



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

Gülsüm Merve ÇAKIR

Prof. Dr. Filiz Nuran ACAR

Yüksek Lisans Tezi

Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

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

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gülsüm Merve ÇAKIR

Danışman: Prof. Dr. Filiz Nuran ACAR

Erzurum
Aralık, 2025



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Prof.Dr. Filiz Nuran ACAR danışmanlığında Gülsüm Merve ÇAKIR tarafından hazırlanan “**BİR ATIKSU ARITMA TESİSİNİN SUYUN SÜRDÜRÜLEBİLİRGİNE KATKISININ GRİ SU AYAK İZİ İLE BELİRLENMESİ**” başlıklı çalışma 01/12/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Çevre Mühendisliği - Anabilim Dalı Çevre Mühendisliği Bilim Dalı'nda **Yüksek Lisans** tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Doç.Dr. Fatma EKMEKYAPAR TORUN <i>ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ</i>	e-imza
Jüri Üyesi (Danışman):	Prof.Dr. Filiz Nuran ACAR <i>ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ</i>	e-imza
Jüri Üyesi:	Doç.Dr. Sinan KUL <i>BAYBURT ÜNİVERSİTESİ</i>	e-imza

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylanm.

03/12/2025
Prof.Dr. Alper NUHOĞLU
Enstitü Müdürü
e-imza



ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Prof. Dr. Filiz Nuran ACAR danışmanlığında Bir Atıksu Arıtma Tesisinin Suyun Sürdürülebilirliğine Katkısının Gri Su Ayak İzi İle Belirlenmesi başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	2	30
Kuramsal Temeller	8	30
Materyal ve Metot	9	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	3	20
Sonuçlar ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	6	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Gülsüm Merve ÇAKIR	Prof. Dr. Filiz Nuran ACAR
01.12.2025	01.12.2025
İmza:	İmza:

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

“Bir Atıksu Arıtma Tesisinin Suyun Sürdürülebilirliğine Katkısının Gri Su Ayak İzi İle Belirlenmesi” konu başlığındaki bu çalışma, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Çevre Mühendisliği Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır. Bu kapsamda, yaptığım tez çalışmasının gerçekleştirilmesinin her aşamasında manevi desteğini, ilgisini, değerli tüm bilgi ve birikimleriyle destek ve yardımlarını esirgemeyen, kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Filiz Nuran ACAR’a, eğitim hayatımın ve tez çalışmamın her aşamasında manevi olarak yanımda hissettiğim sevgili eşim ve meslektaşım Umur ÇAKIR’a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca, tez çalışmam süresince bana sabır ve motivasyon veren canım oğullarım Alp ve Yiğit’e sevgimi ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Gülsüm Merve ÇAKIR

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

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

Gülsüm Merve ÇAKIR

Danışman: Prof. Dr. Filiz Nuran ACAR

Amaç: Atık su arıtma tesislerinin suyun sürdürülebilirliğine katkısını ölçeklendirmenin yollarından biri su ayak izlerini hesaplamaktır. Bu çalışmada, bir arıtma tesisi örneğinde gri su ayak izi hesaplanarak ilgili tesisin suyun sürdürülebilirliğine katkısının metrik olarak tespit edilmesi hedeflenmiştir.

Yöntem: Gri su ayak izi hesaplamaları için tesisin 2023 yılı BOİ₅, KOİ, TN, ve TP giriş- çıkış konsantrasyon verileri ve alıcı ortam için II.sınıf su kalite limitleri kullanılmıştır. Çalışmada; atıksuyun arıtılmaması (Senaryo 1), tesisin mevcut arıtma durumu (Senaryo 2) ve tesiste iyileştirme yapılarak arıtma veriminin artırılması durumu (Senaryo 3) için gri su ayak izi Su Ayak İzi Metodolojisine göre hesaplanmıştır.

Bulgular: BOİ₅, KOİ, TN ve TP kirleticilerinin yıllık ortalama değerleri için üç senaryoya göre WFGri hesaplamaları yapılmıştır. BOİ₅ Senaryo 1'e göre 2.388.960 m³/ay tatlı suya gereksinim varken Senaryo 2'de BOİ₅'in asimile edilmesi için gereken tatlı su miktarındaki ortalama azalma değeri 349.833,60 m³/ay, Senaryo 3'de -134.352,00 m³/ay'dır. Dolayısıyla ΔWFGri₁₋₂ 2.039.126,40 m³/ay, ΔWFGri₁₋₃ 2.523.312,00 m³/ay olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar tesisin alıcı ortama katkısı olduğunu ancak tesiste arıtma veriminin artırılması halinde suyun sürdürülebilirliğine katkının daha fazla olacağını teyit etmiştir. Diğer kirlilik parametreleri için aynı durum söz konusudur. ΔWFGri değerleri debi değerine bölünmesiyle alıcı su ortamında birim atık su başına asimile olmaktan korunan su miktarı çarpanları hesaplanarak yanıt formülasyonu oluşturulmuştur. Senaryo 2'ye göre BOİ₅, KOİ, TN ve TP için sırasıyla 4,92; 4,28; 1,65; 8,87 değerleri elde edilirken Senaryo 3'de bu çarpan değerleri 6,08; 5,52; 2,22; 11,30 olarak bulunmuştur.

Sonuç: Üç senaryoya için hesaplanan gri su ayak izi değerlerine göre ilgili atıksu arıtma tesisinin alıcı su ortamını iyileştirdiği görülmüştür. Tesisin mevcut arıtma verimine göre gri su ayak izini azalttığı ve alıcı ortamda korunan tatlı su hacminin arttığı kanıtlanmıştır. Tesiste yapılması muhtemel iyileştirmeler sonrasında gri su ayak izinin daha fazla azalacağı ve suyun sürdürülebilirliğine katkısının artacağı metrik olarak ifade edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir Su Yönetimi, Su Ayak İzi, Gri Su Ayak İzi, Atıksu Arıtma Tesisleri

Aralık 2025, 60 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

DETERMINATION OF THE CONTRIBUTION OF A WASTEWATER TREATMENT PLANT TO WATER SUSTAINABILITY THROUGH GREY WATER FOOTPRINT

Gülsüm Merve ÇAKIR

Supervisor: Prof. Dr. Filiz Nuran ACAR

Purpose: One way to quantify the contribution of wastewater treatment plants to water sustainability is to calculate their water footprint. This study aims to quantify the facility's contribution to water sustainability by calculating the greywater footprint of a treatment plant..

Method: For grey water footprint calculations, the facility's 2023 BOD₅, COD, TN, and TP influent-effluent concentration data and Class II water quality limits for the receiving environment were used. In the study, the grey water footprint was calculated according to the Water Footprint Methodology for the cases of not treating the wastewater (Scenario 1), the current treatment status of the facility (Scenario 2), and the case of increasing the treatment efficiency by making improvements (Scenario 3) in the facility.

Findings: WFgrey calculations were performed for the annual average values of BOD₅, COD, TN, and TP pollutants under three scenarios. While 2,388,960 m³/month of freshwater is required for BOD₅ in Scenario 1, the average reduction in the amount of freshwater required to assimilate BOD₅ is 349,833.60 m³/month in Scenario 2 and -134,352.00 m³/month in Scenario 3. Therefore, $\Delta WF_{grey1-2}$ was determined to be 2,039,126.40 m³/month, and $\Delta WF_{grey1-3}$ was determined to be 2,523,312.00 m³/month. These results confirm that the plant contributes to the receiving environment, but that its contribution to water sustainability would be greater if treatment efficiency was increased. The same applies to other pollution parameters. The response formulation was created by dividing the ΔWF_{grey} values by the flow rate and calculating the multipliers for the amount of water protected from assimilation per unit of wastewater in the receiving water environment. According to Scenario 2, the values for BOD₅, COD, TN, and TP were 4.92, 4.28, 1.65, and 8.87, respectively, while in Scenario 3, these coefficient values were found to be 6.08, 5.52, 2.22, and 11.30.

Results: Based on the greywater footprint values calculated for the three scenarios, the wastewater treatment plant has been shown to improve the receiving water environment. It has been proven that the plant has reduced its greywater footprint based on its current treatment efficiency and increased the volume of freshwater preserved in the receiving environment. Potential improvements to the plant are expected to further reduce the greywater footprint and increase its contribution to water sustainability.

Keywords: Sustainable Water Management, Water Footprint, Grey Water Footprint, Wastewater Treatment Plants

December 2025, 60 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
KISALTMALAR DİZİNİ	ix
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	3
Sürdürülebilirlik ve Ayak İzi Göstergeleri.....	3
Suyun Sürdürülebilirliği ve Su Ayak İzi Göstergesi.....	9
WF Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi	15
Atıksu Arıtma Tesislerinde Su Ayak izi	17
MATERYAL YÖNTEM.....	21
Atıksu Arıtma Tesisi	21
WFgri Hesaplamaları	24
Atıksu Analiz Parametreleri	25
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	26
Hedef ve Kapsam Belirleme	26
WF Hesaplama	27
WF Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi	34
WF Yanıt Formülasyonu.....	39
SONUÇLAR.....	43
KAYNAKLAR.....	45
ÖZGEÇMİŞ.....	49

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Sürdürülebilirlik Bileşenlerine Göre Ayak İzleri	9
Tablo 2. Birleşik ve Bileşik Göstergeler.....	9
Tablo 3. Su Ayak İzi Değerlendirme Aşamaları.....	26
Tablo 4. 2023 Yılı İçin AAT Maksimum ve Minimum Giriş- Çıkış Konsantrasyonları	31
Tablo 5. WFgri Hesaplama Verileri.....	31
Tablo 6. BOİ ₅ , KOİ, TN ve TP Giderimi İle Birim Atık Su Başına Aylık Olarak Asimile Olmaktan Korunan Tatlı Su Miktarı Çarpanları	41

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Sürdürülebilir kalkınma unsurları	4
Şekil 2. BM Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri	7
Şekil 3. Su ayak izi bileşenleri	13
Şekil 4. WF değerlendirmesi için WFN ve LCA yaklaşımları ve WFN yaklaşımında WF muhasebesine ilişkin ayrıntılar	16
Şekil 5. WF Sürdürülebilirlik değerlendirmesi için çevresel, sosyal ve ekonomik göstergeler	17
Şekil 6. İlgili AAT'nin uydu görüntüsü	21
Şekil 7. AAT'ndeki proseslerin görüntüleri	22
Şekil 8. İlgili AAT proses akım şeması.....	24
Şekil 9. WFgri değerlendirmesi için Senaryo 1 ve Senaryo 2 şeması.....	27
Şekil 10. AAT 2023 yılı atık su kirlilik parametreleri için giriş-çıkış konsantrasyon değerleri	29
Şekil 11. Kirlilik parametrelerine göre Senaryo 1, Senaryo 2'ye göre aylık WFgri ve Δ WFgri değerleri (m^3/ay)	33
Şekil 11. Kirlilik parametrelerine göre Senaryo 1, Senaryo 2'ye göre aylık WFgri ve Δ WFgri değerleri (m^3/ay) (Devamı)	34
Şekil 12. BOİ5, KOİ, TN ve TP için 2019-2023 yılları arası yıllık ortalama arıtma verimleri	35
Şekil 13. WFgri değerlendirmesi için Senaryo 3 şeması	35
Şekil 14. WFgri'nin yıllık ortalama değer üzerinden tüm senaryoların karşılaştırılması ve Senaryo1- Senaryo 2; Senaryo 1- Senaryo 3 için Δ WFgri değerleri (m^3/ay)	38

KISALTMALAR DİZİNİ

AAT	: Atıksu Arıtma Tesisi
AAT-C	: Konvansiyonel Atıksu Arıtma Tesisi
AAT-WR	: Su geri kazanım ünitesiyle ileri atık su arıtma tesisi
AB	: Avrupa Birliği
AKM	: Askıda Katı Madde
BM	: Birleşmiş Milletler
BOİ₅	: Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı
CF	: Karbon Ayak İzi
EC	: Avrupa Komisyonu
EF	: Ekolojik Ayak İzi
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Örgütü
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
L	: Litre
LCA	: Yaşam Döngüsü Analizi
SDG	: Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları
TN	: Toplam Azot
TOK	: Toplam Organik Karbon
TP	: Toplam Fosfor
UN-Habitat	: Birleşmiş Milletler İnsan Yerleşimleri Programı
UNDP	: Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı
UNEP	: Birleşmiş Milletler Çevre Programı
UNESCO-IHE	: UNESCO Su Eğitimi Enstitüsü
WF	: Su Ayak İzi
WF_{gri}	: Gri Su Ayak İzi
WF_{mavi}	: Mavi Su Ayak İzi
WF_{yeşil}	: Yeşil Su Ayak İzi
WF_N	: Su Ayak İzi Ağı
WF_{tüketim}	: Su Ayak İzi – Tüketim
WF_{üretim}	: Su Ayak İzi – Üretim
WWTP	: Atıksu Arıtma Tesisi
YSKY	: Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği

GİRİŞ

İnsan faaliyetlerinin doğal ortamlar üzerindeki olumsuz etkileri gün geçtikçe daha görünür ve hissedilir olmuştur. Aynı zamanda doğal kaynakların aşırı tüketimi dünyanın geleceğini tehdit etmektedir. İklim değişikliği ile bağlantılı kuraklık ve su kıtlığı ekosistemi zorlayan en önemli çevresel sorunlardandır. Küresel iklim değişikliği büyük ölçüde doğal su döngüsü dinamiklerini etkilemektedir. Özellikle kentlerde geçirimsiz yüzeylerden ötürü doğal su döngüsünü bozan akış- infiltrasyon oranlarının değişmesi, aşırı su kullanımı, suyun kirlenmesi önemli etkilerdir. Suyla ilgili diğer bir çevre sorunu aşırı antroposen emisyonunun neden olduğu azot ve fosfor kaynaklı ötrofikasyondur (Matustik ve Kocí, 2021). Bu problemlerin sinerjik etkileri ve geri bildirimleri göz önüne alındığında insanların dünyayı etkileme biçimlerini değiştirmeleri elzemdir. Günümüze kadar çevrenin korunması ve olumsuz etkilerinin minimize edilmesi için Birleşmiş Milletler 1972 Stockholm Konferansı, 1987 Brundtland Raporu gibi uluslararası pek çok çaba mevcuttur. Bu çalışmalar sonrasında, çevre korunmaya çalışılırken ekonomi ve teknolojinin paralel şekilde ilerlemesi gerekliliğini ifade eden “sürdürülebilirlik” kavramı ortaya çıkmıştır (Matustik ve Kocí, 2021; Jørgensen et al., 2008). Dolayısıyla günümüzde ve ilerleyen süreçlerde çevresel kalite- ekonomik refah- toplumsal gelişim üçlüsünün kesişimi olan sürdürülebilirlik insanlığın hedefi olmak zorundadır. Birleşmiş Milletler '2030 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri' (SDG) 2030 yılına kadar sağlıklı ve kaliteli yaşam, temiz su ve sanitasyon, erişilebilir ve temiz enerji, sürdürülebilir şehirler ve topluluklar, iklim eylemi, sudaki yaşam ve diğer konu başlıklarıyla toplam 17 temel Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi ve bu temel hedeflerle ilişkili 169 alt hedeften oluşmaktadır (UN, 2020; Delanka-Pedige et al., 2021). SDG 6 kapsamında 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 (UN, 2020; Delanka-Pedige et al., 2021; Obaideen et al., 2022).

Günümüz dünyasında su tüketimi ve kirlilikteki artışın bir sonucu olarak Dünya'nın tatlı su kaynakları üzerindeki baskı yadsınamayacak kadar ciddi boyutlara ulaşmıştır. İklim değişikliğinin de su kaynakları üzerindeki etkisiyle, sürdürülebilir kalkınmada tatlı su, merkezi bir öneme sahiptir ve iyileştirilmiş su yönetimine yönelik kritik ihtiyacın yaygın olarak kabul görmesine yol açmıştır. Su kıtlığı ve yüksek su kirliliği seviyeleri, suya erişimi evsel, endüstriyel ve tarımsal faaliyetlerde engellenmektedir. Bu sorunların tespiti iyi bir şekilde

yapılmış olsa da ve giderek daha fazla ilgi görse de, birincil üreticiden tüketiciye ve nehir havzaları içinde değer zinciri boyunca su kullanımını ele alan net ve tutarlı bir yaklaşımın eksik olduğu vurgulanmaktadır. İnsanlığın üretken faaliyetleri ile dünyanın tatlı su kaynakları üzerindeki bu artan baskı arasındaki bağlantıları daha iyi anlamak için, bir ürünün değer zinciri boyunca tüketilen su miktarını ve kullanılan kirlilik asimilasyon kapasitesini ölçmek ve hem yerel hem de küresel bağlamda sürdürülebilirliğini değerlendirmek için çok miktarda veriye ihtiyaç vardır. Bu verilerden yararlanılarak her faaliyetin sürdürülebilir yönetimini sağlamak için en uygun kararlar alınabilir. Bu nedenle her bir faaliyette verilerin çeşitli teknikler kullanılarak ölçeklendirilmesi sürdürülebilirlik çalışmalarını kolaylaştırmaktadır. 1970'lerden günümüze kadar insan faaliyetlerinin doğrudan ve dolaylı etkilerinin değerlendirilmesi gerekliliği vurgulanarak çevresel etki değerlendirmeleri, çevresel girdi- çıktı analizleri, enerji, ekserji analizleri gibi teknikler (Marques et al., 2017), daha sonrasında Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) geliştirilmiştir (Guinee et al., 2011). Son yıllarda öne çıkan ve daha popüler olan diğer bir sürdürülebilirlik göstergesi “ayak izi” kavramıdır. İlgili kavram, ilk olarak 1990'larda Rees (1992) tarafından ekolojik ayak izi olarak önerilen ve birçok çevresel konuyu değerlendirmek için geliştirilen bir göstergedir. Daha sonraları “ayak izi” çalışmaları pek çok alanda geliştirilmiştir. Bunların en yaygın olarak kullanılanlarından biri “su ayak izi” göstergesidir. “Su ayak izi” 2002 yılında Hoekstra ve Hung tarafından geliştirilmiştir (Hoekstra ve Hung, 2002). Gri, mavi ve yeşil su ayak izi bileşenlerinin toplamı olan “Su ayak izi” bir ürünün, bir tesisin, bir organizasyonun, örneğin bir şirketin veya bir sektörün doğrudan ve dolaylı su kullanımını veya sanal su içeriğini ölçmek için kullanılabilen bir gösterge olarak tanımlanmaktadır.

Sürdürülebilir su yönetiminin önemli unsurlarından biri atık su arıtma tesisleridir. Atıksu arıtımı ile daha fazla suyun kullanıma hazır hale getirilmesi ve doğal su kaynakları üzerindeki baskının azaltılması hedeflenmektedir. Atıksu alıcı ortama verilmeden önce arıtıldığında, nihai atıktaki kirleticilerin konsantrasyonu azaldığı için gri su ayak izinin azalacaktır. Gri su ayak izinin hesaplanması yoluyla göstergeler üreterek, atıksu arıtma tesislerinin çevreye ve hidrolojik döngüye katkısı, enerji kaynakları ve iklimle olan etkileşimi, korunan suyun miktarı ile ilgili metrik değerlendirmeler yapmak mümkündür.

Bu çalışmada kentsel bir atıksu arıtma tesisi örneğinde, biyokimyasal oksijen ihtiyacı, kimyasal oksijen ihtiyacı, toplam azot ve toplam fosfor kirlilik parametreleri dikkate alınarak gri su ayak izi muhasebesi yapılmıştır. Sürdürülebilir su yönetimi için alıcı ortamda korunan su hacmini tespit ederek atıksu arıtma tesisinin çevre üzerindeki katkısını metrik sonuçlar ile ölçeklendirmek amaçlanmıştır.

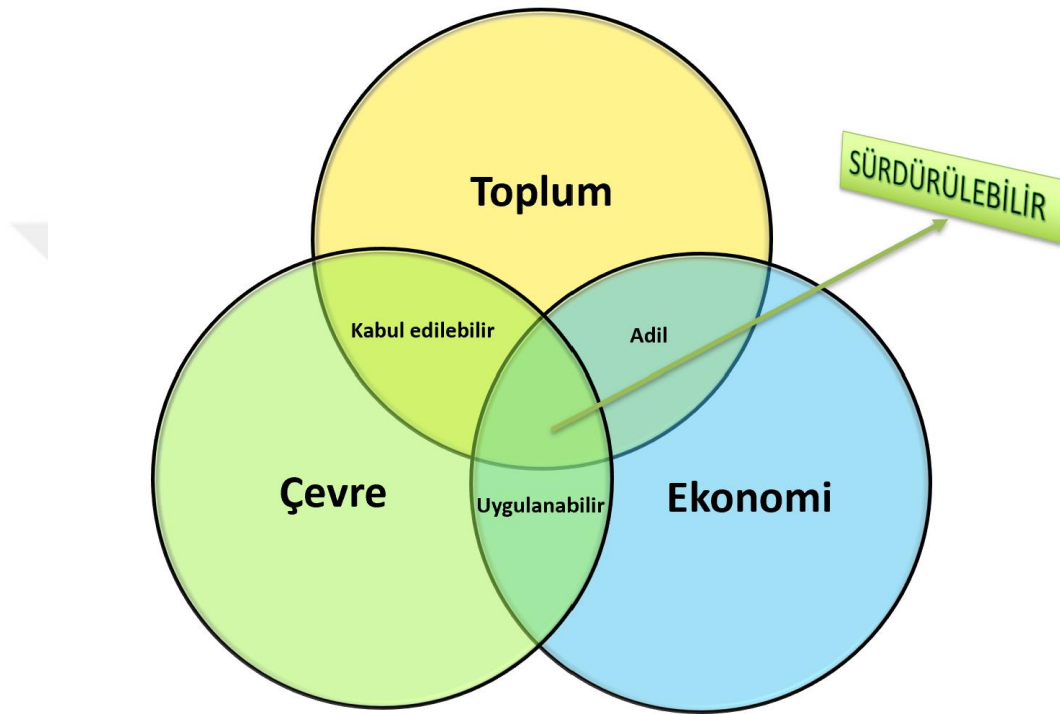
KURAMSAL TEMELLER

Sürdürülebilirlik ve Ayak İzi Göstergeleri

Daimî olma yeteneği (URL 1, 2024) olarak ifade edilen sürdürülebilirlik, son yıllarda sıklıkla kullanılan bir kavramdır. Sürdürülebilirlik, 21. yüzyılda sürdürülebilir kalkınma ifadesiyle daha çok gündeme gelmiştir. Sürdürülebilirlik ve sürdürülebilir kalkınma, özellikle 1987'de Brundtland raporunun yayınlanmasıyla önemli bir ivme kazanmıştır. “Ortak Geleceğimiz” olarak adlandırılan bu raporda, sürdürülebilir kalkınmanın, günümüzün ihtiyaçlarını karşılanırken gelecek nesillerin gereksinimlerinin engellenmemesi gerekliliği üzerinde durulmaktadır. Raporda ilaveten, dünyanın karşı karşıya olduğu birçok krizin, aslında birbiriyle bağlantılı büyük tek bir krizin parçaları olduğu ve sürdürülebilir kalkınma ile ilgili ortak kararlara toplumun tüm paydaşlarının aktif katılımı gerekliliği vurgulanmaktadır. Brundtland Raporu'na göre yoksulluk sürdürülebilirliği azaltmakta ve çevresel baskıları hızlandırmaktadır. Bu nedenle ekonomi ile ekoloji arasında bir denge kurulmasının gerekmektedir. "Ortak Geleceğimizin raporu'nun yayınlanması ve Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu'nun çalışmaları," 1992 Dünya Zirvesi'nin toplanması Gündem 21 ile Rio Deklarasyonu'nun kabul edilmesi ve Sürdürülebilir Kalkınma Komisyonu'nun kurulması için zemin hazırlamıştır (Zaccai, 2012; URL 2, 2024). 20. yüzyılın sonunda yaygın olarak bilinmeye başlanan çevresel sürdürülebilirlik, bu yüzyılın başından itibaren daha fazla kabul görmektedir. Temiz Hava Yasası, Avrupa Birliği (AB) politikaları (EC 2014a) ve dünyanın dört bir yanındaki diğer birçok politika gibi çeşitli politikalara ve anlaşmalara yol açmıştır. Gün geçtikçe sürdürülebilir kalkınma ve çevresel sürdürülebilirliğin birçok tanımı ve yorumu yapılırken (Zaccai, 2012) sürdürülebilir kalkınmada, farklı stratejileri, eylemleri, etkileri tanımlamak için çeşitli terimler kullanılmaktadır (Glavic ve Lukman, 2007). Genellikle sürdürülebilir kalkınma "gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğini tehlikeye atmadan şimdiki zamanın ihtiyaçlarını karşılayan kalkınma" olarak tanımlanmaktadır (Marteel et al., 2003; Amekudzi et al., 2009). Goodland, (1995); tarafından geliştirilen çevresel sürdürülebilirlik kavramı, “insan ihtiyaçları için kullanılan hammaddelerin kaynaklarını koruyarak ve insan atıklarının giderlerinin aşılmasını sağlayarak insan refahını iyileştirmeyi, böylece insanlara zarar gelmesini önlemeyi” amaçlamaktadır. En son yapılan bir tanıma göre, sürdürülebilirlik bilimi, “doğa ve insanlık arasındaki karmaşık ilişkiyi inceleyen, karşılıklı olarak etkilenen bilimsel ve sosyal referans paradigmalarını uzlaştıran ve çok zamansal ve mekânsal ölçekleri kapsayan çözüm odaklı bir disiplindir. Disiplin, sektörel bilgiyi ve çeşitli epistemik ve normatif duruşları

ve çözümlerin tanımına yönelik metodolojileri sermayeleştirme ve entegre etme yeteneğine sahip bütünsel bir yaklaşımı ima eder” (Sala et al., 2013).

Sürdürülebilirlik genellikle üç unsur arasındaki kesişim olarak ifade edilir. Bu üç unsur çevre, ekonomi ve sosyal temalarıdır. Şekil 1’de görüldüğü üzere çevre- ekonomi–sosyal temaların ortak kesişimi sürdürülebilir kalkınmayı belirtmektedir (Giddings et al., 2002; Mori ve Christodoulou, 2012; Cucek et al., 2015 a).



Şekil 1. Sürdürülebilir kalkınma unsurları (URL 3, 2025’den uyarlanmıştır)

Sürdürülebilirliğe ulaşmak önemli bir hedeftir. Sürdürülebilir kalkınma bu hedefe doğru bir ilerlemeyi temsil etmektedir. (Pope et al., 2004; Matustík ve Kocí, 2021). Sürdürülebilirliğin üç unsurunun içerikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

Çevresel unsurlar;

- Yenilenebilir kaynaklar
- Kaynak kullanımının minimize edilmesi
- Kaynak indirgeme
- Geri dönüşüm, yeniden kullanım, onarım
- Yenilenme, kurtarma, yeniden üretim
- Arıtma

Ekonomik unsurlar;

- Çevresel muhasebe
- Eko verimlilik
- Etik yatırımlar

Sosyal unsurlar;

- Sosyal sorumluluk
- Sağlık ve güvenlik
- Kirlenen öder ilkesi (vergilendirme)
- Paydaşlara raporlama

Sürdürülebilirlik çalışmaları için yukarıda belirtilen üç temel unsur dışında ekolojik unsurun da dikkate alınması gerektiği vurgulanmaktadır. Doğal sistemlerde doğadaki her alt sistemin, dolaylı veya doğrudan bağlantılar yoluyla diğer her alt sistemle bağlantılı olduğu ve dolayısıyla doğal ekosistemde, türler arasında rekabet gibi birçok ilişkinin olduğu ve her biri farklı sonuçlara sahip olduğu ilkeleri göz önünde bulundurulmalıdır (Glavic ve Lukman, 2007).

Bu temel prensipler çerçevesinde çevresel, ekonomik ve sosyal birçok yaklaşım geliştirilmiştir.

Çevresel yaklaşımlar;

- Kirlilik kontrolü
- Temiz üretim
- Eko tasarım
- Yeşil kimya
- Yaşam döngüsü analizi
- Atık minimizasyonu
- Sıfır atık temalarıdır.

Sürdürülebilir bir sistemi anlamak ve ona doğru ilerleme kaydetmek için ekonomik ve toplumsal yaklaşımlar ise;

- Çevresel yasallaştırma,
- Gönüllü çevresel anlaşmalar
- Tedarik zinciri yönetimi olarak değerlendirilmektedir.

Sürdürülebilirliğin tüm unsurları dikkate alınarak geliştirilen yaklaşımlar daha sonraları bütüncül stratejilerin oluşmasını sağlamıştır. Her biri, birbirine bağlı yaklaşımlardan oluşan, çevrenin bütünsel korunmasını sağlamak ve kısa ve uzun vadeli insan refahına katkıda

bulunmak için alt sistemler oluşturularak çeşitli stratejiler oluşturulmuştur. Çevresel alt sistemler;

- Çevre Mühendisliği ve çevre teknolojileri
- Entegre atık yönetimi
- Endüstriyel ekoloji ve
- Kirlilik önleme olarak bilinirken,

Ekonomik ve sosyal stratejiler;

- Çevresel yönetim stratejileri ve
- Ürün hizmet sistemleri stratejileri olarak bilinmektedir.

Yukarıda belirtilen tüm çalışmalar yani sürdürülebilir üretim, sürdürülebilir tüketim ve sorumluluk sistemlerini oluşturmaktadır (Glavic ve Lukman, 2007).

Konuyla ilgili olarak uluslararası düzeyde BM üyesi ülkeler tarafından 2030 sonuna kadar ulaşılması amaçlanan hedefleri içeren bir evrensel eylem çağrısı olan Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarını (Sustainable Development Goals) (SDG) için çevresel- sosyal ve ekonomik temaları, Şekil 2’de görüldüğü üzere 17 evrensel amaçtan oluşmaktadır. Bu SDG’ları 169 gösterge ile takip edilmektedir (UNDP, 2024). Bu amaçlar yoksulluğun, açlığın sona erdirilmesinden, temiz su, sanitasyon, iklim eylemi, sudaki yaşam, sürdürülebilir şehirler, yenilikçi sanayinin sağlanmasına kadar birçok çevresel, ekonomik ve toplumsal amaçları kapsamaktadır.



Şekil 2. BM Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (URL 4, 2025’den alınmıştır)

Sürdürülebilir kalkınma için pek çok çaba gösterilmiş ve pek çok hedef belirlenmiş olsa da çevresel sürdürülebilirlik ve sürdürülebilir kalkınma değerlendirmeleri için ölçülendirmenin hâlâ bir sorun olduğu ve yeni kavramlar ve ölçümlerin geliştirilmesi gerektiği belirtilmektedir (Cucek et al., 2012). Metriklerin anlaşılması kolay ve kullanıcı dostu olması, verilerin kısa sürede toplanması ve maliyet açısından uygun olması önemlidir (Marteel et al., 2003; Ness et al., 2007), sürdürülebilirlik değerlendirmesi üç ana kategoriye ayrılmaktadır;

- Ürünle ilgili değerlendirme
- Entegre değerlendirme araçları
- Göstergeler/endeksler

Göstergeler birçok işlevi yerine getirmektedir. Bilgileri basitleştirerek, açıklayarak ve kullanılabilir hale getirerek daha iyi kararları ve daha etkili eylemleri sağlayabilmektedirler. Çoğu zaman verilerin normalleştirilmesi gerekir ve bu da, oranlar kullanılarak yapılabilir. Fiziksel ve sosyal bilim bilgisini karar alma sürecine dahil etmeye yardımcı olabilirler ve

SDG'lere doğru ilerlemeyi ölçmeye ve kalibre etmeye yardımcı olabilirler. Ekonomik, sosyal ve çevresel aksaklıkları önlemek için erken uyarı sağlayabilirler (UN, 2007).

Sürdürülebilirliğin ölçeklendirilmesinde tercih edilen yaklaşım ne olursa olsun, hangi faaliyetin veya davranışın sürdürülebilir olduğuna karar verebilmek için çok miktarda bilgiye ihtiyaç vardır (Matustík ve Kocí, 2021). Bu nedenle, 1970'lerden günümüze kadar insan faaliyetinin hem doğrudan hem de dolaylı etkilerini değerlendirmenin gerekli olduğu birçok çalışmada vurgulanmıştır (Patterson et al., 2017). Çevresel değerlendirmeler için enerji, emerji veya ekserji analizi, çevresel girdi-çıktı analizi ve daha birçok teknik geliştirilmiştir (Marques et al., 2017; Matustík ve Kocí, 2021). Geliştirilen bu yöntemlerin içinde ISO tarafından standartlaştırılmış Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) yer almaktadır (Guinee et al., 2011; Matustík ve Kocí, 2021). Bu yöntemlere ilaveten son yıllarda çevresel sorunları değerlendirmek için geliştirilen ve anlaşılır bir sürdürülebilirlik göstergesi olarak geniş bir popülerlik kazanan yöntem “ayak izi” göstergeleridir (Cucek et al., 2012; Fang et al., 2014; Chen et al., 2020; Matustík ve Kocí, 2021). “Ayak izi”, doğal kaynakların insanlar tarafından tahsis edilmesini tanımlayan niceliksel bir ölçümdür (Hoekstra, 2008). Aynı zamanda insan faaliyetlerinin nasıl farklı etkiler oluşturabileceğini açıklar.

Sürdürülebilirliğin üç unsuru ile ilişkili günümüze kadar geliştirilen ayak izi kategorileri çevresel ayak izi, sosyal ayak izi ve ekonomik ayak izi temel başlıkları ile ifade edilmektedir. Bu kategorilere ait ayak izi grupları Tablo 1’de verilmiştir. En çok bilinen ve en yaygın olarak kullanılan ayak izleri çevresel ayak izleridir. “Çevresel Ayak İzi Ailesi” oluşturan en yaygın kullanılan ayak izlerinin Karbon Ayak İzi (CF) ve Su Ayak İzi (WF) olduğu söylenebilir. (Galli et al. 2011). Tablo 2’de görüldüğü üzere sürdürülebilirlik çalışmalarında çevresel, sosyal ve ekonomik ayak izlerinin birleştirilmesiyle ve bileşik olarak bazı hesaplamaların yapılmasıyla “bileşik ayak izi” tanımı geliştirilmiştir. Bileşik bir gösterge, iki veya daha fazla bireysel göstergeyi veya "alt göstergeyi" tek bir sayıya birleştirmektedir. Bileşiklerin, karmaşık bilgileri tek bir endekste ifade etme ve şirketlerin veya ülkelerin genel sürdürülebilirlikleri açısından sıralanmalarına olanak sağlama avantajları olmaktadır (Cucek et al., 2012).

Tablo 1. Sürdürülebilirlik Bileşenlerine Göre Ayak İzleri

Ayak İzi Ailesi	Alt Kategoriler
Çevresel Ayak İzleri	Karbon Ayak İzi Su Ayak İzi Enerji Ayak İzi Emisyon Ayak İzi Azot Ayak İzi Arazi Ayak İzi Biyoçeşitlilik Ayak İzi Diğer Çevresel Ayak İzleri (Fosfor Ayak İzi İnsan Ayak İzi Atık Ayak İzi
Sosyal Ayak İzleri	Sosyal Ayak İzi Diğer Sosyal Ayak İzleri İnsan Hakları Ayak İzi Yolsuzluk Ayak İzi Yoksulluk Ayak İzi Çevrimiçi Sosyal Ayak İzi İş Ayak İzi İş Çevresel Ayak İzi Gıda Enerji Ayak İzi Sağlık Ayak İzi
Ekonomik Ayak İzleri	Finansal ayak izi Ekonomik ayak izi

Tablo 2. Birleşik ve Bileşik Göstergeler

Ayak İzi Ailesi	Alt Kategoriler
Birleşik (Çevresel, Sosyal, Ekonomik) Ayak İzleri	Ekserji Ayak İzi Kimyasal Ayak İzi
Bileşik Ayak İzleri	Ekolojik Ayak İzi (EF) Sürdürülebilir Proses Göstergesi Sürdürülebilir Çevresel Performans Göstergesi

Suyun Sürdürülebilirliği ve Su Ayak İzi Göstergesi

Suyun sürdürülebilir yönetimi günümüz dünyası ve gelecek nesiller için son derece önemlidir. Dünyadaki suyun sadece %2,5'i tatlı su olup bu suyun üçte ikisi kutuplarda ve dağlık bölgelerde kar ve buzullar olarak bulunmaktadır (Anderson, 2003). Dolayısıyla kullanıma açık olan su yaklaşık %1 civarındadır. Dünya çapında yaklaşık 4430 km³ tatlı su kullanılmakta olup,

bunun %70'i tarımda, %25'i sanayide ve %5'i evlerde kullanılmaktadır (Maqsoom et al., 2021). Global olarak tarım, sanayi ve evsel kullanımlar için küresel tatlı su çekimleri 1901 yılında 671,31 milyar m³/yıl'dır. Bu miktar 2014 yılı verilerine göre 3,99 trilyon m³/yıl ulaşmıştır. Artan küresel nüfus, teknolojik ve ekonomik gelişmelerle ilintili olarak tüketimin artması, küresel tatlı su kullanımının 1900'den bu yana yaklaşık altı kat arttığını göstermektedir. Ülkemizde de benzer durum gözlenmektedir. Örneğin, 2014 yılı verilerine göre çekilen su miktarı 3,99 trilyon m³/yıl ulaşmıştır. Aynı yıl ülkemizde tarım, sanayi ve evsel kullanım için çekilen su miktarı 51,97 milyar m³/yıl iken bu değer 2020 yılında 61,53 milyar m³/yıl olmuştur (Our World in Data, 2020). 2030 yılına kadar küresel su talebinin %50 oranında artması beklenmektedir (UN-Habitat, 2016, Gomez-Llanos et al., 2018).

Su tüketiminin gün geçtikçe daha da artması tatlı su kaynakları üzerinde ciddi baskı oluşturmaktadır. Dünya çapında yaklaşık 1,1 milyar insan suya erişememekte ve toplam 2,7 milyar insan yılın en az bir ayı boyunca su kıtlığı yaşamaktadır. Su kaynakları üzerindeki baskı sadece suyun aşırı tüketilmesi ile ilgili değildir. Su kirlenmesi su kaynakları üzerindeki baskının bir diğer temel sebebidir. Bu durum yani yetersiz sanitasyon 2,4 milyar insan için önemli bir sorun olmaktadır. Dolayısıyla insanlar, patojen kaynaklı hastalıklara etkilenmektedirler. İklim değişikliğinin dünya genelindeki hava ve su modellerini değiştirmesi bazı bölgelerde kıtlık ve kuraklıklara, bazı bölgelerde ise sellere neden olarak doğal su döngüsünün bozulmasına neden olmaktadır. Aşırı su çekilmesi, suyun kirlenmesi, iklim değişikliğinin yanı sıra su kayıp ve kaçakları gibi birçok yan etkiler sebebiyle su sistemlerinin çoğu strese girmiştir (Vanham ve Bidoglio, 2013; Müller et al., 2024).

Nehirlerin, göllerin kuruduğu veya kullanılamayacak kadar kirlendiği günümüzde şahit olunan durumlardır. Dünyadaki sulak alanların yarısından fazlası yok olduğu bilinmektedir. Tarım, diğer su kullanan sektörlerle göre en çok su tüketimini gerçekleştirmekte olup tarımsal sulamada pek çok zaman ve yerde geleneksel yöntemlerin kullanılması veya bilinçsiz sulama işlemleri nedeniyle su israf edilmektedir. Endüstriler, ele alınması gereken bir risk olan su kıtlığına ve bozulmasına doğrudan ve dolaylı olarak giderek önemli katkıda bulunmaktadır (Fallahi et al., 2024).

2025 yılına kadar dünya nüfusunun üçte ikisinin su kıtlığıyla karşı karşıya kalabileceği ve dünyadaki ekosistemlerin daha da zarar göreceği vurgulanmaktadır (URL 4, 2024). Yüzey ve yeraltı suyu kaynaklarının nitelikleri ve miktarları, nüfus artışı, şehirlere göç, artan kaynak tüketimi ve iklim değişikliğinin etkisiyle etkilenmektedir (UNEP, 2007; Cucek et al., 2015a).

SDG 6.4: “2030 yılına kadar, tüm sektörlerde su kullanım verimliliğini önemli ölçüde artırın ve su kıtlığını gidermek, su kıtlığı çeken insan sayısını önemli ölçüde azaltmak için sürdürülebilir tatlı su tedarikini sağlayın” hedefini vurgulamaktadır (URL 5, 2024).

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 et al., 2024). Dolayısıyla suyun sürdürülebilir yönetimi çevresel, toplumsal ve ekonomik olarak son derece önemli ve elzemdir. Önceleri su kaynakların yönetimi genellikle bölgesel, ulusal veya su havzası ölçeğinde ele alınmıştır. Ancak küresel değişimler ve küreselleşme etkilerinin tatlı su kaynakları artan bir şekilde etkilediği fark edilince bu sorunlar küresel düzeyde tartışmaya ve araştırılmaya başlanmıştır. Sürdürülebilir su yönetimini çalışmalarını desteklemek ve ölçeklendirebilmek için “Su Ayak İzi” kavramı 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 değişikliğiyle mümkündür (Ercin ve Hoekstra, 2014; Cucek et al., 2015a).

WF, CF, EF gibi, çevresel ayak izi göstergeleri ailesinin bir parçasıdır. WF kavramı, 2002 yılında, Hollanda Twente Üniversitesi'nde Arjen Hoekstra tarafından, mal ve hizmetlerin tüm tedarik zinciri boyunca üretilmesi için tüketilen ve kirlenen su miktarını ölçmek için bir ölçüt olarak ortaya atılmıştır (URL 6, 2024; URL 7, 2024).

WF kavramı, ayrıca 1990'ların başında John Allan tarafından ortaya atılan sanal su ticareti fikriyle de ilgilidir (Chapagain ve Hoekstra, 2004). Konuyla ilgili çalışmalar su ayak izlerinin tahmin edilmesi için UNESCO-IHE'nin 2004 tarihli Ulusların Su Ayak İzi Raporu, 2008 tarihli Suyun Küreselleşmesi isimli kitabı ve 2011 tarihli küresel standardı belirleme kılavuzu olan Su Ayak İzi Değerlendirme Kılavuzu gibi bazı önemli yayınlarla gelişmiştir. Bu süreçte alanında dünya lideri kurumların iş birliğiyle 2008 yılında Su Ayak İzi Ağı (WFN) kurulmuştur. Hükümetler, işletmeler ve artan su kıtlığı ve artan su kirliliği seviyeleri ve bunların insanlar ve doğa üzerindeki etkileri konusunda endişe duyan topluluklar arasında bilgi, araç ve yenilikleri paylaşmak için bir platform görevi gören uluslararası bir öğrenme topluluğu olan WFN 'nın üreticiler, yatırımcılar, tedarikçiler ve düzenleyiciler gibi tüm sektörlerden, sivil toplum kuruluşlarından ve akademisyenlerden oluşan bir yapıdır. WFN, bilimsel esasları dikkate alarak, hükümetlerin, şirketlerin, bireylerin ve küçük ölçekli üreticilerin, dünyada tatlı suyu kullanma ve paylaşma durumlarını dönüştürmelerine olanak tanıyan pratik ve stratejik çözümler sağlamaya yönelik bir misyona sahiptir (URL 6, 2024). Şubat 2011'de, WFN, çevre

örgütleri, şirketler, araştırma kurumları ve BM'nin küresel bir iş birliği çabasıyla Küresel Su Ayak İzi Standardını başlatmış akabinde Temmuz 2014'te, Uluslararası Standardizasyon Örgütü, büyük şirketler, kamu otoriteleri, sivil toplum örgütleri, akademik ve araştırma grupları ile küçük ve orta ölçekli işletmeler gibi çeşitli geçmişlere sahip uygulayıcılara su ayak izi değerlendirmesi yapmaları için pratik rehberlik sağlamak amacıyla ISO 14046:2014, Çevre yönetimi- su ayak izi- ilkeler, gereklilikler ve kılavuzlar yayımlanmıştır. ISO standardı, LCA ilkelerine dayanmakta olup ürün ve şirketlerin farklı türdeki değerlendirmeleri için uygulanabilir (ISO, 2014; URL 6, 2024).

WF, bir birey, şehir, il, eyalet veya ulus gibi iyi tanımlanmış herhangi bir tüketici grubu veya kamu kuruluşu, özel teşebbüs veya ekonomik sektör gibi üretici için belirli bir ürün üretiminde su kullanımını nicelleştirme yöntemi olarak tanımlanırken ayrıca ithalat ve ihracattaki somut veya sanal suyu da yansıtabilir (Cucek et al., 2015b; Hoekstra, 2008). Aynı zamanda malların ve hizmetlerin üretiminde tüketilen doğrudan ve dolaylı su miktarlarını bütüncül bir şekilde ele alan gerçek su tüketiminin bir göstergesidir (Hoekstra, 2008; URL 8, 2024).

Su kullanımı üreticiden ziyade tüketiciye atfedildiği için WF tüketime dayalı bir ölçüm olarak kabul edilir (Gleick et al., 2014). Sanal su kavramıyla yakından bağlantılı olup (Hoekstra ve Chapagain, 2007) kullanılan, tüketilen ve/veya kirletilen doğrudan ve dolaylı tatlı suyun toplam hacmini temsil etmektedir (Cucek et al., 2015b). WF kavramının gücü, sistemin su yönetimi hakkında geniş bir bakış açısı ve su kullanımının daha derin bir şekilde anlaşılmasını sağlamasıdır.

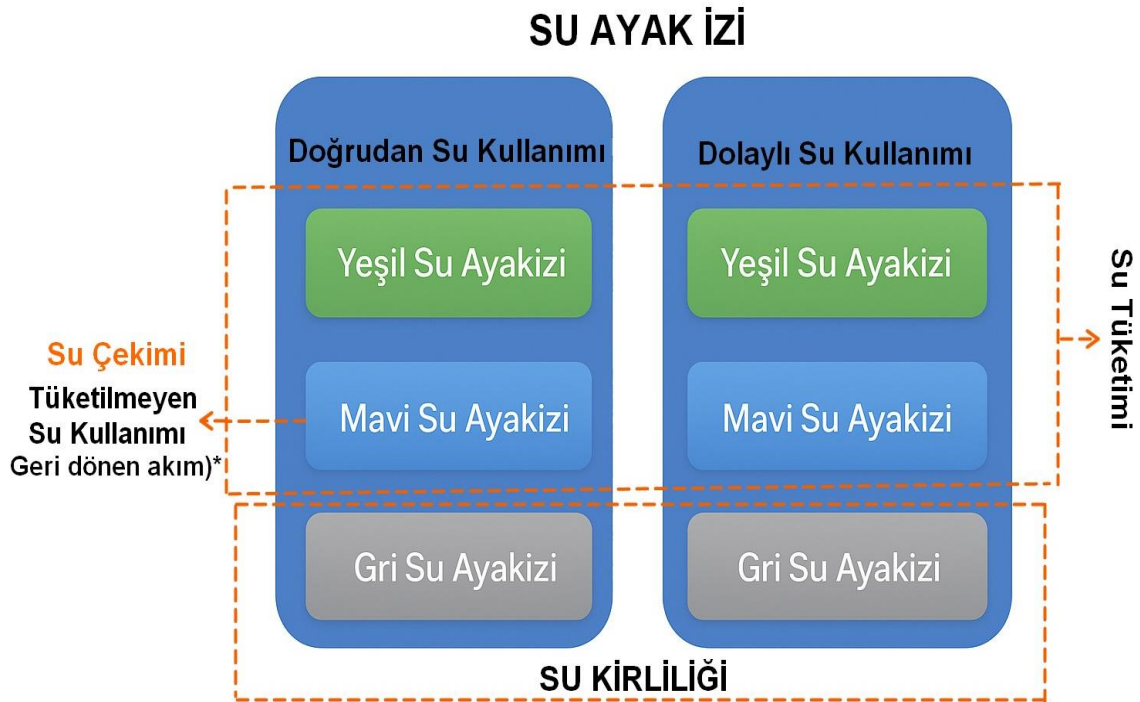
Hoekstra et al. (2009), WF'ne ilgi gösterilmesinin ana nedeninin, tüketimlerimizin tatlı su kaynakları üzerinde oluşturduğu etkilerin fark edilmesinin olduğunu, WF üretim ve tedarik zincirlerinin entegre olarak ele alınması ve su kıtlığı ve kirliliği gibi sorunların daha iyi anlaşılabilmesi için son derece etkili ve kapsayıcı bir araç olduğunu vurgulamıştır. WF, musluktan akan, kaynaktan tarlaya verilen su gibi görünen su olarak nitelendirilen suyu ifade etmemektedir. Suyla ilgili doğrudan ve dolaylı olarak iç ve dış bütün tüketimleri temsil eden bir göstergedir. Sadece direkt tüketilen suyu değil satın alınan ürünlerin içeriğindeki su tüketimini, başka coğrafyalardan ithal edilen ürünlerle birlikte sebep olunan, gereksiz kullanımlarla birlikte küresel ölçekte başka insanların adil su hakkı üzerinde sebep olunan görünmeyen suyu da temsil etmektedir. Dolayısıyla WF doğrudan ve dolaylı WF olarak tanımlanmaktadır.

Doğrudan WF, bir tüketicinin veya üreticinin su tüketimini ve su kullanımına bağlı kirlilik değeri olarak tanımlanır.

Dolaylı WF, tüketilen veya üretilen ürünlerin üretimi için gerekli su tüketimine ve kirliliğe karşılık gelir ve tüketiciler tarafından tüketilen tüm ürünlerin veya üretici tarafından kullanılan bütün (su harici) girdilerin su ayak izlerinin toplamına eşittir.

Örneğin et tüketiminde, tüketicinin doğrudan su ayak izi, eti hazırlarken ve pişirirken tüketilen ve kirlenen su hacmini ifade eder. Et tüketicisinin dolaylı su ayak izi ise, eti satan perakendecinin, eti satışa hazırlayan gıda işleyicisinin, hayvanların yetiştirildiği çiftliğin ve hayvanlar için yem üreten tarım çiftliğinin doğrudan su ayak izine bağlıdır (URL 8, 2024). Dolayısıyla WF, birim zaman veya işlevsel birim başına tüketilen (buharlaştırılan veya ürüne dahil edilen) ve kirlatilen su hacimleri açısından ölçülür (Galli et al., 2012; Dong et al., 2013). Su hacmini ifade etmesinin yanısıra kullanılan suyun türünü ne zaman ve nerede kullanıldığını da göstermekte olan çok yönlü bir gösterge olarak ifade edilmekte olup su verimliliği ile ilişkilendirilmektedir. Dolayısıyla WF, su kullanımını ve kirliliği tüm tedarik zinciri boyunca entegre eder (Galli et al., 2011).

Mavi, yeşil ve gri su olmak üzere üç gruba ayrılan bu sular farklı türlerdeki su kullanımını ölçer. Ayrıca su kullanımlarını belirli yerlere ve zamanlara bağlar ve bir sistemin hidrolojik sürdürülebilirliğini değerlendirir (Cucek et al., 2015b). Bu nedenle, yeşil su ayak izi, mavi su ayak izi ve gri su ayak izi olarak ifade edilen WF bileşenleri doğrudan ve dolaylı su kullanımına bağlı olarak Şekil 3'te gösterildiği gruplandırılmaktadır.



Şekil 3. Su ayak izi bileşenleri (Hoekstra et al., 2009'dan uyarlanmıştır)

WFyeşil, bir malı üretmek için ihtiyaç duyulan toplam yağmur suyu hacmidir. Özellikle tarım, bahçe ve orman ürünleri için geçerlidir. WFyeşil, toprakta depolanan, bitkiler tarafından terleme ve buharlaşma yoluyla tüketilen yağış kaynaklı sudur.

- WFyeşil, akışa geçmeyen ve yeraltı suyuna karışmayan ancak toprakta depolanan veya geçici olarak toprağın veya bitkinin üzerinde kalan karasal yağış anlamına gelir.
- Tarlalarda ve orman alanlarında gerçekleşen yağmur suyu evapotranspirasyonu ile hasat edilen bitkiye dahil olan yağmur suyu toplamını ifade eder (URL 8, 2024; Hoekstra et al., 2009).

WFyeşil (Hacim /Zaman) = Buharlaşan Yeşil Su + Ürüne Dahil Olan Yeşil Su

WFMavi, bir malı üretmek için ihtiyaç duyulan toplam yüzey ve yeraltı tatlı su hacmidir. İçme-kullanma suyu, sulama suyu ve sanayi su tüketimleri mavi su ayak izi olarak değerlendirilebilir.

WFMavi; evsel, endüstriyel ve tarımsal su kullanımları için, yüzey veya yeraltı suyu kaynaklarından su iletim hattına transfer edilen brüt su olarak tanımlanabilir. Örneğin; tarım için buharlaşma kaybı, bitkisel ürün tarafından kullanılan su ve drene edilen suların toplamı olarak, endüstriyel ve evsel sektörlerdeki WFMavi ise, bir havzada mevcut yüzey ve yeraltı suyu kütlelerinden verilen su olarak ifade edilebilir (URL 8, 2024; Hoekstra et al., 2009).

WFMavi (Hacim/Zaman) = Buharlaşan Mavi Su + Ürüne Dahil Olan Mavi Su + Drenaj Miktarı

WFgri, noktasal ve yayılı kirletici kaynakları için hesaplanabilir.

- WFgri, kirliliğin göstergesidir ve kirlilik yükünü alıcı su kütlesindeki doğal konsantrasyonlarına indirmek için gereken tatlı su hacmi olarak tanımlanır.
- WFgri, kirlilik yükünün, kirlilik sonucunda ortamdaki mevcut su kalitesi durumu ile doğal konsantrasyonu arasındaki farka bölünmesi ile hesaplanır (URL 8, 2024; Hoekstra et al., 2009).

WFgri (hacim /zaman) = Kirletici yükü / (alıcı su kütlesinde ölçülen maksimum kirletici konsantrasyonu – alıcı su kütlesinde ölçülen doğal konsantrasyon)

WF Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi

WF değerlendirmesi aşağıda belirtilen faaliyetleri içermektedir:

- Bir sürecin, ürünün, üreticinin veya tüketicinin WF'ni ölçmek ve konumlandırmak veya belirli bir coğrafi alanda su ayak izini uzay ve zaman içinde ölçmek
- WF'nin çevresel, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirliğini değerlendirmek
- Bir yanıt stratejisi formüle etmek

Genel olarak WF'ni değerlendirme, insan faaliyetlerinin veya belirli ürünlerin su kısıtlılığı ve kirliliği sorunlarıyla ilişkisini analiz etmek, faaliyetlerin ve ürünlerin su açısından nasıl daha sürdürülebilir hale gelebileceğini görmeyi amaçlamaktadır.

Tam bir WF değerlendirmesi 4 ayrı aşamadan oluşmaktadır:

- ✓ Hedef ve kapsam belirleme
- ✓ WF muhasebesi
- ✓ WF sürdürülebilirlik değerlendirmesi
- ✓ WF yanıt formülasyonu

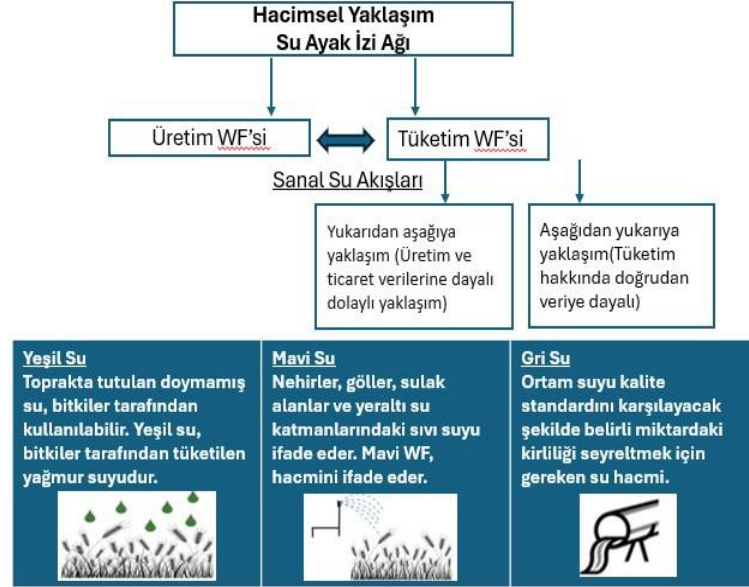
WF değerlendirmelerinde şeffaflık önemlidir. Bu nedenle çalışmanın hedefleri ve kapsamı net bir şekilde tüm ayrıntılarıyla belirlenmelidir (Hoekstra et al., 2009).

Şekil 4'de görüldüğü üzere WF'nin değerlendirilmesi ile ilgili literatürde iki ana yaklaşım vardır (UNEP, 2011; Vanham ve Bidoglio, 2013; Stejskalová et al., 2021):

- WFN tarafından geliştirilen hacimsel yaklaşım (Hoekstra et al., 2011)
- LCA topluluğu tarafından geliştirilen ağırlıklı yaklaşım (Vanham ve Bidoglio, 2013; Paterson et al., 2015).

WFN'na göre hacimsel yaklaşımla WF değerlendirmesinde, bir coğrafi bölgenin üretiminin ($WF_{\text{üretim}}$) ve tüketiminin ($WF_{\text{tüketim}}$) WF'si arasında önemli bir ayrım yapılması gerektiği belirtilmektedir (Şekil 4). Bu ayrım iki şekilde yapılabilir. Birincisi, yerel su kaynaklarının doğrudan ve dolaylı su kullanımının toplamıdır. İkincisi, yerel tüketim yoluyla yerel ve yabancı su kaynaklarının doğrudan ve dolaylı su kullanımının toplamıdır. Bu ikisi arasında denge, endüstriyel ve tarımsal ürünlerin ticaretinden kaynaklanan sanal su akışları (ithalat ve ihracat) ile sağlanır. $WF_{\text{tüketim}}$, yukarıdan aşağıya veya aşağıdan yukarıya yaklaşımla hesaplanabilir. Yukarıdan aşağıya yaklaşımda, artı sanal su ithalatı eksi sanal su ihracatı eşittir. Aşağıdan yukarıya yaklaşım, tüketime ilişkin doğrudan temel verilere dayanmaktadır. Yeşil, mavi ve gri olarak üç bileşenden oluşan WF, tek bir toplam olarak ifade edilebilir. Ancak aslında su kullanımının çok boyutlu bir göstergesidir ve farklı su tüketimi ve kirliliğini mekân ve zamanın bir fonksiyonu olarak göstermektedir (Vanham ve Bidoglio, 2013).

Aşamalar	Hacimsel Yaklaşım (Su Ayak İzi Ağı (WFN))	Yaşam Döngüsü Analizi Yaklaşımı (LCA Topluluğu)
Hazırlık	Hedefleri ve kapsamı belirlemek	
Envanter	WF Muhasebe	Yaşam Döngüsü Envanteri (YDÜ)
Etki Değerlendirmesi	WF Sürdürülebilirlik değerlendirmesi	Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi (LCIA)
Sonuç	WF Tepki Formülasyonu	Tercüme

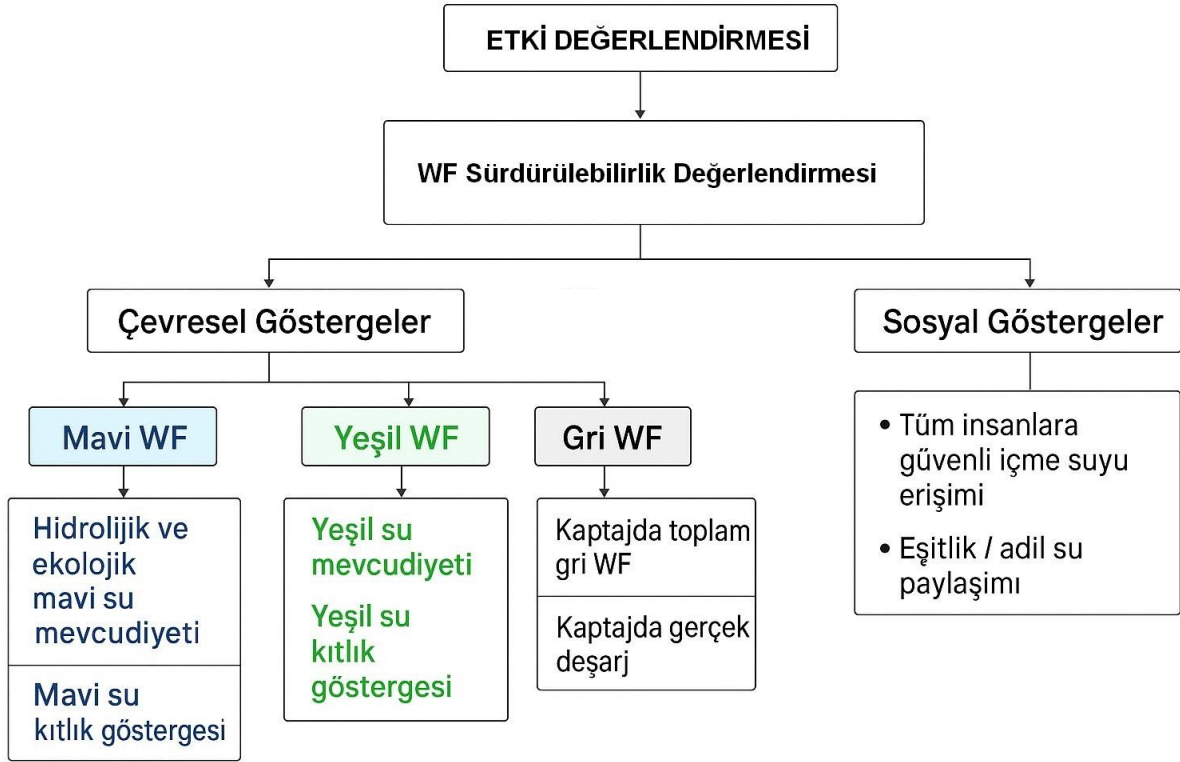


Şekil 4. WF değerlendirmesi için WFN ve LCA yaklaşımları ve WFN yaklaşımında WF muhasebesine ilişkin ayrıntılar (Vanham ve Bidoglio, 2013'den uyarlanmıştır)

WF su kullanımının bir göstergesi olduğundan, sürdürülebilirlik değerlendirmelerinde, WF'nin hesaplanan değerinin taşıdığı anlam hakkında bir fikir sahip olmak için mevcut kaynaklarla karşılaştırma yapılması gerekmektedir.

WF sürdürülebilirlik değerlendirmesi, WF değerlendirmesinde (Şekil 1) belirli bir WF'nin çevresel, sosyal ve ekonomik açıdan sürdürülebilir olup olmadığını değerlendirmeyi amaçlayan bir aşamadır (Şekil 5). Coğrafi çevresel sürdürülebilirlik göstergelerinden (yeşil ve mavi su kıtlığı ve su kirliliği seviyesi) mavi su kıtlığı göstergesi en çok geliştirilen ve şu anda uygulanan göstergedir. Mavi su üretim miktarının coğrafi alandaki ekolojik mavi su kullanılabilirliğine (hidrolojik su kullanılabilirliği eksi çevresel akışlar) bölünmesiyle hesaplanır. Yeşil su kıtlığı göstergesi, yeşil su üretiminin coğrafi bölgenin yeşil su kullanılabilirliğine bölünmesiyle hesaplanır; burada, ikincisi, karadan gelen yağmur suyunun toplam buharlaşma terlemesinden doğal bitki örtüsü için ayrılmış karadan gelen evapotranspirasyonun çıkarılması ve üretken hale getirilemeyen karadan gelen ET'nin çıkarılmasıyla hesaplanır. Su kirliliği düzeyi göstergesi bir havzadaki tüm gri WF_{üretim}'nin toplamının gerçek akışına bölünmesiyle elde edilir. Sosyal ve ekonomik göstergeler hala daha geliştirilmelidir. Toplam (çevresel, sosyal, ekonomik) sürdürülebilirliği ele almak için daha fazla koşul şunlardır: (1) toplam WF, dünyadaki adil bir payın altında kalmaktadır ve (2) WF

(hepsi yeşil, mavi ve gri) üretim süreçlerinin – bölgede üretilen ve tüketilen ürünlerin – (kabul edilebilir toplumsal maliyetle) azaltılamaz veya önlenemez. İkincisi, kıt su ve kara kaynaklarının küresel bağlamına atıfta bulunur. Bir havzadaki yeşil, mavi veya gri su havzası, çevresel, sosyal veya ekonomik sürdürülebilirlik kriterlerinden birini karşılamadığında, su havzası ‘coğrafi olarak sürdürülebilir’ olarak kabul edilemez.



Şekil 5. WF Sürdürülebilirlik değerlendirme için çevresel, sosyal ve ekonomik göstergeler (Vanham ve Bidoglio, 2013’den alınmıştır)

Atıksu Arıtma Tesislerinde Su Ayak izi

Atıksu arıtma tesislerinin (AAT) WF’nin belirlenmesi ile ilgili çalışmalar henüz çok yenidir. Atıksu alıcı ortamlara verilmeden önce arıtıldığında, nihai atıktaki kirleticilerin konsantrasyonu azaldığı için WFgri’nin de azalacağı, bir prosesin WFgri’nin, arıtmadan önceki kaliteye değil, nihai olarak çevreye atıldığı andaki atık suyun kalitesine bağlı olduğunun unutulmaması gerektiği, atık su arıtımı ile WFgri’nin 0’a indirebileceği ilk defa Hoekstra et al. (2011) tarafından vurgulanmıştır. Bu çalışmada, açık havuzlarda arıtma işlemi sırasında buharlaşma gerçekleştiğinde atık su arıtma işleminin kendi başına WFmavi’ye sahip olacağı da belirtilmektedir (Hoekstra et.al. 2011).

Bir AAT’nin WF ilk defa Shao ve Chen (2013) tarafından AAT’nin tesisin yapım ve işletme aşamalarında WFN yöntemi esas alınarak sadece WFmavi hesaplanmıştır. Çin/Pekin’de bir AAT için yürütülen çalışmanın amacı AAT’nin çevreye olan etkisinin WF olarak

hesaplanabilmesi için belirli bir yöntem oluşturmak olarak ifade edilmiştir. Wfmavi'sini hesaba katmak için ekonomik geniş girdi-çıktı ve ayrıntılı süreç tabanlı yöntemleri birleştirerek hibrit bir yaklaşım kullanılmıştır. Çalışmada arıtılan 1 m³ atık suyun 3,12 L Wfmavi izine sahip olduğunu hesaplanmış ve bu ayak izinin de %57,14'lük kısmının elektrik, %10,28'inin temiz su, %5.59'luk kısmının ise kimyasal tüketimi kaynaklı olduğu belirtilmiştir.

Morera et al. (2016), WF metodolojisinin AAT'nde uygulanabilirliğini gösterdikleri çalışmalarında, İspanya La Garriga AAT'de arıtmasız deşarj, ikincil arıtma ve üçüncül arıtma dahil olmak üzere üç atık su arıtma senaryosunun Wfmavi ve WFgri 'lerini değerlendirmek için WF değerlendirme metodolojisiyle uyumlu süreç tabanlı yaklaşım benimsemişlerdir. Çalışmada AAT'leri için Wfmavi ve WFgri'nin öneminin vurgulanması, AAT'nde yapılacak iyileştirmelerin WF kavramıyla olumlu etkilerinin hesaplanabilmesi amaçlanmıştır. AAT'nin sırayla Wfmavi ve WFgri'nin toplam WF oranlarının sırasıyla %5 ve %95 olduğu hesaplanmıştır. Arıtmasız deşarj, ikincil arıtma ve fosfor giderimi için üçüncül arıtma senaryolarına göre, Wfmavi ve WFgri hesaplanmıştır. WFgri için Toplam Organik Karbon (TOK), Toplam Azot (TN) ve Toplam Fosfor (TP) parametreleri dikkate alınmıştır. İncelenen AAT'de, yasal sınırları karşılamak için sırasıyla ikincil arıtma ve üçüncül arıtma olarak kimyasal fosfor giderimi kullanıldığında WF'nin %51,5 ve %72,4 oranında azalmıştır. Çalışmada TP gideriminin arıtmadan sonra daha yüksek etkisi ve WF'nin daha fazla azaltılması nedeniyle bir öncelik olması gerektiği ve WF'nin kentsel su döngüsünde faydalı bir gösterge olduğu belirtilmiştir.

Gu et al. (2016), AAT'nde su-enerji bağlantısının tam kapsamlı değerlendirmenin zor olduğunu vurgulamalarına rağmen AAT'nin hidrolojik döngü, enerji kaynakları ve iklimle nasıl etkileşime girdiğini anlamak için bir yol sağlamak amacıyla WF metodolojisi ile ve su-enerji bağlantısına dayanarak daha kapsamlı bilgi elde etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada WFgri kavramına dayalı olarak yeni bir gösterge olan "WFgri azaltma" göstergesi önerilmiştir. Bu gösterge su kaynakları üzerindeki insan etkilerini azaltmada atık su arıtma tesislerinin rolünü daha iyi değerlendirmek için kullanılmıştır. Bu çerçevede Çin'in güneyinde farklı arıtma süreçleri, hedefleri ve kapasiteleri olan dokuz gerçek AAT bu prosedürle modellenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre AAT'lerin daha yüksek kapasiteye ve uygun teknolojiye sahip olmasının WFgri'nin daha fazla azaltılmasını sağlayacağı belirtilmiştir. 2014 yılında Çin'deki AAT'nde ortalama olarak, 1m³ evsel kanalizasyon arıtıldığında 6,78 m³ WFgri azaldığı, 1m³ evsel atıksuyu arıtmak için 13,38 L tatlı su gerektiği ve bu işlem sırasında 0,23 kg CO₂ salındığı belirtilmiştir. Bu nedenle, atık sudaki su-enerji bağlantısı, atık su arıtma tesislerinin hidrolojik döngü, enerji kaynakları ve iklimle nasıl etkileşime girdiği belirtilen çalışmada bir AAT'nin

enerji tüketimi pahasına arıtma verimliliğini ve yenilenebilirliğini ortaya çıkarmak için bir dizi endeks tasarlanmıştır. Atıksu özelliklerinin, arıtma teknolojilerinin ve yönetim sistemlerinin, bu WWTP'ler aracılığıyla gri su ayak izini azaltmada enerji kullanımının verimliliği üzerinde büyük bir etkisi olduğunu bulunmuştur. Araştırmacılar çalışmalarının, su-enerji bağlantısını dikkate alarak, AAT'nin daha iyi planlanmasına ve işletilmesine katkıda bulunması beklendiği vurgulanmıştır.

Gomez- Llanos et al. (2018), Batı İspanya'da La Vera'da bulunan Cuacos ve Villanueva olarak adlandırılan iki AAT için bir su ayak izi değerlendirmesi yapmışlardır. Su ve enerji tüketimi açısından kentsel su döngüsünün karmaşıklığını değerlendirmek için ayak izi ailesinden göstergeler kullanılan çalışmanın ana amacı su arıtma sürecinin ve yönetim uygulamalarının verimliliğini analiz etmektir. Çalışmada tesislerin mevcut arıtma durumu ve atıksuyun arıtılmadan alıcı ortama verilmesi senaryosuna göre karşılaştırmalı olarak WF değerlendirmeleri yapılmıştır. WF değerinin, mevcut operasyonlar altında arıtma yapılmayan senaryoya göre daha az olduğu, Cuacos AAT'de TN için ortalama %16,44 ve TP için %9,56 ve Villanueva AAT'de TN için %22,01 oranında azaldığı belirtilmiştir. Her iki AAT'de, TN ve Tp'un kirletici parametreleri, operasyonel sınırlayıcı parametreler olduğu ifade edilmiştir. WF göstergesinin tatlı su kullanımının sürdürülebilirliğini ve etkisini daha kapsamlı bir şekilde değerlendirmek için diğer ek göstergelerle tamamlanması gerektiği vurgulanmıştır.

Stejskalová et al. (2021), Çekya Hostivice AAT için yürütülmüştür. Yeniden yapılandırılma yapılarak mevcut kapasitesinin yükseltile AAT'nde WFgri hesaplamaları yapılmıştır. Çalışmada 6 yıllık datalar kullanılmıştır. Değerlendirme, kapasitenin artırıldığı ve arıtma teknolojisinin bir membran çamur ayırma ile donatıldığı yeniden inşadan önceki ve sonraki bir dönemi içermektedir. Çalışmada AAT'de hem yapılandırılmadan önce hem de sonra WFgri'ne en sık amonyum azotu neden olduğu, Hostivice AAT'den deşarj edilen su küçük bir akarsuya (Litovice akarsuyu) verilmektedir. Arıtılan su kalitesi için tüm yasal gereklilikleri karşıladığı ancak WFgri'nin küçük akarsu üzerindeki etkisinin deşarj edilen besin miktarı nedeniyle olumlu olmadığı belirtilmiştir. kirliliğin temiz suyla 'seyreltilmesi' varsayıldığında, deşarj edilen kirliliği 'seyreltmek' için gereken tatlı su miktarı, TN için akarsuyun uzun vadeli ortalama su içeriğini 1,4 kat, TP için ise 3,9 kat aşmaktadır. Ancak bu akarsu ilaveten tarım arazilerinden ve küçük atık su arıtma tesislerinden gelen giriş kirliliğine maruz kalmaktadır. Bu nedenle WFgri hesaplanırken bu durumun da dikkate alınması, WFgri değerinin, alıcı su kütlesinin ekosistemini etkilemeden kirlilebilecek tatlı su miktarıyla karşılaştırılması gerektiği vurgulanmıştır.

Çankaya (2023), WF değerlendirmesi için bir atık su arıtma tesisinde eklenmesinden önce ve sonra karşılaştırmalı olarak yürüttüğü çalışmasında, konvansiyonel atıksu arıtma tesisi (AAT-C) ve su geri kazanım ünitesiyle ileri atık su arıtma tesisi (AAT-WR), WF'nin sürdürülebilirliği sadece tatlı su tüketimiyle değil, aynı zamanda su kirliliği seviyesiyle de değerlendirilmiştir. WFmavi değerinin daha yüksek olması nedeniyle AAT- WR'nin WF, AAT-C'den biraz daha yüksek (%4,1) bulunmuştur. AAT-WR'deki daha yüksek değerlerin temel nedeni, daha yüksek elektrik tüketimi, çamur oluşumu ve taşıma işlemleri ile ilişkilendirilmiştir. AAT-WR'deki WFgri'nin WWTP-C'den %38,1 daha düşük olduğu hesaplanmıştır. Çalışmada enerji tasarrufu ve çamur arıtımı ile ilgili iyileştirmelerin WFmavi'inde azalma sağlayabileceği vurgulanmıştır. İki atık su arıtma sisteminin WF'nin sürdürülebilirliği karşılaştırıldığında, su geri kazanım üniteli AAT'nin su kirliliği seviyesi açısından geleneksel AAT'den daha sürdürülebilir olduğu belirtilmiştir.

Kalya ve Alver (2023), ülkemizde $24.750 \pm 2895 \text{ m}^3/\text{gün}$ debiye sahip bir AAT'nin, tüketilen kimyasallar ve enerjiye bağlı olarak doğal su döngüsüne ve alıcı ortam su kalitesinin korunmasına katkısını WF göstergeleri ile değerlendirmişlerdir. 2018-2019 yıllarında gerçekleştirilen izleme çalışması sonucunda, AAT'nin WF göstergelerine göre, mevcut durumda AAT'nde tüketilen 1 birim suya kıyasla minimum 233 m^3 su ve maksimum 322.940 m^3 su korunduğu ve geri kazanılan suyun giriş debisinin yaklaşık 19 katı olduğu belirlenmiştir. Çalışmada sürdürülebilir bir çevre anlayışında su kaynaklarının sürdürülebilirliğinin ve AAT'nin doğal su döngüsündeki görevleri çok önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Varol et al. (2024), çalışmalarında AAT'nin WF değerlendirmesi yoluyla göstergeler üreterek sürdürülebilir bir çevreye katkısını değerlendirmeyi amaçlamışlardır. $2.973.854 \text{ m}^3/\text{ay}$ evsel atık suyu işleyen ve Sınıf III su kalitesiyle alıcı ortama deşarj edilen atık su arıtma tesisinin su ayak izi girdileri ve çıktıları iki farklı senaryo açısından değerlendirilmiştir. Birinci senaryo atık suyun arıtılmadan alıcı su kütlesine deşarjı, ikinci senaryo arıtılmış atık suyun mevcut AAT performansı ile alıcı su kütlesine deşarjı olarak belirlenmiştir. WFgri, WFmavi ve WFeşil'in AAT üzerinde sırasıyla %95,127, %3,981 ve %0,892'lik bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. İlk senaryoya göre, 1 birim atık su arıtılmadan deşarj edildiğinde, alıcı ortamda ortalama 61,91 birim tatlı suyun kalitesini düşürdüğü veya kirlettiği belirtilirken AAT'nde atıksu arıtıldığında, yüzey suyu kalitesi yasal alıcı ortam standartlarına uyularak korunduğu ifade edilmiştir. Arıtma tesisinin işletimi için 1 birim tatlı su kullanılarak yaklaşık 9368 birim tatlı suyun kirlenmesi önlendiği ve WF'nin tesislerin doğal su döngüsüne katkısını göstermek için iyi bir gösterge olduğu vurgulanmıştır.

MATERYAL YÖNTEM

Atıksu Arıtma Tesisi

WF değerlendirmesi yapılan AAT Kuzeydoğu Anadolu Bölgesinde Kars ili Sarıkamış ilçesi, Sarıkamış-Kars Karayolu Yağbasan köyü mevkiinde yer almaktadır. AAT ilgili yerleşimin evsel atık sularını ve zaman zaman bölgede bulunan bazı işletmelerin endüstriyel atık sularını arıtmaktadır. AAT şehir merkezine 2,5 km uzaklıkta Yağbasan köyünün yakınında vadi içerisinde bölgenin en düşük kotlu mevkisinde konumlandırılmıştır. Tesis 15.000 kişilik nüfusa hizmet vermektedir. AAT'ne ait uydu görüntüsü Şekil 6'da verilmiştir.

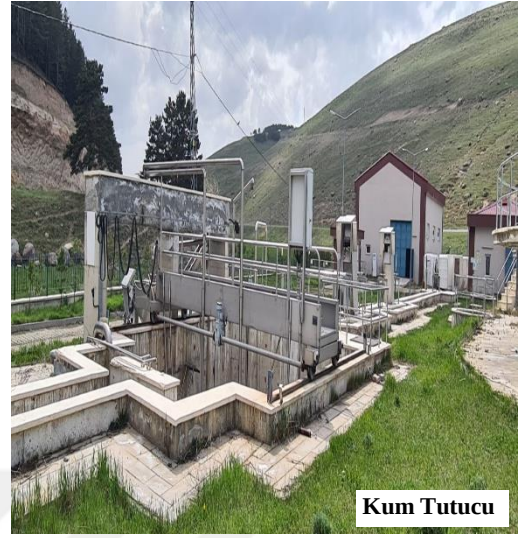


Şekil 6. İlgili AAT'nin uydu görüntüsü

AAT aşağıda sıralanan ünitelerden oluşmaktadır ve proseslerin fotoğrafları Şekil 7'de gösterilmiştir.

- Bypass yapısı, kaba ızgara ve ince ızgara
- Kum tutucu
- Giriş suyu terfi merkezi
- Anaerobik havuzlar
- Havalandırma havuzları
- Çökeltim havuzları

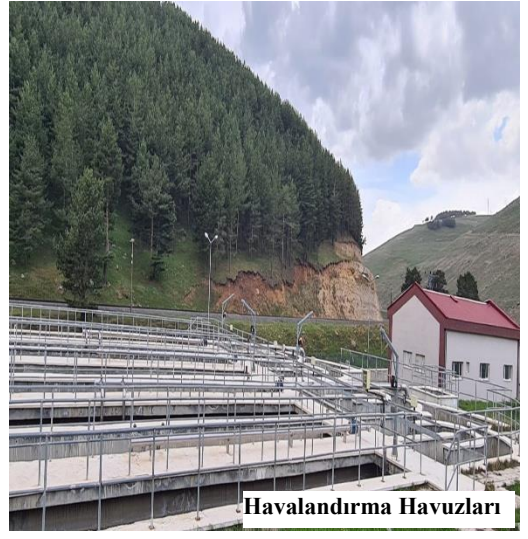
- Geri devir terfi merkezi
- Çamur susuzlaştırma ünitesi



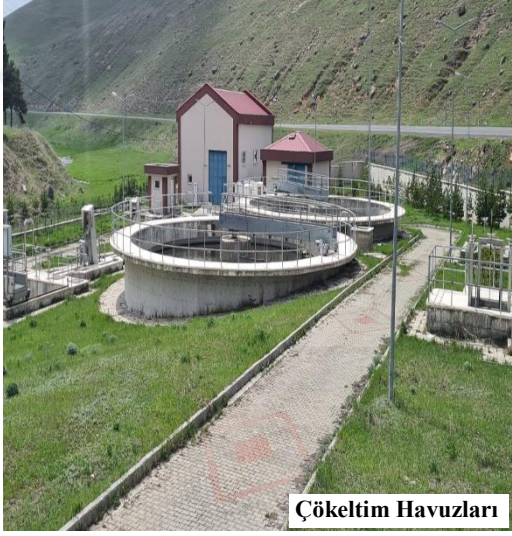
Şekil 7. AAT'ndeki proseslerin görüntüleri



Anaerobik Havuzlar



Havalandırma Havuzları



Çökeltim Havuzları



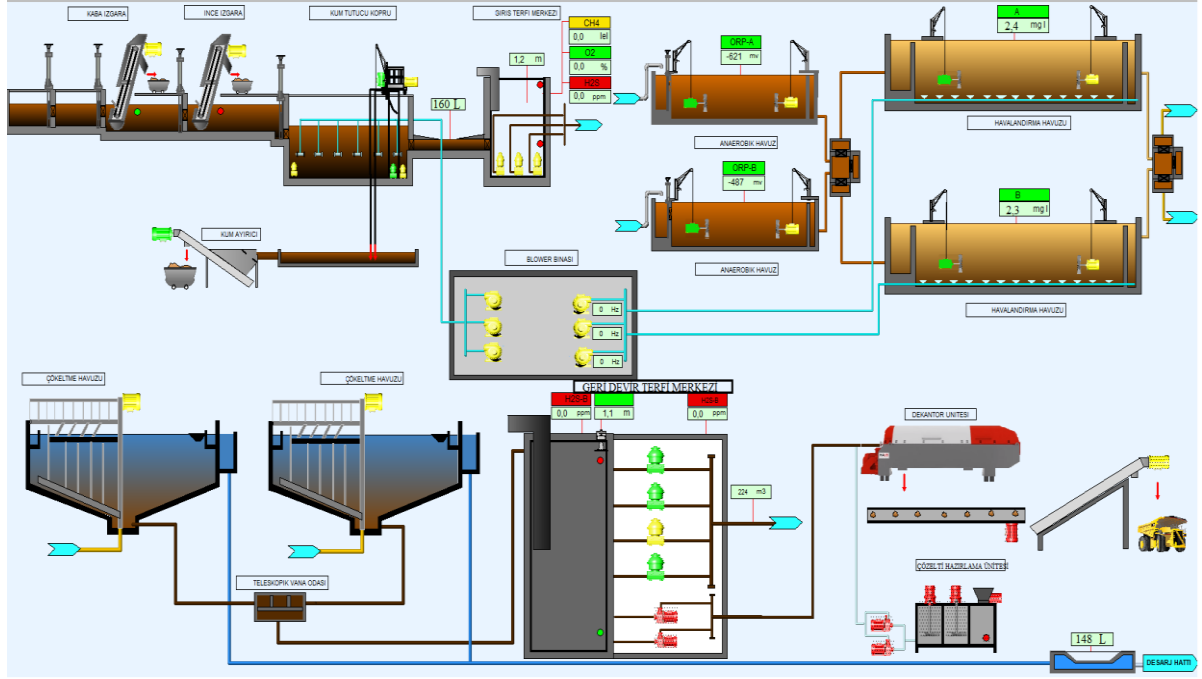
Geri Devir Terfi Merkezi



Çamur Susuzlaştırma

Şekil 7. AAT'ndeki proseslerin görüntüleri (Devamı)

Tesisin proses akım şeması Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. İlgili AAT proses akım şeması

WFgri Hesaplamaları

Bir proses adımının, proses adımıyla ilişkilendirilebilecek tatlı su kirliliğinin derecesinin bir göstergesi olan WFgri, doğal arka plan konsantrasyonlarına ve mevcut ortam suyu kalitesi standartlarına bağlı olarak, kirletici yükünü asimile etmek için gereken tatlı su hacmi olarak tanımlanır. Diğer bir ifade ile WFgri, su kirliliğinin boyutunun, kirleticileri zararsız hale getirecek şekilde seyreltmek için gereken su hacmi cinsinden ifade edilebileceğini ifade eder (Hoekstra et al., 2011). WFgri, bir tatlı su kaynağına doğrudan bir boru aracılığıyla veya dolaylı olarak topraktan, geçirimsiz yüzeylerden veya diğer dağınık kaynaklardan gelen akış veya sızıntı yoluyla deşarj edilen noktasal kaynaklı kirliliği kapsar (URL 9, 2024).

Bu çalışmada WFgri, WFN metodolojisine göre hesaplanmıştır (Morera et al., 2016). WFgri, kirletici yükünün (L, kütle/zaman cinsinden), söz konusu kirletici için ortam suyu kalite standardı (maksimum kabul edilebilir konsantrasyon $C_{deşarj\ limit}$, kütle/hacim cinsinden) ile alıcı su kütlesindeki doğal konsantrasyonu ($C_{doğal}$, kütle/hacim cinsinden) arasındaki farka bölünmesiyle hesaplanır (Hoekstra et al., 2011; Morera et al., 2016). WFgri aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir:

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

Bir alıcı su kütlesindeki doğal konsantrasyon, havzada insan kaynaklı herhangi bir bozulma olmaması kabulü ile su kütlesinde oluşacak konsantrasyondur. Suda doğal olarak bulunmayan insan kaynaklı kirleticileri için, $C_{\text{doğal}}$ 0'dır. Doğal konsantrasyonlar kesin olarak bilinmediğinde ve/veya düşük olduğu tahmin edildiğinde, basitlik açısından $C_{\text{doğal}}$ değeri 0 varsayılabilmektedir (Hoekstra et al., 2011).

Atıksu Analiz Parametreleri

WFgri'nin hesaplanabilmesi için AAT giriş – çıkış kirlilik parametreleri verilerine gereksinim vardır. AAT'de atıksu giriş ve çıkış analizleri aşağıda belirtilen kirlilik parametreleri üzerinden takip edilmektedir.

AAT'de Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY) çerçevesinde takip edilen kirlilik parametreleri aşağıdaki sıralanmıştır:

- BOI_5
- KOI
- TN
- TP
- AKM

Bu çalışmada, AAT'den AKM parametresiyle ilgili veri temin edilemediğinden diğer parametreler diğer kirlilik parametreleri üzerinden WFgri hesaplamaları yapılmıştır.

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

AAT'nin doğal su ortamının ve insan sağlığının insan faaliyetlerinden olumsuz etkilenmesini önlemede kentsel su döngüsünde rolü büyüktür. AAT'lerin suyun sürdürülebilir yönetimine olan katkısını girdi ve çıktılarıyla değerlendirmek son derece önemlidir. WF Tablo 3'de görüldüğü üzere dört aşamada değerlendirilmektedir.

Tablo 3. Su Ayak İzi Değerlendirme Aşamaları (Hoekstra et al. 2011'den uyarlanmıştır)

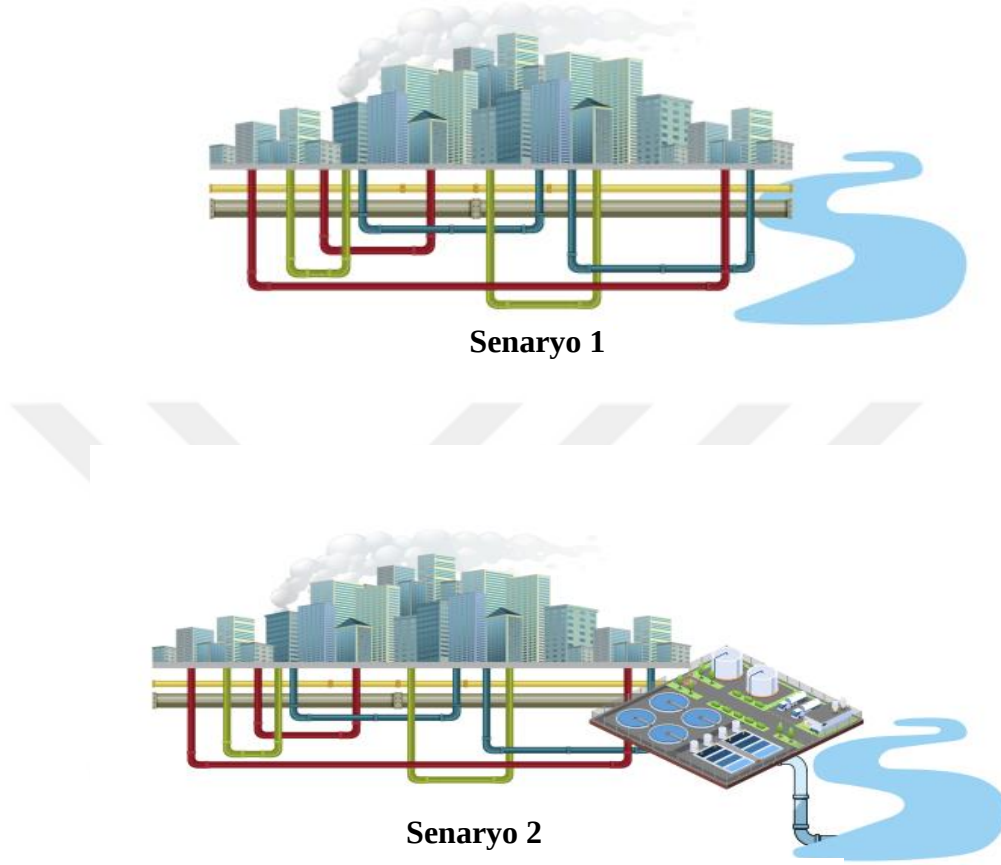
DEĞERLENDİRME AŞAMALARI	
1- Hedef Ve Kapsam Belirleme	
2- WF Hesaplama	
3- WF Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi	
4- WF Yanıt Formülasyonu	

Hedef ve Kapsam Belirleme

Bu çalışmada, toplam WF değerlendirmesi yapılmamıştır. Bu nedenle hedef ve kapsam belirleme WFgri için planlanmıştır. WFgri değerlendirmesinin hedefleri; bir AAT örneğinde, tesisin alıcı su ortamında kirlilik yükünün azaltılmasındaki çevresel olumlu rolünü göstermek için, BOİ₅, KOİ, TN, TP parametrelerinin AAT'de giderilme verimleri üzerinden belirlenmiştir. Bu hedeflere ulaşmak için, atık su arıtımı ile ilgili atık suyun arıtılmaması durumu ve mevcut tesiste arıtılması durumu olarak iki farklı senaryo oluşturularak kapsam belirlenmiştir. İlgili AAT örneği üzerinde, atık su arıtma tesislerinin, sürdürülebilir su yönetimine katkısı, sadece WFgri göstergesiyle değerlendirilmiştir. WFgri kirlilikle ilgili bir göstergedir. Bu nedenle YSKY'ne göre evsel atıksularda takip edilen kirlilik parametreleri dikkate alınarak WFgri hesaplamaları yapılmıştır. Bu kapsamda ilgili AAT'den data temin edilen parametreler BOİ₅, KOİ, TN, TP'dur.

Çalışmada iki farklı senaryo oluşturulmuştur. Bu senaryolar iki şekildedir (Şekil 9):

- Senaryo 1- Arıtma olmaması durumu
- Senaryo 2- Arıtma olması durumu (mevcut durum)



Şekil 9. WFgri değerlendirmesi için Senaryo 1 ve Senaryo 2 şeması

WF Hesaplama

Belirlenen hedef ve kapsam doğrultusunda oluşturulan senaryolara göre WFgri temel eşitliğinden hareketle AAT giriş- çıkışı için kütle denklığı yapılarak aşağıdaki eşitlikler oluşturulmuştur (Eşitlik 2-7).

Senaryo 1- Arıtma olmaması durumu

$$Q_{giriş} \times C_{giriş1} + WF_{grisenaryo1} \times C_{doğal} = (Q_{giriş} + WF_{grisenaryo1}) \times C_{deşarj limit} \quad (2)$$

$$WF_{grisenaryo1} = \frac{Q_{giriş} \times (C_{giriş1} - C_{deşarj limit})}{C_{deşarj limit} - C_{doğal}} \quad (3)$$

$$WF_{grisenaryo1} = \frac{Q_{giriş} \times (C_{giriş1} - C_{deşarj limit1})}{C_{deşarj limit1}} \quad (4)$$

Senaryo 2- Arıtma olması durumu (Mevcut Durum)

$$Q_{giriş} \times C_{giriş2} + WF_{grisenaryo2} \times C_{doğal} = (Q_{giriş} + WF_{grisenaryo2}) \times C_{deşarj limit} \quad (5)$$

$$WF_{grisenaryo2} = \frac{Q_{giriş} \times (C_{giriş2} - C_{deşarj limit})}{C_{deşarj limit} - C_{doğal}} \quad (6)$$

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

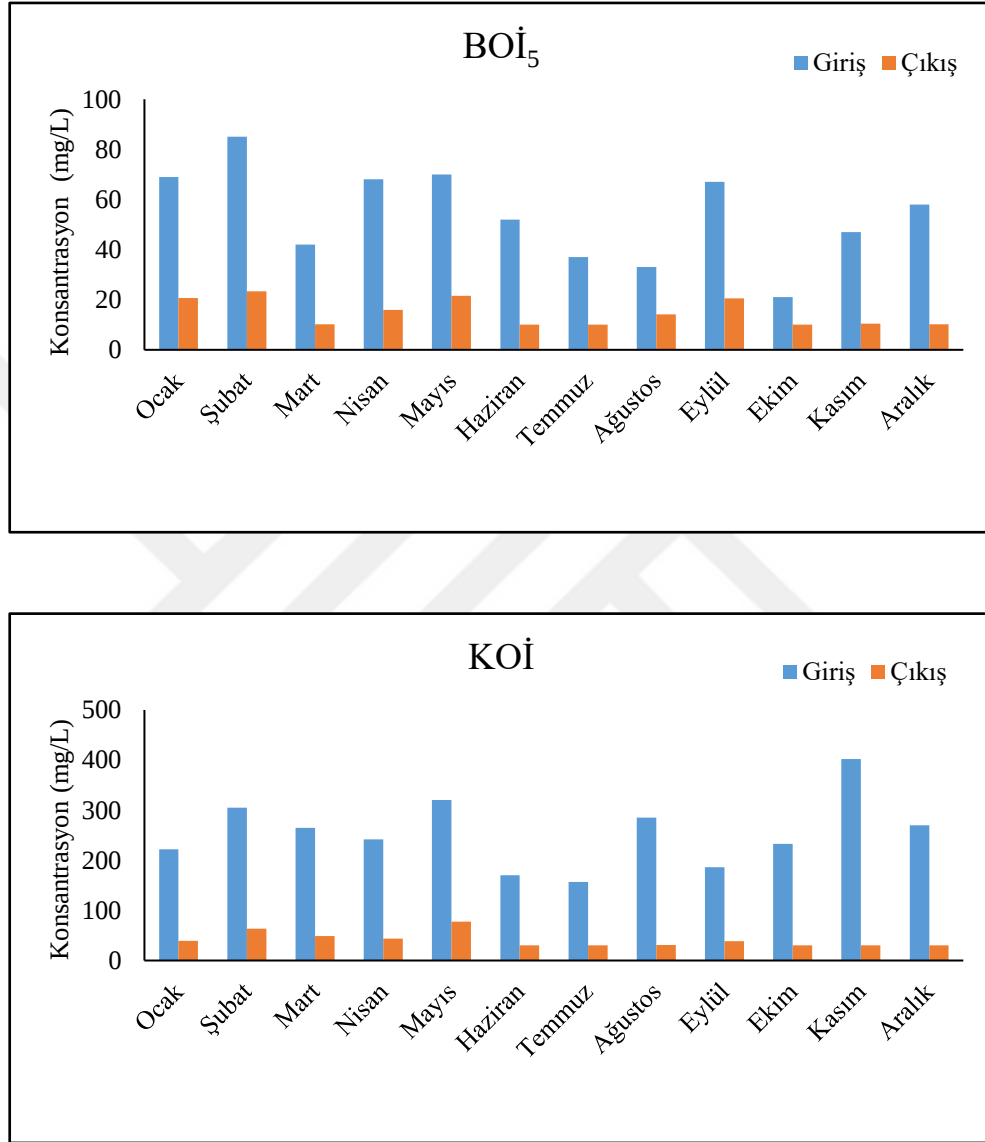
$Q_{giriş}$, debi; $C_{giriş}$, kirlenici konsantrasyonu; $C_{deşarj limit}$, alıcı ortam su kalite sınıf limit değerleri; $C_{doğal}$, AATdeşarjından önce alıcı ortam doğal su kütlesindeki kirlilik konsantrasyonu WF_{gri1} , atık suyun arıtılmaması durumunda WF_{gri2} , arıtma yapılması durumunda WF_{gri} 'dir.

AAT'de WF_{gri} 'nin hesaplanabilmesi için aşağıdaki verilere ihtiyaç vardır. Bu veriler aşağıda sıralanmıştır:

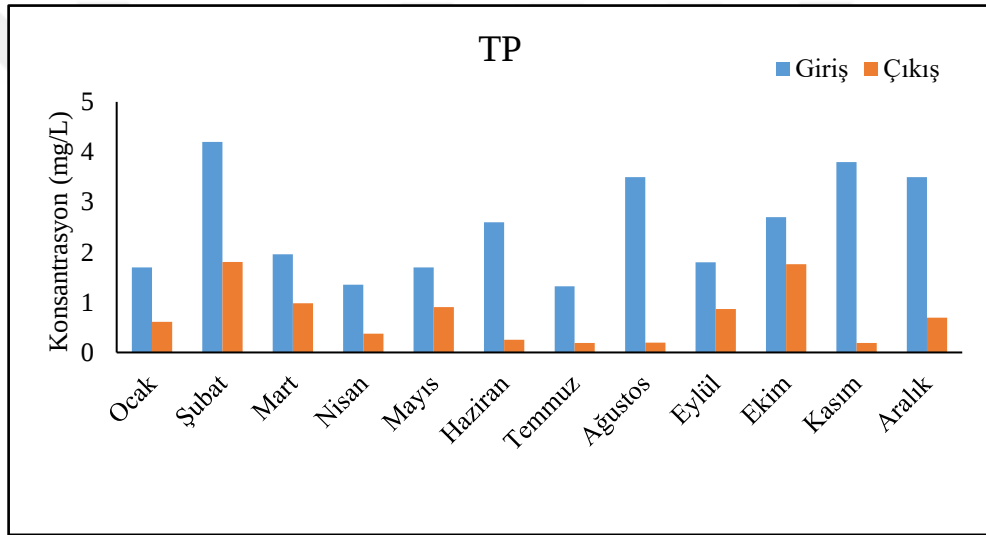
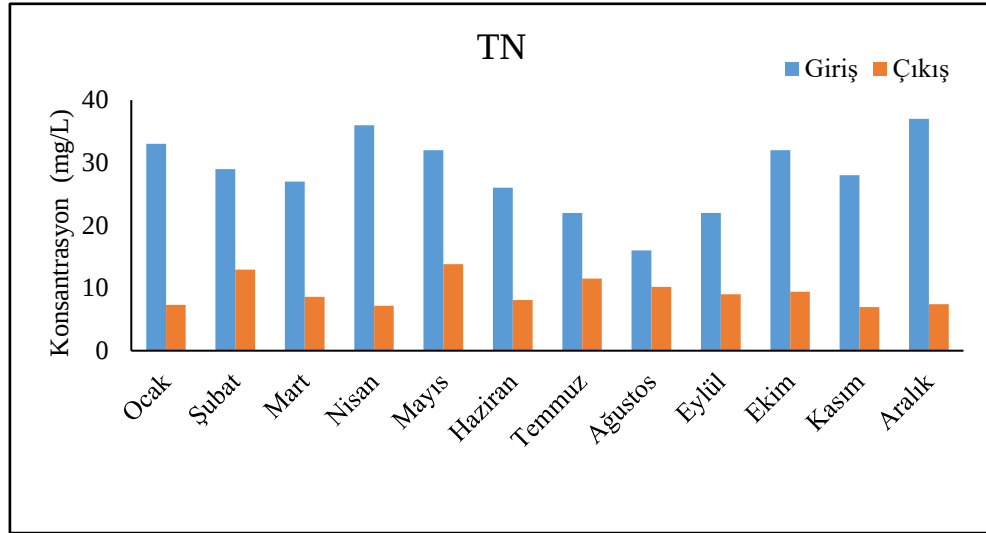
- ✓ AAT giriş-çıkış debileri
- ✓ Kirlilik parametreleri giriş- çıkış konsantrasyon değerleri
- ✓ Alıcı ortam su kalitesi sınıfının seçilmesi

Çalışmada AAT'den alına bilgiler doğrultusunda AAT giriş debisi 414.720 m³/ay değerindedir. Hesaplamalarda çıkış debisi giriş debisiyle aynı kabul edilmiştir. Yani $Q_{giriş} = Q_{çıkış}$ olarak hesaplamalar yapılmıştır. AAT'de yetkilileri çıkış debisiyle giriş debisi arasında önemli bir fark olmadığını teyit etmişlerdir. Aylık WF_{gri} hesaplamalarında her ay için aynı debi değeri kullanılmıştır. WF_{gri} hesaplamalarında $BOİ_5$, $KOİ$, TN ve TP giriş ve çıkış değerleri tesisin envanter bilgilerinden temin edilmiştir. Alıcı ortam su kalite sınıfının seçilmesinde YSKY'de Kıta içi Yerüstü Su Kaynaklarının Genel Kimyasal ve Fizikokimyasal Parametreler Açısından Sınıflarına Göre Kalite Kriterleri değerlerinden faydalanılmıştır. YSKY (Tablo 2)'de Kıta içi 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 $BOİ_5$, $KOİ$, TN ve TP değerleri dikkate alınmıştır (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2021). AATdeşarjı Sarıkamış deresine yapılmaktadır. İlgili alıcı ortamda kirlilik parametreleri ile ilgili herhangi bir ölçüm yapılmamıştır.

Evsel kaynaklı atık sular öncelikli olarak beş temel parametre olan BOİ₅, KOİ, TN, TP ve AKM karakterize edilmektedir. Çalışmada tesisten temin edilen AKM verileri yeterli olmadığından WFgri hesaplamaları, diğer kirlilik parametreleri için kurgulanmıştır. 2023 yılı aylık BOİ₅, KOİ, TN, TP giriş-çıkış konsantrasyon değerleri Şekil 10’da sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 10. AAT 2023 yılı atık su kirlilik parametreleri için giriş-çıkış konsantrasyon değerleri



Şekil 10. AAT 2023 yılı atık su kirlilik parametreleri için giriş-çıkış konsantrasyon değerleri (Devamı)

Şekil 10'a göre kirlilik parametrelerinin maksimum, minimum giriş çıkış konsantrasyonları Tablo 4'de özetlenmiştir. Tablodaki değerlere göre kirlilik parametrelerinin giriş maksimum ve minimum değerleri arasında belirgin farklılıkların olduğu görülmektedir. Örneğin, giriş BOI_5 konsantrasyonu maksimum ve minimum konsantrasyon değerleri sırasıyla 85 mg/L ve 21 mg/L'dir. Benzer şekilde giriş maksimum KOI konsantrasyonu 402 mg/L iken minimum KOI konsantrasyonu 157 mg/L değerindedir. Bu durum AAT'nin evsel atık suların dışında zaman zaman bölgede bulunan işletmelerin endüstriyel kaynaklı atık sularını kabul etmesiyle ilişkili olabilir. Çıkış konsantrasyonlarının nispeten birbirine daha yakın değerlerde olduğu görülmektedir.

Tablo 4. 2023 Yılı İçin AAT Maksimum ve Minimum Giriş- Çıkış Konsantrasyonları

AAT GİRİŞ KONSANTRASYONLARI (mg/L)				
	BOİ₅	KOİ	TN	TP
Maksimum	85,00	402,00	37,00	4,20
Minimum	21,00	157,00	16,00	1,32

AAT ÇIKIŞ KONSANTRASYONLARI (mg/L)				
	BOİ₅	KOİ	TN	TP
Maksimum	23,36	77,80	12,94	1,81
Minimum	10,00	30,00	7,17	0,19

2023 yılı için hesaplanan aylık ortalama giriş-çıkış konsantrasyonları ve WFgri'nin hesaplanmasında gerekli diğer veriler Tablo 5'de verilmiştir. Tabloda görüldüğü üzere 12 ayın ortalaması olarak BOİ₅ ortalama giriş konsantrasyonu 54,08 mg/L iken ortalama çıkış konsantrasyonu 14,75 mg/L olarak hesaplanmıştır. AAT'de, ortalama olarak BOİ₅ 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. Tesisin TN ve TP'un giderme verimi ortalama konsantrasyon verilerine göre sırasıyla %66,11 ve %82,62 olarak belirlenmiştir.

Tablo 5. WFgri Hesaplama Verileri

Parametre (mg/L)	BOİ₅	KOİ	TN	TP
Konsantrasyon				
Girişyılıkortalama	54,08	254,75	28,33	2,51
Çıkışyılıkortalama	14,75	40,99	9,60	0,73

Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği Limitleri (mg/L) (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2021)
Su kalite sınıfları

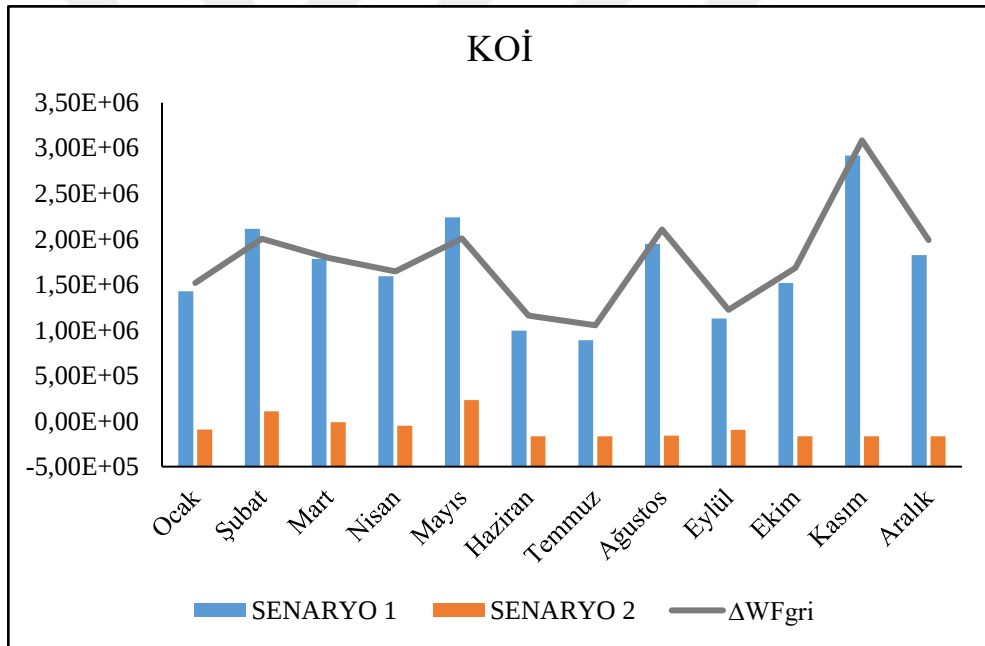
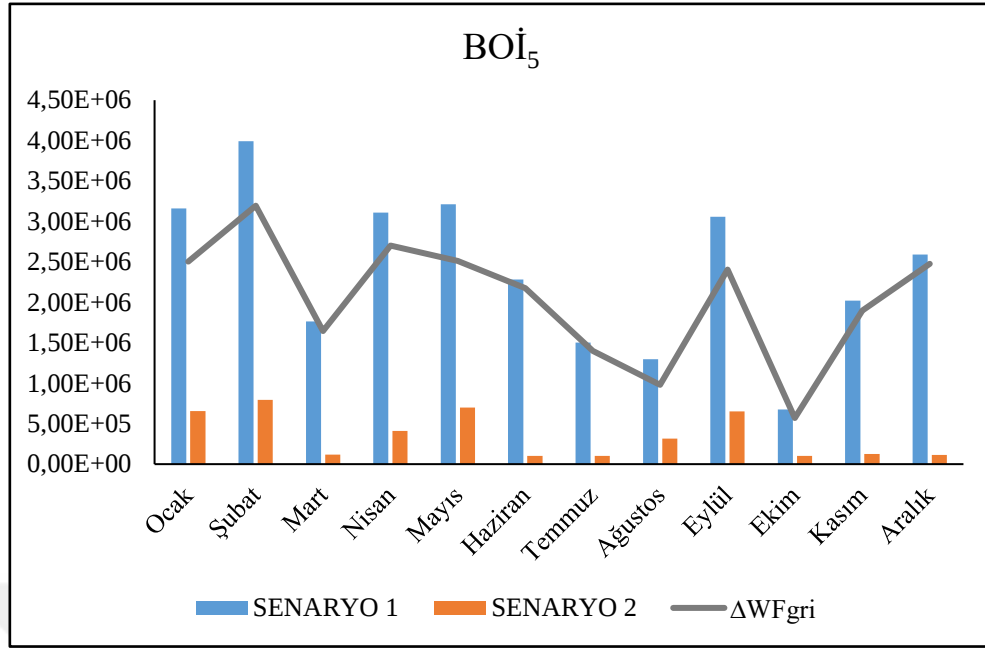
I. Sınıf (Çok iyi)	<4	<25	<3,5	<0,08
II.Sınıf (İyi)	8	50	11,5	0,2
III.Sınıf (Orta)	>8	>50	>11,5	>0,2
C _{doğal}	0			

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. TN için ortalama çıkış konsantrasyonu 9,60 mg/L'dir. Bu değer II. Sınıf su kalitesi değerinden düşük olmasına rağmen I. Sınıf kaliteden oldukça yüksek bir değerdedir. TP'un ortalama çıkış konsantrasyonu 0,73 mg/L olup

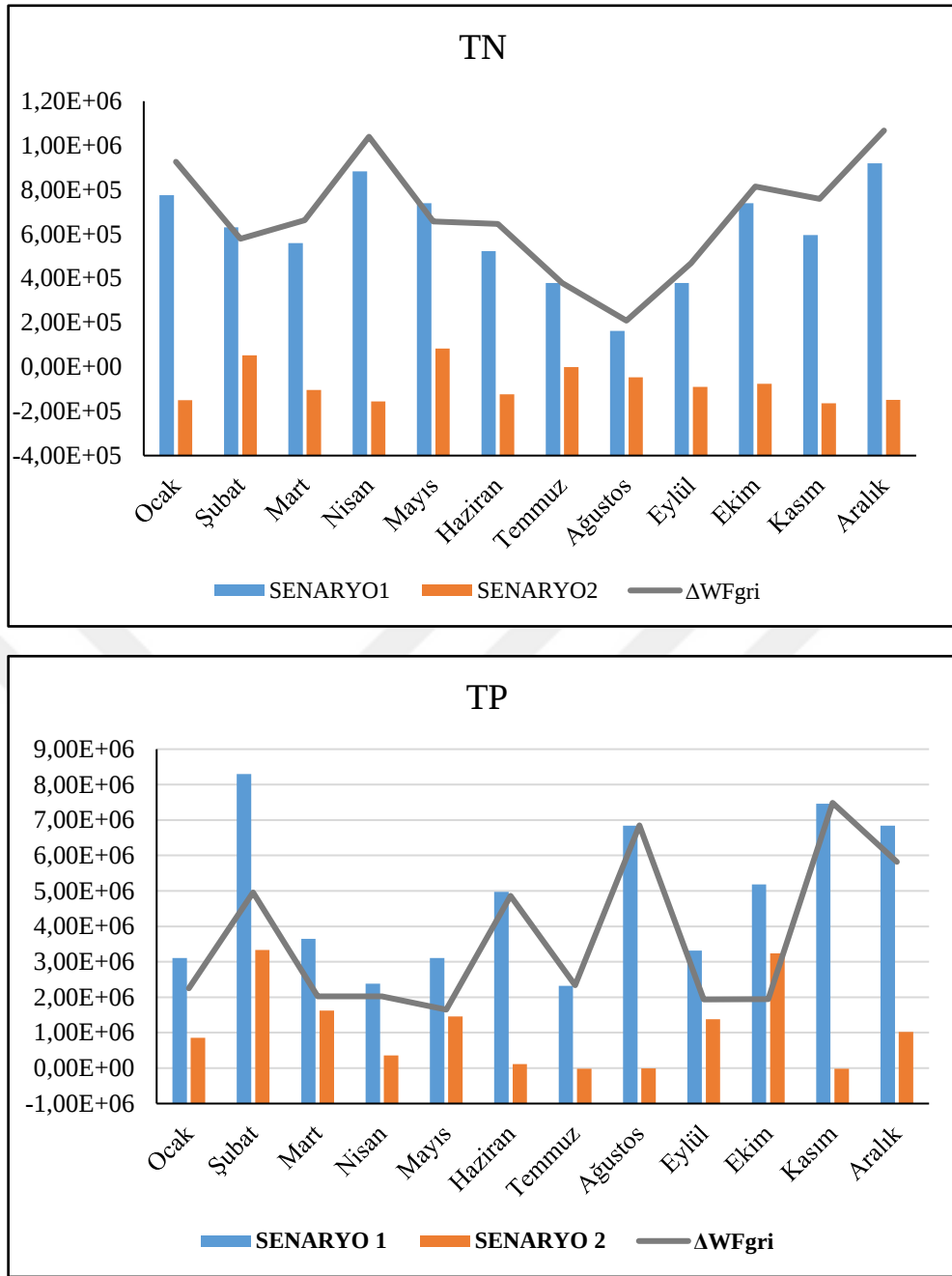
bu değer III. Sınıf su kalite değerini temsil etmektedir. AAT için bulunduğu konum dikkate alınarak II. sınıf yani iyi olarak tabir edilen su kalitesini sağlaması gerektiği düşünülerek WFgri hesaplamalarında değarj limit konsantrasyon değerleri BOİ₅ için 8 mg/L, KOİ için 50 mg/L, TN 11,5 mg/L ve TP için 0,2 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 kalite kriterlerini sağlamak şartıyla sulama suyu olarak açıklanmaktadır. Bu limit değerlere göre arıtma yapılmaması 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 BOİ₅, KOİ, TN ve TP için Şekil 10'da gösterilmiştir. Şekil 11 incelendiğinde 2023 yılı boyunca tüm aylarda her kirlilik parametresi için arıtma tesisini alıcı ortamda temiz suyun korunmasına önemli katkısı olduğu görülmektedir. Örneğin; Ocak ayı için Senaryo 1'e göre WFgri, BOİ₅, KOİ, TN ve TP için sırasıyla 3.162.240 m³/ay, 1.426.636,80 m³/ay, 775.346,09 m³/ay ve 3.110.400,00 m³/ay olarak hesaplanmıştır. Senaryo 2'de ise WFgri yine aynı sıralamayla 656.812 m³/ay, -90.906, 62 m³/ay, -150.453,20 m³/ay ve 854.323,20 m³/ay değerlerindedir. AAT'de gerçekleştirilen arıtma ile WFgri değerlerindeki düşüş gözlenmiştir. Bu sonuçlar atıksuların arıtılmaması halinde kirlilik parametrelerinin asimile edilmesi için gerekli tatlı su miktarının ne denli büyük hacimlerde olduğunu göstermektedir. Yukarıda belirtilen iki farklı senaryoya göre hesaplanan aylık WFgri değerleri arasındaki fark Eşitlik 8'deki gibidir:

$$\Delta WF_{gri1-2} = WF_{gri\text{senaryo1}} - WF_{gri\text{senaryo2}} \quad (8)$$

ΔWF_{gri} , AAT'nin performansını ifade etmektedir. Başka bir deyişle; Senaryo1 ve Senaryo 2 arasındaki fark alıcı ortamda korunan su miktarını vermektedir. Ocak ayı BOİ₅ örneğinde; alıcı ortamda korunan tatlı su hacmi 2.505.427,20 m³/ay'dır. Aynı ay için Senaryo 2'ye göre KOİ ve TN parametreleri için WFgri değerlerinin eksi olarak hesaplanması AAT'nin alıcı ortamın korunmasına daha fazla katkı sağladığının bir göstergesidir. Ocak ayı ΔWF_{gri} KOİ 1.517.543,42 m³/ay ve ΔWF_{gri} TN 925.799,29 m³/ay olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar WFgri Senaryo 1 değerlerinin üzerinde olup arıtma yapılarak alıcı ortama değarj edilen suyun alıcı ortam su kalitesini daha da yükselttiği şeklinde açıklanabilir. Ocak ayı TP ΔWF_{gri} değeri 2.256.076,80 m³/ay'dır. Tüm kirlilik parametreleri için diğer aylarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 11. Kirlilik parametrelerine göre Senaryo 1, Senaryo 2'ye göre aylık WFgri ve ΔWFgri değerleri (m³/ay)

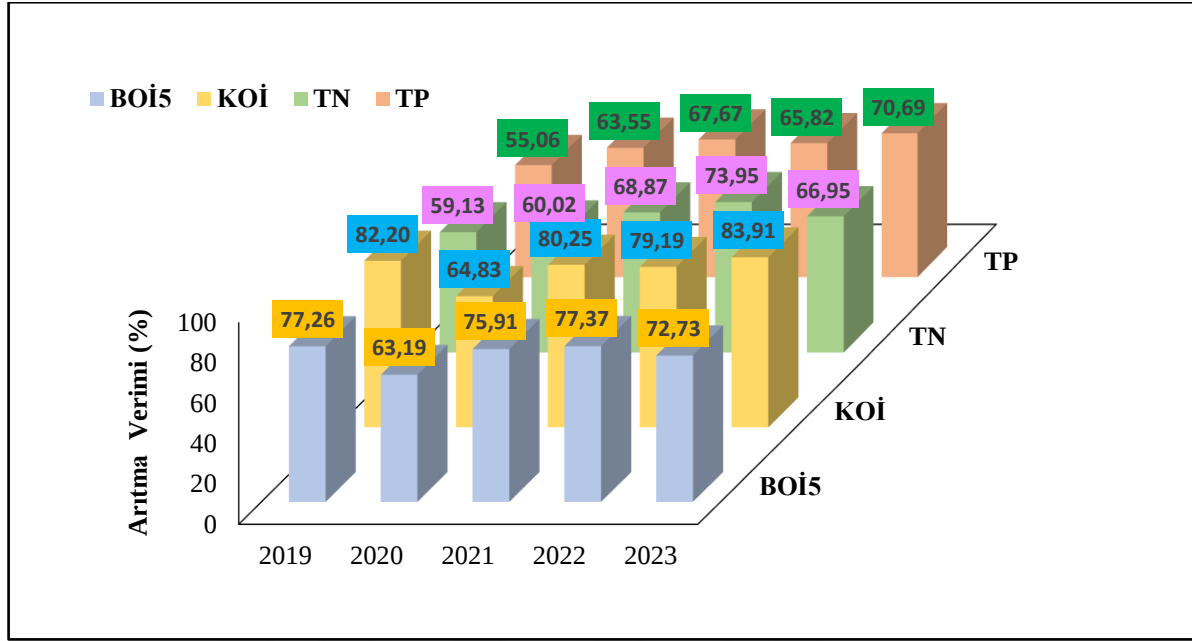


Şekil 11. Kirlilik parametrelerine göre Senaryo 1, Senaryo 2'ye göre aylık WFgri ve ΔWFgri değerleri (m³/ay) (Devamı)

WF Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi

Tesisin geçmiş yıllara yönelik (2019-2022) BOİ₅, KOİ, TN ve TP giriş- çıkış yıllık ortalama konsantrasyon değerleri temin edilip ilgili kirlilik parametreleri için verim değerleri hesaplanmıştır. AAT'nin 2023 yılı dahil olmak üzere 5 yıllık arıtma verimi değerleri tüm kirlilik parametreleri için Şekil 12'de görüldüğü gibidir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde 2019-2023 yılları için arıtma verimlerinin birbirine çok yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Örneğin, BOİ için yıllık ortalama arıtma verimi 2019, 2020, 2021, 2022 ve 2023 yıllarında

sırasıyla %77,26; %63,19; %75,91; %77,37 ve % 72,73 olmuştur. Benzer sonuçlar diğer parametreler için de geçerlidir. AAT'nin 5 yıllık süreçte arıtma performansı yaklaşık olarak aynı seviyededir.



Şekil 12. BOİ5, KOİ, TN ve TP için 2019-2023 yılları arası yıllık ortalama arıtma verimleri

AAT'nin soğuk iklim bölgesinde olması, giriş atıksuyun nispeten seyreklik olması ve yeterince biyokütle üretilmemesi veya işletmede karşılaşılan birtakım problemler nedeniyle arıtma AAT'nin işletilmesindeki iyileştirmeler veya bazı modifikasyonlarla arıtma veriminin tüm kirlilik parametreleri için %90 arıtma verimine yükseltilmesi halinde tesisin sürdürülebilirliğe katkısı ile ilgili üçüncü bir senaryo oluşturulmuştur (Şekil 13). Senaryo 3 tüm kirlilik parametreleri için 2023 yıllık ortalama giriş konsantrasyonlarının %90 arıtılmış olması halinde WFgri'nin hesaplanmasına dayalıdır.



Şekil 13. WFgri değerlendirmesi için Senaryo 3 şeması

Tesiste 2023 yılı için yıllık ortalama BOİ₅, KOİ, TN, TP giriş konsantrasyonlarının (54,08 mg/L; 254,75 mg/L; 28,33 mg/L ; 4,20 mg/L) %90 arıtılması halinde yıllık ortalama çıkış konsantrasyonları sırasıyla 5,41 mg/L; 25,47 mg/L; 2,83 mg/L; 0,42 mg/L olacaktır. Senaryo 1 ve Senaryo 2’de olduğu gibi su kalite sınıfı II. Sınıf seçilerek WFgri hesaplamaları yapılmıştır. Burada ΔWFgri sonucu Eşitlik (9)’a göre belirlenmiştir.

$$\Delta WF_{gri1-3} = WF_{griSenaryo1} - WF_{griSenaryo3} \quad (9)$$

Arıtma yapılmaması (Senaryo 1), mevcut arıtma (Senaryo 2), iyileştirilmiş arıtma (Senaryo 3) durumları için m³/ay olarak BOİ₅, KOİ, TN, TP için WFgri sonuçları Şekil 14’de karşılaştırılmıştır. ΔWFgri1-2 ve ΔWFgri1-3 hesaplamaları ile ilgili sonuçların da karşılaştırıldığı şekilde AAT’de yapılması muhtemel iyileştirmelerle suyun sürdürülebilirliğine daha fazla katkı sağlanabileceği metrik değerler ile açıkça ortaya konmuştur.

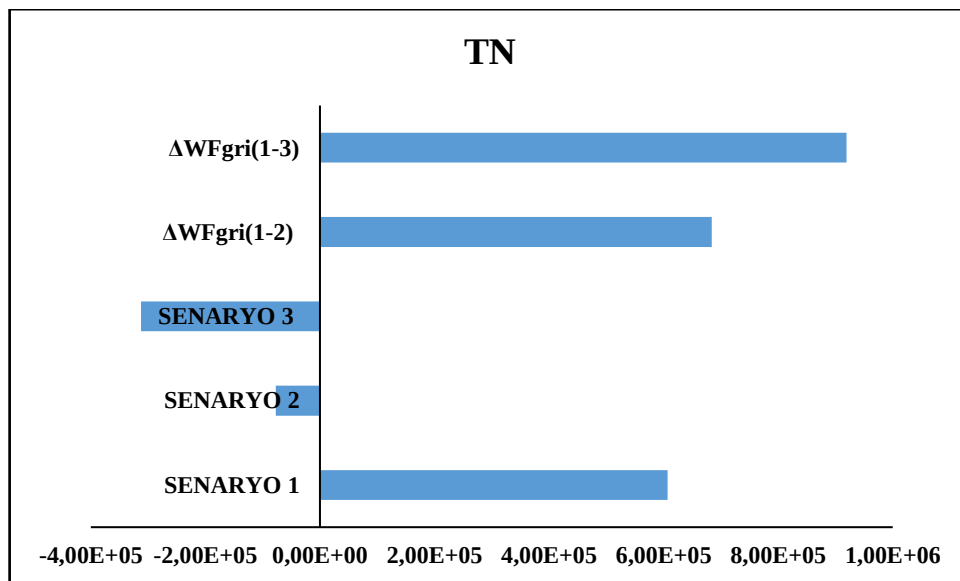
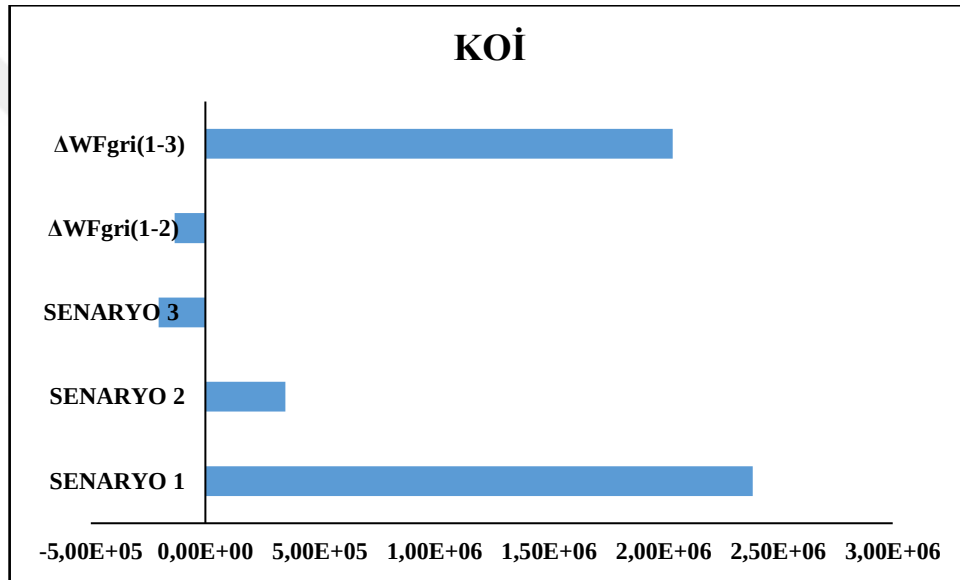
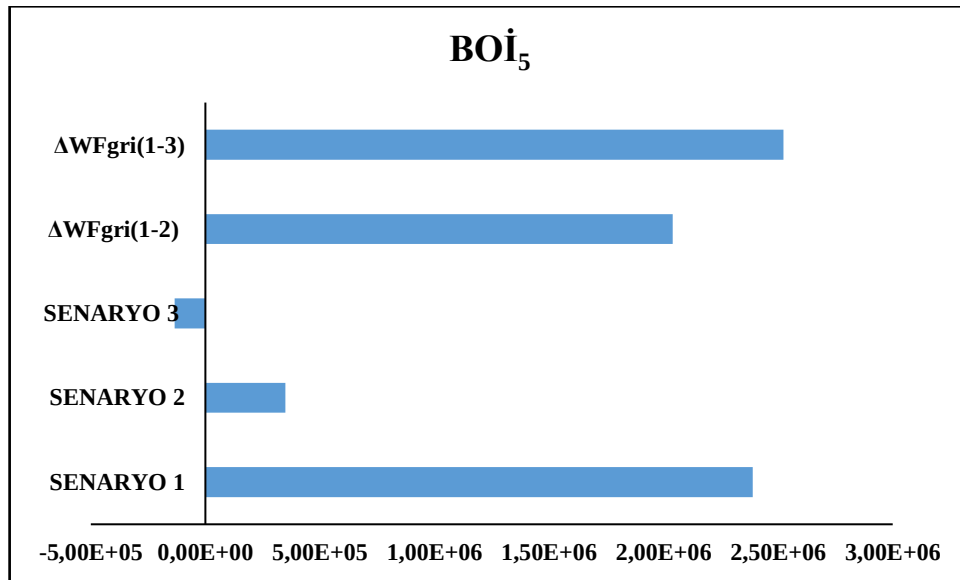
BOİ₅ için ilgili AAT’nin, YSKY limitlerine göre II.Sınıf su kalite standartlarını sağlayamadığı ancak alıcı su ortamının korunması için önemli katkı sağladığı görülmektedir. Senaryo 1’e göre BOİ₅’in arıtılmadan alıcı ortama deşarjı halinde, alıcı ortam konsantrasyonuna asimile edilmesi için ortalama 2.388.960 m³/ay tatlı suya gereksinim vardır. Oysa Senaryo 2’de,yıllık ortalama arıtma verimine göre, BOİ₅’in asimile edilmesi için gereken tatlı su miktarındaki ortalama azalma değeri 349.833,60 m³/ay’dır. Bu sonuç, alıcı ortamın daha az kirlendiğini ifade etmektedir. BOİ₅ için ortalama ΔWFgri1-2 için 2.039.126,40 m³/ay olarak hesaplanmıştır. AAT’de BOİ₅’in giderilme veriminin %72,73’den %90’a yükseltilmesi halinde yani Senaryo 3 için WFgri -134.352,00 m³/ay olacaktır. Dolayısıyla ΔWFgri1-3 2.523.312,00 m³/ay olarak hesaplanmıştır. Böylece alıcı ortam su kalitesi mevcut durumundan daha kaliteli olacaktır.

KOİ için 1.698.278,40 m³/ay tatlı suya ihtiyaç varken arıtma yapılması ile Senaryo 2 için 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 kirlenmesini önlediği ve ilaveten alıcı suyun kalitesini artırdığı görülmektedir. KOİ için ortalama ΔWFgri1-2 1.773.017,86 m³/ay olarak bulunmuştur. Senaryo 3 için yıllık ortalama WFgri -203.420,16 m³/ay, iken ΔWFgri1-3 2.290.844,16 m³/ay değerindedir.

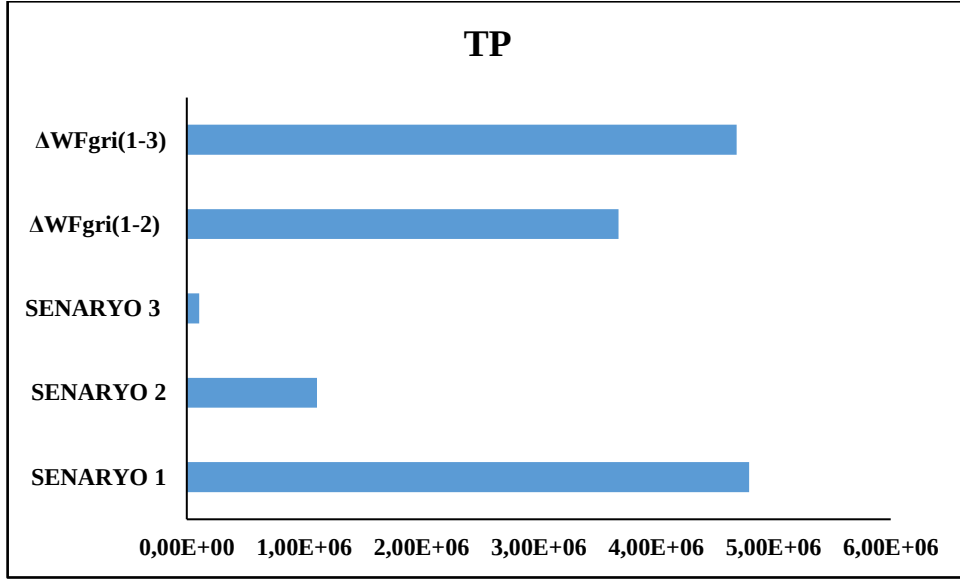
Senaryo 1'e göre TN'un asimile olması için gerekli tatlı su hacmi $607.053,91 \text{ m}^3/\text{ay}$ iken Senaryo 2 ile hesaplanan hacim $-76.972,63 \text{ m}^3/\text{ay}$ değerindedir. KOİ parametresinde olduğu gibi TN'un arıtılmasıyla hem alıcı ortamın kirlenmesi önlenmiş hem de alıcı suyun kalitesi artırılmıştır. TN için ortalama $\Delta \text{WFgri}_{1-2}$ $684.026,55 \text{ m}^3/\text{ay}$ değerindedir. %90'lık arıtma verimi olasılığı üzerinden oluşturulan Senaryo 3 için yıllık ortalama değer üzerinden $\text{WFgri} - 312.542,61 \text{ m}^3/\text{ay}$, $\Delta \text{WFgri}_{1-3}$ $919.596,52 \text{ m}^3/\text{ay}$ olarak bulunmuştur.

TP'un arıtılmaması halinde, alıcı ortamda asimile olması için $4.791.744,00 \text{ m}^3/\text{ay}$ hacimde tatlı suya ihtiyaç olduğu görülmektedir. Arıtma yapılması ile bu değer $1.111.104,00 \text{ m}^3/\text{ay}$ değerine düştüğü görülmektedir. TP için ortalama ΔWFgri yani azaltılan WFgri hacmi $3.680.640,00 \text{ m}^3/\text{ay}$ 'dır. Tesisin çıkış TP konsantrasyonu istenilen performansta olmamasına rağmen hesaplanan WFgri değeri AAT TP'dan kaynaklı kirliliğin önlenmesine önemli katkı sağlandığını göstermektedir ancak TP alıcı ortamlar için kritik bir kirlilik parametresidir (Morera et al., 2016; Varol et al., 2024). Bu nedenle TP'un arıtma veriminin artırılması için AAT'de yapılabilecek bazı modifikasyonlar WFgri hacmini azaltacaktır. Senaryo 3 için WFgri $105.926,4 \text{ m}^3/\text{ay}$ olarak hesaplanırken $\Delta \text{WFgri}_{1-3}$ $4.685.817,60 \text{ m}^3/\text{ay}$ 'dır.

Genel olarak sonuçlar değerlendirildiğinde tüm parametreler için AAT'nin alıcı ortam kirlenmesinin önlenmesine sunduğu katkı ortadadır. Tesisin özellikle KOİ ve TN kirleticilerinin giderilmesinde elde edilen sonuçlar ile II. sınıf su kalite sınır değerlerinin altında çıkış konsantrasyonları sağlandığı ve dolayısıyla daha kaliteli suyun deşarj edilmesi ile alıcı ortam suyun kalitesinin artırılmasına da önemli katkı sağladığı tespit edilmiştir. AAT'de iyileştirme yapılması halinde suyun sürdürülebilirlik seviyesi daha fazla artacaktır.



Şekil 14. WFgri'nin yıllık ortalama değeri üzerinden tüm senaryoların karşılaştırılması ve Senaryo1- Senaryo 2; Senaryo 1- Senaryo 3 için ΔWFgri değerleri (m³/ay)



Şekil 14. WFgri'nin yıllık ortalama değer üzerinden tüm senaryoların karşılaştırılması ve Senaryo1- Senaryo 2; Senaryo 1- Senaryo 3 için $\Delta WFgri$ değerleri (m³/ay) (Devamı)

WF Yanıt Formülasyonu

WF değerlendirmesinin son aşaması WF yanıt formülasyonudur. Bu aşamada alıcı su ortamında birim atık su başına asimile olmaktan korunan su miktarı çarpanını bulmak için $\Delta WFgri$ değerleri debi değerine bölünmüştür. BOİ₅, KOİ, TN ve TP için 2023 yılında aylık ve yıllık ortalama Senaryo 1 ve Senaryo 2 WFgri farkı ve yine Senaryo 1 ve Senaryo 3'e göre WFgri farkı olarak arıtılan birim atık su başına alıcı ortamda asimile olmaktan korunan birim taze su Tablo 6'da verilmiştir. Başka bir ifadeyle, şekilde görülen değerler aylık veya yıllık ortalama olarak birim atık su başına taze suyun kaç kat korunduğunun göstergesidir.

2023 yılı aylık sonuçlar incelendiğinde $\Delta WFgri/Debi$ değerleri BOİ₅ için 1,38- 7,71; KOİ için 2,54- 7,44; TN için 0,5- 2,57 ve TP için 3,98- 18,05'dir. Tüm kirlilik parametreleri için aylık sonuçlar birbirleriyle karşılaştırıldığında aylık olarak önemli bir korelasyon olmadığı görülmektedir. Örneğin; AAT'nin alıcı ortama en düşük katkısı BOİ₅ için Ekim ayında KOİ için Temmuz ayında, TN için Ağustos ayında ve TP için Mayıs ayında olmuştur. Alıcı ortama en yüksek katkı ise BOİ₅, KOİ, TN ve TP için sırasıyla Şubat, Kasım, Aralık ve Kasım aylarında gerçekleşmiştir. En yüksek çarpan için aylık bazda birebir bir eşleşme olmamasına rağmen mevsimsel olarak birbirine yakın sonuçlar sözkonusudur. Soğuk mevsimde tesisin alıcı ortamda tatlı suyun korunmasına daha fazla katkı sağladığı görülmektedir. Ocak ayında tüm kirlilik parametreleri için en yüksek çarpan değerine yakın sonuçlar elde edilmiştir. BOİ₅, KOİ, TN ve TP için bu değerler sırasıyla 6,04; 3,66; 2,23 ve 5,44'dür. Dolayısıyla ilgili AAT Sonbahar sonu ve Kış mevsiminde daha yüksek performans göstermektedir.

2023 yılı ortalamasına göre birim atık su başına BOİ₅ giderimiyle 4,92 kat, KOİ giderimiyle 4,28 kat, TN giderimiyle 1,65 kat ve TP giderimiyle 8,87 kat taze su asimile olmaktan korunmuştur. Senaryo 3 olasılığında BOİ₅, KOİ, TN, TP için bu çarpanlar sırasıyla 6,08; 5,52; 2,22; 11,30 olarak hesaplanmıştır. %90 arıtma verimi üzerinden AAT'de gerek işletmede gerekse proseslerde yapılabilecek bazı modifikasyonlarla mevcut duruma göre BOİ₅ için 1,16; KOİ için 1,24; TN için 0,57 ve TP için 2,43 çarpan fazlası alıcı ortam iyileştirmesi sözkonusu olacaktır.

AAT'lerin WF değerlendirmeleriyle ilgili benzer sonuçlar diğer çalışmalarda da belirtilmiştir. Gu et al. (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. WFgri'nin azaltılmasına yönelik çalışmalarında, Çin'in güneyinde farklı arıtma süreçleri, hedefleri ve kapasiteleri olan 9 gerçek AAT'den elde edilen sonuçlara göre AAT'lerin daha yüksek kapasiteye ve uygun teknolojiye sahip olmasının WFgri'nin daha fazla azaltılmasını sağlayacağı belirtmişlerdir. AAT'nde ortalama olarak, bir m³ evsel atık su arıtıldığında 6,78 m³ WFgri'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 WFgri'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 et al. (2021), Çekya'da yeniden yapılandırma yapılan bir AAT'de 2012-2016 yılları için WFgri 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 WFgri'ne neden olduğu vurgulanmıştır. Yeniden yapılandırmadan sonra amonyum azotu için WFgri'nin 2,7 kat azaldığı hesaplanmıştır.

Çankaya (2023), çalışmasında bir AAT'de su geri kazanım ünitesi eklenmeden önce (2018 yılı) ve eklendikten sonra (2021 yılı) WFgri 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 koruduğunu belirtmişlerdir. Varol et al. (2024), WF değerlendirmesi yaptıkları AAT'nin

185.221.591 m³/ay WFgri oluşumunu önlediğini ve sürdürülebilir çevre hedeflerine katkıda bulunduğu, bir birim arıtılmış atıksu başına ortalama 62,28 birim tatlı su korunduğu belirtmişlerdir.

Tablo 6. BOİ₅, KOİ, TN ve TP Giderimi İle Birim Atık Su Başına Aylık Olarak Asimile Olmaktan Korunan Tatlı Su Miktarı Çarpanları

ΔWFgri/Debi					
Aylar		BOİ ₅	KOİ	TN	TP
Mevcut Durum	Ocak	6,04	3,66	2,23	5,44
	Şubat	7,71	4,84	1,40	11,96
	Mart	3,97	4,33	1,60	4,88
	Nisan	6,51	3,96	2,51	4,88
	Mayıs	6,06	4,84	1,58	3,98
	Haziran	5,25	2,80	1,56	11,72
	Temmuz	3,38	2,54	0,91	5,65
	Ağustos	2,36	5,08	0,50	16,52
	Eylül	5,80	2,95	1,13	4,68
	Ekim	1,38	4,06	1,97	4,70
	Kasım	4,58	7,44	1,83	18,05
	Aralık	5,98	4,80	2,57	14,04
Mevcut Durum	Yıllık Ortalama	4,92	4,28	1,65	8,87
% 90 Arıtma Verimi	Yıllık Ortalama	6,08	5,52	2,22	11,30

Bu çalışmadan ve önceki çalışmalardan elde edilen sonuçlar, AAT'lerin WFgri'nin azaltılmasını sağladığı ve suyun sürdürülebilirliğine önemli bir katkı sunduğunu

göstermektedir. Ayrıca WFgri'nin azaltılmasında, AAT'lerde yeniden yapılandırma işlemlerinin ve AAT'lerde etkin yönetimin katkısının dikkate değeri olduğu görülmüştür.



SONUÇLAR

AAT'ler, doğal su ortamının ve insan sağlığının insan faaliyetlerinden olumsuz etkilenmesini önlemede kentsel su döngüsünde önemli bir rol oynar. Bu çalışmada bir AAT örneği üzerinde atık su arıtma sürecini değerlendirilmiş ve AAT'nin alıcı su ortamına olan katkısı WFgri ile ölçeklendirilerek ifade edilmiştir. Bu değerlendirme WFN metodolojisine göre yapılmıştır. Bu metodolojinin, bir AAT'nin WFgri değerinin hesaplanmasında uygun ve kullanışlı olduğu görülmüştür. Çalışma hedef ve kapsamında ilgili AAT'nin 2023 yılı BOİ₅, KOİ, TN ve TP parametreleri için üç senaryo oluşturulmuştur. Senaryo 1 atıksuyun arıtılmadan alıcı ortama verilmesi, Senaryo 2 AAT'nin hâlihazırda arıtma performansına göre arıtılmış suyun alıcı ortama deşarjı ve Senaryo 3 AAT'de bazı iyileştirmeler yapılarak arıtma veriminin artırılması sonrasında alıcı ortama verilmesi durumlarını kapsamaktadır. Alıcı ortam su kalitesi II. Sınıf seçilmiştir. Bu hedef ve kapsama göre WFgri hesaplamaları, m³/ay olarak Ocak- Aralık aralığında Senaryo 1 ve Senaryo 2 için hesaplanmıştır. Kirlilik parametrelerinin yıllık ortalama konsantrasyonlarına göre WFgri Senaryo 1, Senaryo 2 ve Senaryo 3 için belirlenmiştir. Sonrasında bu senaryolar için elde edilen WFgri sonuçları karşılaştırılarak AAT'nin sürdürülebilirliğe katkısı $\Delta WFgri$ ile ifade edilmiştir. $\Delta WFgri$ değerlerinin debiye oranlanmasıyla, tüm kirlilik parametreleri için, alıcı su ortamında birim atık su başına asimile olmaktan korunan su miktarı çarpanları elde edilerek yanıt formülasyonu oluşturulmuştur. WFgri değerlendirmesinden elde edilen metrik sonuçlar aşağıdaki gibidir:

2023 yılı boyunca tüm aylarda her kirlilik parametresi için arıtma tesisinin alıcı ortamda temiz suyun korunmasına önemli katkısı olduğu görülmektedir. Örneğin; Ocak ayı için Senaryo 1'e göre WFgri, BOİ₅, KOİ, TN ve TP için sırasıyla 3.162.240 m³/ay, 1.426.636,80 m³/ay, 775.346,09 m³/ay ve 3.110.400,00 m³/ay olarak hesaplanmıştır. Senaryo 2'de ise WFgri yine aynı sıralamayla 656.812 m³/ay, -90.906, 62 m³/ay, -150.453,20 m³/ay ve 854.323,20 m³/ay değerlerindedir. WFgri değerlerinin eksi olarak hesaplanması AAT'nin alıcı ortamın korunmasına daha fazla katkı sağladığının bir göstergesidir. Ocak ayı $\Delta WFgri_{1-2}$ değerleri BOİ₅ için 2.505.427,20 m³/ay, KOİ için 1.517.543,42 m³/ay, TN için 925.799,29 m³/ay, TP için 2.256.076,80 m³/ay'dır. Diğer aylarda da tüm parametreler için elde edilen benzer sonuçlar AAT'nin alıcı ortamın sürdürülebilirliğine katkısını metrik olarak kanıtlanmıştır.

BOİ₅, KOİ, TN ve TP kirlleticilerinin yıllık ortalama değerleri için üç senaryoya göre WFgri hesaplamaları yapılmıştır. BOİ₅ Senaryo 1'e göre 2.388.960 m³/ay tatlı suya gereksinim

varken Senaryo 2’de BOİ₅’in asimile edilmesi için gereken tatlı su miktarındaki ortalama azalma değeri 349.833,60 m³/ay, Senaryo 3’de -134.352,00 m³/ay’dır. Dolayısıyla $\Delta W F_{gri1-2}$ 2.039.126,40 m³/ay, $\Delta W F_{gri1-3}$ 2.523.312,00 m³/ay olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar tesisin alıcı ortama katkısı olduğunu ancak tesiste arıtma veriminin artırılması halinde suyun sürdürülebilirliğine katkının daha fazla olacağını teyit etmiştir. Diğer kirlilik parametreleri için aynı durum söz konusudur.

$\Delta W F_{gri}$ değerleri debi değerine bölünmesiyle alıcı su ortamında birim atık su başına asimile olmaktan korunan su miktarı çarpanları hesaplanarak yanıt formülasyonu oluşturulmuştur. Senaryo 2’ye göre BOİ₅, KOİ, TN ve TP için sırasıyla 4,92; 4,28; 1,65; 8,87 değerleri elde edilirken Senaryo 3 de bu çarpan değerleri 6,08; 5,52; 2,22; 11,30 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar atıksuyun arıtılmadan alıcı ortama göre tesisin 2023 yılı mevcut arıtma verimine göre ve muhtemel daha yüksek arıtma verimine göre alıcı ortamı kaç kat koruduğunu göstermektedir. Örneğin; TP parametresi için; alıcı su ortamında birim atık su başına asimile olmaktan korunan su miktarı, tesis mevcut durumunda 8,87, iyileştirilmesi durumunda 11,30 kat korunmuş olduğunun ifadesidir. Bu hesaplamalarla AAT’nin su döngüsüne olan katkısı metrik sonuçlarla teyit edilmiştir.

WF_{gri} haricinde AAT’de WF_{mavi} ve WF_{yeşil}’nin hesaplanması ile net WF değerinin belirlenmesinin sürdürülebilirlik çalışmaları için daha yönlendirici olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Amekudzi, A., Khisty, C. J., Khayesi, M., 2009. Using the sustainability footprint model to assess development impacts of transportation systems. *Transportation Research Part A*, 43, 339-348.
- Anderson, J., 2003. The environmental benefits of water recycling and reuse. *Water Supply*, 3 (4), 1-10.
- Chen, K.H., Wang, H.C., Han, J.L., Liu, W.Z., Cheng, H.Y., Liang, B., Wang, A.J., 2020. The application of footprints for assessing the sustainability of wastewater treatment plants: A review. *Journal of Cleaner Production*, 277, 124053.
- Cucek L., Klimes, J.J., Varbanov, P.S., Kravanja, Z., 2015a. Significance of environmental footprints for evaluating sustainability and security of development. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17, 2125–2141.
- Cucek, L., Klimes, J.J., Kravanja, Z., 2012. A Review of Footprint analysis tools for monitoring impacts on sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 34, 9e20.
- Cucek, L., Klimes, J.J., Kravanja, Z., 2015b. Overview of environmental footprints, Editor: Klimes, J.J., *Assessing and Measuring Environmental Impact and Sustainability*. 1st Edition, ISBN: 9780127999685, eBook ISBN: 9780128022337, Elsevier, Waltham, USA.
- Çankaya, S., 2023. Evaluation of the impact of water reclamation on blue and grey water footprint in a municipal wastewater treatment plant. *Science of the Total Environment*, 903, 166196.
- Delanka-Pedige, H.M.K., Munasinghe-Arachchige, S.P., Abeysiriwardana-Arachchige, I.S.A., Nirmalakhandan, N., 2021. Wastewater infrastructure for sustainable cities: assessment based on UN sustainable development goals (SDGs). *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 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. *Science and Total Environment*, 442, 215–224.
- Ercin, A.E., Hoekstra, A.Y., 2014. Water footprint scenarios for 2050: A global analysis. *Environment International*, 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. *Journal of Cleaner Production*, 454, 142227.
- Fang, K., Heijungs, R., De Snoo, G.R., 2014. Theoretical exploration for the combination of the ecological, energy, carbon, and water footprints: overview of a footprint family. *Ecological Indicators*, 36, 508e518.
- 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.
- 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 Ecology Footprint Theory Applications*, 16, 100–112.
- Giddings, B., Hopwood, B., O’Brien, G., 2002. Environment, economy and society: fitting them together into sustainable development. *Sustainable Development*, 10, 187-196.

- Glavic, P., Lukman, R., 2007. Review of sustainability terms and their definitions. *Journal of Cleaner Production*, 15, 1875e1885.
- Gleick, P.H., Ajami, N., Christian-Smith, J., Cooley, H., Donnelly, K., Fulton, J., Ha M.L., Heberger, M., Moore, E., Morrison, J., Orr, S., Schulte, P., Srinivasan, V., 2014. *The World's Water Volume 8: The Biennial Report on Freshwater Resources*. Island Press, Washington, USA.
- Gomez-Llanos, E., Duran-Barroso, P., Matías-Sanchez, A., 2018. Management effectiveness assessment in wastewater treatment plants through a new water footprint indicator. *Journal of Cleaner Production*, 198, 463e471.
- Goodland, R., 1995. The concept of environmental sustainability. *Annual Review Ecology and Systematic*, 26, 1–24.
- 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. *Ecological Indicators*, 60, 402–409.
- Guinee, J., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., Rydberg, T., 2011. *Life Cycle Assessment : Past, 45, 90e96*.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., 2007. Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management*, 21(1), 35–48.
- Hoekstra, A., 2009. Human appropriation of natural capital: a comparison of ecological footprint and water footprint analysis. *Ecological Economics*. 68, 1963 1974.
- Hoekstra, A.Y., 2008. *Water Neutral: Reducing and Offsetting the Impacts of Water Footprints*. Value of Water Research Report Series No. 28. UNESCO-IHE Institute for Water Education. Delft, Netherlands.
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., 2004. *Water footprints of nations*. Value of Water Research Report Series No. 16, 2004, UNESCO-IHE. Institute for Water Education.
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., Mekonnen, M.M., 2011. *The Water Footprint Assessment Manual*. Earthscan, London-Washington, DC.
- Hoekstra, A.Y.; Hung, P.Q., 2002. *Virtual Water Trade: A Quantification of Virtual Water Flows between Nations in Relation to International Crop Trade*. Value of Water Research Report Series No. 11; UNESCO-IHE: Delft, Netherlands.
- ISO 14046, 2014. *Environmental Management—Water Footprint— Principles, requirements and guidelines*. The International Organization for Standardization, Geneva.
- Jørgensen, A., Le Bocq, A., Nazarkina, L., Hauschild, M., 2008. Methodologies for social life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13, 96- 103.
- 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). *Journal of Environmental Management*, 292, 112742.
- Maqsoom, A., Aslam, B., Zahoor, H., , Ismail, S., Thaheem, M.J., Musarat, M.A., Vatin, N., 2021. Assessing Rainwater Harvesting Potential in Urban Areas: A Building Information Modelling (BIM) Approach. *Sustainability*, 13, 12583.
- Marques, A., Verones, F., Kok, M.T., Huijbregts, M.A., Pereira, H.M., 2017, How to quantify biodiversity footprints of consumption? A review of multi-regional inputoutput analysis and life cycle assessment. *Current Opinion Environmental Sustainability*, 29, 75e81.

- Marteel, A. E., Davies, J.A., Olson, W.W., Abraham, M.A., 2023. Green chemistry and engineering: drivers, metrics, and reduction to practice. *Annual Review of Environmental and Resources*, 28, 401-428.
- Matustík, J., Kocí, V., 2021. What is a footprint? A conceptual analysis of environmental footprint indicators. *Journal of Cleaner Production*, 285, 124833.
- Morera, S., Corominas, L., Poch M., Aldaya, M.M., Comas, J., 2016. Water footprint assessment in wastewater treatment plants. *Journal of Cleaner Production* 112, 4741e4748.
- Mori, K., Christodoulou, A., 2012. Review of sustainability indices and indicators: towards a new City Sustainability Index (CSI). *Environmental Impact Assessment Review*, 32 (1), 94e106.
- Müller, S.I., Hitsov, I.P., Chapanova G., Wyseure, L., Diekow, T., Moed, D.H., Kaiser, C., Palmowski, L., Hamelink, L., Wintgens, T., 2024. Comparison of cooling tower blowdown and enhanced make up water treatment to minimize cooling water footprint. *Journal of Environmental Management*, 367, 121949.
- Ness, B., Urbel-Piirsalu, E., Anderberg, S., Ollson, L., 2007. Categorising tools for sustainability assessment. *Ecological Economics*, 60, 498e508.
- Obaideen, K., Shehata, N., Sayed, E.T., Abdelkareem, M.A., Mahmoud, M.S., Olabi, A.G., 2022. The role of wastewater treatment in achieving sustainable development goals (SDGs) and sustainability guideline. *Energy Nexus*, 7, 100112.
- Our World in Data, 2020. By Hannah Ritchie and Max Roser Water Use and Stress, <https://www.ourworldindata.org/water-use-stress>, Erişim Tarihi: 20.10. 2024.
- Paterson, W., Rushforth, R., Ruddell, B.L., Konar, M., Ahams, I.C, Gironás, J., Mijic, A., Mejia, A., 2015. Water Footprint of Cities: A Review and Suggestions for Future Research. *Sustainability*, 7, 8461-8490.
- Patterson, M., McDonald, G., Hardy, D., 2017. Is there more in common than we think? Convergence of ecological footprinting, emergy analysis, life cycle assessment and other methods of environmental accounting. *Ecological Modelling*, 362, 19e36.
- Pope, J., Annandale, D., Morrison-Saunders, A., 2004. Conceptualising sustainability assesment. *Environmental Impact Assessment Review*, 24 (6), 595e616.
- Sala, S., Bianchi, A., Christophe Bligny, J., Bouraoui, F., Castellani, V., De Camillis, C., Mubareka, S., Vandecasteele, I., Andree Wolf, M., 2013. Water footprint in the context of sustainability assessment- Report on the application of life cycle based indicators of water consumption in the context of integrated sustainability impact analysis.
- Shao, L., Chen, G.Q., 2013. Water Footprint Assessment for Wastewater Treatment: Method, Indicator and Application. *Environmental Science and Technology*, 47, 7787–7794.
- Stejskalová, L., Ansorge, L., Kučera, J., Vološinová, D., 2021. Grey water footprint as a tool for wastewater treatment plant assessment- Hostivice case study. *Urban Water Journal*, 18(10), 796–805.
- Tarım ve Orman Bakanlığı. 2021. Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği. <https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/mevzuatlar>, Erişim Tarihi: 08.07.2025.
- UN, 2007. Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies, Third Edition.

- UN, 2020. SDG Indicators: Global indicator framework for the Sustainable Development Goals and targets of the 2030 Agenda for Sustainable Development.
- UNDP, 2024. <https://www.undp.org/sustainable-development-goals/>, Erişim Tarihi: 15.09.2024
- UNEP, 2007. Water, section B, state-and-trends of the environment: 1987–2007. Global environment outlook 4: environment for development, Valetta.
- UNEP, 2011. Water Footprint and Corporate Water Accounting for Resource Efficiency. United Nations Environment Programme, Paris.
- UN-Habitat, 2016. World Cities Report 2016: Urbanization and Development: Emerging Futures. UN- Habitat.
- URL1, <https://tr.wikipedia.org/wiki/Sürdürülebilirlik>, Erişim Tarihi: 15.09.2024.
- URL2, https://tr.wikipedia.org/wiki/Ortak_Geleceğimiz, Erişim Tarihi: 15.09.2024
- URL3, <https://unstats.un.org/sdgs/indicators/indicators-list>, Erişim tarihi: 7 Temmuz 2025.
- URL4, <https://www.isglobal.org/en/-/sdgs-and-global-health>, Erişim Tarihi: 24.10.2025.
- URL5, <https://www.sdg6data.org/en>, Erişim tarihi: 5.11.2024.
- URL6 https://en.wikipedia.org/wiki/Water_footprint/ Erişim tarihi:4.11.2024.
- URL7, 2024, <https://www.waterfootprint.org/about-us/aims-history/>, Erişim tarihi: 20.10.2024
- URL8, 2024, <https://www.suverimliligi.gov.tr/su-ayak-izi/>, Erişim tarihi: 20.10.2024.
- URL9, 2024 <https://www.waterfootprint.org/water-footprint-2/what-is-a-water-footprint/>, Erişim tarihi: 23.11.2025.
- Vanham, D., Bidoglio G., 2013. A review on the indicator water footprint for the EU28. Ecological Indicators, 26, 61–75.
- Varol, S., Alver, A., Altaş, A., 2024. The water footprint assessment for advanced biological wastewater treatment plant. International Journal of Environmental Science and Technology, 21, 2035–2048.
- Zaccai, E., 2012. Over two decades in pursuit of sustainable development: influence, transformations, limits. Environmental Development, 1, 79-90.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Gülsüm Merve ÇAKIR
Doğum tarihi:	-
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Cumhuriyet Anadolu Lisesi Kars/Merkez
Lisans:	Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği, Erzurum
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği, Erzurum
Doktora:	-
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce: İyi	
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
-	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
ORCID: 0000-0002-2672-6649 Acar, F.N., Güneş (Çakır), G.M., 2025. Bir atıksu arıtma tesisinin suyun sürdürülebilirliğine katkısının gri su ayak izi ile belirlenmesi. Black Sea Journal of Engineering and Science, 8(6),1680-1688.	