

**SÜRDÜRÜLEBİLİR SU YÖNETİMİ KAPSAMINDA SU
AYAK İZİ ve TEKSTİL ENDÜSTRİSİNDE BİR ÖRNEK
UYGULAMA**

Yasemin BAŞKILIÇ



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SÜRDÜRÜLEBİLİR SU YÖNETİMİ KAPSAMINDA SU AYAK İZİ ve
TEKSTİL ENDÜSTRİSİNDE BİR ÖRNEK UYGULAMA**

Yasemin BAŞKILIÇ
0000-0002-5490-3307

Dr. Öğr. Üyesi Sevil ÇALIŞKAN ELEREN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Yasemin BAŞKILIÇ tarafından hazırlanan “SÜRDÜRÜLEBİLİR SU YÖNETİMİ KAPSAMINDA SU AYAK İZİ ve TEKSTİL ENDÜSTRİSİNDE BİR ÖRNEK UYGULAMA” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sevil ÇALIŞKAN ELEREN

- Başkan** : Dr. Öğr. Üyesi Sevil ÇALIŞKAN ELEREN İmza
0000-0002-8489-9214
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
- Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Berrak EROL NALBUR İmza
0000-0002-0078-2722
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
- Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Saadet HACISALİHOĞLU İmza
0000-0001-5969-4180
Bursa Teknik Üniversitesi,
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ali KARA
Enstitü Müdürü
26/07/2023

B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

23/06/2023

Yasemin BAŞKILIÇ

TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Dr. Öğr. Üyesi
Sevil ÇALIŞKAN ELEREN
23/06/2023

Yasemin BAŞKILIÇ
23/06/2023

ÖZET

Yüksek Lisans

SÜRDÜRÜLEBİLİR SU YÖNETİMİ KAPSAMINDA SU AYAK İZİ ve TEKSTİL ENDÜSTRİSİNDE BİR ÖRNEK UYGULAMA

Yasemin BAŞKILIÇ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sevil ÇALIŞKAN ELEREN

Bu çalışmada, sürdürülebilir yaşam standartlarını sağlamak amacıyla su kullanımını kontrol altında tutmak için yaygınlaşan su ayak izi hesaplamalarının örnek bir tekstil endüstrisi üzerinde uygulanması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, Bursa Organize Sanayi Bölgesi'nde faaliyet gösteren bir tekstil fabrikasının su verileri kullanılarak, su ayak izi bileşenleri hesabı ile küresel standartta su ayak izi değerlendirmesi yapılmıştır. Tesiste pamuk, polyester, naylon, viskon gibi kumaş türlerine boya ve apre işlemleri uygulanmaktadır. Ürünlerin üretim ve tedarik aşamasındaki su ayak izi hesaplanırken elektrik, enerji, yakıt gibi fonksiyonlar hesaplamalara dahil edilmemiştir. Fabrikanın proses sınırları içinde mavi su ayak izi 13370 ton/ay, yeşil su ayak izi 132,97 ton/ay, gri su ayak izi 18450 ton/ay olarak hesaplanmıştır. Genel ihtiyaçlar için ise 361 ton/ay su kullanılmaktadır. İşletme içi operasyonların toplam su ayak izi değeri 31952,97 ton/ay şeklinde belirlenmiştir.

Pamuk, polyester, naylon ve viskon ürünlerinin tedarik zinciri su ayak izi değerleri, bir takım kabuller yapılarak ayrı ayrı hesaplanmıştır. Su ayak izi, pamuk ürünü için tedarik edilen illere bağlı olarak sırasıyla 2497503, 5878433 ve 4187973 ton/ay olarak elde edilmiştir. Polyester ürünü tedarik zinciri su ayak izi değerleri tedarik edilen polyester türüne göre sırasıyla 6835,80, 2171,91 ve 4503,85 ton/ay olarak hesaplanmıştır. Naylon ürünü için tedarik zinciri su ayak izi değeri 1825,39 ton/ay olarak bulunurken, viskon kumaş için bu değer 292,33 ton/ay olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak pamuğun Adana ilinden tedarik edilmesiyle ve polyester ürününün tamamının geri dönüştürülmüş polyester kullanılmasıyla birlikte firmanın su ayak izi değerinin azalacağı saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Su ayak izi, su ayak izi hesaplama, sürdürülebilir su potansiyeli, tekstil endüstrisi

2023, viii + 57 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

WATER FOOTPRINT WITHIN THE SCOPE OF SUSTAINABLE WATER
MANAGEMENT AND AN EXAMPLE APPLICATION IN TEXTILE INDUSTRY

Yasemin BAŞKILIÇ

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Environmental Engineering

Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Sevil ÇALIŞKAN ELEREN

In this study, it is aimed to apply water footprint calculations on a sample textile industry to keep water use under control in order to ensure sustainable living standards. In this context, a global standard water footprint assessment was made by using the water data of a textile factory operating in the Bursa Organized Industrial Zone, with the calculation of water footprint components. Dyeing and finishing processes are applied to fabric types such as cotton, polyester, nylon, viscose in the textile factory. Functions such as electricity, energy and fuel are not included in the calculations while calculating the water footprint of the products during the production and supply stages. The blue water footprint is calculated as 13370 tons/month, the green water footprint is 132.97 tons/month, and the gray water footprint is 18450 tons/month within the process boundaries of the factory. 361 tons/month of water is used for general needs. The total water footprint of in-house operations has been determined as 31952.97 tons/month.

The supply chain water footprint values of cotton, polyester, nylon and viscose products have been calculated separately by making some assumptions. The water footprint was obtained as 2497503, 5878433 and 4187973 tons/month, respectively, depending on the provinces supplied for the cotton product. Polyester product supply chain water footprint values are calculated as 6835.80, 2171.91 and 4503.85 tons/month, respectively, according to the type of polyester supplied. While the supply chain water footprint value for nylon product was found as 1825.39 tons/month, this value was calculated as 292.33 tons/month for viscose fabric. As a result, it has been determined that the company's water footprint value will decrease with the supply of cotton from Adana province and the use of recycled polyester in the entire polyester product.

Key words: Water footprint, water footprint calculation, sustainable water potential, textile industry,

2023, viii + 57 pages.

TEŞEKKÜR

Tezimin her aşamasında bilgi ve tecrubesini benden esirgemeyen ve bana her zaman anlayiŐla yaklaŐan değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Sevil ÇALIŞKAN ELEREN'e,

Hayatımın her anında maddi ve manevi olarak beni destekleyen, yol gösteren ve hayata dair bütün planlarımı gerçekleŐtirmem için bana güç kaynağı olan canım babam Metin ÖZKUL ve annem Fikriye ÖZKUL'a,

Yüksek lisans serüveninin başlangıcından itibaren yanımda olan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen canım eŐim Caner BAŞKILIÇ ve bu serüvenimin sürprizi olarak hayatımıza giren canım kızım Alya BAŞKILIÇ'a,

Tez çalışmalarım sırasında yardımlarını ve desteklerini daima hissettiğim canım arkadaşlarım Gülcihan UZUN ve Seray YAŐAR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yasemin BAŞKILIÇ
23/06/2023

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	ii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Sürdürülebilir Su Yönetimi Metodolojisi.....	4
2.2. Su Ayak İzi Kavramı.....	6
2.2.1. Su Ayak İzi Değerlendirme Aşamaları.....	9
2.2.2. Türkiye'nin Su Ayak İzi.....	11
2.2.3. Su Ayak İzinin Çevresel Önemi.....	12
2.3. Tekstil Endüstrisi.....	14
2.3.1. Tekstil Atık Sularının Arıtma Yöntemleri.....	16
2.3.2. Tekstil Atık Sularının Çevresel Etkileri.....	19
2.4. Su Ayak İzi İle İlgili Yapılmış Çalışmalar.....	20
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	24
3.1. Örnek Tekstil Fabrikasının İş Akışı.....	24
3.2. Su Ayak İzinin Değerlendirilmesinde Sınırların Belirlenmesi.....	27
3.3. Su Ayak İzinin Hesabında Kullanılacak Su Miktarlarının İncelenmesi.....	28
3.4. Firma Atık Suyunun Kirletici Parametreleri.....	30
3.5. Firmanın Yağmur Suyu Depolama Hattı.....	30
3.6. Pamuk Ürünü Tedarik Zinciri Su Ayak İzi Hesabı.....	32
3.7. Polyester Ürünü Tedarik Zinciri Su Ayak İzi Hesabı.....	35
3.8. Naylon Ürünü Tedarik Zinciri Su Ayak İzi Hesabı.....	35
3.9. Viskon Ürünü Tedarik Zinciri Su Ayak İzi Hesabı.....	35
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	36
4.1. İşletmenin Su Ayak İzi.....	36
4.1.1. İşletme İçi Operasyonlarının Su Ayak İzi.....	36
4.1.2. İşletmenin Genel Kullanım Su Ayak İzi.....	39
4.1.3. İşletmenin Pamuk Ürünü İçin Tedarik Zinciri Su Ayak İzi.....	39
4.1.4. İşletmenin Polyester Ürünü İçin Tedarik Zinciri Su Ayak İzi.....	43
4.1.5. İşletmenin Naylon Ürünü İçin Tedarik Zinciri Su Ayak İzi.....	44
4.1.6. İşletmenin Viskon Ürünü İçin Tedarik Zinciri Su Ayak İzi.....	45
5. SONUÇ.....	48
KAYNAKLAR.....	51
ÖZGEÇMİŞ.....	57

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
C_{max}	Alıcı ortamda bir kirleticiye ait izin verilen maksimum konsantrasyon
C_{nat}	Alıcı ortamındaki kirleticinin doğal konsantrasyon değeri
\pm	Artı-eksi
N	Azot
Cu	Bakır
Zn	Çinko
Fe	Demir
eq	Eşdeğer ağırlık
P	Fosfor
g	Gram
SA_{gri}	Gri su ayak izi
ha	Hektar
H_2O_2	Hidrojen Peroksit
$SA_{i\text{şl}}$	İşletme su ayak izi
$SA_{i\text{şl.oper.genel}}$	İşletmenin genel kullanım su ayak izi
$SA_{i\text{şl.oper.iç}}$	İşletme içi operasyonlarının su ayak izi
$SA_{i\text{şl.oper}}$	İşletmenin operasyonel su ayak izi
$SA_{i\text{şl.ted.zin}}$	İşletmenin tedarik zinciri su ayak izi
Kg	Kilogram
Cr	Krom
Pb	Kurşun
S^{-2}	Kükürt
L	Litre
L	Kirletici yükü miktarı
Mn^{+2}	Mangan
m^2	Metrekare
m^3	Metreküp
mg	Miligram
mm	Milimetre
$KMnO_4$	Permanganat
$^{\circ}C$	Santigrat derece
CN^{-}	Siyanür
NaOH	Sudkostik asit
SO_4	Sülfat
TiO_2	Titanyum dioksit
$I[x,i]$	X kaynağından gelen İ girdi ürününün hacmi
$SA_{ürün[x,i]}$	X kaynağından gelen İ girdi ürününün su ayak izi
%	Yüzde

Kısaltmalar	Açıklama
USEPA	Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı
AKM	Askıda Katı Madde
UNESCO	Birleşmiş Milletler Eğitim, Bilim ve Kültür Kurumu
BOİ	Biyolojik Oksijen İhtiyacı
WWF	Dünyayı Koruma Vakfı
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
ISO 14040	Su ayak izi standardı
WFN	Su Ayak İzi Ağı
IHE	Su Eğitimi İçin Delft Enstitüsü
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UV	Ultraviyole
WF	Water Footprint
LCA	Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi
ISO 14040	Yaşam Döngüsü Değerlendirme Standardı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Yeryüzündeki su kaynakları türlerinin oranları.....	4
Şekil 2.2. Su ayak izinin bileşenlerinin şematik gösterimi.....	8
Şekil 2.3. Su ayak izi değerlendirmesinin aşamaları.....	9
Şekil 2.4. Su ayak izi bileşenlerine göre Türkiye'de üretimin ve tüketimin su ayak izi.....	12
Şekil 2.5. Tekstil materyaline göre uygulanan terbiye, boyama ve apre işlemi	15
Şekil 3.1. Firmada gerçekleşen iş akışı.....	24
Şekil 3.2. Çalışmanın belirlenen sınırları.....	28
Şekil 3.3. Firmada kullanılan su türlerinin kaynakları.....	29
Şekil 3.4. Firmaya ait su ayak izi türleri.....	29
Şekil 3.5. Örnek bir yağmur suyu geri kazanım sisteminin şematik gösterimi..	31
Şekil 3.6. Kullanılan bilgisayar programlarında izlenen adımlar.....	34
Şekil 4.1. Pamuğun tedarik edildiği illere göre firmanın su ayak izi değerleri.	42
Şekil 4.2. Tedarik edilen polyester türüne göre firmanın su ayak izi oranları..	44
Şekil 4.3. Tesise ait su ayak izi değerlerinin türlerine göre sayısal verileri....	46
Şekil 5.1. Firmaya ait su ayak izi türlerinin miktarları.....	48

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Tekstil endüstrisinde proseslere göre su kullanım oranları.....	16
Çizelge 2.2. Farklı endüstriler ve sektörler için kullanılan su ayak izi metotları	22
Çizelge 3.1. Tesiste üretilen ürün miktarı ve tüketilen su miktarları.....	29
Çizelge 3.2. Atık su numunesindeki kirletici konsantrasyonları.....	30
Çizelge 3.3. Firmanın yağmur suyu kullanımı ile ilgili veriler.....	31
Çizelge 4.1. Atık su konsantrasyonlarına bağlı olarak kirleticilerin su ayak izi değerleri	38
Çizelge 4.2. Pamuk ürünü için TÜİK 2021 istatistik verileri ve Cropwat 8.0 programı yardımı ile elde edilen sonuçlar.....	40
Çizelge 4.3. Pamuğun illerden tedarik edilen miktarlarına bağlı olarak tedarik zinciri su ayak izi sonuçları.....	41
Çizelge 4.4. Pamuk ürününün tedarik zinciri su ayak izi verilerine göre firmanın toplam su ayak izi değerleri.....	41
Çizelge 4.5. Tedarik edilen polyester türüne göre firmanın tedarik zinciri su ayak izi miktarları.....	43

1. GİRİŞ

Günümüzde nüfus artışına paralel olarak insanoğlu, yaşamsal ihtiyaçlarını karşılamak için sürekli olarak artan üretim ve tüketim faaliyetleri içerisinde. Oluşan ihtiyaçlar doğrultusunda arz-talep ilişkisini dengeleyebilmek adına sanayileşmedeki gelişmeler de dikkat çekici bir boyut kazanmaktadır. Üretim ve tüketimdeki bu artış, doğaya bırakılan katı atıkları ve atık suları kontrol altında tutmak amacıyla insanları farklı çalışmalara yönlendirmektedir. Sürdürülebilir yaşam, geri dönüşüm, ekolojik ayak izi, karbon ayak izi, su ayak izi gibi terimler bu çalışmalar kapsamında doğaya bırakılan atıkları kontrol altında tutmak ve ortak geleceğimiz için dengeyi sağlamak amacıyla ortaya çıkmıştır. Özellikle ülkemizin mevcut şartlar altında 2030 yılında su fakiri ülke olacağı tahmin edildiğinden su kullanımını kontrol altında tutmayı amaçlayan su ayak izi çalışmaları önem kazanmıştır (Guerra-Rodríguez, Rodríguez, Singh ve Rodríguez-Chueca, 2018).

Son zamanlarda çevresel sürdürülebilirlik, doğal çevreyi önemli ölçüde kirleten tekstil endüstrisinde önemli bir endişe haline gelmiştir. Bu endişe nedeniyle, büyük perakendeciler, faaliyetlerinden kaynaklanan çevresel zararları ele almaları için tüketiciler, hükümetler, sivil toplum kuruluşları gibi çeşitli paydaşların yoğun baskısı altındadır. Aynı zamanda perakendeciler, hükümetler tarafından dayatılan düzenlemelere uymak için genellikle çevresel gerekliliklerini ortaya koymaktadır. Üreticiler, bu gereklilikleri yerine getirebilmek adına sürdürülebilir üretim yöntemlerine ve sürdürülebilir kaynak kullanımını kapsayan çalışmalara yönelmektedir (Muthu, 2022). Bu çalışmalara örnek olarak verilebilecek üretim, tüketim veya herhangi bir hizmet sektörü için gerçekleştirilen su ayak izi değerlendirme çalışmaları son yıllarda önemli hale gelmiştir.

Su ayak izi kavramı ilk kez 2002 yılında Arjen Hoekstra tarafından UNESCO-IHE'de ortaya atılmıştır. UNESCO-IHE, Hollanda'da bulunan ve dünyada su konusunda lisansüstü eğitim veren en büyük kuruluştur (Sandu, Virsta, 2021). Su ayak izi, buharlaşma da dahil olmak üzere birim zamanda harcanan ve/veya kirletilen su miktarı ile ölçülmektedir. Bu terim, bir bireyin, toplumun veya iş kolunun, bunların tükettiği

malların ve hizmetlerin üretimi için kullanılan veya üreticinin mal ve hizmet üretimi için kullandığı toplam temiz su kaynaklarının miktarı olarak tanımlanmaktadır (Alper, 2015).

Bir ülkenin, sanayi kuruluşlarının ya da en basit olarak bireylerin günlük yaşamındaki su ayak izinin hesaplanması ve bunun raporlanması, su kullanımını kontrol altında tutmak için mükemmel bir kılavuздur. Özellikle bazı endüstri dallarında temiz su kullanımı ve açığa çıkan atık su miktarları fazladır. Örneğin tekstil sektörü ürünleri ülkemizde tarihi geçmişlere dayanan ve insanların günlük yaşantılarının her alanında kullandığı ihtiyaçlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sektör en çok su tüketen ve kirleten endüstri dallarının başında gelmektedir (Li et al, 2021, Chen et al, 2017, Rather et al, 2019). Yapağı ve ipliklerin yıkanması, boyama yüksek oranda su tüketen proseslerdir. Islak proseslerin bulunduğu tekstil sektöründe başlangıçta kullanılan suyun çok az miktarı ürünlerde yer almakta ve sonuçta büyük bir kısım atık su olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca başlangıçta kullanılan sular düşük maliyetli kuyu, göl ve nehir gibi temiz su kaynaklarından alınmaktadır (Alper, 2015). Açığa çıkan tekstil atık suları sanayi bölgelerinde bulunan atık su arıtma tesisleri açısından önemli bir noktada yer almaktadır. Kirlilik yükü yüksek olan ve ülkemiz sanayisindeki payı % 20'nin üzerinde olan tekstil endüstrisinin atık suları arıtılmadan deşarj edilirse doğa ve insan sağlığı açısından ciddi tehdit oluşturacaktır (Baburşah, 2004).

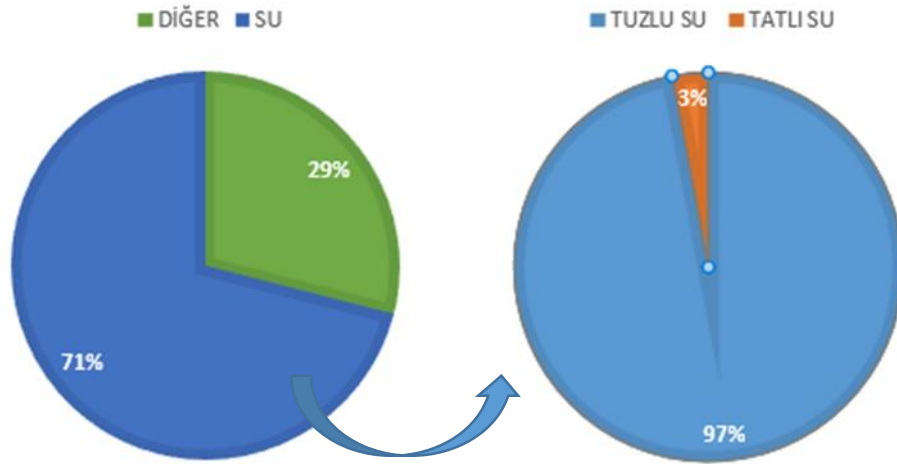
Proseslere göre değişiklik gösteren tekstil endüstrisi atık suları askıda katı madde (AKM), renk, organik kirleticilerin göstergesi olan kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ), yağ ve gres, azot (N), fosfor (P), demir (Fe) ve sülfat (SO₄) parametrelerini içermektedir. Tekstil atık suyu arıtılırken karşılaşılan en büyük problem renk parametresi olarak görülmektedir. Tekstil atık sularının arıtma yöntemleri, fiziksel ve fizikokimyasal yöntemler (kuagülasyon-flokülasyon, adsorpsiyon, iyon değişimi, membran filtrasyon gibi), kimyasal oksidasyon yöntemleri, biyolojik yöntemler (aerobik ya da anaerobik parçalanma gibi) ve elektrokimyasal yöntemler (elektrodiyaliz gibi) şeklinde sıralanmaktadır. Alıcı ortamlara deşarj edilmeden önce tekstil atık sularındaki kirletici parametrelerin analizleri yapıp kaynaklarının belirlenmesi ve atık suyun karakteristiğine uygun arıtma işlemlerinin uygulanması gerekmektedir (Namal, 2017).

Bu alışmada, Türkiye’de tekstil sektörü konusunda önemli bir konumda yer alan Bursa’da faaliyet gösteren bir tekstil firmasında su ayak izi hesaplaması uygulanmıştır. Endüstrinin suyu ile ilgili vresel etkilerin kapsamlı değerlendirmesi için ISO 14046 standardına dayalı tekstil endüstrisi WF (Water Footprint) metodolojisi ile endüstrinin su miktarı ve kalitesiyle ilgili vresel etkiler değerlendirilmiştir. Firmada işlem gören pamuk, polyester, naylon ve viskon kumaş türleri için tedarik zinciri su ayak izi değerleri hesaplamalara dahil edilmiştir. Su ayak izi değerlendirme sınırları oluşturulurken, ürünlerin üretiminde ve tedarik aşamalarında kullanılan elektrik, yakıt, enerji gibi parametreler çalışma sınırları dışında tutulmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Sürdürülebilir Su Yönetimi Metodolojisi

Su, dünyamız ve insanlar için hayati öneme sahip en önemli ihtiyaçlar arasındadır. Yeryüzü oluşumunun ana maddeleri incelendiğinde dünyanın %71 oranında su ile kaplı olduğu görülmektedir. Bu su miktarının %97'lik kısmı tuzlu sulardan oluşan okyanuslar ve denizler olarak karşımıza çıkmaktadır (Şekil 2.1). Dünya üzerindeki suların sadece %3' ü tatlı su olarak nitelendirilmekte fakat bu miktarın üçte ikisi dağ buzulları ve kutup buzulları halindedir. Sonuç olarak yeryüzündeki su miktarının %1' i insani ihtiyaçlar için kullanılabilen ancak sadece % 0,3 oranındaki sulara erişilebilmektedir (Türkiye Sınai Kalkınma Bankası, 2018).



Şekil 2.1. Yeryüzündeki su kaynakları türlerinin oranları (Türkiye Sınai Kalkınma Bankası, 2018).

Tüm canlıların hayati fonksiyonlarını yerine getirebilmeleri için suya bağımlı olması, suyun durumunu hem ekolojik hem de sosyokültürel açıdan incelemeyi zorunlu hale getirmektedir. Mevcut su durumu inceleme çalışmaları yapılırken, suyla ilgili insan merkezli yaklaşımın yetersiz olduğu görülmüş ve zamanla dünya üzerindeki tüm canlıların suyla olan ilişkileri değerlendirilmiştir (Ögenler ve Okuyaz, 2017). Değerlendirme kapsamında sürdürülebilir su kullanımı stratejileri ele alınmış ve gelecek nesiller için adil su kullanımı amacıyla su kaynaklarının korunması hedeflenmiştir.

Ekonomik karlılık ve büyüme üzerinde doğrudan olumsuz etkisi olan aşırı baskı altındaki çevresel kaynakların yarattığı belirsizlik ve riskler arttıkça, sanayi kuruluşlarında "temiz üretim" ve "daha yeşil ekonomi" kavramlarına giderek daha fazla odaklanılmaktadır. Tatlı su tedarik kaynaklarının kıtlığı ve yeraltı sularına aşırı bağımlılık, endüstrilerin sayısının artması, sektörlerdeki mevcut su yönetimi durumunun araştırılmasını gerekli kılmıştır. Yeraltı suyunun verimli kullanımı yoluyla endüstriyel su kullanımında "çevresel sürdürülebilirlik" elde etmek için sistematik süreçlerin ve etkili izleme araçlarının geliştirilmesi kritik önem taşımaktadır (Haque ve diğ., 2021).

Kavramsal olarak sürdürülebilir ve temiz üretim, verimliliği artırmayı ve insanlara ve çevreye yönelik riskleri en aza indirmeyi amaçlayan süreçlere, ürünlere ve hizmetlere caydırıcı çevresel yaklaşımların sürekli kullanımını entegre etmeyi amaçlamaktadır. Yapılan literatür araştırmaları, sürdürülebilir ve temiz üretim uygulamalarının ekonomik ve çevresel kazanımlar sağladığını ortaya koymuştur. Sürdürülebilir kalkınma hedefleri içinde yer alan temiz su ve sanitasyon (sıhhi koşullar) başlığı altında, 2030 yılına kadar bütün sektörlerde su kullanım etkinliğinin büyük ölçüde artırılması, su kıtlığı sorununu çözmek için sürdürülebilir tatlı su tedarikinin sağlanması ve su kıtlığından muzdarip insan sayısının önemli ölçüde azaltılması ve bununla birlikte bütünleşik su kaynakları yönetimi hedeflenmiştir. Bu hedefler doğrultusunda, su kullanımına yönelik bu tasarrufların önemli olduğu aşıkardır ve su kaynakları yönetimini "Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri" ile ilişkilendiren çok az çalışma bulunmaktadır (Neto, 2019).

Tekstil endüstrisi, yoğun kimyasal ve su tüketimi sonucu ciddi anlamda su kaynaklı kirlilik ile karakterize edilir ve yüksek çevresel ayak izine sahiptir. Ancak tekstil endüstrisi sürdürülebilir kalkınmayı artırma konusunda umut verici bir potansiyele de sahiptir. Giderek daha sıkı hale gelen atık su deşarj limitleri nedeniyle, tekstil sanayi kümelenme ve işbirliği ile su kaynaklı sorunlara çözüm bulmaya çalışmaktadır. Kümelenmelerindeki üç temel paydaş olan yerel yönetim, işletmeler ve çevresel hizmet operatörleri, çelişkili çıkarları dengeleyerek sistematik önlemler aramaktadır (Lyu, 2021). Endüstriyel kümelenme, belirli bir alandaki birbirine bağlı firmaların, tedarikçilerin ve kurumların coğrafi bir yoğunlaşmasıdır (Bryan ve diğ., 2014). Endüstriyel kümelenme, tesis içi ve merkezi arıtma tesislerinden oluşan iki aşamalı bir atık su arıtma sistemini

içebilir. Tekstil endüstrisindeki bu iki aşamalı atık su arıtma sistemi, elverişli bir vizyon olarak çevresel ve ekonomik yüklerde kayda değer azalmalar sağlayabilir. Sahip olunan bu özellik tekstil endüstrisinin gelişiminin ayırt edici bir özelliğidir. Böyle bir sistem tekstil sanayi kümelenmelerinde kullanışlıdır ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Paydaşların sürekli etkileşimli katılım yoluyla sürdürülebilirlik konularında fikir birliğine vardığı paydaş işbirliği, artan karmaşıklık ve disiplinler arası yapı nedeniyle sürdürülebilir su yönetiminde önemli bir yöntem haline gelmiştir (Woldesenbet ve Kebede, 2021).

Tekstil sanayi gruplarındaki üç paydaş olan yerel yönetim, işletmeler ve çevresel hizmet operatörleri, ortak çıkarlarını dengeleyebilmek adına sistematik önlem arayışındadır (Lyu, 2021). Endüstriye göre farklılık gösteren sürdürülebilir üretim yöntemleri bu önlemlerin başında gelmektedir. Tekstil ve giyim endüstrisinde üretim zinciri, çevre kirliliği (katı atıklar, atık su deşarjları, hava kirliliği ve sera gazı emisyonları) ve kaynakların çıkarılması ve tüketilmesi (hammadde, su, enerji) gibi çeşitli sorunlarla ilişkilidir. Endüstrinin nasıl daha sürdürülebilir hale gelebileceğini göstermek için yeni iş modeli, verimli atık yönetim sistemi ve rejeneratif üretim süreçleri ve malzemeleri gibi modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen bu modeller, tekstil ve giyim ürünlerinin yeniden kullanımı ve geri dönüşümüne odaklanmaktadır (Okafor, 2021). Bu modellerin yanı sıra, endüstriyel kümelerde atık su arıtma tesisleri ve enerji tesisleri arasında endüstriyel simbiyozu teşvik ederek hem su hem de enerji sistemlerinin verimliliğini artırmanın yollarını aramak da mantıklıdır (Hu ve diğ., 2020). Endüstriyel simbiyoz uygulamaları ile endüstriyel kümelerin, enerji tüketimi ve tatlı su ihtiyacı azaltılabilir (Boix ve diğ., 2011). Endüstriler, su kıtlığı ve kirliliğine doğrudan ve dolaylı olarak katkıda bulduklarının ve bunun yanıt vermeleri gereken bir risk oluşturduğunun farkına vardıklarında dolayı daha iyi su yöneticileri olmanın yollarını aramaya başlamışlardır (Hoekstra, 2015). Bu nedenle de bu işin ilk adımı olarak şirketler su ayak izlerini (WF) ortaya koymuşlardır.

2.2. Su Ayak İzi Kavramı

2002 yılında Hoekstra'nın su ayak izi kavramını ortaya atmasından sonra bir ürünün üretimi dışında tedarik aşaması boyunca su kullanımını dikkate alma fikri ilgi

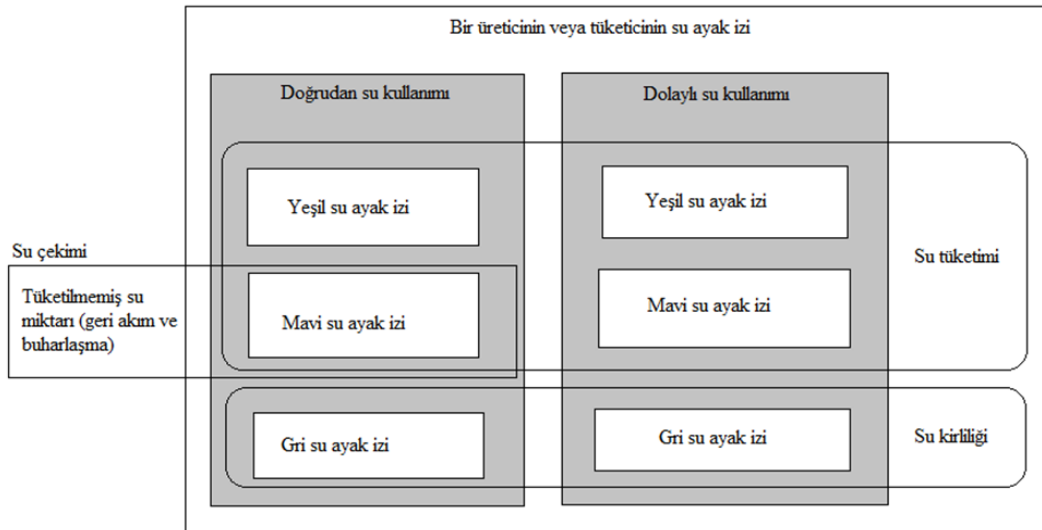
kazanmıştır. Su ayak izi, bir tüketici veya üreticinin doğrudan su kullanımının yanında dolaylı su kullanımına da bakan tatlı su tüketiminin bir göstergesidir (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, Mekonnen, 2009). Su ayak izi fikrini uygulayabilmek için Hoekstra tarafından Su Ayak İzi Ağı (WFN) kurulmuştur. WFN, artan su kıtlığı ve kirlilik seviyeleri ile insanlar ve doğa üzerindeki sonuçları hakkında paydaşlar arasında bilgi ve yenilik alışverişi için bir platform sağlamaktadır (Sandu, Virsta, 2021). Bir ürün veya hizmetle ilgili doğrudan ve dolaylı olarak bir tüketici grubu veya üreticiler için tatlı su tüketimine bağlı su ayak izi hesaplanabilir (Hoekstra ve Hung, 2002).

Kavramı ortaya atan Arjen Hoekstra, üretim ve tedarik zincirinin bir bütün olarak ele alındığında, su kıtlığı ve kirliliği gibi konuların açıkça anlaşılabilceğini belirtmektedir. Hoekstra, su problemlerinin genel olarak küresel ekonominin yapısıyla yakından bağlantılı olduğunu savunmaktadır. Su ayak izi, yalnızca bir tüketici veya üreticinin doğrudan su kullanımıyla ilgilenmekle yetinmeyip, aynı zamanda dolaylı su kullanımına da bakan tatlı su kullanımının bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Bir ürünün su ayak izi, ürünü üretmek için kullanılan ve tedarik zinciri boyunca kullanılan tatlı su hacmidir (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, Mekonnen, 2011). Bu terim, bir bireyin, toplumun veya iş kolunun, bunların tükettiği malların ve hizmetlerin üretimi için kullanılan veya üreticinin mal ve hizmet üretimi için kullandığı toplam temiz su kaynaklarının miktarı olarak tanımlanmaktadır (Alper, 2015).

Su ayak izinin hesaplanmasını kolaylaştırmak ve aynı zamanda daha ayrıntılı veriler elde edebilmek için mavi, yeşil ve gri su ayak izi olmak üzere üç tür su ayak izi mevcuttur. Mavi su ayak izi, belirli bir ürünü üretmek için kullanılan ve buharlaştırılan, doğrudan ürünlere entegre edilen veya denize dökülen yer altı veya yer üstü su kaynaklarının miktarını ifade etmektedir. Yeşil su ayak izi, üretim veya tedarik zinciri aşamasında kullanılan yağmur suyu miktarı olarak tanımlanabilir. Gri su ayak izi, sudaki kirleticileri ve atık suları seyreltmek ve kirleticileri uygun kalite sınırlarının altına indirmek için gereken tatlı su miktarıdır (Sandu ve Virsta, 2021). Su ayak izinin amacı, bir tüketici veya üreticinin tatlı su kaynaklarının kullanımıyla ilişkisini daha iyi ve daha geniş bir bakış açısı ile ortaya koymaktır. Su tüketimi ve kirliliğin hacimsel ölçüsü olan su ayak izi, yerel çevresel etkinin bir ölçüsü değildir. Yerel çevresel etki yerel su kaynaklarının

hassasiyetine ve aynı kaynakları kullanan su tüketicileri ve kirleticilerine bağlıdır (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, Mekonnen, 2011).

Su ayak izlerinin bileşenleri incelendiğinde, su kaynaklarından çekilen suların tüketilmeyen kısmının (geri akım) su ayak izine ait olmadığı görülmektedir. Ayrıca kaynaktan çekilen su miktarı doğrudan su kullanımına ait bir parametre iken, su ayak izinin yeşil ve gri su miktarları dolaylı su kullanımı bileşenini içermektedir. Eğer tüketilmemiş su miktarı geldiği kaynağa geri dönerse mavi su kullanımını kapsamamaktadır. Kaynaktan çekilen su, kaynağa geri dönmezse bu su miktarı mavi su kullanımıyla sınırlanılmayıp yeşil ve gri su kullanımını da içermektedir. Buna bağlı olarak kaynaktan çekilen ve tüketilen su, doğrudan su kullanımının yanında dolaylı su kullanımı kategorisine de girerek sınırını genişletmektedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Su ayak izinin bileşenlerinin şematik gösterimi (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, Mekonnen, 2011).

Su ayak izi hesaplamalarının avantajları (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, Mekonnen, 2011):

1. Suyun çeşitli kullanım amaçları için nasıl tahsis edildiğine dair zamansal olarak açıklayıcı bilgiler vermektedir.
2. Sürdürülebilir ve adil su kullanımı aynı zamanda tahsisi hakkındaki tartışmaları desteklemektedir.

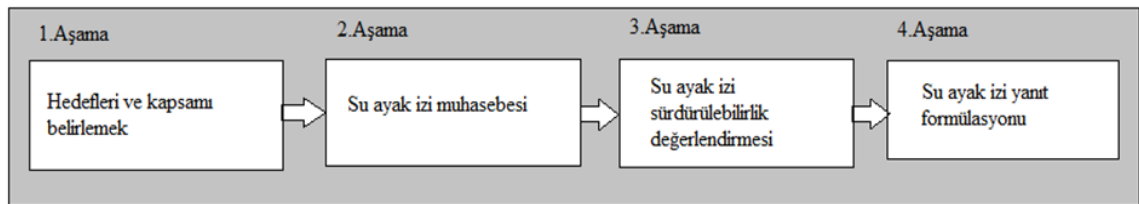
3. Çevresel, sosyal ve ekonomik etkilerin yerel bir değerlendirmesi için iyi bir temel oluşturur ve insanlar için bir kılavuz niteliğindedir.

2.2.1. Su Ayak İzi Değerlendirme Aşamaları

Su ayak izi hesaplamaları, sürdürülebilir yaşam standartlarını sağlayabilmek adına yapılması gerekenleri somut olarak görmek için açıklayıcı bir kılavuz olarak kullanılmaktadır. Son zamanlarda insan faaliyetlerinin, üretimin ve tüketimin yarattığı su kıtlığı ve sonucunda ortaya çıkan çevre kirliliği problemleri dikkat çekici bir boyut kazanmıştır. Su ayak izi değerlendirmelerinin asıl amacı suyun ortaya çıkan bu çevresel sorunlarla var olan ilişkisini analiz etmek; ayrıca insan faaliyetlerinin ve ürünlerin su perspektifinden nasıl daha sürdürülebilir hale geleceğini görmektir.

Bir su ayak izi değerlendirme süreci temel anlamda aşağıdaki üç aşamadan oluşmaktadır (Şekil 2.3).

1. Değerlendirmek istenen bir prosesin, ürünün, üreticinin veya tüketicinin konumlandırılmasının ardından su ayak izini ölçmek veya belirli bir coğrafi alandaki su ayak izini yer ve zaman olarak ölçmek,
2. Hesaplanan su ayak izinin çevresel, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirliğini değerlendirmek,
3. Durum sonucunda alınan önlemlerin faydalarını gözlemlemek amacıyla bir yanıt stratejisi formüle ederek değerlendirmeyi sonuçlamaktadır (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, Mekonnen, 2011).



Şekil 2.3. Su ayak izi değerlendirmesinin aşamaları (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, Mekonnen, 2011).

Su ayak izi değerlendirmelerinde ilgilenilecek noktalara bağlı olarak sınırların doğru çizilmesi gerekmektedir. Örneğin bir üretim zincirinin seçilen belirli bir prosesinin su ayak izi hesaplanabileceği gibi nihai bir ürünün de su ayak izi hesaplanabilmektedir. Alternatif olarak bir tüketici veya tüketici grubunun su ayak izinin yanında bir üreticinin veya tüm ekonomik sektörün su ayak izi de değerlendirilebilmektedir. Son olarak bir ülke, il, ilçe, su toplama havzası ya da nehir havzası gibi sınırları belirlenmiş bir alandaki toplam su ayak izi hesaplanarak coğrafi bir perspektif çizilebilmektedir (Sandu ve Virsta, 2021). Toplam su ayak izi, bölgede gerçekleşen pek çok sürecin toplamına eşit kabul edilmektedir. Bir araç olarak kullanılan su ayak izi değerlendirmesi, bahsi geçen tüm süreçlerin su kıtlığı üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Bunun sonucunda ilgili kurum ve kuruluşların, bireylerin tedbir alması gerektiği konusunda somut deliller sunmaktadır. Üretim ve tüketim aşamasında sürdürülebilir olmayan tatlı su kullanımını en aza indirmek için yapılması gerekenleri, su ayak izi değerlendirmesi çalışmaları sonucunda elde etmek mümkündür.

Su ayak izi değerlendirme çalışmalarına, ilk olarak yapılacak seçimler konusunda şeffaf olabilmek için, çalışmanın amaçlarını ve kapsamını net bir şekilde belirleyerek başlanmaktadır. Bir su ayak izi çalışmasının birçok nedeni olabilir. Örneğin bir ülke yabancı su kaynaklarına bağımlılık durumunu ortaya koymak için ya da su kullanımı yoğun olan ithal ürünlerin bulunduğu bölgelerde sürdürülebilir su kullanımını değerlendirmek amacıyla su ayak izi çalışmaları yapabilmektedir. Nehir havzası idaresi, havzadaki kıt su kaynaklarının ne kadarının düşük değerli ihraç ürünlerinde kullanıldığını görmek amacıyla da su ayak izini değerlendirebilir. Diğer bir örnek olarak bir şirketin tedarik zinciri boyunca bağımlı olduğu kıt su kaynaklarını ortaya koymak ve sürdürülebilir su kullanımını işlevsel hale getirmek için yaptığı su ayak izi çalışmaları da verilebilir (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, Mekonnen, 2011).

Su ayak izi muhasebesi aşaması, verilerin toplandığı ve hesapların geliştirildiği aşamadır. Bu aşamada hesaplardaki detayların kapsamı bir önceki aşamada belirlenen amaçlara ve alınan kararlara bağlıdır. Muhasebe aşamasından sonra, su ayak izinin çevresel, sosyal ve ekonomik açıdan uygulanabilirliğinin tespit edildiği sürdürülebilirlik değerlendirmesi aşaması gelmektedir. Üçüncü aşamada incelenen duruma su perspektifi açısından en ince

ayrıntısıyla bakmak mümkündür. Son aşamada yanıt seçenekleri, uygulanacak stratejiler ve belirlenen politikalar formüle edilmektedir. Su ayak izi değerlendirmelerinde tek bir çalışmaya tüm bu aşamaları dahil etmek zorunlu değildir. Hedefler ve kapsam belirlendikten sonra sadece muhasebeyle ilgilenmek de yeterli görülmektedir ya da muhasebenin ardından çalışmanın sürdürülebilirliğini tespit ederek su ayak izi değerlendirmesini sonuçlandırmak mümkündür. Bazı su ayak izi değerlendirme çalışmalarında sonuca daha farklı açıdan bakabilmek için bir önceki aşamaya geri dönmek gerekebilmektedir (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, Mekonnen, 2011).

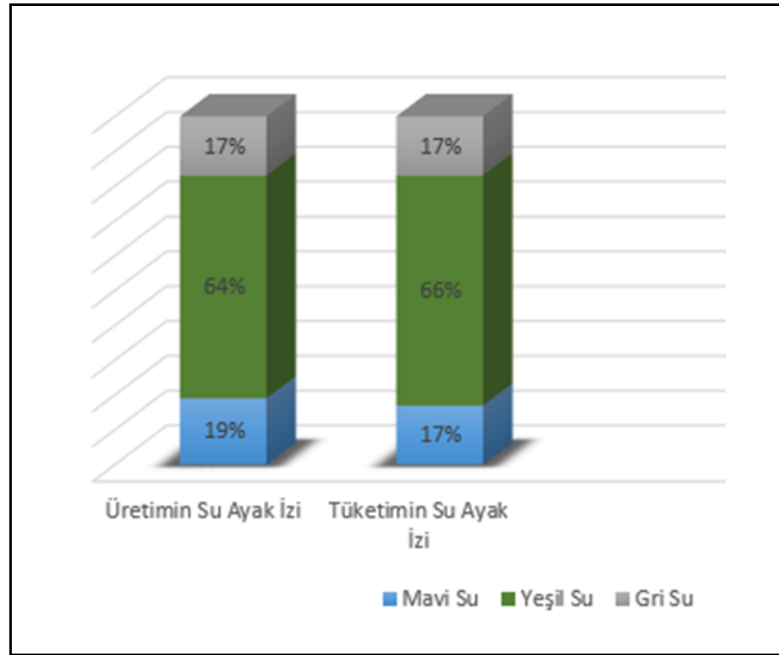
2.2.2. Türkiye'nin Su Ayak İzi

Bir ürüne ait su ayak izi, ürünü üretmek için ve ürünün tedarik zinciri boyunca ölçülen tatlı su hacmine eşittir. Bu terim, kullanılan kaynağa göre su tüketim hacimlerini ve türüne göre kirlilik potansiyelini gösteren çok yönlü bir göstergedir. Toplam su ayak izinin tüm bileşenleri coğrafi ve zamansal olarak değişiklikler göstermektedir ve değerlendirme sınırları bu iki faktöre göre belirlenmektedir (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, Mekonnen, 2011).

Türkiye coğrafyası gereği sularla çevrili bir ülke konumunda görünse de su zengini bir ülke değildir. Hatta mevcut şartlar altında 2030 yılında Türkiye'nin su fakiri bir ülke olacağı tahmin edilmektedir (Türkiye Sınai Kalkınma Bankası, 2018). Bu yüzden sürdürülebilir su kullanımının bir göstergesi olan su ayak izi kavramı ve bunun Türkiye açısından değerlendirilmesi oldukça önemlidir. Üretimin su ayak izi, Türkiye'de üretilen tüm ürünler için kullanılan mavi, yeşil, gri su miktarıdır. İhracatın su ayak izi, ülkeden ihraç edilen ürünlerin veya hizmetin üretiminde kullanılan mavi, yeşil, gri su miktarıdır. İthalatın su ayak izi, ülkeye ithal edilen ürünlerin veya hizmetin üretiminde kullanılan mavi, yeşil, gri su miktarıdır. Tüketimin su ayak izi ise ülke içerisinde tüketilen ürün ya da hizmetlerin üretiminde kullanılan mavi, yeşil, gri su miktarıdır (Pegram ve diğ., 2014).

Türkiye'de üretimin ve tüketimin su ayak izi neredeyse eşittir. Aynı şekilde ülkeye ithalatla giren sanal su miktarı, ülkeden ihracatla çıkan sanal su miktarına denktir. Bu

eşitlik Türkiye'nin sanal su bütçesinin denkliğini ifade etmektedir. Su ayak izi hesaplamaları hem üretim hem de tüketim için mavi, yeşil ve gri su ayak izi bileşenleri şeklinde gerçekleştirilmiştir. Geleneksel su kullanımı hesaplamaları sadece kullanılan yeraltı ve yerüstü su kaynaklarından çekilen su miktarlarını ele almaktadır. Bu da sadece mavi su ayak izi olarak ifade edilmektedir. Fakat bunların yanında su ayak izi hesaplamaları, yeşil ve gri su ayak izlerini de ele alarak üretimin veya tüketimin toplam su ayak izini kapsamaktadır. Türkiye'nin üretim ve tüketiminin mavi, yeşil, gri su ayak izi oranlarına bakıldığında yeşil su ayak izinin oransal olarak diğer su ayak izlerinden fazla olduğu görülmektedir. Bu durum Türkiye'de gerçekleşen üretim ve tüketimin yağışlara ve diğer iklim şartlarına bağlı olduğunu göstermektedir (Çakmak, 2017). Türkiye'nin mavi, yeşil ve gri su ayak izi miktarlarının oranları Şekil 2.4'te yer almaktadır.



Şekil 2.4. Su ayak izi bileşenlerine göre Türkiye'de üretimin ve tüketimin su ayak izi (Pegram ve diğ., 2014)

2.2.3. Su Ayak İzinin Çevresel Önemi

Su kirliliği, tatlı su kaynaklarının tükenmesi ve yaygın su kıtlığı gibi problemler 21.yüzyılın suyla ilgili en büyük çevresel sorunları arasındadır. Bu sorunların merkezinde

insanların su kaynaklarını bilinçsizce kullanması yatmaktadır. Su ayak izi kavramı, bu sorunları ve daha fazlasını yanıtlaması için ortaya çıkmıştır. İnsanların tatlı su tüketimi ile suyun büyük çevresel sorunları arasındaki ilişkiyi ele alan su ayak izi kavramı, bilim duvarlarının içindeki ve ötesindeki paydaşlarda yankı uyandırmaktadır (Hogeboom, 2020).

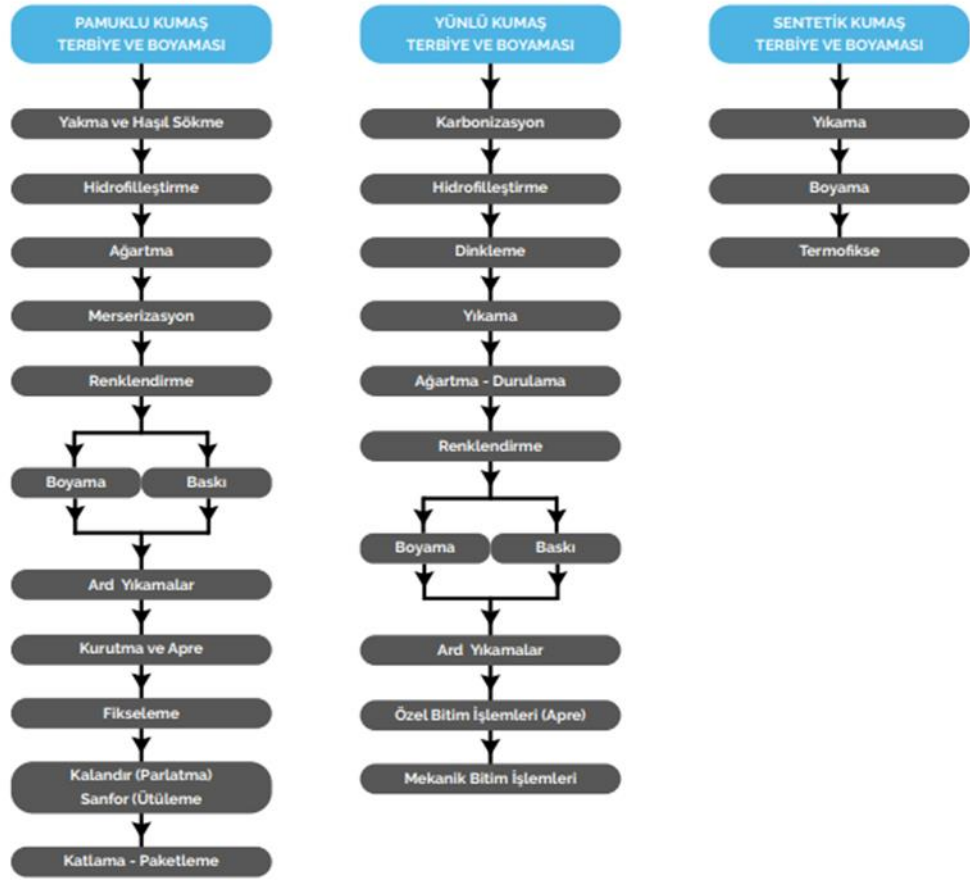
Arjen Hoekstra su ayak izi kavramını, dolaylı su kullanımını ölçmek, haritalamak ve su kaynakları yönetimine tedarik zincirleri boyunca tüketicileri ve üreticileri dahil etmenin önemini göstermek amacıyla tatlı su tahsisinin bir göstergesi olarak ortaya atmıştır. Su ayak izi çalışmaları tedarik zinciri aşamalarının su kaynakları yönetimi ve tatlı su tahsisi ile ilişkisini keşfederken, yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) çalışmaları da su kullanımının önemini kabul etmiştir ve ilgili etkileri LCA'ya dahil etmiştir. Daha sonra LCA, suyla ilgili çevresel etkileri çalışmalarına dahil etmek için kapsamlı metodolojiler geliştirmiş ve su ayak izi konusunda uluslararası ISO 14040 standartlarına uygun ana kavramları çerçevelemeye başlamıştır (Boulay ve diğ., 2013).

Endüstriyel faaliyetlerin artmasıyla birlikte ortaya çıkan bölgesel su kıtlığı ve atık su kirliliği sadece ülkemiz için değil tüm dünya ülkeleri için problem haline gelmiştir. Tekstil ve hazır giyim endüstrisinde üretim payı yüksek ülkelerin başında gelen Çin, yüksek su tüketimi ve kirliliği sorunlarına çare bulamamıştır. Türkiye tekstil sektöründe Çin'den sonra Avrupa Birliği'nin ikinci büyük tedarikçisi konumundadır (Öztürk, 2005). Her iki ülkede yapılan araştırmalar sonucunda bu sorunun çözümü olarak tüketilen tatlı su kaynaklarının ve üretilen atık su miktarının dengede olması gerektiği kanısına varılmıştır. Bu dengenin kurulabilmesi ancak su ayak izi değerlendirme çalışmalarıyla mümkündür. Özellikle su kullanımının maksimum olduğu tekstil endüstrisi için, uzun üretim zinciri ve yetersiz veriler nedeniyle proses düzeyinde su ayak izinin hesaplanması uluslararası bir sorun haline gelmiştir. Sürdürülebilir üretim için bu sorunların ortadan kaldırılması amacıyla araştırmalar devam etmekte ve endüstrilerin çevresel etkilerinin değerlendirilmesi için birçok çalışma yürütülmektedir (Li X., ve diğ., 2021).

2.3. Tekstil Endüstrisi

Tekstil sektörü, oluşturduğu imalat sanayi üretimindeki pay, gayri safi yurt içi hâsıla, ihracat, yatırımlar, istihdam ve ekonomik kalkınma açısından tüm dünyada olduğu gibi, ülkemizde de en önemli sektörlerden biridir. Bu sektörün öne çıkan ürün grupları arasında farklı ihtiyaçlar doğrultusunda iplik, elyaf, örme ve dokuma kumaş, pamuk, keçe, polyester gibi kumaş türleri yer almaktadır (Dağlı ve diğ., 2018). Günlük yaşamımızın her alanında kullandığımız havlu, yatak örtüsü, perde, giysi döşemelik gibi ev tekstili ve giysi modası değişimi içerisinde sürekli olarak tüketilen ve ihtiyaç duyulan ürünler tekstil endüstrisinin bütününe oluşturmaktadır. Bu üretim döngüsü sonucunda oluşan ve tüketicilerin elinde görevini tamamlayan tekstil atıklarının çoğu çevresel açıdan bir tehdit oluşturmaktadır (Doğan, 2011). Tekstil endüstrisi, dünyadaki en çok su tüketen ve su kaynaklarını kirleten endüstrilerden biridir (Li ve diğ., 2021, Chen ve diğ., 2017, Rather ve diğ., 2019).

Tekstil ürünlerinin üretiminden sonra ürünlerin kullanıma hazır hale getirilmesi tekstil ürünlerinin bitirilmesi alt sektörüne aittir. Bu sektör tekstil ürünlerinin (iplik, eşyaf, kumaş) ön terbiye, boyama-baskı ve apre (bitim) işlemlerini kapsamaktadır. Alt sektörde işlenen ürünlerin yapısı ve formuna göre uygulanan teknikler ve teknolojiler, üretim proseslerinde değişiklik göstermektedir. İşlemler ayrıntılı olarak incelendiğinde; ön terbiye prosesleri olan ağartma, hidrofilleştirme, kasar işlemleri, mersezasyon ve enzimatik işlemler tekstil materyalinin boyama ve baskıya hazırlanması için uygulanmakta ve kullanım amacına uygun teknik özellikler (boyar madde afinitesi, parlaklık, mukavemet vb.) ürünlere kazandırılmaktadır. Tekstil ürünlerinin renklendirilmesi çeşitli yöntemlerle boyama-baskı proseslerinde gerçekleştirilmektedir. Son terbiye proseslerinde ise tekstil materyallerini kullanıma uygun hale getirmek için buruşmazlık, çekmezlik, su-yağ iticilik, tutum, geç tutuşurluk gibi çeşitli teknik özellikler kazandırılmaktadır (Dağlı ve diğ., 2018). Kumaş türlerine göre gerçekleştirilen boyama ve apreleme işlemleri Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Tekstil materyaline göre uygulanan terbiye, boyama ve apre işlemi (Dağlı ve diğ., 2018)

Tekstil endüstrisi, çeşitli işleme operasyonlarında büyük miktarda su tüketmektedir. Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı'na (USEPA) göre ortalama 9000 kg kumaş üretmek için 36000 litre su kullanılmaktadır. Tekstil endüstrisinde ıslak proseslerde su, kimyasalların işlenmesi için bir çözücü olarak ve bir yıkama durulama ortamı olmak üzere iki esas amaç için kullanılmaktadır. Bunun dışında iyon değişimi, kazan, soğutma suyu, buharla kurutma ve temizleme aşamalarında da bir miktar su tüketilmektedir. Bir tekstil endüstrisinde kullanılan suyun proseslere göre kullanım oranları Çizelge 2.1'de gösterilmiştir (Shaikh, 2009).

Çizelge 2.1. Tekstil endüstrisinde proseslere göre su kullanım oranları (Shaikh, 2009).

PROSES	TÜKETİLEN SU YÜZDESİ
Ağartma	%38
Boyama	%16
Baskı	%8
Kazanlar	%14
Diğer Kullanımlar	%24

Tüm bu üretim süreçleri sonucunda çevre kirliliğine yol açabilecek birçok atık türü ortaya çıkmaktadır. Tekstil endüstrisi Türkiye’de hızla gelişme gösteren ve ilerleyen endüstrilerin başında gelmektedir (Doğan, 2011). Bu durum, daha fazla kontrol altında tutulması ve bertaraf edilmesi gereken katı atık ve atık suların oluşumunu beraberinde getirmektedir. Aynı zamanda tekstil endüstrisi prosesleri en çok su tüketen ve kirlüten prosesler olduğu için, su kaynaklarının sürdürülebilir olarak kullanılması ve tekstil atık sularının farklı teknolojiye sahip arıtma yöntemleri ile arıtılması gerekmektedir.

2.3.1. Tekstil Atık Sularının Arıtma Yöntemleri

Tekstil endüstrisinden kaynaklanan atık suların arıtımı evsel nitelikli atık suların arıtımına göre daha zordur. Tekstil endüstrisi atık suları yüksek konsantrasyonda biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ), kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), boya ve askıda katı madde (AKM) içermektedir. Yüksek oranda renk ve KOİ içeren atık sular, hem estetik açıdan doğal kaynakları kirlletmekte hem de su kaynaklarında yaşayan canlılar için gerekli çözünmüş oksijen miktarını azaltmaktadır (Namal, 2017).

Tekstil endüstrisi atık sularında kontrol edilmesi gereken kirlletici parametreleri, BOİ, KOİ, AKM, yağ ve gres, renk, pH değeri, fenol, siyanür, klor, sülfür, sülfid ve krom gibi parametrelerdir. Atık suyun içerisindeki zehirli organik maddeler, azot, fosfor, ağır metaller ve çözünmüş inorganik kirlleticilerin tekstil atık sularından arındırıldıktan sonra alıcı ortamlara deşarj edilmesi gerekmektedir (Çetin, 1995).

Atık sulardan renk gideriminde kullanılan arıtma yöntemleri aşağıdaki gibi sıralanabilir (Namal, 2017):

- Kimyasal oksidasyon yöntemleri
- Aerobik veya anaerobik arıtma gibi biyolojik yöntemler
- Koagülasyon-flokülasyon, iyon değişimi, adsorpsiyon ve membran filtrasyon gibi fiziksel ve fizikokimyasal yöntemler
- Elektrodializ gibi elektrokimyasal yöntemler

Kimyasal oksidasyon ile arıtma evsel ve endüstriyel atık sularda bulunan Mn^{+2} , Fe^{+2} , S^{-2} , CN^{-} , SO_4^{-2} gibi inorganik maddelerle, fenoller, aminler, renk, koku, tat oluşturan bileşikler, bakteriler, algler gibi organik maddelerin giderilmesi amacıyla uygulanmaktadır. Kimyasal oksidasyon yöntemleri ekonomik nedenlerden dolayı kısıtlı alanlarda kullanılmaktadır. Oksitleyici maddelerin seçiminde arıtma verimi, fiyatı, taşıma ve saklama kolaylığı, diğer arıtma kademeleri ile uyumluluğu, oksidasyon işleminin mekanizması göz önünde bulundurulmalıdır. Kimyasal oksidasyon yönteminde kullanılan oksitleyici maddeler, hava, oksijen, ozon, hidrojen peroksit (H_2O_2), potasyum permanganat ($KMnO_4$), klor ve bileşikleri şeklinde sıralanabilir (Ardalı, 2019).

Aerobik biyolojik arıtma sistemi olan aktif çamur süreci, mikroorganizmaların organik maddeyi oksijen varlığında ayrıştırmaları esasına dayanılarak geliştirilmiş bir yöntemdir (Yıldız ve diğ., 2013). Biyolojik prosesler KOİ ve AKM gideriminde etkili bir yöntemdir fakat özellikle tekstil atık sularında bulunan renk gideriminde yetersiz kalmaktadır. Çünkü tekstil endüstrisinde kullanılan boya bileşikleri, biyolojik olarak ya çok zor parçalanmakta ya da hiç bozunmamaktadır. Bu arıtma yönteminin tercih edilmesinin sebebi ucuz bir yöntem olması ve diğer arıtma yöntemlerine göre daha az çamur miktarı oluşmasıdır. Anaerobik sistemler ise renk, ağır metaller ve organik halojenlerin gideriminde verimli sonuçlar vermektedir. Yün yıkama atık sularının içerisinde bulunan ve biyolojik olarak zor ayrışabilen organik maddeler de anaerobik sistemlerde giderilebilmektedir. Anaerobik arıtma sistemlerinin dezavantajlarından bir tanesi arıtmanın sonucunda toksik ve kanserojen aromatik aminlerin ürün olarak oluşmasıdır (Namal, 2017).

Anaerobik prosesler 3 adımda meydana gelmektedir (Anonim, 2009):

- Yüksek molekül ağırlıklı çözülmüş ve askıdaki organiklerin hidrolizi.
- Küçük organik bileşiklerin parçalanarak, uçucu yağ asitlerine (asetik asit) dönüşümü.
- Asetik asitin ve aynı zamanda hidrojen ve karbondioksitin metana dönüşümü

Fiziksel arıtma yöntemlerinden olan koagülasyon-flokülasyon yöntemleri, atık su içerisinde çökmeyen veya çok yavaş çöken bu nedenle bulanıklığa sebep olan ince boyutlu katı taneciklerin yardımcı bir madde ilavesiyle hızlı çöktürülmesi esasına dayanmaktadır. Koagülasyonda taneciklerin kümeleştirilme işlemi, ortama inorganik elektrolitlerin ilavesiyle, yüzey elektrik yüklerinin nötralize edilerek kararsız hale getirilmesiyle sağlanmaktadır. Flokülasyonda ise taneciklerin kümeleştirilmesi, yüksek molekül ağırlıklı organik polimerlerin ortama ilave edilmesiyle birlikte taneler arasında fiziksel bir köprü meydana getirilmesiyle sağlanmaktadır (Taşdemir ve Erdem, 2010).

Diğer bir fiziksel arıtma yöntemi olan adsorpsiyon prosesi, suların arıtılma aşamasında kirlenmiş su ve katı adsorbent arasındaki ara yüzeyde meydana gelmektedir. Adsorbe olan kirletici adsorbat, adsorbe eden faz ise adsorbent olarak tanımlanmaktadır. Çözelti pH değeri, sıcaklık, ortama giren maddeler, adsorbent yüzey alanı, adsorbentin dozu ve yapısı adsorpsiyon prosesinin performansını etkileyen faktörlerdir (Akgül ve diğ., 2019).

İyon değiştirme yöntemi de fiziksel arıtma yöntemlerine ait bir arıtma prosesidir. Bu yöntem bir ayırma prosesi olarak etkilidir fakat yüksek konsantrasyonda kirlilik barındıran endüstriyel atık suların arıtımında uygulanabilirliği oldukça düşüktür. Ayrıca yatırım ve işletme maliyetleri yüksek olduğundan büyük hacimli atık suların arıtılması için kullanımı yaygın değildir. Kirleticilerin yapısındaki anyonlar anyon değiştirici reçinelerdeki hidroksil iyonları ile yer değiştirerek anyon değiştiricide tutunurlar (Eren, 2013).

Elektroliz yönteminde, asit boyalar demir hidroksit oluşumu ile hızlı bir şekilde uzaklaştırılmaktadır. Laboratuvar çalışmalarında bu yöntemle %80 renk giderimi sağlanmıştır. Fotokataliz yönteminde ise UV ışınları, H₂O₂ ve TiO₂ birlikte

kullanılmasıyla boya çözeltilerinden kaynaklanan renk giderimi sağlanmaktadır. Aynı zamanda bu yöntem ile %90 karbon giderimi gerçekleştirilmiştir. UV/H₂O₂ prosesi tam ölçekli uygulamalarda UV/TiO₂ prosesine göre daha etkilidir fakat oldukça yavaş ve maliyetli bir yöntemdir (Namal, 2017).

2.3.2. Tekstil Atık Sularının Çevresel Etkileri

Tekstil üretim endüstrisi, tüm endüstriler arasında en eski tarihe dayanan ve karmaşık bir teknoloji yapısına sahip endüstrilerden biridir. Bu endüstrinin temel ürünleri, pamuk, jüt, ipek ve yün gibi doğal elyaflar ve aynı zamanda polyester, viskon, naylon ve akrilik gibi sentetik/suni elyaflara kadar geniş bir elyaf/iplik yelpazesinden oluşmaktadır. Tekstil ürünlerine artan taleple birlikte, tekstil fabrikaları ve atık suları orantılı olarak artmakta ve dünyada büyük bir kirlilik sorunu oluşmaktadır. Tekstil endüstrisinde kullanılan birçok kimyasal çevre kirliliği ve sağlık sorunlarına neden olmaktadır. Tekstil atık suyundaki kimyasal kirleticiler arasında boyalar önemli bir parametre olarak kabul edilir (Khan ve Malik, 2013).

Tekstil endüstrisi ile ilgili dünya çapındaki çevre sorunları, arıtılmamış atık suların deşarjından kaynaklanan su kirliliği ve özellikle işleme sırasında kullanılan toksik kimyasallardan kaynaklanan sorunlardır.

Yapılan bir çalışmada (Marwari ve Khan, 2012) tarafından Jaipur'da bulunan Sanganer kasabasında *Lycopersicon esculentum* adında bir domates türü yetiştirilmiştir. Domates türü, yetiştirilme aşamasında %20 ve %30 tekstil atık suyuna maruz bırakılmıştır. Çalışmada çiçeklenme öncesi, pik ve çiçeklenme sonrası dönemlerde metal birikimi, büyüme ve biyokimyasal parametreler açısından inceleme yapılmıştır. Çalışma sonunda klorofil içeriğinin metal konsantrasyonundaki artıştan en ciddi şekilde etkilendiği ortaya çıkmıştır. Toplam klorofil içeriği %72,44 oranında azalma gösterirken; karbonhidrat, protein ve azot içeriği sırasıyla %46,83, %71,65 ve %71,65 oranında azalma göstermiştir. Atık su uygulamasındaki artışla birlikte kök ve gövde uzunluğu oranı %50, kök ve gövde kuru ağırlığı oranı ve toplam kuru ağırlık %52, %69, %72 oranlarında azaltılmıştır. Mahsul hasadından sonra, en yüksek konsantrasyonda kirlilik içeren tekstil atık suyu ile

muamele edilen bitkilerin meyve numunelerinde 2.570 mg Zn, 0.800 mg Cu, 1.520 mg Cr ve 2.010 mg Pb gibi kirletici parametrelerine rastlanmıştır (Marwari ve Khan, 2012).

Tekstil atık suları, hidrosülfidlerin varlığından dolayı oksijen konsantrasyonunu büyük ölçüde azalttığı ve su ekosisteminin ihtiyacı olan ışığın su kütlesinden geçişini engellediği için kritik çevresel bir tehlikedir (Kocaer ve Alkan, 2002).

Tekstil endüstrisi atık sularının çevresel etkilerinin yanında insan ve hayvan sağlığına karşı tehdit oluşturabilecek birçok etkisi bulunmaktadır. Küresel olarak kullanılan renklendiricilerin yaklaşık %40'ı bilinen bir kanserojen madde olan organik olarak bağlı klor içermektedir. Kimyasallar buharlaşarak soluduğumuz havaya karışır veya cildimiz tarafından tutulmaktadır. Sonucunda alerjik reaksiyonlar olarak karşımıza çıkmakta ve çocuklara, anne karnındaki bebeklere bile zarar verebilmektedir. Bu kimyasal kirlilik nedeniyle hücrelerin normal işleyişi bozulmakta ve bu durum hayvanların fizyolojisinde ve biyokimyasal mekanizmalarında değişikliğe yol açarak solunum, ozmoregülasyon, üreme gibi önemli fonksiyonların bozulmasına neden olabilmekte ve hatta ölümlere yol açmaktadır. Tekstil endüstrisi atıklarında bulunan ağır metaller biyolojik olarak parçalanamadığından vücuttaki organlarda birikir ve zamanla çeşitli hastalık semptomlarına yol açarlar. Bu nedenle, arıtılmamış veya yeterli derecede arıtılmamış tekstil atık suları, doğal ekosistemi olumsuz etkileyerek ve uzun vadeli sağlık etkilerine neden olarak, hem su hem de karasal yaşam için zararlı olabilir (Khan ve Malik, 2013).

2.4. Su Ayak İzi İle İlgili Yapılmış Çalışmalar

Bursa'da yapılan bir çalışmada dokuma kumaş üretim fabrikasında farklı sürdürülebilir üretim yöntemleri uygulanarak çevresel performans değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışma sonucunda şirketin toplam su tüketiminin %40,2 oranında, atık su oluşumunun ise %43,4 oranında azaldığı görülmüştür. Aynı zamanda şirketin toplam enerji tüketimi ve buna bağlı CO₂ emisyonları sırasıyla %17,1 ve %13,5 oranında azaltılmıştır. Firmanın çevresel performansının incelenmesinin ardından aşağıdaki sürdürülebilir üretim uygulamaları faaliyete geçirilmiştir (Alkaya ve Demirer, 2014).

- Taşma yerine damla dolgulu yıkama kullanımı
- Ram soğutma suyunun yeniden kullanımı
- Yakma soğutma suyunun yeniden kullanımı
- Su yumuşatma sisteminin yenilenmesi
- Su iletim sisteminde muhtelif vana ve armatürlerin yenilenmesi

Yapılan başka bir çalışmada tekstil sektöründe uygulanan ağartma prosesi kimyasallar yerine UVA ışınları ile uygulanmıştır. Bir UV-A lambası yardımıyla yapılan işlemde daha önce uygulanan proseslere göre %82,3-71,8 oranlarında enerji tasarrufu ve %50 oranında da su tasarrufu sağlanmıştır (Li ve diğ., 2022). Firma için tekstil endüstrisinin sürdürülebilirliğini arttırmaya yönelik buna benzer yöntemler örnek gösterilebilir.

Diğer bir çalışmada sürdürülebilir üretim yöntemi olarak klasik renk sıyırıcı olan sodyum hidrosülfid yerine Ozon kullanılmıştır. Ozonun reaktif boyaların kromofor gruplarına göre renk gideriminde etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca işlem sonucunda oluşan atık çevresel kalite standartlarına uygundur ve renk sıyırma verimliliğini etkilemeden en az dört kez yeniden kullanılabilir (Zulfiqar ve diğ., 2023). Atık su miktarını ve su kullanımını azaltmak amacıyla alternatif bir yöntem olarak kullanılabilir.

İsviçre’de yapılan çalışmada bir tişört yaşam döngüsü analizi yapılmış ve üretim sırasında pamuktan başka bir malzeme ya da daha az çevresel yüke sahip bir tekstil ürününün seçilmesi ile bir tişörtün çevresel performansını iyileştirebileceği gözlemlenmiştir (Schmutz ve diğ., 2021).

Su ayak izi değerlendirme çalışmalarına örnek olabilecek diğer bir çalışmada tekstil ve giyim atıklarının potansiyel su ayak izi değerlendirmesi incelenmiştir. Karışık pamuk lifinin (%70 işlenmemiş pamuk lifi ve %30 geri dönüştürülmüş pamuk lifi) su ayak izi değerinin %100 işlenmemiş pamuk lifi su ayak izi değerinden %26,28 daha az olduğu görülmüştür. Su ayak izi esas olarak elyaf üretimi ve boyama aşamalarında azaltılmıştır (Constantin ve diğ., 2015). Başka bir değerlendirme çalışmasında ham polyester kumaş üretiminin ve geri dönüştürülmüş polyester kumaş üretiminin su ayak izi sırasıyla 5,98 m³ H₂O_{eq}/100 kg ve 1,90 m³ H₂O_{eq}/100 kg olmuştur. Yaşam döngüsü değerlendirme

poligonu yöntemiyle kapsamlı karbon ayak izi ve su ayak izi değerlendirmesi, polyester kumaş üretim sürecinin işlenmemiş polyesterin geri dönüştürülmüş polyesterden daha büyük çevresel etkiler sergilediğini göstermiştir (Qian ve diğ., 2021).

Madencilik sektöründe su yönetimi, artan su kıtlığı nedeniyle stratejik öneme sahiptir. Bir çalışmada, altının ocaktan çıkarılmasının ve işlenmesinin su ayak izi, su ayak izi muhasebesi ve yaşam döngüsü değerlendirmesi kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, mavi su kaynaklarının tüketimi olan doğrudan mavi su ayak izi kayıp dönüş akışı yüzünden 260,61 m³/kg Au ile en büyük değere sahiptir ve kayıp dönüş akışının tek kaynağı atık havuzudur. Dolaylı su ayak izi değerleri arasında Oksijen 37,38 m³/kg Au ile en yüksek değere sahiptir. Ayrıca, gri su ayak izinden sorumlu kritik bileşenin 1,777 m³/kg Au değer ile Arsenik kullanımı olduğu tespit edilmiştir. Yaşam döngüsü değerlendirme metodolojisine göre mavi su ayak izi 357,32 m³/kg olarak bulunmuş ve dolaylı mavi su ayak izine en yüksek katkıyı 12,5 m³/kg Au ile dizel sağlamıştır.

Çizelge 2.2. Farklı endüstriler ve sektörler için kullanılan su ayak izi metotları

Değerlendirme Metodu	Metodun Tanımı	Kullanıldığı Alanlar	Kaynaklar
Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA)	Hammaddelerin çıkarılması, işlenmesi, yapı bileşenlerinin üretimi, yapıların kullanımı ve kullanım ömrü sonuna kadar yapıların bütün yaşam döngüsünü kapsayan bir çevresel etki tahmin yöntemidir.	İnşaat sektöründe kullanılan yapı malzemeleri, altın madeni su ayak izi	(Duru ve Koç, 2021)

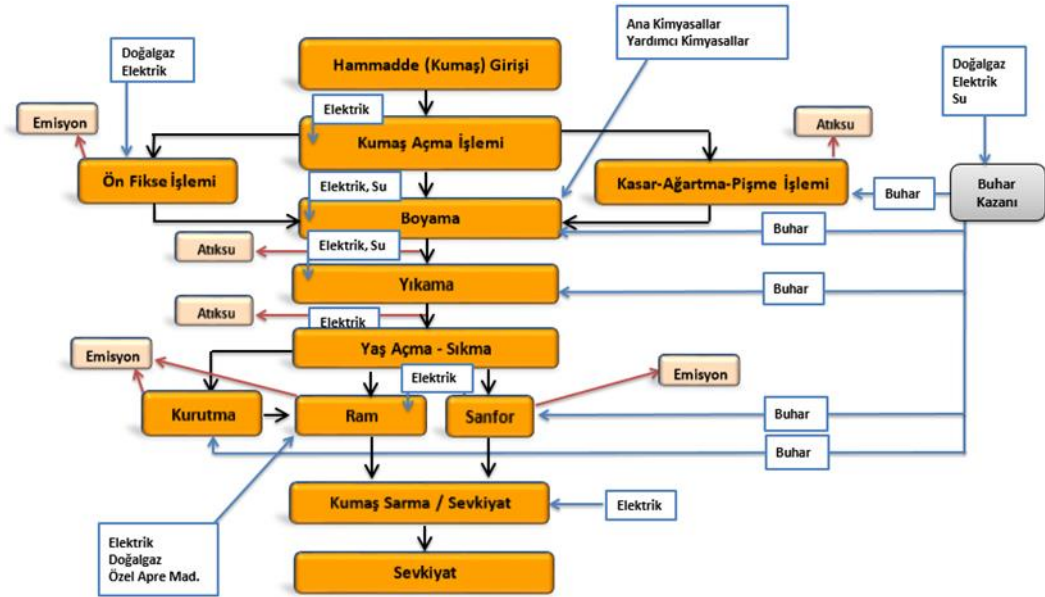
Çizelge 2.2. Farklı endüstriler ve sektörler için kullanılan su ayak izi metotları (devam)

SWAT Modeli ve Su Ayak İzi Muhasebesi	SWAT, büyük, karmaşık su havzalarında arazi yönetimi uygulamalarının etkisini ölçmek için geliştirilmiş nehir havzası ölçekli bir modeldir.	Havza kaynaklı sulamanın kullanıldığı bitkisel ürünlerin üretimi	(Nalbandan ve diğ., 2023)
Mekansal Enterpolasyon ile Su Ayak İzi Değerlendirmesi	İncelenen bir alanda değişik bölgelerden alınan örnekleme değerlerini kullanarak, örnek alınmamış herhangi bir noktanın değerini tahmin etme işlemidir.	Tarım sektörü	(Muratoğlu, 2020)
Ekolojik Ayak İzi	Bir popülasyonu sürdürmek için gerekli biyolojik alandır.	Gıda sektörü, balıkçılık, hayvancılık	(Hoekstra, 2009)
Su Ayak İzi Değerlendirme Kılavuzu ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi	Su tüketimi ve kirliliğin hacimsel ölçümünün formülasyonlar kullanılarak değerlendirildiği bir kılavuzdur.	Krom-nikel alaşımsız çelik, alaşımsız çelik, Portland çimentosu (CEM I), Portland kompozit çimento (CEM II/B) ve soda-kireç camının mavi ve yeşil su ayak izi	Gerbens-Leenes ve Hoekstra, 2018).
Sanal Su İle Su Ayak İzi Değerlendirmesi	Bir ülke üretim için fazla miktarda su gerektiren ürünleri üretmek yerine ithal ettiğinde sanal su ticareti yapmış olur.	İthalat ve ihracat	(Eşkin, 2018)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Örnek Tekstil Fabrikasının İş Akışı

Örnek olarak seçilen firma 2000 yılında İstanbul’da faaliyete başlamıştır. 2008 yılından itibaren Bursa Organize Sanayi Bölgesi’nde 7200 m²’lik kapalı bir alanda aktif olarak kumaş boyama ve apreleme gibi işlemleri gerçekleştirmektedir. Firmada biri yedek olmak üzere toplam 2 adet buhar kazanı ve 4 tanesi numune boya makinesi olmak üzere toplam 24 adet boya makinesi mevcuttur. Firmada 88 işçi çalıştırılmaktadır. Tesis tekstil endüstrisi alt sektörlerinden olan “Tekstil Ürünlerinin Bitirilmesi” sektörüne aittir. Firma ürünlerini, içerisinde Zara, Zara Home, Bershka, Pull and Bear, Massimo Dutti, Stradivarius, Oysho, Uterqüe, Tempe gibi markaların bulunduğu Inditex grubu için hazırlamaktadır. Bu markalar genellikle hazır giyim ve ev tekstili için ürünler üretmektedir. Tesiste gerçekleşen iş akışı Şekil 2.6’da verilmiştir (Hacıoğlu, kişisel görüşme, 19 Ekim 2022).



Şekil 3.1. Firmada gerçekleşen iş akışı

Kumaş boyama prosesi, müşterinin istediği türdeki kumaş üzerinde istediği rengin elde edilmesi için laboratuvarında yapılan renk verme çalışmaları ile başlamaktadır. Yapılan renk çalışması müşteri tarafından onaylandıktan sonra üretim aşamasına geçilmekte ve

boyanacak kumaşın miktarına göre boya reçetesi hazırlanmakta ve müşteriden gelen sipariş talimatına göre kasar işlemi uygulanması istenen kumaşlar kasar işleme tabi tutulmaktadır. Kasar işleminin birinci amacı kumaşa arzu edilmeyen esmerliği veren renkli safsızlıkları gidermektir (Tamtürk F.H., 2007). Kasar işlemi ile kumaş üzerinde bulunan doğal sarımtırak, kahverengi pigmentlerin bozulması sağlanarak kumaştan uzaklaştırılmaktadır (Anonim, 2021). Açık renkli kumaşların mutlaka bir kasar işleme tabi tutulması gerekmektedir. Ayrıca boya ve baskı yapılacak kumaşlarda daha parlak renk elde etmek için yeterli miktarda bir kasar yapılması daha verimli sonuçlar elde edilmesine yardımcı olmaktadır. Kasar işleminden sonra kumaşlar nötralize işlemine tabi tutulur. Bu işlemin amacı üzerinde bulunan yardımcı kimyasalların uzaklaştırılmasının yanında boyaya elverişli bir ortam hazırlamaktır. Boya reçetesindeki boyar madde ve kimyasal ölçülerine bağlı kalınarak boya işlemi gerçekleştirilmektedir. Boyama işlemi sonrasında kumaşlar yıkanarak kumaş üzerinde kalan boya artıkları giderilmektedir. Yumuşatıcı ilavesi ile birlikte kumaşa yumuşaklık kazandırılmaktadır (Hacıoğlu, kişisel görüşme, 2022).

Kumaş müşteriden gelen sipariş doğrultusunda, santrifüj, balon sıkma veya halat açma makinelerine gönderilmektedir. Tüp halindeki örgü kumaşların boyamadan sonra fazla suyunun uzaklaştırılmasında balon sıkma makinesi kullanılmaktadır. Açık en olarak işlem görmesi için tüp olarak boyanan kumaşların halat kesmeden geçmesi gerekmektedir. Halat kesme makinesi, halat formundaki ıslak örgü kumaşların may (örgü dönmesi) izinden ikiye kesilerek açık en haline getirilmesi için kullanılmaktadır (Beneks Makine, 2019). Nemli haldeki kumaşlar daha sonra kurutma işlemine tabi tutulur ve kumaşa istenilen değerlerin verilmesi bu aşamada başlamaktadır. Genel olarak kurutma işlemi ve kumaş eninin stabil hale getirilmesi için ram makinası kullanılmaktadır. İki taraftaki taşıyıcı silindirler arasındaki mesafeyi ayarlayarak kurutulan kumaşa istenilen en kazandırılmaktadır. Yani kumaşın enine yönde esnemesi veya çekmesi sağlanmaktadır (Tekstil Sayfası, 2019).

Kumaş ilgili apre makinelerine gönderilerek müşterinin istemiş olduğu apre talimatına göre işlem görmektedir (Hacıoğlu, kişisel görüşme, 2022). Müşteri isteği doğrultusunda hem mekanik hem de kimyasal apre işlemleri yapılmaktadır. Ön terbiye ve renklendirme

işlemlerinden sonra kumaşa uygulanan kimyasal ve mekanik işlemler, apre (bitim) işlemleri olarak adlandırılmaktadır. Apre işlemlerinde asıl amaç, kumaşın görünümünü, tutumunu ayarlamak ve geliştirmek, sahip olunan özellikleri geliştirmek veya mümkünse ürüne yeni kullanım özellikleri kazandırmak, konfeksiyon için dikim ve kesim kolaylıkları sağlamaktır. Mekanik apre (kuru apre) yöntemleri, tıraşlama, şardonlama, kalandırlama, makaslama, zımparalama gibi yöntemlerden oluşmakta ve bunlar ürüne kuru halde uygulanmaktadır. Şardonlama (tüylendirme), özellikle pamuklu kumaşa uygulanan bir işlemdir ve liflerin çekilerek kumaş yüzeyine çıkarılmasıyla birlikte kumaşta tüylendirilmiş bir yüzey oluşmaktadır. Yüzeyin düzgün hale getirilmesi ve tekstil ürün yüzeyinin üzerindeki fazlalıkların kesilerek alınması tıraşlama işlemi ile gerçekleşmektedir. Kimyasal apre (yaş apre) yöntemleri ise, buruşmazlık apresi, kir iticilik apresi, güç tutuşurluk apresi, antibakteriyel apre, antistatik apre vb. gibi özel bir kimyasal madde içeren, apre flottesinde (kimyasal maddelerden oluşan işlem çözeltisi) uygulanan yaş işlemlerdir. Kimyasal apre işlemlerinde amaç, liflere bağlanan ve ürüne applike edilen terbiye maddeleri ile liflerin tutumunda, görünümünde veya kullanım özelliklerinde değişiklikler meydana getirmektir. Kumaşların çoğu kullanıma sunulmadan önce apre işlemleri uygulanmaktadır (Milli Eğitim Bakanlığı, 2018).

Son olarak sanfor işlemiyle birlikte, kumaşın en-boy stabilitesi sağlanmakta (kumaşı birçok yıkamadan sonra alacağı şekle sokmak), tuşe verilmekte ve buruşuklukları açarak kumaş ütülenmektedir. Sanfora giren kumaş ütülenmeden önce buhar verilerek (ya da sprey sistemi ile su verilerek) nemlendirilmektedir ve ardından çelik ve keçe silindir arasından geçirilerek ütü etkisi kazandırılmaktadır (Halis, 2020).

Pamuklu Kumaş Boyama Prosesi;

Ön terbiye, kasar, boyama ve yıkama işlemleri aynı makinelerde yapılmaktadır.

1. **Kasar işlemi:** İşlem sırasında sudkostik (NaOH), hidrojen peroksit, ıslatıcı, yağ sökücü, sodyumtiyosülfat, asetik asit, enzim kullanılmaktadır. 98 °C'de yaklaşık olarak 40 dakika kumaşa kasar işlemi uygulanmaktadır.
2. **Boyama işlemi:** Kumaş ön işlemlerden geçirildikten sonra su + reaktif + boyar madde + tuz + alkali çözeltisi içinde 65 °C'de 45 dakika sürekli karıştırılmaktadır.

3. **Yıkama işlemi:** Boya makinelerinde boyama işleminden sonra asit ve sabun kullanarak 40 dakikada gerçekleştirilir.
4. **Yumuşatma işlemi:** Yıkama işleminin ardından yumuşatıcı ile yaklaşık olarak 20 dakika yumuşatma işlemi gerçekleştirilmektedir (Hacıoğlu, kişisel görüşme, 2022).

Polyester Kumaş Boyama Prosesi;

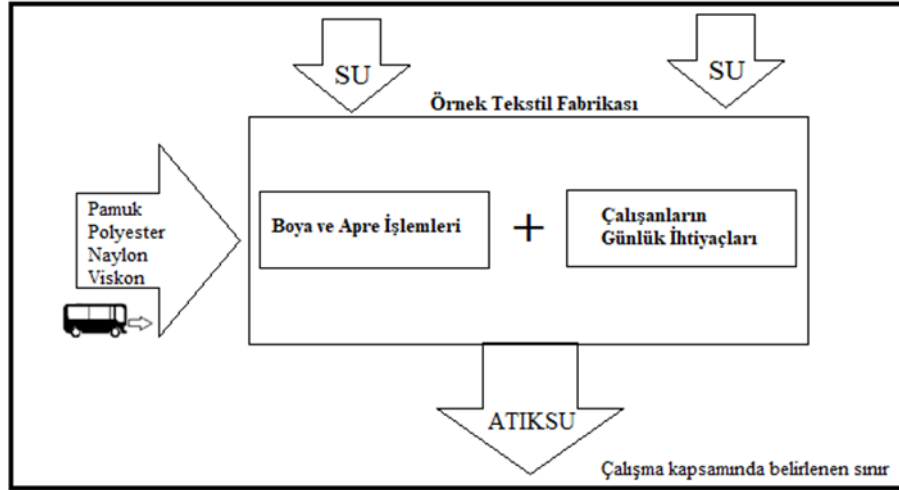
Polyester kumaşların terbiye ve boyama işlemleri yüksek kristal yapıları, hidrofob özelliği ve apolar oluşu nedeniyle diğer kumaşların terbiye ve boyama işlemlerinden farklıdır. Yüksek sıcaklık ve basınç altında boyama işlemi yapılmaktadır.

- Polyester bazlı kumaş, 130 °C sıcaklıkta, su + dispers boyar madde + dispergatör ve asetik asit karışımı çözeltisi içinde ve basınç altında 40 dakika sürekli olarak karıştırılarak boyama işlemine tabi tutulmaktadır.
- Daha sonra, boya makinelerinde boyama işleminin ardından Sud kostik (NaOH) + hidrosülfid ve asetik asit karışımı kullanılarak redüktif yıkama işlemi yapılmaktadır.
- Son olarak yıkama işleminin ardından yaklaşık 20 dakika boyunca yumuşatıcı ile yumuşatma işlemi gerçekleştirilir (Aniş ve Eren, 2003).

3.2. Su Ayak İzinin Değerlendirilmesinde Sınırların Belirlenmesi

Bir su ayak izi değerlendirilmesinin kapsamı ilgilenilen noktaya göre belirlenmektedir. Yani elde edilmek istenen sonuçlara göre sınırlar daraltılıp genişletilerek su ayak izi hesaplamaları gerçekleştirilebilir. Örneğin bir ürünün sadece üretim aşamasına ait su ayak izi hesaplaması yapılabileceği gibi o ürünün tesise getirilip alıcıya ulaştırılmasına kadar olan sürecinin su ayak izi değerleri hesaplamalara katılabilir. Su ayak izi değerlendirilmeleri su kıtlığı, sürdürülebilir su kullanımı ve su kirliliği ile ilgili ilişkilerinin değerlendirilmesinde kullanılan analitik bir araçtır. Su ayak izi çalışmaları, çizilen sınırlamalar doğrultusunda üretim, tüketim veya herhangi bir hizmetin sayısal verilerini değerlendirerek, çevresel su etkilerinin somut halini ortaya koymaktadır (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, Mekonnen, 2011).

Yapmış olduğumuz bu çalışmada tesise gelen pamuk, polyester, naylon ve viskon gibi ürünlerin boya ve apre işlemleri ve çalışanların insani ihtiyaçları için harcanan su miktarlarına göre sınırlandırma yapılmıştır (Şekil 3.1). Kullanılan enerji (elektrik, doğalgaz, yakıt vb.) için su ayak izi değerlendirilmesi çalışma kapsamında yer almamaktadır.

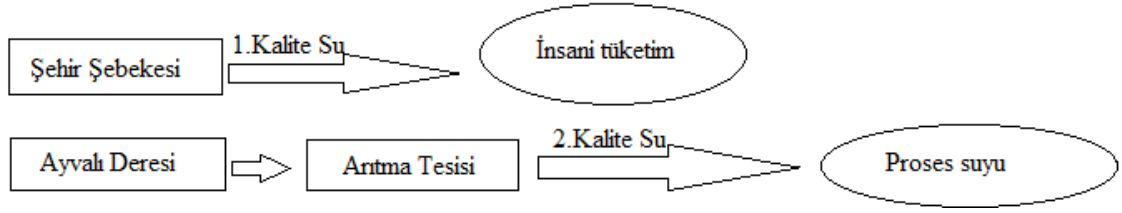


Şekil 3.2. Çalışmanın belirlenen sınırları

3.3. Su Ayak İzinin Hesabında Kullanılacak Su Miktarlarının İncelenmesi

Su ayak izinin hesaplanması için gerekli olan tüm veriler, örnek olarak seçilen fabrika ile gerçekleştirilen kişisel görüşmeler sonucunda elde edilmiştir.

Firmada kullanılan iki tür atık su bulunmaktadır. Bunlar birinci kalite su ve ikinci kalite su olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Birinci kalite su, normal şehir şebekesinden gelen ve içme, temizlik, tuvalet gibi ihtiyaçlar için kullanılan su türüdür. İkinci kalite su, Organize Sanayi Bölgesi Arıtma Tesisi ve bir su üretim tesisi tarafından tedarik edilmektedir. Arıtma tesisi bölgedeki diğer tesislerden gelen atık suları arıtıp Ayvalı Deresi'ne deşarj etmekte, su üretim tesisi de deşarj edilen bu suları fiziksel, biyolojik ve ileri arıtma ile temizleyerek fabrikalara tekrar kullanım için göndermektedir. Gönderilen bu su ikinci kalite su olarak adlandırılmakta ve sadece proseslerde kullanılmaktadır (Şekil 3.3).



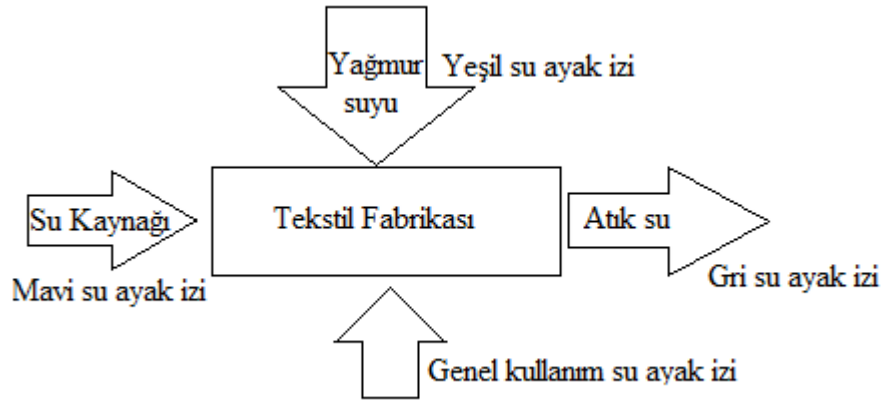
Şekil 3.3. Firmada kullanılan su türlerinin kaynakları

Tesiste gerçekleşen üretim miktarı, kullanılan su miktarları ve açığa çıkan atık su miktarı Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Tesiste üretilen ürün miktarı ve tüketilen su miktarları (Hacıoğlu, kişisel görüşme, 2022)

Toplam Üretim (kg/ay)	Pamuk Üretim (kg/ay)	Polyester Üretim (kg/ay)	Kullanılan 1.Kalite Su Miktarı (ton/ay)	Kullanılan 2.Kalite Su Miktarı (ton/ay)	Açığa Çıkan Atık Su Miktarı (ton/ay)	Buharlaştırma Miktarı (ton/ay)
161171	1541,5	114311,10	261	13120	12578	250

Örnek olarak seçilen tekstil fabrikasının Şekil 3.4’te gösterilen mavi, yeşil ve gri su ayak izlerinin hesaplanması için Çizelge 3.1’de yer alan veriler sadece mavi su ayak izinin hesaplanması için yeterli olmaktadır.



Şekil 3.4. Firmaya ait su ayak izi türleri

3.4. Firma Atık Suyunun Kirletici Parametreleri

Örnek firmaya ait atık sudaki kirleticiler ve konsantrasyonları, Çizelge 3.2’de gösterilmiştir. Bu veriler gri su ayak izinin hesaplanmasında kullanılacaktır.

Çizelge 3.2. Atık su numunesindeki kirletici konsantrasyonları (Hacıoğlu, kişisel görüşme, 2022)

Kirletici	Atık sudaki toplam değer (mg/L)
Toplam Kurşun	0,012
Toplam Kadmiyum	0,017
Toplam Cıva	0,003
Toplam Bakır	0,011
Toplam Çinko	0,12
KOİ	595
Yağ ve Gres	78
Toplam Kjeldahl Azotu	7,4
Sülfat	90
Toplam Fosfor	1,70
Florür	0,25
Siyanür	0,12
Krom	0,01
Toplam Krom	0,01
Toplam Demir	0,53
AKM	83

3.5. Firmanın Yağmur Suyu Depolama Hattı

Ele alınan tekstil fabrikasının tesis alanında mevcut olan çatı (kapalı) alanı 7555 m²’dir. Dünyada gelişmiş ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de gerekli ön işlemlerden (ızgara, çöktürme, filtreleme, dezenfeksiyon vb.) geçirilerek yağmur suyunun endüstriyel proseslerde kullanımına yönelik sistem geliştiren ve uygulayan tasarım ve mühendislik firmaları mevcuttur. Bu firmaların uyguladıkları geri kazanım sistemleri temelde benzerdir ve aşağıda listelenen bileşenleri içermektedir.

- Yağmur suyu filtre sistemi
- Yağmur suyu depolama tankı
- Yağmur suyu pompa sistemi
- Kuru kuyu
- Filtre edilmemiş yağmur suyu giriş bağlantısı

3.6. Pamuk Ürünü Tedarik Zinciri Su Ayak İzinin Hesabı

Tesisin su ayak izi hesaplanmasında belirlenen sınırlara firma içi üretim su ayak izi ve pamuk tedarik zinciri su ayak izi dahildir. Tesise gelen pamuk, müşteri tarafından Adana ve Kahramanmaraş illerinden tedarik edilmektedir. Bölgelerdeki pamuk sulama suyu miktarlarını gerçekçi bir şekilde hesaplamak için Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Teşkilatı (Food And Agriculture Organization of the United Nations - FAO) tarafından geliştirilen Climwat 2.0 ve Cropwat 8.0 programları kullanılmıştır.

Cropwat 8.0 programı, toprak, iklim ve mahsul verileri ışığında mahsullerin su ve sulama gereksinimlerini hesaplayan bir yazılımdır. Ek olarak, program sayesinde farklı yönetim şartları için sulama planları tasarlanabilir ve değişen mahsul türleri için taslak su kaynakları hesaplanabilir. Cropwat 8.0, aynı zamanda çiftçilerin sulama uygulamalarını geliştirmek için ve yağmur sulaması ve yapay sulama koşulları altındaki mahsul performanslarını tahmin etmek için de kullanılabilir (Anonim, 2023; FAO, 2005).

Climwat 2.0 programı, Cropwat ile birlikte kullanılacak bir iklim veri tabanıdır ve dünya çapında bir dizi klimatolojik istasyon ve çeşitli mahsuller için mahsul suyu gereksinimlerinin, sulama kaynağının ve sulama planlamasının hesaplanmasına izin vermektedir. Veriler, tekli veya çoklu istasyonlar için Cropwat'ta kullanımlarına uygun formatta çıkarılabilmektedir. Seçilen her istasyon için iki dosya oluşturulur ve ilk dosya, uzun vadeli aylık yağış verilerini (mm/ay) içermektedir. Ayrıca efektif yağış da hesaplanarak aynı dosyaya dahil edilmiştir. İkinci dosya, yedi iklim parametresi için uzun vadeli aylık ortalamalardan oluşmaktadır. Bu dosya ayrıca konumun koordinatlarını ve rakımını da içermektedir. (Anonim, 2023; FAO, 2005).

Aynı zamanda belirlenen iller için ekili alan ve pamuk üretimi Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK, 2021) verilerinden elde edilmiştir. Pamuk ürünleri için su ayak izi hesabında kullanılan programlarda şu adımlar izlenmiştir;

1.Adım: Climwat 2.0 programı ile seçili illerin istasyonları belirlenmiş ve iklim özellikleri, yağış miktarları Cropwat 8.0 programında kullanılmak üzere hazır hale getirilmiştir.

2.Adım: Cropwat 8.0 programında ‘Climate/ ETo’ seçeneği ile şehirlerin iklimsel özellikleri listelenmiştir.

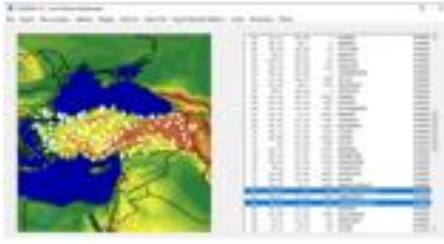
3.Adım: ‘Rain’ seçeneği ile şehirlerin yıllık yağış verileri yüklenmiştir.

4.Adım: ‘Soil’ seçeneği ile şehirlerin toprak türü belirlenmiştir. Adana ili için toprak türü ağır toprak olarak belirlenirken (Anonim, 2019), Kahramanmaraş ilinin toprak türü medium toprak olarak bulunmuştur (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2023).

5.Adım: ‘Crop Pattern’ seçeneğinde sulama bilgilerine ihtiyaç duyduğumuz pamuk bitkisi seçimi gerçekleştirilmiştir. Pamuk için ekim tarihi nisan ortası kabul edilmiştir (Hacıoğlu, kişisel görüşme, 2022).

6.Adım: ‘Crop ve Schedule’ seçenekleri yardımıyla pamuk bitkisinin sulama bilgilerine ve gereken su miktarlarına ulaşılmıştır ve ‘Print’ seçeneğinden tüm bilgiler rapor haline getirilmiştir.

Tüm bu işlemler sonucunda Cropwat 8.0 ve Climwat 2.0 programları ile Adana ve Kahramanmaraş illerinde üretilen pamuk için gerekli su miktarları ve yıllık yağış miktarları elde edilmiştir ve tüm bu adımlar Şekil 3.6’da gösterilmiştir. Rapor üzerinde işaretlenmiş olan miktarlar pamuk ürünü için tedarik zinciri su ayak izinin hesabında kullanılmıştır. Ayrıca Adana ve Kahramanmaraş illerinde üretilen pamuk miktarlarına ait veriler Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK,2021) resmi internet sitesinden ‘excel’ dosyası halinde indirilmiş ekili alan ve üretilen pamuk miktarları kaydedilmiştir.



1.Adım: Climate 2.0 programından istasyon seçimi ve iklim özelliklerinin kaydedilmesi.



2.Adım: Şehirlerin iklimsel özelliklerinin aylık olarak listelenmesi.



3.Adım: Şehirlerin yıllık yağış verileri.



4.Adım: Şehirlerin toprak türlerinin seçilmesi.



5.Adım: Sulama bilgilerine ihtiyaç duyulan pamuk bitkisinin seçilmesi.



6.Adım: Pamuk bitkisi için sulama bilgilerinin rapor haline getirilmesi

Şehir	İklim	Toprak	Sulama	Yıllık Yağış	Yıllık Su İhtiyacı	Yıllık Su Tasarrufu
Adana
Antalya
...

7.Adım: Pamuk üretimi için gerekli sulama bilgilerinin raporu

Şekil 3.6. Kullanılan bilgisayar programlarında izlenen adımlar

3.7. Polyester Ürünü İçin Tedarik Zinciri Su Ayak İzinin Hesabı

Polyester ürünü tedarik zinciri su ayak izinin hesaplanmasında kullanılan veriler yapılan literatür araştırmaları sonucu elde edilmiştir. Hesaplamalarda ham ve geri dönüştürülmüş polyester için kabuller kullanılmıştır. Ham polyester üretimi için su ayak izi $5,98 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O}_{\text{eq}}/100 \text{ kg}$ ve geri dönüştürülmüş polyester üretimi için su ayak izi $1,90 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O}_{\text{eq}}/100 \text{ kg}$ şeklinde kabul edilmiştir (Qian ve diğ., 2021).

Ele alınan tesiste polyester boyama miktarı $114311,10 \text{ kg/ay}$ 'dır. Tedarik edilen ham ve geri dönüştürülmüş polyesterin miktarları tam olarak bilinmediğinden varsayımlar yapılarak tedarik zinciri su ayak izi hesaplanmıştır. Kullanılan kabuller ve üretim verileri kapsamında firmaya gelen polyester türünün miktarına göre tedarik zinciri su ayak izi hesaplanmıştır.

3.8. Naylon Ürünü İçin Tedarik Zinciri Su Ayak İzinin Hesabı

Naylon ürünü tedarik zinciri su ayak izinin hesaplanmasında kullanılan veriler yapılan literatür araştırmaları sonucu elde edilmiştir. Elde edilen bilgilere göre tekstil endüstrisi, elyafların yıkanmasından mamul ürünlerin ağırtılmasına, boyanmasına ve yıkanmasına kadar tüm operasyonlarında yüksek hacimde su kullanan bir endüstridir. Ortalama olarak, 1 kg naylon elyaf tekstil ürünü üretmek için yaklaşık 200 L su gereklidir (Thangavel K., Duraisamy G., 2014). Firmaya gelen naylon miktarı ve elde edilen literatür verileri doğrultusunda naylon ürünü tedarik zinciri su ayak izi hesaplanmıştır.

3.9. Viskon Ürünü İçin Tedarik Zinciri Su Ayak İzinin Hesabı

Viskon ürünü tedarik zinciri su ayak izinin hesaplanmasında da elde edilen literatür verileri kullanılmıştır. İncelenen çalışmalarda istatistiklere göre, bir ton viskon kesikli elyaf üretimi için yaklaşık 65 ton tatlı su kullanılmaktadır (Qian ve diğ., 2021). Ayrıca yapılan başka bir çalışmada viskon üretimi aşamalarının çevresel etkileri incelenmiş ve iplik eğirme işleminin en yüksek çevresel yüke sahip olduğu ve ardından kimyasal hamurlaştırma ve boyama işlemlerinin geldiği görülmüştür (Zhu ve diğ., 2020).

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. İşletmenin Su Ayak İzi (SA_{işl.})

Hesaplamalarda ‘Su Ayak İzi Değerlendirme Kılavuzu’nda yer alan formüller kullanılmıştır (Hoekstra ve diğ., 2011). İşletmenin operasyonel su ayak izi ve tedarik zinciri su ayak izi tüm ürünler için hesaplanmıştır.

$$SA_{işl.} = SA_{işl.oper.} + SA_{işl.ted.zin.} \quad (4.1)$$

SA_{işl.}: İşletme su ayak izi (Hacim/Zaman)

SA_{işl.oper.}: İşletmenin operasyonel su ayak izi

SA_{işl.ted.zin.}: Tedarik zinciri su ayak izi

$$SA_{işl.oper.} = SA_{işl.oper.iç.} + SA_{işl.oper.genel} \quad (4.2)$$

SA_{işl.oper.}: İşletmenin operasyonel su ayak izi (Hacim/Zaman)

SA_{işl.oper.iç.}: İşletme içi operasyonların su ayak izi

SA_{işl.oper.genel}: İşletmenin genel kullanım su ayak izi

4.1.1. İşletme İçi Operasyonlarının Su Ayak İzi (SA_{işl.oper.iç.})

Firmanın operasyonları, prosesleri ile ilgili ilişkilendirilebilecek tüketilen ve kirletilen su miktarıdır. Kullanılan kimyasallara bağlı kirletici konsantrasyonları ve buharlaşma miktarı da dahil edilmelidir.

Çalışmada ele alınan tekstil fabrikasının yapılan görüşmeler sonucunda elde edilmiş su miktarları aşağıdaki gibidir:

- Proseslerde kullanılan su miktarı: 13120 ton / ay
- Açığa çıkan atık su miktarı: 12178 ton / ay
- Buharlaşan su miktarı: 250 ton / ay

Elde edilen su miktarlarına bağlı olarak tesisin mavi su ayak izi, gri su ayak izi ve yeşil su ayak izi sırasıyla hesaplanmıştır.

Mavi Su Ayak İzi:

Bir ürünün ya da hizmetin üretim aşamasında ve tedarik zinciri boyunca yer altı ve yer üstü su kaynaklarının tüketimini ifade etmektedir.

Su Ayak İzi_{Mavi} = Buharlaşan Mavi Su + Yeraltı ve Yüzey Mavi Su +

Geri Akış (4.3)

Su Ayak İzi_{Mavi}: Mavi su ayak izi (Hacim/Zaman)

Buharlaşan Mavi Su: Buharlaşan su miktarı (250 ton/ay)

Yeraltı ve Yüzey Mavi Su: İnsani ihtiyaçlar dışında kullanılan yeraltı ve yüzey suyu miktarı (13120 ton/ay)

Geri Akış: Kayıp geri akış (Tekrar kullanımı mümkün olmayan su miktarıdır. Tesis içinde bu miktar bilinmediğinden 0 olarak kabul edilmiştir.)

Gri Su Ayak İzi:

Belirli bir su kalitesini sağlamak amacıyla atık sulardaki kirletici derişimlerinin seyreltilmesi için gereken tatlı su miktarı gri su ayak izi olarak tanımlanmaktadır.

$$SA_{gri} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}} \quad (4.4)$$

SA_{gri}: Gri su ayak izi (Hacim/Zaman)

L: Kirletici yükü miktarı (Kütle/Zaman)

C_{max}: Alıcı ortamda o kirleticiye ait izin verilen maksimum konsantrasyon değeri (Kütle/Hacim)

C_{nat}: O kirleticinin doğal ortamdaki konsantrasyon değeri (Doğal konsantrasyon tam bilinmediğinde bu değer 0 kabul edilir.)

Firmanın atık su miktarı: 12578 ton/ay

Kirletici konsantrasyonu miktarları çıkan atık su miktarına göre elde edilmiştir.

Konsantrasyon değerleri hesaplanırken birimlerde yaklaşık olarak 1 ton = 1000 litre kabulüyle değişiklik yapılmıştır.

Kirleticiler için de [4.4] numaralı denklem kullanılarak hesaplamalar yapılmış ve sonuçlar Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Buna göre işlemler sonucunda firmanın toplam gri su ayak izi değeri 18450,24 ton / ay olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.1. Atık sudaki konsantrasyonlarına bağlı olarak kirleticilerin su ayak izi değerleri

Kirletici	Atık sudaki toplam değer (mg/L)	Limit Değer (mg/L)	Kirletici için su ayak izi değeri $\times 10^3$ L/ay
Toplam Kurşun	0,012	2,2	68,60
Toplam Kadmiyum	0,017	0,11	1943,87
Toplam Cıva	0,003	0,055	686,07
Toplam Bakır	0,011	3,3	41,92
Toplam Çinko	0,12	22	68,61
KOİ	595	2760	2721,42
Yağ ve Gres	78	132	7432,45
Toplam Kjeldahl Azotu	7,4	110	846,15
Sülfat	90	1870	605,35
Toplam Fosfor	1,70	27,5	777,55
Florür	0,25	16,5	39,06
Siyanür	0,12	1,1	1372,14
Krom	0,01	0,55	228,69
Toplam Krom	0,01	3,3	38,11
Toplam Demir	0,53	27,5	242,41
AKM	83	880	1186,33

Yeşil Su Ayak İzi:

Bir ürünün ya da hizmetin üretim ve tedarik sürecinde doğrudan veya dolaylı olarak kullanılan toplam yağmur suyu hacmidir. Firmada yağmur suyunu kullanmak üzere oluşturulan bir depolama hattı mevcuttur. Bursa iline ait yağış verileri incelendiğinde aylık toplam yağış miktarı ortalaması 22 kg/m^2 olarak elde edilmiştir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2022). Tesisin çatısına kurulan sistemde çatıya düşen yıllık yağış miktarı $1994,52 \text{ m}^3$ 'tür. Aylık olarak bu miktar ortalama $166,21 \text{ m}^3$ 'e tekabül etmektedir (Hacıoğlu, kişisel görüşme, 2022). Bu miktarın %80 'i kullanılabilir yağmur suyu miktarıdır. Sonuç olarak aylık kullanılan yağmur suyu miktarı $132,97 \text{ m}^3/\text{ay}$ olarak tespit

edilmiştir. Buna bağlı olarak tesisin yeşil su ayak izi değeri (yaklaşık $1 \text{ m}^3=1 \text{ ton}$ kabulüyle) 132,97 ton / ay olarak hesaplanmıştır.

4.1.2. İşletmenin Genel Kullanım Su Ayak İzi ($SA_{i\text{şl.oper.genel}}$)

Firmada gerçekleşen üretim operasyonları haricinde genel ihtiyaçlar ve temizlik için harcanan su miktarıdır.

Temizlik için harcanan su miktarı: 100 ton / ay

Genel ihtiyaçlar için harcanan su miktarı: 261 ton / ay

Toplam su ayak izi: 361 ton / ay şeklinde tespit edilmiştir.

Yapılan tüm işlemler sonucunda elde edilen veriler [4.2] numaralı denklemde yerine konulduğunda işletmenin operasyonel su ayak izi değeri;

$SA_{i\text{şl.oper.iç.}}$: Mavi su ayak izi (13370 ton/ay) + Gri su ayak izi (18450,24 ton/ay) + Yeşil su ayak izi (132,97 ton/ay) = 31952,97 ton/ay

$SA_{i\text{şl.oper.genel}}$: 361 ton/ay

SA_{oper} : 31952,97 ton/ay + 361 ton/ay = 32313,97 ton/ay şeklinde hesaplanmıştır.

4.1.3. İşletmenin Pamuk Ürünü İçin Tedarik Zincirinin Su Ayak İzi ($SA_{i\text{şl.ted.zin.pamuk}}$)

Tedarik zinciri su ayak izi değerlendirilmesi pamuk ürünü için aşağıda yer alan [4.5] numaralı denklem kullanılarak yapılmıştır.

$$SA_{i\text{şl.ted.zin.}} = \sum_x (\sum_i (SA_{\text{ürün}}[x, i] \times I[x, i])) \quad (4.5)$$

$SA_{i\text{şl.ted.zin.}}$: Tedarik zinciri su ayak izi (Hacim / Zaman)

$SA_{\text{ürün}[x,i]}$: X kaynağından gelen girdi İ ürününün su ayak izi

$I[x,i]$: X kaynağından iş birimine gelen İ ürünün hacmi (Ürün birimleri/Zaman)

Müşteriden alınan bilgilere göre firmaya gelen pamuk Adana ve Kahramanmaraş illerinden tedarik edilmektedir. Cropwat 8.0 programı kullanılarak Adana ve Kahramanmaraş illerinde üretilen pamuğun mavi ve yeşil su ayak izi aşağıda yer alan [4.6], [4.7] ve [4.8] numaraları denklemlerle hesaplanmıştır (Alper, 2015).

$$\text{Mavi su ayak izi} = \frac{\text{Toplam Sulama İhtiyacı}}{\text{Verim}} \times 10 \quad (4.6)$$

$$\text{Yeşil Su Ayak İzi} = \frac{\text{Toplam Etkili Yağmur}}{\text{Verim}} \times 10 \quad (4.7)$$

$$\text{Verim} = \frac{\text{Üretim}}{\text{Ekili alan}} \quad (4.8)$$

Formülasyonda yer alan tüm veriler Cropwat 8.0, Climwat 2.0 programları kullanılarak ve TÜİK 2021 istatistik sonuçları yardımıyla elde edilmiştir. Çizelge 4.2’de yer alan veriler gerekli formüllerde kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

Çizelge 4.2. Pamuk ürünü için TÜİK 2021 istatistik verileri ve Cropwat 8.0 programı yardımı ile elde edilen sonuçlar

Veriler	Adana	Kahramanmaraş
Bitki Su Tüketimi (mm/ha)	820	1024,3
Sulama İhtiyacı (mm/ha)	680,9	1091
Toplam Etkili Yağmur (mm/ha)	149,1	122,6
Üretim (ton)	113 689	12 216
Ekili Alan (ha)	21 890,1	3808
Verim (ton/ha)	5,19	3,2

Yukarıdaki veriler doğrultusunda Adana’da üretilen pamuk için;

$$\text{Mavi Su Ayak İzi: } (680,9 \times 10) / 5,19 = 1311,94 \text{ m}^3 / \text{ton}$$

$$\text{Yeşil Su Ayak İzi: } (149,1 \times 10) / 5,19 = 287,28 \text{ m}^3 / \text{ton}$$

$$\text{Toplam: } 1311,94 + 287,28 = 1599,22 \text{ m}^3 / \text{ton}$$

Kahramanmaraş’ta üretilen pamuk için;

$$\text{Mavi Su Ayak İzi: } (1091 \times 10) / 3,2 = 3409,37 \text{ m}^3 / \text{ton}$$

$$\text{Yeşil Su Ayak İzi: } (122,6 \times 10) / 3,2 = 383,12 \text{ m}^3 / \text{ton}$$

$$\text{Toplam: } 3409,37 + 383,12 = 3792,49 \text{ m}^3 / \text{ton}$$

Tedarik edilen pamuğun illerden gelen miktarları bilinmediğinden birtakım varsayımlar yapılarak tedarik zinciri su ayak izi hesaplanmıştır. Firmaya giren pamuk miktarı 1541,5 kg/ay olarak belirlenmiştir. Pamuğun illerden tedarik edilen miktarlarına bağlı olarak [4.5] numaralı denkleme göre pamuk için toplam tedarik zinciri su ayak izi değerleri (1

ton = 1000 kg kabulüyle) Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Pamuğun tamamının bir ilden veya iki ilden yarı yarıya karşılanmasına bağlı olarak hesaplanan su ayak izleri önemli miktarlarda değişim göstermektedir.

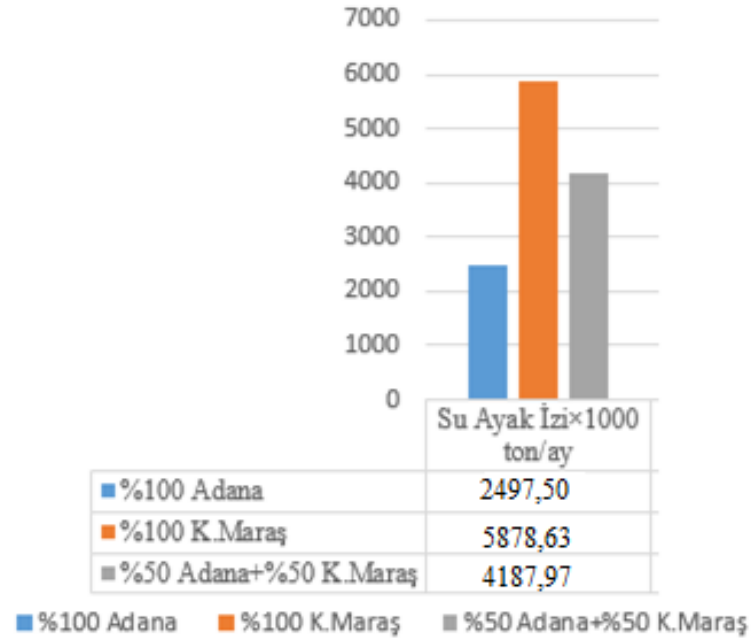
Çizelge 4.3. Pamuğun illerden tedarik edilen miktarlarına bağlı olarak tedarik zinciri su ayak izi sonuçları

Adana pamuğu için toplam su ayak izi	K.Maraş pamuğu için toplam su ayak izi	Firmaya gelen pamuk miktarı	Pamuğun %100'ü Adana'dan tedarik edildiğinde su ayak izi	Pamuğun %100'ü K.Maraş'tan tedarik edildiğinde su ayak izi	Pamuğun %50 Adana + %50 K.Maraş tedarik edildiğinde su ayak izi
1599,22 m ³ /ton	3792,49 m ³ /ton	1541,5 kg	2465,19 m ³ /ay	5846,12 m ³ /ay	4155,66 m ³ /ay

Tüm bu işlemlerin sonucunda Denklem 4.1'e göre ele alınan tekstil fabrikasının pamuk ürünü tedarik zinciri su ayak izine bağlı olarak su ayak izi değeri (1 m³=1000 L kabulüyle) hesaplanarak Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Pamuk ürününün tedarik zinciri su ayak izi verilerine göre firmanın toplam su ayak izi değerleri

% 100 Adana SA _{işl.ted.zin.}	2465190 ton/ay	SA _{işL.} = 2497503,97 ton/ay
% 100 K.Maraş SA _{işl.ted.zin.}	5846120 ton/ay	SA _{işL.} = 5878433,97 ton/ay
% 50 Adana + %50 K.Maraş SA _{işl.ted.zin.}	4155660 ton/ay	SA _{işL.} = 4187973,97 ton/ay



Şekil 4.1. Pamuğun tedarik edildiği illere göre firmanın su ayak izi değerleri

İllerden gelen pamuk miktarına göre değişen tedarik zinciri su ayak izine bağlı olarak işletmeye ait üç farklı su ayak izi değeri elde edilmiştir (Şekil 4.1). Elde edilen sonuçlar incelendiğinde Adana ilinde üretilen pamuk miktarına bağlı su ayak izi değerinin diğer illerden daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum Adana ilinde yetiştirilen pamuğun daha verimli olduğu sonucuyla ilişkilendirilmiştir. Ayrıca Bitkisel Üretim Genel Müdürlüğü'nün yürütmüş olduğu "İyi Tarım Uygulamaları" çalışmasının Adana ilinde de uygulanması, pamuk üretimindeki verimin yüksek olmasının en önemli nedenlerinden biridir. Başka bir çalışmada yapılan Türkiye illerinde üretilen pamuğun su ayak izi değerlendirme sonuçları incelendiğinde Adana ilinin en az su tüketimine ve en yüksek verime sahip il olduğu görülmüştür (Alper, 2015).

Akdeniz Bölgesinin en büyük ırmakları olan Seyhan ve Ceyhan, Adana toprakları içinden akmaktadır. İlin topraklarında yükselti ve yüzey şekillerine göre iklim şartları değişiklik göstermektedir. Dağlık kesimde yağışlar doğal olarak fazladır. Toroslardan sonra düz bir görünüm içinde hafif bir eğimle Akdeniz'e kadar inen Adana'nın bereketli toprakları günümüzde "Çukurova" olarak bilinmektedir ve tüm bu faktörler Adana ilinde verimli

pamuk üretiminin sebepleri arasındadır (Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2018).

4.1.4. İşletmenin Polyester Ürünü İçin Tedarik Zincirinin Su Ayak İzi (SA_{işl.ted.zin.polyester})

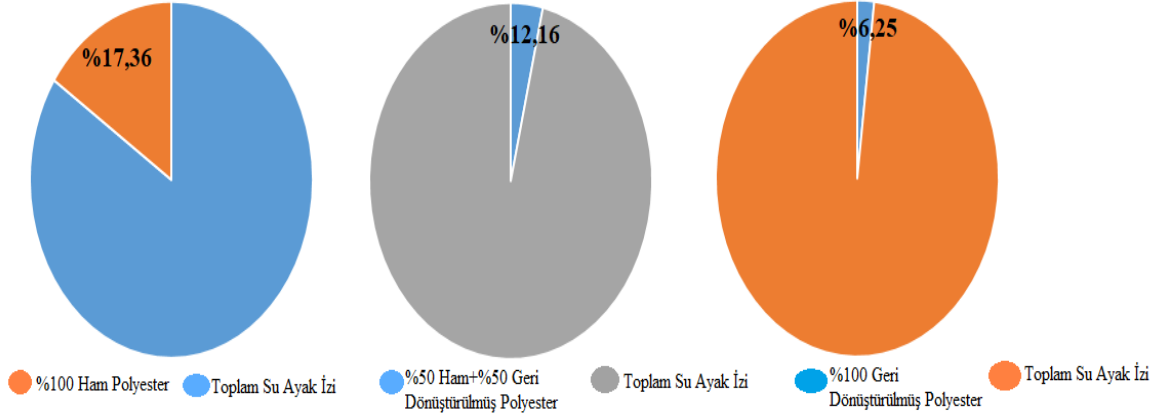
Fabrikaya ait tedarik zinciri su ayak izi değerlendirmesi polyester ürünü için de hesaplanmıştır. Hesaplamalarda ham ve geri dönüştürülmüş polyester için kabuller kullanılmıştır. Ham polyester üretimi için su ayak izi 5,98 m³ H₂O_{eq}/100 kg ve geri dönüştürülmüş polyester üretimi için su ayak izi 1,90 m³ H₂O_{eq}/100 kg şeklinde kabul edilmiştir (Qian ve diğ., 2021).

Ele alınan tesiste polyester boyama miktarı 114311,10 kg/ay'dır. Tedarik edilen ham ve geri dönüştürülmüş polyesterin miktarları tam olarak bilinmediğinden kabuller yapılarak tedarik zinciri su ayak izi hesaplanmıştır. Kullanılan kabuller ve üretim verileri kapsamında firmaya gelen polyester türünün miktarına göre su ayak izi değerleri Çizelge 4.5'te yer almaktadır.

Çizelge 4.5. Tedarik edilen polyester türüne göre firmanın tedarik zinciri su ayak izi miktarları

Polyester Kullanım Oranları	% 100 Ham Polyester	% 50 Ham+% 50 Geri Dönüştürülmüş Polyester	% 100 Geri Dönüştürülmüş Polyester
Su Ayak İzi (ton/ay)	6835,80	4503,85	2171,91

Elde edilen polyester ürünü tedarik zinciri su ayak izi sonuçlarına bağlı olarak fabrikanın su ayak izi değerleri, % 100 ham polyester için 39149,77 ton/ay, %50 ham + %50 geri dönüştürülmüş polyester için 36817,82 ton/ay, %100 geri dönüştürülmüş polyester için ise 34485,88 ton/ay olarak elde edilmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Tedarik edilen polyester türüne göre firmanın su ayak izi oranları

Yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere geri dönüştürülmüş polyester kullanımının artışıyla birlikte polyester türlerinin su ayak izi ve toplam su ayak izi oranlarında önemli bir azalma meydana gelmiştir. Yani tedarik edilen polyester türü, firmanın toplam su ayak izi değerini önemli oranda etkilemektedir.

Enerji kullanımı ve küresel ısınma potansiyeli açısından, geri dönüştürülmüş polyester elyafın, işlenmemiş polyester elyaftan daha düşük çevresel etkilere neden olduğu ortaya çıkmıştır (Shen ve diğ.,2011). Avusturya'daki bir araştırma grubunun yapmış olduğu karbon ayak izi çalışmasında geri dönüştürülmüş polyesterin karbon ayak izinin, saf polyestere kıyasla %79 daha az olduğu tespit edilmiştir (Qian ve diğ., 2021). Bu veri bizim elde ettiğimiz su ayak izi sonucu ile uyumludur. Bu çalışmada %100 ham polyester yerine %100 geri dönüştürülmüş polyester kullanıldığında su ayak izi değeri %68,23 oranında azalmıştır. Yapılan başka bir çalışmada polyester üretimi boyunca gri su ayak izi değerlendirmesi yapılmıştır ve ortaya çıkan atık sudaki Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) değerinin en şiddetli su ötrofikasyon etkisine sahip olduğu görülmüştür. Polyester kumaş üretiminin alkali soyma işleminin en büyük çevresel etkiye sahip proses olduğu sonucuna varılmıştır (Wang ve diğ., 2022).

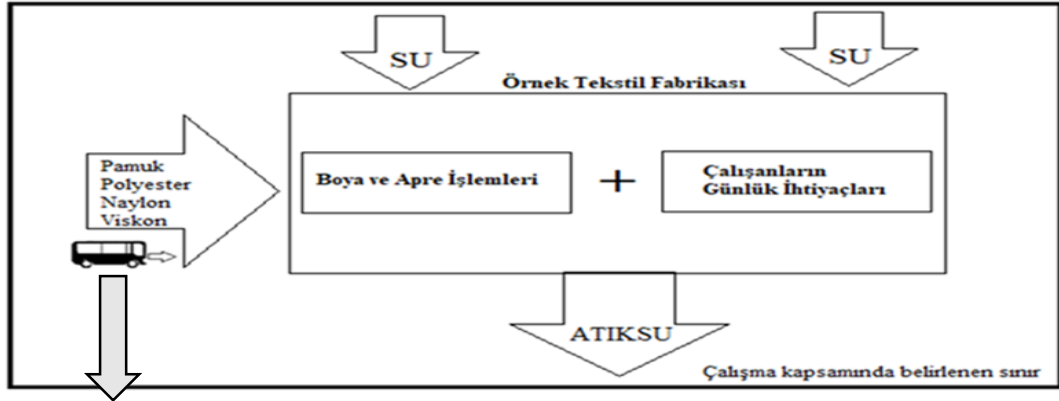
4.1.5. İşletmenin Naylon Ürünü İçin Tedarik Zincirinin Su Ayak İzi ($SA_{i\text{şl.ted.zin.naylon}}$)

Firmaya gelen ve işlem gören bir başka ürün ise naylon türü kumaşlardır. Bu kumaşların tedarik zincirinin su ayak izinin hesaplanmasında literatürden elde edilen kabuller

kullanılmıştır. Ortalama olarak, 1 kg naylon elyaf tekstil ürünü üretmek için yaklaşık 200 L su gereklidir (Thangavel K., Duraisamy G., 2014). Tesiste yaklaşık olarak ayda 9126,95 kg naylon işlem görmektedir. Bu veriler doğrultusunda naylon ürünü tedarik zinciri su ayak izi (1 ton=1 litre kabulüyle) 1825,39 ton/ay olarak elde edilmiştir.

4.1.6. İşletmenin Viskon Ürünü İçin Tedarik Zincirinin Su Ayak İzi ($SA_{i\text{şl.ted.zin.viskon}}$)

Tekstil fabrikasında işlem gören bir başka kumaş türü olan viskon kumaşlar için tedarik zinciri su ayak izinin hesaplanmasında da literatürden elde edilen kabuller kullanılmıştır. İncelenen çalışmalarda istatistiklere göre, bir ton viskon kesikli elyaf üretimi için yaklaşık 65 ton tatlı su kullanılmaktadır (Qian ve diğ., 2021). Tesiste ayda ortalama 4497,40 kg viskon türü kumaş işlem görmektedir. Bu veriler ışığında viskon türü kumaşın tedarik zinciri su ayak izi 292,33 ton/ay olarak hesaplanmıştır.



Pamuk Tedarik Zinciri Su Ayak Izi	
1..Alternatif	%50 Adana + %50 Kahramanmaraş → 4155660 ton/ay
2..Alternatif	%100 Adana → 2465190 ton/ay
3..Alternatif	%100 Kahramanmaraş → 5846120 ton/ay
Polyester Tedarik Zinciri Su Ayak Izi	
1..Alternatif	%50 Ham Polyester + %50 Geri Dönüştürülmüş Polyester → 4503,85 ton/ay
2..Alternatif	%100 Ham polyester → 6835,80 ton/ay
3..Alternatif	%100 Geri dönüştürülmüş polyester → 2171,91 ton/ay
Naylon Tedarik Zinciri Su Ayak Izi	
	Naylon → 1825,39 ton/ay
Viskon Tedarik Zinciri Su Ayak Izi	
	Viskon → 292,33 ton/ay

Şekil 4.3. Tesise ait su ayak izi değerlerinin türlerine göre sayısal verileri

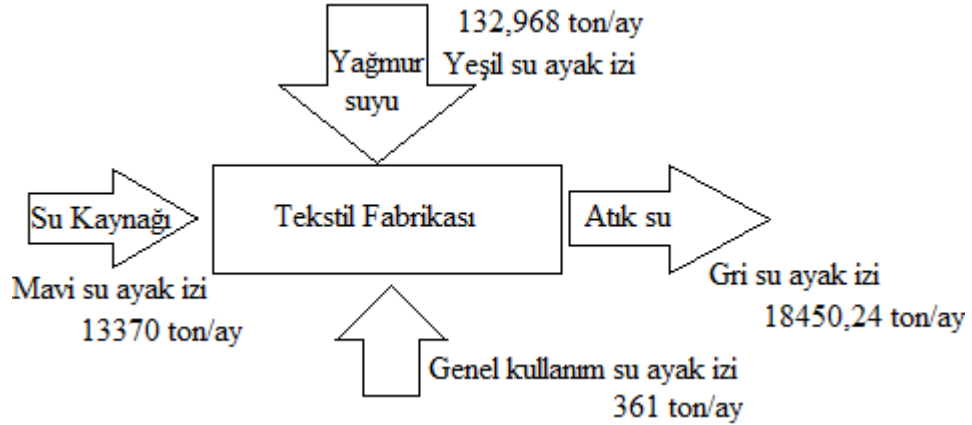
Günümüzde giyim insanın temel ihtiyaçları ile sınırlı kalmayıp artık bir yaşam standardı ve biçimi haline gelmiştir. Giyim ve tekstil ürünlerine olan bu talebin artışı, insanları çevre dostu tekstil materyalleri arayışına sürüklemektedir. Doğal veya yapay liflerden oluşan bütün tekstil malzemelerinin çevresel etkileri mevcuttur ve etki seviyeleri kullanılan materyale göre değişmektedir. Örneğin pamuk ve yün elyafların üretimi diğer elyaflara oranla daha fazla su ayak izine sahiptir. Aynı şekilde yapay liflerin çevresel etkileri doğal liflere göre daha fazladır. Bu yüzden tekstil hammaddelerinin geri dönüşümü ve yeniden kullanımı dünyamız ve çevremiz için çok önemlidir (Ranabhat, 2019).

Bir ürünün temel su ayak izi ne kadar düşükse, ürünün su kaynakları üzerindeki çevresel etkisinin de o kadar düşük olduğu anlamına gelmektedir (Zhu ve diğ., 2022). Çizelge 4.6 yer alan verilerden görüldüğü üzere pamuğun verimli üretildiği Adana ilinden tedarik edilmesi ve %100 geri dönüştürülmüş polyester miktarının arttırılmasıyla birlikte firmanın çevresel etkisini düşürmek mümkün olacaktır.

5. SONUÇ

Yapılan bu tez çalışmasında Bursa Organize Sanayi Bölgesi'nde yer alan, boya ve apreleme faaliyetleri sürdüren bir tekstil fabrikasına ait veriler kullanılarak su ayak izi hesaplanmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

Ele alınan tekstil fabrikasının operasyonel su ayak izi 32538,84 ton/ay, pamuk ürünü için tedarik zinciri su ayak izi, illerden gelen miktarların tamamının Adana ilinden, yarısının Adana yarısının Kahramanmaraş ilinden ve tamamının Kahramanmaraş ilinden geldiği kabulüne göre sırasıyla 2465190 ton/ay, 5846120 ton/ay ve 4155660 ton/ay olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.1. Firmaya ait su ayak izi türlerinin miktarları

Bu varsayımlara bağlı olarak firmaya ait üç adet su ayak izi verisi elde edilmiştir. Bunlar sırasıyla 2497503,97 ton/ay, 5878433,97 ton/ay ve 4187973,97 ton/ay şeklindedir.

- Tesiste işlem gören pamuğun tedarik edildiği il su ayak izini önemli derecede etkilemektedir. Örneğin Adana ili için firmanın su ayak izinin diğer verilere göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum Adana'da üretilen pamuğun daha verimli olması ile açıklanabilir.
- Polyester ürünü için tedarik zinciri su ayak izi, tesise gelen polyesterin türüne göre %100 ham polyester için 6835,80 ton/ay; %50 ham + %50 geri dönüştürülmüş polyester için 4503,85 ton/ay; %100 geri dönüştürülmüş polyester için 2171,91 ton/ay olarak hesaplanmıştır.

- Bu varsayımlara bağılı olarak firmaya ait üç farklı su ayak izi değeri elde edilmiştir. Bunlar sırasıyla 39149,77 ton/ay, 36817,82 ton/ay, 34485,88 ton/ay şeklindedir.
- %100 geri dönüştürülmüş polyester kullanıldığında toplam su ayak izinde %11,84 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Geri dönüştürülmüş polyester kullanımı arttıkça tedarik zinciri su ayak izi ve buna bağılı olarak toplam su ayak izi değeri azalma söz konusudur.
- Naylon ürünü için tedarik zinciri su ayak izi değeri 1825,39 ton/ay olarak elde edilmiştir.
- Viskon kumaş ürünü için tedarik zinciri su ayak izi değeri 292,33 ton/ay olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen verilere göre firmanın su ayak izinin azaltılması amacıyla müşteriden tedarik edilen pamuk kumaşın mümkün olduğunca Adana ilinden tedarik edilmesi ve tedarik edilen polyesterin mümkün olduğunca geri dönüştürülmüş polyester olarak tercih edilmesi öneri olarak sunulmuştur. Bu çalışmada elde edilen bulguların literatür ile uyumlu olduğu görülmüş ve geri dönüştürülmüş polyesterin, ham polyestere göre daha çevre dostu olduğu kanısına varılmıştır.

Ayrıca firmada, tesis içinde proseslerde kullanılan suyun makineleri soğutma amacıyla tekrar kullanılması firmaya %10-15 oranında su tasarrufu sağlayarak tesisin su ayak izini düşüren önemli bir uygulamadır. Yağmur suyu toplama sisteminde depolanan ve bunun %80 kullanılabilir yağmur suyu miktarı olarak kabul edilen sistemde yapılacak onarımlar ve yeniliklerle birlikte kullanılabilir yağmur suyu miktarı artırılabilir. Böylece varsayılan yağmur suyu miktarının firmaya aylık olarak kazandırdığı su tasarruf oranını %0,98'den daha yüksek seviyelere taşımak mümkündür.

Firmaya ait verilerle su kıtlığı ayak izi, su ötrofikasyon ayak izi ve su ekotoksisite ayak izi gibi değerlendirmelerle su yönetimi kapsamında daha ayrıntılı sonuçlar elde edilebilir. Su ayak izi yanında su ayak izi muhasebesi de yapılabilir. Bu değerler baz alınarak tekstil endüstrisinin, farklı ürünler arasındaki su miktarı ve kalitesindeki benzerlikleri ve farklılıkları tanınması ve endüstri içindeki ürünlerin dönüşümünün ve kalitesinin etkili bir

şekilde değerlendirilmesi yapılabilir. Ayrıca düzenleyici ve yönetimle ilgili önlem ve politikaların daha da geliştirilmesi konusunda bilgi oluşturabilecek bu değerlendirme çalışmaları gelecekteki su yönetimi ve araştırmaları için bir referans sağlayacaktır.

Özellikle tekstil ve hazır giyim endüstrileri gibi günlük su ihtiyacı fazla olan sektörler için ekolojik kaygının oluşması, üreticileri su tasarrufu ve doğal kaynakların korunması gibi çalışmalara yönlendirmiştir. Bu gibi çevresel boyutlar, mevcut küresel bağlamda sürdürülebilirliği sağlamanın tek yolu olduğundan, sürdürülebilir kalkınmanın tüm bilimsel girişimlerinde ekstra alan çizmektedir.

Farklı sürdürülebilir üretim yöntemleriyle firma içerisinde gerekli su miktarını azaltmak mümkündür. Örneğin, farklı yıkama sistemlerinin kullanımı, ram soğutma suyu ve yakma soğutma suyunun yeniden kullanımı sağlanabilir. Tesiste kullanılan su yumuşatma sistemleri ve iletim hatları gözden geçirilebilir. Bunun yanı sıra ağartma işlemi olarak, literatürde de yer bulmuş olan UV ışığı uygulamaları kullanılabilir. Renk giderme yöntemleri olarak da kimyasal yerine farklı metotlar kullanmak, hem su tüketimini hem de atık su içeriğindeki kirlilik yükünü, dolayısı ile su ayak izini azaltmaya yardımcı olacaktır.

KAYNAKLAR

- Akgül, T.S., Bekaroğlu, K.Ş. & Yiğit, N. (2019). Adsorpsiyon Ve İyon Değişimi Prosesleriyle İçme Sularından Doğal Organik Madde Giderimi, Derleme. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(3), 549-573. doi: 10.17482/uumfd.584151
- Alkaya, E., Demirer G.N., (2014). Sustainable textile production: a case study from a woven fabric manufacturing mill in Turkey, *Journal of Cleaner Production*, 65, 595-603. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.008>
- Alper, F. (2015). *Sürdürülebilirlik Kavramı İçerisinde Su Ayak İzi: Tekstil Sektörü Örneği* [Yüksek Lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi]. Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Aneirin, (2013, Kasım 15). Rainwater Harvesting, *Climate Culture Communications Lab*. <https://ccclab.info/2013/10/15/rainwater-harvesting/>
- Aniş, P., Eren, H.A. (2003). Poliester/Pamuk Karışımlarının Boyanması: Uygulamalar ve Yeni Yaklaşımlar, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 8(1), 131-139.
- Anonim, (2021, Ağustos 31). Kumaş kasar işlemi. <https://www.vizyonapre.com/hizmetlerimiz/kumas-kasar/>
- Anonim, (2018, Mart 30). Su ayak izi büyüklüğü. <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/su-ayak-iziniz-ne-kadar-buyuk>
- Anonim, (2012). Su ayak izi. <https://waterfootprint.org/en/water-footprint/>
- Anonim, (2009, Şubat 4). Atık su arıtma yöntemleri. <http://www1.mmo.org.tr>
- Anonim, (2019, Temmuz 10). Adana ili toprak türü. <http://www.yuregir.gov.tr/cografi>
- Anonim, (2023, Temmuz 9). Climwat programı tanıtımı. <https://climwat-for-cropwat.software.informer.com/2.0/>
- Anonim, (2023, Temmuz 6). Cropwat programı tanıtımı. <https://cropwat.informer.com/%C4%B0ndir/>
- Ardalı, Y., (2019, Eylül). Kimyasal Oksidasyon. <https://avys.omu.edu.tr>
- Baburşah, S. (2004). *Tekstil Endüstrisi Atıksularının Geri Kazanımı ve Yeniden Kullanılması* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı.

- Beneks Makine, (2019, Eylül 30). Balon Sıkma Makinesinin Teknik Özellikleri. [http://www.beneks.com/makineler/balon-sikma makinesi](http://www.beneks.com/makineler/balon-sikma-makinesi)
- Benli, H., Bahtiyari, İ.M. (2016). Pamuklu Kumaşların Ozon-Hidrojen Peroksit Kombinasyonu ile Ağartılması ve Doğal Boyalar ile Renklendirilmesi, *Journal of Textiles and Engineer*, 23(103), 189-196. <http://dx.doi.org/10.7216/1300759920162310304>
- Boix, M., Montastruc, L., Azzaro-Pantel, C. & Domenech, S. (2015). Optimization Methods Applied to The Design of Eco-Industrial Parks: A Literature Review, *Journal of Cleaner Production*, 87, 303-317. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.032>.
- Boulay, A.M., Hoekstra, A.Y. & Vionnet, S. (2023). Complementarities of Water-Focused Life Cycle Assessment and Water Footprint Assessment, *Environmental Science & Technology*, 47, 11926-11927. doi: [dx.doi.org/10.1021/es403928f](https://doi.org/10.1021/es403928f)
- Bryan, G., Chowdhury, S., Mobarak, A.M. (2014). Underinvestment in a Profitable Technology: The Case of Seasonal Migration in Bangladesh, *Journal of The Econometric Society*, 82(5), 1671-1748, <https://doi.org/10.3982/ECTA10489>
- Chen, L., Wang, L., Wu, X. & Ding, X. (2017). A process-level water conservation and pollution control performance evaluation tool of cleaner production technology in textile industry, *Journal of Cleaner Production*, 143, 1137-1143. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.006
- Çakmak, B. (2017, Aralık 29). *Su Ayak İzi* [PowerPoint Slayt]. <https://acikders.ankara.edu.tr>
- 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, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Çetin, S. (1995). *Bir Tekstil Fabrikası Endüstriyel Atıksu Arıtma Tesisinin İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi]. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, (2018). *Adana İlinin Tanıtımı*, Adana. <https://adana.csb.gov.tr/ilimizi-taniyalim-i-1222>
- Dağlı, S., Duhaçacı B.T., Şık E., Uyuşur B. & Partal R. (2018). *Tekstil Ürünlerinin Bitirilmesi Kaynak Verimliliği Rehberi*, Türkiye Cumhuriyeti Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Ankara.
- Doğan, Z. (2011). *Tekstil Sektöründe Atık Ekolojisi Uygulamaları*, 1. *Uluslararası Moda ve Tekstil Tasarımı Sempozyumu*, Antalya, 24-25.

- Duru, M.O. ve Koç, İ. (2021). Sürdürülebilir Yapı Üretiminde Yaşam Döngüsü Değerlendirme (LCA) Hesaplamalarının Yapı Bilgi Modellemesi (Bim) İle Entegrasyonuna Yönelik Bir Araştırma, *Sanat ve Tasarım Araştırmaları Dergisi*, 2(3), 107-121.
- Eren, F. (2013). *İyon Değişimi Yöntemi İle Sulu Çözeltilerden ve Atıksudan Sülfat Gideriminin İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi]. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Eşkin, P., (2018, Haziran 17). Sanal Su Nedir? Globalde ve Türkiye’de Sanal Su Durumu. *Ekolojist.net*. <https://ekolojist.net/sanal-su-nedir/>
- Gerbens-Leenes P., Hoekstra A.Y., (2018). The Blue and Grey Water Footprint of Construction Materials: Steel, Cement and Glass, *Water Resources and Industry*, 19, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2017.11.002>
- Guerra-Rodríguez, S., Rodríguez, E., Singh, D. N. & Rodríguez-Chueca, J. (2018). Assessment of sulfate radical-based advanced oxidation processes for water and wastewater treatment, A Review. *Water*, 10(12), 1828-1847. doi: 10.3390/w10121828
- Halis, (2020, Mart 15). Kumaşlara Sanfor İşlemi. *Tekstil Bilgi*. <https://tekstilbilgi.net/kumaslara-sanfor-islemi.html>
- Haque, S., Nahar, N., Sayem, S. (2021). Industrial Water Management and Sustainability: Development of SIWP Tool for Textile Industries of Bangladesh, *Water Resources and Industry*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2021.100145>
- Hoekstra, A.Y.. (2009). Human Appropriation of Natural Capital: A Comparison of Ecological Footprint and Water Footprint Analysis, *Ecological Economics*, 68(7), 1963-1974. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.06.021>
- Hoekstra, A.Y. (2015). The Water Footprint of Industry, Assessing and Measuring Environmental Impact and Sustainability, Butterworth-Heinemann, *Chapter 7*, 221-254. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799968-5.00007-5>
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M. & Mekonnen, M.M. (2011). The Water Footprint Assessment Manual Setting the Global Standard, *Earthscan*, 38-58. <https://doi.org/10.1007/978-981-33-4377-1>
- Hogeboom, R.J. (2020). The Water Footprint Concept and Water’s Grand Environmental Challenges, *One Earth Journal*, 218-222. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.02.010>
- Hu, W., Guo, Y., Tian, J. & Chen, L. (2020). Energy And Water Saving Potentials in Industrial Parks by An Infrastructure-Integrated Symbiotic Model, *Resources Conservation and Recycling*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104992>

- Khan, S., Malik, A. (2013, Ocak” 1). Environmental and Health Effects of Textile Industry Wastewater, *Environmental Deterioration and Human Health*, 55-71.
- Kocaer, F.O., Alkan, U. (2002). Boyar Madde İçeren Tekstil Atıksularının Aritim Alternatifleri, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 7(1), 47-55.
- Li, Q., Zhao, X., Quan, H. & Zhau, Y., (2022). Establishing an energy-saving scouring/bleaching one-step process for cotton/spandex fabric using UVA-assisted irradiation, *Royal Society of Chemistry*, 12, 9404-9415. doi: 10.1039/d2ra00659f
- Li, X., Ren, J., Wu, Z., Wu, X. & Ding, X. (2021). Development of a novel process-level water footprint assessment for textile production based on modularity, *Journal of Cleaner Production*, 291, 125884. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.125884 0959-6526
- Lyu, Y., Liu, Y., Guo, Y., Tian, J. & Chen, L. (2021). Managing Water Sustainability in Textile Industry Through Adaptive Multiple Stakeholder Collaboration, *Water Research*, 205. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117655>
- Marwari, R., Khan, T.I. (2012). Effect of textile waste water on tomato plant, *Lycopersicon Esculentum*, *Journal of Environmental Biology*, 33, 849-854.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü, (2022). İllere Ait Mevsim Normalleri İstatistik Verileri, Ankara. <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=BURSA>
- Milli Eğitim Bakanlığı, (2018). Temel Bitim İşlemleri (Apre), *Tekstil Teknolojisi*, Ankara.
- Muratoğlu, A., (2020). Assessment of Wheat’s Water Footprint and Virtual Water Trade: A Case Study for Turkey, *Ecological Processes*, 9(13), 1-16. <https://doi.org/10.1186/s13717-020-0217-1>
- Muthu, S.S. (2022). *Sustainable Approaches in Textiles and Fashion Manufacturing Processes and Chemicals*, Springer, 195, <https://doi.org/10.1007/978-981-19-0538-4>
- Nalbandan, R.B., Delavar, M., Abbasi, H. & Zaghiyan, M.R., (2023). Model-Based Water Footprint Accounting Framework to Evaluate New Water Management Policies, *Journal of Cleaner Production*, 382. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135220>
- Namal, O.Ö. (2017). Tekstil Endüstrisi Atıksularının Arıtımında Kullanılan Proseslerin Araştırılması, *Nevşehir Bilim ve Teknoloji*, 6, 388-396. doi: 10.17100/nevbiltek.322169

- Neto, G., Correia, J., Silva, P., Sanches, A. & Lucato, W. (2019). Cleaner Production in the textile industry and its relationship to sustainable development goals, *Journal of Cleaner Production*, 228, 1514-1525. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.334>
- Okafor, C., Madu, C., Ajaero, C., Ibekwe, J. & Nzekwe, C. (2021). Sustainable Management of Textile and Clothing, *Clean Technologies and Recycling*, 1(1), 70–87. doi: 10.3934/ctr.2021004
- Ögenler, O., Okuyaz, S. (2017). Türkiye’de Suyun Durumu Hakkında Kısa Bir Değerlendirme, *Lokman Hekim Dergisi*, 7(3), 178-186.
- Öztürk, K. (2004). Energy usage and cost in textile industry: A case study for Turkey, *Energy*, 30(2005), 2424-2446. doi:10.1016/j.energy.2004.11.014
- Pegram, G., Conyngham, S., Aksoy, A., Dıvrak, B.B. & Öztok, D. (2014). Türkiye’nin Su Ayak İzi Raporu: Su, Üretim ve Uluslararası Ticaret İlişkisi, *WWF Türkiye*.
- Qian, W., Zhu, J., Chen, F., Ji, X., Wang, X. & Wang, L. (2021). Water footprint assessment of viscose staple fiber garments, *Water Supply Journal*, 21(5), 2217-2232. doi: 10.2166/ws.2021.040
- Ranabhat, R. (2019). *Environmental Impact of Textile Fibers* [Lisans Tezi, Tampere Üniversitesi]. Enerji ve Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Rather, L.J., Jameel, S., Dar, O.A., Ganie, S.A., Bhat, K.A. & Mohammad, F. (2019). Advances in the sustainable technologies for water conservation in textile industries, *Water in Textiles and Fashion*, 175-194. doi.org/10.1016/B978-0-08-102633-5.00010-5
- Sandu, M.A., Virsta, A. (2021). The Water Footprint In Context Of Circular Economy, *AgroLife Scientific Journal*, 10 (2), 170-177.
- Schmutz, M., Hischier, R. & Som, C. (2021). Factors Allowing Users to Influence the Environmental Performance of Their T-Shirt, *Sustainability*, 13. <https://doi.org/10.3390/su13052498>
- Shaikh, M.A., (2009). *Water Conservation in Textile Industry*, [SFDAC-Hamdard Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Fakültesi Ders Notları], 48-51.
- Shen, L, Worrell, E & Patel, MK. (2010). Open-loop recycling: A LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling Resour, *Conservation and Recycling*, 55(1), 34–52. doi:10.1016/j.resconrec.2010.06.014
- Tamtürk, F.H. (2007). *Pamuklu Dokuma Kumaşlara Uygulanan Seçilmiş Ön Terbiye İşlemlerinin Kumaş Performansına Etkisi* [Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi]. Fen Bilimleri Enstitüsü. Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı.

- Tarım ve Orman Bakanlığı, (2023). Kahramanmaraş ili toprak türü. <https://kahramanmaras.tarimorman.gov.tr>
- Taşdemir, T., Erdem, V. (2010). Flokülasyon Yöntemi İle Atıksudan Askıda Tanelerin Giderimi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(1), 109-121.
- Tekstil Sayfası, (2019, Ocak 18). Ramöz Makinesi Nedir, Ne İşe Yarar, <https://tekstilsayfasi.blogspot.com/2019/01/ramoz-ram-makinesi.html>
- Thangavel, K., Duraisamy, G. (2014). Environmental Analysis of Textile Value Chain: An Overview, *ResearchGate*, 153-188. doi: 10.1007/978-981-287-110-7_6
- Türkiye İstatistik Kurumu, (2021). Adana ve Kahramanmaraş İllerinde Pamuk Üretimi İstatistikleri, Türkiye İstatistik Kurumu, Ankara. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Bitkisel-Uretim-Istatistikleri-2022-45504>
- Türkiye Sınai Kalkınma Bankası, (2018, Mart 21). Sürdürülebilir kalkınma. <http://cevreciyiz.com/makale-detay/1251/su-ayak-izi-nedir>
- Wang, K., Wang, X., Feng, X. & Wang, L. (2022). Improved Gray Water Footprint Calculation and Assessment Method for Polyester Fabric Production, *Journal of Research*, 9(2), 74-80. <https://doi.org/10.1177/2472344422108145>
- Woldesenbet, G.W., Kebede, A. (2021). Multi-Stakeholder Collaboration for The Governance of Water Supply in Wolkite, Ethiopia, *Environment Development and Sustainability*, 7728-7755. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-020-00943-3>
- Yıldız, S., Namal, O.Ö., Mehmet, Ç. (2013). Atık Su Aritma Teknolojilerindeki Tarihsel Gelişimler, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 1(1), 55-67.
- Zhu, L., Chen, B., Liu, J., Chen, S., Zhang, Y., & Wang, X. (2022). Assessing Baseline Water Footprints of Natural Fiber Textile Products in China, *Journal of Cleaner Production*, 379. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134747>
- Zhu, J., Yang, Y., Li, Y., Xu, P., Wang, L. (2020). Water Footprint Calculation and Assessment of Viscose Textile, *Industria Textila*, 71(1), 33-40. doi: 10.35530/IT.071.01.1642
- Zufiqar, A., Arooj, F., Aftab, M., Rashid, M., Luqman, M., Kashif, S. & Naseer, R., (2023). A Sustainable Approach to Dyed Cotton Fabric Stripping Using Ozone, *Sustainability*, 15, 7467. <https://doi.org/10.3390/su15097467>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Yasemin BAŞKILIÇ
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa / 23. 04. 1995
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Turgut Alp Anadolu Lisesi (2009-2013)
Lisans : Uludağ Üniversitesi Çevre Mühendisliği (2013-2018)
Yüksek Lisans :

Çalıştığı Kurum/Kurumlar :

İletişim (e-posta) : yasemin.ozkul.14@gmail.com

Yayımları : Başkılıç., Y. 2023. Sürdürülebilir Su Yönetimi
Kapsamında Tekstil Endüstrisinde Su Ayak İzi
Değerlendirmesi: Polyester Kumaş Hattı. 3. Uluslararası
Antalya Bilimsel Araştırmalar ve Yenilikçi Çalışmalar
Kongresi, 13-14 Şubat, 2023, Antalya, Türkiye.