,40 m³/ay tatlı suya ihtiyaç varken arıtma yapılması ile senaryo hesaplanan değer 74.739,46 m³/ay'dır. Bu değer negatif olarak hesaplanmıştır. Negatif sonuç arıtılıp alıcı ortama verilen suyun alıcı ortam kalitesinden yüksek olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla incelenen AAT'nin alıcı

ortamın kirlenmesi önlediği ve ilaveten alıcı suyun kalitesinin arttırdığı görülmektedir.

Alıcı su ortamında birim atık su başına asimile olmaktan korunan su miktarı çarpanını bulmak için ΔWFGri değerleri debi değerine bölünmüştür. BOİ₅ ve KOİ için 2023 yılında aylık bazda arıtılan birim atık su başına alıcı ortamda asimile olmaktan korunan birim taze su Tablo 2'de verilmiştir. Başka bir ifadeyle şekilde görülen değerler aylık olarak birim atık su başına taze suyun kaç kat korunduğunun göstergesidir. Tüm yıl için birim atık su başına ortalama olarak BOİ₅ giderimiyle 4,92 kat, KOİ giderimiyle 4,28 kat taze su asimile olmaktan korunmuştur.

Tablo 2. BOİ₅ ve KOİ giderimi ile birim atık su başına aylık olarak asimile olmaktan korunan tatlı su miktarı çarpanları

	$\Delta WF_{gri}/Debi$	
Aylar	BOİ ₅	KOİ
Ocak	6,04	3,66
Şubat	7,71	4,84
Mart	3,97	4,33
Nisan	6,51	3,96
Mayıs	6,06	4,84
Haziran	5,25	2,80
Temmuz	3,38	2,54
Ağustos	2,36	5,08
Eylül	5,80	2,95
Ekim	1,38	4,06
Kasım	4,58	7,44
Aralık	5,98	4,80
ORTALAMA	4,92	4,28

AAT'lerin WF değerlendirmeleriyle ilgili benzer sonuçlar diğer çalışmalarda da belirtilmiştir. Gu vd. (2016), bir AAT'nin hidrolojik döngü, enerji kaynakları ve iklimle nasıl etkileşime girdiğini anlamak için WF metodolojisi ile ve su-enerji bağlantısına dayanarak daha kapsamlı bilgi elde etmeyi amaçlamışlardır. WF_{gri}'nin azaltılmasına yönelik çalışmalarında, Çin'in güneyinde farklı arıtma süreçleri, hedefleri ve kapasiteleri olan dokuz gerçek AAT'den elde edilen sonuçlara göre AAT'lerin daha yüksek kapasiteye ve uygun teknolojiye sahip olmasının WF_{gri}'nin daha fazla azaltılmasını sağlayacağı belirtmişlerdir. AAT'nde ortalama olarak, bir m³ evsel atık su arıtıldığında 6,78 m³ WF_{gri}'nin azaldığı, bir m³ evsel atıksuyu arıtmak için 13,38 L tatlı su gerektiğini vurgulamışlardır. Çalışmada, atık su özelliklerinin, arıtma teknolojilerinin ve yönetim sistemlerinin, AAT'ler aracılığıyla WF_{gri}'ni azaltmada enerji kullanım veriminin büyük bir etkisi olduğu ifade edilmiştir. Araştırmacılar çalışmalarının, su-enerji bağlantısını dikkate alarak, AAT'nin daha iyi planlanmasına ve işletilmesine katkıda bulunması beklendiği vurgulamışlardır. Stejskalová vd. (2021), Çekya'da yeniden yapılandırma yapılan bir AAT'de 2012-2016 yılları için WF_{gri} değerlendirmesi yapmışlardır. Yeniden yapılandırma sürecinde AAT kapasitesi artırılmış ve tesis membran proses ile revize edilmiştir. Çalışmada AAT'de hem yapılandırılmadan önce hem de sonra en sık amonyum azotunun WF_{gri}'ne neden olduğu vurgulanmıştır. Yeniden yapılandırılmadan sonra amonyum azotu için WF_{gri}'nin 2,7 kat azaldığı hesaplanmıştır. Çankaya (2023), çalışmada bir AAT'de su geri kazanım ünitesi eklenmeden önce (2018 yılı) ve eklendikten sonra (2021 yılı) WF_{gri} değerlendirmesi yapmıştır. Çalışmada su geri kazanımının WF_{gri}'ni azaltmaya yönelik çevresel faydasının 2021 yılı için %44 olduğu belirtilmiştir. Kalya ve Alver (2023), evsel atık suyun arıtılmaması ve arıtılması durumları için inceledikleri AAT'nin BOİ₅ giderimi ile birim atık su başına 16 kat taze suyu asimile olmaktan korunduğunu belirtmişlerdir. Varol vd. (2024), WF değerlendirmesi yaptıkları AAT'nin 185.221.591 m³/ay WF_{gri} oluşumunu

önlediğini ve sürdürülebilir çevre hedeflerine katkıda bulunduğu, bir birim arıtılmış atıksu başına ortalama 62,28 birim tatlı su korunduğu belirtmişlerdir.

Bu çalışmadan ve önceki çalışmalardan elde edilen sonuçlar, AAT'lerin WF_{gri}'nin azaltılmasını sağladığı ve suyun sürdürülebilirliğine önemli bir katkı sunduğunu göstermektedir. Ayrıca WF_{gri}'nin azaltılmasında, AAT'lerde yeniden yapılandırma işlemlerinin ve AAT'lerde etkin yönetimin katkısının dikkate değer olduğu görülmüştür.

4. Sonuç

Bu çalışmada, WF ağı hesaplama metodolojisinin, bir AAT'nin WF_{gri} değerinin hesaplanmasında uygun ve kullanışlı olduğu görülmüştür. Bu metodla, bir AAT'nin, WF_{gri} değerinin belirlenmesi ile AAT'lerin doğal su döngüsüne sağladığı katkı ölçeklendirilebilir şekilde ifade edilmiştir. Aynı zamanda AAT'lerinin işletme problemlerinin giderilmesinde planlanma ve yönlendirmelerin yapılması için hacimsel olarak ifade edilen WF_{gri} verilerinin önemli olduğu görülmektedir.

İlgili AAT'de, arıtılan ham atık suyun düşük BOİ₅ ve KOİ konsantrasyonları ile oldukça zayıf karakter atık su özelliklerini temsil etmesine rağmen arıtılarak alıcı ortama verilmesinin su döngüsüne sağladığı katkı 2023 yılı için WF_{gri} değerleri ile aylık olarak belirlenmiştir. Birim atık su başına ortalama olarak BOİ₅ giderimiyle 4,92 kat, KOİ giderimiyle 4,28 kat taze suyun asimile olmaktan korunduğu hesaplanmış ve bu hesaplamalarla AAT'nin su döngüsüne olan katkısı teyit edilmiştir.

Bu çalışmada, AAT'de atık sudaki iki temel kirlilik parametresinin arıtılmasına bağlı olarak WF_{gri} belirlenmiş olmasına rağmen AKM, TN, TP gibi evsel atık suyu karakterize eden diğer kirlilik parametreleri için de WF_{gri} tespitleri yapılabilir. Ayrıca WF_{gri} haricinde AAT'de mavi ve yeşil WF'nin hesaplanması ile net WF değerinin belirlenmesinin sürdürülebilirlik çalışmaları için daha yönlendirici olacağı düşünülmektedir.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarların katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazarlar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	F.N.A.	G.M.G.
K	60	40
T	60	40
Y	60	40
VTI	40	60
VAY	60	40
KT	60	40
YZ	60	40
KI	60	40
GR	60	40
PY	60	40
FA	50	50

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu çalışmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Kaynaklar

- Awad H, Alalm MG, El-Etriby HK. 2019. Environmental and cost life cycle assessment of different alternatives for improvement of wastewater treatment plants in developing countries. *Sci Total Environ*, 660: 57-68.
- Cucek L, Klemes JJ, Varbanov PS, Kravanja Z. 2015. Significance of environmental footprints for evaluating sustainability and security of development. *Clean Technol Environ Policy*, 17: 2125-2141.
- Çankaya S. 2023. Evaluation of the impact of water reclamation on blue and grey water footprint in a municipal wastewater treatment plant. *Sci Total Environ*, 903: 166196.
- Delanka-Pedige HMK, Munasinghe-Arachchige SP, Abeysiriwardana-Arachchige ISA, Nirmalakhandan N. 2021. Wastewater infrastructure for sustainable cities: assessment based on UN sustainable development goals (SDGs). *Int J Sustain Dev World Ecol*, 28(3): 203-209.
- Dong H, Geng Y, Sarkis J, Fujita T, Okadera T, Xue B. 2013. Regional water footprint evaluation in China: a case of Liaoning. *Sci Total Environ*, 442: 215-224.
- Ercin AE, Hoekstra AY. 2014. Water footprint scenarios for 2050: a global analysis. *Environ Int*, 64: 71-82.
- Fallahi A, Taheriyoun M, Asghari K. 2024. Water footprint assessment in an industrial symbiosis system based on environmental, economic, and social sustainability indices. *J Clean Prod*, 454: 142227.
- Galli A, Wiedmann T, Ercin E, Knoblauch D, Ewing B, Giljum S. 2012. Integrating ecological, carbon and water footprint into a "Footprint Family" of indicators: definition and role in tracking human pressure on the planet. *State Art Ecol Footpr Theory*

Appl, 16: 100-112.

- Galli A, Wiedmann T, Ercin E, Knoblauch D, Ewing B, Giljum S. 2011. Integrating ecological, carbon and water footprint: defining the "footprint family" and its application in tracking human pressure on the planet. Technical Document, Surrey, UK.
- Gomez-Llanos E, Duran-Barroso P, Matias-Sanchez A. 2018. Management effectiveness assessment in wastewater treatment plants through a new water footprint indicator. *J Clean Prod*, 198: 463-471.
- Gu Y, Dong Y, Wang H, Keller A, Xu J, Chiramba T, Li F. 2016. Quantification of the water, energy and carbon footprints of wastewater treatment plants in China considering a water-energy nexus perspective. *Ecol Indic*, 60: 402-409.
- Hoekstra AY, Chapagain AK, Aldaya MM, Mekonnen MM. 2011. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard. Earthscan, London, Washington, DC.
- Kalya E, Alver A. 2023. Determining the contribution of the wastewater treatment plant to the sustainable environment with water footprint indicators. *Environ Dev Sustain*, 25: 12999-13014.
- Malakar K, Lu C. 2021. Measuring sustainability as distance to ideal position of economy, society and environment: application to China's provincial water resources (2004-17). *J Environ Manag*, 292: 112742.
- Mekonnen MM, Hoekstra AY. 2011. National water footprint accounts: the green, blue and grey water footprint of production and consumption. *Value of Water, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands*, pp: 45-59.
- Morera S, Corominas L, Poch M, Aldaya MM, Comas J. 2016. Water footprint assessment in wastewater treatment plants. *J Clean Prod*, 112: 4741-4748.
- Obaideen K, Shehata N, Sayed ET, Abdelkareem MA, Mahmoud MS, Olabi AG. 2022. The role of wastewater treatment in achieving sustainable development goals (SDGs) and sustainability guideline. *Energy Nexus*, 7: 100112.
- Paterson W, Rushforth R, Ruddell BL, Konar M, Ahams IC, Gironás J, Mijic A, Mejia A. 2015. Water footprint of cities: a review and suggestions for future research. *Sustainability*, 7: 8461-8490.
- Shao L, Chen GQ. 2013. Water footprint assessment for wastewater treatment: method, indicator, and application. *Environ Sci Technol*, 47: 7787-7794.
- Silva JA. 2023. Wastewater treatment and reuse for sustainable water resources management: A systematic literature review. *Sustainability*, 15: 10940.
- Stejskalová L, Ansorge L, Kučera J, Vološinová D. 2021. Grey water footprint as a tool for wastewater treatment plant assessment - Hostovice case study. *Urban Water J*, 18(10): 796-805.
- Tarım ve Orman Bakanlığı. 2021. Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği. URL: <https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/mevzuatlar> (erişim tarihi: 8 Temmuz 2025).
- UN Habitat. 2016. World Cities Report 2016: Urbanization and development: emerging futures. URL: <https://unhabitat.org/world-cities-report-2016> (erişim tarihi: 8 Temmuz 2025).
- United Nations. 2020. SDG Indicators: global indicator framework for the Sustainable Development Goals and targets of the 2030 Agenda for Sustainable Development. URL: <https://unstats.un.org/sdgs/indicators/indicators-list> (erişim tarihi: 7 Temmuz 2025).
- Van Vliet W. 2002. Cities in a globalizing world: from engines of growth to agents of change. *Environ Urban*, 14: 31-40.
- Varol S, Alver A, Altaş A. 2024. The water footprint assessment for advanced biological wastewater treatment plant. *Int J Environ Sci Technol*, 21: 2035-2048.

Villarín MC, Merel S. 2020. Paradigm shifts and current challenges in wastewater management. J Hazard Mater, 390: 122139.
Zhang GP, Hoekstra AY, Mathews RE. 2013. Water footprint

assessment (WFA) for better water governance and sustainable development. Water Resour Ind, 1-2: 1-6.