



**ERZURUM İLİ KENTSEL ATIK SULARININ GRİ SU
AYAK İZİNİN HESAPLANMASI**

Muhammed Selim ÖZDEMİR

**Yüksek Lisans Tezi
Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Zeynep EREN
2024**

(Her hakkı saklıdır.)

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

**ERZURUM İLİ KENTSEL ATIK SULARININ GRİ SU AYAK İZİNİN
HESAPLANMASI**

(The Greywater Footprint Calculation of Erzurum City's Urban Wastewater)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed Selim ÖZDEMİR

Danışman: Prof. Dr. Zeynep EREN

Erzurum
Aralık, 2024

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Muhammed Selim ÖZDEMİR tarafından hazırlanan “Erzurum İli Kentsel Atıksularının Gri Su Ayak İzinin Hesaplanması” başlıklı çalışması 30/12/2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Çevre Teknolojisi Bilim Dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Doç. Dr. Serkan BAYAR
Atatürk Üniversitesi
Danışman: Prof. Dr. Zeynep EREN
Atatürk Üniversitesi
Jüri Üyesi: Doç.Dr Sinan KUL
Bayburt Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

Aslı Islak İmzalıdır

Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü/Yönetim Kurulunun
.../.../... tarih ve sayılı
kararı.

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

Prof. Dr. Alper NUHOĞLU

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Prof. Dr. Zeynep EREN danışmanlığında sunulan “Erzurum İli Kentsel Atıksularının Gri Su Ayak İzinin Hesaplanması” 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	5	30
Kuramsal Temeller	30	30
Materyal ve Yöntem	29	35
Bulgular	9	20
Tartışma	9	20
Tezin Geneli	25	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.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Muhammed Selim ÖZDEMİR	Prof. Dr. Zeynep EREN
25.12.2024	25.12.2024
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* 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

Öncelikle yüksek lisans eğitimimizin her aşamasında gece gündüz demeden, her an bir telefon kadar uzağımızda olan ve bizi bizden daha iyi takip edip motivasyonumuzu yüksek tutarak eğitimimizi başarıyla sonuçlandırmamızın en önemli mimarı kıymetli danışman hocam Prof.Dr. Zeynep EREN'e çalışmalarımın her aşamasında sunduğu katkılardan dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda gerekli verilerin sağlanması konusunda ve vermiş oldukları destekten dolayı öncelikle Erzurum Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü ile Erzurum Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi Müdürü Çevre Yüksek Mühendisi Selim AYDIN'a ve Erzurum Meteoroloji 12. Bölge Müdürlüğü'ne ve meslektaşım Çevre Yüksek Mühendisi Nuray ERDOĞDU'ya da teşekkür ederim.

Öğrencilik yıllarımdan itibaren mesleğimle ilgili birçok tecrübe kazanımına vesile olan değerli büyüğüm babam İhsan ÖZDEMİR'e, hayatımın her aşamasında olduğu gibi bu çalışmamda da daima yanımda olan aileme, eşim Büşra ÖZDEMİR'e, kızlarım Esmâ ÖZDEMİR ve Elif ÖZDEMİR'e sonsuz şükranlarımı sunarım.

Muhammed Selim ÖZDEMİR

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERZURUM İLİ KENTSEL ATIK SULARININ GRİ SU AYAK İZİNİN HESAPLANMASI

Muhammed Selim ÖZDEMİR

Danışman: Prof. Dr. Zeynep EREN

Amaç: Son yıllarda iklim değişikliği kaynaklı kuraklığa bağlı olarak su kıtlığı sorunu sık sık gündeme gelmektedir. Temiz su kaynakları zaten hem evsel hem endüstriyel hem de tarımsal amaçlı kullanımlardan dolayı küresel olarak yaygın bir kirlilik tehdidi altındadır. Bu nedenle suyun her sektörde sürdürülebilir kullanımı oldukça önemlidir. Atıksu arıtma tesisleri ise atıksuların hem mevzuata uygun kalitede arıtılması hem de su ve enjinin etkin kullanılması açısından son yıllarda çalışmaların odağı haline gelmiştir. Bu amaçla bu çalışmada Atıksu Arıtma Tesislerinde sürdürülebilir su kullanımı konusunda karar verici mekanizmalara destek sağlamak amacıyla bir Su Ayak İzi değerlendirmesi yapılmıştır.

Yöntem: Çalışma sahası olarak Erzurum İli BAAT seçilerek tesisin 2023 yılına ait debi, KOİ, BOİ₅, AKM, ve TN parametreleri kullanılarak Su Ayak İzi Ağı olarak geliştirilen yöntemle tesise ait Gri Su Ayak İzi hesaplanmıştır. Tesisin toplam Su Ayak İzi içerisinde Gri Su Ayak İzi'nin payını görebilmek için de Yeşil ve Mavi Su Ayak İzi hesapları da yapılmıştır. Hesaplamalarda hem Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY, 2004) hem de Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (YSKY, 2012) esas alınmıştır ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bulgular: Erzurum BAAT en yüksek gri su ayak izi SKKY (2004)'e göre AKM ve YSKY (2012)'ye göre BOİ₅ parametresidir. Dolayısı ile Erzurum BAAT toplam gri su ayak izi SKKY (2004)'e göre $WF_{gri} = 584.113,2 \text{ m}^3/\text{yıl}$ olurken, YSKY (2012)'e göre $WF_{gri} = 2.142.388,88 \text{ m}^3/\text{yıl}$ olarak hesaplanmıştır. SKKY (2004)'ne tesisin en yüksek su ayak izini %88'lik bir pay ile Mavi Su Ayak İzi oluşturmaktadır. Bunu %11'lik pay ile Gri Su Ayak İzi ve %1'lik pay ile Yeşil Su Ayak İzi takip etmektedir. YSKY (2012) esas alınarak hesaplanan Erzurum BAAT toplam su ayak izinin ise %67'sini Mavi Su Ayak İzi, %32'sini Gri Su Ayak İzi ve %1'ini Yeşil Su Ayak İzi oluşturmaktadır. Ayrıca tesiste 1 m^3 atıksuyun Su Ayak İzi; SKKY (2004) ve YSKY (2012)'ye göre sırasıyla $0,182 \text{ m}^3$ ve $0,237 \text{ m}^3$ olarak hesaplanmıştır.

Sonuç: Çalışmadan elde edilen sonuçlar kullanılarak tesiste suyun daha sürdürülebilir kullanımının sağlanması mümkündür. Tesisin arıtma veriminin tüm parametreler dikkate alınarak artırılmasının, alıcı ortama giren kirlilik yükünü azaltacağı için gri Gri Su Ayak İzi düşüreceği görülmüştür. Özellikle biyolojik arıtım verimliliğindeki artışın arıtılmış atıksuların deşarj edildiği Karasu Nehri'nin asimilasyon kapasitesini aşmaması bakımından önem taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Su Ayak İzi, Erzurum Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi, Sürdürülebilir Su Yönetimi

Aralık 2024, 67 sayfa

ABSTRACT

MS THESIS

THE GREYWATER FOOTPRINT CALCULATION OF ERZURUM CITY'S URBAN WASTEWATER

Muhammed Selim ÖZDEMİR

Supervisor: Prof. Dr. Zeynep EREN

Purpose: In recent years, the problem of water scarcity has frequently become important due to climate change that leads to drought. Fresh water resources are already under a widespread threat of global water pollution due to domestic, industrial and agricultural uses. Therefore, the sustainable use of water in every sector is very essential. Wastewater treatment plants have gain importance of recent studies in terms of both the treatment of wastewater in accordance with the legislation and the efficient use of water and energy. For this purpose, a Water Footprint Assessment was conducted in this study to support decision-making mechanisms on sustainable water use in Wastewater Treatment Plants.

Method: The study area was selected as Erzurum BAAT and Grey Water Footprint of plant was calculated using the method developed by the Water Footprint Network using the flow rate, COD, BOD₅, SS, and TN parameters for the year of 2023. Green and Blue Water Footprint calculations were also included in the study inorder to see the share of the Grey Water Footprint in the total Water Footprint of the plant. Both the Turrkish Water Pollution Control Regulation (SKKY, 2004) and the Turkish Surface Water Quality Regulation (YSKY, 2012) were taken as basis in the calculations as the results were compared.

Results: Erzurum BAAT's highest Grey Water Footprint was SS according to SKKY (2004) and BOI₅ parameter according to YSKY (2012). Therefore, Erzurum BAAT's total Grey Water Footprint was WF_{gri} = 584.113,2 m³/year according to SKKY (2004), while it was calculated as WF_{gri} = 2.142.388,88 m³/year according to YSKY (2012). According to SKKY (2004), the plant's highest water footprint was constituted by Blue Water Footprint with a share of 88%. This was followed by Grey Water Footprint with a share of 11% and Green Water Footprint with a share of 1%. Erzurum BAAT's total water footprint calculated based on YSKY (2012) consists of 67% Blue Water Footprint, 32% Grey Water Footprint and 1% Green Water Footprint. In addition, Water Footprint of 1 m³ wastewater in the plant was calculated as 0.182 m³ and 0.237 m³ according to SKKY (2004) and YSKY (2012), respectively.

Conclusion: It is possible to provide more sustainable use of water in the plant based on the results that was obtained in this study. It has been observed that increasing the treatment efficiency of the plant by considering all operational parameters would reduce the pollutant discharging to the receiving water environment and thus, reduce the Grey Water Footprint. It is especially important that the increase in biological treatment efficiency does not exceed the assimilation capacity of the Karasu River, where the treated wastewaters are discharged.

Keywords; Water Footprint, Erzurum Biological Wastewater Treatment Plant, Sustainable Water Management

December 2024, 67 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	2
Küresel Su Döngüsü.....	2
İklim Değişikliği ve Su Kaynakları.....	4
Su ve Sürdürülebilirlik	7
Su Stresi	9
Su Kirliliği.....	11
Türkiye’de su kaynaklarının yönetimi	12
Atıksu Arıtma Tesisleri	15
Su Ayak İzi Kavramı.....	16
Mavi su ayak izi	19
Yeşil su ayak izi	20
Gri su ayak izi	20
ISO 14046 su ayakizi standardı.....	22
Kentsel arıtma tesislerinin su ayak izi.....	24
Erzurum Kentinin Su Kaynakları.....	25
Literatür Özeti	26
MATERYAL VE METOT	30
Erzurum İli Coğrafi Bilgileri.....	30
Çalışma Sahası: Erzurum Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi (BAAT).....	31
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	34
Araştırma Bulguları.....	34
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	47

KAYNAKLAR.....	47
EKLER	52
EK-1. Erzurum Büyükşehir Başkanlığı Eski Genel Müdürlüğü İle Atatürk Üniversitesi Rektörlüğü Arasındaki İ�birli�i Protokolü	52
ÖZGEÇMİŞ.....	55



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Küresel Su Dağılımına İlişkin Bir Tahmin	3
Tablo 2. SKA-6: Temiz Su ve Sanitasyon Eylemi Hedefler ve Göstergeleri.....	7
Tablo 3. Yerüstü Su Kalite Yönetmeliği EK-5 Tablo 2'ye Göre Kalite Kriterleri.....	14
Tablo 4. Palandöken Barajının Genel Özellikleri	25
Tablo 5. Erzurum BAAT Giriş Suyu Dizayn Parametreleri	33
Tablo 6. Tesis Giriş Atıksuyu Aylık ve Yıllık Ortalama Parametreler.....	36
Tablo 7. Tesis Çıkış Atıksuyu Aylık ve Yıllık Ortalama Parametreler	37
Tablo 8. Gri Su Ayak İzi Hesabında Kullanılacak Olan Kirletici Parametreler İçin Deşarj Standartları	38
Tablo 9. Gri Su Ayak İzi Hesabında Kullanılacak Olan Tüm Parametreler.....	38
Tablo 10. SKKY (2004)'e göre Erzurum BAAT Gri Su Ayak İzi Hesaplama Sonuçları, m ³ /yıl.....	38
Tablo 11. YSKY (2012)'e göre Erzurum BAAT Gri Su Ayak İzi Hesaplama Sonuçları, m ³ /yıl.....	39
Tablo 12. Erzurum Meteoroloji 12. Bölge Müdürlüğü 2023 Yılı Yıllık Ortalama Yağış Verileri	41
Tablo 13. Erzurum BAAT Yıllık Girdi-Çıktı Değerleri	42

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Küresel su döngüsü	2
Şekil 2. 1850–1900 referans dönemine göre yıllık küresel yüzey hava sıcaklığı anomalileri ...	5
Şekil 3. SKA-6: Temiz su ve sanitasyon eylemi hedefleri.....	8
Şekil 4. 2015 yılında kabul edilen küresel taahhütler arasındaki suyun bağlayıcı rolü	8
Şekil 5. Falkenmark gösterge sınıfları.....	10
Şekil 6. Türkiye’deki hidrolojik havzalar.....	13
Şekil 7. 2022 yılında dünya genelinde güvenli bir şekilde arıtılan evsel atıksu akışının bölgelere göre oranı.....	15
Şekil 8. Su ayak izinin bileşenleri	17
Şekil 9. Kirlilik yükünün Abstr düzeltmesi.....	22
Şekil 10. Su Ayak İzi değerlendirmesinin LCA yöntemine göre aşamaları	23
Şekil 11. Erzurum ili ana su kaynağı olan Palandöken Barajı	26
Şekil 12. Erzurum BAAT görüntüsü.....	32
Şekil 13. Gri su ayak izi hesabında kullanılan konsantrasyon parametreleri ve WFgri, toplam.....	34
Şekil 14. AAT proses şeması	36
Şekil 15. BAAT giriş ve çıkış parametreleri	37
Şekil 16. Erzurum BAAT SKKY (2004) Yönetmeliğine göre hesaplanmış toplam ve bakiye gri su ayak izi.....	39
Şekil 17. Erzurum BAAT YSKY (2012) Yönetmeliğine göre hesaplanmış toplam ve bakiye gri su ayak izi.....	40
Şekil 18. Erzurum BAAT yıllık su girdi ve çıktıları için kütle denkliği	42
Şekil 19. Erzurum BAAT toplam su ayak izi, SKKY (2004)	44
Şekil 20. Erzurum BAAT toplam su ayak izi, YSKY (2012)	45

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AAT	: Atıksu Arıtma Tesisi
AB	: Avrupa Birliği
AKM	: Askıda Katı Madde
BAAT	: Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi
BM	: Birleşmiş Milletler
BOİ	: Biyolojik Oksijen İhtiyacı
BWF	: Mavi su ayak izi
DSÖ	: Dünya Sağlık Örgütü
EPA	: Çevre Koruma Ajansı
GWF	: Gri su ayak izi
HAB	: Zararlı Alg Patlamaları
HKEP	: Havza Koruma Eylem Planları
IPCC	: Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
LCA	: Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi
NHYP	: Nehir Havza Yönetim Planları
SYGM	: Su Yönetimi Genel Müdürlüğü
TN	: Toplam Azot
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
WPL	: Su Kirliliği Seviyesi
WFN	: Water Footprint Network

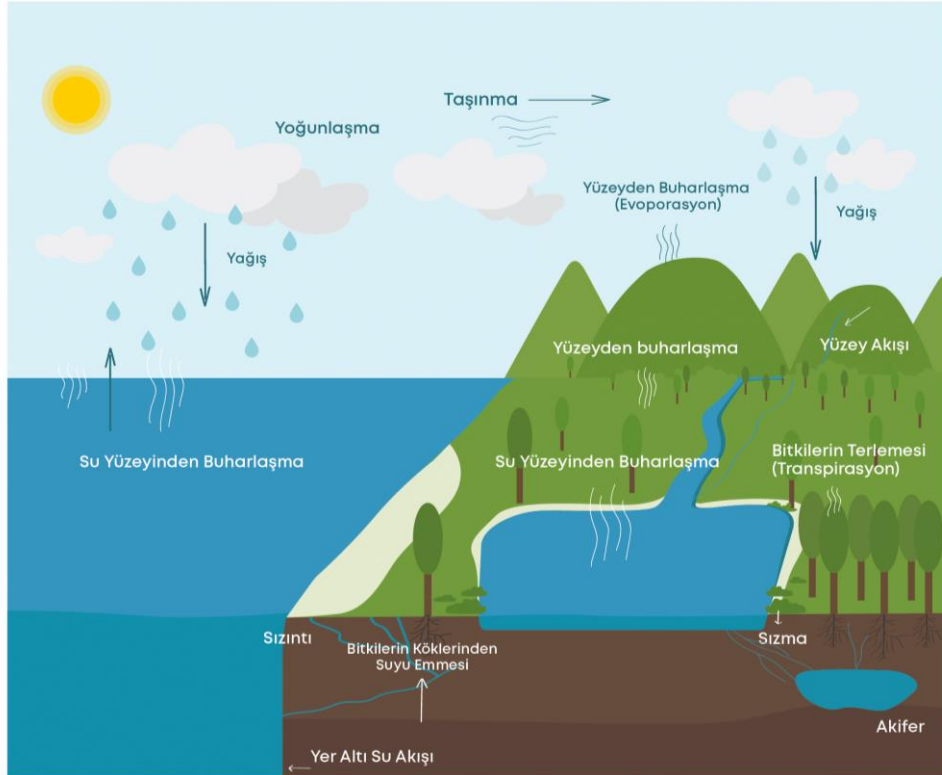
GİRİŞ

Su tüm canlıların temel yaşam kaynağıdır. Günlük aktiviteler, beslenme ve barınma gibi tüm temel ihtiyaçlarımız suya doğrudan bağımlıdır. Yerkürenin yaklaşık olarak %70 'i sularla kaplıdır ancak hepimizin bildiği gibi bunun büyük bir kısmı okyanus ve denizlerden ileri gelen tuzlu sulardır. Tatlı su kaynaklarımızın ise insanı kullanıma hazır kısmı çok küçük bir yüzdeye sahiptir. Bu kadar kısıtlı miktardaki tatlı su kaynaklarımız üzerinde yoğun kirlilik baskısı mevcuttur. Kentsel gelişimin ilerlemesi, sanayi üretimindeki artış su kirliliğinin her geçen gün artmasına sebep olmaktadır. Tatlı su kaynakları üzerindeki bir diğer önemli baskı ise son yıllarda şiddeti artan küresel iklim değişikliğinin yarattığı kuraklık etkisidir. Bu nedenle temiz su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı oldukça önem kazanmaktadır. Gündelik hayatımızda su tüketimi denilince aklımıza musluktan akan su gelmektedir ancak musluktan akan suyun kaynağında biriktirilmesi, arıtılması ve evlerimize kadar getirilmesi de dahil olmak üzere tüm aşamalarda dolaylı olarak veya enerji kaynaklı su tüketilmektedir. Su Ayak İzi kavramı da tam bu noktadan doğmuştur. Su ayak izi kavramı bir ürün (bu ürün suyun kendisi de olabilir) veya hizmetin üretiminden (o suyun evlerimize kadar taşınması) tüketiciye ulaşıncaya kadar harcanan doğrudan ve dolaylı su miktarlarının toplamını ifade etmektedir. Tüm bu süreçlerde kullanılan su yüzey veya yeraltı su kaynaklarından temin ediliyorsa bu Mavi Su Ayak İzi; yağmur suyundan kaynaklı bir su kullanımı var ise Yeşil Su Ayak İzi ve oluşan kirli suyun alıcı ortam standartlarına uygun hale getirilmesi için yani alıcı ortam tarafından asimile edilmesi için ihtiyaç duyulan tatlı su miktarı ise Gri Su Ayak İzi olarak sınıflandırılmaktadır. Bu nedenle atıksu arıtma tesislerinde tesis verimliliği kadar suyun sürdürülebilir kullanımı da oldukça önemlidir. Atıksuların arıtılmaksızın doğrudan alıcı ortamlara deşarj edilmesi ekosisteme ve insan sağlığına önemli bir tehdit oluşturmaktadır. Ancak buna rağmen küresel olarak oluşan atıksuların ancak yarısı güvenli bir şekilde bertaraf edilerek alıcı ortamlara verilmektedir. Mevcut atıksu arıtma tesisleri için ise enerji ve temiz su kullanımı büyük bir problem teşkil etmektedir. Bu noktada Su Ayak İzi parametresinin kullanımı önem kazanmaktadır. Bu amaçla bu tez çalışmasında Erzurum Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi'nin (BAAT) Gri Su Ayak İzi (WFgri) değerlendirilmesi yapılmıştır. Çalışma için Erzurum BAAT'nin 2023 yılına ait debi, KOİ, BOİ₅, AKM, ve TN parametreleri üzerinden WFgri değeri hesaplanmıştır. Tesisin toplam su ayak izi içerisindeki payının değerlendirilmesi için de ayrıca WFeşil ve WEmavi değerleri de hesaplanarak literatürdeki örnek AAT su ayak izi haspaları ile karşılaştırılmıştır.

KURAMSAL TEMELLER

Küresel Su Döngüsü

Tarih boyunca insan medeniyetleri su kıyılarına veya suya yakın alanlara kurulmuştur. Erken dönem Mısır ve Hindistan uygarlıkları sırasıyla Nil ve Ganj Nehirleri kıyılarında gelişmiş ve nehirler günlük yaşamın merkezinde yer alarak, sanat, edebiyat ve müzik ile de belgelenen bir kültürü oluşturmuştur (Pietz *et al.* 2021). İnsan faaliyetleri büyük ölçüde suya bağımlıdır ancak gezegenimizin dörtte üçü suyla kaplı olmasına rağmen tahmin ettiğimiz kadar çok temiz su kaynağı mevcut değildir. Dünyamızın yaklaşık %71'i su ile kaplıdır ve okyanuslar, bu suyun yaklaşık %96,5'ini barındırmaktadır; bu nedenle su, tuzludur. Küresel su döngüsü sayesinde, gezegenimizin su kaynağı sürekli olarak bir noktadan diğerine ve bir şekilden diğerine geçiş yapmaktadır. Bu sayede su her zaman taze bir şekilde insanların kullanımına sunulmaktadır. Su, atmosferin üst katmanlarında birikir, ardından yağmur şeklinde yeryüzüne düşer ve güneş ışığı etkisiyle buharlaşma ve terleme yoluyla tekrar atmosfere geri döner. Bu süreç su döngüsü olarak adlandırılır. (Şekil 1).



Şekil 1. Küresel su döngüsü (URL-1 2024)

Su, gezegenimizdeki yaşam için temel bileşendir, katı, sıvı ve gaz formunda bulunur. Su döngüsü ayrıca Dünya iklim sisteminin başlıca bileşenleri olan; hava, bulutlar, okyanus, göller, bitki örtüsü, kar örtüsü ve buzulları birleştirir. Sıvı formdaki su, su buharı oluşturmak üzere buharlaşır, ardından bulutları oluşturmak için yoğunlaşır ve tekrar yağmur ve kar şeklinde yeryüzüne geri döner. Küresel su döngüsü, birçok farklı süreci içeren karmaşık bir sistemdir. Şekil 1'e göre suyun farklı fazlarda atmosferde *taşınması*, sıvı formdaki suyun karadan *akışı*, toprağa *sızması* ve *yeraltı suyunu* oluşturması şeklinde gerçekleşir. Yeraltı suyu bitkilere *bitki alımı* ile ulaşır ve bitkilerden tekrar atmosfere buharlaşır, bu olay *terlemedir*. Katı buz ve kar doğrudan gaza dönüşebilir ve *süblimleşme* adımı alır (NOAA 2019).

Gezegenimizdeki suyun yalnızca %2,5'inin tatlı su kaynaklarını oluşturmakta ve bu suyun yalnızca %1,2'si ise yüzey su kaynaklarını meydana getirmektedir. Geri kalan üçte iklik kısım buzlarda hapsedilmişken üçte birlik kısım ise yeraltı suyunu oluşturmaktadır. Tüm toplam tatlı yüzey su miktarının (%1,2) yine yaklaşık üçte ikisi permafrost ve üçte biri ise göllerde bulunmaktadır. Nehirler tatlı yüzey su kaynaklarının %0,49'unu oluşturmakta ve bu tatlı yüzey suyunun %3'ü ise atmosferde su buharı olarak bulunmaktadır. Nehirler tatlı yüzey su kaynaklarının yalnızca küçük bir miktarını oluşturmalarına rağmen, insanlar sanayi, hidroelektrik, tarım, hayvancılık, evsel kullanım gibi tüm faaliyetleri için ihtiyaç duydukları suyun büyük bir kısmını buradan alırlar (USGS 2019). Suyun küresel dağılımı Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Küresel Su Dağılımına İlişkin Bir Tahmin (USGS 2019).

Su kaynağı	Su hacmi, mil ³	Su hacmi, km ³	Tatlı su yüzdesi	Toplam su yüzdesi
Okyanuslar, Denizler ve Koylar	321.000.000	1.338.000.000	--	96,54
Buzullar, Buzullar ve Kalıcı Kar	5.773.000	24.064.000	68,7	1,74
Yeraltı suyu	5.614.000	23.400.000	--	1,69
<i>Tatlı</i>	2.526.000	10.530.000	30,1	0,76
<i>Tuzlu su</i>	3.088.000	12.870.000	--	0,93
Toprak Nemi	3.959	16.500	0,05	0,001
Zemin Buz ve Permafrost	71.970	300.000	0,86	0,022
Göller	42.320	176.400	--	0,013
<i>Tatlı</i>	21.830	91.000	0,26	0,007
<i>Tuzlu su</i>	20.490	85.400	--	0,006
Atmosfer	3.095	12.900	0,04	0,001
Bataklık suyu	2.752	11.470	0,03	0,0008
Nehirler	509	2.120	0,006	0,0002
Biyolojik Su	269	1.120	0,003	0,0001

(Yüzdelere yuvarlanmıştır, bu nedenle 100'e eklenmeyecektir)

Su, kuraklık ve sel gibi aşırı hava olaylarının temel bir parçası olduğu için iklimin değişkenliğini ve değişimini etkiler. Su, insan toplumlarının ve ekosistemlerin temel ihtiyaçlarını karşılamak için kritik bir öneme sahiptir. Bu nedenle su kaynaklarının hem insan kullanımı hem de ekosistem sağlığı için korunması önemlidir. Dünya'nın birçok bölgesinde; kentsel büyüme, nüfus artışları, kirlilik ve iklim değişiklikleri sebebiyle su kaynakları hızla tükenmektedir. Bu çoklu stres faktörleri ise küresel hidrolojik döngüyü olumsuz etkilemektedir.

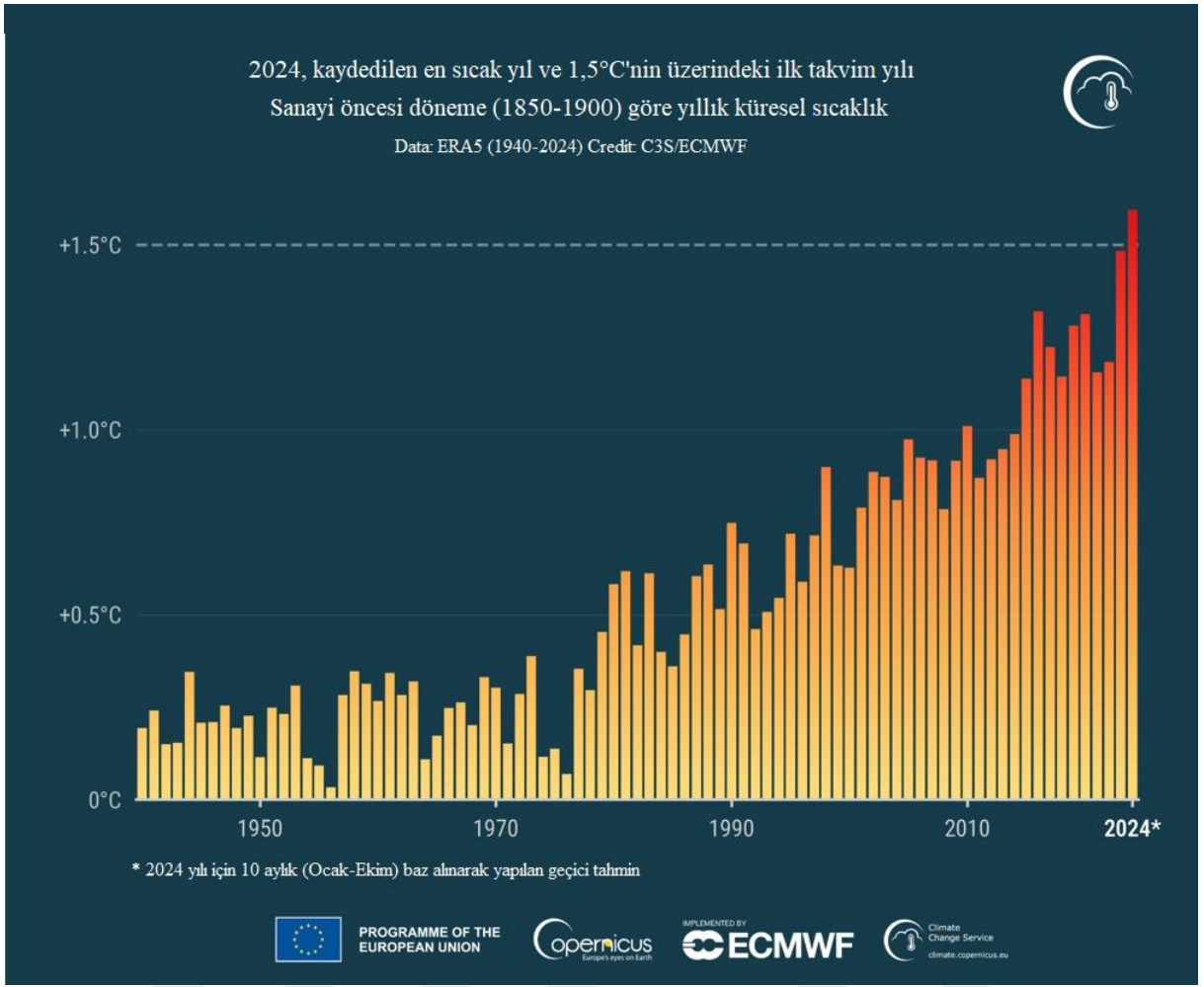
İklim değişikliği ile hidrolojik döngü üzerinde kaydedilen üç büyük değişim şunlardır: (a) bazı bölgeler daha fazla yıllık veya mevsimsel yağış alırken diğerleri daha az yağış almaktadır, (b) birçok bölgede yoğun yağışta artış görülmüştür ve birçoğunda kuraklık dönemlerinde artış veya azalışlar görülmüştür, (c) bazı bölgelerde daha uzun kuraklık dönemleriyle ayrılmış daha yoğun yağış olaylarına doğru kaymalar görülmüştür. Genel olarak, küresel su döngüsünde insan kaynaklı değişikliğe dair net bir resim vardır ve bu durum artık dünya çapında toplumları ve ekosistemleri etkilemektedir (AR6 2021).

İklim Değişikliği ve Su Kaynakları

2015 yılı Paris BM İklim Değişikliği Konferansı'nda kabul edilen Paris Anlaşmasının asıl hedefi, "küresel ortalama sıcaklıktaki artışları sanayi öncesi seviyelerin 2 °C üzerinde tutmak" ve "sıcaklık artışlarını sanayi öncesi seviyelerin 1,5 °C üzerinde sınırlamak"tır.

Çünkü BM Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) 1,5 °C eşiğinin aşılmasının daha şiddetli kuraklıklar, sıcak hava dalgaları ve yağışlar dahil olmak üzere çok daha ciddi iklim değişikliği etkilerinin ortaya çıkma riskini taşıdığını belirtmektedir (URL-2 2024). Ancak son 12 ayın (Kasım 2023 - Ekim 2024) küresel ortalama sıcaklığı 1991-2020 ortalamasının 0,74 °C üzerinde ve 1850-1900 sanayi öncesi ortalamasının yaklaşık 1,62 °C üzerinde ölçülmüştür.

ERA5 uydu verilerine göre 2024'teki yıllık sıcaklığın sanayi öncesi seviyeden muhtemelen 1,55 °C'den daha yüksek olacağı neredeyse kesinleşmiştir. ERA5 uydu verilerine göre 1940'tan 2024'e kadar 1850–1900 referans dönemine göre yıllık küresel yüzey hava sıcaklığı anomalileri Şekil 2'de gösterilmiştir. 2024 tahmini geçicidir ve Ocak-Ekim ayları arasındaki verilere dayanmaktadır (Copernicus 2024).



Şekil 2. 1850–1900 referans dönemine göre yıllık küresel yüzey hava sıcaklığı anomalileri (°C)

Bu bilimsel kanıtlar küresel sıcaklıklar arttıkça iklimin değişmeye devam edeceğini ve bu değişimin toplumları esas olarak su yoluyla etkileyeceğini ortaya koymaktadır. İklim değişiklikleri, insanlığın temel ihtiyaçları için su mevcudiyetini, kalitesini ve miktarını etkileyecek ve su ve sanitasyona ilişkin insan haklarını tehdit etmeye devam edecektir. Küresel sıcaklık artışlarının su döngüsünü değiştirmesi ayrıca enerjinin üretimi, gıda güvenliği, insan sağlığı, biyoçeşitlilik, ekonomik kalkınma ve yoksulluğun indirgenmesi için de riskler oluşturacaktır. Böylelikle Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarına (SKA) 2030 gündemi de tehlikeye girecektir (UN Water 2024).

İklim değişikliği suyun miktarını ve mevcudiyetini etkilemektedir. Son yıllarda hızla artan ve çok çok önemli iklim tehlikelerinden kabul edilen kuraklık su kaynaklarını olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca aşırı yağışların sebep olduğu kentsel su baskınları da temiz suyun kalitesini ve miktarını etkilemektedir. Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO); toprak nemi, kar ve buz dahil olmak üzere karasal su depolanmasının son yirmi yıllık dönemde yılda 1 cm oranında azaldığını ve bu durumun su güvenliği açısından önemli sonuçlar doğuracağını belirtmektedir. Bu sebeple iklim değişikliği ile mücadelede ederken su en önemli uyum önceliği olan

sektörlerden biri olarak kabul edilmektedir. WMO (2021), 2018 yılında, 2,3 milyar insan su stresi altındaki ülkelerde yaşadığını ve 3,6 milyar insanın yıl içerisinde en az bir ay süreyle suya erişemediği belirtmektedir. 2050 yılına kadar ise, beş milyardan fazla insanın yılda en az bir ay süreyle suya yetersiz erişim sağlayacağını belirtmektedir. Ayrıca iklim değişikliğine bağlı meteorolojik afetler arttıkça suyla ilgili tehlikelerin sıklığı da son 20 yıldır artmıştır. 2000’li yıllardan beri sel felaketleri %134 artış göstermiştir (WMO 2021).

IPCC 6. Değerlendirme Raporuna göre (AR6 2021) su güvenliği; “bir nüfusun geçim kaynaklarını, insan refahını ve sosyo-ekonomik kalkınmayı sürdürmek, su kaynaklı kirliliğe ve suyla ilgili felaketlere karşı koruma sağlamak ve ekosistemleri barış ve siyasi istikrar ikliminde korumak için yeterli miktarda kabul edilebilir kalitede suya sürdürülebilir erişimi güvence altına alma kapasitesi” olarak tanımlanmaktadır. 2015’ten beri su krizi ilk beş riskten biri olarak listelenmektedir. Bu nedenle su iklime dayanıklı kalkınma için gereken çeşitli sistem geçişlerinde merkezi bir rol oynar. İklim değişikliğine uyum sağlamak ve etkilerini hafifletmek için merkezde su güvenliğinin olmasının dört nedeni vardır:

1. Dünya nüfusunun yaklaşık yarısı (8 milyar kişiden 4 milyarı) iklimsel ve iklim dışı faktörler nedeniyle yılın en azından bir kısmında şiddetli su kıtlığına maruz kalmaktadır. İklim değişikliğinin ek stres faktörüyle birlikte, küresel olarak daha büyük bir kesimin iklim değişikliği nedeniyle artan su kıtlığıyla karşı karşıya kalması öngörülmektedir.
2. İklim değişikliği doğrudan zaman ve mekân boyunca tatlı su bulunabilirliğini etkilerken, aşırı hava olaylarının suyla ilgili etkilerine karşı hassasiyet halihazırda tarım, enerji ve sanayi, sağlık ve sanitasyon, kent ve belediye, tatlı su ekosistemleri gibi tüm büyük sektörlerde hissedilmekte olup gelecekte yoğunlaşması öngörülmektedir.
3. 2014’ten beri kaydedilen tüm uyum tepkilerinin büyük çoğunluğu kuraklık, sel ve yağış değişkenliği gibi suyla ilgili tehlikelere uyum sağlamakla ilgilidir. Bu uyum önlemleri, sulama, su ve toprak neminin korunması, yağmur suyu hasadı, ürün ve çeşitlerde değişiklikler, iyileştirilmiş tarımsal uygulamalar gibi tepkiler yoluyla suyla ilgili tehlikelerin etkilerini azaltmayı amaçlamaktadır. Ancak olumlu sonuçlar ile iklim riskinin azaltılması arasındaki bağlantı belirsizdir ve değerlendirilmesi zor olmaya devam etmektedir.
4. Son olarak, küresel ısınmayı 1,5 °C ile sınırlamak çeşitli su kullanım sektörlerindeki risk artışını en aza indirecek ve adaptasyonu etkili tutacak olsa da, birçok azaltma önlemi potansiyel olarak gelecekteki su güvenliğini etkileyebilir.

Su ve Sürdürülebilirlik

Su, iklim krizinin birçok etkisinin enerji, tarım, sağlık ve ulaşım sektörlerine yönelik çeşitli riskler yoluyla toplum tarafından hissedildiği önemli bir ortamdır. SKA'nın 6. Eylemi, herkes için erişilebilir su ve atık su hizmetlerini ve sürdürülebilir su yönetimini güvence altına almak amacıyla oluşturulan "SKA-6: Temiz Su ve Sanitasyon" eylemidir (URL-3 2024). Tablo 2'de SKA'nın 6. Eylemine ait hedefler ve göstergeler yer almaktadır. Şekil 3'te ise bu hedefler kısaca özetlenmiştir.

Tablo 2. SKA-6: Temiz Su ve Sanitasyon Eylemi Hedefler ve Göstergeleri

SKA-6	Hedefler ve Alt Göstergeleri
6.1.	2030'a kadar herkesin güvenilir ve erişilebilir içme suyuna evrensel ve eşit biçimde erişiminin güvence altına alınması
6.1.1.	Güvenilir şekilde yönetilen içme suyu hizmetlerini kullanan nüfusun oranı
6.2.	2030'a kadar herkesin yeterli temizlik ve sıhhi koşullara eşit biçimde erişiminin sağlanması ve kadınların, kız çocuklarının ve kırılgan durumda olan kişilerin ihtiyaçlarına özel önem göstererek kamuya açık alanlarda dışkılamanın sona erdirilmesi
6.2.1.	Sabun ve su ile el yıkama imkanı dahil olmak üzere güvenilir şekilde yönetilen atıksu ve kanalizasyon hizmetlerini kullanan nüfusun oranı
6.3.	2030'a kadar kirliliği azaltarak, çöp boşaltmayı ortadan kaldırarak, zararlı kimyasalların ve maddelerin salımını en aza indirgeyerek, arıtılmamış atık su oranını yarıya indirerek ve geri dönüşümü ve güvenli tekrar kullanımı küresel olarak ciddi ölçüde artırarak su kalitesinin yükseltilmesi
6.3.1.	Güvenilir şekilde arıtılmış atıksu oranı
6.3.2.	İyi su kalitesi çevresine sahip su alanlarının oranı
6.4.	2030'a kadar bütün sektörlerde su kullanım etkinliğinin büyük ölçüde artırılması, su kıtlığı sorununu çözmek için sürdürülebilir tatlısu tedarikinin sağlanması ve su kıtlığından muzdarip insan sayısının önemli ölçüde azaltılması
6.4.1.	Zaman içinde su kullanım verimliliğindeki değişim
6.4.2.	Su stresinin düzeyi: kaynaklardan çekilen tatlı suyun mevcut tatlısu kaynaklarına oranı
6.5.	2030'a kadar uygun görüldüğünde sınır ötesi işbirliği yoluyla her düzeyde bütünleşik su kaynakları yönetimi uygulanması
6.5.1.	Entegre su kaynakları yönetimi uygulamasının derecesi (0-100)
6.5.2.	Su işbirliği için operasyonel bir düzenleme ile sınır ötesi havza alanının oranı
6.6.	2020'ye kadar dağları, ormanları, sulak alanları, nehirleri, akiferleri ve gölleri kapsayan su ekosistemlerinin korunması ve eski haline getirilmesi
6.6.1.	Suyla ilişkili ekosistemlerin kapsamının zaman içindeki değişimi
6.a.	2030'a kadar uluslararası işbirliğinin ve gelişmekte olan ülkelere su hasadı, tuzdan arındırma, su verimliliği, atık su arıtımı, geri dönüşüm ve tekrar kullanım teknolojileri gibi suyla ve sıhhi koşullarla ilgili faaliyetlerinde ve programlarında verilen kapasite geliştirme desteğinin artırılması
6.a.1.	Devlet koordinasyonundaki harcama planının bir parçası olan su ve atıksu hizmetleri ile ilgili resmi kalkınma yardımının miktarı
6.b.	Yerel halkların su ve sıhhi koşullar yönetiminin geliştirilmesine katılımlarının desteklenmesi ve güçlendirilmesi
6.b.1.	Su ve atıksu hizmetlerinin yönetilmesinde yerel toplulukların katılımı için kurulu ve operasyonel politika ve prosedürleri olan yerel yönetim birimlerinin oranı



Şekil 3. SKA-6: Temiz su ve sanitasyon eylemi hedefleri

BM İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) kapsamında Paris Anlaşması 2016 yılında yürürlüğe girmiştir. 2015-2030 yıllarını kapsayan Sendai Afet Riskini Azaltma Çerçevesi (Sendai Çerçevesi) 2015 yılında Japonya'nın Sendai kentinde organize edilen Üçüncü Birleşmiş Milletler Afet Riskini Azaltma Dünya Konferansı'nda kabul edilmiştir. Bu küresel anlaşmalar, kendi hedefleri olan ayrı çerçeveler olsa da, su konusunda örtüşen gündemleri bulunmaktadır ve bu gündem SKA'nın 2030 gündemi ile de kesişmektedir (Şekil 4). SKA'ların çoğu yeterli ve güvenli suya erişim olmadan karşılanamaz.



Şekil 4. 2015 yılında kabul edilen küresel taahhütler arasındaki suyun bağlayıcı rolü (UN Water 2019)

İklim değişikliğinin etkilerinin suyla derinden bağlantılı olduğu göz önüne alındığında (örneğin, seller, fırtınalar ve kuraklıklar), birçok azaltma ve uyum önlemi çok sayıda su bazlı müdahaleyi içerir. Bu, Sendai Çerçevesi'nin aşırı olaylar sırasında ve sonrasında hayat kurtarıcı temel hizmetler sağlamak için yeni ve mevcut su altyapısının afet dayanıklılığını iyileştirme hedefleriyle uyumludur. Ancak hala birçok ülkede, gözlemsel veriler ve iklim değişikliğinin hidrolojik döngüyü ve suya bağımlı hizmetleri uygun zamansal ve mekansal ölçeklerde nasıl etkileyeceği konusunda bilgi açığı bulunmaktadır. Başlıca gözlemsel ve veri açığı, iklim değişikliğinin su kalitesi, su ekosistemleri ve yeraltı suyu koşulları üzerindeki etkilerini içerir. İklim değişikliği azaltım çalışmaları için enerji ne ise, uyum için de su o derece öneme sahiptir. Yani temiz su kaynaklarının iklim krizinin getirdiğı değişiklikleri absorbe etmek ve bunlara uyum sağlamak için elzem olduğı anlamına gelir. Suyun iklim adaptasyonundaki merkeziliği son yıllarda giderek daha fazla kabul edilen bir gerçek halini almıştır. Bu nedenle SKA'nın 6. Temiz Su ve Sanitasyon eylemi ile 13. İklim Eylemi, 2030 ajandası için bir çok hedefi birlikte içermektedir. Bu amaçlar karar verici mekanizmalar için önceliklerin belirlenmesini sağlamaktadır. 2030 yılına kadar tüm insanlar için, tüm amaçlar için su ve sanitasyonun sağlanması, küresel toplumun gelecekte karşılaşılabileceğı çok sayıda ve çeşitli tehditlere karşı geleceğe hazır olmasına yardımcı olacaktır (UN Water 2019; UN Water 2021). 2030 yılına kadar tüm bireyler için güvenli ve ekonomik içme suyuna evrensel erişimin sağlanabilmesi için altyapı ve sanitasyon tesislerine yatırım yapılması, su ekosistemlerinin korunması ve yeniden iyileştirilmesi, hijyen eğitimi verilmesi, su kullanım verimliliğinin artırılması ve su stresinin azaltılması önemli adımlardan biridir. Suyu sürdürülebilir bir şekilde yönetmek, gıda ve enerji üretimini de daha iyi yönetmek anlamına gelir ve böylelikle su ekosistemleri, biyolojik çeşitliliği koruyabilir ve iklim değişikliği konusunda harekete geçebiliriz. Sürdürülebilir su yönetimi; sulak alanların korunması, yağmur suyu hasadı, akıllı tarım uygulamaları ve atıksuların arıtıldıktan sonra kullanılması gibi temel çözümleri içermektedir (URL-5 2024).

Su Stresi

Küresel olarak, su talebi 1960'lerden beri iki katına çıkmıştır ve halihazırda mevcut kaynaklardan daha fazladır. Nüfus artışı, tarım, hayvancılık, enerji üretimi ve imalat endüstrileri su talebini artırmaktadır. Dünyada kullanılan suyun yaklaşık %86'sı gıda yetiştirmek için kullanılmaktadır. Su stresi, su talebinin yenilenebilir tedarike oranını ölçer. Arz ve talep arasındaki fark ne kadar küçükse, bir yer su kıtlığına karşı o kadar savunmasızdır. Aşırı su stresiyle karşılaştıran bir ülke, mevcut su kaynaklarının en az %80'ini tüketmiş demektir. Küresel nüfusun dörtte birine ev sahipliği yapan 25 ülkenin her yıl ciddi su stresi yaşadığı ve dünya nüfusunun en az %50'sinin yılın bir ayı boyunca aşırı su stresi altında olduğı ifade

edilmektedir. Dünyadaki en büyük su sorunlarından biri su kıtlığıdır ve nüfus artışı, mevcut kaynakların kirlenmesi, iklim değişikliği, kentleşme ve değişen yaşam tarzları gibi çeşitli faktörler nedeniyle gelecekte birçok bölgede su kıtlığının artması beklenmektedir. Birçok bölgede su kaynakları tüm tarımsal, endüstriyel ve çevresel talepleri karşılamaya yeterli değildir. Şiddetli su kıtlığının dünyanın birçok bölgesinde yaygın olduğu göz önüne alındığında, dünyanın sınırlı yıllık tatlı su arzının yönetimini iyileştirmek yalnızca su kullanıcıları ve yöneticileri için değil, aynı zamanda nihai tüketiciler, işletmeler ve politika yapıcılar için de önemli bir zorluktur (Jefferies *et al.* 2012; Kuzma *et al.* 2023).

Su kaynaklarının coğrafi dağılımı, karşılık gelen nüfus yoğunlukları ve su kalitesinin dağılımı eşit değildir. Ülkelerin su durumunu göstermek için kullanılan en yaygın ölçütlerden biri “Falkenmark su stresi göstergesi”dir. Falkenmark’a (1989) göre, bir ülkedeki yenilenebilir tatlı su miktarı kişi başına yıllık 1.700 m³’ün altına düşerse, o ülke su sıkıntısı çeken bir ülke olarak kabul edilir. 1.000 m³’ün altındaysa, su kıtlığı yaşıyor ve 500 m³’ün altındaysa, kesin su kıtlığı yaşıyor anlamına gelir (Falkenmark *et al.* 1989). Şekil 5’te bu Falkenmark Gösterge sınıfları yer almaktadır (URL-10 2020).



Şekil 5. Falkenmark gösterge sınıfları

Ülkemiz uzun yıllar su zengini olarak sınıflandırılmasına rağmen, artan nüfus, su kirliliği, şehirleşme, sanayileşme, iklim değişikliği etkileri ve su kaynaklarının aşırı kullanımı nedeniyle su stresi yaşayan ülkeler kategorisine düşmüştür. Türkiye’nin yıllık kullanılabilir tatlı su miktarı 112 milyar m³ olup, 2023 yılı itibarıyla kişi başı yıllık kullanılabilir tatlı su miktarı 1.287 m³ olarak belirtilmektedir. Bu miktar, Falkenmark göstergesine göre 1.700 m³’ün altına düşerek (su stresi) göstermektedir. 1970’te Türkiye’nin kişi başı yıllık kullanılabilir tatlı su miktarı 3.145 m³, 2000’de ise 1.652 m³ idi. 2030 yılı itibarıyla Türkiye’nin su sıkıntısı çeken ülkeler arasında yer alması öngörülmektedir. 2050 yılına ait projeksiyonlar ise kişi başı yıllık kullanılabilir tatlı su miktarının 1.069 m³ olacağını göstermektedir. Şu anki durumda, ülkemizin yıllık kullanılabilir tatlı su miktarının %77’si tarımda, %23’ü ise içme ve kullanma suyu ile endüstriyel üretimde kullanılmaktadır. Küresel iklim değişikliği etkileri açısından yüksek risk taşıyan Akdeniz kuşağında yer alan ülkemiz, riskli ülkeler arasında kabul edilmekte ve önümüzdeki 100 yıl içinde su kaynaklarının yaklaşık %25 oranında azalması beklenmektedir. (SYGM 2024; URL-11 2024; URL-12 2024).

Su Kirliliği

Dünya çapında, tarımsal amaçlı temiz su kaynaklarının kullanım oranı yaklaşık %70'tir. Bunu %20'nin biraz altında sanayi ve %12 ile evsel veya belediye hizmetleri amaçlı kullanımlar takip etmektedir. Yeraltı suyu, sulama için kullanılan tüm suyun yaklaşık %25'ini ve evsel amaçlar için çekilen temiz su kaynaklarının yarısını oluşturmaktadır (URL-7 2024). DSÖ'nün 2023 yılında yayınladığı rapora göre; 2022'de, küresel nüfusun %73'ü (yaklaşık 6 milyar kişi) güvenli şekilde yönetilen içme suyu hizmeti kullanmıştır ancak hala küresel anlamda en az 1,7 milyar insan dışkıyla kirlenmiş bir içme suyu kaynağı kullanmaktadır. Güvenli ve yeterli su, yalnızca ishal gibi hastalıkları değil, aynı zamanda akut solunum yolu enfeksiyonları ve çok sayıda ihmal edilmiş hastalığı önlemek için önemlidir. Mikrobiyolojik olarak kirlenmiş içme suyu, ishal, kolera, dizanteri, tifo ve çocuk felci gibi hastalıkları bulaştırabilir ve her yıl yaklaşık 505.000 ishal kaynaklı ölüm meydana geldiği tahmin edilmektedir. Kentsel, endüstriyel ve tarımsal atıklar ile su kaynaklarının eksik yönetimi, yüz milyonlarca insanın içme suyunun tehlikeli şekilde kirlenmiş olmasına sebep olmaktadır (WHO 2023). Su kirliliğinin olası nedenleri arasında; kurşun gibi zararlı kimyasalların sızdığı eski su boruları, tehlikeli atık depolama alanları ve sanayi atıkları, tarım faaliyetlerinden kaynaklanan pestisitler ve gübreler, arsenik gibi doğal olarak bulunan tehlikeli kimyasallar ve kanalizasyon suyu deşarjları sayılabilir. (URL-6 2024).

Su kirleticileri noktasal kaynak veya noktasal olmayan kaynak olarak ikiye ayrılır. Noktasal kaynak kirliliği, endüstriyel tesislerden veya kanalizasyon sistemleri aracılığı ile belediye atıksu arıtma tesislerinden gelen kirliliktir. Noktasal olmayan kirlilik ise, tarım hayvancılık bölgeleri, inşaat alanları ve diğer arazi bozulmalarından kaynaklanan yüzey akış ile meydana gelir. Noktasal kaynaklardan gelen kirlilikler genellikle organik içeriği yüksek kirleticileri oluşturduğu için sucul ortamların oksijenini tüketebilir ve anaerobik koşullar yaratır. Ayrıca yine Askıda Katı Maddeler (AKM) de oksijen tükenmesine katkıda bulunurlar. Bu temel kirlilik parametreleri noktasal kaynaklar bir atıksu arıtma tesisi ile sonlanıyorsa etkin bir şekilde arıtılabilir ancak son yıllarda özellikle azot ve fosfor gibi besin maddeleri düşük arıtma verimleri nedeniyle sıklıkla yüzey sularına deşarj edilmektedirler. Bu maddeler ayrıca noktasal olmayan kaynaklardan sucul ortamlara ulaşan en temel kirleticiler olarak bilinmektedirler çünkü hızlandırılmış ötrofikasyona sebep olurlar. Bunlardan başka organik mikrokirleticiler, ağır metaller ve ısırl kirlilik de su kaynaklarını ve sucul ekosistemleri tehdit eden diğer önemli parametrelerdir. Arıtma tesisi olmadan doğrudan sucul ortamlara deşarj edilen pis sular kadar nüfus artışı ile verimsiz/yetersiz hale gelen arıtma tesisleri de su kaynaklarındaki kirliliklerin her geçen gün artmasına sebep olmaktadır (Pierce and Vesilind,

1998). Küresel olarak, su kirliliği nedeniyle memelilerin %24'  ve i  sulara bağlı kuşların %12'si tehdit altında kabul edilmektedir. Bazı bölgelerde, yerel tatlı su balık türlerinin %50'sinden fazlası ve dünyadaki amfibilerin yaklaşık üçte biri yok olma tehlikesiyle karşı karşıyadır. Su kirliliği nedeniyle tatlı su türleri, karasal türlere göre beş kat daha fazla bir yok olma oranıyla karşı karşıyadır. Gelişmekte olan ülkelerdeki endüstriyel atıkların %70'i arıtılmadan sucul ortamlara deşarj edilmektedir. Nitrat, dünyanın yeraltı suyu akiferlerindeki en yaygın kimyasal kirleticidir (URL-8 2010).

Türkiye'de su kaynaklarının yönetimi

Ülkemizde su yönetiminin geçmişi oldukça eskidir ve 1929 yılında Bayındırlık Bakanlığı'na bağlı olarak, günümüzdeki adıyla DSİ Genel Müdürlüğü kurulmuştur. 1950'li yıllarda, su yönetiminde genel yaklaşım, dünya genelinde olduğu gibi Türkiye'de de su kaynaklarını kullanmak ve geliştirmek yönünde olmuştur. (URL-13 2024). Ulusal mevzuat olarak ise 1983 yılında çıkarılan  evre Kanunu kapsamında 1988 yılında Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği kabul edilmesi ile su kirliliği ile mücadele etmek için yasal düzenlemeler yapılmıştır. Bugün Yönetmelik 25687 sayılı ve 31.12.2004 tarihli Resmi Gazete değişikliği ile halen yürürlüktedir ( şB 2004). 2004 yılında  lkemizin AB tam üyelik süreci müzakerelerinin başlamasıyla bazı uyum şartlarının sağlanması gereklidir. Bunlardan biri AB'nin 21.12.2009 tarihinde açılan  evre Faslı kapsamında yer alan su varlıkları konusunda yapılacak uyum çalışmalarıdır. Bu nedenle  lkemiz AB'nin 23.10.2000 tarihinde kabul ettiği "AB Su  er eve Direktifi'ne" (2000/60/EC) uyum doğrultusunda su ile ilgili mevcut mevzuatın söz konusu direktife uyumlu hale getirilmesi amacıyla çalışmalara başlamıştır. 2011 yılında "Nehir Havza Yönetim Planlarının (NHYP)" hazırlanması çalışmalarını başlatmıştır. 2011 yılında Su havzalarının Korunması ve planlanması Yönetmeliği ile uyum sağlanmıştır (Sınıraşan bölümlerinin aktarımı tam üyelik tarihinde). Ardından 2012 yılında nehir havza bölgelerinin tanımı ile 25 Nehir Havzası belirlenmiş, 2013 yılında Havza Koruma Eylem Planlarının (HKEP) NHYP'ye dönüştürülmesi çalışmaları başlatılmıştır. 2015 yılından sonra da NHYP uygulanmaya başlamıştır (Kınacı 2017). Tüm bu çalışmaları yürütmek maksadıyla 4 Temmuz 2011 tarihli ve 27984 sayılı Resmi Gazete ile Tarım ve Orman Bakanlığı'na bağlı olarak Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (SYGM) kurulmuştur. SYGM; Su yönetimindeki karmaşayı ortadan kaldırmak, AB Su  er eve Direktifi'ne uyum sağlamak amacıyla ulusal ve uluslararası düzeyde koordinasyon kurmak, su kaynaklarının havza bazında kalite ve miktar açısından değerlendirilmesinde koordinasyonu sağlamak için ulusal bir su kanunu hazırlamak ilkeleri doğrultusunda çalışmalar yürütülmektedir. SYGM'nin ülkemizde belirlediği 25 ana havza şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Türkiye’deki hidrolojik havzalar (SYGM 2024)

SYGM, bu havzalarda entegre su kayanları yönetim planı ile; Canlılar ve toplumun tüm kesimlerinin ihtiyaçlarını göz önünde bulundurarak, havza bazında su kaynaklarının verimli kullanımını sağlamak, korumak ve olumsuz etkilerini kontrol altına almak amacıyla gerçekleştirilecek koordinasyon, planlama, organizasyon, yatırım, izleme, izin verme, denetim ve yaptırım süreçleri yürütülmektedir. Ülkemizin teknik ve ekonomik olarak kullanılabilir yerüstü tatlı su miktarı 112 Milyar m³/yıl ve toplam yeraltısu kullanımını ise 15 milyar m³/yıl olup bunun; 40 milyar m³’ü (%74) tarımsal sulamada, 7 milyar m³’ü (%13) içme-kullanma amacıyla ve 7 milyar m³’ü (%13) de sanayide kullanılmaktadır (SYGM 2024). Suyun tüm paydaşlar arasında etkili, verimli ve sürdürülebilir kullanımını sağlamak için 4-8 Ekim 2021 tarihlerinde 1. Su Şurası gerçekleştirilmiştir. Şura’nın sonuç bildirgesinde su verimliliği vurgusu yapılmış; Belediyelerde içme suyu sistemlerinde %35 seviyesinde olan su kaybı oranının %25 seviyesinin altına indirilmesi gibi sürdürülebilir, etkin, verimli ve bütüncül strateji ve politikalar belirlenmiştir. Ayrıca Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında, kullanılmış suların uygun kaliteye getirilerek başta tarımsal sulama olmak üzere yeniden kullanımı sağlanacak, sektör ve havza bazında su ayak izinin belirlenmesi yaklaşımları benimsenmiştir. Ayrıca yine Şura sonuç bildirgesinde Tarımsal ve Kentsel Yağmur Suyu Hasadının ve Evsel Gri Su Kullanımının Yaygınlaştırılması hedefi kapsamında gri su kullanımının kent ölçeğinde yaygınlaştırılmasına vurgu yapılmıştır. Sonuç bildirgesinin bir diğer önemli hedefi ise Havza Yönetim Planlarına Entegre Edilmiş Su Ayak İzi Çalışmalarına Öncelik verilmesi olarak belirlenmiş ve havza ölçeğinde mavi, yeşil ve gri su ayak izi ve sanal su muhtevallarının hesaplanması, mevcut durumun sürdürülebilirliğinin belirlenmesi ve çözüm önerilerinin geliştirilmesi stratejileri vurgulanmıştır (URL-14 2021).

2012 tarih ve 28483 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan Yerüstü Su Kalite Yönetmeliği’ne göre EK-5 Yerüstü Su Kütlelerinde Bazı Parametreler İçin Çevresel Kalite

Standartları ve Kullanım Maksatları Tablo 2’de belirlenen Kıtaİçi Yerüstü Su Kaynaklarının Genel Kimyasal ve Fizikokimyasal Parametreler Açısından Sınıflarına Göre (Değişik:RG-16/6/2021-31513) Kalite Kriterleri Tablo 3’de gösterilmiştir. Bu parametreler özellikle atıksuların deşarjı için yapılan su ayakizi çalışmalarında maksimum konsntrasyonlar olarak dikkate alınmaktadır (URL-15 2012).

Tablo 3. Yerüstü Su Kalite Yönetmeliği EK-5 Tablo 2’ye Göre Kalite Kriterleri

Su Kalite Parametreleri	Su Kalite Sınıfları ^(a)		
	I (çok iyi)	II (iyi)	III (orta)
Renk (m ⁻¹)	RES 436 nm: ≤ 1,5 RES 525 nm: ≤ 1,2 RES 620 nm: ≤ 0,8	RES 436 nm: 3 RES 525 nm: 2,4 RES 620 nm: 1,7	RES 436 nm: > 4,3 RES 525 nm: > 3,7 RES 620 nm: 2,5
pH	6-9	6-9	6-9
İletkenlik (µS/cm)	< 400	1000	> 1000
Yağ ve Gres (mg/L)	< 0,2	0,3	> 0,3
Çözünmüş oksijen (mg/L)	> 8	6	< 6
Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) (mg/L)	< 25	50	> 50
Biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ ₅) (mg/L)	< 4	8	> 8
Amonyum azotu (mg NH ₄ ⁺ -N/L)	< 0,2	1	> 1
Nitrat azotu (mg NO ₃ ⁻ -N/L)	< 3	10	> 10
Toplam kjeldahl-azotu (mg N/L) ^(b)	< 0,5	1,5	> 1,5
Toplam azot (mg N/L) ^(c)	< 3,5	11,5	> 11,5
Orto fosfat fosforu (mg o-PO ₄ -P/L)	< 0,05	0,16	> 0,16
Toplam fosfor (mg P/L)	< 0,08	0,2	> 0,2
Florür (µg/L)	≤ 1000	1500	> 1500
Mangan (µg/L)	≤ 100	500	> 500
Selenyum (µg/L)	≤ 10	15	> 15
Sülfür (µg/L)	≤ 2	5	> 5

(a) Kalite sınıflarına göre suların kullanım maksatları:

I. Sınıf - Yüksek kaliteli su (I. sınıf su kalitesinde olması “Çok İyi” su durumunu ifade etmektedir.);

- 1) İçme suyu olma potansiyeli yüksek olan yerüstü suları,
- 2) Yüzme gibi vücut teması gerektirenler dâhil rekreasyonel maksatlar için kullanılabilir su,
- 3) Alabalık üretimi için kullanılabilir nitelikte su,
- 4) Hayvan üretimi ve çiftlik ihtiyacı için kullanılabilir nitelikte su,

II. Sınıf - Az kirlenmiş su (II. sınıf su kalitesinde olması “İyi” su durumunu ifade etmektedir.);

- 1) İçme suyu olma potansiyeli olan yerüstü suları,
- 2) Rekreasyonel maksatlar için kullanılabilir nitelikte su,
- 3) Alabalık dışında balık üretimi için kullanılabilir nitelikte su,
- 4) Mer’i mevzuat ile tespit edilmiş olan sulama suyu kalite kriterlerini sağlamak şartıyla sulama suyu,

III. Sınıf - Kirlenmiş su (III. sınıf su kalitesinde olması “Orta” su durumunu ifade etmektedir.);

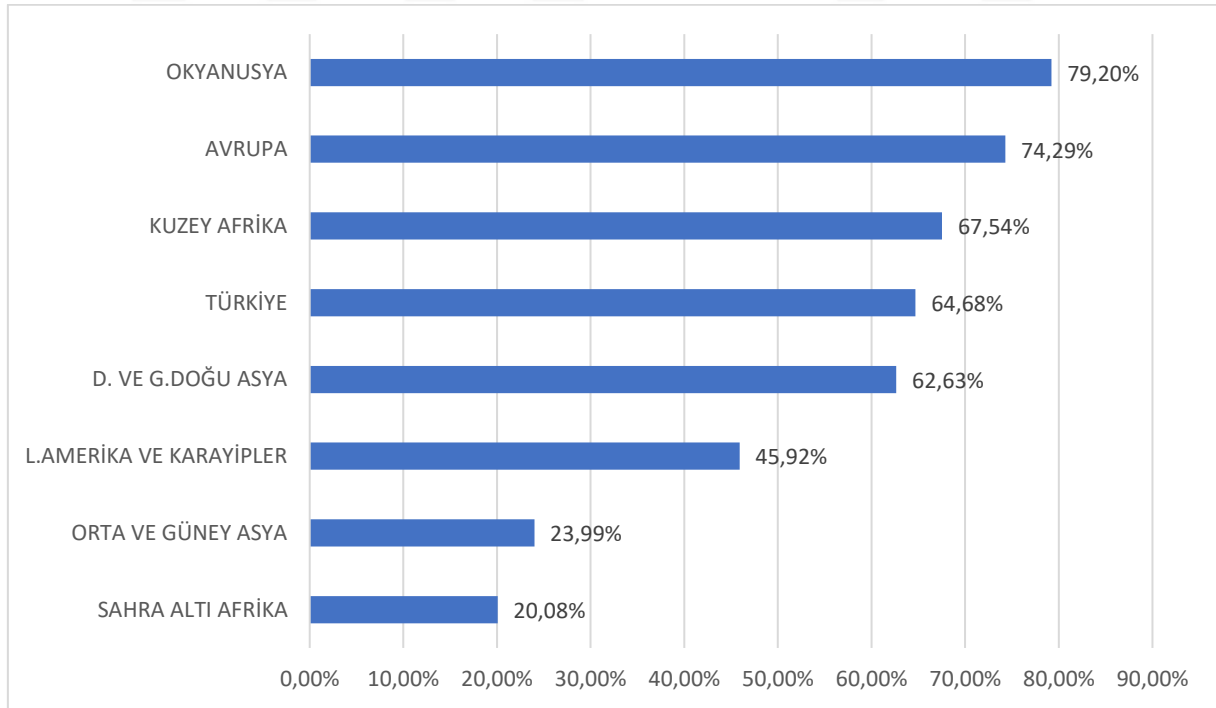
Gıda, tekstil gibi nitelikli su gerektiren tesisler hariç olmak üzere, uygun bir arıtmadan sonra su ürünleri yetiştiriciliği için kullanılabilir nitelikte su ve sanayi suyu, ifade etmektedir.

(b) TKN: NH₃-N + Organik Azot

(c) TN: TKN + NO₃-N + NO₂-N

Atıksu Arıtma Tesisleri

BM 2024 yılı raporlarına göre küresel olarak, 2022’de evsel atık suların %42’si güvenli bir şekilde arıtılmadan deşarj edilmiştir. Bu da tahmini olarak 113 milyar m³ evsel atık suyun yetersiz veya hiç arıtılmadan çevreye salınmasına yol açmıştır. Evsel atık suyun güvenli bir şekilde arıtılmayan kısmının %45’i, kanalizasyon bağlantıları veya septik tanklar gibi yeterli siyah su ve gri su toplama sistemlerinden yoksun hanelerden kaynaklanmaktadır. 2022 yılı için atıksu istatistiklerini bildiren; belirli bir düzeyde arıtım uygulanan toplam atık suyun oranı %76 olan ve dünya nüfusunun %73’ünü temsil eden 107 ülke arasında, yalnızca 42 ülke için “güvenli” yani en azından atıksuların arıtılmasında ikincil arıtım uygulayan ülke olduğu belirtilmektedir. Endüstriyel atıksular için verilen istatistikler daha da endişe vericidir. Endüstriyel atıksu arıtımı ile ilgili raporlama sınırlı ve veriler yalnızca küresel nüfusun %8’ini temsil eden 22 ülkeden gelmektedir. Bu ülkelerde ise endüstriyel atıksuların yalnızca %38’inin arıtıldığı ve yalnızca %27’sinin güvenli bir şekilde arıtıldığı belirtilmektedir (UN Water 2024). Şekil 6’da Dünya genelinde arıtılan atıksuların oranı bölgeler bazında gösterilmiştir. Dünya genelinde, güvenli bir şekilde arıtılmış evsel atıksu akışlarının oranı 2020’de %55,5’ten 2022’de %57,8’e yükselerek %2,29 oranında iyileştiği kaydedilmiştir (WHO 2024). Ülkemiz deküresel sıralama da %64,68 oranı ile atıksularını güvenle bertaraf ettiğini beyan eden ülkeler arasındadır.



Şekil 7. 2022 yılında dünya genelinde güvenli bir şekilde arıtılan evsel atıksu akışının bölgelere göre oranı (URL-9 2022)

Ülkemizde, TÜİK (2022) verilerine göre; belediyeler, sanayi kuruluşları ve maden işletmeleri dahil olmak üzere 2020 yılında su kaynaklarından toplam 18,2 milyar m³ su çekilirken, 2022 yılında bu rakam 19,2 milyar m³'e ulaşmıştır. 2022 yılında çekilen suyun %22,1'i yeraltı suyu, %21,1'i ise yüzey suyu olmak üzere, toplamda %43,2'si tatlı su kaynaklarından sağlanmıştır. Alıcı ortamlara doğrudan toplam 16,4 milyar m³ atıksu deşarj edilmiştir . Bunun %76,5'i denizlere, %19,5'i akarsulara, %1'i barajlara, %0,8'i foseptiklere, %0,7'si göl/göletlere, %0,2'si araziye, %1,4'ü ise diğer alıcı ortamlara deşarj edilmiştir. Soğutma suyu hariç deşarj edilen atıksuyun %79,3'ü arıtılmıştır (TÜİK 2022). 1992 yılında Rio'da düzenlenen Dünya Zirvesi'nin hazırlık konferanslarından Dublin Konferansı'nda benimsenen “Dublin İlkeleri”ne göre; hayatın, kalkınmanın ve çevrenin sürdürülebilirliğinde temel rol oynayan tatlı su kaynakları sonsuz ve bozulmaz değildir. Bu nedenle Dublin ilkeleri su yönetiminin, tüm paydaşların katılımıyla gerçekleştirilmesi gerektiğini ve suyun, tüm yararlı kullanımları ile ekonomik bir değere sahip olduğu belirtilmektedir (URL-16 2002). Bu nedenle su yönetimi konusunda sürdürülebilir bir yönetim politikası, sosyo-ekonomik, eşitlik, teknik ve kurumsal kavramların birarada tutulduğu bir yaklaşım olan "bütünleşik su kaynakları yönetimi" kavramı önceliklendirilmedi.

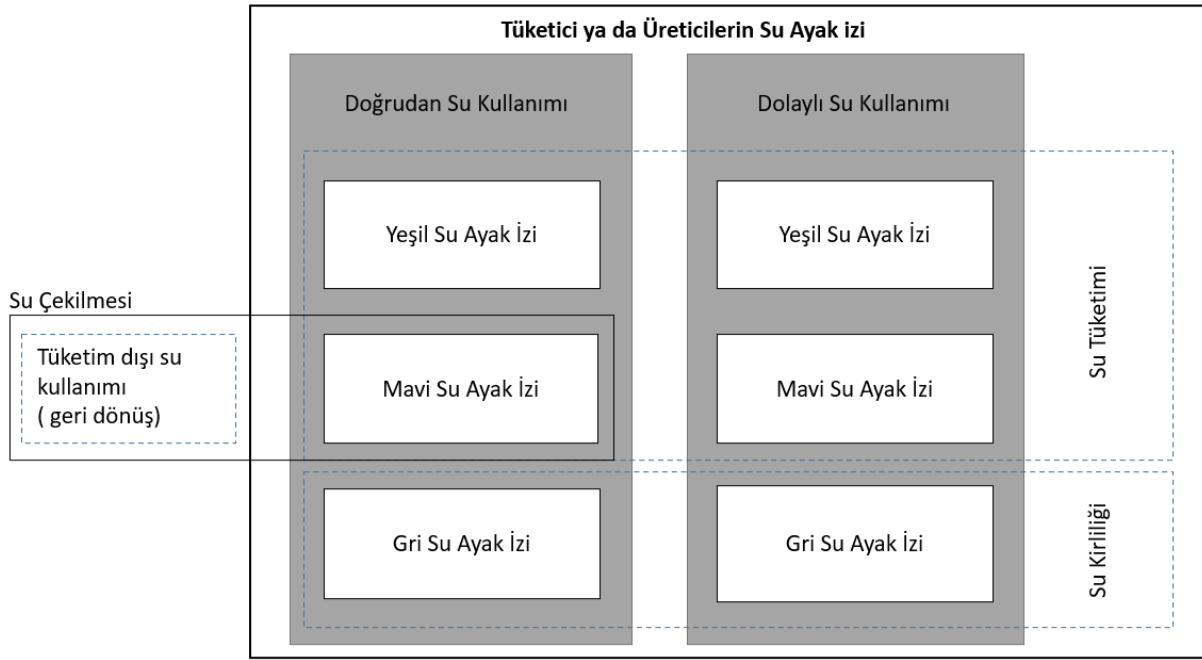
Su Ayak İzi Kavramı

Günlük yaşamımızda suyun önemini genellikle yeterince fark etmeyiz, ancak bir kişinin tükettiği su miktarı yalnızca içme ve kullanım suyuyla sınırlı değildir. Kullandığımız, giydiğimiz, yediğimiz, aldığımız ya da sattığımız her şeyin üretiminde su kaynakları kullanılır. Su ayak izi terimi, kullandığımız her ürün ve hizmeti üretmek için gerekli olan su miktarının bir ölçüsüdür. Ürün tedarik zinciri boyunca su kullanımını göz önünde bulundurma fikri, 2002 yılında Hoekstra tarafından “su ayak izi” kavramının ortaya atılmasıyla başlamıştır. Hoekstra (2003) tarafından tanımlanan ve daha sonra Hoekstra ve Chapagain (2008) tarafından geliştirilen “su ayak izi” kavramı, insan tüketimi ile dünyanın tatlı suyunun tahsisi arasındaki bağlantıyı analiz etmek için bir çerçeve sunmaktadır. Su ayak izi, yalnızca bir tüketicinin veya üreticinin doğrudan su kullanımına değil, aynı zamanda dolaylı su kullanımına da odaklanan tatlı su kullanımının bir göstergesidir. Bir ürünün su ayak izi, tüm tedarik zinciri boyunca ürünü üretmek için kullanılan tatlı su hacmidir. Çok boyutlu bir göstergedir ve kaynağa göre su tüketim hacimlerini ve kirlilik türüne göre kirli su hacimlerini gösterir ve tüm bileşenleri coğrafi ve zamansal olarak belirtilir (Hoekstra, 2003).

Mavi su ayak izi (BWF), bir ürünün tedarik zinciri boyunca yüzey ve yeraltı suyu gibi mavi su kaynaklarının tüketimini ifade eder. Bu tüketim, bir havzadaki mevcut yeraltı-yüzey su kütlesinden su kaybını ifade etmektedir. Bu kayıp; suyun buharlaşması, bir ürüne dahil

edilmesi veya başka bir havza alanına veya denize geri dönmesiyle gerçekleşir. Mavi su ayak izi, su akışının tüketim amaçlı kullanımını, yani, akış suyunun havzadan soyutlanmasını, geri akış şeklinde havzaya geri dönmediği sürece geçerlidir. Yeşil su ayak izi (GWP), toprakta toprak nemi olarak depolanan yağmur suyu gibi yeşil su kaynaklarının tüketimini ifade etmektedir. Yeşil su ayak izi, çoğunlukla bitki yetiştirmek veya ormanlar için kara yüzeyinden gelen buharlaşma akışının insan tarafından kullanımını ifade eder. Bir ürünün gri su ayak izi (GWP) ise, kirliliği ifade eder yani mevcut ortam suyunun, kirletici yükünü kalite standartlarına göre asimile etmek için gereken tatlı su hacmi olarak tanımlanır. Bir ülkenin su ayak izi, o ülkede insanlar tarafından tüketilen mal ve hizmetleri üretmek için kullanılan toplam tatlı su hacmi olarak tanımlanır (Mekonnen and Hoekstra, 2010).

Su ayak izinin bileşenlerinin şematik gösterimi Şekil’8 de yapılmıştır. Buna göre su çekimlerinin tüketim dışı kısmı (geri akış) su ayak izinin bir parçası değildir. Ayrıca, su çekimi ölçüsünün aksine, su ayak izinin yeşil ve gri suyu ve dolaylı su kullanım bileşenini içerdiğini gösterir (Hoekstra 2010).



Şekil 8. Su ayak izinin bileşenleri

Su ayak izi, bir tüketicinin veya üreticinin tatlı su sistemlerinin kullanımıyla nasıl ilişkili olduğuna dair daha iyi ve daha geniş bir bakış açısı sunar. Su tüketimi ve kirliliğinin hacimsel bir ölçüsüdür ancak su tüketimi ve kirliliğinin yerel çevresel etkisinin bir ölçüsü değildir. Belirli bir miktarda su tüketimi ve kirliliğinin çevresel etkisi, yerel su sisteminin kırılganlığına ve aynı sistemi kullanan su tüketicilerinin ve kirletici kaynakların sayısına bağlıdır. Su ayak izi hesapları, suyun çeşitli insani amaçlar için nasıl tahsis edildiğine dair zamansal ve mekânsal olarak bilgiler sunar. Sürdürülebilir ve eşitlikçi su kullanımı ve dağıtımı hakkındaki tartışmalara

açıklık getirir ve ayrıca çevresel, sosyal ve ekonomik etkilerin yerel olarak değerlendirilmesi için iyi bir temel oluşturur (Hoekstra *et al.* 2009; Hoekstra 2010).

Belirli bir ülkede tüketilen tüm mallar o ülkede üretilmediğinden, ulusal su ayak izi; yerel su kaynaklarının kullanımı ve ülke sınırları dışındaki suyun kullanımı olmak üzere iki bölümden oluşur. Su ayak izi, 1990’larda tanıtılan ekolojik ayak izi kavramına benzer şekilde geliştirilmiştir (Wackernagel and Rees, 1998). “Ekolojik ayak izi”, bir ülkenin yada bir kentin nüfusunun kullandığı kaynakları üretmek ve ürettiği atıkları özümsemek için gereken arazi ve su ekosistemlerinin alanını temsil eder. “Ekolojik ayak izi” kavramı insanların yaşamını sürdürmek için gereken alanı niceliksel olarak belirlerken, “su ayak izi” kavramı bir nüfusun yaşamını sürdürmek için gereken su miktarını ifade eder. Su ayak izi kavramı, bir emtia veya hizmet üretmek için gereken su hacmi olarak tanımlanan sanal su kavramıyla yakından bağlantılıdır. Özellikle gıda ihtalatıyla birlikte gerçekleşen, sanal su yerel su kaynakları üzerindeki baskıyı azaltmak için bir araç olarak kullanılarak alternatif bir su kaynağı haline gelmiştir. Bu nedenle sanal suya ayrıca “dışsal su” adı verilmektedir (Hoekstra and Chapagain, 2007). Bir nüfusun su ayak izini değerlendirirken, ülkeden çıkan ve ülkeye giren sanal su akışlarını ölçmek esastır. Su ayak izinin değerlendirilmesi için başlangıç noktası olarak yerel su kaynaklarının kullanımı alınır, ülkeden çıkan sanal su akışları çıkarılmalı ve ülkeye giren sanal su akışları eklenmelidir (Hoekstra 2010).

Su ayak izi değerlendirme çalışmaları ilk olarak çalışmanın amaç ve kapsamının belirlenmesi ile başlar. Su ayak izi çalışmaları aşağıdaki hedefler için yapılabilir:

- Bir işlem adımının su ayak izi
- Bir ürünün su ayak izi
- Bir tüketicinin su ayak izi
- Bir tüketici grubunun su ayak izi
 - Bir topluluktaki tüketicilerin su ayak izi
 - Bir belediye, il veya diğer idari birimdeki tüketicilerin su ayak izi
 - Bir su toplama alanı veya nehir havzasındaki tüketicilerin su ayak izi
- Coğrafi olarak belirlenmiş bir alandaki su ayak izi
 - Bir topluluktaki tüketicilerin su ayak izi
 - Bir belediye, il veya diğer idari birimdeki tüketicilerin su ayak izi
 - Bir su toplama alanı veya nehir havzasındaki tüketicilerin su ayak izi
- Bir işletmenin su ayak izi
- Bir iş sektörünün su ayak izi

- Bir bütün olarak insanlığın su ayak izi

Su ayak izi değerlendirme çalışmasının ilk aşamasının bir diğer önemli parametresi kapsam yani çalışma sınırlarını açık olarak (envanter sınırları) belirlemektir. Sistemin sınırlarını belirlerken aşağıdaki kontrol listesi kullanılabilir:

- Mavi, yeşil ve/veya gri su ayak izi mi hesaplanacak
- Tedarik zinciri boyunca geriye doğru giderken analiz nerede kesilecek
- Hangi düzeyde mekansal-zamansal yorum yapılacak
- Hangi veri dönemi kullanılacak
- Tüketiciler ve işletmeler için, doğrudan ve/veya dolaylı su ayak izi mi alınacak
- Belirli nüfuslar için, ülke içindeki su ayak izi ve/veya ulusal tüketimin su ayak izi mi; ulusal tüketimin iç ve/veya dış su ayak izi mi hesaplanacak

Su ayak izi değerlendirme çalışmasının ikinci aşaması su ayak izi muhasebe aşamasıdır. Ülkeler yılda, evsel, tarımsal ve endüstriyel amaçlar için yıllık yenilenme oranını geçemeyecek belirli bir hacimde suya ihtiyaç duyarlar. Bu nedenle belirli bir süre boyunca ne kadar tatlı suyun kullanılabilir olduğu ve bu süre boyunca insanların bu sudaki gerçek kullanımının belirlenmesi önemli noktadır. Su ayak izi muhasebesi, bu konulara bilgi sağlar. Su ayak izi temelde insanın tatlı su kullanımını hacim olarak ifade eder ve insanın su ayak izini gerçek tatlı su kullanılabilirliğiyle karşılaştırır bu da sürdürülebilir kullanımı için oldukça önemlidir. Su ayak izi değerlendirme çalışmasının üçüncü aşaması su ayak izi sürdürülebilirlik değerlendirmesi ve son aşaması ise su ayak izi yönetimidir. Özünde, su ayak izi sürdürülebilirlik değerlendirmesi, öncelikle insan su ayak izinin ekosistemin sürdürülebilir bir şekilde destekleyebileceği parametrelerle karşılaştırılmasıdır. Sürdürülebilirliğin çevresel, sosyal ve ekonomik olmak üzere farklı boyutları ve birincil ve ikincil etkiler olmak üzere etkileri vardır. Bir ürünün, üreticinin veya tüketicinin su ayak izinin sürdürülebilirliği kısmen çeşitli su ayak izi bileşenlerinin bulunduğu coğrafi bölgeye bağlıdır. Bu sorunlar, dikkate alınan coğrafi alandaki tüm faaliyetlerin, su kısıtlılığı ile kirliliğinin kümülatif etkisi olarak ortaya çıkar. Son aşamada ise hesaplanan su ayak izine nasıl bir tepki verileceği, nasıl bir politika çizileceği ve strateji önerileri geliştirilir. Yapılacak bir su ayak izi çalışmasında bu dört aşamanın hepsinin tamamlanması zorunlu değildir (Hoekstra *et al.* 2009; Hoekstra 2010; Çankaya 2019).

Mavi su ayak izi

Mavi su ayak izi, mavi suyun, yani tatlı yüzey veya yeraltı suyunun tüketim amaçlı kullanımının bir göstergesidir. Tüketim amaçlı su kullanımı terimi; buharlaşan su, ürüne dahil edilen su, başka bir su toplama alanına veya denize geri dönen su, farklı bir dönemde geri dönen

su durumlarını ifade eder. Genellikle tüketim amaçlı su kullanımına; su depolama (yapay su rezervuarları), taşıma (açık kanallar), işleme (geri toplanmayan suyun buharlaşması) ve toplama ve bertaraf (drenaj kanalları ve atık su arıtma tesisleri) sırasında buharlaşan su dahil olmak üzere tüm üretimle ilgili süreçlerdeki buharlaşma dahil edilir. Tüketim amaçlı su kullanımı suyun kaybolduğu anlamına gelmez, çünkü su döngü içinde kalacak ve her zaman bir yere geri dönecektir. Su yenilenebilir bir kaynaktır, ancak bu, kullanılabilirliğinin sınırsız olduğu anlamına gelmez. Mavi su ayak izi, belirli bir dönemde tüketilen başka bir deyişle aynı havza içinde hemen geri dönmeyen mevcut su miktarını ölçer. Mavi işlem suyu ayak izinin birimi, birim zaman başına (örneğin, gün, ay veya yıl) su hacmidir (Hoekstra *et al.* 2009). Bir işlem adımıdaki mavi su ayak izi Eşitlik (1)'e göre hesaplanır:

$$WF_{\text{mavi}} = \text{Buharlaşma} + \text{Katılım} + \text{Kayıp} [\text{hacim/zaman}] \quad (1)$$

Yeşil su ayak izi

Yeşil su ayak izi insanların yeşil suyu kullanımının bir göstergesidir. Yeşil su ayak izi, yeraltı suyunu boşaltmayan veya yenilenmeyen, ancak toprakta depolanan veya geçici olarak toprağın veya bitki örtüsünün üstünde kalan karasal yağışı ifade eder. Yeşil su, ürün büyümesi için üretken hale getirilebilir ancak tüm yeşil su ürünler tarafından alınamaz, çünkü topraktan her zaman buharlaşma olacaktır ve yılın tüm dönemleri veya alanları ürün büyümesi için uygun değildir. Yeşil su ayak izi, üretim süreci sırasında tüketilen yağmur suyu hacmidir. Bu, özellikle tarım ve ormancılık ürünlerini kapsar. Yeşil su ayak izi Eşitlik (2)'ye göre hesaplanır:

$$WF_{\text{yeşil}} = \text{Buharlaşma} + \text{Katılım} [\text{hacim/zaman}] \quad (2)$$

Gri su ayak izi

Tarihsel olarak, insanlar hem tatlı su kaynağı hem de atıklarını boşaltmak için bir akan yüzey sularını kullanmışlardır. Ancak su kütlelerinin, yararlanılacak sınırlı bir hacmi ve atıkları özümsemek için sınırlı bir kapasitesi vardır. Mavi su ayak izi, toplam akan akıştan etkili bir şekilde çıkarılan su hacmini gösterirken gri su ayak izi; uygun atık özümseme kapasitesini gösterir. Bu nedenle gri su ayak izi atıkları özümsemek için gereken su hacmi olarak tanımlanır ve kirleticileri seyreltmek için gereken su hacmi olarak ifade edilir. Böylece ortam suyunun kalitesi ulusal mevzuatta belirtilen su kalite standartlarının üzerinde kalır. Su kirliliğini, tahsis edilen su hacimleri açısından ölçmenin avantajı, farklı kirlilik biçimlerinin tek bir paydada, yani atık özümsemesi için tahsis edilen su hacminde bir araya getirilmesidir (Hoekstra *et al.* 2009; Hoekstra, 2011).

Su kaynaklarındaki kirliliğin hızlı artışı ile birlikte bu kaynaklardaki azot (N) ve fosfor (P) gibi kirletici parametreler öne çıkmaya başlamıştır. Tarım, kentsel kanalizasyon, yüzey

akışı, endüstriyel atık su ve fosil yakıtların yakılması ile atmosferik azot birikimi bu kirleticiler için en yaygın antropojenik kaynaklardır. Aslında biyolojik olarak parçalanabilen ancak kentsel atıksu arıtma tesislerindeki karbon odaklı arıtma yaklaşımları nedeniyle yeterince arıtılmayan bu N ve P'nin önemli bir kısmı yüzey sularına girmekte ve nehirler aracılığıyla kıyı denizlerine taşınmaktadır. Son elli yılda insan faaliyetleri küresel N ve P döngülerini değiştirmiş ve dünya çapında göllerin, nehirlerin ve kıyı bölgelerinin hızlandırılmış ötrofikasyonuna sebep olmuştur (Eren 2021). Ötrofikasyon hem su kalitesi hem de sucul ekosistem için önemli bir tehdit olup biyoçeşitliliği ve sucul ekosistemlerden sağlanan hizmetleri etkilemektedir. Ötrofikasyonun en yaygın olarak bilinen iki belirtisi Zararlı Alg Patlamaları (HAB) ve sucul ortamdaki hipoksik koşullardır. Su kirliliğinin derecesini ifade etmek için kullanılan gri su ayak izi (GWF), mevcut ortam suyu kalite standartlarına göre kirlenici yükünü asimile etmek için gereken tatlı su hacmi olarak tanımlanmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda farklı nehir havzalarında hesaplanan GWF ile Su Kirliliği Seviyesi (WPL) kullanılarak yararlı göstergeler elde edilmiştir. WPL değeri Eşitlik (3)'de (Liu *et al.* 2012);

$$WPL(km^3) = GWP/Q_{ger} \quad (3)$$

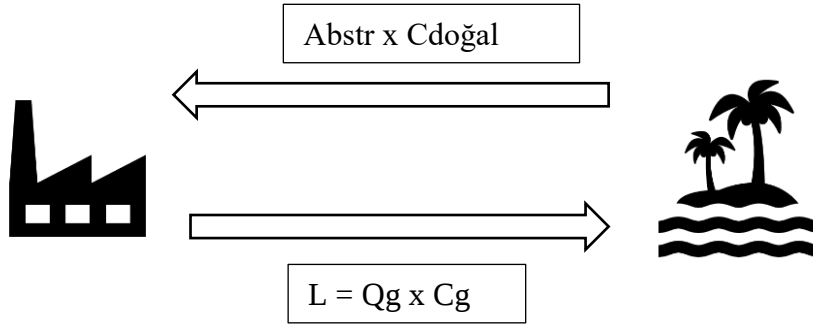
olarak hesaplanmaktadır. Burada Q_{ger} , gerçek havza deşarjını ($km^3/yıl$) göstermektedir. WPL'nin 1 olması kirlilik asimilasyon kapasitesinin tamamen tüketildiği anlamına gelirken; 1'den büyük değerler, su kütlelerinde ciddi kirlilik olduğunu gösterir. 1'den düşük WPL değerleri, kirleniciyi havza ölçeğinde kabul edilebilir maksimum seviyenin altına seyreletmek için yeterli sucul ortam olduğunu gösterir. Ancak, havzada yerel veya periyodik kirlilik sorunlarının olmadığını garanti etmez (Liu *et al.* 2012). GWP, su kirliliğini kirlenmiş bir hacim açısından ifade etmek için rahatlıkla kullanılabilir, böylece su tüketimiyle karşılaştırılabilir ve hacim olarak ifade edilir (Chapagain *et al.* 2006; Hoekstra and Chapagain, 2008).

Noktasal kirliliğin gri su ayak izi hesaplaması Eşitlik (4)'ye göre yapılmaktadır:

$$WF_{gri} = \frac{L}{C_{yasal} - C_{doğal}} = \frac{(Q_{giriş} \times C_{giriş}) - (Abstr \times C_{giriş})}{C_{yasal} - C_{doğal}} \quad (4)$$

Buna göre; L kirlenici yükünü [kütle/zaman], C_{yasal} (C_{max}) alıcı ortamda izin verilen en yüksek kirlenici konsantrasyonunu [kütle/hacim], $C_{doğal}$ ise kirleneticilerin deşarj öncesi alıcı ortamdaki doğal konsantrasyonunu [kütle/hacim] ifade eder. Eşitliğin sağ tarafında ise; $Q_{giriş}$ deşarj debisini [hacim/zaman], $C_{giriş}$ deşarj konsantrasyonunu [kütle/hacim], Abstr WF_{gri} hesaplamasına dahil edilmeyecek debiyi [hacim/zaman], $C_{giriş}$ prosese giriş suyu kirlenici konsantrasyonunu ifade eder [kütle/hacim]. Hesaplamalarda Abstr düzeltmesinin kullanılmasının sebebi prosese giren sudaki mevcut kirlenici yükünü prosesin WF_{gri} hesaplamasına dahil etmemektir (Şekil 9). Burada $C_{doğal}$ parametresinin alıcı ortamdaki

kirleticinin fiili konsantrasyonu değil, kirleticinin insani hiçbir faaliyet olmaksızın alıcı ortamda bulunabilecek doğal konsantrasyonu olduğuna dikkat edilmelidir. Örneğin insan eliyle üretilen kimyasallar doğada bulunamayacağından $C_{doğal}=0$ alınmalıdır.



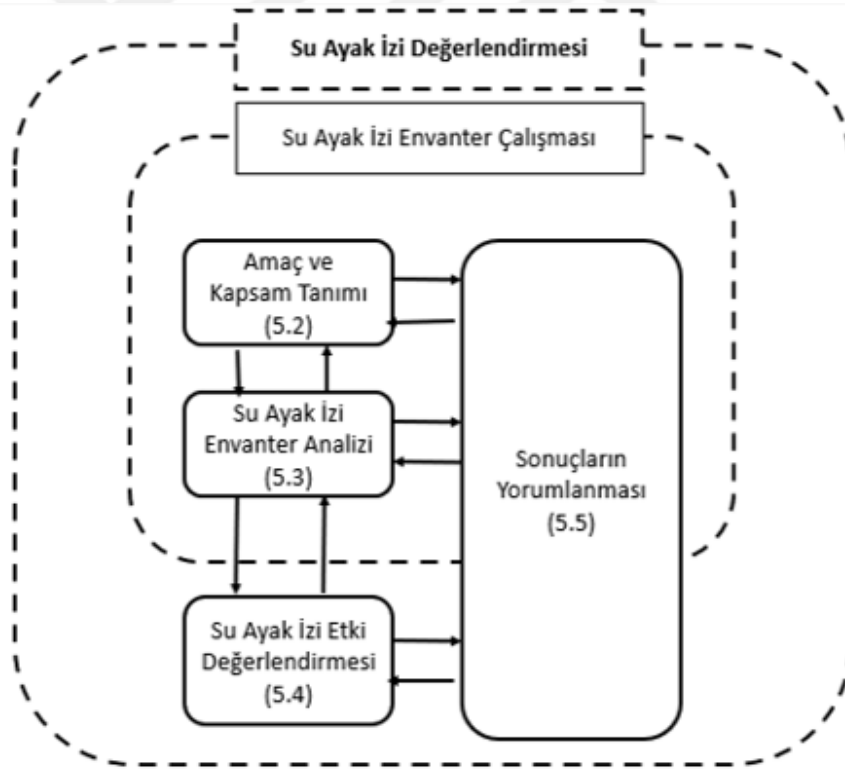
Şekil 9. Kirlilik yükünün Abstr düzeltmesi

Gri su ayak izi, deşarj edilen kirleticinin doğaya etkisinin izin verilen en yüksek kirletici konsantrasyonu ve doğal konsantrasyon arasındaki farkla nasıl telafi edilebileceğinin hacimsel ifadesidir. Örnek olarak doğanın Cyasal- $C_{doğal}=1$ mg/L seyreltme kapasitesi varken $C_{giriş}=2$ mg/L deşarj ediliyorsa bu deşarjın WFgri debisinin iki katı olacaktır. Bu örnekte izin verilen değer yani Cyasal=3 mg/L olabilir. Bu deşarj yasal limitin altında olsa da her birim hacim deşarj ancak 2 birimlik WFgri ile seyreltilecek ve alıcı ortam yasal sınırların altında bir kirletici konsantrasyonuna sahip olacaktır (Hoekstra *et al.* 2011; Çankaya 2019).

ISO 14046 su ayakizi standardı

Su yönetimi konusu, artan su talebi, birçok alanda artan su kıtlığı ve su kalitesinin bozulmasıyla sürdürülebilir kalkınma konusunun giderek daha merkezi bir parçası haline gelmiştir. Bu nedenle, uluslararası düzeyde tutarlı bir şekilde kullanılabilecek su ayak izi değerlendirmesi gibi uygun değerlendirme teknikleri geliştirilmiştir. Su ayak izlerinin değerlendirilmesi ve raporlanması için çeşitli metodolojiler mevcuttur ve bu metodolojiler suyla ilgili farklı yönleri vurgulamaktadır. Bu nedenle, su ayak izlerinin değerlendirilmesinde ve raporlanmasında tutarlılığın sağlanması gerekmektedir. İki farklı su ayak izi metodolojisi vardır. Bunlardan birincisi; Su Ayak İzi Ağı tarafından önerilen Su Ayak İzi Değerlendirmesi (WFA) (Hoekstra *et al.* 2011) ve diğeri ise Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) çalışmalarının suyla ilgili çevresel etkilerini de dahil eden uluslararası su ayak izi standardıdır (ISO 14046) (Boulay *et al.* 2013). LCA’de, gdoğrudan ri su ayak izi ölçülmez ancak bunun yerine, atık su deşarjıyla ilgili etki parametreleri (asitletme, ötrofikasyon veya toksisite potansiyeli gibi) dikkate alınır. Ancak su ayak izi hesaplamaları, hacimleri gösteren ve su kullanım türünü (mavi, yeşil ve gri) ve su kullanımının yerini ve zamanlamasını açıkça ortaya koyan çok boyutlu bir göstergedir (Çankaya 2023).

LCA değerlendirmesine dayalı olarak oluşturulan ISO 14046, bu uluslararası standarda uygun bir su ayak izi değerlendirmesi için yaşam döngüsü değerlendirmesi (ISO 14044'e göre) sunmaktadır. Bu standart modülerdir, yani farklı yaşam döngüsü aşamalarındaki su ayak izleri, toplam su ayak izini temsil etmek üzere birleştirilebilir. Ayrıca, su ile ilgili olası çevresel etkileri belirler, ilgili coğrafi ve zamansal boyutları kapsar, su kullanım miktarını ve su kalitesindeki değişiklikleri tespit eder ve hidrolojik verileri kullanır. ISO 14046; Kapsam, Terimler ve Tanımlar, İlkeler, Metodolojik Çerçeve, Raporlama ve Eleştirel İnceleme kısımlarından oluşmaktadır. Kapsamı ve referansı LCA standardı olan ISO 14046 standardı su ayak izi hesaplamasında kullanılan su türleri ve sınıflandırılmasını; tatlı su, acı su, deniz suyu, yeraltı suyu, fosil su (yenilenemeyen yeraltı suyu), su kütlesi, drenaj havzası, temel su akışı olarak yapmaktadır. Standarda göre bir su ayak izi değerlendirmesi, bir ürün, süreç veya organizasyonla ilişkili suyla ilgili olası çevresel etkileri ele alır ve yaşam döngüsü değerlendirmesinin dört aşamasını içerir: hedef ve kapsamın tanımı, su ayak izi envanter analizi, su ayak izi etki değerlendirmesi ve sonuçların yorumlanması. Bu aşamalar Şekil 10'da gösterilmiştir (ISO 2014).



Şekil 10. Su Ayak İzi değerlendirmesinin LCA yöntemine göre aşamaları

Su ayak izi hesaplama yöntemi mavi, yeşil ve gri olmak üzere üç hacimsel bileşene ayrılmakta, LCA temelli ISO 14044 ise etki merkezli su ayak izi yaklaşımı olup böyle bir ayırım bulunmamaktadır. LCA yönteminde su kullanımı kaynaklı çevresel tahribat ve yoksunluk

değerlendirilirken, Su ayak izi hesaplama yönteminde su, sınırlı bir küresel kaynak olarak değerlendirilmiş ve su üretkenliği esas alınarak bir yöntem oluşturulmuştur (Çankaya 2019).

Kentsel arıtma tesislerinin su ayak izi

Günümüzde, kentsel gelişim ve nüfus artışı özellikle tatlı su kaynaklarının kullanımı ile ilgili endişeler nedeniyle önemli ölçüde artmıştır. Bu durum, su kıtlığı ile birleştiğinde daha da kötüleşmektedir. Kentsel su döngüsü, içme ve kullanma amaçlı olarak doğal kaynaklardan su çekilmesini, gerekli kalite standartlarını karşılamak amacıyla suyun içme suyu arıtma tesislerinde arıtımını, dağıtımını, tüketimini ve son olarak atıksuyun kanalizasyon sistemleri aracılığıyla toplanmasını, taşınmasını ve atıksu arıtma tesislerinde arıtımını içerir. Kentsel su döngüsü içinde doğal ekosistemlere geri döndürülmeden önce su kalitesini iyileştirmek için atıksuyun arıtılması önemli bir role sahiptir. Geleneksel atıksu arıtımı, atık suyun kimyasallar ve enerji kullanılarak farklı proseslerle arıtılmış suya dönüştürüldüğü ve katı atıklar ve gaz emisyonları gibi yan ürünlerin üretildiği endüstriyel bir faaliyet olarak kabul edilir (Morera *et al.* 2016).

AAT'lerinde su ayak izinin hesaplandığı bir çalışmada günlük 4000 m³ su arıtan bir tesiste arıtmanın olmadığı, ikinci arıtmanın uygulandığı ve fosfor gideriminin aypıldığı üç farklı senaryo için su ayak izi hesaplanmıştır. Deşarj standartlarını karşılamak için sırasıyla ikincil arıtma ve kimyasal fosfor giderimi kullanıldığında su ayak izinde %51,5 ve %72,4 oranında bir azalma elde edilmiştir. Ayrıca arıtılmayan senaryoya kıyasla atıksuyun arıtılmamasının gri su ayak izinde büyük bir azalma meydana getirdiği, ancak mavi su ayak izinin küçük olduğu belirlenmiştir. Gri su ayak izi hesapları, yani nehirdeki doğal konsantrasyonlara ulaşınca kadar atık su arıtma tesisi çıkışını seyreltmek için gereken su hacmi ise, mevcut atık su arıtımında sırasıyla TN, TP ve TOC için 539.317 m³/ay, 3.448.115 m³/ay ve 261.779 m³/ay olarak hesaplanmıştır. Normla arıtım proseslerinde fosfor giderimi olmadığı için TP ait gri su ayak izi diğerleirnen büyük hesaplanmıştır (Morera *et al.* 2016).

Çankaya atıksu arıtma tesislerinin su geri kazanımının su ayakizi üzerindeki etkisini ölçmek için yaptığı çalışmada; su geri kazanım ünitesi eklenmeden önce 2,2 m³ ve su geri kazanım ünitesi eklendikten sonra 2,3 m³ olarak tesisin su ayak izini hesaplamıştır. Su geri kazanımının gri su ayak izinin azaltılmasına yönelik çevresel faydasını %44 olarak belirlemiştir. Ayrıca tesiste su geri kazanım yapılmazsa, AKM, BOİ₅, TN ve TP kirleticileriyle ilgili gri su ayak izlerinin sırasıyla %24, %120, %108 ve %22 daha yüksek olacağını bulmuştur. Su geri kazanım ünitesi, alıcı su kütlesine atık su deşarjını azalttığı için gri su ayak izi açısından önemli bir çevresel kazanç sağlandığını ortaya koymuştur (Çankaya 2023).

Erzurum Kentinin Su Kaynakları

1940'lara kadar Palandöken dağından gelen sular Erzurum'da ana içme suyu kaynağı idi. Ancak zamanla kent sınırlarının büyümeis ve nüfus artışı ile sağlanan bu içme suyu miktar olarak yetersiz kaldığından 1940 ile 2008 yılları arasında Erzurum Ovası'nda açılan 51 adet derin su kuyuları ile kentin içme suyu ihtiyacı karşılanmıştır. Ova'daki kentleşme ve tarım faaliyetleri nedeniyle kuyulardaki içme sularının miktar ve kalitesi yetersiz hale gelmeye başladığı için 2008 yılında Fırat alt havzasında yer alan Erzurum Palandöken Baraj Göleti ana içme suyu kaynağı olarak devreye alınmıştır. Baraj Göleti'nden temin edilen sular Erzurum İçme Suyu Arıtma Tesisi'nde arıtılarak kent halkının kullanımına sunulmaktadır. 1995 yılında DSİ 8. Bölge Müdürlüğü tarafından temeli atılan Palandöken Barajı'nda ilk su tutma çalışmaları 2005 yılı Kasım ayında su başlamıştır. ESKİ Genel Müdürlüğü tarafından ise 2002 yılında İçmesuyu İsale Hattı, Arıtma Tesisi, Ana Besleme Hatları ve Depo inşaatları ise ihale edilmiş ve 2008 yılında tamamlanarak işletmeye açılmıştır. Kentteki çeşitli bölgelerde yer alan çeşme suları ise şehrin çeşitli yerlerinden çıkan ve Palandöken Dağı Kaynak sularından beslenmektedir. Palandöken Barajının genel özellikleri Tablo 4 ve görüntüsü ise Şekil 11'de gösterilmektedir. Barajın 2022 yılı aktif doluluk oranı %72,26'dır (ESKİ 2024).

Tablo 4. Palandöken Barajının Genel Özellikleri

İçme Suyu hissesi, hm³	70,3
İnşaat başlangıç yılı	1995
Bitiş yılı	2005
Tünel Çapı, m	3,6
Tünel uzunluğu, m	4.880
Yıllık ortalama akım, hm ³ /yıl	128,7
İsale hattı uzunluğu, km	19,96
Göl hacmi (Max Su Seviyesi), hm ³	296
İsale hattı boru çapı, mm	1.500
Aktif hacim, hm ³ /yıl	115,3



Şekil 11. Erzurum ili ana su kaynağı olan Palandöken Barajı

Literatür Özeti

İraz (2021), Su, canlıların yaşamlarını sürdürebilmesi için son derece önemli bir kaynaktır. Son yüzyılda yaşanan nüfus artışları, iklim değişiklikleri, su kaynaklarının kirlenmesi ve su tüketimindeki artışlar, dolaylı olarak temiz su kaynaklarının korunmasını ve daha verimli kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir. Bu soruna çözüm bulmak amacıyla yakın zamanlarda ortaya çıkan su ayak izi (SA) kavramı, sürdürülebilir su yönetiminde önemli bir rol oynamaktadır. Su ayak izi, insanların tükettikleri ve yaşamlarını sürdürebilmeleri için gereken ihtiyaçların üretiminde kullanılan toplam tatlı su miktarını ifade eder. Bu çalışmanın amacı, Fırat havzasındaki 2008-2019 yıllarına ait su ayak izini kapsamlı bir şekilde hesaplamaktır. Çalışmada, uzun dönemli iklim verisi, evapotranspirasyon tahmini, kişi başı su kullanımı ve son 11 yılın ortalama yağış verileri kullanılmıştır. Bu çerçevede, Fırat havzasındaki bitkisel ve hayvansal üretim ile evsel ve endüstriyel su kullanımlarının mavi, yeşil ve gri su ayak izleri ilçe bazında hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda, Fırat havzasının toplam su ayak izi 28,01 milyar m³ olarak belirlenmiştir. Fırat havzasında su ayak izi oranı %90 ile en fazla tarımsal alanda görülmüştür. Tarımsal üretimin toplam su ayak izi 25,29 milyar m³, yeşil su ayak izi 6,33 milyar m³, mavi su ayak izi ise 15,89 milyar m³ ve gri su ayak izi 3,07 milyar m³ olarak hesaplanmıştır. Tarımsal üretimin mavi ve toplam su ayak izi en yüksek Akçakale ilçesinde, yeşil ve gri su ayak izi ise en yüksek Siverek ilçesinde olmuştur. Hayvansal üretimin toplam su ayak izi 2,51 milyar m³, evsel ve endüstriyel su ayak izi ise 0,51 milyar m³ olarak hesaplanmıştır. Yapılan bu çalışmaların, ülkemizdeki temiz su kaynaklarının sürdürülebilirliği, havza yönetimi ve planlaması konusunda örnek teşkil etmesi, özellikle tarımsal üretimde başarıyı artırmak ve su israfını önlemek açısından fayda sağlaması beklenmektedir. (İraz 2021).

Şahin (2018), Türkiye’de kullanılabilir toplam 112 km³ su hacmi bulunmaktadır. Bu miktarın 44 km³’ü tarımda, sanayide ve içme ile kullanma suyu olarak tüketilmektedir. İklim değişikliklerinden kaynaklanan su azalışının büyük kısmı tarım sektöründe kullanılmaktadır. Artan nüfusun gıda ihtiyacını karşılayabilmek için tarımsal sulama büyük bir öneme sahiptir ve bu ihtiyacın kesintiye uğramaması hayati bir gerekliliktir. Bu çalışmada, sürdürülebilir su yönetimi uygulamalarına rehberlik etmesi amacıyla Türkiye’deki toplam su kullanımının yaklaşık %74’ünü oluşturan tarım alanındaki su tüketimi, su ayak izi kavramı ile değerlendirilmiştir. Türkiye genelinde tarımsal üretimin %65’ini oluşturan 10 tarım ürününün sulama suyu ihtiyacı, Dünya, Türkiye ve Antalya ölçeklerinde karşılaştırılmış ve 6 ürünün sulama suyu tüketiminin dünya ortalamasının üzerinde olduğu belirlenmiştir. Antalya’da, tarımsal üretimin %91’ini oluşturan 20 tarım ürününün birim su ayak izi değerleri, Dünya, Türkiye ve Antalya ölçeklerinde kıyaslanmıştır. Seçilen tarım ürünlerinde sulama suyu ihtiyacının, Antalya’daki tüketim ortalamasının Türkiye genelinden yüksek olduğu tespit edilmiştir. Antalya’da, su ayak izi kavramı kullanılarak değerlendirilen bir diğer alan ise turizm olmuştur. Turizm sektöründeki su tüketiminin belirlenmesi amacıyla seçilen turizm tesislerinde, doğrudan ve dolaylı su tüketimi ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Dolaylı su tüketiminin hesaplanabilmesi için yiyecek, içecek ve elektrik kullanımına bağlı su ayak izi hesaplanmıştır. Seçilen bir 5 yıldızlı otelde, doğrudan ve dolaylı su tüketimi birleştirilerek yıllık ortalama su ayak izi 11.900 l/gece olarak hesaplanmıştır. Bu değer, uluslararası çalışmalarda bulunan su ayak izi değerlerinin üzerinde çıkmaktadır. (Şahin 2018).

Kutlu (2022), Ankara’nın evsel ve endüstriyel atık suları, Ankara Merkezi Atık Su Arıtma Tesisinde işlenmektedir. Atıksu, belirli aşamalardan geçirilerek deşarj kriterlerine uygun bir seviyeye getirildikten sonra Ankara Çayı’na deşarj edilmektedir. Ancak her geçen gün artan kirlenme seviyeleriyle, nehir su kalitesi açısından (sınıf IV) kötü bir durumda kalmaktadır. Bu çalışmada, Ankara için kentsel gri su ayak izi hesaplaması yapılmıştır. Ankara Tatlar Merkezi Atık Su Arıtma Tesisinin giriş ve çıkış verileri ile Ankara Çayı’ndan alınan debi verileri kullanılarak, Prof. Arjen Hoekstra’nın geliştirdiği gri su ayak izi formülüyle hesaplama yapılmıştır. Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) için hesaplanan gri su ayak izi 0,9 Mm³/gün, Toplam Azot (TN) için 2,5 Mm³/gün, toplam fosfor için 3,1 Mm³/gün ve amonyum için ise 10,7 Mm³/gün olarak belirlenmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda; KOİ parametresi arıtılıp deşarj edildiği için asimilasyon sınırını aşmazken, diğer parametreler (Toplam Azot, Toplam Fosfor ve Amonyum) asimilasyon sınırını aşmıştır. Bu durum, nehrin giderek daha fazla kirlenmesine ve zamanla bu yükü taşıyamaz hale geleceğine işaret etmektedir. Bu sebeple, arıtma tesisinde azot ve fosfor gideriminin yapılması büyük önem arz etmektedir. (Kutlu 2022).

Mohsin (2022), Su, canlı yaşamının sürdürülebilmesi için en önemli kaynaktır. Susuz bir yaşam mümkün değildir. Bu nedenle bilim insanları, suyun sürekliliğini sağlamak adına küresel ısınmayı önlemenin yollarını, yağışların azalmasına yol açan faktörleri ve nüfus artışı nedeniyle meydana gelen su israfının azaltılabilmesi için araştırmalar yapmaktadır. Hem üreticinin hem de tüketicinin kullandığı tatlı su kaynaklarının değerlendirilmesi için önerilen su ayak izi, suyun doğrudan ve dolaylı tüketimini hesaplar ve su kaynaklarının yönetilmesi konusunda büyük faydalar sağlar. Bu çalışmada, Türkiye'nin ekonomik olarak en gelişmiş ve nüfus bakımından da beşinci en büyük şehri olan Bursa'nın su ayak izi hesaplanmıştır. Bursa, 11.027 kilometrekarelik bir yüzey alanına sahiptir. Birçok medeniyete ev sahipliği yapmış olan bu kadim şehrin 2021 yılı toplam nüfusu 3 milyon 56 bin kişidir. Çalışmada, evsel, tarımsal ve endüstriyel su ayak izleri ayrı ayrı değerlendirilmiş, mavi ve yeşil su ayak izleri ayrıntılı bir şekilde hesaplanmıştır. Çalışmaların sonucunda, Bursa ilinin ortalama su ayak izi yılda 105,417 milyar m³ olarak bulunmuştur. İl genelinde su ayak izinin %77'si sanayi su ayak izi, %21'i evsel su ayak izi ve %2'si tarımsal su ayak izi olarak hesaplanmıştır. Bursa'nın kişi başına düşen ortalama su ayak izi ise yılda 7.220 m³ olarak belirlenmiştir. Sanayi sektöründeki toplam su ayak izi 80,952 milyar m³ olarak hesaplanmıştır. Bursa'nın endüstriyel gri su ayak izi miktarı ise 80,822 milyar m³ olarak bulunmuştur. Toplam evsel su ayak izi 22,0645 milyar m³ olarak hesaplanmıştır. Doğrudan ve dolaylı su ayak izleri, toplam evsel su ayak izinin sırasıyla %24'ünü ve %1'ini oluşturmaktadır. Bursa ilinde artan sanayileşme, konut sayısındaki artış ve hızla büyüyen nüfus nedeniyle tarım, evsel ve endüstriyel alanlarda mavi su kullanımının azaltılması, yeşil su kullanımı konusunda farkındalık yaratılması ve bilinçlendirme çalışmalarının yapılması büyük önem taşımaktadır. (Mohsin 2022).

Sütirmak (2020), Dünya üzerindeki su miktarı, canlıların yaşam kaynağı olarak yaklaşık 1,4 milyar 350 milyon km³ olarak hesaplanmaktadır. Bu suyun büyük bir kısmı, %97,4'ü okyanuslar ve denizler tarafından oluşturulmaktadır. Geriye kalan %2,4'lük kısmı ise göl ve nehirlerde bulunan tatlı sulardır. Tatlı suların %68'i buzullarda, %30'u ise yeraltı su kaynaklarında bulunmaktadır. Tatlı su kaynaklarının büyük çoğunluğunun kutuplarda ve yeraltında yer alması, doğrudan kullanılabilir su miktarının oldukça kısıtlı olmasına neden olmaktadır. Dünya nüfusunun %20'si, sağlıklı içme suyuna erişemediği için hastalıklar ve ölüm riskiyle karşı karşıyadır. Doğal su kaynaklarının büyük kısmı kirlenmiş olup, kullanılamaz hale gelmiştir; bir kısmı ise altyapı problemleri nedeniyle halk sağlığını tehdit etmektedir. Sürdürülebilir su yönetimi açısından su ayak izi önemli bir kavramdır. Su ayak izinin üç türü vardır: yeşil, mavi ve gri. Üretim sırasında yüzey ve yeraltı su kaynaklarından kullanılan su mavi su ayak izini, yağmur suyundan sağlanan su ise yeşil su ayak izini oluşturur. Gri su ayak izi, kirlenmeyle ilgili bir kavramdır. Bu çalışmanın amacı, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Avcılar kampüsü öğrencilerinin çevresel farkındalıklarını artırmaktır. Araştırmada, 2018-2019 eğitim döneminde öğrencilere bireysel su ayak izi anketi uygulanmış ve öğrencilerin su ayak izi profili çıkarılmıştır. Elde edilen verilere göre, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Avcılar Kampüsü öğrencilerinin yıllık ortalama kişi başı su ayak izi 1848,78 m³ olarak hesaplanmıştır. Bu değer, 2014 yılında Türkiye’de hesaplanan yıllık birey başına düşen su ayak izi miktarının olan 1519 m³’ün %21 üzerinde bulunmaktadır. Yıllık yeşil su ayak izi 1.329 m³, mavi su ayak izi 199 m³, gri su ayak izi ise 1.849 m³ olarak hesap edilmiştir. Anket sonuçları IBM SPSS ortamına aktarılmış ve değişkenler arasındaki anlamlı ilişkiler değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, beklenmedik şekilde değişmemiştir. Yaş ortalamalarının su ayak izini etkilemediği, ancak gelir düzeyinin artmasının genel su ayak izini artırdığı gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonunda, Türkiye'ye kıyasla çok daha yüksek çıkan su ayak izi değerleri nedeniyle acilen önlem alınması gerektiği vurgulanmaktadır. Öğrencilere su ayak izi konusunun anlatılması, bu konuda bilinçlendirilmeleri ve hayatlarında basit değişikliklerle su tasarrufu sağlayarak büyük etkiler yaratabilecekleri ifade edilmelidir. (Sütırmak 2020).

MATERYAL VE METOT

Erzurum İli Coğrafi Bilgileri

Erzurum İli, genellikle yüksek arazilerden oluşur. Platoların deniz seviyesinden yüksekliği 2000 m civarındayken, bu platoların üzerindeki dağların yüksekliği ise 3000 m'ye kadar çıkmaktadır. Karasu-Aras Dağları'nın bazı kısımları, Erzurum İli'nin güneyinde dağ kümelerinin oluşmasına yol açmıştır. Bu dağ kümelerinin en mühimleri, Erzurum şehir merkezinin (825 km²) güney kısımlarında bulunan Palandöken Dağı (B. Ejder 3176.1 metre) ile Pasinler çevresinin (540 km²) güney varolan Şahveled Dağlarıdır (Çakmak Dağı 3063 m). Bingöl Dağları'nın kuzeyi de Erzurum İl sınırlarında yer almaktadır.

Erzurum İli'nde kuzeyde yer alan dağlarsa Kuzey Anadolu Dağları'nın ikinci sırasındaki yükseltilerdir. Bu dağlar arasında en bilinenler, Erzurum ile İspir ilçesi ortasında yer alan Mescit Dağları'nın doğusunda bulunan 3168.9 metre yükseklikteki Kargapazarı veya diğer adıyla Dumlu Dağı ve bir bölümü Kars şehir sınırları içerisinde bulunan Allahuekber Dağları'dır. Bu dağlar arasında kuzeyde ve güneyde iki büyük depresyon ovası yer alır. Erzurum ilinin bulunduğu Erzurum Ovası ile Hasankale Ovası, 2030 metre yüksekliğindeki Deveboynu Beli tarafından birbirinden ayrılmaktadır. Erzurum Ovası'nın en düşük bölgesi yaklaşık 1850 metre, Hasankale Ovası da hemen hemen 1650 metre yüksekliğindedir. Her ikisi de ova özelliğindedir.

Erzurum ilinin büyük bir kısmında karasal iklim hakimdir. Kış mevsiminin uzun süreli ve oldukça sert geçtiği kent , yaz mevsimini kısa süreli ve sıcak bir şekilde yaşamaktadır. İklim sertliğini önemli ölçüde hafifleten bir neden de İlinin kuzey bölgelerindeki vadi içleri ve çukur sahalaradır. İlde 1929 yılından bu yana meteoroloji istasyonunda ölçüm yapılmaktadır. Yaklaşık 70 yıl süren gözlemler sonucunda, kentin en düşük sıcaklık ayı ortalama -8.6 ° C , en yüksek ayı ise ortalama 19.6 ° C olarak ölçülmüştür. -35 °C kentin en soğuk günü , 35 °C ise en sıcak gün olarak kaydedilmiştir. Yıl içerisinde yer yüzüne düşen yağış hacmi yaklaşık 453 mm civarındadır. Kış aylarında yağış genel olarak kar şeklinde gerçekleşir; kar yağışı ortalama 50 gün civarındadır ve karın yerde kaldığı gün sayısı 114 olarak belirlenmiştir. En fazla yağış, ilkbaharda ve yazları görülürken, en az yağış kış mevsiminde yaşanır.

Erzurum ilinin doğal bitki örtüsü büyük ölçüde step formasyonundan oluşmaktadır. Orman örtüsü ise sınırlıdır ve genellikle belirli alanlarda yoğunlaşır. Orman örtüsü 1900-2000 metreler seviyesinde başlarken , bitiş sınırı ise 2400 metreleri bulmaktadır. Kentin önde gelen

ormanlık alanları, kuzey kısımdaki ilçelerinde yoğun olarak bulunan sarıçam ve meşe ormanları ile batı sınırında bulunan meşe ormanlarıdır. İlin topraklarının yaklaşık %60'ını stepler oluşturur. Buradaki bitki örtüleri bazı bölgelerde keven topluluklarıyla yer değiştirmiş olsa da, geniş alanlarda verimli çayırliklar bulunur ve bu alanlar mera hayvancılığı için uygundur.

İlin bir bölümü Hazarakaçlama Havzasıda yer alırken, batı tarafı da Basra Körfezi Akaçlama Havzası'na, kuzey kesimi ise Karadeniz Akaçlama Havzası'na aittir. Batı kesimindeki sular Karasu Nehri'ne, kuzeyindeki sular ise Tortum çayı ve Oltu çayının birleşimiyle meydana gelen Çoruh Nehrine akar. Erzurum, bu üç ana havzanın kesişim noktasında yer alır ve bu nedenle su kaynakları oldukça boldur.

Erzurum ilinde doğal göller sayıca azdır, ancak yapay göller son yıllarda artmaktadır. İl sınırları içinde yer alan en kayda değer doğal göl, Tortum Çayı üzerinde meydana gelen heyelan ve sedimandan oluşan Tortum Gölü'dür ve 1997 yılında ilçe statüsü alan Uzundere ilçesinin yönetme sınırlarında yer almaktadır. Göl 8 km² lik bir alana sahip olup, kuzeybatıda bulunan Kemerli Dağı'ndan heyelan sebebiyle kaymış olan kütlelerin Tortum Çayı'nın güzergahını tıkamasıyla vücut bulmuştur. Bunun sonucunda çay yatağı değişmiş ve 48 metre yüksekliğindeki Tortum Şelalesi meydana gelmiştir.

1963 senesinde çalıştırılmaya başlanan Tortum hidroelektrik santrali de bu Göl sularından faydalanılarak faaliyetine devam etmektedir. Artakalan suyun önü açılarak Tortum Şelalesi oluşturulur. Serçeme Deresi üzerinde bulunan Kuzgun Barajı (10.3 km²), Lezgi Deresi üzerinde bulunan Palandöken Gölü (22 km²) ve Aras Nehrinin devamındaki Söylemez Barajı (14.2 km²) başlıca yapay göller arasında sayılmaktadır.

Çalışma Sahası: Erzurum Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi (BAAT)

Erzurum BAAT Merkeze bağlı Aziziye ilçesinin Kuşçu Köyünde Ferah mahallesine sınır ve Karasu nehri ile Pulur çayı kuzey kısmında bulunur. Şekil 12'de tesisin üst görünüşü gösterilmektedir. Şehrin merkez bölgesinde biriken atıksular, tahmini 15 km uzunluğunda ve 1200 mm çapında kanallar yardımıyla taşınarak, 2400 mm çapta ve 300 m uzunluğunda betonarme borular aracılığıyla BAAT 'a iletilmektedir. Erzurum BAAT, Biyolojik Proses Havuzları, maksimum 130.000 m³/gün debiye ve aşağıda belirtilen kirlilik yüklerine göre tasarlanmıştır. Tesisin 1. kademede 444.934 kişilik evsel nüfus ve 56.700 kişiye hizmet verecek endüstriyel nüfusa göre; 2. kademe ise 528.595 kişilik evsel ve 58.733 kişi endüstriyel nüfus hesap edilerek dizayn edilmiştir. Aktif çamur prosesi karbon ve azot gierim esasına dayanmaktadır. Tesisin girişinde öncelikle 8 cm 'lik kepçe tipli giriş kaba ızgara sonrasında 2 cm 'lik mekanik temizleme özellikli kaba ızgaradan geçirek atıksudaki kaba katı maddeler

tutulmaktadır. Atıksu, yaklaşık 6,8 m terfi pompalarıyla yükselterek cazibeli ile akımı sağlar ve 6 mm aralıklı mekanik temizlemeli ince ızgaradan geçirilir. Burdan sonra atıksu iki bölmeli havalandırmalı kum-yağ tutucuya gönderilir ve inorganik maddeler hava yardımıyla dibe çöktürülerek, yağ, köpük vb. yüzer maddeler de atıksu yüzeyinden ayrılır. Atıksu, öncelikle çöktürme havuzlarına yönlendirilir ve debi miktarına bağlı olarak bu kısımda dinlendirilip savaklanarak ara terfi merkezi kısmına iletilir. Ardından, havalandırma tanklarına aktarılır. Havalandırma havuzlarında nitrifikasyon-denitrifikasyon proseslerinin gerçekleştirilmesiyle, atıksudaki azot, karbon, fosfor ve diğer organik maddeler birlikte arıtılır. Havalandırma havuzundan çıkan atıksu son çöktürme ünitesine iletilir ve savaklanarak Karasuya deşarjı sağlanır. Fazla çamursa çamur pompası vasıtasıyla Çamur Binasına gönderilir. Tesiste arıtılarak deşarj edilen günlük ortalama atıksu miktarı $3650 \text{ m}^3/\text{h}$ olarak belirtilmektedir. (ESKİ 2024, EK-1).



Şekil 12. Erzurum BAAT görüntüsü (Google Earth 2022)

Erzurum İleri Biyolojik Arıtma Tesis, atıksu arıtma süreçlerinde gelişmiş bir teknoloji kullanarak, aerobik tanklarda biyolojik arıtmanın yanı sıra, azot, fosfor ve diğer kirleticilerin daha etkin bir şekilde giderilmesini sağlamak amacıyla tasarlanmış bir tesis olarak öne çıkmaktadır. Havalandırma havuzlarında nitrifikasyon ve denitrifikasyon süreçlerinin uygulanması sayesinde, atıksudaki azot, karbon, fosfor ve diğer kirleticiler etkin bir şekilde arıtılmaktadır. Bu süreçler, atıksuyun biyolojik arıtma ile temizlenmesini sağlarken, aynı zamanda çevreye verilen zararı minimize etmek için önemli bir rol oynamaktadır.

Havalandırma çıkışı sonrasında, su son çöktürme tankına iletilmekte ve burada suyun temizlenmesi tamamlanmaktadır. Son çöktürme havuzlarından çıkan su, Türkiye'deki "Su Kirliliği ve Kontrolü Yönetmeliği"ne uygun olarak, belirlenen kriterler doğrultusunda Karasu

Nehri'ne deşarj edilmektedir. Bu yönetmelik, yeraltı ve yüzey su kaynaklarının korunması ve su kirliliğinin önlenmesi için gerekli teknik ve yasal düzenlemeleri içermektedir.

Tesisin bir diğer önemli özelliği de çamurun işlenmesidir. Katı madde içeriği yoğunlaştırma tanklarında arttırılan çamur, anaerobik çürütücülerde biyogaz üretimi amacıyla işlenmektedir. Bu biyogaz, tesisteki kombine ısı-güç sistemiyle ısı ve elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Bu süreç, enerjinin geri kazanılmasına katkı sağlarken, aynı zamanda atık çamurun çevre dostu bir şekilde bertaraf edilmesine olanak tanır.

Erzurum İleri Biyolojik Arıtma Tesisi, su kirliliğini önlemeye yönelik gelişmiş biyolojik arıtma yöntemleri ve sürdürülebilir enerji üretimi sağlamak amacıyla önemli bir örnek teşkil etmektedir.

Erzurum BAAT 2025 kapasitesi ort. kuru havanın min. Debi miktarı 1658 m³/h , max. yağışlı hava miktarı 5434 m³/h ve kuru havanın maks. Gün olarak ortalaması 2602 m³/h olarak ; 2040 yılına ait planlamalarsa ort. Min. kuru hava 2210 m³/h, maks. yağışlı hava miktarı 7265 m³/h ve maks. günlük ortalama kuru hava miktarı 3468 m³/h olarak tasarlanmıştır.

Tablo 5. Erzurum BAAT Giriş Suyu Dizayn Parametreleri

Parametreler	Dizayn Değerleri (mg/L)	Deşarj Standardı (SKKY)
KOİ	631	90
BOİ ₅	321	25
AKM	343	35
TN	54	10
TP	13	-
pH	6-9,5	6-9,5

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Araştırma Bulguları

Bu tez çalışması kapsamında genel olarak su ayak izi çalışmaları için önerilen Hoekstra (2003) tarafından geliştirilen WFN yöntemi kullanılarak Erzurum BAAT'ne ait gri su ayak izi (WFgri) hesabı yapılacaktır. Çalışma sınırları sadece Erzurum BAAT ve alıcı ortamı kapsamaktadır. Çalışma kapsamına alınan parametrelerin mevzuatta belirlenen sınır değerlerine Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğinden alınmıştır (SKKY, 2004). Bu sınır değerler bu çalışmada Cyasal olarak tanımlanmıştır. AAT atık suları arıtmakta ve doğaya yüksek konsantrasyonlarla kirlilik desarjını önlemektedir. Tesisin WFgri değeri hesaplanırken iki faktör dikkate alınacaktır. Bunlardan ilki, AAT'nin kirlitici giderim verimliliğinin göstergesi olan WFgri,toplam'dır. WFgri,toplam göstergesi, atık suyun hiç arıtma olmaksızın deşarj edilmesi halinde yasal deşarj sınırına (Cyasal) seyreltilebilmesi için gerekli tatlı su hacmini tanımlamaktadır. AAT'leri proseslerinde çeşitli girdiler kullanarak suyu arıtan endüstriyel tesislerdir. Bu proseslerin bazılarında WFmavi ve bazılarında ise WFgri doğrudan veya dolaylı olarak bulunmaktadır. Bunların toplamı AAT'lerinin birim atık suyu arıtmak için oluşturduğu WF miktarıdır. İkinci faktör ise WFgri,etki'dir ve AAT'nin birim atık suyu arıtmak için oluşturduğu gri su ayak izini tanımlayan bir göstergedir. Eşitlik (4)'te gri su ayak izi hesabında kullanılacak denklem verilmiştir. Ancak bu bölümde Eşitlik (4)'te tanımlanan Abstr ifadesi yani ham su düzeltmesi yapılmış kirlitici yükü yani yerine (Qgiriş-Cgiriş) kullanılacaktır.

Havzadan alınan suyun başka bir havzaya aktarılması halinde Cdoğal=0 olarak kabul edileceğinden Eşitlik (5)'teki Abstr x Cdoğal hesaplamalara dahil edilmemiştir (Çankaya 2019)

$$WF_{gri} = \frac{L}{C_{yasal} - C_{doğal}} = \frac{(Q \times C_{giriş})}{C_{yasal} - C_{doğal}} \quad (5)$$

Bu konsantrasyonlar bir çizelge üzerinde Şekil 13' de gösterildiği gibidir.



Şekil 13. Gri su ayak izi hesabında kullanılan konsantrasyon parametreleri ve WFgri,toplam

AAT genelde emniyetli sınırdan çalışabilmek için yasal sınırların altında kirletici deşarj konsantrasyonu veya kütleli debiler ile işletilirler. Bu nedenle WFgri,operasyonel tanımı yapılmıştır. Gri su ayak izi ise Eşitlik (6)'daki gibi bu iki kısmın toplanması ile belirlenir.

$$WF_{gri,giderim} = WF_{gri,zorunlu} + WF_{gri,operasyonel} \quad (6)$$

Dolayısı ile Eşitlik (4) ile tanımlanan gri su ayak izi denklemi Eşitlik (7) ve (8) kullanılarak detaylandırılır ve hesaplanır.

$$WF_{gri,giderim} = \frac{Q \times (C_{giriş} - C_{çıkış})}{C_{yasal} - C_{doğal}} \quad (7)$$

$$WF_{gri,operasyonel} = \frac{Q \times (C_{yasal} - C_{çıkış})}{C_{yasal} - C_{doğal}} \quad (8)$$

Erzurum BAAT'nin zorunlu olarak Çıkış değerinin Cyasal sınırına indirmesi gerektiği için bu tez çalışmasında WFgri,zorunlu göstergesi önerilmiştir. Dolayısı ile Eşitlik (7) ve (8)'nin Eşitlik (6)'da yerine koyulması ile Eşitlik (9) elde edilir:

$$WF_{gri,operasyonel} = Q \frac{C_{giriş} - C_{yasal}}{C_{yasal} - C_{doğal}} \quad (9)$$

WFgri hesaplamasında Qgiriş=Qçıkış kabul edilerek Qgiriş değeri kullanılmıştır.

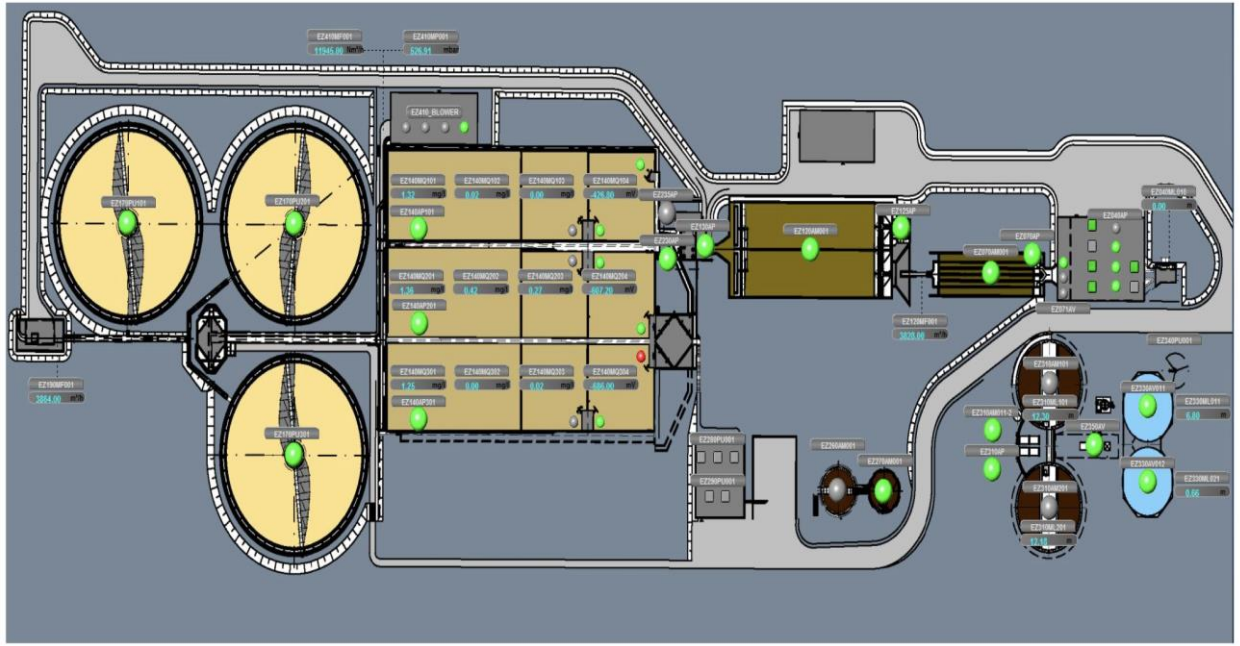
Toplam su ayak izi ise (WFgri,toplam) WFgri,giderim ve bakiye (WFgri,bakiye) kalan su ayak izinin toplamından meydana gelmektedir. Çünkü AAT'nin etki alanı dışında bakiye kalan kirletici konsantrasyonu bulunmaktadır. Bu gösterge de doğal ve proses kaynaklı bakiye konsantrasyon olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Abstr olarak ifade edilen ham sudaki kirletici konsantrasyonu ihmal edildiği için bu kısım ihmal edilir ancak proses kaynaklı bakiye konsantrasyon AAT'nin deşarj kirletici konsantrasyonunun Cdoğal sınırlar üzerindeki ayak izinin göstergesidir (Eşitlik 10).

$$WF_{gri,bakiye} = WF_{gri,bakiye,doğal} + WF_{gri,bakiye,proses} \quad (10)$$

Buradan da WFgri,bakiye,doğal ihmal edildiği için; WFgri,bakiye ayak izi eşitlik (11)'e göre hesaplanmıştır.

$$WF_{gri,bakiye} = \frac{(Q \times C_{çıkış})}{C_{yasal} - C_{doğal}} \quad (11)$$

Erzurum BAAT'nde yer alan arıtım prosesleri Şekil 14'te gösterilmiştir (Eren ve Kaya, 2020). Ayrıca tesisten temin edilen 2023 yılı giriş ve çıkış atıksu numunelerine ait aylık ortalama parametreler sırasıyla Tablo 6 ve Tablo 7 'de gösterilmiştir.



Şekil 14. Erzurum BAAT proses akış şeması

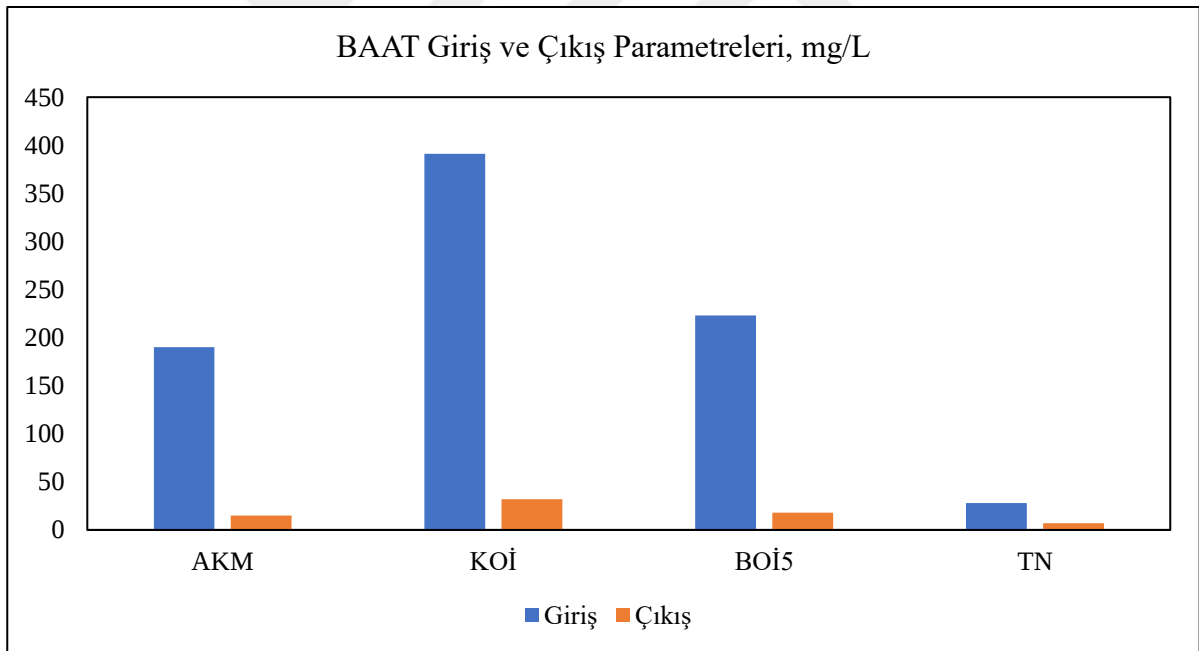
Tablo 6 ve Tablo 7’de verilen giriş ve çıkış kirlilik parametreleri arasındaki fark ise Şekil 15’te gösterilmiştir. Şekil 15’e göre tesiste tüm parametreler %90’ın üzerinde arıtım verimine sahiptir. TN ise %70’in üzerinde arıtılmaktadır.

Tablo 6. Tesis Giriş Atıksuyu Aylık ve Yıllık Ortalama Parametreler

	Debi	Sıcaklık, °C	pH	İletkenlik	AKM	KOİ	BOİ ₅	TN
	m ³ /gün	Dış ortam	Atıksu	µs/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Ocak	70.848	-11	11	8	821	152	366	31
Şubat	75.300	-8	11	8	826	168	348	177
Mart	75.290	-3	11	8	843	175	321	154
Nisan	80.893	9	13	8	767	162	368	203
Mayıs	65.368	33	16	7	814	199	476	286
Haziran	65.787	7	18	7	833	187	485	280
Temmuz	71.368	11	20	8	826	216	417	252
Ağustos	74.287	21	20	8	783	190	361	197
Eylül	79.343	16	19	8	797	225	398	246
Ekim	92.584	6	17	8	809	205	369	210
Kasım	86.213	1	13	8	848	208	393	217
Aralık	84.997	-9	11	8	882	196	392	227
Ortalama	76.857	6	15	8	821	190	391	223

Tablo 7. Tesis Çıkış Atıksuyu Aylık ve Yıllık Ortalama Parametreler

	Debi	Sıcaklık	pH	İletkenlik	AKM	KOİ	BOİ ₅	TN
	m ³ /gün	°C		µs/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Ocak	66558	11	8	694	16	34		7
Şubat	72000	11	8	703	17	31	18	9
Mart	72323	11	8	729	17	32	19	7
Nisan	75620	13	8	655	14	30	17	5
Mayıs	63813	16	8	690	14	29	17	4
Haziran	64750	19	8	723	13	31	18	5
Temmuz	70148	21	8	717	14	30	17	8
Ağustos	72984	21	8	681	15	33	19	8
Eylül	78000	20	8	664	16	32	18	9
Ekim	89416	18	8	683	19	37	21	8
Kasım	83877	15	8	694	15	31	18	6
Aralık	80906	13	8	742	16	34	20	6
Ort.	74200	16	8	698	15	32	18	7

**Şekil 15.** BAAT giriş ve çıkış parametreleri

Erzurum BAAT; SKKY (2004)'nde yer alan Tablo 21. Evsel Nitelikli Atık Suların Alıcı Ortama Deşarj Standartları (Tablo 21.4) göre nüfusu 100.000'den büyük olan ve ham kirlilik yükü BOİ cinsinden 6.000 kg/gün'den fazla olan tesisler sınıfında yer almaktadır. Yönetmelik'te belirlenen ve bu tez çalışmasında gri su ayak izi hesabında kullanılacak olan kirlletici parametreler için deşarj standartları Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Erzurum BAAT Gri Su Ayak İzi Hesabında Kullanılacak Olan Kirlетici Parametreler İçin Deşarj Standartları

Parametre	Birim	Kompozit Numune (24 Saatlik)
Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı (BOİ ₅)	(mg/L)	35
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	(mg/L)	90
Askıda Katı Madde (AKM)	(mg/L)	25
pH	-	6-9

Hesaplamalar hem SKKY (2004) hem de YSKY (2012) esas alınarak hesaplanmıştır (Çankaya 2019; Kutlu 2022). Erzurum BAAT’nde arıtma için kullanılan kimyasallar dikkate alınmamıştır. Tablo 9’da hesaplamada kullanılacak tüm veriler gösterilmiştir.

Tablo 9. Gri Su Ayak İzi Hesabında Kullanılacak Olan Tüm Parametreler

Parametre	Debi	Cgiriş	Cyasal	Cyasal	Cçıkış	Cdoğal	Chamsu
	m ³ /gün	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	mg/L
			SKKY (2004)	YSKY (2012)			
AKM	76857	190	25	-	15	-	-
KOİ	76857	391	90	50	32	-	-
BOİ ₅	76857	223	35	8	18	-	-
TN	76857	28	-	11,5	7	-	-

Tablo 10 ve 11’de ise sırasıyla SKKY (2004) ve YSKY (2012)’de yer alan deşarj ve kirlilik standartları kullanılarak ve Eşitlik (7-11)’deki adımlar izlenerek elde edilen hesaplama sonuçları gösterilmiştir.

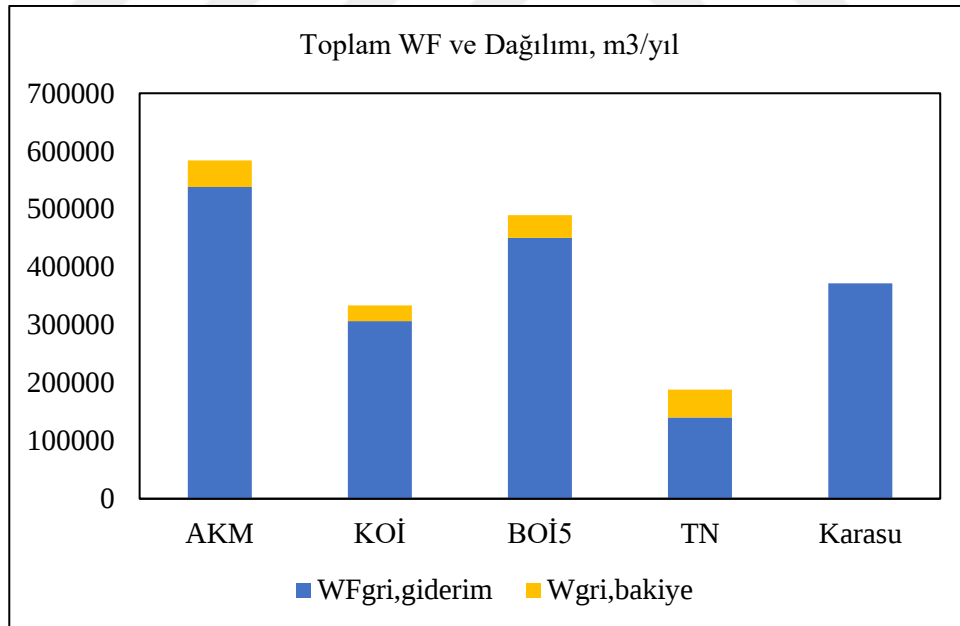
Tablo 10. SKKY (2004)’e göre Erzurum BAAT Gri Su Ayak İzi Hesaplama Sonuçları, m³/yıl

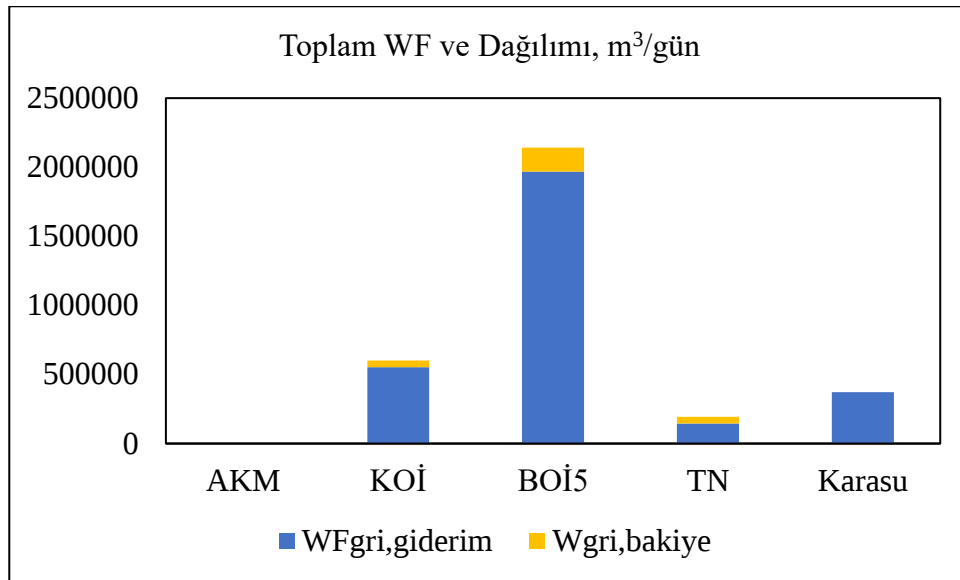
SKKY (2004)					
	WFgri, giderim	WFgr, operasyonel	Wfgri, zorunlu	Wgri, bakiye	Wgri, toplam
AKM	537999	30742,8	507256,2	46114,2	584113,2
KOİ	306574,033	49530,067	257043,967	27326,933	333900,967
BOİ ₅	450162,429	37330,543	412831,886	39526,457	489688,886
TN	140347,565	30074,478	110273,087	48164,637	188512,203

Tablo 11. YSKY (2012)'e göre Erzurum BAAT Gri Su Ayak İzi Hesaplama Sonuçları, m³/yıl

YSKY (2012)	WFgri, giderim	WFgr, operasyonel	Wfgri, zorunlu	Wgri, bakiye	Wgri, toplam
AKM					
KOİ	551833,26	27668,52	524164,74	49188,48	601021,74
BOİ ₅	1969460,63	-96071,25	2065531,88	172928,25	2142388,88
TN	144493,912	30962,981	113530,931	48164,6374	192658,55

Erzurum BAAT'ne ait herbir deşarj parametresi için hesaplanan ve Tablo 10 ve 11'de verilen gri su ayak izi değerlerinin Karasu Nehri'nin debisi (Eren ve Kaya, 2020) ile karşılaştırılması ise Şekil 16 ve Şekil 17'de gösterilmiştir. Şekil 16 Erzurum BAAT deşarj parametrelerinin SKKY (2004) Yönetmeliğine göre hesaplanmış gri su ayak izinin (m³/yıl) Karasu Nehri'nin yıllık debisi ile karşılaştırılmasını gösterirken; Şekil 17 Erzurum BAAT deşarj parametrelerinin YSKY (2012) Yönetmeliğine göre hesaplanmış gri su ayak izinin (m³/yıl) Karasu Nehri'nin yıllık debisi ile karşılaştırılmasını göstermektedir.

**Şekil 16.** Erzurum BAAT deşarj parametrelerinin (SKKY, 2004) Karasu Nehri debisi ile karşılaştırılması, m³/yıl



Şekil 17. Erzurum BAAT deşarj parametrelerinin (YSKY, 2012) Karasu Nehri debisi ile karşılaştırılması, m³/yıl

Tesisin toplam gri su ayak izini hesaplamak için en yüksek gri su ayak izine sahip parametre alınmaktadır. Çünkü zaten en yüksek yıllık su debisi diğer kirleticileri de özümseme kapasitesine sahip olacaktır. Şekil 16 ve Şekil 17'e göre en yüksek gri su ayak izi SKKY (2004)'e göre AKM ve YSKY (2012)'ye göre BOİ₅ parametresidir. Dolayısı ile Erzurum BAAT toplam gri su ayak izi SKKY (2004)'e göre $WF_{gri} = 537.999 \text{ m}^3/\text{yıl}$, SKKY (2004) olurken, Erzurum BAAT toplam gri su ayak izi YSKY (2012)'e göre $WF_{gri} = 2.142.388,88 \text{ m}^3/\text{yıl}$ olarak hesaplanmıştır. Eşitlik (3)'te belirtilen Su Kirliliği Seviyesi (WPL)'nin hesaplanabilmesi için havza bazlı yıllık debi değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır ancak bu veri temin edilememiştir. Ancak hem SKKY (2004)'e göre AKM ve BOİ₅ parametresinin; hem de YSKY (2012)'ye göre BOİ₅ parametresinin suyun asimilasyon kapasitesini aştığı görülmektedir. Burada tesis çıkış BOİ₅ değerinin (18 mg/L), YSKY (2012)'ne göre II. Sınıf yüzey suyu olarak kabul edilen sucul ortamlarda izin verilen maksimum BOİ₅ konsantrasyonunun (8 mg/L) olmasından kaynaklanmaktadır.

Çalışmada ayrıca mavi ve yeşil su ayak izi de hesaplanmıştır. $WF_{yeşil}$ hesabı için yalnızca Erzurum BAAT yüzeyine düşen yağış verileri kullanılacaktır. Erzurum Meteoroloji 12. Bölge Müdürlüğü'nden alınan 2023 yılı yıllık ortalama yağış verileri Tablo 12'de gösterilmiştir.

Tablo 12. Erzurum Meteoroloji 12. Bölge Müdürlüğü 2023 Yılı Yıllık Ortalama Yağış Verileri

2023	Ort. Yağış, mm
January	6,6
February	44,6
March	80,8
April	140,4
May	155,4
June	62
July	56,5
August	12,8
September	3,7
October	61,3
November	108,1
December	36
Yıllık toplam	761,6

Erzurum BAAT'ne düşen yağış miktarı kent merkezinde yer alan istasyon verileri kullanılarak temin edilmiş olup aritmetik ortalaması 69,24 mm (kg/m²) olarak hesaplanmıştır. Yıllık toplam yağış ise 761,6 mm'dir. AAT'nin alanı 67.000 m² olarak tesisten temin edilmiştir.

Suyun özgül ağırlığı 1,000 kg/m³ olarak kabul edilerek WFyeşil Eşitlik (12)'deki gibi hesaplanmıştır.

$$WF_{\text{yeşil, yağış}} = 761,6 \text{ kg/m}^2\text{yıl} \times 67000 \text{ m}^2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg} = 51.027,2 \text{ m}^3/\text{yıl} \quad (12)$$

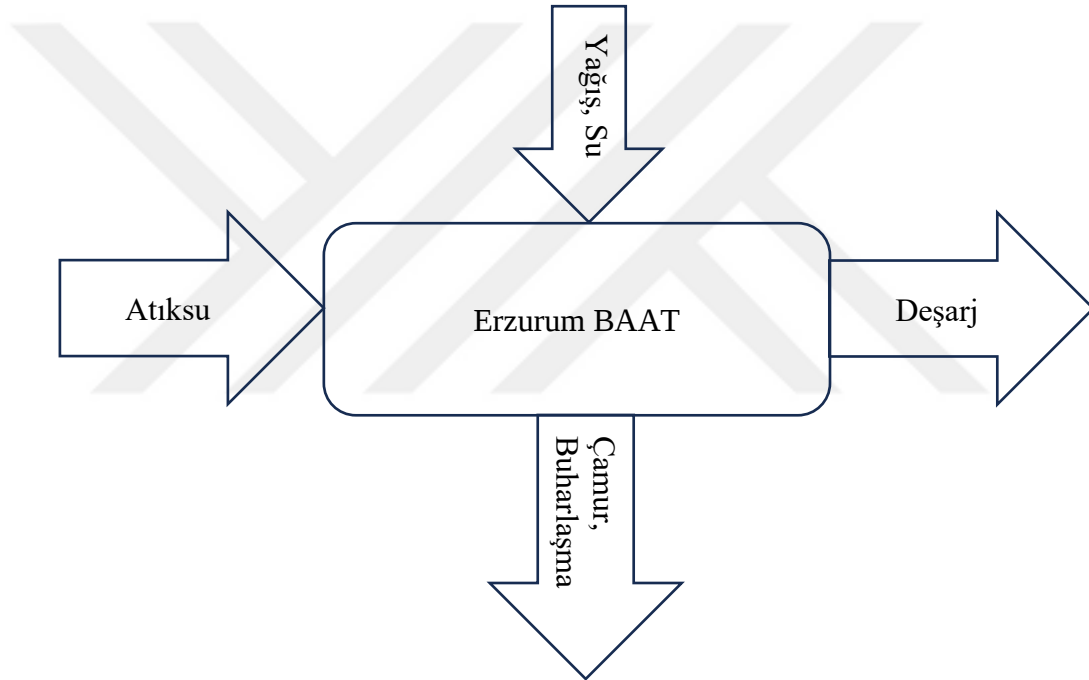
AAT'nin etki alanı içinde WFyeşil hesaplanırken doğrudan (WFyeşil, yağış) veya dolaylı (WFyeşil, diğer) yeşil su ayak izi kaynakları hesaplamaya dahil edilecektir ancak burada dolaylı kaynaklar ihmal edilmiştir. Bu nedenle toplam yeşil su ayak izi WFyeşil, yağış'a eşdeğer olarak 51.027,2 m³/yıl hesaplanmıştır.

Mavi su ayak izi hesabı için tesisten temin edilen yıllık girdi-çıkış ve kimyasal kullanım verileri Tablo 13'da gösterilmiştir.

Tablo 13. Erzurum BAAT Yıllık Girdi-Çıktı Değerleri

Girdi-Çıktıları	Miktar
Deşarj edilen su hacmi, m ³	23.706.000
Elektrik Tüketimi, kWh	10.450
Susuzlaştırılmış Artıma Çamuru, m ³	12.500.000
Tesiste kullanılan temiz su, m ³	30.000
Kimyasallar	
Katyonik toz polimer, ton	30
Katyonik sıvı polimer, ton	20

Mavi su yak izi için öncelikle tesiste bir kütle denkliğinin kurulması gerekmektedir (Şekil 18).

**Şekil 18.** Erzurum BAAT yıllık su girdi ve çıktıları için kütle denkliliği

Buna göre önce tesisin açık yüzeylerden toplam buharlaşma miktarı hesaplanması gerekmektedir. Erzurum Meteoroloji Bölge Müdürlüğü 2023 yılı için açık alanlardan 6 aylık için toplam yüzey buharlaşmasını 694,4 mm/yıl (kg/m²yıl) olarak temin edilmiştir. Buna göre Eşitlik (13)’den buharlaşan su miktarı hesaplanabilir:

$$WF_{\text{mavi, buharlaşma}} = 694,4 \text{ kg/m}^2\text{yıl} \times 67000 \text{ m}^2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg} = 46.524,8 \text{ m}^3/\text{yıl} \quad (13)$$

Ardından tesisten çamurun deşarj edilen kısmı için su ayak izi hesabı yapılacaktır. Tesisten yılda 12.500.000 kg %80 su içeriğine sahip arıtma çamuru atıldığı belirtilmiştir. Suyun özgül ağırlığı 1.000 kg/m³ olarak kabul edilirse çamurla sistemden uzaklaştırılan su Eşitlik (14)’te gösterilmiştir:

$$WF_{mavi, \text{çamur}} = 12.500.000 \text{ kg/yıl} \times 80/100 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg} = 10.000 \text{ m}^3/\text{yıl} \quad (14)$$

Böylelikle Şekil 18’de kurulan su girdi ve çıktıları kütle denklğine göre;

$$\text{Tesise giren su} = \text{Atıksu} + \text{Yağış} + \text{Su} \quad (15)$$

$$\text{Tesisten çıkan su} = \text{Deşarj} + \text{Çamur} + \text{Buharlaşıma} \quad (16)$$

şeklinde hesaplanabilir. Eşitlik (15-16)’da tüm değerler yerine koyularak tesise giren mavi su ayak izi iel çıkan mavi su ayak izi hesaplanabilir. Hesaplamalar Eşitlik (17) ve Eşitlik (18)’de gösterilmiştir.

$$WF_{mavi, \text{giren}} = (76.857 \times 365) + 51.027,2 + 30.000 = 28.133.832,2 \text{ m}^3/\text{yıl} \quad (17)$$

$$WF_{mavi, \text{çıkan}} = 23.706.000 + 10.000 + 46.524,8 = 23.762.524,8 \text{ m}^3/\text{yıl} \quad (18)$$

Tesisteki kayıp kaçak miktarının hesabı (Eşitlik (19)) için Eşitlik (17) ve Eşitlik (18)’in farkı hesaplanmalıdır. Sonuçlar Eşitlik (20)’de gösterilmiştir.

$$WF_{mavi, \text{kayıp}} = WF_{mavi, \text{giren}} - WF_{mavi, \text{çıkan}} \quad (19)$$

$$WF_{mavi, \text{kayıp}} = 28.133.832,2 - 23.762.524,8 = 4.371.307,4 \text{ m}^3/\text{yıl} \quad (20)$$

Bu kayıp kaçak değeri, tesiste giriş çöktürme havuzu üstünden ayrılan yağ-köpük ve arıtma çamuru geri döngüsü ile aktarılan çamur ile ayrılan su miktarını ifade etmektedir.

Eşitlik (21)’de gösterildiği gibi elde edilen tüm değerlerin toplamı ise tesisteki doğrudan mavi su ayak izini vermektedir. Sonuçlar Eşitlik (22)’de gösterilmiştir.

$$WF_{mavi, \text{doğrudan}} = WF_{mavi, \text{hamsu}} + WF_{mavi, \text{buharlaşan}} + WF_{mavi, \text{çamur}} + WF_{mavi, \text{kayıp}} \quad (21)$$

$$WF_{mavi, \text{doğrudan}} = 30.000 + 46.524,8 + 10.000 \text{ m}^3/\text{yıl} + 4.371.307,4 = 4.457.832,2 \text{ m}^3/\text{yıl} \quad (22)$$

Tesisteki dolaylı mavi su ayak izi için ise kimyasallardan ve elektrik tüketiminden gelen su ayak izi hesaplanmalıdır (Çankaya 2019).

Tesiste kimyasal olarak çöktürme işlemleri için sadece katyonik toz polimer ve sıvı polimer kullanılmakta ve ortalama yoğunlukları $0,7 \text{ g/cm}^3$ olarak belirtilmektedir (Tablo 13). Tesiste toplam yıllık 50 ton kimyasal madde kullanıldığı için, Eşitlik (23)’e göre:

$$WF_{mavi, \text{kimyasal}} = 50 \text{ ton/yıl} \times 10^6 \text{ g/ton} \times 0,7 \text{ g/cm}^3 = 35 \text{ m}^3/\text{yıl} \quad (23)$$

Kimyasallardan kaynaklanan dolaylı mavi su ayak izi hesaplanmıştır. Elektrik tüketiminden kaynaklı dolaylı mavi su ayak izi ise Eşitlik (24)’te hesaplanmıştır ve sonuçlar Eşitlik (25)’te

gösterilmiştir (Tablo 13). Elektrik tüketim hesabı için kullanılan katsayı Çankaya (2019) çalışmasından alınmıştır.

$$WF_{mavi,elektrik} = \text{Yıllık Tüketim} \times 0,025129 \quad (24)$$

$$WF_{mavi,elektrik} = 10.450 \times 0,025129 = 292,6 \text{ m}^3/\text{yıl} \quad (25)$$

Toplam dolaylı mavi su ayak izi ise kimyasal (Eşitlik (23)) ve elektrik kullanımından (Eşitlik (25))) ileri gelen mavi su ayak izinin toplanması ile elde edilecektir (Eşitlik (26-27)).

$$WF_{mavi,dolaylı} = WF_{mavi,kimyasal} + WF_{mavi,elektrik} \quad (26)$$

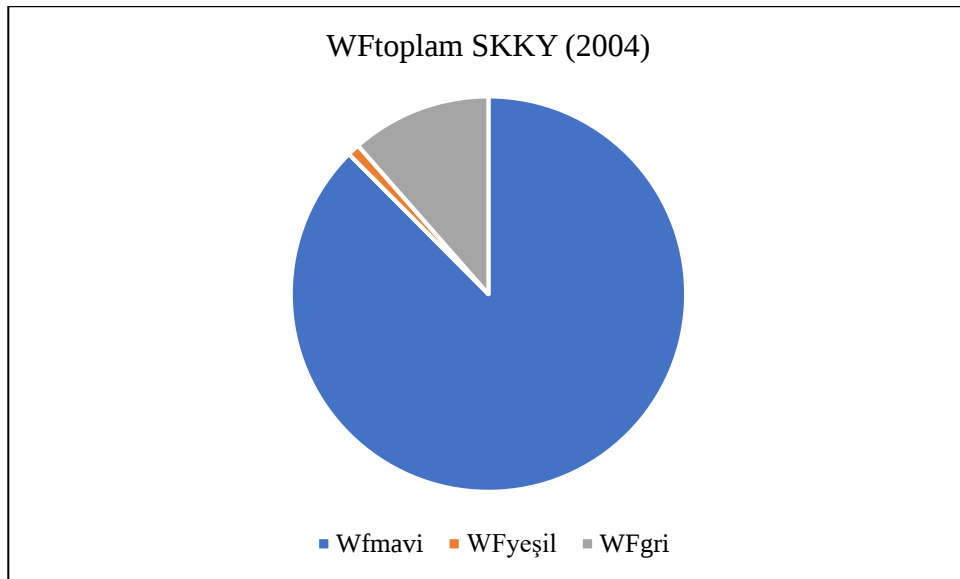
$$WF_{mavi,dolaylı} = 35 + 292,6 = 297,6 \text{ m}^3/\text{yıl} \quad (27)$$

Eşitlik (22)'de hesaplanan toplam doğrudan ve Eşitlik (27)'de hesaplanan toplam dolaylı mavi su ayak izi değerlerinin toplanması (Eşitlik (28)) ise Erzurum BAAT toplam mavi su ayak izi değerini verecektir. Bu sonuç da Eşitlik (29)'da verilmiştir.

$$WF_{mavi} = WF_{mavi,dolaylı} + WF_{mavi,doğrudan} \quad (28)$$

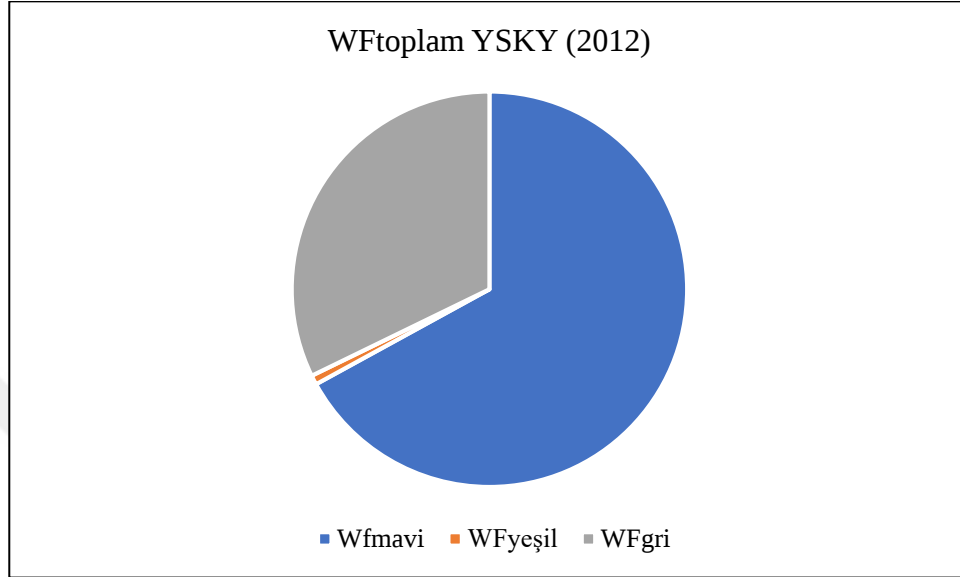
$$WF_{mavi} = 297,6 + 4.457.832,2 = 4.458.129,8 \text{ m}^3/\text{yıl} \quad (29)$$

Çalışmanın son aşamasında Erzurum BAAT'nin gri su, yeşil su ve mavi su ayak izinden oluşan toplam su ayak izi pasta grafik olarak SKKY (2004)'e ve YSKY (2012)'ye göre sırasıyla Şekil 19 ve Şekil 20'de gösterilmiştir. Şekil 19'dan görüldüğü gibi tesisin en yüksek su ayak izini %88'lik bir pay ile mavi su ayak izi oluşturmaktadır. Bunu %11'lik pay ile gri su ayak izi ve %1'lik pay ile yeşil su ayak izi takip etmektedir (SKKY 2004).



Şekil 19. Erzurum BAAT toplam su ayak izi, SKKY (2004)

Şekil 20'ye bakıldığında ise YSKY (2012)'nde belirlenen su kirletici parametreler için sınır değerler SKKY (2004)'ne göre daha düşük olduğu için (Tablo 9), tesisin gri su ayak izi artmaktadır. Buna göre YSKY (2012) esas alınarak hesaplanmış Erzurum BAAT toplam su ayak izinin %67'sini mavi su ayak izi, %32'sini gri su ayak izi ve %1'ini yeşil su ayak izi oluşturmaktadır.



Şekil 20. Erzurum BAAT toplam su ayak izi, YSKY (2012)

Şekil 19 ve Şekil 20'den yola çıkılarak tesise giren 1 m³ atıksuyun Su Ayak İzi SKKY (2004)'ne göre 0,182 m³ ve YSKY (2012)'ye göre ise 0,237 m³ olarak hesaplanmıştır. Çankaya (2019) SKKY (2019)'a göre yaptığı su ayak izi hesabında bu değeri; 1 m³ atık suyun su ayak izi değeri de 0.777 m³ olarak hesaplamıştır (Çankaya 2019). Her iki Yönetmeliğe göre hesaplanmış toplam su ayak izi içindeki mavi su ayak izinin yüksek olmasının temel sebebi mavi su ayak izinin doğrudan kısmında yer alan tesiste oluşan çamura ait olduğu görülmektedir. Tesiste iki adet çamur çürütücü yer almakta olup, çamur çürütme işleminden sonra susuzlaştırma yapılarak elde edilen su havalandırma havuzlarının başına geri döndürülmektedir.

Çankaya (2019) yılında yaptığı çalışmada Borçelik tesisi atıksu arıtma tesisinin su ayak izini hesaplamış ve yeşil su ayak izinin toplam su ayak izine yalnızca % 0,35 etkisi olduğu sonucunu bulmuştur. Ayrıca toplam su ayak izinin % 29'nun mavi % 71'i ise gri su ayak izi olarak hesaplamıştır (Çankaya 2019). Kutlu (2022) yılında yaptığı çalışmada Ankara Merkezi Atık Su Arıtma Tesis'i'nin kentsel gri su ayak izini hesaplamıştır. Elde edilen sonuçlara göre KOİ parametresi arıtılıp deşarj edildiği için Ankara Çayı'nın asimilasyon kapasitesini aşılmadığı ancak TN'un asimilasyon kapasitesini aştığı görülmüştür. Bu nedenle mevcut arıtma

tesisinde azot ve fosfor gideriminin yapılması gerektiği belirtilmiştir. Çalışmada KOİ için gri su ayak izi 5479,45 m³/yıl olarak hesaplanırken, bizim çalışmamızda KOİ için gri su ayak izi 1646,635 m³/yıl olarak hesaplanmıştır. Her iki çalışmada belirtilen sonuçların kıyaslanması YSKY (2012) üzerinden yapılmıştır (Kutlu 2022).

Alver (2022) yılında yaptığı çalışmasında Kocaeli ilinde bulunan endüstriyel nitelikli bir atık su arıtma tesisinin su ayak izini hesaplamıştır. Tesiste doğrudan ve dolaylı mavi su ayak izi 3.695,909 m³ olarak hesaplanmıştır. Tesiste BOİ₅ parametresinin artırılması ile 13.907.451 m³/ay gri su ayak izi oluşumunun önüne geçilmiştir. Ayrıca tesis su ayak izinin en yüksek oranının enerji kullanımına ait olduğu belirtilmiştir (Alver 2022).

Yılmaz (2024) yaptığı çalışmasında Ankara Polatlı AAT giriş ve çıkış verileri ve Gülveren Deresi'nin bağlandığı Sakarya Nehri üzerinden alınmış debi değerlerini kullanarak gri su ayak izi değerlerini KOİ için 0,01 Mm³/gün (3.650.000 m³/yıl) ve toplam azot için Mm³/gün (7.300.000 m³/yıl) olarak hesaplamıştır. Bu tez çalışmasında ise en yüksek gri su ayak izi KOİ'ye ait olmamakla birlikte 601.021,74 m³/yıl olarak hesaplanmıştır. Her iki çalışmada YSKY (2012) esas alınmıştır (Yılmaz 2024). Ulusal literatürde atıksu arıtma tesisleri ile ilgili yapılmış su ayak izi çalışmaları oldukça sınırlı olup elde edilen su ayak izi sonuçlarının, atıksu arıtma tesislerinde su yönetmek isteyen karar verici mekanizmalar için faydalı bir sayısal gösterge olduğu ve arıtma tesislerinde uygulanabileceği düşünülmektedir. Bu alanda yapılan araştırmalardan şeffaf, tutarlı ve karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilebilmesi için daha fazla çalışma yapılması, özellikle veri kaynaklarının standart hale getirilmesi ve mümkünse ulusal veri envanteri oluşturulması gerekmektedir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Suyun sürdürülebilir kullanımı konusu giderek önem kazandığı için su ayak izi çalışmaları da son yıllarda artış göstermektedir. Suyun sektörler arasında tahsisi, su kaynaklarının üzerindeki baskı ve havza bazlı su kaynakları üzerindeki bütünleşik etkileri ortaya koyabilmek için gri su ayak izinin hesaplanması da son yıllarda oldukça önem kazanmıştır. Her ne kadar ulusal ölçekte AAT'lerinin toplam su ayak izi ve gri su ayak izi değerlendirmesi konusundaki çalışmalar sınırlı olsa da bu tez çalışmasından elde edilen sonuçların literatüre önemli bir katkı sunması amaçlanmıştır. Çalışmada ayrıca kentsel atıksuların su ayak izi açısından karşılaştırılabilir sayısal değerler de sunulmuştur. Çalışma, aslında kentsel atıksuları başarılı bir şekilde arıtan AAT'lerinin de su kaynakları üzerinde bir yükü olduğunu ortaya koyması açısından önemlidir. Çalışmada elde edilen belli başlı sonuçlar şöyledir:

- Tesisin en yüksek gri su ayak izi SKKY (2004)'e göre AKM ve YSKY (2012)'ye göre BOİ₅ parametresidir.
- Tesisin toplam gri su ayak izi SKKY (2004)'e göre 584.113,2m³/yıl, YSKY (2012)'e göre ise 2.142.388,88 m³/yıl olarak hesaplanmıştır.
- Tesisin toplam yeşil su ayak izi 51.027,2 m³/yıl olarak hesaplanmıştır.
- Tesisin en yüksek su ayak izini %88'lik bir pay ile mavi su ayak izi oluşturmaktadır. Bunu %11'lik pay ile gri su ayak izi ve %1'lik pay ile yeşil su ayak izi takip etmektedir (SKKY 2004).
- Tesisin toplam su ayak izinin %67'sini mavi su ayak izi, %32'sini gri su ayak izi ve %1'ini yeşil su ayak izi oluşturmaktadır (YSKY 2012).
- Tesise giren her 1 m³ atıksuyun su ayak izi 0,182 m³ olarak hesaplanmıştır (SKKY 2004).
- Tesise giren her 1 m³ atıksuyun su ayak izi 0,237 m³ olarak hesaplanmıştır (YSKY 2012).
- Tesis içi kullanılan temiz suyun su ayak izi 30.000 m³/yıl olarak hesaplanmıştır.

KAYNAKLAR

- Abbasi, N. A., Shahid, S. U., Majid, M., & Tahir, A. (2022). Ecotoxicological risk assessment of environmental micropollutants. In *Environmental micropollutants* (pp. 331-337). Elsevier.
- Alver, A., (2022). Endüstriyel Atık Su Arıtma Tesislerinde Su Ayak İzi Ve Enerji Hesabı, Fen Bilimleri Enstitüsü - Aksaray Üniversitesi.
- AR6, 2021. IPCC Sixth Assessment Report: Chapter 4: Water, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/>, Access Date: 10.12.2024.
- Boulay, A. M., Hoekstra, A. Y., & Vionnet, S. (2013). Complementarities of water-focused life cycle assessment and water footprint assessment.
- Copernicus, 2024. Copernicus: 2024 virtually certain to be the warmest year and first year above 1.5°C, <http://climate.copernicus.eu/>, Access Date: 09.12.2024.
- 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.
- Çankaya, T. (2019). Atık su arıtma tesislerinde su ayak İzi hesaplama yöntem önerisi ve haddeleme-galvanizleme tesisinde uygulama örneği. *Environmental Engineering. Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey*.
- ÇŞB, 2004. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği. <https://www.mevzuat.gov.tr/>,
- Eren, Z. (2021). Zararlı Alg Patlaması ve Marmara Denizindeki Müsilaj Problemi İlişkisi. *JENAS Journal of Environmental and Natural Studies*, 3(2), 203-213. <https://doi.org/10.53472/jenas.985310>
- Eren, Z., Kaya, F. (2020). Fırat-Dicle Havza Koruma Eylem Planı Çerçevesinde Kentsel Atıksu Arıtma Tesisinin Karasu Nehrinin Su Kalitesi Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 3(2), 95-109.
- ESKİ, 2024.
- Falkenmark, M., J. Lundquist and C. Widstrand (1989), “Macro-scale Water Scarcity Requires Micro-scale Approaches: Aspects of Vulnerability in Semi-arid Development”, *Natural Resources Forum*, Vol. 13, No. 4, pp. 258-267.
- Hoekstra, A. Y. (2011). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Routledge.
- Hoekstra, A. Y. and Chapagain, A. K. (2008) *Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources*, Blackwell Publishing, Oxford
- Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2007). Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. *Integrated assessment of water resources and global change: A north-south analysis*, 35-48.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2009). *Water footprint manual* (pp. 1-131). Enschede, The Netherlands: Water footprint network.
- ISO, 2014. Environmental management —Water footprint — Principles, requirements and guidelines.

- İraz, E. (2021). *Fırat havzasının su ayak izinin hesaplanması* (Master 's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Jefferies, D., Muñoz, I., Hodges, J., King, V. J., Aldaya, M., Ercin, A. E., ... & Hoekstra, A. Y. (2012). Water footprint and life cycle assessment as approaches to assess potential impacts of products on water consumption. Key learning points from pilot studies on tea and margarine. *Journal of Cleaner Production*, 33, 155-166.
- Kınacı, C. (2017). Su yönetiminde temel kavramlar ve bileşenler; Türkiye’de su yönetimi’. Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, <http://cdn.istanbul.edu.tr/>, Erişim Tarihi: 14.12.2024.
- Kutlu, T. (2022). Ankara'nın kentsel atık sularının gri su ayak izi, Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Su Politikaları ve Güvenliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Kutlu, T. (2022). *Ankara'nın kentsel atık sularının gri su ayak izi* (Master ’s thesis, Sosyal Bilimleri Enstitüsü).
- Kuzma, S., Saccoccia, L., & Chertock, M. (2023). Countries, Housing One-Quarter of the Population, Face Extremely High Water Stress. *World Resources Institute*. <https://www.wri.org>.
- Liu, C., Kroeze, C., Hoekstra, A. Y., & Gerbens-Leenes, W. (2012). Past and future trends in grey water footprints of anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs to major world rivers. *Ecological indicators*, 18, 42-49.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2010). A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat. *Hydrology and earth system sciences*, 14(7), 1259-1276.
- Mohsin, A. (2022). *Bursa ilinin su ayak izinin belirlenmesi* (Master ’s thesis, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).
- Morera, S., Corominas, L., Poch, M., Aldaya, M. M., & Comas, J. (2016). Water footprint assessment in wastewater treatment plants. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4741-4748.
- NOAA, 2019. Water Cycle, <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/freshwater/water-cycle>, Access Date: 09.12.2024.
- Pierce, J. J., & Vesilind, P. A. (1998). Environmental pollution and control (Fourth Eddition).
- Pietz, D. A., Zeisler-Vralsted, D., Pietz, D. A., & Zeisler-Vralsted, D. (2021). Water, Civilization, and Culture. *Water and Human Societies: Historical and Contemporary Perspectives*, 1-27.
- Sütürmak, T. (2020). *İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Avcılar Kampüsü Su Ayak İzi Profili belirlenmesi* (Master ’s thesis, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).
- SYGM, 2024. Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, <https://www.tarimorman.gov.tr/>, Erişim Tarihi: 14.12.2024.
- Şahin, H. (2018). *Su ayak izi kavramının sürdürülebilir su yönetimi çalışmalarında kullanılması* (Master 's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- TÜİK, 2022. Su ve Atıksu İstatistikleri 2022. <https://data.tuik.gov.tr/>, Erişim Tarihi: 11.12.2024.
- UN Water, 2019. Climate Change and Water UN-Water Policy Brief, <https://www.unwater.org/>, Access Date: 09.12.2024.

- UN Water, 2021. Summary Progress Update 2021:SDG 6 — water and sanitation for all, <https://www.unwater.org/>, Access Date: 10.12.2024.
- UN Water, 2024. Progress on Implementation of Integrated Water Resources Management – 2024 Update, <https://www.unwater.org/>, Access Date: 09.12.2024.
- URL-1, 2024. Küresel su döngüsü, <https://sutema.org/kuresel-su-dongusu>, Erişim Tarihi: 09.12.2024.
- URL-10, 2020. Yarının Suyu, <https://www.yarininsuyu.com/tskb>, Erişim Tarihi: 11.12.2024.
- URL-11, 2024. Su Verimliliği Seferberliği, <https://www.suverimliliği.gov.tr/kurumsal-kimlik/>, Erişim Tarihi: 11.12.2024.
- URL-12, 2024. Water Stress; Triggered by Climate Change and Our Daily Choices, <https://weglobal.org/>, Access Date: 11.12.2024.
- URL-13, 2024. Türkiye'nin Suyu ve Yönetimi. <https://sutema.org>, Erişim Tarihi: 14.12.2024.
- URL-14, 2021. 1. T.C. Tarım Ve Orman Bakanlığı, I. Su Şûrası, 04-08 Ekim 2021, Ankara, <https://cdniys.tarimorman.gov.tr/>, Erişim Tarihi: 14.12.2024.
- URL-15, 2012. Yerüstü Su Kalite Yönetmeliği, <https://www.mevzuat.gov.tr/>, Erişim Tarihi: 14.12.2024.
- URL-16, 2002. Vizyon 2023: Bilim ve Teknoloji Stratejileri Teknoloji Öngörü Projesi, Çevre ve Sürdürülebilir Kalkınma Paneli, https://tubitak.gov.tr/tubitak_content_files/vizyon2023, Erişim Tarihi: 14.12.2024.
- URL-2, 2024. What is the Paris Agreement?, <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>, Access Date: 09.12.2024.
- URL-3, 2024. 6 Temiz Su ve Sanitasyon, <https://www.kureselamaclar.org/>, Erişim Tarihi: 09.12.2024.
- URL-6, 2024. Safe Water and Your Health, <https://www.niehs.nih.gov/health/>, Access Date: 10.12.2024.
- URL-7 2024. Water for Prosperity and Peace, <https://www.unesco.org/reports/wwd/>, Access Date: 11.12.2024.
- URL-8, 2010. World Water Quality Facts And Statistics, <https://pacinst.org/wp-content/uploads/2013>, Access Date: 11.12.2024.
- URL-9, 2022. Share of domestic wastewater that is safely treated, <https://ourworldindata.org/>, Access Date: 11.12.2024.
- USGS, 2019. How Much Water is There on Earth? <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/>, Access Date: 09.12.2024.
- Wackernagel, M., & Rees, W. (1998). *Our ecological footprint: reducing human impact on the earth* (Vol. 9). New society publishers.
- WHO, 2023. World Health Organization: Drinking-water, <https://www.who.int/>, Access Date: 10.12.2024.
- WHO, 2024. Domestic Wastewater, <https://data.who.int/indicators/i/6EFF579/A37BDD6>, Access Date: 11.12.2024.
- WMO, 2021. The State of Climate Services 2021: Water, <https://library.wmo.int/>, Access Date: 09.12.2024.

Yılmaz, A., (2024). İleri Aritma Uygulanan Kentsel Atık Suların Gri Su Ayak İzi , Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Entegre Su Yönetimi Anabilim Dalı.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Muhammed Selim ÖZDEMİR
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Adnan Menderes Lisesi (2005)
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi (2011)
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bil. Ens., Çevre Teknolojileri Anabilim Dalı (2024)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	orta
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
-Çevre Mühendisleri Odası	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
-	