



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ENDÜSTRİYEL ATIKSU ARITMA TESİSLERİNDE
SU AYAK İZİ VE ENERJİ HESABI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esra KALYA

DANIŞMAN

Doç. Dr. Alper ALVER

AKSARAY, 2022

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 192301006 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Esra KALYA tarafından hazırlanan “**ENDÜSTRİYEL ATIKSU ARITMA TESİSLERİNDE SU AYAK İZİ VE ENERJİ HESABI**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Alper ALVER

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Prof. Dr. Levent ALTAŞ

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Prof. Dr. Yusuf YAVUZ

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 04/02/2022

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Doç. Dr. Mehmet Ali HINIS

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinalliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

Esra KALYA

TEŞEKKÜR

Saygıdeğer danışmanım,

Yüksek Lisans yolculuğuna başlamam için ilk desteği sağlayarak bu süreçte; konuyla ilgili bütün soru ve sorunlarıma her zaman sabır, içtenlik, anlayış, ilgi ile çözüm yolu buldunuz, çalışmama daha büyük hevesle yaklaşmamı sağladınız ve çok sancılı geçebilecek bir sürecin sayenizde mutlulukla sonuna gelmiş bulunmaktayım. Sizinle çalışabilmek büyük bir ayrıcalık ve bu imkana sahip olduğum için kendimi çok şanslı hissediyorum. Bu yüzden çok değerli hocam sayın Doç. Dr. Alper ALVER'e teşekkürlerin en büyüğünü ederim. Ayrıca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve her zaman içtenlikle yardımcı olan çok değerli hocam Doç. Dr. Emine BAŞTÜRK'e teşekkür ederim.

Sevgili ailem,

Hayatım boyunca sizin, her zaman yanımda olduğunuzu bilmek benim için en büyük güç olmuştur. Bu yüzden attığım her adımda, çıktığım her yolda siz ve sizi mutlu edebilmek en büyük motivasyon kaynağım olmuştur. Hiçbir zaman bana kendimi çaresiz hissettirmeyip, çıktığım bu yolda bana destek olduğunuz için teşekkür ederim. Bu yolculuk ve benim için yapmış olduğunuz fedakarlıklar için teşekkür ederim. Ailemden ayırmadığım ve her tökezlediğimde elini omzumda hissettiğim canım arkadaşım Hilal CANDEMİR'e teşekkür ederim.

Çalışma verilerini benimle paylaşan ve her an yardımlarını esirgemeyen İzmit Su Kanalizasyon İdaresi yönetimine ve Selçuk VAROL'a teşekkürü ayrıca bir borç bilirim.

Esra KALYA

AKSARAY, 2022

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETLERİ.....	4
2.1 Ayak İzi Kavramı	4
2.2 Su Ayak İzi Kavramı	7
2.3 Sanal Su Kavramı	9
2.4 ISO 14046 Uluslararası Su Ayak İzi Standardı	11
2.5 Su Ayak İzi Değerlendirme Kılavuzu.....	13
2.6 Su Ayak İzi Bileşenleri	14
2.6.1 Gri su ayak izi	14
2.6.2 Mavi su ayak izi	14
2.6.3 Yeşil su ayak izi	15
2.7 Su-Enerji İlişkisi	15
2.8 Atıksu Arıtma Tesisinin Su Ayak İzi.....	15
2.9 Su Ayak İzi Çalışmalarının Karşılaştırılması.....	17
2.9.1 Su ayak izi yöntemlerine, veri tabanlarına ve araçlarına genel bakış	17
2.9.2 Su ayak izi yöntemlerinin, veri tabanlarının ve araçlarının karşılaştırılması	18
2.10 Atıksu Arıtma Tesisinin Enerji ve Su Bağlantısı	19
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	21
3.1 Çalışmanın Hedefi ve Sınırları	21
3.2 Çalışma Alanı ve Atıksu Arıtma Tesisi	21
3.3 Analiz Metotları.....	23
3.4 Atıksu Arıtma Tesisi Su Ayak İzinin ve Enerji-Su İlişkisinin Değerlendirilmesi İçin Metodoloji	24
3.4.1 Gri su ayak izi hesabı	24
3.4.2 Mavi su ayak izi hesabı	26
3.4.3 Yeşil su ayak izi	27
3.4.4 Enerji-su hesabı.....	28
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	29
4.1 Atıksu Arıtma Tesisi Su Karakterizasyonu	29
4.2 Alıcı Ortam Su Kalitesinin Belirlenmesi	34
4.3 Atıksu Arıtma Tesisi Su Ayak İzinin Belirlenmesi	34
4.3.1 Atıksu arıtma tesisi su ayak izi girdileri.....	36
4.3.2 Atıksu arıtma tesisi su ayak izi çıktıları	37
4.3.3 Atıksu arıtma tesisi gri su ayak izi	37
4.3.4 Atıksu arıtma tesisi mavi su ayak izi.....	40

4.3.5 Atıksu arıtma tesisi yeşil su ayak izi	41
4.4 Atıksu Arıtma Tesisi Enerji-Su İlişkisinin Belirlenmesi	43
4.5 Sürdürülebilir Çevre Açısından Çalışmanın Değerlendirilmesi.....	44
4.6 Diğer Çalışmalarla Kıyaslama.....	44
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	46
KAYNAKLAR.....	48
ÖZGEÇMİŞ	55



YÜKSEK LİSANS TEZİ

ENDÜSTRİYEL ATIKSU ARITMA TESİSLERİNDE SU AYAK İZİ VE ENERJİ HESABI

Esra KALYA

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Alper ALVER

ÖZET

Su, tüm canlılar için yaşam kaynağıdır. Sanayileşme ve diğer insan faaliyetleri sonucunda her gün milyonlarca metreküp su kirlenmektedir. Bu çalışmada Kocaeli İlinde bulunan $24.750 \pm 2.895 \text{ m}^3/\text{gün}$ kapasiteli 42 Evler Atıksu Arıtma Tesisinin (AAT) su döngüsüne katkısı su ayak izi (SAİ) göstergeleri üzerinden incelenmiştir. AAT'lerde SAİ hesaplamasına ait az sayıda çalışma olup, bu çalışmayla beraber bir karşılaştırma yönteminin geliştirilmesi ve daha sonra yapılacak diğer çalışmalara öncülük etmesi hedeflenmektedir. Çalışma kapsamında, AAT'nin SAİ'si arıtımın olduğu ve olmadığı durumlar için değerlendirilmiş ve iki durum arasındaki farktan AAT'nin gri su ayak izine katkısı belirlenmiştir. AAT'nin aylık kirlenici giderim verimleri; BOİ₅ (Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı), KOİ (Kimyasal Oksijen İhtiyacı), TA (Toplam Azot), TF (Toplam Fosfor) ve AKM (Askıda Katı Madde) için sırasıyla ortalama %95,01, %94,23, %14,87, %63,30 ve %94,79'dir.

AAT, alıcı ortamın Sınıf III (orta) su kalitesini koruyarak su döngüsünde ayda ortalama $14.375.243 \text{ m}^3$ tatlı su geri kazanımı sağlamıştır. Geri kazanılan suyun hacmi, AAT giriş debisinden aylık ortalama 19 kat daha fazladır. AAT'de doğrudan ve dolaylı olarak tüketilen toplam tatlı su miktarı ortalama $3.696 \text{ m}^3/\text{ay}$ olarak hesaplanmıştır. SAİ_{Mavi, Dolaylı}, SAİ_{Mavi, Toplam}'ın $\%87,143 \pm \%2,196$ 'sını oluşturur. AAT'de tüketilen elektrik enerjisinin üretimi için kullanılan su miktarı SAİ_{Mavi, Dolaylı}'nın $\%97,093 \pm 0,874$ 'ünü oluşturmaktadır. Buradan hareketle tesis Su-Enerji ilişkisi değerlendirilmiştir. SAİ_{Mavi, Toplam} ile $\Delta\text{SAİ}_{\text{Gri}}$ karşılaştırılarak, AAT'nin su döngüsüne kar ve zarar analizi yapılmıştır.

AAT'nin işletilmesi esnasında tüketilen 1 m^3 taze su başına ortalama 116.327 m^3 su alıcı ortamda asimile olmaktan kurtarılmıştır. Bu çalışma, AAT'nin doğal su döngüsüne, alıcı ortam kalitesinin korunmasına ve sürdürülebilir çevreye katkısını tüm yönleriyle ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir Çevre, Arıtma Tesisi, Su Döngüsü, Su Ayak İzi.

Ocak, 2022; 55 sayfa

M. Sc. THESIS

WATER FOOTPRINT AND ENERGY CALCULATION FOR INDUSTRIAL WASTEWATER TREATMENT PLANTS

Esra KALYA

Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Environmental Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Alper ALVER

ABSTRACT

Water is the source of life for all living things. Millions of cubic meters of water are polluted every day as a result of industrialization and other human activities. In this study, the contribution of the 42 Evler Wastewater Treatment Plant (WWTP) with a capacity of $24,750 \pm 2,895 \text{ m}^3/\text{day}$ in Kocaeli Province, Turkey to the water cycle was examined through Water Footprint (WF) indicators. There are few studies on water footprint calculation in wastewater treatment plants, and it is aimed to develop a benchmarking method with this study and to lead other studies to be done later. Within the scope of the study, WWTP's WF was evaluated for cases with and without treatment, and the contribution of WWTP to gray water footprint was determined from the difference between the two cases. The monthly averaged removal rates of the BOD₅, COD, TN, TP, and TSS 95.01%, 94.23%, 14.87%, 63.30%, and 94.79%, respectively.

By maintaining the Class III (medium) water quality of the receiving environment, WWTP achieved an average of $14,375,243 \text{ m}^3$ fresh water recovery per month in the water cycle. The volume of recovered water is 19 times greater than the inflow of WWTP. The total amount of fresh water consumed directly and indirectly in the WWTP is $3,696 \text{ m}^3/\text{day}$ on average, that is, chemicals, energy, sludge treatment, etc. $\text{WF}_{\text{Blue,Indirect}}$ constitutes $87.143 \pm 2.196\%$ of the $\text{WF}_{\text{Blue,Total}}$. The amount of water used for the production of electrical energy consumed in the WWTP constitutes $97.093 \pm 0.874\%$ of $\text{WF}_{\text{Blue,Indirect}}$. From this point of view, the water-energy relationship of the facility was evaluated. An analysis of WWTP's benefit and loss to the water cycle was made by comparing $\text{WF}_{\text{Blue,Total}}$ with $\Delta\text{WF}_{\text{Gray}}$.

An average of $116,327 \text{ m}^3$ of water per 1 m^3 of fresh water consumed during the operation of the WWTP was saved from assimilation in the receiving environment. This study reveals all aspects of WWTP's contribution to the natural water cycle, the protection of the receiving environment quality and the sustainable environment.

Keywords: Sustainable Environment, Treatment Plant, Water Cycle, Water Footprint.

Jauary, 2022; 55 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. SAI değerlendirme aşamaları .	12
Şekil 3.1. AAT akış şeması.	22
Şekil 4.1. AAT giriş-çıkış kirletici parametreleri ve debi değişimi.	31
Şekil 4.2. AAT'nin SAI bileşenleri.	35
Şekil 4.3. AAT SAI _{Gri} hesabı.	38
Şekil 4.4. SAI _{Gri} 'nin debiye oranı.	39
Şekil 4.5. AAT SAI _{Mavi} hesabı.	40
Şekil 4.6. AAT SAI _{Yeşil} hesabı.	42
Şekil 4.7. AAT tarafından korunan taze su hacminin (ΔSAI_{Gri}) tesise yağışla gelip kirlenen su hacmine (SAI _{Yeşil}) oranı.	42
Şekil 4.8. AAT tarafından korunan taze su hacminin (ΔSAI_{Gri}) tüketilen su hacmine (SAI _{Mavi, Toplam}) oranı.	43

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Analiz edilen parametreler ve yöntemleri.	32
Çizelge 4.1. AAT giriş ve çıkış suyu karakterizasyonu.	38
Çizelge 4.2. AAT'nin çamur karakterizasyonu.	42
Çizelge 4.3. Alıcı ortam analiz sonuçları.	43
Çizelge 4.4. SAI bileşenlerinin karakterizasyonu.	44



SİMGELER VE KISALTMALAR

AAİ	Azot Ayak İzi
AAT	Atıksu Arıtma Tesisi
AKM	Askıda Katı Madde
BAİ	Biyoçeşitlilik Ayak İzi
BMEBKK	Birleşmiş Milletler Eğitim, Bilim ve Kültür Kurumu
BOİ₅	Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı
C	Konsantrasyon
C_{Alıcı Ortam}	Alıcı Ortam Konsantrasyonu
C_{Çıkış}	AAT Çıkış Suyu Kirletici Konsantrasyonu
C_{Deşarj Limiti}	Atıksu Deşarj Limiti Konsantrasyonu
C_{Giriş}	AAT Giriş Suyu Kirletici Konsantrasyonu
CO₂	Karbondioksit
COVID-19	Koronavirüs Hastalığı
ÇAİ	Çevresel Ayak İzi
DDKV	Dünya Doğayı Koruma Vakfı
EAAT	Endüstriyel Atıksu Arıtma Tesisi
FAİ	Fosfor Ayak İzi
GCMS	Genel Cebirsel Modelleme Sistemi
GJ	Gigajoule
GMTSSS	Grafik Modelleme Tarafından Sağlanan Süreç Sentezi
HBA	Hayat Boyu Analiz
ISO	Uluslararası Standardizasyon Örgütü
KAİ	Karbon Ayak İzi
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
L	Kirletici yükü
N	Nüfus
OSB	Organize Sanayi Bölgesi
P_{Aylık}	Aylık yağış miktarı (mm veya L/m ²)
SAİ	Su Ayak İzi
SAİ_A	Su Ayak İzi Ağı
SAİ_{Gri}	Gri Su Ayak İzi
SAİ_{Gri,Arıtılmamış}	Arıtım Olmadan Gri Su Ayak İzi
SAİ_{Gri,Arıtılmış}	Arıtım Sonrası Gri Su Ayak İzi
SAİ_{Mavi}	Mavi Su Ayak İzi
SAİ_{Mavi,Buharlaştırma}	Buharlaştırma Kaynaklı Mavi Su Ayak İzi
SAİ_{Mavi,Çamur}	Çamur Kaynaklı Mavi Su Ayak İzi
SAİ_{Mavi,Çamur Arıtımı}	Çamur Arıtımı Kaynaklı Mavi Su Ayak İzi
SAİ_{Mavi,Doğrudan}	Doğrudan Mavi Su Ayak İzi
SAİ_{Mavi,Dolaylı}	Dolaylı Mavi Su Ayak İzi
SAİ_{Mavi,EnerjiTüketimi}	Enerji Tüketimi Kaynaklı Mavi Su Ayak İzi
SAİ_{Mavi,Kayıp}	Tesis Kayıp, Kaçak, Sızıntı kaynaklı Mavi Su Ayak İzi
SAİ_{Mavi, Şebeke Suyu}	Şebeke Suyu Kullanımı Kaynaklı Mavi Su Ayak İzi
SAİ_{Mavi,Toplam}	Toplam Mavi Su Ayak İzi
SAİ_{Yeşil}	Yeşil Su Ayak İzi
SÇAY	Seri Çevre Ara Yüzü
SKKY	Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği
TA	Toplam Azot

TAİ	Tarım Arazi Ayak İzi
Q_{Çıkış}	AAT Çıkış Debisi
Q_{Giriş}	AAT Giriş Debisi
ε	Arıtma verimliliği
\$	Dolar



1. GİRİŞ

Dünya nüfusu yılda yaklaşık 80 milyon kişi büyüyor ve nüfusun 2050 yılına kadar toplamda 9,1 milyar kişiye ulaşacağı tahmin ediliyor [1]. Nüfusla birlikte büyüyen ekonominin büyük bir bölümü, önemli boyutta sosyal ve çevresel maliyeti de beraberinde getirmiştir [2]. Nüfus, kentleşme, sanayileşme, üretim ve tüketimdeki artışlar, tüm tatlı su kaynaklarına sürekli artan bir talep yaratmıştır. Su döngüsündeki mevcut kayıplar 2030 yılına kadar devam ederse, iklim değişikliği senaryosuna göre Dünya'nın %40'ı küresel su açığı ile karşı karşıya kalacaktır [3]. Dünyanın artan ihtiyaçlarını karşılayacak kadar su var olsa da mevcut su kullanımını, yönetimini ve paylaşımını önemli ölçüde değiştirilmedikçe su sıkıntısı problemi son bulmayacaktır.

Sürdürülebilir bir çevre için kentsel yaşamda kullanılan suyun su döngüsüne yeniden dahil edilmesi gerekmektedir [4]. Kentsel su döngüsü; doğal kaynaklardan su temini, farklı kullanımlar için suyun arıtılması, şebekede suyun dağıtımı, tüketiciler tarafından su tüketimi, atıksuyun kanalizasyon sistemleri tarafından toplanması, taşınması ve atıksuyun arıtılmasını içerir [5]. Atıksu, doğal ekosistemlere geri gönderilmeden önce su kalitesini iyileştirmek için kentsel su döngüsünde önemli bir rol oynayan AAT'lerde arıtılmaktadır [6]. AAT'ler hem ekolojik yaşamın korunmasında hem de su kaynaklarının sürdürülebilirliğinde önemli role sahiptir [5]. AAT'ler; kimyasalları, enerjiyi tüketen ve yan ürünler (istisnai olarak katı atıklar ve gaz emisyonları) üreten, farklı işlemler kullanarak atıksuyu arıtılmış suya dönüştüren endüstriyel tesisler olarak kabul edilir. Bu tesisler, su emisyonlarının doğal ekosistemler üzerindeki etkisini azaltmıştır; ancak bunun beraberinde artan maliyetler ve diğer çevresel etkiler söz konusudur [7]. Kentsel su döngüsünde önemli bir role sahip olan AAT'ler için SAI'nin hesaplanması su kalitesinin doğal ekosisteme geri dönmeden önce iyileştirilmesi, geleceğe yönelik su planlarının yapılması, su sorunlarına çözüm geliştirilmesi, toplum ile paydaşlarının su yönetimine dahil edilmesi ve kamu politikalarında değişiklikler yapılması adına su koruma bilincinin artırılması açısından önemlidir. Suyun mevcudiyeti ve kullanılabilirliği, her gün artan kirleticiler yüzünden baskı altındadır [8]. Yüzey sularının ve kıyı alanlarının ötrofikasyonunun 2030 yılına kadar hemen hemen her yerde artması beklenmektedir [9].

AAT'ler, atıksuyun sürecin başından sonuna kadar herhangi bir enerji türü kullanılarak arıtıldığı su-enerji bağlantısına bir örnektir [10]. Atıksuyun AAT'ye taşınmasından deşarjına kadar enerjiye ihtiyaç vardır ve enerjinin kullanılabilir hale getirilmesi, kullanılması için de suya ihtiyaç vardır [11]. AAT'ler genellikle yoğun enerji harcayan tesislerdir ancak enerji kullanımı, alan, konum, ekipman ve kullanılan işlemlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir [12]. Fiziksel arıtma, kimyasal arıtma, havalandırma, pompalar, su taşıma, çamur arıtma, çamur susuzlaştırma ve geri devir gibi hemen her proste enerji kullanılmaktadır [13]. Bu noktada su-enerji ilişkisinin belirlenmesi sayesinde yöneticiler, kurumlar, işletmeler ve ekonomik paydaşlar sistemin sürdürülebilirliği hakkında stratejik bilgilere erişmektedir. Böylece enerji için gerekli olan su ile su için gerekli olan enerjinin doğru ve sürekli kullanımına fayda sağlanabilmektedir.

Su ile ilgili mevcut olumsuzluklar insanoğlunu konuyla ilgili çözüm yolları bulmaya zorlamıştır. Suyun doğru ve akıllıca kullanımı için paydaşlar SAİ kavramını benimsemeye başlamıştır. Bu konudaki çalışmalarının her geçen gün daha da artacağı düşünülmektedir. SAİ, bir ürün veya hizmetin oluşumu sırasında su tüketimini ölçen ve sürdürülebilir su yönetiminde en önemli unsur olan araç ve kavramdır [14]. SAİ sadece suyun hacmi ile ilgili olmayıp, kullanım şekli (yeşil, mavi ve gri), ne zaman ve nerede kullanıldığı hakkında da bilgi verir. Bu açıdan SAİ çok boyutlu bir göstergedir [7]. SAİ; Mavi Su Ayak İzi ($SAİ_{Mavi}$), Gri Su Ayak İzi ($SAİ_{Gri}$) ve Yeşil Su Ayak İzi ($SAİ_{Yeşil}$) olmak üzere 3 farklı bileşenden oluşur. Bu 3 bileşen, yağmur suyu miktarı, şebeke veya tatlı su tüketimi ve kirleticilerin alıcı su ortamında asimile olması için gereken temiz su miktarı şeklinde değerlendirmesini sağlar.

SAİ bileşenlerinden $SAİ_{Gri}$, bu temel kirleticiler parametrelerinin giriş suyu konsantrasyonu, yasal limitler, çıkış suyu konsantrasyonu ve alıcı ortam/su kütlesindeki konsantrasyon dikkate alınarak hesaplanmıştır [15]. 42 Evler AAT'nin atıksu arıtımı sayesinde alıcı ortamın standartlarını ne ölçüde koruduğu $SAİ_{Gri}$ göstergesi kullanılarak hesaplanabilmektedir [16]. Ayrıca SAİ hem doğrudan hem de dolaylı olarak ayrı ayrı hesaplanabilmektedir. Dolaylı SAİ, ürünün tedarik zinciri boyunca kullanılan su tüketimi olarak tanımlanmaktadır [17]. Genel olarak endüstriyel tesislerde tüketilen su miktarı, diğer bir deyişle operasyonel süreçlerdeki su tüketimi, tedarik zincirindeki su tüketimine göre çok daha azdır. Yani dolaylı su kullanımı

doğrudan kullanıma kıyasla daha fazladır. Dolaylı SAİ hesaplamalarında, tesis/proses içi su tüketiminin yanı sıra hammadde temini, ara ürün üretimi ve enerji kullanımı gibi birçok süreçte su tüketimi mevcuttur. Bu çalışmada, AAT’de doğrudan ve dolaylı olarak tüketilen su miktarını hesaplamak için $SAİ_{Mavi}$ kullanılmıştır. Genel olarak, AAT’ler için literatürde yapılan çalışmalarda $SAİ_{Yeşil}$ değeri hesaplanmamıştır [18]. AAT SAİ hesaplanmasına yönelik çalışmalarda farklı yöntemler ve veri tabanları kullanılmış ve farklı göstergeler üretilmiştir. Bu nedenle bu çalışmaları birbirleriyle karşılaştırmak güçtür.

Bu çalışmanın amacı 42 Evler AAT özelinde AAT’lerin sürdürülebilir su kaynaklarına katkısını belirlemek amacıyla SAİ yöntemini kullanarak çeşitli çevresel göstergeler elde etmektir. SAİ hesabı yapılırken, öncelikle hedef ve kapsam belirlenmiş, SAİ hesabı yapılmış, SAİ’nin sürdürülebilirliği değerlendirilmiş ve verimliliği arttırmak adına önerilerde bulunulmuştur [19]. AAT giriş ve çıkış yapısında takip edilen kirletici parametreler üzerinden SAİ hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. AAT’ler için SAİ hesaplamasına ait az sayıda çalışma olup [18], bu çalışmayla beraber bir kıyaslama yönteminin geliştirilmesi ve daha sonra yapılacak diğer çalışmalara kılavuz olması hedeflenmiştir. Çizilen su kıtlığı senaryolarına karşı, SAİ hesap yöntemin uygulandığı tesise, sürdürülebilir bir su yönetimi politikası hazırlayabilmesi için ilk veri sağlanmış, tesis bu çalışmanın sonucunda performansını ölçebileceği bir göstergeye sahip olmuştur.

2. LİTERATÜR ÖZETLERİ

2.1 Ayak İzi Kavramı

Rekabetin her geçen gün arttığı dünyamızda bölge ve ülkelerin; gelişmesi, büyümesi ve ilerleyebilmesi için kalkınması gerekmektedir. Kalkınmanın sürdürülebilirliğini sağlamak ise daha önemlidir. Hızla büyüyen nüfusa karşılık artan doğal kaynak tüketimi, doğal kaynakları tamamen tüketmeden gelecek nesillere aktarabilme düşüncesini doğurmuştur. Sürdürülebilir kalkınma olarak adlandırılan bu düşüncenin çevre boyutu ise oldukça önemlidir. Sürdürülebilirlik yaklaşımını farklı boyut ve konular üzerinden değerlendirmek mümkündür. Son zamanlarda sürdürülebilirlik kavramının disiplinler arası değerlendirilmesi sonucunda ekolojik ayak izi kavramı genişletilerek ayak izi ailesi kavramı oluşturulmuştur. İnsanoğlu üretim/tüketim faaliyetleri ile çevreyi kirletmekte ve doğal kaynakları kullanmaktadır. Kullanım ve kirletme, doğanın kendini yenileyebilme kapasitesini aşmakta ve doğa üzerindeki baskı her geçen gün artmaktadır. Sürdürülebilirlik ve doğa üzerindeki baskıyı hesaplamak amacı ile bazı muhasebe araçları oluşturulmuştur. Bu muhasebe araçlarından biri de “Ekolojik Ayak İzi” kavramıdır [20].

Ekolojik ayak izi, 1990’lı yılların başında Mathis Wackernagel ve William Rees tarafından geliştirilmiş bir ekolojik muhasebe ölçütüdür [21]. Ekolojik ayak izi, genel anlamıyla belirli bir nüfusun üretim/tüketim faaliyetleri sonucu doğa üzerinde bıraktığı yükü hesaplamak ve ekosisteme ne kadarının geri kazandırılması gerektiğini belirleyebilmek için geliştirilmiş bir yöntemdir (URL-1). Ekolojik ayak izi, doğal değerlerin sürdürülebilmesi için gerekli olan biyolojik üretken alan miktarını ortaya koymaktadır [22]. Ekolojik ayak izi kavramı diğer ayak izi kavramlarından daha genel bir yaklaşım sunmaktadır.

Çevresel ayak izleri, doğal kaynak tüketiminin kaynak bazında değerlendirilmesini sağlayarak her bir kaynağın sürdürülebilirliğini sağlamaktadır [23]. Ayak izleri ayrı ayrı çevresel, ekonomik ve sosyal ayak izleri ve bunların birleşimi olan çevresel, sosyal ve/veya ekonomik ayak izleri olarak ikiye ayrılır. “Ayak izi” kavramı, Rees, W. E. tarafından tanımlanan ekolojik ayak izi fikrinden ortaya çıkmıştır [21]. Bu tanımlamadan sonra, başka çevresel ayak izleri de ortaya çıkmıştır. Diğer ayak izi türleri direkt bir konu, bir sorun veya kaynağı incelemekte ve yaşam döngüsü

perspektifiyle belirli bir süreç, ürün veya aktivite ile ilişkili oluşan çevresel baskı sınıflarını göstermektedir. Karbon (KAİ, eng: CF), Su (SAİ, eng: WF), Çevresel (ÇAİ, eng: ENF), Azot (AAİ, eng: NF), Fosfor (FAİ, eng: PF), Biyoçeşitlilik (BAİ, eng: BF) ve Tarım arazi (TAİ, eng: LF) ayak izleri, sürdürülebilirlik ve sürdürülebilir kalkınma için gerekli oldukları için kilit ayak izleri olarak tanımlanmaktadır. Bunların yanı sıra, son zamanlarda farklı ayak izleri de geliştirilmiştir ve şu anda gözden geçirilmektedirler. Yeni geliştirilen ayak izleri için uygulama eksikliği vardır; bu nedenle daha kapsamlı incelemeleri gerekmektedir.

Karbon ayak izi, genellikle iklim değişikliğiyle ilgili belirli bir miktarda gaz emisyonunu belirten daha popüler çevre koruma göstergesidir. İnsanoğlunun üretim veya tüketim faaliyetleri ile ilişkilidir [24]. Genellikle bir sistemin tüm yaşam döngüsü boyunca yayılan karbondioksit (CO_2) ve diğer sera gazlarının toplam miktarını temsil eder ve fonksiyonel birim başına CO_2 eşdeğer kütle olarak ifade edilmektedir [25].

Ekolojik ayak izi, çevre üzerindeki insan talebinin bir ölçüsüdür ve bir insan nüfusunun tükettiği kaynakları sağlamak ve ilgili atıkları asimile etmek (özümseme) için gerekli biyolojik olarak verimli kara ve deniz alanlarının miktarını temsil etmektedir [26].

Çevresel ayak izi, doğal kaynakların insanlar tarafından ödeneklerini tanımlayan nicel bir ölçümdür [25]. İnsan faaliyetlerinin küresel çevre üzerinde nasıl farklı yükler ve etkiler yükleyebileceğini açıklayan bir kavramdır [27]. Ayak izi miktarı ne kadar büyük olursa, insan yaşamını desteklemek için o kadar fazla kaynak gerekmektedir.

Çevresel gösterge (indikatör), çevrenin durumuna ilişkin bilgi ve bakış açısı sağlamaya yardımcı olan sayısal bir değerdir. Göstergeler (indikatörler), zaman içinde izlenen çevresel koşulların nicel ölçümlerine veya istatistiklerine dayalı olarak geliştirilmektedir [28].

Ayak izi araçları, ayak izi hesaplamaları ve bu ayak izlerinin nasıl azaltılacağını göstermek için kullanılan araçlardır. En çok kullanılan araçlar, özellikle KAİ [29], Ekolojik aya izi, su ayak izi, azot ayak izidir [30]. Diğer araçlar, Genel Cebirsel Modelleme Sistemi (GCMS) ve Grafik Modelleme Tarafından Sağlanan Süreç Sentezi (GMTSSS) gibi optimizasyon çerçeveleri ve matematiksel programlama araçları ve

PNS çözümü gibi süreç grafiklerine dayalı yapısal optimizasyon araçlarıdır [25, 31, 32]. Ayrıca, Çevresel Performans Strateji Haritasını oluşturarak ayak izi ve maliyeti hesaplayan [33], sürdürülebilir proses indeksini hesaplayan SÇAY on Excel [34, 35], bölgesel yenilenebilir enerji ağlarının sürdürülebilirlik değerlendirmesini yapan bölgesel optimize edici (RegiOpt) [36] araçlar mevcuttur.

Ayak izi ailesi, gezegen üzerindeki insan baskılarını farklı açılardan takip edebilen bir dizi göstergedir [37]. Bugüne kadar geliştirilen karbon ayak izi, ekolojik ayak izi, SAİ ve enerji ayak izi olan temel ayak izi kategorilerini temsil etmektedir ve iklim, gıda, su ve enerji güvenliği ile ilgili bir kavramdır [38].

Yaşam döngüsü analizi, süreçler, ürünler veya faaliyetlerle ilişkili emisyonları, kaynak tüketimlerini ve çevresel-sağlık etkilerini ölçmek için yapılandırılmış, kapsamlı, uluslararası standartlarda bir araçtır. Genellikle "beşikten mezara" analiz veya açık döngü olarak adlandırılır. Tüm nakliye ve dağıtım adımları dahil olmak üzere, kaynakların üretim, kullanım ve bakımı süresince çıkarılması ve işlenmesinden geri dönüşüm veya bertarafa kadar sistemin tüm yaşam döngüsünü hesaba katmaktadır [39]. Yaşam döngüsü analiz ilkesi ve çerçevesi, hedef ve kapsam tanımı; yaşam döngüsü envanteri, yaşam döngüsü etki değerlendirmesi ve çıkarım olmak üzere dört aşamaya ayrılmıştır.

Sürdürülebilir kalkınma, insanların ve toplulukların, ekonomik, sosyal ve çevresel sistemlerin dayanıklılığını sağlarken, sürdürülebilir bir süre boyunca tam potansiyellerini gerçekleştirmelerini sağlayacak fırsatlar yelpazesini iyileştirme sürecidir [40]. Sürdürülebilir kalkınma, bugünün ihtiyaçlarını gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneklerinden ödün vermeden karşılayan kalkınmayı temsil etmektedir [41].

Su Ayak İzi, sanal su konseptiyle yakından bağlantılı bir kavramdır [42]. Ayrıca, insan tüketimi için gerekli su hacmi açısından doğal sermayenin tahsis edilmesini gösteren bir kavramdır [43]. SAİ_{Yeşil}, SAİ_{Gri}, SAİ_{Mavi} bileşenlerinden oluşmaktadır. SAİ_{Mavi}, yüzey ve yeraltı suyunun tüketimini; SAİ_{Yeşil}, toprakta toprak nemi olarak depolanan yağmur suyunun tüketimini ve SAİ_{Gri}, kirliliği ifade etmektedir ve mevcut su kalite standartlarına bağlı olarak kirlетici yükünü özümsemek için gereken tatlı su hacmi olarak tanımlanmaktadır.

Sanayi devriminden bu yana antropojenik etkiler ile kontrolsüz ve bilinçsiz salınan gazlar iklim değişikliği gibi önemli çevresel problemlere neden olmuştur. Dünyada küresel ısınma ve iklim değişikliği tehdidine karşı düşük karbonlu ekonomiye geçmeye yönelik adımlar atılmakta ve çalışmalar yapılmaktadır [44]. İklim değişikliği ve atmosferde biriken sera gazı problemleri KAİ yaklaşımını düşündürmüştür. KAİ, belirli bir insan faaliyeti tarafından atmosfere salınan başta karbondioksit olmak üzere sera gazlarının miktarıdır [45]. KAİ, geniş bir değerlendirme olabileceği gibi bir bireyin, bir ailenin, bir işletmenin ve ülkenin faaliyetleri için uygulanabilir. KAİ iki ana sınıfta değerlendirilmektedir. Bunlar; evsel enerji tüketimi ve ulaşım gibi faaliyetler kaynaklı fosil yakıtların yanması sebebiyle ortaya çıkan doğrudan CO₂ emisyonlarının ölçüsü olan doğrudan ayak izi, yaşam döngüsü boyunca kullanılan tüm ürünlerin imalatı ile atık haline ulaşmalarına kadar ki süreçler kaynaklı dolaylı CO₂ emisyonlarının ölçüsü dolaylı ayak izi olarak tanımlanır (URL-2). Günümüzde, iklim değişikliğine etkisi olan faktörlerden biri de AAT'lerdir [46]. AAT'lerde sera etkisi; uygulanan procesten, enerji tüketiminden, tesis içinde kullanılan kimyasallardan, çamur arıtımından ve bakım faaliyetlerinden oluşmaktadır. AAT'lerde başlıca sera gazı emisyonları; (CO₂), metan (CH₄) ve nitroz oksit (N₂O) emisyonlarıdır [47]. Daha sonra yapılacak çalışmalarda SAİ kavramı ile beraber KAİ kavramı da tartışılabilir ve uygun arıtım yöntemleri önerilebilir.

Ayak izleri ailesinde SAİ kavramı, doğal hayatın sürdürülebilirliği için temel element olan su ile ilgilenmektedir. Diğer ayak izleri ile kıyaslayacak olursak SAİ, çevre/doğa üzerinde su kullanımı ve su tasarrufu ile ilgili en net sonuçlara ulaşarak suyun sürdürülebilirliği için stratejiler uygulamayı hedefler. Diğer ayak izi kavramlarında genellikle kullanım kaynaklı kirlilik değerlendirilmektedir. SAİ kavramında ise su kaynağının kullanımı ile oluşan kirlilik ile beraber aslında kullanılan suyun sınırlı olması ve tasarrufu gerektiği üzerinde durulmaktadır. Su üretim, tüketim ve yaşamsal faaliyetlerin tümünde direkt kullanılan en önemli kaynaktır.

2.2 Su Ayak İzi Kavramı

Dünya her geçen gün sanayileşmenin, endüstrileşmenin etkisi ile gelişmekte, bu gelişmeyi refah artışına bağlı olarak nüfus artışı takip etmektedir. Böylelikle artan nüfusun ihtiyacını karşılayabilmek adına üretim ve tüketimdeki artış da kaçınılmaz hale gelmektedir. Yapılan çalışmalar neticesindeki öngörülere göre mevcut su

kaynakları sürekli olarak gelişen yeni dünyanın ihtiyaçlarını karşılamakta yetersiz kalmaya başlayacaktır. Bu öngörülen yetersizliğe bir de mevcut kaynakların antropojenik sebepler ile tahribatı da eklenecek olursa ilerisi için stresli günlerin bizleri beklediğini söylemek mümkündür. Ülkemizde kişi başına düşen yıllık kullanılabilir su miktarı 1.350 m³ civarındadır ve bu miktarın 2030 yılındaki tahmini nüfus göz önüne alındığında 1.000 m³ civarında olacağı ön görülmektedir (URL-3). Bu değerler gösteriyor ki ülkemiz su zengini bir ülke olmamakla beraber su stresi yaşayan bir konumundadır. Suyun, canlı hayatı ile hayatın sürdürülebilirliği için önemi devamlı olarak gündemde olan ve bireyler, toplumlar, işletmeler tarafından konuşulan bir konu olmasına karşın, konu sorumluluk almaya geldiğinde maalesef aynı hassasiyet gösterilmemektedir. SAİ kavramı tam da ‘Elimizden ne gelir ki?’ denilen noktada elimizden neler gelebileceğini göstermek konusuna rehberlik edebilecek bir yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır.

SAİ kavramı, ilk kez Arjen Hoekstra tarafından 2002 yılında Birleşmiş Milletler Eğitim, Bilim ve Kültür Kurumu (BMEBKK)’ de ortaya konulmuştur [48]. Uzun yıllardır insanoğlu suyun sadece doğrudan kullanıldığını kabul etmiştir ancak Hoekstra tarafından SAİ kavramının ortaya atılması ile beraber aslında görülmeyen bilinmeyen ama kullanılan suyun varlığı da konuşulmaya başlanmıştır [48]. SAİ; bir ürün veya hizmetin üretim, tedarik ve dağıtım süreçlerinde uğradığı bütün işlemlerde ihtiyaç duyulan su miktarı ile bunun türlerini ifade etmektedir. Su tüketiminin sadece musluklardan akan sudan ibaret olmadığını, kullanılan her ürün ve/veya her hizmetin belli bir su tüketimine sebep olduğunu savunmaktadır. Bu kavramdan önce giymiş olduğumuz bir kazağın su tüketimine sebep olduğu düşünülmemiştir. Mevcut su kaynaklarının üzerinde her geçen gün artan baskı ve bu kaynakların hepsinin kullanılabilir olmadığı düşünüldüğünde plansız su kullanabilme lüksüne sahip olmadığımız söylenebilir.

SAİ kavramı doğrultusunda, su yönetim politikaları ve stratejiler geliştirerek suyun sürdürülebilirliği sağlanabilir. Bu kavram yakın zamanda popüler olan ve üzerinde henüz yeni yeni çalışmalar yapılan bir kavramdır. Başlangıçta bir ülkeyi bölgeyi yani geneli temsil eden SAİ çalışmaları yapılmaktaydı. Kavramın popülaritesinin artması ile beraber SAİ hesaplamaları tedarik zincirlerini incelemek adına özel sektörler, prosesler, iş kolları ve ürünler üzerinde de yapılmaya başlanmıştır [48]. SAİ kavramı

ile beraber suyun akıllıca kullanımı hedeflenmiştir. SAİ çalışmaları ile ele alınan ürünün/hizmetin ne kadar su tüketimine neden olduğu, ne kadar suyu kirlettiği belirlenebilir. Elde edilen bu bilgiler ışığında ürünün/hizmetin işleyişi göz önünde bulundurularak farklı yaklaşımlar önerilebilir, tüketim ve kirlilik azaltılabilir. Yapılan çıkarımlar neticesinde uzun vadeli planlar ile geleceğe yatırım yapılabilir. Yaklaşmakta olan su kıtlığı, kirlilik ve bunların ekolojik dengelere olan etkisinin azaltılabilmesi için bireylerin, şirketlerin, yönetimlerin ve ülkelerin uygulayabileceği SAİ çalışmaları kurtarıcı bir yöntem olabilir. SAİ kavramını benimsemek, kavram doğrultusunda sürdürülebilir stratejiler geliştirmek için bu kavramın detaylı olarak tanınması ve benimsenmesi gerekmektedir.

SAİ kavramı incelenirken sık sık Sanal Su kavramı ile de karşılaşılmaktadır. SAİ kullanılan suyu sadece hacimsel olarak ifade etmez, kullanılan suyun türüne, kaynağına ve nerede kullanıldığına dair çok kapsamlı bir inceleme sunar. SAİ, Sanal Sudan ayıran en belirgin özellik kapsamıdır. SAİ, bir ürün veya hizmetin çok boyutlu ifadesidir [49]. SAİ bileşenlerine göre; $SAİ_{Gri}$, $SAİ_{Mavi}$ ve $SAİ_{Yeşil}$ olmak üzere üçe ayrılmaktadır [7]. $SAİ_{Mavi}$; bir ürün veya hizmet üretmek için kullanılan toplam yeraltı ve yüzeysel su miktarını ifade ederken; $SAİ_{Yeşil}$ bir ürün veya hizmetin üretimi için kullanılan toplam yağmur suyu miktarını ifade eder. $SAİ_{Gri}$ ise bir ürün veya hizmeti üretirken kirlatilen tatlı su kütleini alıcı ortam kalite standardına asimile etmek için gerekli olan tatlı su miktarıdır. $SAİ_{Mavi}$ ve $SAİ_{Yeşil}$ kullanılan su kaynağının birer göstergesi, $SAİ_{Gri}$ kirliliğin göstergesidir [50].

2.3 Sanal Su Kavramı

1992 yılında Dublin’de düzenlenen ‘Su ve Sürdürülebilir Kalkınma’ konferansının sonuç bildirgesi, suyun ‘‘Ekonomik Mal’’ olarak değerlendirilmesi gerektiğine dayanak teşkil etmiş ve bu konferans su için önemli bir dönüm noktası olmuştur [51]. Suyun hayati öneminin dışında ekonomik ve sosyal alandaki aktif rolü göz ardı edilemeyecek kadar büyüktür. İlerleyen yıllarda artan su sıkıntıları beraberinde, yeterli/kullanılabilir su mevcudiyeti bulunan ülkeler için pozitif ayrıcalıklar getirecektir. Dünya üzerindeki mevcut su kaynaklarının hepsi tatlı su değildir ve tatlı suların hepsi kullanılabilir formda değildir. Bu kaynakların ülkesel hatta ülke içi bölgesel dağılımları da eşit değildir. Bunun aksine dünyanın her noktasında bir ürün üretmek, bir hizmet vermek için su kullanımı gerekmektedir. Her bir ürünün, işlemin

akışında su kullanıldığı göz önünde bulundurulması gereken bir gerçek olmakla beraber “Dolaylı Su Kullanımı” olarak ifade edilen kullanımının, “Doğrudan Su Kullanımına” kıyasla çok daha ciddi hacimlerde olduğu yapılan çalışmalarda görülmüştür. “Sanal Su”, ürün veya hizmetin arkasında bulunan doğrudan kullanımın haricinde dolaylı kullanılan su miktarını da ifade ettiği için saklı su, gizli su veya gömülü su olarak çeşitli şekillerde de adlandırılmaktadır. Sanal su kavramı ile SAI kavramı sürekli olarak beraber anılan ancak birbirlerinden farklı kavramlardır. Sanal su; suyun sadece hacimsel olarak kullanımı ile ilgilenmektedir. SAI ise kullanılan suyun hacmi ile beraber kaynağını da sorgulamaktadır. Yani SAI olaya kalite perspektifinden bakan daha kapsamlı bir yaklaşımdır. Dolayısıyla bu iki kavram birbiri ile karıştırılmamalıdır.

Sanal su kavramı, 1990’lı yılların başında Ortadoğu ülkeleri su sorunlarında su ticaretinin bir çözüm olabileceği seçeneği üzerine yapılan çalışmalar sırasında ilk kez Profesör J.A. Allan tarafından ortaya atılmıştır [52]. Allan, ürün veya hizmetlerin yapılan ticaretlerle beraber düşük miktarda fiziksel suyun aktarıldığını ancak bu ürünlerin içerisinde bulunan sanal su miktarlarının çok fazla olduğunu belirtmiştir [53]. Her ülkenin kullanmış olduğu ürünün Sanal Su miktarı, ürünü üretebilmek için gerekli su miktarına bağlı olarak değişmektedir. Aynı ürün farklı ülke ve bölgelerde farklı sanal su miktarı oluşturacaktır. Ülkeler arası yapılan ürün ithalat ve ihracatı ile beraber ürünlerin içerisinde saklı bulunan sanal suyun da ithalat ve ihracatı yapılmaktadır. Bu durum suyun çevresel önemi kadar ekonomik ve sosyal açıdan önemini de göstermektedir. Ülkeler su varlığı ve kullanılabilirliği kadar ürün üretebilirler. Suyun olmadığı yerde üretim, enerji ve ekonomik sürdürülebilirlik düşünülemez. Bu varlık ve kullanılabilirliği konusunda yaşanacak sıkıntılar ülkeyi ekonomik ve sosyal anlamda etkileyecek dışa bağımlılığı arttıracak veya en kötü senaryoyla tam bağımlı hale getirebilecek kadar önemli bir etkidir. Günümüz korona virüs hastalığını (COVID-19), bu hastalığa karşı üretilen ve ciddi miktarlarda ihracatı gerçekleşen aşı durumunu örnek olarak ele alabiliriz. Ülkeler arası ilişkilere ve aşığı ihraç eden ülkenin inisiyatifine bağlı olarak gönderilen aşı miktarları, ileri zamanlarda sanal su ticareti için de gerçekleşebileceği yorumu yapılabilir. Bu doğrultuda dışa bağımlılıklarını azaltmak adına ülkeler, işletmeler, kurumlar ve hatta bireyler sanal su kavramı ile sürdürülebilir su planlamaları ve stratejileri geliştirme çalışmaları yürütmeye başlamışlardır.

2.4 ISO 14046 Uluslararası Su Ayak İzi Standardı

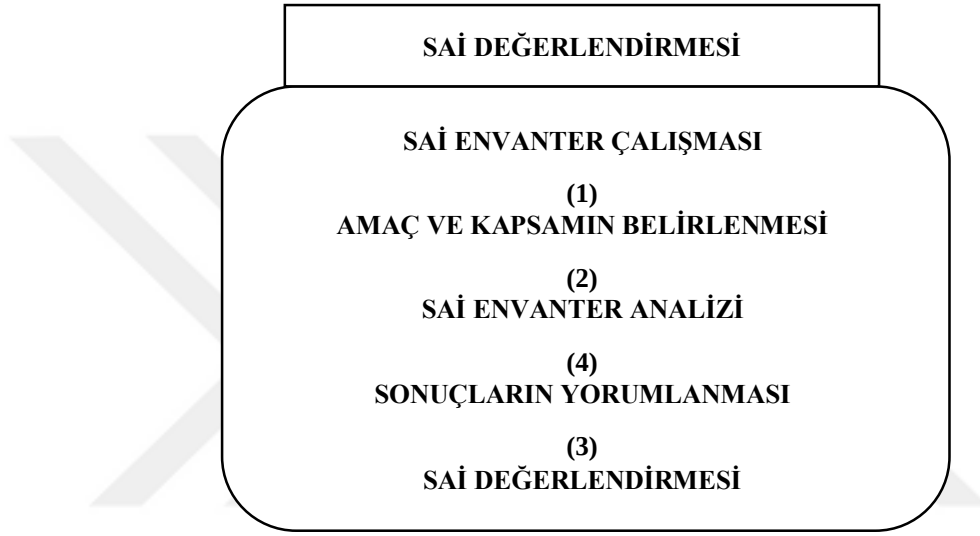
SAİ Değerlendirmesi için Su Ayak İzi Ağı (SAİA) Değerlendirme Kılavuzu ve ISO 14046 Standardı (SAİ Standardı) olmak üzere iki yöntem karşımıza çıkmaktadır. İşletmeler veya kurumlar; pazarlama, kıyaslama, su yönetimi ve sürdürülebilirlik gibi farklı amaçlar doğrultusunda SAİ hesabı yaparak SAİ'lerini beyan edebilirler. İşletmelerin ve/veya kurumların bu beyanları yaparken değerlendirmeye kılavuz edecek, diğer işletmeler ile kıyaslamaya kolaylaştıracak ve herkes tarafından kabul görececek bir yöntemin belirlenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde her işletme, her ürün için farklı yöntemlerin kullanılması ile bilgi kirliliği ve kıyaslama zorluğu oluşacak bu durum iyileştirme çalışmalarına etkin fayda sağlamayacaktır. Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) bu doğrultuda 2014 yılında SAİ Değerlendirmesi ile ilgili bir standart geliştirmiştir.

ISO 14046:2014 SAİ Standardı; yaşam döngüsü değerlendirmesine dayalı olarak kurumların, işletmelerin ve ürünlerin SAİ değerlendirmesiyle ilgili gereklilik, ilke ve kılavuzları açıklayan bir standarttır [54]. Bu uluslararası standarda göre, SAİ değerlendirmesi sadece su üzerine etkileri ile beraber çevresel etki değerlendirmesi de dikkate alınmalı ve yaşamsal döngü analizi prensibi ile hesaplanarak raporlanmalıdır. Bu nedenle bu standart ile çalışırken sıklıkla ISO-14040 ve ISO-14044 Hayat Boyu Değerlendirme Standartları da karşımıza çıkacaktır [55]. Hayat Boyu Analiz (HBA), Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ve Yaşam Boyu Analiz gibi farklı şekillerde de adlandırılabilmektedir. Standart; ilkeler, metodoloji, raporlama ve eleştirel gözden geçirme bölümlerini kapsamaktadır. ISO 14046 SAİ değerlendirmesi;

- ✓ Su ile ilgili potansiyel çevresel etkilerin değerlendirilmesi,
- ✓ Yaşam döngüsünün her bir aşamasındaki ürün/hizmetin suya etkisini azaltabilmek adına yapılacakların belirlenmesi,
- ✓ Suyla ilgili stratejilerin risk yönetimi ve suyun çevresel etkileri ile ilgili paydaşların bilgilendirilmesi,
- ✓ SAİ raporları ile ilgili bilimsel kaynaklara dayalı güvenilir bilgi sağlanması gibi avantajları sağlamaktadır [54].

ISO 14046 Standardı; dört ana adımdan oluşmaktadır. Bu yöntem, SAİ Değerlendirmesi için standart ve çeşitli alternatifler sunan çok seçenekli bir çalışmadır.

Bu yöntemle SAİ Değerlendirmesi yapılırken; hedef net bir şekilde tanımlanmalıdır. Çalışmanın nerde yapılacağı, neyi hedef aldığı, HBA değerlendirmesinin yapılıp yapılmayacağı vb. birçok konu net ve açık bir şekilde belirtilmelidir. Eğer kurum/işletme sadece SAİ Envanter Çalışması yapacak ise sürece Etki Değerlendirmesini dahil etmeyecektir. Etki Değerlendirmesini de dahil ederek HBA mantığı ile ilerlenirse geniş kapsamlı bir çalışma yapılmak isteniyor denilebilir ve bu çalışma SAİ Değerlendirmesi olarak adlandırılır. Bu işleyişin görsel anlatımı Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. SAİ değerlendirme aşamaları (URL-4).

HBA; ürün ya da hizmetin ortaya konulabilmesi için gerekli hammadde üretiminden, ürünün üretilmesi, lojistiği ve atık haline gelerek bertaraf edilmesine kadar ki tüm akışı incelemektedir. HBA çalışması genellikle kurum ve işletmelerin işleyişleri esnasında çevreye en çok zararı bulunan bölümleri belirlenerek bunlarla ilgili iyileştirme çalışmalarının gerçekleşmesi için yapılmaktadır [55]. HBA’nın amacı tanımlanırken, çalışmanın gerçekleştirilme nedeni, ilerleyişi ve sınırları açıkça belirtilmelidir. Konunun amaç ve kapsamı açıklandıktan sonra envanter analizi ve onu takiben etki analizi yapılır. Süreç boyunca her adım soncunda yapılan yorum başka adımın bilgi girdisi niteliğindedir. Yorumlama, her bir adım için ayrı yapılmaktadır. HBA çalışması, çalışmanın sınırlarına göre yani çalışmanın nerede başlayıp nerede bittiğine göre adlandırılmaktadır. Burada, elde edilen hammadde beşik, hammaddenin işlenecek işletmeye getirilmesi kapı, kullanım ömrü dolarak işlevini bitirmiş artık kullanılamayan ürüne mezar denilmektedir. Bir ürünün tüm döngülerini kapsayan

çalışmaya beşikten mezara, bertaraf edilen ürünün geri kazanılması ise beşikten beşiğe olarak tanımlanmaktadır [55].

2.5 Su Ayak İzi Değerlendirme Kılavuzu

SAİ Değerlendirme Kılavuzu, SAİA tarafından geliştirilen küresel bir standarttır. SAİA yönteminde doğrudan ve dolaylı su kullanımı ile bunların gri, mavi ve yeşil bileşenleri değerlendirilir. SAİA yöntemi de ISO 14046 gibi dört aşamadan oluşmaktadır. Bunlar; amaç ve kapsamın belirlenmesi, SAİ hesaplanması, SAİ sürdürülebilirlik değerlendirmesi ve sonuçların yorumlanmasıdır. Kamusal, coğrafi bir bölge, bir belediye, ülke, ürün, işletme veya işletmedeki herhangi bir proses baz alınarak genel veya özel her türlü değerlendirme için kullanılabilir bir yöntemdir. Bu doğrultuda öncelikle çalışılmak istenen konu belirlenir. Belirlenen konunun ISO 14046’da olduğu gibi hedef ve kapsamı net bir şekilde tanımlanır. Bu aşamayı takiben hesaplama aşamasına geçilir ki bu aşama verilerin toplanıp SAİ hesabının yapıldığı aşamadır. Bu bölümdeki her bir detay ve bu detayların sınırı ilk adıma bağlıdır. Hesaplama aşamasının tamamlanması ile elde edilen sonuçlar doğrultusunda çalışma; sosyal, ekonomik ve çevresel boyutları ile sürdürülebilirlik açısından değerlendirilir. SAİA Değerlendirme Kılavuzu ve ISO 14046 arasındaki en önemli fark işte bu 3. maddedir. ISO 14046 yönteminde bu bölümde bir etki değerlendirmesi ve tercihe bağlı olarak HBA değerlendirmesi yapılmaktadır ve bu yöntem ile yapılan çalışmada sadece suyun çevresel etkisi ile ilgilenmekte, sosyal ve ekonomik boyut ele alınmamaktadır. Ancak SAİA yönteminde, 3. Aşamada sürdürülebilirlik değerlendirmesi ile SAİ’nin çevresel, ekonomik ve sosyal boyutu değerlendirilmekte bunların olası etkileri ve sürdürülebilirlikleri ile ilgili yorumlar yapılmaktadır. ISO 14046’ya göre bir diğer fark ise SAİA yönteminde SAİ_{Gri}, SAİ_{Mavi} ve SAİ_{Yeşil} dikkate alınarak bir değerlendirme yapılmaktadır. SAİA yönteminin dört aşamasında şu bölümler ele alınmaktadır [56];

- ✓ 2. Bölüm: SAİ değerlendirmesinde hedefler ve kapsam belirlenirken dikkate alınması gereken önemli konuları,
- ✓ 3. Bölüm: SAİ muhasebesi için tanım ve yöntemleri,
- ✓ 4. Bölüm: Sürdürülebilirlik değerlendirmesi için yönergeleri,
- ✓ 5. Bölüm: Su politikasında dikkate alınacak SAİ müdahale seçenekleri,
- ✓ 6. Bölüm: SAİ değerlendirme sınırları tartışmak,
- ✓ 7. Bölüm: Ele alınması gereken başlıca sorunlar bunların tanımı ve tartışması,

✓ 8. Bölüm: Sonuçlar.

Bu yöntemde $SAİ$; $SAİ_{Gri}$, $SAİ_{Mavi}$ ve $SAİ_{Yeşil}$ toplamından oluşmaktadır.

2.6 Su Ayak İzi Bileşenleri

2.6.1 Gri su ayak izi

Kirlilik ile ilişkilendirilen $SAİ_{Gri}$, bir ürün veya hizmetin üretim ve tedariki boyunca uğramış olduğu bütün işlemlerde kirletmiş olduğu su kütesinin, kabul edilebilir alıcı ortam standartlarına asimile etmek için gereken tatlı su miktarıdır. Yani $SAİ_{Gri}$ bu noktada $SAİ_{Yeşil}$ ve $SAİ_{Mavi}$ 'den farklı olarak su kalitesini temsil etmektedir. $SAİ$ bileşenlerinin kullanım miktarı sektörden sektöre hatta aynı sektör içerisindeki farklı şartlara göre değişmektedir. Tarım ve hayvancılık gibi sektörlerle bakacak olursak buralarda $SAİ_{Gri}$ oluşumu $SAİ_{Yeşil}$ ve $SAİ_{Mavi}$ 'ye göre daha düşüktür. Endüstri ve/veya evsel kullanım sonucu oluşan yüksek kirlilik yüküne sahip atıksuların arıtıldığı AAT ile ilgili yapılan $SAİ$ çalışmalarında $SAİ_{Gri}$ tesis performansını değerlendirmede incelenecek öncelikli bileşendir. $SAİ_{Gri}$ hesaplamaları genellikle, alıcı ortam için kalite standartları yani mevzuatlarca izin verilen maksimum konsantrasyonlar esas alınarak yapılır [56].

2.6.2 Mavi su ayak izi

$SAİ_{Mavi}$ bir ürün veya hizmet için yeraltı ve yüzey su kaynaklarından çekilen tatlı su miktarıdır. $SAİ$ hesaplamaları, su kullanımını baz alarak hesaplandığı için sisteme tekrar dönen su yani kaynağa tekrar dahil olan su hesaba katılmaz. $SAİ_{Mavi}$ kapsamında değerlendirilen ve kullanılan su aslında doğrudan kullanım haricinde dolaylı kullanımı da ifade etmektedir. Bir mal veya hizmetin üretimi esnasında direkt olarak proste kullanılan ve yaşamsal faaliyetler için kullanılan su doğrudan kullanım olarak değerlendirilmektedir. Doğrudan kullanımın haricinde $SAİ_{Mavi}$ Değerlendirmesinde hesaba katılması gereken dolaylı kullanımlar da mevcuttur. Proseslerden buharlaşan, proseslerde kullanılan ürün ve ekipmanların içinde dolaylı olarak bulunan ve proseslerden kayıp edilen suyun, doğru bir değerlendirme yapabilmek adına $SAİ_{Mavi}$ hesabına dahil edilmesi gereklidir.

2.6.3 Yeşil su ayak izi

Bir ürün/hizmetin üretimi için kullanılan toplam yağmur suyu miktarını ifade etmektedir. $SAI_{Yeşil}$ yağmur suyu miktarının yer altı suyuna karışan kısmı haricinde toprak veya toprak üstünde bulunan kısmı ifade etmektedir. $SAI_{Yeşil}$ tarım, hayvancılık ve tekstil gibi sektörlerde önemli bir orana sahiptir.

2.7 Su-Enerji İlişkisi

Su ve enerji, milli güvenlik ve sürdürülebilir kalkınma için çok önemli ve birbirleriyle yakından bağlantılı iki faktördür. Son yıllarda, düzenli ve temiz enerji kullanımı için artan rekabet Su-Enerji ilişkisine olan ilgiyi arttırmış bu konu ile ilgili çalışmalar önem kazanmıştır. Su ve Enerji sürekli döngü içerisinde olan birbirinden ayrılmaz iki kaynaktır [57]. Suyun temini, dağıtımı, kullanımı ve kullanım sonrası oluşan atıksuyun arıtımı gibi her bir adımda farklı türde enerji türlerinin kullanımı mevcuttur [58]. Aynı şekilde enerji kaynaklarını kullanılabilir forma getirebilmek için her zaman su kullanımına ihtiyaç vardır [59]. Enerji temini için işleme, soğutma ve dağıtım gibi bütün süreçler yoğun su kullanımı gerektirmektedir. Artan enerji ihtiyacını karşılamak, enerji kullanım amacına bağlı olarak kullanım sonrası çevre üzerindeki etkisi ve enerji ihtiyacını karşılayabilmek için sınırlı su kaynakları gibi pek çok sebep nedeniyle enerji ile ilgili yeni yaklaşımlar aranmaktadır. Enerji temini için yenilenebilir enerji gibi alternatiflerin arandığı bu süreçte SAI değerlendirmelerinin de sürece dahil edilmesi, mevcut su sıkıntılarının yönetimi için önemli bir adım olacaktır. Su olmadan enerjiye, enerji olmadan suya ulaşmak mümkün değildir. Bu iki kaynak arasındaki bağlantı göz ardı edilemeyecek kadar önemlidir. Sonuç olarak, sürdürülebilirlik ile ilgili geniş değerlendirmelerin yapıldığı bir çalışma olan SAI çalışmasında enerji verimliliğini arttırmak ve su yönetimini iyileştirmek adına bu bağlantı da hesaba katılmıştır.

2.8 Atıksu Arıtma Tesisinin Su Ayak İzi

Üretim ve tüketim süreçlerinin hepsinde su kullanımı vardır. Dolayısıyla su kullanımı sonucunda evsel ve/veya endüstriyel atıksu oluşumu söz konusudur. Kirlilik yükü fazla olan atıksuların direkt olarak doğal sisteme deşarjı geri dönüşü olmayan çevresel tahribatlara sebep olmaktadır. Özellikle yeni düzenlemeler ve mevzuatlar ile beraber getirilen sınırlamalar bu tahribatı önleyici niteliktedir. İşletmelerin çevresel

sürdürülebilirlik bilinci ile faaliyet göstermeleri veya mevzuatlarca belirlenen deşarj limitlerine uymaması sonucunda uygulanan cezai işlemler neticesinde atıksu arıtma tesisleri her geçen gün önem kazanmaya başlamıştır.

Geleneksel atıksu arıtımı; kimyasal ve enerji tüketen ve farklı prosesler ile yan ürünler (esas olarak katı atıklar ve gaz emisyonları) oluşturan atıksuyun arıtılmış suya dönüştürüldüğü bir endüstriyel faaliyet olarak kabul edilir [7]. Böylece su emisyonlarının doğal sistem üzerindeki olumsuz etkisi azalmaktadır. AAT'ler sadece belediye kaynaklı kullanım gerektiren tesisler olmaktan çıkmış atıksu kirliliğine sebep olan her işletmenin bünyesinde bulundurması gereken tesisler haline gelmiştir. Endüstriyel tesisleri düşünecek olursak, genellikle Organize Sanayi Bölgesi (OSB) olarak adlandırılan bölgelerde toplanan bu işletmeler oluşturdıkları atıksu ve atıksuyun kirlilik yüküne bağlı olarak deşarjlar yapmaktadırlar. Endüstriyel tesislerin, atıksu kirlilik yükleri yasal deşarj sınırlarının altında ise kanalizasyon hattı vasıtasıyla OSB arıtma tesislerine, üzerinde ise de atıksuyu kanalizasyon sistemine deşarj etmeden önce kendi bünyelerinde arıtım yapma zorunlulukları vardır. Mevzuatlarca getirilen kanalizasyon hattı ya da alıcı ortama deşarj limitlerinin her geçen gün daha da katılaşması sonucu mevcut tesisler yasal sınırlarını sağlamakta yetersiz kalabilmektedir. İhtiyaçları karşılamak adına yeni kurulacak veya yeniden planlanacak tesislerde SAİ kavramını benimsetmek, önemli su tasarruflarına olanak sağlayacaktır.

SAİ Değerlendirmesi kavramının yeni yeni konuşulduğu bu dönemlerde, SAİ hesabı daha çok ülke ve bölge bazlı çalışmalarda kullanılmıştır. Bununla beraber tarım ve tarım ürünleri ile ilgili çok fazla çalışma yapılmıştır. Kavramın tanınması ve amacının daha da iyi anlaşılması ile beraber SAİ kavramı yeni alanlar için de değerlendirilmeye başlamıştır. AAT'ler belli üretim/işlem faaliyetleri sonucu bünyelerine gelen atıksu kirlilik yüklerini alıcı ortam deşarj standartlarına düşürmek için arıtım yapan tesislerdir. Dolayısı bu tesislerde kirliliği asimile etmek ve proses işleyişi için yüksek hacimlerde su kullanılmaktadır. Bu durum su ve enerji tasarrufu için iyileştirme çalışmaları yapma ihtiyacı doğurmuştur. Gelişen teknoloji, artan çalışmalar ile su kıtlığı senaryoları göz önüne alındığında AAT'lerde atıksuyun sadece yasal limitlere uygun bir şekilde alıcı ortamlara deşarjından ziyade atıksuyun tekrar tesis içi proseslerde kullanılabilir kalitede arıtılması gibi alternatif çözümler hedeflenmektedir. Önceki yıllarda suyun sadece arıtılarak deşarj edilmesi bir çözüm olarak görülürken

artan su sorunları, insanlığı yeni ve kalıcı çözümler üretmeye mecbur kılmıştır. Mevcut sorunların azaltılması ve önlenmesi için SAİ yaklaşımı önemli bir atılım olacaktır. Öyle ki arıtım ile doğaya büyük katkı sağlayan AAT’lerde yapılacak SAİ çalışmaları ve bu çalışma neticesinde belirlenecek yönetim ve sürdürülebilirlik stratejileri ile beraber doğaya daha da büyük katkısı sağlanacaktır.

AAT’lerde yapılacak SAİ değerlendirmeleri ile yoğun su ve enerji kullanımına uygulanabilir çözümler getirilebilecektir. Tesisin tasarlanmasında veya iyileştirme amacı ile sonradan revize edilmesi aşamasında yapılan hesaplar ile hangi prosesin ne kadar su kullandığı, bunun alternatifleri düşünülerek sürdürülebilirlik için önemli adımlar atılabilecektir. Böyle çalışmaların artması ile beraber bir kıyaslama ortamı oluşturularak daha sürdürülebilir stratejiler geliştirilebilecektir.

2.9 Su Ayak İzi Çalışmalarının Karşılaştırılması

2.9.1 Su ayak izi yöntemlerine, veri tabanlarına ve araçlarına genel bakış

AAT’ler kirlilik gideren tesisler oldukları için alıcı ortamda oluşabilecek SAİ_{Gri} miktarının ciddi oranda azalmasına sebep olmaktadır. Atıksuların arıtılmadan doğrudan alıcı ortama deşarjı, mevcut su kıtlık senaryoları da düşünülecek olursa yüksek miktarlarda SAİ_{Gri} oluşumuna ve alıcı ortam kalitesinde önemli tahribatlara sebebiyet verecektir. SAİ Değerlendirmesinde; AAT için hangi SAİ bileşenlerinin kullanıldığı, bunların miktarı ve etkisi göz önünde bulundurularak alternatifler planlanabilecektir. Bu planlar doğrultusunda sürdürülebilir yöntemler ile su sıkıntılarına bir çözüm önerilebilir.

SAİ Değerlendirmesi farklı sektörler, farklı ürünler ve bireyler için yapılabilecek bir değerlendirmedir. SAİ ile ilgili çalışmalar, bu kavramın yeni tanındığı dönemlerde genellikle ülke ve bölge tabanlı olarak yapılmaktaydı. Sanal su ticaretinin gündeme gelmesi ile beraber tarımsal ürünlere yönelik SAİ değerlendirmeleri popülerlik kazanmıştır. Tarımsal ürünler ve bunların sanal su içerikleri merak uyandıran bir konu haline gelmiştir. SAİ kavramı toplumun büyük bir kısmı tarafından tanınması ile beraber, çalışmalara yeni iş kolları, enerji türleri, kuruluşlar ve ürün değerlendirmeleri de eklenmeye başlamıştır. İnsanların ‘‘ben ne kadar SAİ’ye sebep oluyorum?’’ sorusu bu değerlendirmeyi her sektör için uygulanabilir kılmaya başlamıştır.

SAİ ile ilgili çeşitli çalışmalarla beraber, elektrik ve enerji üzerine de çok fazla çalışma yapılmaktadır. Örneğin; Gerbens-Leenes ve Hoekstra tarafından yapılmış çalışmada tedarik zincirinin ilk halkasında bulunan, birincil enerji taşıyıcılarının SAİ değerlendirmesi SAİA yöntemi ile yapılan bir çalışmadır [60]. Enerji üzerine yapılan bir diğer çalışma; Mekonnen ve Hoekstra tarafından yapılan, hidroelektrikten gelen elektriğin SAİ_{Mavi} miktarının hesaplandığı çalışmadır [61].

Türkiye’de ilk SAİ Raporu, Dünya Doğayı Koruma Vakfı (DDKV) tarafından çeşitli kuruluşların iş birliği ile beraber 2014 yılında hazırlanmıştır. Bu raporda SAİA Değerlendirme Raporu esas alınarak Türkiye’de ithalat ve ihracatın SAİ üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

AAT’ler ile ilgili ilk SAİ Değerlendirmesi Shao ve Chen tarafından gerçekleştirilmiştir [62]. Shao ve Chen tarafından gerçekleştirilen çalışmada, SAİA yöntemi ile çamur arıtımında kullanılan su miktarı hesaba katılmadan AAT SAİ_{Mavi} hesabı yapılmıştır. Bu konu ile ilgili bir diğer çalışma olan Morera ve Corominas tarafından yapılan değerlendirmede, arıtım ile ilgili üç ihtimal üzerine SAİA yöntemi ile SAİ değerlendirmesi yapılmıştır [7]. Bu çalışmada da SAİ_{Mavi} ve SAİ_{Gri} hesaba dahil edilmiş, SAİ_{Yeşil} ise hesaba dahil edilmemiştir. AAT’ler için SAİ ve enerji hesabının yapıldığı bu çalışmada ise SAİ_{Yeşil} de hesaplamaya dahil edilmiştir.

2.9.2 Su ayak izi yöntemlerinin, veri tabanlarının ve araçlarının karşılaştırılması

SAİ değerlendirmesinin çeşitli uygulamaları mevcuttur. Bunlar arasında bir kıyaslama yapılacak olursa; SAİ Değerlendirmelerinde uygulamanın amacına bağlı olarak yöntem ve araçların seçildiği görülmektedir. Hatta yeni yöntemler geliştirmek için de çalışmalar yapılmaktadır. Uygulamanın amacı ve sınırlarına uygun yöntem ile yola çıkılmalıdır. Uygulamada kapsamlı bir değerlendirme yapılmak ve bu sürecin çevresel boyutlu etkisi inceleniyor isteniyor ise HBA yöntemi seçilebilir ya da yapılacak çalışmanın sosyal ve ekonomik boyutu değerlendirilmek isteniyorsa SAİA yöntemi kılavuz alınabilir.

Gerbens-Leenes ve Hoekstra tarafından yapılan çalışmada sadece tedarik zincirinin ilk halkasında bulunan birincil enerji taşıyıcılarının SAİ değerlendirilmiştir [59]. Buna

karşılık; Hoekstra ve Mekonnen tarafından yapılan hidroelektrikten gelen elektriğin SAI_{Mavi} çalışması tedarik ve kullanım boyunca oluşan SAI_{Mavi} hesaplanmıştır [63]. Bu çalışmalara her geçen gün farklı bir bakış açısı, farklı ürün, farklı amaç doğrultusunda yenileri ekleniyor ve eklenmeye devam edecektir. Netice olarak her yapılan çalışma ile konu hakkındaki sınırlı veri kaynağını genişleyecek, çalışmalar kıyaslanabilecek ve alternatifler önerilebilecektir. AAT için yapılan çalışmalarda; Morera, S., L. Corominas yaptığı çalışma üç yöntemli bir çalışma olup $SAI_{Yeşil}$ hariç SAI bileşenleri hesaplanmıştır [7]. Shao, L. ve G. Chen tarafından yapılan çalışmada sadece SAI_{Mavi} hesaplanmıştır [62]. Bu çalışmalara zamanla alternatifler ekleneceği yorumu çıkarılabilir.

2.10 Atıksu Arıtma Tesisinin Enerji ve Su Bağlantısı

AAT'ler, prosesin başlangıcından sonuna kadar herhangi bir şekilde enerji kullanılarak atıksuyun arıtıldığı su-enerji bağının bir örneğidir. Suyun tesise taşınmasından deşarjına kadar enerji ihtiyacı, enerjinin kullanılabilir forma getirilmesinden kullanımına kadar su ihtiyacı vardır. Fiziksel arıtım, kimyasal arıtım, havalandırma, pompalar, suyun borularla taşınması, çamur arıtma, çamur susuzlaştırma, geri devir gibi neredeyse her işlemde enerji kullanılmaktadır. Geçmiş yıllarda atıksu arıtımı ve AAT'ler günümüzdeki kadar rağbet görmemekteydi. Çevresel bilincin ve su kaynakları için rekabetin artması AAT'lerin önem kazanmasına sebep olmuştur. Bununla beraber her geçen gün gelişen teknoloji ve imkanlar doğrultusunda mevcut tesisler yerini modern teknolojilere bırakmaktadır. Özel işletmeler ve belediyeler, çevre bilinci ve müşteri memnuniyeti ile bu güncellemeleri takip ederek proses değişiklikleri, kapasite artırımı ve ek tesis inşası gibi konuları gündemlerine almaya başlamışlardır. Tam da bu noktada yeni tesisler veya revize edilen tesislerin planlanması, tasarımı ve işletmesinde Su - Enerji ilişkisini benimsemek hem sistemin sürdürülebilirliğini sağlayacak hem de karar vericiler, kurumlar, işletmeler ve ekonomik paydaşlar için stratejik bilgi sağlayacaktır [64]. Böylelikle enerji için gerekli olan su ile su için gerekli olan enerjinin doğru ve sürekli kullanımına fayda sağlanacaktır.

AAT'lerin işletimi esnasında neredeyse her adımda kullanılan enerji, maliyetin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır [62]. Tesis tasarım ve planlamalarında enerji maliyetini düşürmek atıksuyun arıtımı kadar önemli bir husus haline gelmiştir. Arıtım sonucu

oluşan biyolojik çamurdan enerji üretimi üzerine yapılan atılımlar bunun en güzel örneğidir. Tesis içinde arıtım için kullanılan enerji kaybına karşı aynı oranda olmasa bile enerji üretmek mantığıyla prosesler tasarlanmakta ve uygulanmaktadır. Örneğin anaerobik tesisler; bu tesisler arıtım için aerobik tesislere kıyasla havalandırma gibi enerji kullanımına ihtiyaç duymayan ve arıtım sonucu metan gazı üreten tesisler olup bu mantıkla kullanımları her geçen gün artmaktadır. Öncelikle atıksu karakteristiği ve atıksuyun etkin arıtımı amacı göz önünde bulundurularak, seçilen prosesin daha az enerji gerektirmesi aynı zamanda seçilen enerjinin daha az su kullanımı gerektirmesi gibi kıstaslar neticesinde tercihler yapılabilir.

AAT'lerde enerji yönetimi, düşük maliyet ile istenilen deşarj standartlarına uygun arıtım yapmayı ve sürdürülebilirlik için enerjinin makul miktarda kullanımını sağlanmayı hedeflemektedir [62]. Bu, sistem boyunca tüm işlemleri kapsayacak şekilde değerlendirilme yapmak ile mümkündür. Bu yönetimi uygulanabilir kılmak için; proses seçiminde en az enerji kullanımı ile en etkili arıtım prensibinin dikkate alınması, tesis alanı seçiminde terfi ihtiyacının az olduğu yerlerin seçilmesi, mümkün olan en az pompa kullanımı, enerji ihtiyacı düşük verimi yüksek ekipman kullanımı, uygun enerji seçimi gibi faktörler tasarım esnasında dikkat edilmesi gereken unsurlar arasındadır [62]. Böylelikle hem enerji kullanımını azalmış hem de enerjinin içinde saklı bulunan su kullanımını azalmış olacaktır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Çalışmanın Hedefi ve Sınırları

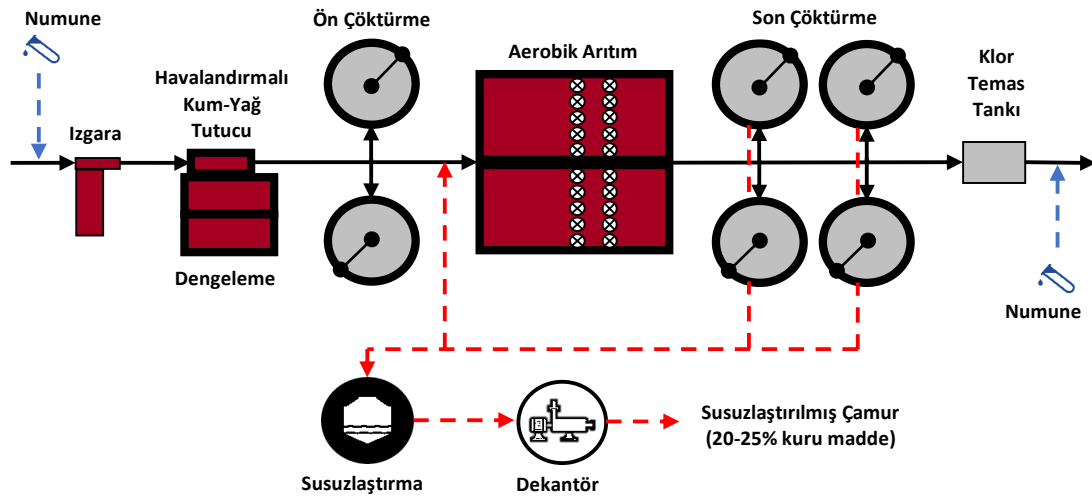
Birçok sektör ve ürün için uygulanan SAİ değerlendirmesi, su tüketimine sebep olan AAT'ler için de yapılması gereken bir değerlendirmedir. Konusu su olan, su ile çok fazla ilişkili olan ATT'lerin; doğru stratejiler ile yönetilmesiyle suyun sürdürülebilirliği üzerindeki katkısı da arttırılabilir. AAT'leri atıksuların arıtımı ile doğal su döngüsüne katkı sağlamaktayken tesisin işletilmesi için şebeke suyu, enerji, kimyasal vb. tesiste kullanımına bağlı olarak doğrudan ve/veya dolaylı olarak su tüketimine de neden olmaktadır. Bu çalışmada, evsel ve endüstriyel nitelikli atıksuların beraber arıtıldığı 42 Evler AAT örnek alınarak tesisteki su tüketimine karşılık atıksuların arıtılması sayesinde alıcı ortamda asimile olmaktan korunan su miktarları üzerine bir değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Bu değerlendirmelerden hareketle tesisin su tüketimi ve SAİ azalmasına nasıl alternatifler çözümler getirebileceği yorumlanmıştır. AAT'lerin suyun sürdürülebilirliğine maksimum fayda sağlayabilmesi adına kaynak oluşturulması hedeflenmiştir. 42 Evler AAT'nin giriş ve çıkış sularında 24 ay süreyle BOİ₅, KOİ, TA, TF ve AKM parametreleri ile kimyasal tüketimi, enerji tüketimi, çamur oluşumu, şebeke suyu kullanımı, su kayıpları, buharlaşma ve yağış miktarları izlenerek AAT'nin SAİ'ye katkısı hesaplanmıştır. Çizilen su kıtlığı senaryolarına karşı, değerlendirme yapılan tesise, sürdürülebilir bir su yönetimi politikası oluşturabilmesi için kaynak sağlanmıştır. Tesis bu çalışmanın neticesinde SAİ ile ilgili performansının ölçülebileceği bir göstergeye sahip olmuştur [50]. SAİA Değerlendirme Kılavuzunun rehberliğinde ele alınan AAT'nin SAİ_{Mavi}, SAİ_{Gri} ve SAİ_{Yeşil} değerleri hesaplanmıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda AAT'ler için SAİ_{Yeşil} genellikle düşük bir değere sahip olduğu için hesaplamalara dahil edilmemiştir. Bu çalışmada ise SAİ_{Yeşil} de hesaplanmıştır. Diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, AAT'nin Enerji-Su İlişkisi de değerlendirilmiştir.

3.2 Çalışma Alanı ve Atıksu Arıtma Tesisi

Tüketim ve kullanım sonucu kirlenen ve atıksu olarak adlandırılan suyun doğal ortamlara tekrar gönderilmeden önce alıcı ortamın kalite standartları korunacak şekilde arıtılarak deşarj edilmesi çevre kirliliği, su kıtlığı senaryoları, doğal ortamın korunması ve sürdürülebilirlik açısından oldukça önemlidir. Bu çerçevede, temiz su

sorununa bir çözüm olarak geliştirilen AAT'ler, atıksuyu arıttığı ve gündelik yaşamda tekrar kullanılabilir hale getirdiğinden dolayı tüm canlılar için hayati öneme sahiptir [62].

Bu çalışmada Kocaeli İlinde bulunan 24.750 ± 2.895 m³/gün kapasiteli 42 Evler AAT 2018 ile 2019 yılları arasında izlenilmiştir. AAT, 1996 yılı sonunda işletilmeye başlanılmış olup yatırım bedeli 34.281.613 dolardır. AAT'nin koordinatları 40,75851°, 29,95779° olup 46.347 m² alan üzerine kurulmuştur. Toplam 10.500 m² yüzölçümüne sahip üstü açık havuzlara sahiptir. Kanalizasyon şebekesi tarafından toplanan su; ızgara, giriş pompa istasyonu, havalandırılmalı kum ve yağ tutucu, dengeleme havuzu, ön çöktürme havuzu, havalandırma havuzu, son çöktürme havuzu ve klor temas tankı ünitelerinden geçmektedir. AAT aktif çamur sistemi havalandırma tankları ve çökeltme tankları olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Havalandırma tanklarında proses için gerekli oksijen turbo blowerlar tarafından verilmektedir. Son çöktürme tankında biyolojik floklar ile su birbirinden ayrılmaktadır. Son çöktürme havuzunda oluşan çamurun bir kısmı havalandırma tanklarına geri gönderilirken, fazla olan kısmı ise çamur yoğunlaştırıcı ve çamur susuzlaştırma (dekantör) ünitelerinden geçirilerek bertaraf edilmektedir. Çamur susuzlaştırma işlemi için polielektrolit kullanılmaktadır. 42 AAT'de arıtılan sular, Sarı Dere'ye deşarj edilmektedir. AAT akış şeması Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. AAT akış şeması.

42 Evler AAT, Kocaeli İli Sanayi Mahallesi'nden gelen evsel nitelikte atıksular ile yaklaşık 47 farklı endüstri tipinde üretim yapan irili ufaklı işletmelerin endüstriyel

atıksularının birlikte arıtılması amacıyla kurulmuş, klasik aktif çamur sistemi ile çalışan bir biyolojik AAT'dir. 42 Evler AAT'ye atıksu veren fabrikaların bir kısmı kendi bünyesinde ön arıtma yapmak ve kirlilik parametrelerini İSU Atıksuların Kanalizasyona Deşarj Yönetmeliği'nde verilen limitlere indirmekle yükümlüdürler. Endüstriyel atıksu kategorisinde en fazla debi maya endüstrisinden gelmekte ve giriş debisinin yaklaşık %40'ını oluşturmaktadır. 42 Evler AAT ise atıksuları arıttıktan sonra Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY) Tablo 19 "Karışık Endüstriyel Atıksuların Alıcı Ortama Deşarj Standartları Küçük ve Büyük Organize Sanayi Bölgeleri ve Sektör Belirlemesi Yapılamayan Diğer Sanayiler" yönetmeliğine uygun olarak alıcı ortam olan Sarı Dere'ye vermekle yükümlüdür. Bu sebeple AAT'nin giriş ve çıkış yapılarında SKKY Tablo 19'da yer alan BOİ₅, KOİ, TA, TF ve AKM parametreleri sürekli olarak takip edilmektedir. Ana kirleticinin arıtım sonrası konsantrasyonu ile giriş konsantrasyonu arasındaki oran; arıtma verimliliği (ϵ , %) olarak tanımlanmış ve izlenen tüm parametreler için değerlendirilmiştir. Tesis akış şemasında (Şekil 3.1) örnekleme yapılan giriş ve çıkış numune alma noktaları gösterilmiştir. 2018-2019 yılları arasında alınan numunelerde; BOİ₅, KOİ, TA, TF ve AKM analizleri yapılarak analiz sonuçlarının aylık ortalamalarına göre SAİ_{Gri} hesaplamaları yapılmıştır. AAT'de tüketilen enerji, kullanılan kimyasal miktarı, çamur miktarı, buharlaşma ve kayıp gibi parametrelere bağlı olarak SAİ_{Mavi,Toplam} hesaplanmıştır.

3.3 Analiz Metotları

Çalışma kapsamında AAT giriş ve çıkışlarındaki kirletici konsantrasyonları aylık olarak izlenmiştir. İzlenen parametrelerin tespit ve analiz yöntemlerinin sınırı Çizelge 3.1'de verilmiştir [65].

Çizelge 3.1. Analiz edilen parametreler ve yöntemleri.

Parametre	Metot	Tespit Limiti (mg/L)
BOİ ₅	SM 5210 D	0,10
KOİ	SM 5220 B	25,0
TA	ASTM D5176	0,02
TF	TS EN ISO 11885	0,01
AKM	SM 2540 D	0,50

Bu parametreler, hem alıcı ortamda müsilaja neden olabilen hem de Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliğinde yer alan AAT'ler için alıcı ortam deşarj kriterleri oldukları için seçilmişlerdir. Deneysel hataları önlemek için analiz üç tekrarlı olarak yapılmıştır.

3.4 Atıksu Arıtma Tesis Su Ayak İzinin ve Enerji-Su İlişkisinin Değerlendirilmesi İçin Metodoloji

Bu çalışmada, AAT için SAİ değerlendirmesinde SAİA tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır. Dört aşamadan oluşan bu yöntem doğrultusunda ilk olarak hedef ve sınırlar belirlenmiştir. Bu çalışmanın hedefi; AAT'nin SAİ_{Mavi}, SAİ_{Yeşil} ve SAİ_{Gri} hesabı yapmak ve enerji-su ilişkisini değerlendirmektir. Değerlendirme, Ocak 2018'den Aralık 2019'a kadar olan dönemde gerçekleştirilmiştir. Tesis kirletici parametreleri giriş, çıkış ve alıcı ortam değerleri dikkate alınarak SAİ_{Gri} hesabı yapılmıştır. Tesiste su kullanımını ifade eden SAİ_{Mavi}, doğrudan ve dolaylı kullanım kaynakları tespit edilerek hesaplanmıştır. SAİ_{Yeşil}, Kocaeli İli için 2018 ve 2019 yılları arası yağış miktarları kullanılarak hesaplanmıştır. Toplanan veriler ile SAİ hesaplamaları ve değerlendirmeleri yapılmıştır. SAİA metodolojisi kullanılarak yapılan hesaplar için formül Denklem 3.1'de verilmiştir.

$$SAİ_{Toplam} = SAİ_{Gri} + SAİ_{Yeşil} + SAİ_{Mavi} \quad (3.1)$$

AAT'ler yoğun enerji kullanımı ile faaliyet gösteren tesislerdir. Çalışmanın yapıldığı tesiste birincil arıtım olarak havalandırmalı kum-yağ tutucu ünitesi bulunmaktadır. Burada havalandırma turbo blowerlar ile sağlanmaktadır. Bu mekanik aksamaların çalışması için kullanılan enerji aynı zamanda su kullanımına neden olmaktadır. Tesiste tüketilen enerji ve kimyasalların, üretimi ve tesise temini kaynaklı dolaylı su kullanımı söz konusudur.

3.4.1 Gri su ayak izi hesabı

SAİ_{Gri} kavramı; suda bulunan kirleticilerin alıcı ortamda asimile edilerek zararsız hale getirilmesini sağlayan seyreltmek için gerekli taze su hacmini ifade etmektedir [56]. Kirliliği temsil eden SAİ_{Gri}, bu yönüyle diğer bileşenlerden ayrılmaktadır ve su kalitesinin bir göstergesidir. AAT gibi su kirliliğinin giderildiği sistemlerde en önemli bileşenlerin başında geldiği söylenebilir. AAT kirlilik parametrelerine bakıldığında

kirlilik yükü fazla olan; BOİ₅, KOİ, TA, TF ve AKM parametrelerine ait deşarj standartları dikkate alınmıştır. Bu çalışmada, AAT'ye gelen kirlletici konsantrasyonlarının alıcı ortam standartlarına asimile edilmesi için gereken su miktarının göstergesi olarak SAI_{Gri} kullanılmıştır. Yani AAT sayesinde su döngüsünde kirlenmesi engellenen su hacmini gösterilmiştir. SAİA Değerlendirme Kılavuzunda, SAI_{Gri} hesabı için belirtilen formül Denklem 3.2'de gösterilmiştir.

$$SAI_{Gri} = \frac{L}{C_{DeşarjLimiti} - C_{AlıcıOrtam}} \quad (3.2)$$

Burada; L kirlletici yükü (kütle/zaman): C_{DeşarjLimiti} izin verilen maksimum deşarj konsantrasyonu ve C_{AlıcıOrtam}: alıcı ortam konsantrasyonunu ifade eder. Bu çalışmada SAI_{Gri} hesaplanırken iki durum üzerinde durulmuştur. Bunlardan ilki; arıtım olmaksızın atıksuyun doğrudan alıcı ortama deşarj edilmesidir. Böylelikle deşarj edilen yüksek kirlletici yükünün alıcı ortam standartlarına asimile edilebilmesi için gerekli temiz su hacmi Denklem 3.3-3.5'e göre hesaplanmıştır.

$$Q_{Giriş} \times C_{Giriş} + SAI_{Gri \text{ Arıtılmamış}} \times C_{Alıcı Ortam} = (Q_{Giriş} + SAI_{Gri \text{ Arıtılmamış}}) \times C_{Deşarj limiti} \quad (3.3)$$

$$SAI_{Gri, Arıtılmamış} = \frac{Q_{Giriş} \times (C_{Giriş} - C_{Deşarj limiti})}{C_{Deşarj Limit} - C_{Alıcı ortam}} \quad (3.4)$$

$$SAI_{Gri, Arıtılmamış} = \frac{Q_{Giriş} \times (C_{Giriş} - C_{Deşarj limiti})}{C_{Deşarj Limiti}} \quad (3.5)$$

Burada; Q_{Giriş} (hacim/zaman): AAT giriş debisini, C_{Giriş} (kütle/hacim): AAT giriş kirlletici konsantrasyonunu, C_{DeşarjLimiti}: alıcı ortam su kalite sınıfı sınır değerlerini, C_{AlıcıOrtam}: deşarj öncesi alıcı ortam su kütleindeki kirlletici konsantrasyonunu ifade etmektedir ve ihmal edilebilir seviyededir.

İkinci bir durum; arıtım yapıldıktan sonra atıksuyun alıcı ortama deşarjı durumudur. Arıtılan atıksuyun, deşarj edilen kirlletici yükünün alıcı ortam standartlarına asimile edilebilmesi için gerekli olan tatlı su hacmi Denklem 3.6-3.8'e göre hesaplanmıştır.

$$Q_{Çıkış} \times C_{Çıkış} + SAI_{Gri \text{ Arıtılmış}} \times C_{Alıcı ortam} = (Q_{Çıkış} + SAI_{Gri \text{ Arıtılmış}}) \times C_{Deşarj Limiti} \quad (3.6)$$

$$SAI_{Gri, Arıtılmış} = \frac{Q_{Çıkış} \times (C_{Çıkış} - C_{Deşarj Limiti})}{C_{Deşarj limiti} - C_{Alıcı ortam}} \quad (3.7)$$

$$SAI_{Gri,Arıtılmış} = \frac{Q_{Çıkış} \times (C_{Çıkış} - C_{Deşarj Limiti})}{C_{Deşarj Limiti}} \quad (3.8)$$

Bu iki durum arasındaki fark ise atıksuyun arıtılıp arıtılmamasına bağlı olarak AAT performansını göstermektedir ve Denklem 3.9'da olduğu gibi hesaplanmıştır.

$$\Delta SAI_{Gri} = SAI_{Gri,Arıtılmamış} - SAI_{Gri,Arıtılmış} \quad (3.9)$$

3.4.2 Mavi su ayak izi hesabı

Çalışmada SAI_{Mavi} , doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki bileşen üzerinden hesaplanmıştır. Doğrudan kullanımda, tesis içinde personel tarafından kullanılan şebeke suyu, proseslerde kullanılan şebeke suyu, buharlaşma, çamur ve giriş-çıkış debileri arasındaki kayıp miktarları hesaplanmıştır. Dolaylı kullanımda ise kimyasal, enerji ve çamur arıtımı gibi hizmetler için yeraltı ve yerüstü kaynaklardan çekilen tatlı su miktarı hesaplanmıştır.

$SAI_{Mavi,Doğrudan}$, $SAI_{Mavi,Dolaylı}$ ve $SAI_{Mavi,Toplam}$ hesaplama yöntemleri Denklem 3.10-3.12'de verilmiştir.

$$SAI_{Mavi,Toplam} = SAI_{Mavi,Doğrudan} + SAI_{Mavi,Dolaylı} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} SAI_{Mavi,Doğrudan} &= SAI_{Mavi,ŞebekeSuyu} + SAI_{Mavi,Buharlaşma} \\ &+ SAI_{Mavi,Çamur} + SAI_{Mavi,Kayıp} \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} SAI_{Mavi,Dolaylı} &= SAI_{Mavi,Kimyasal} + SAI_{Mavi,Enerji Tüketimi} \\ &+ SAI_{Mavi,Çamur Arıtımı} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Denklem 3.11'de $SAI_{Mavi,Doğrudan}$: AAT'de doğrudan kullanılan su kaynaklarını, $SAI_{Mavi,ŞebekeSuyu}$: proses ve günlük kullanım kaynaklı tüketilen şebeke suyu miktarını, $SAI_{Mavi,Buharlaşma}$: AAT havuz yüzeylerinden buharlaşan su miktarını, $SAI_{Mavi,Çamur}$: arıtılmamış çamur içerisindeki su miktarını ve $SAI_{Mavi,Kayıp}$: AAT giriş ve çıkış debileri arasındaki farkı ifade etmektedir.

Dolaylı su kullanımı için $SAI_{Mavi,Çamur}$ çamur arıtımı için dekantörde kullanılan ve buharlaştırılan su miktarlarını ifade eder. Bu çalışmada ele alınan AAT dekantör

ünitesinde şebeke suyu yerine geri kazanım suyu kullanıldığı için AAT'nin SAI_{Mavi} miktarını azaltmaktadır.

Mekonnen ve Hoekstra tarafından yapılan bir çalışmada 1.000 \$ değerindeki bir endüstriyel ürünün içerisinde saklı bulunan ortalama SAI_{Mavi} miktarı farklı ülkeler için hesaplanmış ve Türkiye için bu değer 27,7 m³ olarak kabul edilmiştir [66]. Sonuç olarak, SAI_{Mavi} hesaplamasında etkisi olduğu bilinen kimyasal, enerji tüketimi ve ulaşım gibi bileşenlerin SAI_{Mavi} 'ye dolaylı etkisi; Mekonnen ve Hoekstra ve Mekonnen ve Hoekstra'nın çalışmaları dikkate alınarak Denklem 3.13'e göre hesaplanmıştır [66,14].

$$SAI_{Mavi,Dolaylı} = 27.7 \times \frac{m \times \text{maaliyet}}{1000 \$} \quad (3.13)$$

Denklem 3.13'te m: birim zamanda tüketilen endüstriyel ürün miktarı, maliyet: kullanılan endüstriyel ürünün fiyatı [\$] ifade etmektedir. Bu yaklaşım $SAI_{Gri,Dolaylı}$ hesabı için de kullanılabilir.

3.4.3 Yeşil su ayak izi

$SAI_{Yeşil}$, birim alana düşen yağışın yeraltı suyuna karışmadığı, yüzeyde kaldığı ve/veya bitkiler tarafından kullanıldığı durumlar için hesaplanır [66]. $SAI_{Yeşil}$, buharlaşan su miktarının ve bitkiler tarafından kullanılan yağış suyu miktarının bir göstergesidir. Dolayısıyla sızarak yeraltı suyuna karışan su miktarı $SAI_{Yeşil}$ kapsamında değerlendirilmemektedir. AAT'leri üzeri açık tesisler olduğu için tesise yağmur suyu sadece yağışlarla ulaşmaktadır. $SAI_{Yeşil}$ hesaplamasında aylık yağış değerleri ile üzeri açık havuzların yüzey alanlarından hareketle $SAI_{Yeşil}$ değeri hesaplanmıştır. $SAI_{Yeşil}$, aylık ortalama yağış ($P_{aylık}$) ile AAT'nin yüzey alanı çarpılarak hesaplanır. Suyun özgül ağırlığının 1 kg/m³ olduğu kabul edilmiştir. $SAI_{Yeşil}$ hesaplaması Denklem 3.14'de gösterilmiştir.

$$SAI_{Yeşil} = P_{aylık} \times \text{Yüzey Alanı}_{AAT} \quad (3.14)$$

3.4.4 Enerji-su hesabı

Çalışma yapılan tesiste enerji kullanımı ağırlıklı olarak tesis içi makine ve ekipmanların çalıştırılması kaynaklıdır. Havalandırma tanklarına proses için gerekli oksijen turbo blowerlar tarafından verilmektedir ve oksijenin aktarımı için pompalar gibi birçok ekipmanın kullanımı için elektrik tüketilmektedir. Tüketilen bu enerjinin, üretim ve tedariki için harcanan taze su miktarı hesaplamalara dahil edilmiştir.

2018 yılında Türkiye elektrik üretiminin, %37,3'ünü kömürden, %29,8'ini doğal gazdan, %19,8'ini hidrolik enerjiden, %6,6'sını rüzgardan, %2,6'sını güneşten, %2,5'ini jeotermal enerjiden ve %1,4'ünü diğer kaynaklardan elde edilmiştir (URL-5). Enerji tüketiminden kaynaklanan SAI_{Mavi} hesaplanmasında, elektrik üretimi için kullanılan kaynaklar ve bunların yüzdeleri ile bunların neden olduğu su kullanım miktarı hesaplanmıştır. Ortalama su tüketim değerlerine dayalı olarak, birim zaman başına tüketilen birim elektrik miktarları yani $SAI_{Mavi, EnerjiTüketimi}$ hesaplaması Denklem 3.15-3.16'da verilmiştir.

Mekonnen, M. M. ve A. Y. Hoekstra tarafından yapılan çalışmada, Türkiye'de bulunan bir hidroelektrik santral için 1 GJ enerji üretimi için oluşan SAI_{Mavi} değeri $0.078 \text{ m}^3/\text{kWh}$ olarak verilmiştir [14]. Bu çalışmada da bu değer kabul edilmiştir.

$$\begin{aligned} SAI_{Mavi, Enerji Tüketimi} &= \text{Enerji Tüketimi} \\ &\times (0,373 \times k_{\text{Kömür}} + 0,298 \times k_{\text{N.Gaz}} + 0,198 \times k_{\text{Hidro}}) \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} SAI_{Mavi, Enerji Tüketimi} &= \text{Enerji Tüketimi} \times (0,00059 + 0,00026 + 0,01554) \\ &= \text{EnerjiTüketimi} \times 0,01639 \end{aligned} \quad (3.16)$$

Burada; $SAI_{EnerjiTüketimi}$, AAT'nin kWh cinsinden elektrik tüketimi olarak verilir ve $k_{\text{kömür}}$, k_{gaz} ve k_{hidro} 1 kWh enerji üretirken kömür, doğal gaz ve hidroelektrik tarafından üretilen SAI_{Mavi} değeridir. 0,373 katsayısı Türkiye'nin toplam enerji üretiminde kömürle üretilen enerjinin oranıdır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1 Atıksu Arıtma Tesisi Su Karakterizasyonu

Karakterizasyon çalışmaları, her bir kirletici bileşenini tek tek veya grup olarak dikkate alarak önemli parametrelere dayalı olarak yürütülmelidir. Bu çalışmada takip edilen konvansiyonel kirletici parametreler; deniz salyası, müsilaaj vb. çevre üzerinde olumsuz etkilere neden olabilecek ve SKKY Tablo 19’da yer alan parametrelerdir. AAT giriş ve çıkış suyu karakterizasyonu ve çıkış suyunun SKKY Tablo 19 ile SKKY Tablo 1: Kıta içi Yerüstü Su Kaynaklarının Sınıflarına Göre Kalite Kriterleri (KYSKSGKK)’ne göre değerlendirilmesi Çizelge 4.1’de verilmiştir.

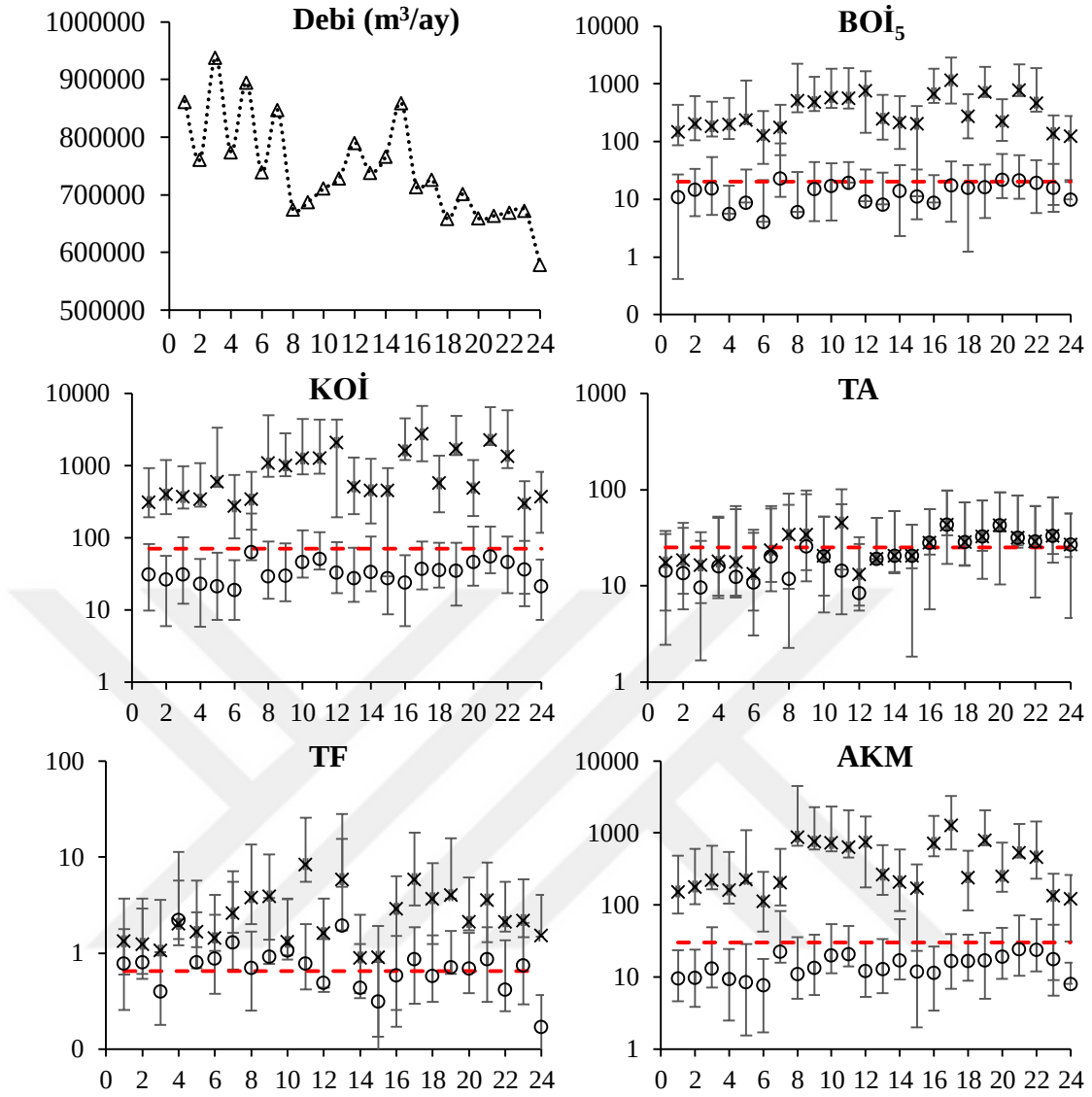
Çizelge 4.1. AAT giriş ve çıkış suyu karakterizasyonu.

Parametre (n=24)		BOİ ₅	KOİ	TA	TF	AKM
Q _{Giriş} veya Q _{Çıkış} (m ³ /ay)		742504,167 ± 86847,4				
C _{Giriş} (mg/L)	Minimum	180,104 ± 158,794	407,673 ± 430,692	15,257 ± 8,129	1,144 ± 0,938	168,75 ± 154,642
	Ortalama	396,297 ± 277,588	924,245 ± 717,294	26,139 ± 9,448	2,76 ± 1,875	426,861 ± 319,298
	Maksimum	734,958 ± 529,684	1.826,96 ± 1.450,06	39,442 ± 13,544	5,636 ± 5,265	841,917 ± 786,551
C _{Çıkış} (mg/L)	Minimum	12,500 ± 3,500	17,875 ± 4,122	8,45 ± 4,446	0,325 ± 0,201	8,208 ± 2,206
	Ortalama	13,828 ± 5,463	34,445 ± 11,509	22,218 ± 9,938	0,813 ± 0,465	14,904 ± 5,205
	Maksimum	25,791 ± 11,750	58,020 ± 27,749	39,442 ± 13,544	2,168 ± 3,003	26,208 ± 12,799
SKKY Tablo 19 (Kompozit 2 Saat)		-	400	-	2	200
SKKY Tablo 1	Sınıf I (çok iyi)	4	25	5,702	0,02	30
	Sınıf II (iyi)	8	50	11,61	0,16	
	Sınıf III (orta)	20	70	25,25	0,65	
	Sınıf IV (zayıf)	>20	>70	>25,25	>0,65	

AAT’de çıkış suyu debisi takip edilmemektedir fakat tesis yetkililerinden çalışma için 3 ay süreyle çıkış suyu debisinin izlenilmesi talep edilmiş ve giriş ile çıkış debisi arasındaki farkın yaklaşık % 0,1 olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple çalışmanın devamında Q_{Giriş}=Q_{Çıkış} olarak kabul edilmiştir. 42 Evler AAT, arıttığı atıksuları SKKY Tablo 19: Karışık Endüstriyel Atıksuların Deşarj Standardı sınırlarına uygun olarak alıcı ortama deşarj etmek zorundadır. AAT çıkış suyu değerleri, SKKY Tablo 19 deşarj limitlerinin çok altındadır ve AAT bu açıdan oldukça yeterli ve iyi işletildiği

görülmektedir. Aynı zamanda AAT çıkış suyunun alıcı ortam su kalitesine etkisi ise SKKY Tablo 1'e göre değerlendirilmiş ve toplam fosfor parametresi nedeniyle arıtılan suyun alıcı ortam su kalitesine göre eşleniği Sınıf IV (zayıf) kalite olarak tespit edilmiştir. 2018 ve 2019 yılları arasında 42 Evler AAT'nin ortalama kirletici yükleri; 54,923 g BOİ₅/N.gün, 127,711 g KOİ/N.gün, 3,612 g TA/N.gün, 0,381 g TF/N.gün ve 59,047 g AKM/N.gün olarak belirlenmiştir. AAT giriş suyu KOİ, BOİ₅ ve AKM kirletici yükleri sırasıyla; kuvvetli, kuvvetli ve orta olarak sınıflandırılabilir. Bu değerlendirmeye göre tesise gelen atıksu ağırlıklı olarak kuvvetli atıksu özelliği göstermektedir. Atıksu karakterizasyonu, çeşitli faktörlere bağlı olarak ülkeden ülkeye ve aynı ülke içinde değişiklik gösterebilir. Atıksu giriş kirletici yükleri açısından hem ulusal hem de uluslararası ölçekte benzerlik gösteren birçok AAT bulunmaktadır [67,68]. Bu sebeple 42 Evler AAT özelinde gerçekleştirilen bu çalışmada hem ulusal hem de uluslararası işletilen diğer atıksu arıtma tesisleri içinde önemli göstergeler üretilmiştir. Tesis giriş ve çıkış sularında takip edilen su kalite parametrelerinin alıcı ortam su kalite sınıfı (Sınıf III) ile ilişkisi Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

AAT'ye gelen atıksuyun organik yükü fazladır. Organik yük, suyun kirlilik yükünün genel göstergesidir. Bu parametrelerin arıtım olmadan direkt alıcı ortama deşarj edilmesi çok önemli çevresel sorunlar ortaya çıkarabilmektedir. Bir su kütlesinin veya su numunesinin KOİ ve BOİ₅ konsantrasyonu ne kadar fazlaysa, sucul sistem o kadar fazla kirlenmektedir. Organik madde artışı doğal etkenlere bağlı olabilir ancak çoğunlukla antropojenik nedenlerden kaynaklanmaktadır. KOİ ve BOİ₅ parametreleri su kalitesini ölçmek için bir indeks olarak kullanılabilir. Bir su kütlesinde bulunan organik madde ile bunun su kütlesi ekosistemi ve estetiği üzerindeki etkisinin belirlenmesi, su kalitesi yönetiminin ayrılmaz bir parçasıdır [69]. Bir su kütlesine artan azot ve fosfor girdileri, algler ile su bitkilerinin aşırı büyümesini teşvik edebilmektedir. Böylece bitki örtüsü, böcekler, balıklar ve diğer su organizmalarının sağlığına ve çeşitliliğine olumsuz etki eden ötrofik koşullar oluşabilmektedir. Zamanla, sucul ortamdaki canlı türleri azaldıkça hayvan ve bitki türlerinin oranı değişebilmektedir. Topluluk bileşimindeki bu değişiklik, ekolojik durumda bozulmalara neden olabilmekte ve su kütlesinin çevreye sağladığı işlevleri değiştirebilmektedir [70]. Özel olarak azot ve fosforu gideremeyen AAT'ler, yüzey veya yeraltı sularında aşırı azot ve fosfor seviyelerine yol açabilir.



Şekil 4.1. AAT giriş-çıkış kirlетici parametreleri ve debi değışimi.

Şekil 4.1’de; x: AAT girişindeki kirlетici konsantrasyonunu, o: AAT çıkışındaki kirlетici konsantrasyonunu, kesikli kırmızı çizgi: SKKY Tablo 1’deki III. Sınıf kalite deşarj limitlerini, x eksenі zamanı (ay) ve y eksenі (debi grafiğı haricinde) kirlетici konsantrasyonunu (mg/L) ifade etmektedir.

Organik maddenin fonksiyonel olarak içerebildiğı TA ve TF parametreleri alıcı ortamda bulunan mikroorganizmalar için besin kaynağı olup sucul ortamda fazla miktarda bulunmaları durumunda olumsuz etkilere sebep olmaktadır. TF doğal ortamda genellikle küçük konsantrasyonlarda bulunduğundan, küçük artışlar bile su kalitesini ve biyolojik durumu olumsuz etkileyebilmektedir [71]. Besin kaynağının ortamda fazla bulunması, alglerin çoğalmasına ve dolayısıyla durgun olan suyun

berraklığını kaybetmesine sebep olmaktadır. Suda organik madde varlığında aerobik mikroorganizmalar ve çeşitli kimyasallar organik maddeyi parçalamak için sudaki çözülmüş oksijeni kullanır. Bu durum su kaynağında çözülmüş oksijen miktarında azalmasına sebep olarak oksijenle solunum yapan canlıları tehlikeye sokmaktadır. Bu nedenle TA ve TF parametrelerinin alıcı ortama direkt deşarjı ciddi sorunları beraberinde getirmektedir. Atıksuların AAT'lerde arıtılmaları sayesinde TA ve TF gibi alıcı ortamda müsilağa sebep olabilen parametreler, yönetmeliklerce getirilmiş sınırlamalar dikkate alınarak alıcı ortama deşarj edilmekte ve böylelikle alıcı ortam korunmaktadır. 2021 yılında Marmara Denizi'nde yaşanan müsilağ problemi nedeniyle alıcı ortamda TA ve TF miktarının sınırlandırılmasının önemi bir kez daha ortaya çıkmıştır. Müsilağ, başlıca fitoplanktonlar ve diatomla ile meydana gelir. Mikro alglerin büyüme hızı ve kompozisyonu, TA/TF oranına da bağlıdır [72]. Fitoplanktonlar için besin kaynağı olan azot ve fosforun alıcı ortamda yüksek oranda bulunması en belirgin müsilağ sebebidir. Bu nedenle AAT'lerde TA ve TF etkin bir şekilde giderilmesi büyük önem taşımaktadır [73]. 42 Evler AAT, TA ve TF parametrelerinin giderimi bakımından diğer kirleticilere göre daha düşük bir performans göstermektedir. Tesisin sadece karbon giderim esasına dayalı olarak tasarlanmış olması bunun en büyük etkenidir. Tesise gelen TA ve TF parametrelerin arıtım verimini arttırmak amacı ile tesis 2021 yılında revize edilmiştir. Tam da bu noktada revize edilen bu tesiste SAİ kavramının dikkate alınması tesis arıtım performansı ile beraber su-enerji sürdürülebilirliği için de önemli bir adımdır.

AKM'ler arasında silt ve kil parçacıkları, plankton, algler, organik kalıntılar ve diğer parçacıklı maddeler bulunmaktadır. Bu maddeler 2 mikronluk bir filtreden geçemeyecek parçacıklardır. Yüksek konsantrasyonlarda AKM bulunması sucul ortamda bulunan toksik maddelerin askıdaki katı maddeler üzerinde adsorpsiyonu yoluyla taşınmasını sağlayabilmektedir.

Organik maddenin AAT'de giderimi sırasında son çöktürme havuzunun dip kısmında çamur birikmekte ve çamurun bir kısmı geri devir ettirilirken bir kısmı da susuzlaştırılarak bertaraf edilmektedir. Özellikle $SAİ_{Mavi}$ hesaplamalarında çamur karakterizasyonu önemli bir yere sahiptir. $SAİ_{Mavi}$ hesaplamalarında; $SAİ_{Mavi,Çamır}$ hesabı, $SAİ_{Mavi,Doğrudan}$ içerisinde değerlendirilmekte ve hesaplamalar için çamur su

içeriğinin bilinmesi gereklidir. AAT'de oluşan çamurun kalitesi hakkında ek bilgiler Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. AAT'nin çamur karakterizasyonu.

Parametre	Birim	Metot	Sonuç
pH		TS 8753 EN 12176	7,66
Nem	%	TS 9546 EN 12880	69,5
Katı İçerik	%	TS 9546 EN 12880	30,5
Organik Madde	%	TS 8336	22,8
İnorganik Madde	%	TS 8336	7,68
Üst Kalorifik Değer	kcal/kg	ASTM D 5865	3,43
Toplam Sülfür	%	ASTM 4239	2,70
Yağ-Gres	mg/kg	SM 5310 B	14,49 (1,45%)
Toplam Organik Karbon	mg/kg	SM 4110 B	322,0 (32,2%)

Tesiste oluşan çamurun su içeriği %70 kabul edilmiştir. $SAI_{Mavi, \text{Çamur}}$ hesaplamalarında; oluşan çamur miktarı ve çamurun ihtiva ettiği su miktarı ele alınmıştır. Yüksek su içeriğine sahip olan çamur susuzlaştırma ve çamur yoğunlaştırma ünitelerinde işlem görmektedir. Böylelikle yüksek su içeriği azaltılarak bertaraf kolaylaştırılmaktadır. Çamur yoğunlaştırma ünitesinde çamurdan ayrılan su dekantör ünitesine gönderildiği için SAI_{Mavi} oranının azalmasına katkı sağlamıştır. Organik madde içeriği %22, organik karbon içeriği %32 olan çamur tesis içerisinde belli oran ve miktarlarda, biyolojik arıtımın sürekliliği için tekrar sisteme gönderilmektedir. Bu miktardan geri kalan kısım bertaraf edilmektedir.

Arıtma çamuru, arıtılmış atıksuyun bir yan ürünüdür. Hem organik hem de inorganik malzemelerden, organik kimyasallardan ve ayrıca patojenlerden oluşmaktadır. Bu nedenle, çevresel etkilerini en aza indirmek için bu tür çamuru uygun şekilde arıtmak son derece önemlidir. Çalışmanın gerçekleştiği tesiste biyolojik arıtım sonucu oluşan çamur öncelikle çamur yoğunlaştırma ünitesinde, daha sonra da susuzlaştırma ünitesinde işlenmektedir. Ön çöktürme ve son çöktürme havuzlarından alınan çamur, yoğunlaştırma tankında bekletilerek kuru madde oranı arttırılmaktadır. Fazla çamurdan ayrılan su üstten savaklanarak dekantör ünitesine gönderilmektedir. Susuzlaştırma ünitesinde polielektrolit eklenerek çamur susuzlaştırma işlemi gerçekleştirilmektedir.

4.2 Alıcı Ortam Su Kalitesinin Belirlenmesi

Çalışmada, SAI_{Gri} hesabı yapılırken atıksu kirletici konsantrasyonu ve alıcı ortam konsantrasyonu tespit edilmesi gereken değerlerdir. Alıcı ortamın kirletici seviyeleri ve alıcı su kütlesinin kalitesi Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

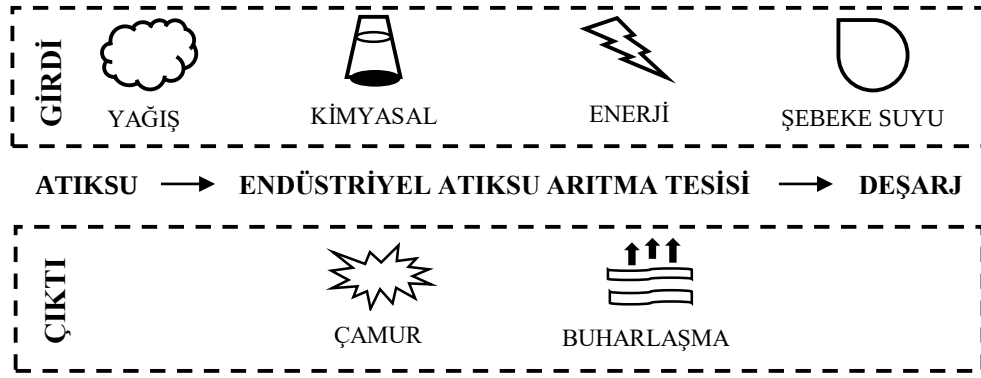
Çizelge 4.3. Alıcı ortam analiz sonuçları.

Parametre	Metot	Sonuç (mg/L)	SKKY Tablo 1			
			Sınıf I	Sınıf II	Sınıf III	Sınıf IV
Alüminyum (Al)	TS EN ISO 11885	0,149	0,300	0,300	1,000	>1,000
Bakır (Cu)	TS EN ISO 11885	<0,011	0,020	0,050	0,200	>0,200
Bor (B)	TS EN ISO 11885	0,120	1,00	1,000	1,000	>1,000
Çinko (Zn)	TS EN ISO 11885	<0,01	0,200	0,500	2,000	>2,000
Demir (Fe)	TS EN ISO 11885	0,335	0,300	1,000	5,000	>5,000
Gümüş (Ag)	TS EN ISO 11885	<0,011	-	-	-	-
Kadmiyum (Cd)	TS EN ISO 11885	0,010	0,003	0,005	0,010	>0,010
KOİ	SM 5220 D	44,37	25,00	50,00	70,00	>70,00
Krom (Cr ⁺⁶)	SM 3500 Cr B	<0,010	-	0,020	0,050	>0,050
Kurşun (Pb)	TS EN ISO 11885	<0,010	0,010	0,020	0,050	>0,050
Mangan (Mn)	TS EN ISO 11885	<0,010	0,100	0,500	3,000	>3,000
Nikel (Ni)	TS EN ISO 11885	<0,010	0,020	0,050	0,200	>0,200
Sülfat (SO ₄)	SM 4500 Sulfate-D	75,00	200	200	400	>400,0
Toplam Azot (TA)	Merck Metodu	13,50	5,702	11,61	25,25	>25,25
Toplam Fosfor (TF)	TS EN ISO 11885	0,401	0,020	0,160	0,650	>0,650
Toplam Krom	TS EN ISO 11885	<0,010	0,020	0,050	0,200	>0,200

SAI Değerlendirme Kılavuzu'nda belirtildiği gibi, SAI alıcı ortamın su kalitesini korumayı amaçlar [56]. Bu nedenle SKKY'de belirtilen su kalite sınıflarının sınır değerleri Tablo 1: İç Su Kaynaklarının Sınıflara Göre Kalite Kriterleri SAI_{Gri} hesaplamalarında deşarj limitleri ($C_{DeşarjLimiti}$) olarak alınmıştır. SAI_{Gri} hesaplamalarındaki deşarj limitleri ($C_{DeşarjLimiti}$), alıcı ortam su kalitesini korumak adına alıcı ortamın mevcut su kalite sınıfı olan Sınıf III (orta) su kalite limitleri olarak belirlenmiştir.

4.3 Atıksu Arıtma Tesisi Su Ayak İzinin Belirlenmesi

AAT için SAI değerlendirmesi AAT giriş ve çıkış suyu analiz sonuçlarına bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamı yalnızca AAT ile sınırlı tutulmuş, AAT'nin SAI girdi ve çıktıları ele alınmıştır. AAT'nin SAI açısından girdi ve çıktı bileşenleri Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. AAT'nin SAI bileşenleri.

Tesise doğrudan ve dolaylı olarak giren su miktarları tesis SAI girdilerine kaynaklık etmektedir. Tesise gelen atıksu, kimyasal kullanımı, yağışlar, enerji kullanımı, proses ve günlük ihtiyaçlar için su kullanımı; tesis SAI girdilerini oluşturmaktadır. Aynı şekilde çamur bertarafı, buharlaşma ve deşarj gibi işlemler su kullanımına sebep olan faaliyetler olup SAI çıktıları oluşturur. SAI bileşenlerinin karakterizasyonu Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. SAI bileşenlerinin karakterizasyonu.

SAİ Parametreleri (n=24)		BOİ ₅	KOİ	TA	TF	AKM
SAİ _{Gri}	C _{Giriş} (g/m ³)	396,3 ± 277,6	924,3 ± 717,3	26,14 ± 9,45	2,76 ± 1,875	426,9 ± 319,3
	C _{Çıkış} (g/m ³)	13,83 ± 5,463	34,45 ± 11,51	22,22 ± 9,938	0,813 ± 0,465	14,90 ± 5,205
	C _{Deşarj Limiti} (g/m ³)	Sınıf III (orta)	20	70	25,25	0,65
	Q _{Giriş} veya Q _{Çıkış} (m ³ /ay)	742.504,167 ± 86.847,4				
SAİ _{Mavi, Doğrudan}	Şebeke Suyu (m ³ /ay)	130,000 ± 52,493				
	Kayıp (m ³ /ay)	3,713 ± 0,434				
	Buharlaşma (m ³ /ay)	64,772 ± 30,262				
	Çamur Miktarı (m ³ /ay)	298,933±105,338				
SAİ _{Mavi, Dolaylı}	Çamur Arıtımı (m ³ /ay)	38,9±13,7				
	Enerji Tüketimi (m ³ /ay)	3.125,7 ± 404,6				
	Kimyasallar (m ³ /ay)	55,52 ± 22,64				
SAİ _{Yeşil}	Yağış (m ³ /ay)	1.332,227 ± 765,487				

Çalışmada yapılan hesaplamalarda SAI Değerlendirme Kılavuzu esas alınmıştır [74]. SAI_{Gri} hesaplanırken; arıtım olmadan deşarj, arıtım sonrası deşarj ve iki durum arasındaki farktan hareketle tesis verimliliği durumları ele alınmıştır. Alıcı ortam su

kalitesi SKKY Tablo 1'e göre Sınıf III (orta) olarak tespit edilmiştir. Orta kalitedeki yüzeysel su kaynakları; gıda, tekstil gibi nitelikli su gerektiren tesisler hariç olmak üzere, uygun bir arıtmadan sonra su ürünleri yetiştiriciliği için kullanılabilir nitelikte su ve sanayi suyu olarak kullanılabilmektedir. Bu nedenle SAI_{Gri} hesaplamalarındaki deşarj limitleri ($C_{Deşarj\ Limiti}$) Sınıf III (orta) su kalite limitleri olarak belirlenmiştir.

SAI_{Mavi} hesabı yapılırken; doğrudan ve dolaylı etkenler üzerinde durulmuştur. Bu iki bileşenin toplamı, $SAI_{Mavi, Toplam}$ değerini vermiştir.

2018 yılı Türkiye elektrik üretimi için kullanılan enerji kaynaklarının oranları hesaplamalarda kullanılmıştır. Mekonnen ve Hoekstra tarafından yapılan çalışmadaki, belli oranda enerji üretimi için oluşan SAI_{Mavi} değerleri kabul edilmiştir [14]. Mekonnen ve Hoekstra tarafından yapılan bir çalışmada 1.000 \$ değerindeki bir endüstriyel ürünün içerisinde saklı bulunan ortalama SAI_{Mavi} miktarı ülkelere göre hesaplanmış ve Türkiye için bu değer $27,7\ m^3$ olarak kabul edilmiştir [66].

4.3.1 Atıksu arıtma tesisi su ayak izi girdileri

Bir AAT'nin performansı genellikle AAT'nin giriş suyundaki temel kirleticiler parametreler üzerinden değerlendirilir [75]. 42 Evler AAT'de endüstriyel ve evsel nitelikli atıksuların beraber arıtılmaktadır. Tesisin giriş debisi $24.750,139 \pm 2.894,913\ m^3/ay$ aralığında değişim göstermektedir. Tesisin giriş ve çıkış noktalarından alınan su numunelerinin analiz sonuçları dikkate alınarak SAI hesapları yapılmıştır. Tesis SAI girdileri; atıksuyun tesise girişi, yağış, enerji kullanımı, kimyasal kullanımı ve şebeke suyu kullanım miktarlarıdır. Tesis girdi ve çıktıları Şekil 4.2'de verilmiştir.

Yağış; Yağış ile tesise giren SAI miktarı, aylık ortalama tesise düşen yağış miktarı ile açık yüzey alanın çarpılmasıyla hesaplanır. Bölgeye ait aylık yağış miktarlarına ulaşılarak, tesise yağışla bulaşan su miktarı hesaplanmıştır. Bu değer $SAI_{Yeşil}$ olarak hesaplanmıştır.

Kimyasal; AAT arıtım süresince kimyasal kullanımı kaynaklı su tüketimine neden olmaktadır. Kimyasal üretimi ve tedariki süreçlerinde su kullanımı vardır.

Enerji; AAT sürecin başlangıcından sonuna kadar enerji kullanımına ihtiyaç duyar. Havalandırma havuzları ve dekantör ünitesi gibi birçok proseste enerji tüketimi vardır.

Tüketilen elektrik enerjisinin, üretimi için su kullanılmaktadır. Dolayısıyla tesise gelen ve kullanılan enerji, tesis için $SA\dot{I}$ girdisidir. Bu değer $SA\dot{I}_{Mavi,Dolaylı}$ hesabında, $SA\dot{I}_{Mavi,Enerji}$ olarak hesaplanmıştır.

Şebeke Suyu; Tesis içerisinde personel kullanımı ve proses içi kullanımı için şebekeden su çekilmektedir. Tesise gelen ve kullanılan bu su miktarı, $SA\dot{I}$ girdisidir. Bu değer $SA\dot{I}_{Mavi,Doğrudan}$ içerisinde hesaplanmıştır.

4.3.2 Atıksu arıtma tesisi su ayak izi çıktıları

Tesis $SA\dot{I}$ çıktılarını; gönderilen çamur, buharlaşma ve deşarj oluşturmaktadır.

Çamur; AAT klasik aktif çamur sistemi ile çalışan biyolojik bir arıtma tesisidir. Tesis arıtım sonucu çamur oluşumuna sebep olmaktadır. Oluşan bu çamurun bir kısmı geniş devir ile sisteme dahil edilmektedir. Kalan kısmı ise çamur yoğunlaştırma ve dekantörde arıtılarak deşarj edilmektedir. Tesisten atılan bu miktar $SA\dot{I}$ çıktısı olarak değerlendirilmiştir. Tesisten atılan çamurun içinde bulunan su miktarı $SA\dot{I}_{Mavi,Doğrudan}$ hesabında $SA\dot{I}_{Mavi,Çamur}$ olarak, arıtılan çamur için kullanılan kimyasalın teşkil ettiği su kullanımı $SA\dot{I}_{Mavi,Dolaylı}$ hesabında $SA\dot{I}_{Mavi,Çamur}$ olarak hesaplanmıştır.

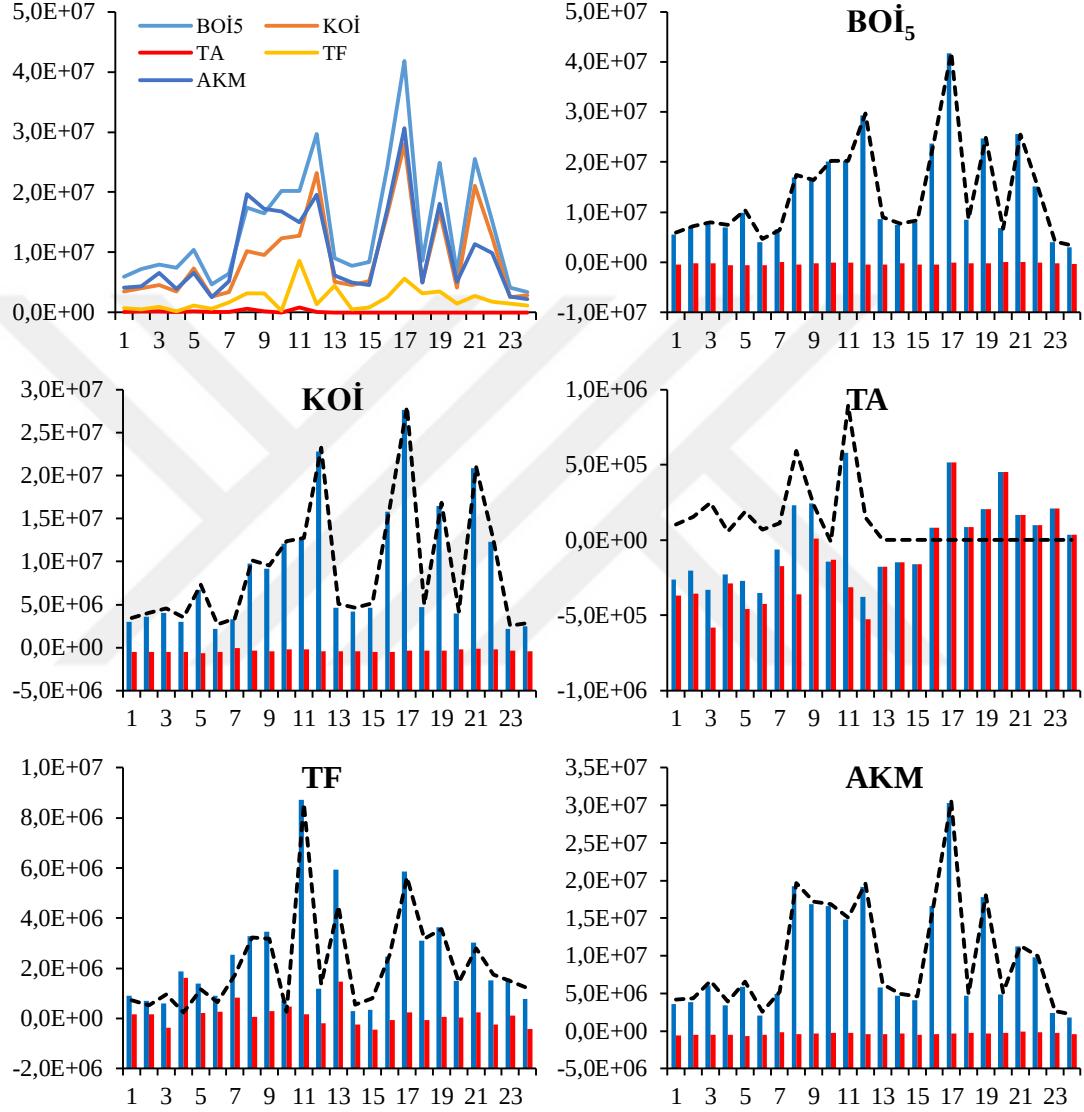
Buharlaşma; AAT'ler üzeri açık tesisler oldukları için bu tesislerde buharlaşma ile su çıkışı gerçekleşmektedir. Tesisin bulunduğu bölgeye ait buharlaşma verilerinde $6,17 \pm 2,882$ mm su buharlaştığı bilgisine ulaşılmıştır. Bu değer açık alan ile çarpılması ile aylık olarak buharlaşan su miktarı hesaplanmıştır. Bu değer $SA\dot{I}$ çıktısı olarak değerlendirilmiş ve $SA\dot{I}_{Mavi,Doğrudan}$ 'da hesaplanmıştır.

Deşarj; Tesise gelen atıksu, proseslerden geçerek arıtmakta ve arıtım sonrasında alıcı ortam su kalite sınıfını koruyacak şekilde deşarj edilmektedir.

4.3.3 Atıksu arıtma tesisi gri su ayak izi

AAT'ler için $SA\dot{I}$ yaklaşımına dayanarak, $SA\dot{I}_{Gri}$ 'nin bir kirletici seviyesini alıcı ortam konsantrasyonlarına düşürmek için gereken tatlı su hacmi olduğu söylenebilir. Bu nedenle alıcı ortama kontrolsüz bir şekilde deşarj edilen kirleticiler için $SA\dot{I}_{Gri}$ miktarları oldukça yüksekken, arıtma sonrası $SA\dot{I}_{Gri}$ miktarları azalmaktadır. $SA\dot{I}_{Gri}$ miktarlarının negatife düşmesi alıcı ortama deşarj edilen suyun kalitesinin alıcı

ortam su kalitesinden daha iyi olduğunu gösterir. Bu çalışmada, kirleticinin alıcı ortama kontrolsüz deşarjı $SAI_{Gri,Arıtılmamış}$ olarak adlandırılmıştır. Arıtım sonrası deşarjı $SAI_{Gri,Arıtılmış}$, AAT'nin SAI_{Gri} azaltılmasına katkısı ikisi arasındaki farkı ifade eder ve ΔSAI_{Gri} olarak adlandırılmıştır. 42 Evler AAT'nin her bir kirlетici parametreleri üzerinden SAI_{Gri} azalımına katkısı Şekil 4.3'de gösterilmiştir.

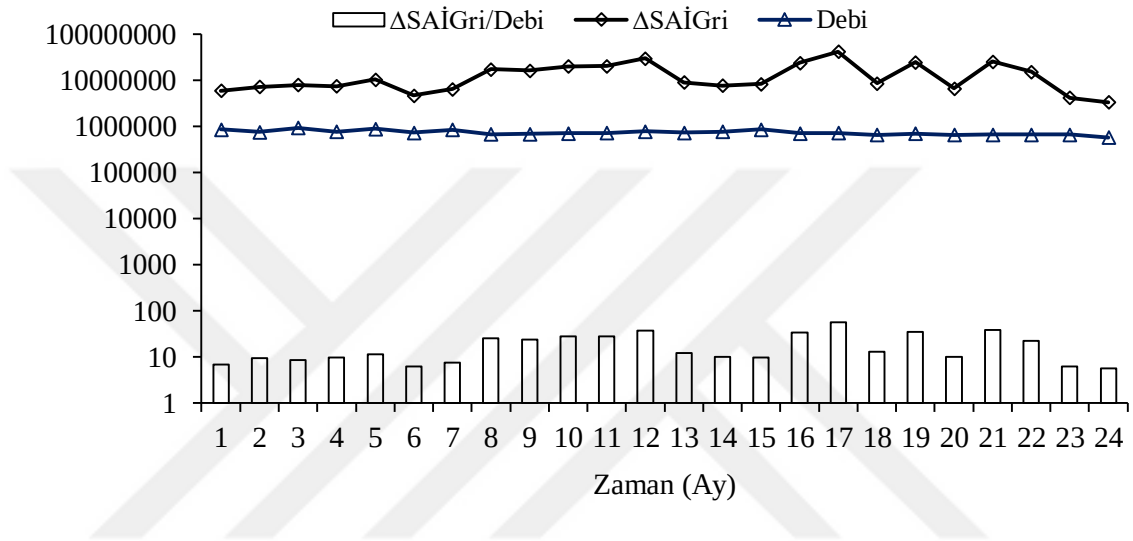


Şekil 4.3. AAT SAI_{Gri} hesabı.

Burada; mavi çubuk $SAI_{Gri,Arıtılmamış}$, kırmızı çubuk $SAI_{Gri,Arıtılmış}$, kesikli siyah çizgi ΔSAI_{Gri} değerlerini, x eksenı su hacmini ve y eksenı zamanı temsil etmektedir. İlk grafik ise tüm kirlетici parametreler için ΔSAI_{Gri} değerlerini ifade etmektedir.

Şekil 4.3'de görüldüğü gibi, her bir kirlетici parametre kontrolsüz bir şekilde alıcı ortama deşarj edildiğinde $SAI_{Gri,Arıtılmamış}$ miktarı oldukça yüksektir. Örneğin BOI_5

parametresi arıtım olmadan alıcı ortama deşarj edildiğinde, alıcı ortam konsantrasyonuna asimile edilmesi için ortalama $13.674.848 \text{ m}^3/\text{ay}$ tatlı su gereklidir. Ayrıca BOI_5 arıtıldıktan sonra gerekli tatlı su miktarı ortalama $232.603 \text{ m}^3/\text{ay}$ azalmaktadır. Yani AAT çıkış suyundaki BOI_5 konsantrasyonu alıcı ortamın limitlerinden düşük olduğu için alıcı ortamı kirletmemiş, aksine alıcı ortamın su kalitesini artırmıştır. Arıtılan birim atıksu başına alıcı ortamda asimile olmaktan korunan birim taze su miktarını Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



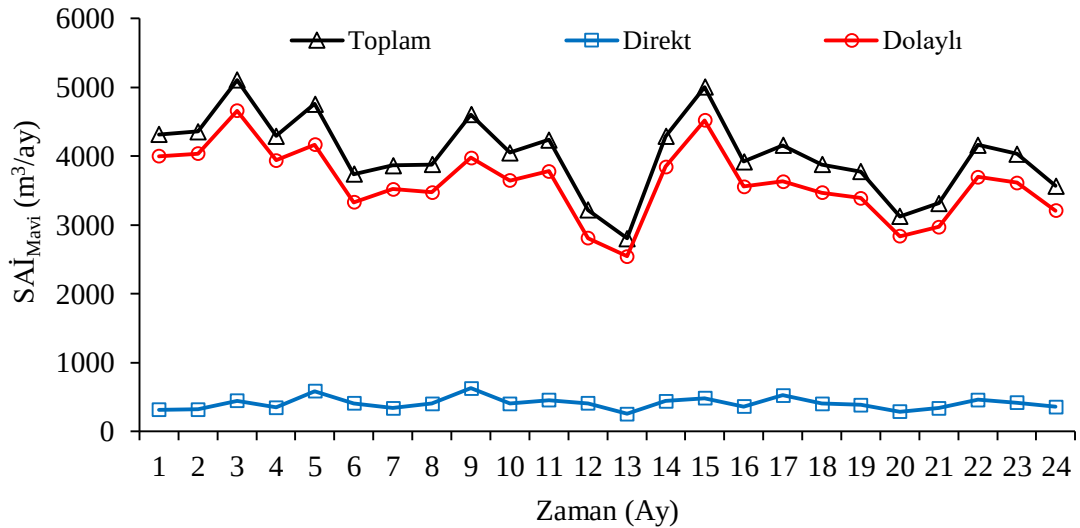
Şekil 4.4. SAI_{Gri} 'nin debiye oranı.

Burada; kare sembolü $\Delta \text{SAI}_{\text{Gri}}$ değerini, üçgen sembolü AAT giriş debisini, dikey çubuklar ise $\Delta \text{SAI}_{\text{Gri}}$ 'nin debiye oranını, x eksenini su hacmini ve y eksenini zamanı temsil etmektedir.

BOI_5 parametresinin arıtılması sayesinde su döngüsünde ortalama $13.907.451 \text{ m}^3/\text{ay}$ tatlı su asimile olmaktan korunmuştur. 42 Evler AAT'nin katkısı en yüksek BOI_5 parametresi için olurken, en düşük katkı $116.710,13 \text{ m}^3/\text{ay}$ ortalama tatlı su miktarı ile TA parametresi için olmuştur. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde AAT'nin SAI_{Gri} miktarının azaltılmasına katkısı BOI_5 parametresi üzerinden değerlendirilmiştir. Ayrıca AAT, giriş atıksu debisinden 16 ± 11 kat daha büyük bir tatlı su hacmini alıcı ortamda asimile olmaktan koruyarak çarpıcı bir sonuç olarak ortaya çıkmıştır.

4.3.4 Atıksu arıtma tesisi mavi su ayak izi

SAI_{Gri} miktarındaki azalma AAT'nin su döngüsüne katkısını gösterirken, AAT'nin işletilmesi sırasında tüketilen bazı ürün ve hizmetler için şebekeden gelen tatlı su kullanılmaktadır. Yani AAT'nin sağladığı faydaların yanı sıra doğrudan ve dolaylı olarak tüketilen ve buna SAI_{Mavi} adı verilen tatlı su kullanımı mevcuttur. AAT'ler için SAI_{Mavi} , arıtma işlemlerinden buharlaşma veya bağlı su yoluyla su döngüsüne geri dönen, arıtma süreçlerini yürütmek için kullanılan kimyasalların ve enerjinin üretiminde kirlenen tatlı su miktarını temsil eder. Ayrıca AAT'de çalışan personelin günlük su tüketimi de SAI_{Mavi} hesaplamalarında dikkate alınmıştır. Su kullanımı, tüketilen, buharlaşan ve/veya kirlenen suyun hacmi olarak ölçülmüştür. Bu çalışmada, AAT'den su döngüsüne geri dönen su miktarı $SAI_{Mavi,Doğrudan}$ olarak ifade edilmiş ve buharlaşma ile kaybedilen, sızma ile kaybedilen, çamurda bağ-su olarak kaybedilen ve personel tarafından günlük tüketilen suyun toplamını içermektedir. $SAI_{Mavi,Dolaylı}$, çamurun arıtılmasında kullanılan polielektrolit kimyasalının üretimi sırasında kullanılan su miktarını ve AAT'de tüketilen enerjinin üretiminde kullanılan su miktarını içerir. 42 Evler AAT, $SAI_{Mavi,Doğrudan}$, $SAI_{Mavi,Dolaylı}$ ve $SAI_{Mavi,Toplam}$ için değerler Şekil 4.5'te açıkça belirtilmiştir.



Şekil 4.5. AAT SAI_{Mavi} hesabı.

Burada; üçgen sembolü $SAI_{Mavi,Toplam}$ 'ı, kare sembolü $SAI_{Mavi,Doğrudan}$ 'ı ve daire sembolü ise $SAI_{Mavi,Dolaylı}$ 'yı ifade etmektedir. $SAI_{Mavi,Dolaylı}$, $SAI_{Mavi,Toplam}$ 'ın $87,143 \pm 2,196\%$ 'sını oluşturur. AAT'de tüketilen elektrik enerjisinin üretimi için kullanılan su miktarı $SAI_{Mavi,Dolaylı}$ 'nın $97,093 \pm 0,874\%$ 'ünü oluşturmaktadır. Buradan hareketle

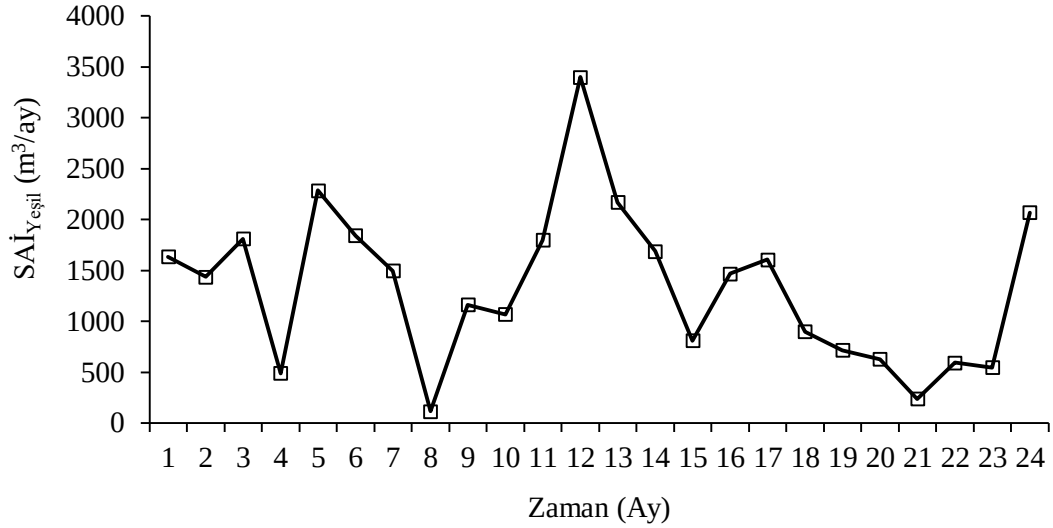
tesis Su-Enerji ilişkisi değerlendirilmiştir. $SAI_{Mavi,Toplam}$ ile ΔSAI_{Gri} karşılaştırılarak, AAT'nin su döngüsüne kar ve zarar analizi yapılmıştır.

Daha önce Morera, S., L. Corominas tarafından yapılan çalışmada üç senaryo (arıtım yapılmadan doğrudan deşarj, ikincil arıtım ve fosfor giderimi) göz önüne alınarak AAT SAI_{Mavi} ve SAI_{Gri} değerleri hesaplanmıştır [7]. $SAI_{Yeşil}$ ihmal edilerek hesaplamalar yapılmış ve bu çalışma neticesinde SAI_{Gri} ve SAI_{Mavi} 'nin toplam SAI 'ye oranı sırasıyla; %95 ve %5 bulunmuştur. Bu çalışmada da SAI_{Mavi} 'nin çok büyük bir bölümünü elektrik tüketiminin oluşturduğu sonucuna varılmıştır.

Su kıtlığı ile ilgili problemler insanlığı yeni su kaynakları aramaya itmiştir. AAT'ler gibi arıtım sonrası yüksek hacimlerde su deşarjı yapan tesisler bu kapsamında değerlendirilmeye başlanmıştır. Modern tesislerin birçoğu ileri arıtım yöntemleri ile dizayn edilerek, arıtılan suların tekrar tesis içinde veya farklı alanlarda kullanımı politikası ile tasarlanmaktadır. Böylelikle ciddi miktarlarda su tasarrufu sağlanmaktadır. Bu planlamalar yüksek yatırım maliyeti doğuracak olsa da uzun vadede; su kaynağının sürdürülebilirliği, düşük enerji tüketimi, doğal su ortamını koruma ve su temini maliyetlerini azaltma gibi birçok avantaj kazandıracaktır [76].

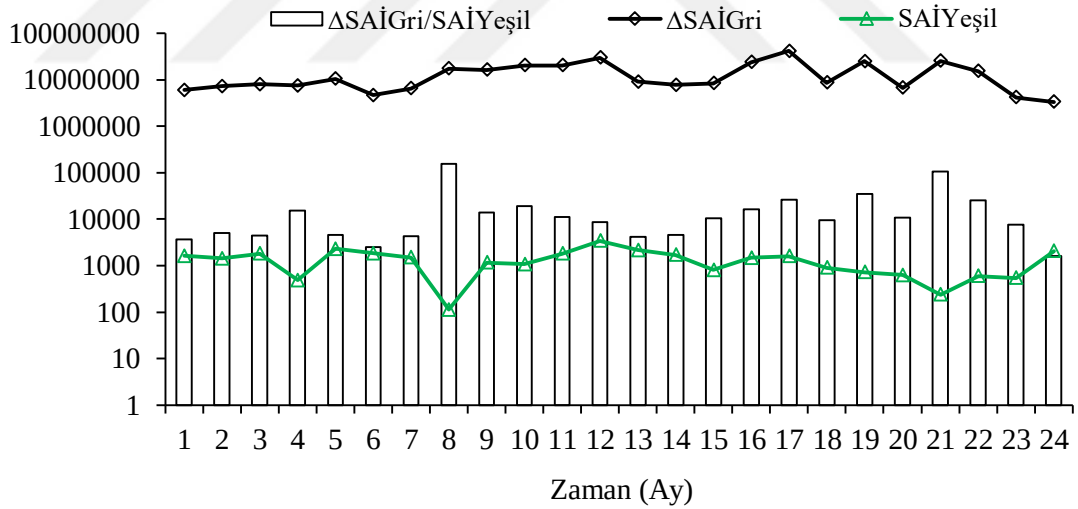
4.3.5 Atıksu arıtma tesisi yeşil su ayak izi

$SAI_{Yeşil}$ hesaplamasında yalnızca AAT yüzeyine düşen yağış verileri kullanılmıştır. Kocaeli İli aylık yağış miktarları dünya hava durumu çevrimiçi sitesinden alınmıştır. Aylık ortalama toplam yağış 126,879 mm'dir. AAT'nin açık yüzeyi 10.500 m² olarak belirlenmiştir. Aylık $SAI_{Yeşil}$ miktarları Denklem 3.14'e göre hesaplanmış ve Şekil 4.6'da sunulmuştur.



Şekil 4.6. AAT SAI_{Yeşil} hesabı.

Bölge yağış miktarı aylık ortalama 126,879 mm'dir. Tesis açık yüzey alanı 10.500 m² ile çarpılarak arıtmaya yağışla düşen aylık ortalama su miktarı hesaplanmıştır. AAT alıcı ortamda asimile olmaktan korunan su miktarının yağmur suyuna oranı Şekil 4.7'de verilmiştir.



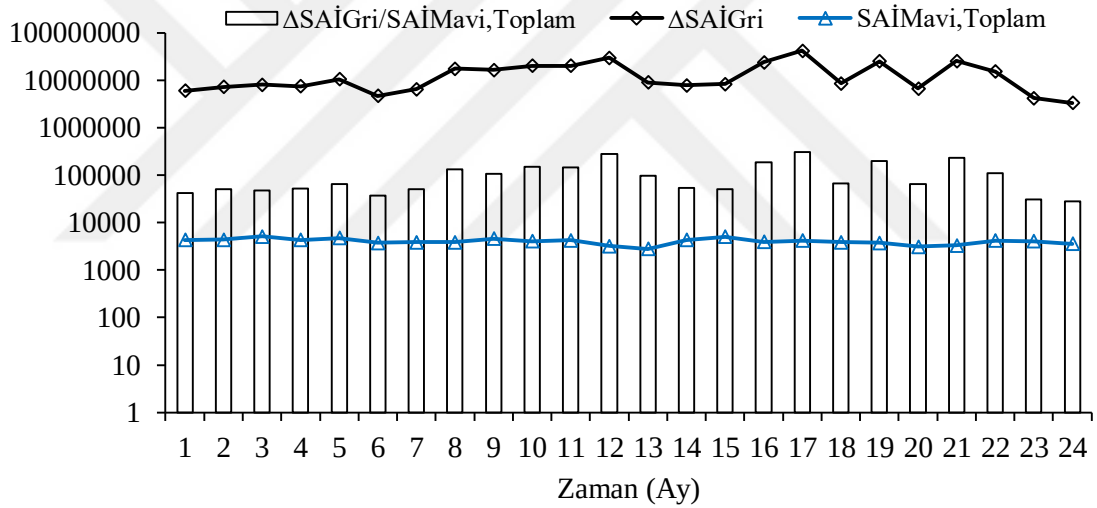
Şekil 4.7. AAT tarafından korunan taze su hacminin (ΔSAI_{Gri}) tesise yağışla gelip kirlenen su hacmine (SAI_{Yeşil}) oranı.

Burada; kare sembolü ΔSAI_{Gri} değerini, üçgen sembolü SAI_{Yeşil} değerini, dikey çubuklar ise ΔSAI_{Gri}'nin SAI_{Yeşil}'e oranını, x eksen su hacmini ve y eksen zamanı temsil etmektedir. Şekil 4.7'deki sonuçlara göre tesise yağışla gelip kirlenen su miktarının (SAI_{Yeşil}) AAT tarafından asimile olmaktan korunan taze su miktarına

($\Delta SA\dot{I}_{Gri}$) oranı ortalama 0,02% olarak bulunmuştur. Bu nedenle, $SA\dot{I}_{Gri}$ yanında çok düşük bir değışkene sahip $SA\dot{I}_{Yeşil}$ gelecekte yapılacak çalışmalarda göz ardı edilebilir.

4.4 Atıksu Arıtma Tesisi Enerji-Su İlişkinin Belirlenmesi

Hesaplamalar gösteriyor ki $SA\dot{I}_{Mavi, Dolaylı}$, $SA\dot{I}_{Mavi, Toplam}$ 'ın $\%87,143 \pm \%2,196$ 'sını oluşturmaktadır. AAT tüketilen elektrik enerjisinin üretimi için kullanılan su miktarı $SA\dot{I}_{Mavi, Dolaylı}$ 'nın $\%97,093 \pm 0,874$ 'ünü oluşturmuştur. Bu nedenle $SA\dot{I}_{Mavi}$ 'nin çok büyük bir kısmının AAT'nin elektrik tüketiminden kaynaklı olduğunu söyleyebilir ve $SA\dot{I}_{Mavi}$ 'yi enerji ile bağdaştırabiliriz. $SA\dot{I}_{Mavi}$ ile $\Delta SA\dot{I}_{Gri}$ karşılaştırarak, AAT'nin su döngüsüne kar ve zararı analizi yapılmıştır. Bu karşılaştırma aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik ve enerji bağlantısı olarak Şekil 4.8'de gösterildiği gibi yorumlanabilir.



Şekil 4.8. AAT tarafından korunan taze su hacminin ($\Delta SA\dot{I}_{Gri}$) tüketilen su hacmine ($SA\dot{I}_{Mavi, Toplam}$) oranı.

Burada; kare sembolü $\Delta SA\dot{I}_{Gri}$ değerini, üçgen sembolü $SA\dot{I}_{Mavi, Toplam}$ değerini, dikey çubuklar ise $\Delta SA\dot{I}_{Gri}$ 'nin $SA\dot{I}_{Mavi, Toplam}$ 'a oranını, x eksenini hacmi ve y eksenini zamanı temsil etmektedir.

BOI_5 parametresine göre hesaplanan $\Delta SA\dot{I}_{Gri}$ 'nin $SA\dot{I}_{Mavi, Toplam}$ 'a oranı 29.993-322.940 aralığında ortalama 116.327 m³/ay'dır. $\Delta SA\dot{I}_{Gri}$ değerlerinin en düşük hesaplandığı TA parametresine göre bile en yüksek $\Delta SA\dot{I}_{Gri}/SA\dot{I}_{Mavi, Toplam}$ oranı 233'tür. En kötü durum gözetildiğinde dahi AAT işleyişi esnasında harcanan 1 m³ suya karşılık alıcı ortamdaki 233 m³ taze su asimile olmaktan korunmuştur. $\Delta SA\dot{I}_{Gri}$ BOI_5

parametresine göre hesaplandığında ise $SAI_{Gri}/SAI_{Mavi,Toplam}$ oranı ortalama 107.107 olmaktadır. Buradan yapılan çıkarımla AAT'nin işleyişi esnasında harcanan 1 m³ suya karşılık alıcı ortamda ortalama 107.107 m³ taze su asimile olmaktan korunmuştur. $\Delta SAI_{Gri}/SAI_{Mavi,Toplam}$ hesapları yapılarak AAT'nin su kaynaklarını korumaya ve sürdürülebilir çevreye katkısını gösteren önemli göstergeler üretilmiştir.

4.5 Sürdürülebilir Çevre Açısından Çalışmanın Değerlendirilmesi

Bu çalışmada Kocaeli, Türkiye'de 24.750 ± 2.895 m³/gün debiye sahip 42 Evler AAT'nin tüketilen kimyasallar ve enerjiye karşılık alıcı ortam su kalitesinin korunması amaçlanmış ve doğal su döngüsüne katkısı SAI göstergeleri aracılığıyla yorumlanmıştır. 2018-2019 yıllarında yapılan izleme çalışması sonucunda AAT'nin giriş atıksu karakterizasyonu 54,923 g BOİ/N.gün, 127,711 g KOİ/N.gün, 3,612 g TA/N.gün, 0,381 g TF/N.gün ve 59,047 g AKM/N.gün olarak belirlenmiştir. AAT'nin BOİ₅, KOİ, TA, TF ve AKM giderim verimlilikleri sırasıyla ortalama %95,01, %94,232, %14,87, %63,303 ve %94,788'dir. Sanayi ve kullanım sularının birlikte arıtıldığı 42 Evler AAT, klasik aktif çamur sistemi ile çalışan bir biyolojik AAT'dir. Daha iyi A ve F giderimi için gelecekte gelişmiş bir biyolojik AAT'ye dönüştürülmesi planlanmaktadır.

AAT'de mevcut durumda tüketilen 1 birim suya kıyasla minimum 233 birim, maksimum 322.940 birim suyun korunduğu ve asimile olmaktan korunan suyun giriş debisinden yaklaşık 16 kat daha fazla olduğu SAI göstergeleri ile belirlenmiştir. Sürdürülebilir çevre anlayışında su kaynaklarının sürdürülebilirliği çok önemlidir. Bu anlamda AAT'lerin doğal su döngüsündeki görevleri oldukça önemlidir. AAT'lerde endüstriyel ve evsel kirleticilerin doğal çevreye ulaşmadan önce arıtılması sayesinde su kaynakları sürdürülebilir ve ekosistem korunmaktadır.

4.6 Diğer Çalışmalarla Kıyaslama

AAT'lerde SAI çalışması ilk kez Shao, L. ve G. Chen tarafından SAI_{Mavi} baz alınarak SAI_A yöntemiyle hesaplanmıştır [62]. Shao, L. ve G. Chen bu çalışmada, bir atıksu arıtma sisteminin çevresel etkisi olarak SAI hesaplamak için açık bir muhasebe prosedürü sağlamayı amaçlamıştır [62].

AAT için yapılan SAI çalışmaları farklı amaç ve yöntemlerle hesaplanmıştır. Yapılan çalışma sayısının az olması ve bunların da farklı amaçlar doğrultusunda yapılması sonuçlar arasında farklılıklara sebebiyet vermektedir. Yapılan çalışmanın bulunduğu bölge, arıtım şekli ve kullanılan kimyasallar ölçümlerde ciddi farklara sebep olmaktadır.

Bu çalışmada, evsel ve endüstriyel nitelikli atıksuların beraber arıtıldığı 42 Evler AAT örnek alınarak tesisteki su tüketimine karşılık atıksuların arıtılması sayesinde alıcı ortamda asimile olmaktan korunan su miktarları üzerine bir değerlendirme gerçekleştirilmiştir. SAI değerlendirilmesi yapılırken SAI'nin her üç bileşeni de ele alınmıştır. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada SAI_{Yeşil} hesaplamalara dahil edilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre literatürle benzer şekilde SAI_{Yeşil}'in AAT'leri üzerindeki payı yok sayılabilecek kadar az olduğu ortaya konulmuştur. Ayrıca bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak SAI_{Gri} hesaplanırken 2 durum ele alınmış ve buradan hareketle tesis performansı ölçülmüştür. SAI_{Gri} hesaplamalarında izlenen kirleticilerin limit değeri alıcı ortam su kalite sınıfı gözetilerek belirlenmiştir. Diğer çalışmalarda ise kirleticilerin yasal limit değerleri kanalizasyon deşarj standartları gözetilerek belirlenmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yüksek BOI_5 , KOI , TA , TF ve AKM kirlilik yüküne sahip endüstriyel ve evsel atıksuların birlikte arıtıldığı 42 Evler AAT, SAI kapsamında incelenmiştir. SAI değerlendirmesinde SAI_{Gri} , SAI_{Mavi} ve $SAI_{Yeşil}$ bileşenleri ayrı ayrı ele alınmıştır.

SAI_{Gri} hesaplanırken arıtım yapılması ve yapılmaması durumları göz önünde bulundurularak 2 değerlendirme yapılmıştır. 42 Evler AAT'nin alıcı ortama katkısı en yüksek BOI_5 parametresi için olurken, en düşük katkı $116.710,13 \text{ m}^3/\text{ay}$ ortalama tatlı su miktarı ile TA parametresi için olmuştur. Yapılan hesaplamalardaki sonuçların eksi değer çıkması gösteriyor ki arıtım sonrası konsantrasyonlar alıcı ortamın limitlerinden düşük ve alıcı ortamı kirletmemiş, aksine alıcı ortamın su kalitesini artırmıştır. BOI_5 parametresinin arıtılması sayesinde su döngüsünde ortalama $13.907.451 \text{ m}^3/\text{ay}$ tatlı su asimile olmaktan korunmuştur. Ayrıca AAT, giriş atıksu debisinden 2-30 kat daha büyük bir tatlı su hacmini alıcı ortamda asimile olmaktan koruyarak çarpıcı bir sonuç olarak ortaya çıkarmıştır. 2 durumun incelenmesi neticesinde yapılan hesaplamalar gösteriyor ki AAT'ler atıksuyun alıcı ortama direkt deşarjını önleyerek en kötü ihtimalde bile çok ciddi miktarlarda su hacminin asimile olmaktan korunmasını sağlamıştır. Bu da AAT'lerin önemini bir kez daha göstermektedir.

SAI_{Mavi} hesaplanırken; doğrudan ve dolaylı su kullanımları hesaplanmış $SAI_{Mavi, Toplam}$ $3.695,909 \text{ m}^3$ olarak elde edilmiştir. Çalışmada, $\Delta SAI_{Gri}/SAI_{Mavi, Toplam}$ oranı ile tesisin 1 m^3 su kullanımına karşı arıtım ile asimile olmaktan koruduğu su miktarı hesaplanmıştır. Yapılan hesaplama gösteriyor ki, alıcı ortama en düşük katkısı bulunan TA parametresinde bile 1 m^3 suya kıyasla alıcı ortamdaki 233 m^3 taze su asimile olmaktan korunmuştur. Tesisin aylık ortalama tüketmiş olduğu 1 m^3 suya kıyasla asimile olmaktan koruduğu su miktarı ise $116.327,011 \text{ m}^3$ 'tür.

$SAI_{Yeşil}$, SAI_{Mavi} , SAI_{Gri} hesaplamaları gösteriyor ki; tesiste arıtım sayesinde ciddi hacimlerde su asimile olmaktan korunmakla beraber tesiste dolaylı ve doğrudan su tüketimi de mevcuttur. AAT'nin doğrudan ve dolaylı su tüketimini azaltarak tesisin SAI 'ye katkısını arttırmak önemli bir adım olacaktır. SAI_{Mavi} hesaplamaları neticesinde $SAI_{Mavi, Toplam}$ 'ın önemli bir bölümünü dolaylı kullanım, dolaylı kullanımın da önemli bir kısmını elektrik tüketimi kaynaklıdır. Dolayısıyla tesis ile ilgili atılacak ilk adımlardan biri tesis enerji kullanımını dürmektir. Bu düşüş alternatif arıtım

yöntemleri ile sağlanabilir. Seçilecek arıtım yönteminde öncelik arıtım performansı ve atıksu karakterizasyonu olmakla beraber, uygulanabilirliği değerlendirilerek örneğin; anaerobik arıtım ile suda bulunan organik kirleticiler giderilebilir. Anaerobik arıtım ile beraber hem havalandırma için gerekli enerjiden tasarruf edilecek hem de $SAI_{Mavi,Enerji}$ azaltılmış olacak dolayısıyla tesisin SAI azalmış olacaktır. Bununla beraber aerobik arıtım sonucu oluşan metan gazının depolanması ve elektriğe dönüştürülmesi gelişmiş teknolojilerde sıklıkla kullanılmaktadır. Yapılacak arıtım sonucu oluşan metan gazın elektrik enerjisine dönüştürülerek bu enerjinin tesis içinde kullanılması bir diğer enerji tasarrufu olacaktır. Böylelikle çalışmada hesaplanan $SAI_{Gri}/SAI_{Mavi,Toplam}$ oranı daha da artarak tesisin su ve enerji sürdürülebilirliği anlamında daha etkili bir katkısı olacaktır.

$SAI_{Yeşil}$ hesaplanırken aylık yağış miktarlarına ulaşılarak $SAI_{Yeşil}$ hesaplanmıştır. Tesise yağışla karışan yağış suyu miktarı aylık ortalama debinin 0.0018 katı olarak hesaplanmıştır. Bu değer göz ardı edilebilecek kadar düşüktür. Su varlığı ile ilgili endişelerin her geçen gün arttığı dünyamızda düşük hacimdeki suların bile israfı yapılmamalıdır. Çalışmada $SAI_{Yeşil}$ hesaplamaları sonucunda tesise yağmur ile düşüp kirlenen yağmur suyu miktarı tespit edilmiştir. Bu miktar düşük bir değere sahip olsa da tek bir birim suyun bile canlılık için önemi tartışılmaz. Bu kadar değerli olan yağmur sularını düşük hacim yüksek hacim olarak gözetmeden boşa akışını veya kirlenmesini önlemeliyiz. Bu doğrultuda konunun öneminden hareketle Yağmur hasadı çalışmaları günümüzde sıklıkla karşımıza çıkan bir yaklaşımdır. 42 Evler AAT için de bu yöntem, yağmur suyunu korumak amacı ile yapılabilir. Yağmur suyu toplama sistemleri ile tesise gelen/düşen yağmur suları toplanarak tesis içi kullanıma gönderilebilir. Böylelikle tesis işletmesi için şebekeden çekilen su miktarı düşecek ve aynı zamanda yağmur suları bir amaç doğrultusunda kullanılmış olacaktır.

Bu değerlendirmelerin hepsi birer yorum olmakla beraber tabii ki arıtma tesisi işletmesi ve proses seçimlerinde; tesisin bulunduğu konum, gelen atıksuyun karakterizasyonu, tesis kullanılabilir alanı ve maliyet gibi birçok etkenin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Su-enerji sürdürülebilirliği amacı doğrultusunda bütün bu etkenlerin birlikte değerlendirilmesi ile en verimli yöntem/prosesler seçilebilir. SAI kavramı bu çalışmaların en önemli parçalarından biri olarak değerlendirilmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] Wei, Z., Xin, L., Zhang, W., Bai, C., Wang, C. ve Li, C., 2019. Isolation and characterization of *Vibrio harveyi* as a major pathogen associated with mass mortalities of ark clam, *Scapharca broughtonii*, in summer, *Aquaculture*, 511, 734248.
- [2] Yang, Martin MC., 2021. Socio-economic results of land reform in Taiwan, ISBN: 9780824885472, University of Hawaii Press, USD.
- [3] Yimere, A. ve Assefa, E., 2021. Assessment of the Water-Energy Nexus under Future Climate Change in the Nile River Basin, *Climate*, 9, 5, 84.
- [4] Wang, W., Wu, B., Liu, Z., Zhou, L., Sun, X., Tian, J. ve Yang, A., 2021. Development of EST-SSRs from the ark shell (*Scapharca broughtonii*) transcriptome and their application in genetic analysis of four populations, *Genes & Genomics*, 43, 6, 669-677.
- [5] Cipolletta, G., Ozbayram, E. G., Eusebi, A. L., Akyol, Ç., Malamis, S., Mino, E. ve Fatone, F., 2021. Policy and legislative barriers to close water-related loops in innovative small water and wastewater systems in Europe: A critical analysis, *Journal of Cleaner Production*, 288, 125604.
- [6] Habib, R. Z., Al Kendi, R. ve Thiemann, T., 2021. The Effect of Wastewater Treatment Plants on Retainment of Plastic Microparticles to Enhance Water Quality—A Review, *Journal of Environmental Protection*, 12, 03, 161.
- [7] Morera, S., Corominas, L., Poch, M., Aldaya, M. ve Comas, J., 2016. Water footprint assessment in wastewater treatment plants, *Journal of Cleaner Production*, 112, 4741-4748.
- [8] Banerjee, C. ve Sharma, A., 2021. Decline in terrestrial water recharge with increasing global temperatures, *Science of The Total Environment*, 764, 142913.
- [9] Friedland, R., Macias, D., Cossarini, G., Daewel, U., Estournel, C., Garcia-Goriz, E., Grizzetti, B., Grégoire, M., Gustafson, B. ve Kalaroni, S., 2021. Effects of nutrient management scenarios on marine eutrophication indicators: a Pan-European, multi-model assessment in support of the Marine Strategy Framework Directive, *Frontiers in Marine Science*, 8, 596126.
- [10] Trubetskaya, A., Horan, W., Conheady, P., Stockil, K. ve Moore, S., 2021. A Methodology for Industrial Water Footprint Assessment Using Energy–Water–Carbon Nexus, *Processes*, 9, 2, 393.
- [11] Mallakpour, S., Hussain, C. M. ve Kaushik, S., 2021. Nanoproducts: Biomedical, Environmental, and Energy Applications, *Handbook of Consumer Nanoproducts*, 978-981-15-6453-6, Springer, Singapore.

- [12] Yang, J. ve Chen, B., 2021. Energy efficiency evaluation of wastewater treatment plants (WWTPs) based on data envelopment analysis, *Applied Energy*, 289, 116680.
- [13] Sarpong, G. ve Gude, V. G., 2021. Codigestion and combined heat and power systems energize wastewater treatment plants—Analysis and case studies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 110937.
- [14] Mekonnen, M.M. ve Hoekstra, A.Y. 2011. The water footprint of electricity from hydropower, *Value of Water Research Report Series No. 51*, UNESCO-IHE, Delft, Netherlands.
- [15] Masiá, A., Picó, Y., Calliera, M., Capri, E., Lamastra, L. ve Ferrari, F., 2014. Integrated forecasting models of pesticide concentrations and environmental monitoring campaigns, *Contributions to Science*, ISSN:1575-6343, 151-160.
- [16] Pellicer-Martínez, F. ve Martínez-Paz, J. M., 2016. Grey water footprint assessment at the river basin level: Accounting method and case study in the Segura River Basin, *Ecological Indicators*, 60, 1173-1183.
- [17] Zhao, X., Chen, B. ve Yang, Z., 2009. National water footprint in an input–output framework-a case study of China 2002, *Ecological Modelling*, 220, 2, 245-253.
- [18] Gómez-Llanos, E., Durán-Barroso, P. ve Matías-Sánchez, A., 2018. Management effectiveness assessment in wastewater treatment plants through a new water footprint indicator, *Journal of Cleaner Production*, 198, 463-471.
- [19] Soytürk, O., 2019. Tüketim toplumu ve su, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- [20] Tosunoğlu, B., 2014. Sürdürülebilir küresel refah göstergesi olarak ekolojik ayak izi, *Hak İş Uluslararası Emek ve Toplum Dergisi*, 3, 5, 132-149.
- [21] Rees, W. E., 1992. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out, *Environment and Urbanization*, 4, 2, 121-130.
- [22] Akıllı, H., Kemahlı, F., Okudan, K. ve Polat, F., 2008. Ekolojik Ayak İzinin Kavramsal İçeriği Ve Akdeniz Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi’nde Bireysel Ekolojik Ayak İzi Hesaplaması, *Akdeniz IIBF Dergisi*, 8, 15, 1-25.
- [23] Mızık, E. T. ve Avdan, Z. Y., 2020. Sürdürülebilirliğin Temel Taşı: Ekolojik Ayak İzi, *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 6, 2, 451-467.
- [24] Wiedmann, T. ve Minx, J., 2008. A definition of ‘carbon footprint’, *Ecological economics research trends*, Carolyn, 1, 1-11, Nova Science Publishers, New York, USA.

- [25] Čuček, L., Klemeš, J. J. ve Kravanja, Z., 2015. Overview of environmental footprints, in *Assessing and measuring environmental impact and sustainability.*, Jiri, 978-0-12-799968-5, Elsevier, USA.
- [26] Wackernagel, M., Schulz, N. B., Deumling, D., Linares, A. C., Jenkins, M., Kapos, V., Monfreda, C., Loh, J., Myers, N. ve Norgaard, R., 2002. Tracking the ecological overshoot of the human economy, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99, 14, 9266-9271.
- [27] UNEP ve SETAC, (2009). *Life cycle management: how business uses it to decrease footprint, create opportunities and make value chains more sustainable*, DTI/1208/PA, Ireland.
- [28] Attorre, F., 2014. *Soqatra Archipelago (Yemen): toward systemic and scientifically objective sustainability in development and conservation*, Fabio, ISBN:9788868123345, Edizioni Nuova Cultura, Italy, Rome.
- [29] Padgett, J. P., Steinemann, A. C., Clarke, J. H. ve Vandenberg, M. P., 2008. A comparison of carbon calculators, *Environmental Impact Assessment Review*, 28, 2-3, 106-115.
- [30] Čuček, L., Klemeš, J. J. ve Kravanja, Z., 2012. A review of footprint analysis tools for monitoring impacts on sustainability, *Journal of Cleaner Production*, 34, 9-20.
- [31] Kravanja, Z., 2010. Challenges in sustainable integrated process synthesis and the capabilities of an MINLP process synthesizer MipSyn, *Computers & Chemical Engineering*, 34, 11, 1831-1848.
- [32] Bertok, B., Barany, M. ve Friedler, F., 2013. Generating and analyzing mathematical programming models of conceptual process design by P-graph software, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52, 1, 166-171.
- [33] De Benedetto, L. ve Klemeš, J., 2010. The environmental bill of material and technology routing: an integrated LCA approach, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 12, 2, 191-196.
- [34] Sandholzer, D. ve Narodoslowsky, M., 2007. SPionExcel—fast and easy calculation of the Sustainable Process Index via computer, *Resources Conservation and Recycling*, 50, 2, 130-142.
- [35] Krotscheck, C. ve Narodoslowsky, M., 1996. The Sustainable Process Index a new dimension in ecological evaluation, *Ecological Engineering*, 6, 4, 241-258.
- [36] Niemetz, N., Kettl, K.-H., Eder, M. ve Narodoslowsky, M., 2012. RegiOpt conceptual planner-identifying possible energy network solutions for regions, *Chemical Engineering Transactions*, 29, 517-522.
- [37] Galli, A., Wiedmann, T., Ercin, E., Knoblauch, D., Ewing, B. ve Giljum, S., 2012. Integrating ecological, carbon and water footprint into a “footprint family”

of indicators: definition and role in tracking human pressure on the planet, *Ecological Indicators*, 16, 100-112.

- [38] Fang, K., Heijungs, R. ve De Snoo, G. R., 2014. Theoretical exploration for the combination of the ecological, energy, carbon, and water footprints: Overview of a footprint family, *Ecological Indicators*, 36, 508-518.
- [39] Guinée J., Heijungs R., Huppes G., Koning A. D., Oers L., Sleeswijk A. W., ve Lindeijer E. 2002. Operational guide to the ISO standards, Guinée J.B. (Editor), Handbook on life cycle assessment, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holland.
- [40] Munasinghe M., 2004. Basic Concepts and Application to Energy, Cleveand C. (Editor), Encyclopedia of Energy, Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- [41] World Commission on Environment and Development, (1987). Report of the World Commission on Environment and Development: Our common future, A/42/427, New York, ABD.
- [42] Hoekstra, A. Y. ve Chapagain, A. K., 2006. Integrated Assessment of Water Resources and Global Change, ISBN: 978-1-4020-5590-4, Springer Science, Holland, Dordrecht.
- [43] Hoekstra, A. Y., 2009. Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis, *Ecological Economics*, 68, 7, 1963-1974.
- [44] Kumaş, K., Akyüz, A. Ö., Zaman, M. ve Güngör, A., 2019. Sürdürülebilir bir çevre için karbon ayak izi tespiti: Makü Bucak sağlık yüksekokulu örneği, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 6, 1, 108-117.
- [45] Müller, L. J., Käthelön, A., Bringezu, S., McCoy, S., Suh, S., Edwards, R., ve Bardow, A., 2020. The carbon footprint of the carbon feedstock CO₂, *Energy & Environmental Science*, 13, 9, 2979-2992.
- [46] Mıstıklar, C. ve Pagano, S. M., 2021. Organize sanayi bölgesine ait atıksu arıtma tesisinde ECAM modellemesiyle karbon emisyonu değerlendirmesi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10, 2, 495-504.
- [47] Yapıcıoğlu, P. ve Demir, Ö., 2017. Atıksu Arıtma Tesisleri için İklim Değişikliğine ve Sera Etkisine Genel bir Bakış, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 22, 3, 235-250.
- [48] Pegram, G., Conyngham, S., Aksoy, A., Dıvrak, B. ve Öztok, D., 2014. Türkiye'nin su ayak izi raporu: su, üretim ve uluslararası ticaret ilişkisi, WWF-Türkiye, ISBN: 978-605-86596-7-4.
- [49] Alper, F., 2015. Sürdürülebilirlik Kavramı İçerisinde Su Ayak İzi: Tekstil Sektörü Örneği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [50] Çankaya, T., 2019. Atık Su Arıtma Tesislerinde Su Ayak İzi Hesaplama Yöntem Önerisi Ve Haddeleme-Galvanizleme Tesisinde Uygulama Örneği, Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [51] Aytemiz, L. ve Diler, Ö., 2015. Sanal Su Ekonomisi, İnsan ve Toplum Bilimleri Araştırma Dergisi, 4, 2, 376-389.
- [52] Rogers, P. P. ve Lydon, P., 1994. Water in the Arab world: perspectives and prognoses, ISBN: 06-749-47819, 323-340, Harvard University (USA), Cambridge, ABD.
- [53] Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. 2003. Virtual water flows between nations in relation to trade in livestock and livestock products, 13, The Netherlands: UNESCO-IHE, Delft, Holland.
- [54] ISO 14046, 2014. Su Ayak İzi Standardı, International Organization for Standardization, Ankara.
- [55] Yıldız, N. B., 2017. Cam elyaf takviyeli beton (GFRC) cephe panelleri için yaşam döngü değerlendirmesi (LCA) yöntemiyle bir sürdürülebilirlik çerçevesi geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.
- [56] Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Mekonnen, M. M. ve Aldaya, M. M., 2011. The water footprint assessment manual: Setting the global standard, ISBN:978-1-84971-279-8, Earthscan, London, Washington.
- [57] Gleick, P. H., 1994. Water and energy, Annual Review of Energy and The Environment, 19, 1, 267-299.
- [58] Gu, Y., Dong, Y.-n., Wang, H., Keller, A., Xu, J., Chiramba, T. ve Li, F., 2016. Quantification of the water, energy and carbon footprints of wastewater treatment plants in China considering a water-energy nexus perspective, Ecological Indicators, 60, 402-409.
- [59] Gerbens-Leenes, W., Hoekstra, A. ve van der Meer, T., 2008. The water footprint of energy consumption: an assessment of water requirements of primary energy carriers, ISESCO Science and Technology Vision, 4, 5, 38-42.
- [60] Gerbens-Leenes, W., Hoekstra, A. Y. ve van der Meer, T. H., 2009. The water footprint of bioenergy, Proceedings of the National Academy of Sciences, 106, 25, 10219-10223.
- [61] Mekonnen, M. ve Hoekstra, A. Y., 2012. The blue water footprint of electricity from hydropower, Hydrology and Earth System Sciences, 16, 1, 179-187.
- [62] Shao, L. ve Chen, G., 2013. Water footprint assessment for wastewater treatment: method, indicator, and application, Environmental Science & Technology, 47, 14, 7787-7794.

- [63] Hoekstra, A. Y. ve Mekonnen, M. M., 2012. The water footprint of humanity, *Proceedings of The National Academy of Sciences*, 109, 9, 3232-3237.
- [64] Xu, J., Luo, P., Lu, B., Wang, H., Wang, X., Wu, J. ve Yan, J., 2018. Energy-water nexus analysis of wastewater treatment plants (WWTPs) in China based on statistical methodologies, *Energy Procedia*, 152, 259-264.
- [65] Rice, E., Baird, R. ve Eaton, A., 2017. Standard methods for the examination of water and wastewater, Lydon ve Rogers (Editor), ISBN: 978-0674947818, American Public Health Association, Washington, ABD.
- [66] Mekonnen, M.M. ve Hoekstra, A.Y., 2011. Ulusal su ayak izi hesapları: üretim ve tüketime yeşil, mavi ve gri su ayak izi, *Suyun Değeri Araştırma Raporu Seri No. 50*, UNESCO-IHE, Delft, Hollanda.
- [67] Erdoğan, R. ve Oktay, Z. Z. E., 2011. Çöp Depo Alanlarının Rehabilitasyonunda Phytoremediation Teknikleri, I. Ulusal Akdeniz Orman ve Çevre Sempozyumu, Kahramanmaraş, Bildiriler Kitabı, 1217-1226.
- [68] Henze, M., Harremoes, P., la Cour Jansen, J. ve Arvin, E., 1997. Wastewater treatment: biological and chemical processes, ISBN: 3-540-62702-2, 2, Springer, Germany.
- [69] Baştürk, E., 2019. Assessing water quality of Mamasın Dam, Turkey: Using water quality index method, ecological and health risk assessments, *CLEAN-Soil Air Water*, 47, 12, 1900251.
- [70] Speranzini, D., Li, V., Jamieson, A., Handyside, P., Reid, D. ve Joose, P., 2015. Using Agri-Environmental Indicators to Communicate Risks to Water Quality from Horticulture Production in Ontario, *Journal of Environmental Indicators*, 9:65.
- [71] Čosić-Flajsig, G., Karleuša, B. ve Glavan, M., 2021. Integrated Water Quality Management Model for the Rural Transboundary River Basin—A Case Study of the Sutla/Sotla River, *Water*, 13, 18, 2569.
- [72] Nevim, G., Durna, E. ve Sayin, F. E., 2021. Marmara Denizi Yüzeyinden Toplanan Müsilaj Biyokütlesinin Suyunun Giderilmesi: Koagülasyon ve Santrifüj Proseslerinin Optimizasyonu, *Aksaray University Journal of Science and Engineering*, 5, 2, 138-157.
- [73] Zeynep, E., 2021. Zararlı Alg Patlaması ve Marmara Denizindeki Müsilaj Problemi İlişkisi, *JENAS Journal of Environmental and Natural Studies*, 3, 2, 203-213.
- [74] Hoekstra, A., Chapagan, A., Aldaya, M. ve Mekoneen, M., 2011. The water footprint assessment manual—Setting the Global Standard, ISBN: 9781849775526, 192, Earthscan, Washington, London.

- [75] Chen, L., Yuan, H., Chen, S., Zheng, C., Wu, X., Li, Z., Liang, C., Dai, P., Wang, Q. ve Ma, X., 2021. Cost-Effective, High-Yield Production of Biotemplated Catalytic Tubular Micromotors as Self-Propelled Microcleaners for Water Treatment, ACS Applied Materials & Interfaces, 13, 26, 31226-31235.
- [76] Demir, Ö., Yıldız, M., Sercan, Ü. ve Arzum, C. Ş., 2017. Atıksuların geri kazanılması ve yeniden kullanılması, Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 2, 2, 1-14.
- [77] URL-1 < <https://www.semtrio.com/blog/ekolojik-ve-karbon-ayak-izi>>, Erişim tarihi: 10.10.2020.
- [78] URL-2 < <http://www.karbonayakizi.com/whatiscarbonfootprint.html>>, Erişim tarihi: 12.10.2020.
- [79] URL-3 < https://www.mfa.gov.tr/turkiye_nin-su-politikasi.tr.mfa>, Erişim tarihi: 14.12.2020.
- [80] URL-4 < <https://www.youtube.com/watch?v=pq0tCJAatdc>>, Erişim tarihi: 14.02.2021.
- [81] URL-5 < <https://www.tskb.com.tr/i/assets/document/pdf/sector-overview-energy-2018-12-low-resolution-final.pdf>>, Erişim tarihi: 15.02.2021.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Esra KALYA

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Aksaray Üni. Çevre Mühendisliği Bölümü, 2014-2018

Yüksek Lisans : Aksaray Üni. FBE, Çevre Mühendisliği ABD, 2019-2022

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. Başaranlar Demir Çelik İnş. Geri dön. San. Tic. A.Ş., Çevre Mühendisi.2014-Hala çalışmakta.

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1. Kalya, E., & Alver, A. (2022). Determining the Contribution of the Wastewater Treatment Plant to the Sustainable Environment with Water Footprint Indicators. Environmental Advances, [Under Review].

Kongrelerde Sunulan Bildiriler

2. Kalya, E., & Alver, A. (2022). Atıksu Arıtma Tesisleri İçin Su Ayak İzi ve Enerji Değerlendirmesi, 2. Uluslararası Mühendislik Bilimleri ve Multidisipliner Yaklaşımlar Kongresi, Uluslararası, Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum.