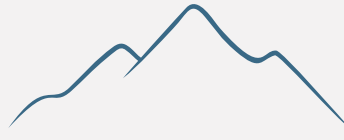


2026



ERZURUM

RAPORU

SU AYNAKIZI



MEHMET
Sekmen
ERZURUM BÜYÜKŞEHİR BELEDİYE BAŞKANI

İKLİMEBB

ERZURUM

SU AYAKIZI RAPORU



MEHMET
Sekmen
ERZURUM BÜYÜKŞEHİR BELEDİYE BAŞKANI

İKLİM EBB



ERZURUM BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİ
Proje Ekibi

_____ **Murat ALTUNDAĞ**

Genel Sekreter Yardımcısı

_____ **Fatih ÇARIKCIOĞLU**

İklim Değişikliği ve Sıfır Atık Daire Başkanı

_____ **Ömer Lütfü AYDIN**

Deprem ve Zemin İnceleme Şube Müdürü

_____ **İbrahim Hakkı KARAOSMANOĞLU**

İklim Değişikliği ve Sıfır Atık Şube Müdürü

_____ **Mahmut YILDIRIM**

Yüksek Şehir Plancısı

_____ **Mücahid HAKSEVER**

Coğrafya Uzmanı

_____ **Ayşenur KARAKAŞ**

Çevre Yüksek Mühendisi



ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Proje Ekibi

_____ **Prof. Dr. Alper Erdem YILMAZ**

Mühendislik Fakültesi

- Çevre Teknolojisi Ana Bilim Dalı

©Bu raporun tüm hakları saklıdır; Erzurum Büyükşehir Belediyesi, İklim Değişikliği ve Sıfır Atık Daire Başkanlığı izni olmadan kopyalanamaz ve yayınlanamaz.



ERZURUM 2026

SU AYAKIZI RAPORU

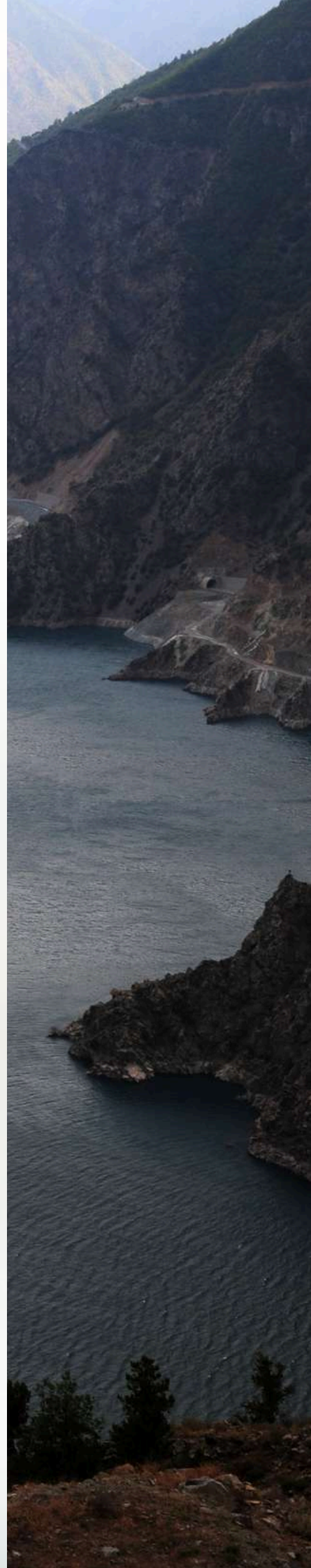


MEHMET
Sekmen
ERZURUM BÜYÜKŞEHİR BELEDİYE BAŞKANI

ERZURUM'A
Değer



İKLİM EBB





Kıymetli Dostlar,

Su, yalnızca günlük yaşamın vazgeçilmez bir unsuru değil; tarımdan sanayiye, kentleşmeden ekosistemlerin devamlılığına kadar tüm üretim ve yaşam döngüsünün temelini oluşturan stratejik bir kaynaktır. Günümüzde iklim değişikliğinin etkileriyle birlikte artan kuraklık riski, düzensiz yağışlar ve su kaynakları üzerindeki baskı, şehirlerin suya bakışını yeniden düşünmesini zorunlu hale getirmiştir. Bu durum, özellikle karasal iklim koşullarına sahip ve üretim yapısı büyük ölçüde tarım ve hayvancılığa dayanan kentler açısından daha da önemlidir.

Erzurum; sahip olduğu doğal kaynaklar, geniş tarım alanları ve gelişen kentsel yapısı ile suyun planlı, dengeli ve sürdürülebilir biçimde yönetilmesi gereken şehirlerimizin başında gelmektedir. Bu kapsamda, suyun nerede, ne kadar ve hangi faaliyetler yoluyla tüketildiğinin bilimsel verilerle ortaya konulması; sağlıklı karar alma süreçlerinin en önemli dayanağını oluşturmaktadır.

Hazırlanan Erzurum Şehri Su Ayak İzi Değerlendirme Raporu, bu ihtiyaca cevap verecek nitelikte, kapsamlı ve bütüncül bir çalışma olarak ortaya konulmuştur.

Bu rapor ile Erzurum ilinde tarımsal üretim, hayvancılık faaliyetleri, evsel kullanım ve endüstriyel süreçler çerçevesinde su kaynakları üzerindeki baskılar ayrıntılı biçimde ele alınmıştır. Çalışma, yalnızca doğrudan su kullanımını değil; üretim ve tüketim süreçlerine gömülü olan dolaylı su kullanımlarını da dikkate alarak ilin gerçek su ayak izi profilini ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, özellikle tarımsal faaliyetler ve yem üretiminin su ayak izi üzerindeki belirleyici rolünü açıkça göstermektedir. Bunun yanı sıra, günlük yaşamda fark edilmeyen sanal su tüketiminin, toplam su yükü içindeki payının ne denli yüksek olduğu bu çalışma ile somut verilerle ortaya konulmuştur.

İklim değişikliğinin etkilerinin giderek daha belirgin hale geldiği günümüzde, mevcut su kaynaklarının verimli kullanılması kadar korunması ve gelecek nesillere aktarılması da büyük önem taşımaktadır. Tarımsal sulamada verimliliğin artırılması, suya duyarlı ürün desenlerinin teşvik edilmesi, hayvancılık faaliyetlerinde yem kaynaklı su tüketiminin azaltılması ve evsel tüketim alışkanlıklarının gözden geçirilmesi, sürdürülebilir su yönetiminin temel unsurları olarak öne çıkmaktadır.

Aynı şekilde, endüstriyel faaliyetlerde su kalitesinin korunmasına yönelik uygulamaların güçlendirilmesi de çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik önemdedir.

Erzurum Büyükşehir Belediyesi olarak; doğal kaynakların korunmasını, iklim değişikliğine uyumlu planlama anlayışını ve çevresel sürdürülebilirliği kent yönetiminin temel öncelikleri arasında görmekteyiz. Bu raporun; stratejik planlama süreçlerine, sektörel politika geliştirme çalışmalarına ve yerel ölçekte uygulanacak su yönetimi stratejilerine güçlü bir bilimsel zemin sunacağına inanıyorum. Aynı zamanda bu çalışmanın, suyun yalnızca teknik bir konu değil; toplumsal bir sorumluluk alanı olduğuna dair farkındalığı artırmasını temenni ediyorum.

Bu değerli çalışmanın hazırlanmasında emeği geçen çalışma arkadaşlarımıza ve Prof. Dr. Alper Erdem YILMAZ'a teşekkür ediyorum; Erzurum'un su kaynaklarının korunması ve sürdürülebilir bir gelecek için yol gösterici bir başvuru kaynağı olmasını diliyorum.

İÇİNDEKİLER

LİSTESİ



08 | YÖNETİCİ ÖZETİ

16 | 1. BÖLÜM: GİRİŞ

- 1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı
- 1.2. Erzurum İli'nin Coğrafi ve İklimsel Özellikleri
- 1.3. Su Kaynaklarının Bölgesel Önemi

19 | 2. BÖLÜM: KURAMSAL ÇERÇEVE

- 2.1. Su Ayak İzi Kavramı
- 2.2. Su Ayak İzinin Bileşenleri
 - 2.2.1. Yeşil Su Ayak İzi
 - 2.2.2. Mavi Su Ayak İzi
 - 2.2.3. Gri Su Ayak İzi
- 2.3. Su Ayak İzi ve Sürdürülebilir Su Yönetimi

27 | 3. BÖLÜM: YÖNTEM VE METODOLOJİ

- 3.1. Su Ayak İzi Metodolojisinin Temelleri
- 3.2. Tarımsal Su Ayak İzi Hesaplamaları
- 3.3. Yerleşim Alanlarının Su Ayak İzi Metodolojisi
- 3.4. Endüstriyel Su Ayak İzi Metodolojisi
- 3.5. Erzurum İli Toplam Su Ayak İzi
- 3.6. Metodolojik Varsayımlar ve Sınırlar





33

4. BÖLÜM: BULGULAR

- 4.1. Tarımsal Faaliyetlerin Su Ayak İzi
 - 4.1.1. Yeşil Su Ayak İzi
 - 4.1.2. Mavi Su Ayak İzi
 - 4.1.3. Tarımsal Sanal Su Ayak İzi
 - 4.1.4. Hayvansal Faaliyetlerin Su Ayak İzi
- 4.2. Yerleşim Alanlarının Su Ayak İzi,
 - 4.2.1. Yerleşim Alanlarında Doğrudan Su Tüketimine Bağlı Mavi Su Ayak İzi
 - 4.2.2. Yerleşim Alanların Gri Su Ayak İzi
 - 4.2.3. Yerleşim Alanlarının Sanal Su Ayak İzi
- 4.3. Endüstriyel Faaliyetlerin Su Ayak İzi
 - 4.3.1. Endüstriyel Faaliyetlerin Mavi Su Ayak İzi
 - 4.3.2. Endüstriyel Faaliyetlerin Gri Su Ayak İzi

58

5. BÖLÜM: SU AYAK İZİ DEĞERLENDİRMESİ

- 5.1. Erzurum İli Su Ayak İzi Sonuçlarının Değerlendirilmesi
 - 5.1.1. Erzurum İlinin Toplam Su Ayak İzi Bileşenleri
- 5.2. Water Footprint Network Yaklaşımına Göre Erzurum'un Profilinin Temel Özellikleri
- 5.3. WFN Literatürü ile Mevcut Sonuçların Karşılaştırılması

66

6. BÖLÜM: SONUÇ VE ÖNERİLER

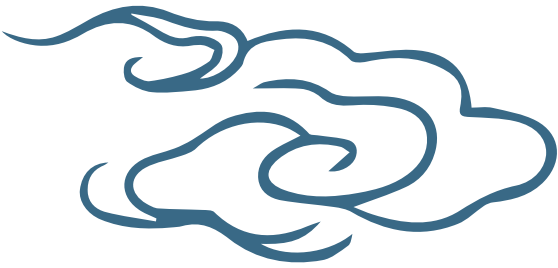
72

7. BÖLÜM: KAYNAKÇA VE EKLER



Tortum Şelalesi

YÖNETİCİ ÖZETİ





Yönetici Özeti

Bu çalışma, Erzurum ilinin tarımsal, hayvansal, evsel ve endüstriyel su ayak izi bileşenlerini uluslararası standartlarda değerlendirmek amacıyla Water Footprint Network (WFN) metodolojisi çerçevesinde hazırlanmıştır. Analizde, üretim ve tüketim temelli hesaplama yaklaşımları birlikte ele alınmış; tarımsal üretim için FAO CROPWAT/CLIMWAT iklim ve bitki su tüketimi modelleri ile Türkiye’de sulama yönetimi amacıyla kullanılan SUET (Sulama Yönetimi ve Bitki Su Tüketimi Sistemi) birlikte kullanılmıştır. Evsel ve endüstriyel su ayak izi bileşenleri ise WFN’in tüketim temelli metodolojisine göre değerlendirilmiştir.

Çalışmadan elde edilen temel bulgulara göre, tarımsal üretimin toplam su ayak izi 916,4 milyon m³/yıl olup bunun %52’si yeşil su (479,4 milyon m³/yıl), %48’i mavi su (437,0 milyon m³/yıl) olarak hesaplanmıştır. Tarımsal üretimde yeşil ve mavi su ayak izi bileşenlerinin birbirine yakın büyüklükte olması, ilin hem yağışa dayalı hem de sulama gerektiren karma bir tarımsal yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Hayvansal üretimden kaynaklanan toplam su ayak izi içinde yem kaynaklı bileşen baskındır. Bu kapsamda yem su ayak izi 1.117 milyar m³/yıl, içme suyu 28,0 milyon m³/yıl ve servis suyu 4,2 milyon m³/yıl olarak hesaplanmıştır.

Hayvansal üretimde su tüketiminin %95’ten fazlasının yem kaynaklı sanal suya dayanması, Erzurum’un hayvancılık ağırlıklı tarımsal yapısının su kullanım dinamikleri üzerindeki güçlü etkisini göstermektedir.

Evsel su ayak izi bileşenleri incelendiğinde; evsel mavi su ayak izi 92,9 milyon m³/yıl, evsel gri su ayak izi 226,5 milyon m³/yıl ve evsel sanal su 1.346 milyar m³/yıl olarak belirlenmiştir. Evsel sanal su miktarının oldukça yüksek olması, gıda tüketim alışkanlıklarının su kaynakları üzerindeki dolaylı etkisini açık biçimde ortaya koymaktadır. Evsel gri su ayak izinin BOD değerlerine göre belirlenmiş olması, yerel atıksu karakterizasyonu ile uyumlu olup kentsel altyapının arıtma verimliliği ile doğrudan ilişkilidir.

Endüstriyel su ayak izi toplam içinde nispeten daha düşük bir paya sahip olmakla birlikte, mavi su ayak izi 6,48 milyon m³/yıl, gri su ayak izi ise 63,38 milyon m³/yıl olarak hesaplanmıştır. Bazı sektörlerde gri su ayak izinin mavi suya göre daha yüksek olması, atıksu kalitesi ve kirletici yüklerin sektör bazında önem arz ettiğini göstermektedir.



ÇALIŞMADAN ELDE EDİLEN TEMEL BULGULAR:

1

1. Tarımsal üretimin toplam su ayak izi 916.4 milyon m³/yıl olup bunun



- %52'si yeşil su (479.4 milyon m³/yıl),
- %48'i mavi su (437.0 milyon m³/yıl) olarak hesaplanmıştır.

2

2. Hayvansal üretimden kaynaklanan toplam su ayak izi içinde yem kaynaklı bileşen baskındır:



- Yem su ayak izi: 1.117 milyar m³/yıl
- İçme suyu: 28.0 milyon m³/yıl
- Servis suyu: 4.2 milyon m³/yıl

3

3. Evsel su ayak izi bileşenleri:



- Evsel mavi su : 82.9 milyon m³/yıl
- Evsel gri su : 276.5 milyon m³/yıl
- Evsel sanal su : 1.346 milyar m³/yıl

4

4. Endüstriyel su ayak izi:



- Mavi su : 6.48 milyon m³/yıl
- Gri su : 63.38 milyon m³/yıl

Genel olarak değerlendirildiğinde, Erzurum ilinin su ayak izi profilinin büyük ölçüde tarımsal üretim, yem tüketimi ve evsel sanal su bileşenleri tarafından şekillendiği görülmektedir. Bu bulgular; sürdürülebilir su yönetimi açısından tarımsal sulama verimliliğinin artırılması, yem kaynaklı sanal su yükünün azaltılması, evsel sanal suyu etkileyen tüketim alışkanlıklarının iyileştirilmesi ve endüstriyel kirletici yüklerinin optimize edilmesi konularında sektörel önceliklendirme yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışma, Erzurum ilinde hem doğrudan su kullanımı hem de sanal su tüketimi bileşenlerini bütüncül bir çerçevede ele alarak, su kaynaklarının korunması ve sürdürülebilir kullanımına yönelik planlama ve karar alma süreçleri için güçlü bir bilimsel altyapı sunmaktadır.



■ PALANDÖKEN DAĞI



■ EYJDER 3200





01

Giriş

02

Kuramsal
Çerçeve

03

Materyal ve
Yöntem

04

Bulgular





05

**Su Ayak İzi
Değerlendirmesi**

06

**Sonuç ve
Öneriler**

07

**Kaynakça ve
Ekler**

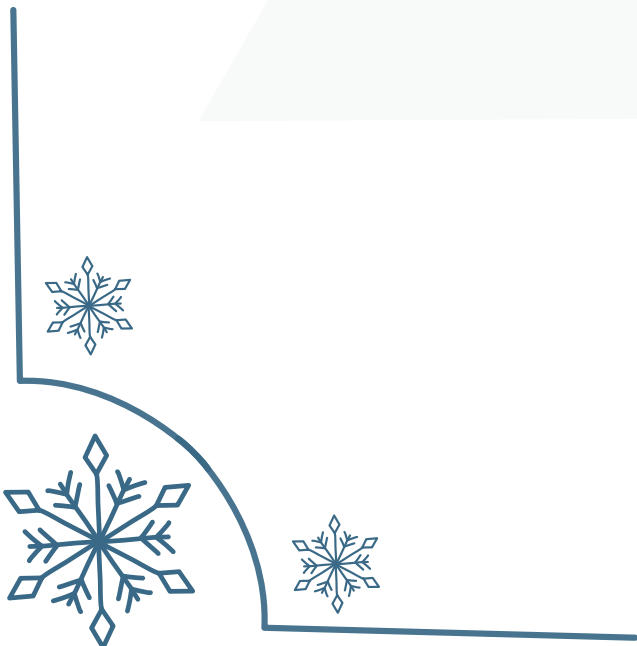




Aziziye Tabiyaları



GİRİŞ





1.GİRİŞ

1.1 ÇALIŞMANIN AMAÇ VE KAPSAMI

Günümüzde küresel iklim değişikliği, hidrolojik döngü üzerinde derin ve büyük ölçüde geri döndürülemez etkiler yaratmakta; bu etkiler, su kaynaklarının hem nicelik hem de nitelik açısından sürdürülebilirliğini ciddi biçimde tehdit etmektedir. Artan sıcaklıklar, düzensizleşen yağış rejimleri, kuraklık sıklığındaki artış ve buharlaşma kayıpları, özellikle karasal iklim özellikleri gösteren bölgelerde su kaynakları üzerindeki baskıyı her geçen gün artırmaktadır. Sosyo-ekonomik yapısı büyük ölçüde tarım ve hayvancılığa dayanan Erzurum ili için su, yalnızca temel bir yaşam kaynağı değil; aynı zamanda bölgesel kalkınmanın, gıda güvenliğinin ve ekosistem bütünlüğünün en stratejik bileşenlerinden biridir.

Bu çalışma, Erzurum'un mevcut su potansiyelini ve kullanım dinamiklerini geleneksel su bütçesi yaklaşımlarının ötesine taşıyarak "Su Ayak İzi" metodolojisi çerçevesinde ele alması bakımından özgün ve kritik bir nitelik taşımaktadır.

Su ayak izi yaklaşımı; yalnızca doğrudan su çekimlerini değil, üretim ve tüketim süreçlerinin tümüne gömülü olan dolaylı (sanal) su kullanımını da dikkate alarak, kentin gerçek su talebini bütüncül bir bakış açısıyla ortaya koymaktadır.

Bu yönüyle çalışma, Erzurum'un su kaynakları üzerindeki toplam baskıyı daha doğru, ölçülebilir ve karşılaştırılabilir verilerle analiz etmeyi mümkün kılmaktadır.

Çalışmanın önemi temel olarak aşağıdaki odak alanlarında toplanmaktadır:

Bütüncül Su Yönetimi:

Araştırma, tarımsal üretimden hayvancılığa, evsel tüketimden endüstriyel faaliyetlere kadar uzanan tüm süreçlerdeki doğrudan ve dolaylı su kullanımlarını kapsayarak, Erzurum'un gerçek su ayak izini ortaya koymaktadır. Bu yaklaşım, parçalı su yönetimi anlayışı yerine havza ve sistem temelli bir su yönetimi perspektifi sunmaktadır.

Sektörel Kaynak Tahsisi ve Verimlilik:

Tarımsal sulama, hayvancılık faaliyetleri, kentsel kullanım ve sanayi sektörlerinin su kaynakları üzerindeki baskıları ayrı ayrı analiz edilerek, hangi sektörlerde su verimliliği artırıcı önlemlerin öncelikli olması gerektiği bilimsel verilerle desteklenmektedir. Böylece, sınırlı su kaynaklarının daha etkin ve adil bir şekilde tahsis edilmesine yönelik güçlü bir karar destek zemini oluşturulmaktadır.

İklim Değişikliğine Uyum ve Dirençlilik:

Artan kuraklık riski ve iklim değişikliğinin etkileri karşısında, Erzurum'un su kaynaklarını koruma ve sürdürülebilir biçimde yönetme kapasitesini güçlendirmeyi hedeflemektedir.

ARTAN SICAKLIKLAR VE DÜZENSİZ YAĞIŞLAR, ÖZELLİKLE KARASAL İKLİM BÖLGELERİNDE SU KAYNAKLARI ÜZERİNDEKİ BASKIYI ARTIRMAKTADIR.

Çalışma, iklim değişikliğine uyumlu, suya duyarlı kentsel ve kırsal planlama stratejilerinin geliştirilmesine katkı sunmaktadır.

Politika Geliştirme ve Stratejik Planlama: Elde edilen bulgular; yerel yönetimler, kamu kurumları, karar vericiler ve sektörel paydaşlar için stratejik planlama süreçlerinde yol gösterici niteliktedir. Su ayak izi temelli analizler, ürün desenlerinin yeniden planlanması, su yoğun üretim modellerinin gözden geçirilmesi ve kentsel su yönetimi politikalarının şekillendirilmesi açısından güçlü bir referans oluşturmaktadır.

Toplumsal Farkındalık ve Sürdürülebilirlik Kültürü: Çalışma, su tüketiminin yalnızca teknik ve idari bir konu olmadığını; bireysel tercihlerden toplumsal üretim-tüketim alışkanlıklarına uzanan geniş bir sorumluluk alanı olduğunu vurgulamaktadır. Bu yönüyle rapor, suyun korunması ve gelecek nesillere aktarılması konusunda toplumsal farkındalığın artırılmasına katkı sağlayan önemli bir başvuru kaynağı niteliği taşımaktadır.

Sonuç olarak bu çalışma; Erzurum'un su kaynaklarını bilimsel, bütüncül ve ileri analiz yöntemleriyle değerlendiren; bölgesel dirençliliği su verimliliği ve sürdürülebilir su yönetimi ekseninde güçlendirmeyi amaçlayan önemli bir akademik ve yönetsel adım olarak öne çıkmaktadır.

1.2. ERZURUM İLİNİN COĞRAFI VE İKLİMSEL ÖZELLİKLERİ

Erzurum ili, Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer almakta olup, sahip olduğu yüksek rakım, geniş plato alanları ve dağlık topoğrafyası ile ülkenin en belirgin fiziki coğrafya birimlerinden birini oluşturmaktadır. İl, doğuda Ağrı ve Kars, batıda Erzincan ve Bayburt, kuzeyde Artvin ve Rize, güneyde ise Muş ve Bingöl illeri ile çevrilidir. Ortalama yükseltisi yaklaşık 1.900 metre olan Erzurum, Türkiye'nin en yüksek yerleşim alanlarından biri olup, bu özelliği ilin iklimsel ve hidrolojik yapısını doğrudan şekillendirmektedir.

Erzurum'un jeomorfolojik yapısı ağırlıklı olarak platolar, yüksek dağ sıraları ve bu birimler arasında yer alan çöküntü alanlarından oluşmaktadır. Erzurum-Kars Platosu, ilin merkez ve çevresinde geniş bir alan kaplamakta; bu plato, tarımsal ve hayvansal üretim açısından ilin temel coğrafi zeminini oluşturmaktadır. Platoyu çevreleyen Palandöken, Dumlu, Mescit ve



Allahuekber dağları, ilin doğal sınırlarını belirlerken aynı zamanda mikroklimatik farklılıkların oluşmasına neden olmaktadır.

Bu dağlık yapı, yüzey akışlarını, kar birikimini ve yer altı su beslenimini doğrudan etkilemektedir.

Yüksek rakım ve uzun süren kar örtüsü, özellikle ilkbahar aylarında kar erimesine bağlı yüzey akışlarını artırmakta; bu durum hem su potansiyelinin oluşumunda hem de taşkın risklerinde belirleyici olmaktadır. Aynı zamanda bu hidrolojik yapı, ilin tarımsal sulama olanaklarını ve su kaynaklarının mevsimsel sürekliliğini şekillendirmektedir.

Erzurum ilinin iklimi, sert karasal iklim özellikleri göstermektedir. Uzun ve soğuk kışlar, kısa ve serin yazlar ilin temel iklim karakterini oluşturmaktadır. Kış mevsimi genellikle ekim ayı sonlarında başlamakta ve nisan ayına kadar etkisini sürdürmektedir. Bu süreçte sıcaklıklar sıklıkla sıfırın altına düşmekte, ekstrem soğuk hava koşulları ve don olayları yaygın olarak görülmektedir. Yaz aylarında ise gündüz ve gece sıcaklık farkları belirgin olup, ortalama sıcaklıklar diğer bölgelere kıyasla düşük seyretmektedir.

Yağış rejimi bakımından Erzurum, yıllık toplam yağış miktarı açısından Türkiye ortalamasının altında veya yakın değerler göstermekte;

yağışların önemli bir bölümü kar şeklinde gerçekleşmektedir. Kar örtüsünün yerde kalma süresi uzun olup, bu durum su kaynaklarının beslenmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Ancak son yıllarda iklim değişikliğine bağlı olarak kar yağışlarının azalması, yağışların yağmur şeklinde ve daha düzensiz gerçekleşmesi, ilin su kaynakları üzerinde belirsizlik ve risk oluşturmaktadır.

Buharlaştırma oranları yaz aylarında artış göstermekle birlikte, yüksek rakım ve düşük sıcaklıklar nedeniyle yıl genelinde sınırlı kalmaktadır. Bununla birlikte, artan sıcaklık eğilimleri ve rüzgâr etkisi, özellikle açık su yüzeylerinde buharlaştırma kayıplarını artırmaktadır. Rüzgârlar, ilin iklimsel konforunu ve tarımsal faaliyetleri etkileyen bir diğer önemli faktör olup, özellikle kış aylarında hissedilen soğuk algısını artırmaktadır.

Sonuç olarak Erzurum ili; yüksek rakımı, sert karasal iklimi, uzun süreli kar örtüsü, geniş plato alanları ve önemli su havzalarına kaynaklık eden hidrolojik yapısı ile su kaynakları yönetimi, tarımsal üretim ve iklim değişikliğine uyum açısından stratejik bir konuma sahiptir.

Bu özgün coğrafi ve iklimsel özellikler, Erzurum'da su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimini zorunlu kılmakta ve ilin iklim

değişikliğine karşı kırılganlığını artırmaktadır. Bu nedenle Erzurum'un fiziki çevre koşullarının bilimsel temelde analiz edilmesi, bölgesel planlama ve sürdürülebilir kalkınma politikaları açısından büyük önem taşımaktadır.

1.3 ERZURUM VE ÇEVRESİ İÇİN SU KAYNAKLARININ BÖLGESEL ÖNEMİ

Su kaynakları, doğal sistemlerin işleyişi ile ekonomik ve toplumsal yapı arasındaki ilişkinin temel belirleyicilerinden biri olup, iklim değişikliği sürecinde stratejik bir yönetsel unsur hâline gelmiştir. Hidrolojik döngüde meydana gelen yapısal değişimler, özellikle yüksek rakımlı ve karasal iklim koşullarına sahip bölgelerde suyun miktarı, sürekliliği ve kalitesi üzerinde belirgin baskılar oluşturmaktadır. Bu çerçevede Erzurum ve çevresi, hem fiziki coğrafi özellikleri hem de Türkiye'nin ana akarsu havzalarına kaynak sağlayan konumu nedeniyle bölgesel ölçekte kritik bir su üretim alanı niteliği taşımaktadır.

Erzurum ve çevresinde yer alan su kaynakları, Doğu Anadolu Bölgesi'nin hidrolojik dengesinin oluşumunda önemli bir rol üstlenmektedir. Bölge, Fırat ve Aras havzalarına ait çok sayıda akarsuya kaynaklık etmekte; bu akarsular aracılığıyla yalnızca yerel su ihtiyacı değil, aynı zamanda daha geniş coğrafyalardaki tarımsal üretim alanları ve yerleşimlerin su gereksinimleri de karşılanmaktadır.

Bu durum, Erzurum ve çevresindeki su varlığını, bölgesel su güvenliği ve havza bütünlüğü açısından stratejik bir konuma taşımaktadır.

Yüksek topoğrafya ve uzun süreli kar örtüsü, bölgedeki su kaynaklarının oluşum ve beslenme süreçlerini belirleyen temel faktörler arasında yer almaktadır. Kış döneminde biriken kar, doğal bir rezerv işlevi görmekte; sıcaklıkların artmasıyla birlikte gerçekleşen kar erimeleri, yüzey ve yer altı su sistemlerini besleyerek su arzının sürekliliğini sağlamaktadır. Ancak son yıllarda gözlenen iklimsel değişkenlik, kar yağışlarının miktarında ve zamansal dağılımında belirgin dalgalanmalara yol açmakta; bu durum Erzurum ve çevresinde su kaynaklarının mevsimsel istikrarını zayıflatmaktadır.

Bölgesel su kaynaklarının önemi, Erzurum ve çevresinde baskın olan tarım ve hayvancılık faaliyetleriyle daha da belirgin hâle gelmektedir. Sulamaya dayalı tarımsal üretim, geniş mera alanlarına dayanan hayvancılık faaliyetleri ve bu sektörlere bağlı yan üretim süreçleri, suya olan talebi sürekli artırmaktadır. Bununla birlikte, üretim süreçlerinde doğrudan kullanılan su miktarının yani sıra, ürünlerin üretim zinciri boyunca tüketilen dolaylı su miktarı da dikkate alındığında, bölgenin toplam su yükünün geleneksel su tüketim hesaplamalarının ötesine geçtiği anlaşılmaktadır.



Bu durum, Erzurum ve çevresi için su ayak izi yaklaşımını gerekli ve işlevsel kılmaktadır.

Su kaynakları, yalnızca ekonomik faaliyetlerin devamlılığı açısından değil, aynı zamanda ekolojik sistemlerin korunması bakımından da kritik bir role sahiptir. Akarsu sistemleri, sulak alanlar ve dağlık ekosistemler, su rejiminde meydana gelen değişimlere karşı yüksek duyarlılık göstermektedir. Erzurum ve çevresinde su miktarındaki azalma ya da su kalitesindeki bozulmalar, ekosistem hizmetlerini olumsuz yönde etkileyerek biyolojik çeşitlilik üzerinde baskı oluşturabilmektedir.

Bu bağlamda Erzurum ve çevresindeki su kaynaklarının bölgesel önemi, mevcut su varlığının tespit edilmesinin ötesinde, geleceğe yönelik su yönetimi yaklaşımlarının bilimsel temellerle ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Su ayak izi temelli değerlendirmeler, su kullanımının sektörel dağılımını, üretim ve tüketim süreçlerindeki gerçek su talebini ve su kaynakları üzerindeki toplam baskıyı görünür kılarak, daha rasyonel ve sürdürülebilir su yönetimi politikalarının geliştirilmesine katkı sunmaktadır.

Sonuç olarak Erzurum ve çevresi, sahip olduğu hidrolojik özellikler nedeniyle bölgesel su sistemlerinin sürekliliği açısından kilit bir konumda yer almakta;

bu durum, bölgedeki su kaynaklarının korunmasını ve etkin biçimde yönetilmesini stratejik bir zorunluluk hâline getirmektedir.

Bu çerçevede yürütülecek su ayak izi çalışmaları, iklim değişikliği koşulları altında suya duyarlı planlama yaklaşımlarının geliştirilmesi ve bölgesel su yönetiminin güçlendirilmesi açısından temel bir bilimsel dayanak oluşturmaktadır.







Çobandede Köprüsü





KURAMSAL ÇERÇEVE





2. KURAMSAL ÇERÇEVE

2.1. SU AYAK İZİ KAVRAMI

Su kaynakları, ekosistemlerin sürekliliği ve insan yaşamının devamlılığı için vazgeçilmezdir. Küresel ölçekte artan nüfus, kentleşme, enerji ve gıda talebi nedeniyle suya olan ihtiyaç her geçen gün artmakta; aynı zamanda iklim değişikliği, yağış rejimlerindeki değişkenlikler ve kuraklık riskini artırarak su kaynakları üzerinde baskı oluşturmaktadır. Bu nedenle, su kullanımının ne kadar olduğu, nasıl kullanıldığı ve hangi faaliyetlerin su kaynakları üzerinde daha fazla baskı yarattığının belirlenmesi, sürdürülebilir su yönetimi açısından kritik önem taşımaktadır.

Su ayak izi (SA) kavramı, su kaynaklarının insan faaliyetleri üzerindeki etkisini nicel olarak ortaya koymak amacıyla, UNESCO-IHE Su Eğitim Enstitüsü bünyesinde 2002 yılında Arjen Y. Hoekstra tarafından ilk kez ortaya konulmuştur. Su ayak izi; bir ürünün, hizmetin veya faaliyetin tüm yaşam döngüsü boyunca doğrudan ve dolaylı olarak tükettiği ve kirlettiği toplam tatlı su miktarını ifade eden bütüncül bir göstergedir (WWF, 2014). Suyun sürdürülemez kullanımını önlemeye yönelik küresel çabalar kapsamında, 2008 yılında şirketler, kamu kurumları, sivil toplum kuruluşları ve bireylerin ortak katılımıyla Su Ayak İzi Ağı (Water Footprint Network) kurulmuştur.

**SU AYAK İZİ;
BİR ÜRÜNÜN, HİZMETİN
VEYA FAALİYETİN TÜM
YAŞAM DÖNGÜSÜ BOYUNCA
DOĞRUDAN VE DOLAYLI
OLARAK TÜKETTİĞİ VE
KİRLETTİĞİ TOPLAM TATLI
SU MİKTARINI İFADE EDEN
BÜTÜNCÜL BİR
GÖSTERGEDİR.**

Su ayak izi yaklaşımı, geleneksel su kaynakları endekslerinden farklı olarak, suyun yalnızca mevcut miktarını değil, belirli bir bölge veya havzada fiilen tüketilen suyun gerçek boyutunu daha doğru ve bütüncül biçimde ortaya koymaktadır. Bu kapsamda su ayak izi, yüzey ve yeraltı sularının yanı sıra üretim süreçlerinde kullanılan toprak suyunu (yeşil su) ve oluşan su kirliliğini temsil eden gri su bileşenlerini de içermektedir. Bu çok boyutlu yapı sayesinde su kaynaklarının niceliksel ve niteliksel açıdan kapsamlı bir değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca su ayak izi, tüketicilerin bölgesel su güvenliğini sağlama açısından yerel (iç su ayak izi) ve dış kaynaklı (dış su ayak izi) su kullanımına olan bağımlılık düzeylerini yansıtmakta; üretimden nihai tüketime kadar tüm tedarik zinciri boyunca kullanılan su miktarını ölçerek su kullanımının mekânsal ve zamansal etkilerini görünür kılmaktadır (Mohsin,2022).

Tatlı su tahsisini değerlendirmede kullanılan temel göstergelerden biri olan su ayak izi, üretici ve tüketicilerin tatlı suyu hem doğrudan hem de dolaylı kullanımını dikkate alan bütüncül bir yaklaşımdır.

Ürün başına tüketilen su miktarı, birim ürün için kullanılan su hacmi (m^3/ton) cinsinden ifade edilmekte olup "sanal su içeriği" olarak da adlandırılmaktadır. Bir ürünün su ayak izi, hammaddenin temininden nihai üretim aşamasına kadar tüm üretim süreçlerinde oluşan su ayak izlerinin toplamını kapsamaktadır. Benzer şekilde, bir bireyin ya da toplumun su ayak izi, tüketilen tüm ürün ve hizmetlerin toplam su ayak izini temsil ederken; bir işletmenin su ayak izi, faaliyetleri sonucunda ürettiği ürünlerin toplam su ayak izine karşılık gelmektedir. Belirli bir coğrafi alanın (il, ülke, bölge veya nehir havzası) su ayak izinin hesaplanmasında ise, söz konusu sınırlar içerisinde gerçekleştirilen tüm üretim ve tüketim faaliyetlerinin toplam su ayak izi esas alınmaktadır.



Bu çerçevede su ayak izi, su tüketimi ve su kirliliğini hacimsel olarak ifade eden bir gösterge olmasının yanı sıra, üretici ve tüketicilerin tatlı su sistemleriyle olan etkileşimlerini çok boyutlu biçimde ortaya koyan önemli bir değerlendirme aracıdır (Egan,2011).

Su ayak izi kavramı, insanların doğrudan ve dolaylı su tüketimlerinin bütüncül bir ölçümü olarak geliştirilmiş olup, bir ürün veya hizmetin üretim sürecinde kullanılan toplam tatlı su miktarını göstermektedir. Doğrudan su ayak izi, bireyin günlük yaşamında doğrudan tükettiği su miktarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu kapsamda duş, banyo lavabosu ve mutfakta kullanılan musluk türleri ile ortalama kullanım süreleri; banyo ve tuvalet kullanım sıklığı; çamaşır ve bulaşık yıkama alışkanlıkları doğrudan su ayak izinin hesaplanmasında dikkate alınmalıdır. Ayrıca bahçe sulama yöntemleri, yüzme havuzunun kullanım süresi ve araç yıkama yöntemleri de bu hesaplama dâhil edilmelidir. Ülkelerin üretim ve tüketim kaynaklı su ayak izlerinin yaklaşık %80'i iç tatlı su kaynaklarına dayanmakta, bu kullanımın yaklaşık %90'ı ise tarımsal sulama faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle tatlı su kaynaklarının korunması ve su tüketiminin etkin biçimde yönetilmesi, ülke ekonomisinin sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir.



Ekonomik kalkınma üzerindeki doğrudan etkisi göz önünde bulundurulduğunda, bireylerin doğrudan ve dolaylı su tüketimlerinin belirlenmesi ve toplam su ayak izinin hesaplanması gereklilik arz etmektedir. Dolaylı su ayak izi ise, bir ürünün üretim zinciri boyunca her aşamada tüketilen toplam su miktarını ifade etmekte olup sanal su niteliği taşımaktadır. Bir ürünün sanal su içeriği ise, üretildiği coğrafyada ürünün ortaya konulabilmesi için harcanan tatlı su hacmi olarak tanımlanmaktadır. Bu kapsamda yakıt kullanımı, elektrik tüketimi, tüketim alışkanlıkları, beslenme tercihleri ile evcil hayvan besleyen bireylerde kedi ve köpek mamalarının üretiminde kullanılan su miktarının hesaplanması dolaylı su ayak izi değerlendirmesinde önem arz etmektedir (Gökçe,2025).

2.2. SU AYAK İZİNİN BİLEŞENLERİ

Su ayak izi değerlendirme kılavuzu, Su ayak izi ağı (SAİA) tarafından geliştirilen ve uluslararası düzeyde kabul gören bir değerlendirme standardıdır. Su ayak izi ağı yöntemi, doğrudan ve dolaylı su kullanımlarını; mavi, yeşil ve gri su ayak izi bileşenleri çerçevesinde bütüncül olarak ele almaktadır. Bu yöntem, yapısal açıdan ISO 14046 standardına benzer şekilde dört temel aşamadan oluşmaktadır. Söz konusu aşamalar; amaç ve kapsamın tanımlanması, su ayak izinin hesaplanması, sürdürülebilirlik değerlendirmesi ve elde edilen sonuçların yorumlanmasıdır.

Su ayak izi ağı yöntemi; kamusal uygulamalar, coğrafi bölgeler, belediyeler, ülkeler, ürünler, işletmeler veya işletme içerisindeki belirli prosesler temel alınarak gerçekleştirilecek genel ya da özel nitelikli değerlendirmelerde kullanılabilir. Bu kapsamda ilk aşamada ele alınacak konu belirlenmekte ve ISO 14046 standardında olduğu gibi çalışmanın amacı ile kapsamı açık ve net bir biçimde tanımlanmaktadır. Bu aşamayı takiben, gerekli verilerin toplandığı ve su ayak izi hesaplamalarının gerçekleştirildiği muhasebe aşamasına geçilmektedir. Hesaplama sürecinde ele alınan tüm detaylar ve sistem sınırları, birinci aşamada belirlenen hedef ve kapsam doğrultusunda şekillenmektedir.

SU AYAK İZİ DEĞERLENDİRME KILAVUZU, SU AYAK İZİ AĞI (SAİA) TARAFINDAN GELİŞTİRİLEN VE ULUSLARARASI DÜZEYDE KABUL GÖREN BİR DEĞERLENDİRME STANDARDIDIR.

SU AYAK İZİ AĞI YÖNTEMİ, DOĞRUDAN VE DOLAYLI SU KULLANIMLARINI; MAVİ, YEŞİL VE GRİ SU AYAK İZİ BİLEŞENLERİ ÇERÇEVESİNDE BÜTÜNCÜL OLARAK ELE ALMAKTADIR.



Hesaplama aşamasının tamamlanmasının ardından elde edilen bulgular, çevresel, ekonomik ve sosyal boyutları içerecek şekilde sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmektedir. Bu nokta, SAİA Değerlendirme Kılavuzu ile ISO 14046 arasındaki en temel farklılıklardan birini oluşturmaktadır. ISO 14046 standardında bu aşamada yalnızca çevresel etki değerlendirmesi yapılmakta ve tercihe bağlı olarak hayat boyu analiz (HBA) uygulanabilmektedir. Dolayısıyla ISO 14046 kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar, su kullanımının çevresel etkileriyle sınırlı kalmakta; sosyal ve ekonomik boyutlar değerlendirmeye dâhil edilmemektedir (Kalya, 2022).

Buna karşılık su ayak izi ağı yönteminde üçüncü aşamada yer alan sürdürülebilirlik değerlendirmesi ile su ayak izinin çevresel, ekonomik ve sosyal etkileri birlikte ele alınmakta; bu etkilerin olası sonuçları ve sürdürülebilirlik düzeyleri kapsamlı biçimde yorumlanmaktadır. ISO 14046'ya kıyasla bir diğer önemli fark ise SAİA yönteminde, değerlendirmelerin Gri Su Ayak İzi, Mavi Su Ayak İzi ve Yeşil Su Ayak İzi bileşenleri dikkate alınarak gerçekleştirilmesidir (Hoekstra,2011).



2.2.1. Yeşil Su Ayak İzi

Yağmur suyuyla sulama yapılabilen yeşil alanlardan gelen suyu ifade eder. Bitki fotosentezi yoluyla bu su kaynaklarından elde edilen suyu değerlendirir. Yeşil su ayak izi, tarımsal üretimde kullanılan su miktarını ölçer.

2.2.2. Mavi Su Ayak İzi

Tatlı su kaynaklarından doğrudan çekilen suyu ifade eder. Tarım sektöründe su ayak izinin ikinci en önemli bileşeni mavi su ayak izi olup, bitkisel üretimde kullanılan suyun belirli bir kısmını yüzey ve yeraltı suları oluşturmaktadır (WWF, 2014). Bunun yanı sıra, tarımsal faaliyetler dışında sanayi tesislerindeki üretim süreçlerinde ve hane halkı kullanımında tüketilen sular da mavi su ayak izi kapsamında değerlendirilmektedir.

2.2.3. Gri Su Ayak İzi

Üretilen atık suların alıcı ortamlarda seyreltilmesi için gereken tatlı su miktarını tanımlar ve kirlilik yükünü dikkate alır. Kirlilik temelli bir gösterge olması nedeniyle gri su ayak izi, mavi ve yeşil su ayak izlerinden ayrılmaktadır. Gri su kavramı, nüfus artışı ve endüstriyel gelişme süreçleriyle doğrudan ilişkilendirilmektedir (Hoekstra, 2008; Mekonnen & Hoekstra, 2010, 2011).



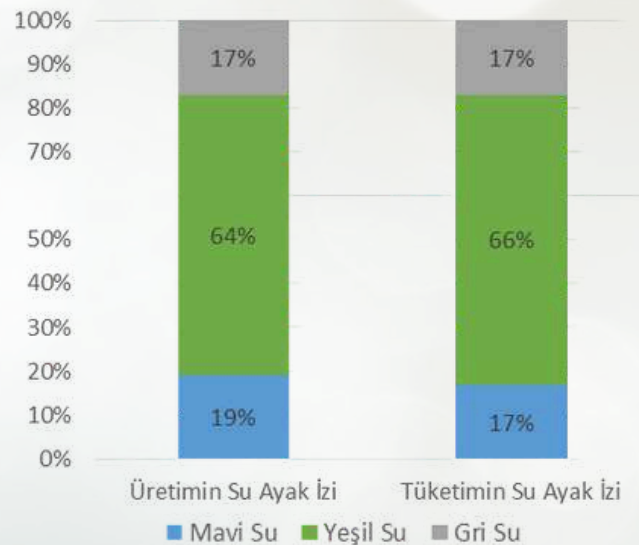
2.3. SU AYAKIZI VE SÜRDÜRÜLEBİLİR SU YÖNETİMİ

Türkiye, Akdeniz havzasında görece yüksek tatlı su potansiyeline sahip ülkeler arasında yer almaktadır. Ancak su kaynaklarının bütüncül ve etkin biçimde yönetilememesi, iklim değişikliğiyle ilişkili sıcaklık artışlarının neden olduğu kuraklaşma eğilimleri ve hızlı nüfus artışı, 2030 yılı ve sonrasında Türkiye'nin ciddi bir su kıtlığı riskiyle karşı karşıya kalacağını göstermektedir (Hoekstra vd.,2006); (Pegram vd., 2014). Yapılan projeksiyonlarda, yüzey suyu miktarlarında 2030 yılı için %20, 2050 yılı için %35 ve 2100 yılı için ise %50 oranında azalma öngörülmektedir. Bunun yanı sıra, nüfus artışına paralel olarak değişen beslenme alışkanlıklarının bireysel su ayak izini önemli ölçüde artırdığı ifade edilmektedir (Ermumcu vd., 2022), (Gökçe, 2025).

Türkiye'de toplam tatlı su kullanımının yaklaşık %73'ü tarımsal sulamada, %16'sı evsel tüketimde ve %11'i ise endüstriyel faaliyetlerde kullanılmaktadır. Buna paralel olarak, ülkenin toplam su ayak izinin %89'u tarım sektörüne, %7'si evsel kullanıma ve %4'ü sanayiye aittir. Tarımsal su ayak izinin %92'si bitkisel üretimden, %8'i ise otlatma faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır (WWF, 2014). Türkiye'nin su ayak izi bileşimi incelendiğinde, bitkisel üretim içerisinde tahıllar ve yem bitkilerinin en yüksek paya sahip olduğu görülmektedir. Bu ürünler aynı zamanda yeşil su ayak izi açısından da üst sıralarda yer almaktadır.

Mavi su ayak izi kapsamında ise tahıllar ve endüstri bitkileri öne çıkmakta; özellikle ekonomik değeri yüksek endüstri bitkilerinin mavi su ayak izi belirgin şekilde daha yüksek düzeydedir. Bu grup içerisinde şekerpancarı dikkat çeken bir ürün konumundadır. Türkiye'nin su ayak izi hesaplamalarına göre, ülke genelinde üretim ve tüketim faaliyetlerinin yaklaşık %80'inin iç tatlı su kaynaklarına dayandığı belirlenmiştir. Bu bulgu, tatlı su kaynaklarının sürdürülebilir yönetiminin ülke ekonomisi üzerinde doğrudan belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 2.9'da sunulduğu üzere, Türkiye'de üretime bağlı su ayak izi ile tüketime bağlı su ayak izi arasında belirgin bir farklılık bulunmamaktadır. Üretim kaynaklı su ayak izinin %64'ü yeşil, %19'u mavi ve %17'si gri su bileşenlerinden oluşurken; tüketim kaynaklı su ayak izinde yeşil su %66, mavi su %17 ve gri su %17 oranında pay almaktadır (Gökçe,2025).

Şekil 1. Su Ayak İzi Bileşenlerine Göre Türkiye'de Üretimin ve Tüketimin Su Ayak İzi (WWF, 2014)



TÜRKİYE'DE TOPLAM TATLI SU KULLANIMININ YAKLAŞIK %73'Ü TARIMSAL SULAMADA, %16'SI EVSEL TÜKETİMDE VE %11'İ İSE ENDÜSTRİYEL FAALİYETLERDE KULLANILMAKTADIR.

Türkiye'nin üretim ve tüketim süreçlerinde mavi, yeşil ve gri su ayak izi bileşenleri değerlendirildiğinde, en yüksek oranın yeşil su ayak izine ait olduğu görülmektedir. Bu bulgu, üretim ve tüketim faaliyetlerinin büyük ölçüde yağış rejimi ve iklimsel koşullara bağımlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu çerçevede, yeşil su ayak izinin baskın olduğu ulusal ölçekteki yapı, bölgesel düzeyde de benzer dinamiklerle şekillenmekte; özellikle iklim koşullarına duyarlı tarımsal üretimin, nüfus artışı ve ekonomik faaliyetlerle birlikte su kaynakları üzerindeki baskıyı artırdığı görülmektedir. Erzurum ili de bu genel eğilimin somutlaştığı alanlardan biri olarak, iklimsel özellikleri ve sosyo-ekonomik yapısı nedeniyle su ayak izi bileşenlerinin birlikte değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Erzurum ili; geniş tarım alanları, gelişmekte olan endüstriyel faaliyetleri ve artan nüfusu ile su kaynakları yönetimi açısından önemli bir bölgedir. Şehrin iklim özelliği nedeniyle

yağış dağılımı yıl içinde düzensizdir ve tarımsal üretimde sulama ihtiyacı dönemsel olarak artmaktadır. Öte yandan, kentsel alanlarda yaşayan bireylerin içme-kullanma suyu tüketimleri, beslenme alışkanlıkları sonucu oluşan sanal su talepleri ve endüstriyel tesislerin su kullanımları, kentin toplam su ayak izini önemli ölçüde etkilemektedir.

Bu çalışma kapsamında Erzurum şehrinin su ayak izi; tarım ve hayvancılık faaliyetleri, yerleşim alanları ve endüstriyel sektörler olmak üzere üç ana başlık altında değerlendirilmiştir. Tarımsal üretim için yeşil ve mavi su ayak izi ile ürünlerin sanal su değerleri hesaplanmış; hayvan yetiştiriciliği için gerekli olan toplam su miktarı belirlenmiş; Erzurum ili genelinde yaşayan bireylerin doğrudan su tüketimleri, dolaylı (sanal) su kullanımları ve bireysel gri su ayak izi belirlenmiştir. Ayrıca şehirde faaliyet gösteren endüstrilerin su çekimleri ve atıksu deşarjları dikkate alınarak mavi ve gri su ayak izi hesaplamaları yapılmıştır.

Bu raporun amacı; Erzurum ilinin su kullanım profilini detaylı olarak ortaya koymak, su kaynakları üzerinde baskı oluşturan sektörleri tespit etmek ve sürdürülebilir su yönetimi için karar vericilere bilimsel temelli bir değerlendirme sunmaktır. Rapor sonucunda elde edilen bulgular, gelecekte uygulanabilecek su tasarrufu stratejileri, verimlilik artırıcı tarımsal uygulamalar ve endüstriyel su yönetimi planlamaları için önemli bir rehber niteliği taşımaktadır.



Tortum Kaleboynu



YÖNTEM VE METODOLOJİ

OB





3. YÖNTEM VE METODOLOJİ

Bu çalışmada Erzurum ilinin su ayak izi bileşenleri hem Water Footprint Network (WFN) metodolojisi hem de SUET (Sulama Yönetimi ve Bitki Su Tüketimi Sistemi) yaklaşımı kapsamında değerlendirilmiş ve ilin su tüketim yapısı çok boyutlu olarak analiz edilmiştir. Her iki metodolojinin birlikte ele alınması, su kullanımının hem küresel ölçekte kabul gören hesaplama bileşenleri (yeşil-mavi-gri su, sanal su) hem de yerel iklim koşullarına bağlı gerçek bitki su tüketimi, sulama ihtiyacı ve sulama etkinliği üzerinden bütüncül şekilde incelenmesini sağlamıştır. Çalışmada, tarımsal üretim, hayvansal üretim, yerleşim alanları ve endüstriyel faaliyetler için ayrı ayrı su ayak izi hesaplamaları yapılmış, ardından şehir ölçeğinde toplam su ayak izi oluşturulmuştur.

3.1. SU AYAK İZİ METODOLOJİSİNİN TEMELLERİ

Su ayak izi üç ana bileşenden oluşur:

a) Yeşil Su Ayak İzi (Green WF)

Bitkilerin topraktan yararlandığı yağmur suyu (toprak nemi) tüketimini ifade eder.

Hesaplama, ürünün birim alan başına yeşil su tüketiminin toplam üretime oranlanması ile yapılır.

$$WF_{green} = \frac{CWU_{green}}{Y} \quad (1)$$

- CWU_{green} : Yeşil su tüketimi (m^3/ha)
- Y : Ürün verimi (ton/ha)

b) Mavi Su Ayak İzi (Blue WF)

Yeraltı ve yüzeysel sulardan çekilen tarımsal sulama suyu, sanayi suyu ve içme-kullanma suyu tüketimini kapsar.

$$WF_{blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y} \quad (2)$$

c) Gri Su Ayak İzi (Grey WF)

Belirli bir kirleticinin alıcı ortamda seyreltilmesi için gerekli tatlı su miktarıdır.

$$WF_{grey} = \frac{L}{(C_{max} - C_{nat})} \quad (3)$$

- L : Yıllık kirletici yükü (kg/yıl)
- C_{max} : Alıcı ortam için izin verilen maksimum konsantrasyon (mg/L)
- C_{nat} : Doğal konsantrasyon (mg/L)

3.2. TARIMSAL SU AYAK İZİ HESAPLAMALARI

Tarımsal ürünler için su ayak izi hesaplamaları aşağıdaki adımlara göre yapılmıştır:

1. Ekili ürünlerin belirlenmesi (tahıllar, yem bitkileri, sebze-meyve vb.)
2. Her ürün için FAO CROPWAT verileri veya literatür kaynaklı:
 - ET_o (referans evapotranspirasyon, referans bitki su tüketimi)
 - ET_c (ürün evapotranspirasyonu, bitki su tüketimi)
 - Sulama suyu ihtiyacı (IR)
 - Etkin yağış (P_{eff}) verilerinin kullanılması

3.Yeşil ve mavi su tüketimlerinin hesaplanması

4.Verim değerlerine göre ürün bazında su ayak izi çıkarılması

5.İl genelindeki toplam su ayak izi:

$$WF_{crop} = \sum (A_i \times WF_i) \quad (4)$$

Burada A_i ürün ekim alanını temsil eder.

Çalışmada SUEE yaklaşımının kullanılması ile sulama ihtiyacının gerçek bitki su tüketimine (ET_c), etkin yağışa (P_{eff}), sulama suyu verimine (IE) ve iklim koşullarına göre hesaplanması sağlanmıştır. Böylece tarım sektörünün su ayak izinde görülen mavi su bileşeninin, yalnızca teorik değil yerel iklim verilerine ve bitki ihtiyaçlarına dayalı gerçekçi sulama gereksinimleri ortaya konmuştur. SUEE metodolojisi, bitki su tüketiminin belirleyicileri olan referans evapotranspirasyon (ET_o), bitki katsayısı (K_c), etkin yağış, toprak su tutma kapasitesi ve sulama yöntemi verimliliği gibi parametreler üzerinden Erzurum'un tarımsal su tüketimini analiz etmeye olanak sağlamıştır.



Tarımsal Sanal Su Ayak İzi

Her ürün için toplam sanal su:

$$VSW = WF_{green} + WF_{blue} + WF_{grey} \quad (5)$$

Toplam tarımsal sanal su ayak izi tüm ürünlerin toplamıdır.

3.3. YERLEŞİM ALANLARININ SU AYAK İZİ METODOLOJİSİ

a) Doğrudan Su Tüketimi (Mavi WF)

Kişi başı günlük su tüketimi yıllık su tüketimine dönüştürülüp yerleşim merkezinde yaşayan toplam nüfus ile çarpılmıştır.

$$WF_{domestic} = P \times q \times 365 \quad (6)$$

- P : Nüfus
- q : Kişi başı günlük ortalama su kullanımı

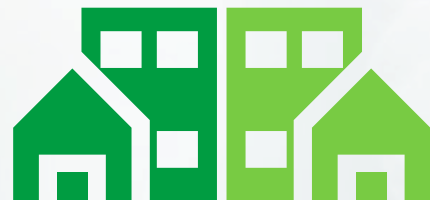
b) Yerleşim Gri Su Ayak İzi

Yerleşim merkezinde hanelerden kaynaklanan atıksu kirlilik yükü (BOD/COD, azot, fosfor vb.) kullanılır.

$$WF_{grey,domestic} = \frac{L_{domestic}}{(C_{max} - C_{nat})} \quad (7)$$

c) Bireysel ve Kentsel Sanal Su Ayak İzi

Gıda tüketim profili (et, süt, tahıl vb.) ile literatürdeki sanal su içerikleri birleştirilerek hesaplanmıştır.





3.4. ENDÜSTRİYEL SU AYAK İZİ METODOLOJİSİ

Endüstriler için:

a) Endüstriyel Mavi Su Ayak İzi

Tesislerin kullandığı su miktarı doğrudan alınır.

$$WF_{blue,ind} = Q_{water} \quad (8)$$

b) Endüstriyel Gri Su Ayak İzi

Atıksu debisi ve kirlilik yüküne göre hesaplanır.

$$WF_{grey,ind} = Q_{eff} \times \frac{C_{eff} - C_{nat}}{C_{max} - C_{nat}} \quad (9)$$

3.5. ERZURUM İLİ TOPLAM SU AYAK İZİ

Tüm bileşenler bir araya getirilerek il ölçeğinde toplam su ayak izi hesaplanmıştır:

$$WF_{total} = WF_{tarımsal} + WF_{evsel} + WF_{endüstriyel} + WF_{sanal} \quad (10)$$

Her bileşen ayrıca yeşil-mavi-gri kategorilerine ayrılmıştır.



3.6. METODOLOJİK VARSAYIMLAR VE SINIRLAR

- Tarımsal su ayak izi hesaplamalarında TUIK 2020-2024 yıllarında Erzurum ilinde yetiştirilen ürün verileri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.
- Evsel su ayak izi hesaplamalarında Erzurum ili nüfus sayıları TUIK 2015-2024 verileri kullanılarak bu yıllara ait ortalama değer kullanılmıştır.
- Evsel su ayak izi hesaplamalarında yerleşim merkezinde tüketilen kişi başı günlük su miktarı 250 L olarak alınmıştır.
- Endüstriyel su ayak izi hesaplamalarında Erzurum Bilim, Sanayi ve Teknoloji İl Müdürlüğünden alınan 2024 yılı verilerine göre hesaplamalar yapılmıştır. Tüm sektörler için su kullanım verileri yıllık su tüketim beyanlarına dayanmaktadır.
- Doğal konsantrasyon ≈ 0 kabul edilmiştir (literatürde yaygın tercih).
- Kirlilik yükü evsel gri su ayak izi hesaplamalarında tek parametre üzerinden değerlendirilmiştir (genellikle BOD/COD). Endüstriyel gri su ayak izi hesaplamalarında ise ilgili endüstri faaliyet alanının oluşturduğu atık su içeriğine bağlı olarak Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği temelinde parametre seçilmiştir.
- Sanal su değerleri Water Footprint Network uluslararası veri tabanından alınmıştır.



Atıksu Arıtma Tesisi



Erzurum Kalesi





BULGULAR



4. BULGULAR

4.1. TARIMSAL FAALİYETLERİN SU AYAK İZİ

4.1.1. Yeşil Su Ayak İzi (GSF)

Yeşil su ayak izi, tarımsal üretim sürecinde bitkilerin toprakta depolanan yağış suyunu kullanarak gerçekleştirdiği evapotranspirasyon miktarını ifade eder. Diğer bir ifadeyle, yağış kaynaklı suyun bitki tarafından tüketilen kısmı olup sulama gerektirmeyen doğal su tüketimini temsil eder. Bu nedenle yeşil su ayak izi, özellikle yağışa dayalı tarımın yaygın olduğu bölgelerde toplam su ayak izi bileşeninin önemli bir kısmını oluşturur.

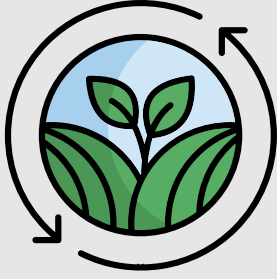
Bu çalışmada Erzurum iline ait yeşil su ayak izi, Water Footprint Network (WFN) metodolojisine uygun şekilde, ürün bazında yağıştan karşılanan su tüketiminin belirlenmesi ve bu tüketimin yıllık ürün verimleri ile ilişkilendirilmesi yoluyla hesaplanmıştır. Her bir ürün için bitki su ihtiyacı (ET_c), etkili yağış miktarı (P_{eff}) ve yetiştirme dönemi boyunca gerçekleşen yeşil su tüketimi dikkate alınmıştır. Toprak su içeriğine katkı sağlayan etkili yağışın, ürünün evapotranspirasyon ihtiyacını karşıladığı ölçüde yeşil su tüketimi hesaplanmıştır.



Her bir tarım ürününe ait yeşil su kullanımı Eşitlik 1 üzerinden belirlenmiştir. Bu hesaplama her ürün için ayrı ayrı yapılmış ve sonuçlar il genelindeki ekim alanlarıyla çarpılarak toplam yeşil su ayak izi elde edilmiştir.

Yeşil su tüketim değerlerinin belirlenmesinde bölgeye ait etkili yağış, ürün büyüme periyotları ve bitki su tüketimi (ET_c) dikkate alınmıştır. Erzurum ilinin iklim özellikleri gereği, yaz döneminde yağışların sınırlı olması ve kış aylarında düşen yağışın önemli bir kısmının kar formunda gerçekleşmesi nedeniyle yeşil su miktarı bitkinin fenolojik dönemine göre değişiklik göstermektedir. Erzurum'da bitkilerin büyüme sezonunda yağışların sınırlı olması, birçok ürün için yeşil su katkısını sınırlamakta; buna karşılık bazı yem bitkileri ve tahıllar için yağmur suyu tarımı belirleyici rol oynamaktadır. Bu çalışmada, tarımsal üretim dönemlerine ilişkin iklim verileri dikkate alınarak her ürün için gerçekçi yeşil su tüketim değerleri hesaplanmıştır.

Çalışmada hesaplanan yeşil su ayak izi değerleri, tarım ürünlerinin üretim miktarlarıyla çarpılarak il genelinde tarımsal faaliyetlerin toplam yeşil su ayak izi belirlenmiştir. Böylece Erzurum'da yağışa dayalı tarımsal su tüketiminin sektörel su kullanım profiline katkısı nicel olarak ortaya konmuştur.



Sonuç olarak, yeşil su ayak izi tarımsal faaliyet kaynaklı su tüketiminin doğal yağışa dayanan kısmını yansıtmakta; mavi su ayak izi ile birlikte değerlendirildiğinde Erzurum ilindeki tarım sektörünün toplam su gereksiniminin çevresel etkilerinin net bir şekilde ortaya konmasına olanak sağlamaktadır.

Çalışmada TUIK verilerine göre Erzurum'da 2020-2024 yıllarında yetiştirilen tarımsal ürünler, ürün çeşitliliği ve ekimi yapılan ortalama alan büyüklüğü Tablo 1'de verildiği gibidir.

Tablo 1. Tarımsal Ürün Çeşitliliği Ve Ekimi Yapılan Ortalama Alan Büyüklüğü

Tarımsal Ürün Çeşidi	Ort. Ekilen alan, (ha)	Tarımsal Ürün Çeşidi	Ort. Ekilen alan, (ha)	Tarımsal Ürün Çeşidi	Ort. Ekilen alan, (ha)
Arpa (Kışlık)	41489	Fasulye (Kuru)	1315	Soğan (Kuru)	17
Ayçiçeği	2299	Fasulye (Taze)	346	Şeker pancarı	2181
Badem	5	Kayısı	130	Üzüm (Sofralık)	57
Bezelye (Taze)	2	Kiraz	75	Çayır otu	76967
Buğday (Kışlık)	99724	Lahana (Beyaz)	233	Fiğ (Yeşilot)	6848
Ceviz	100	Mer c im ek	22	Korunga (Yeşilot)	22850
Çavdar	4436	Mısır (Dane)	144	Mısır (Slaj)	2257
Domates (Yer)	175	Nohut	120	Tritikale	1624
Dut	150	Patates	3250	Yonca (Yeşilot)	35215
Elma	350	Patıcan	5 (0,002)	Yulaf (Yazlık)	21518
Erik	10	Soğan (Yeşil)	27 (0,008)	Toplam	323941



**ERZURUM İLİ İÇİN;
TOPLAM TARIMSAL
YEŞİL SU AYAK İZİ:
479.432.554 M3/YIL**

**TOPLAM TARIMSAL
YEŞİL SU AYAK İZİ:
147.596.362 /TON
OLARAK TESPİT EDİLMİŞTİR.**

Erzurum ilinde 2020-2024 yılları verilerinin ortalaması alınarak yapılan hesaplamalarda ortaya çıkan ortalama ekim alanı toplam 323941 hektardır. Tablo 1'deki ekim alanlarının toplam ekim alanına oranlarını içeren yüzdesel alan büyüklükleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Tarımsal Ürün Çeşitliliği Ve Toplam Ekim Alanındaki % Büyüklüğü

Tarımsal Ürün Çeşidi	Ort. Ekilen alan, (ha)	Tarımsal Ürün Çeşidi	Ort. Ekilen alan, (ha)
Arpa (Kışlık)	12,81	Fasulye (Kuru)	0,41
Ayçiçeği	0,71	Fasulye (Taze)	0,11
Badem	0,002	Kayısı	0,040
Bezelye (Taze)	0,001	Kiraz Lahana	0,023
Buğday (Kışlık)	30,78	(Beyaz)	0,072
Ceviz	0,03	Mercimek	0,007
Çavdar	1,37	Mısır (Dane)	0,044
Domates (Yer)	0,054	Nohut	0,037
Dut	0,046	Patates	1
Elma	0,11	Patlıcan	0,002
Erik	0,003	Soğan (Yeşil)	0,008
Tarımsal Ürün Çeşidi		Ort. Ekilen alan, (ha)	
Soğan (Kuru)		0,005	
Şeker pancarı		0,67	
Üzüm (Sofralık)		0,018	
Yem bitkileri		Ort. Ekilen alan, (ha)	
Çayır otu		23,76	
Fiğ (Yeşilot)		2,11	
Korunga (Yeşilot)		7,05	
Mısır (Slaj)		0,7	
Tritikale		0,5	
Yonca (Yeşilot)		10,87	
Yulaf (Yazlık)		6,64	
Toplam		100	

Tablo 2 incelendiğinde en büyük ekim alanını yem bitkilerinin (%51,64) kapladığını, ikinci sırada tahılların (%44,96) geldiği ve geri kalan %3,4 büyüklüğündeki alanlarda sebze ve meyve yetiştiriciliği yapıldığı görülmektedir. Ürün çeşidi olarak en büyük ekim alanı %30,78 ile buğday ve sonrasında %23,76 ile çayır otu, %12,81 ile arpa ve %10,87 ile yonca gelmektedir. Aynı ortalama değerler üzerinden farklı ürün çeşitlerine bağlı olarak ortaya çıkan ürün verimleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 3. Tarımsal Ürün Çeşitliliği Ve Birim Alan Başına Elde Edilen Üretim Miktarı

Tarımsal Ürün Çeşidi	Verim, ton/ha	Tarımsal Ürün Çeşidi	Verim, ton/ha
Arpa (Kışlık)	3,4	Fasulye (Kuru)	2,8
Ayçiçeği	2,5	Fasulye (Taze)	12,1
Badem	1,5	Kayısı	5
Bezelye (Taze)	2,9	Kiraz	4
Buğday (Kışlık)	3,2	Lahana (Beyaz)	44
Ceviz	2,5	Mercimek	1
Çavdar	2,7	Mısır (Dane)	9,5
Domates (Yer)	43	Nohut	1,2
Dut	5	Patates	36,5
Elma	15	Patlıcan	16,7
Erik	7,5	Soğan (Yeşil)	29
Tarımsal Ürün Çeşidi	Verim, ton/ha	Yem bitkileri	Verim, ton/ha
Soğan (Kuru)	8,5	Çayır otu	7,6
Şeker pancarı	66,6	Fiğ (Yeşilot)	12,5
Üzüm (Sofralık)	26,9	Korunga (Yeşilot)	10,8
		Mısır (Slaj)	53,5
		Tritikale	3,1
		Yonca (Yeşilot)	29,9
		Yulaf (Yazlık)	2,6

Tablo 3 incelendiğinde birim alan başına en yüksek verim sırası ile şeker pancarı (66,6), slajlık mısır (53,5), lahana (44), domates (43), patates (36,5) ve yonca (29,9) olduğu görülmektedir. Bu değerlere bağlı olarak ürün deseninin ilgili metodoloji ile hesaplanan yeşil su ayak izi ve sanal su ayak izi aşağıdaki gibidir.



Tablo 4. Tarımsal Üretim Yeşil Su Ayak İzi

Tarımsal Ürün Çeşidi	Yeşil Su Ayak İzi, m ³ /yıl	Yeşil Su Ayak İzi, m ³ /ton
Arpa (Kışlık)	74928592	22063779
Ayçiçeği	3878514	1525773
Badem	10825	7217
Bezelye (Taze)	3720	1279
Buğday (Kışlık)	368280954	11669231
Ceviz	51780	7 20712
Çavdar	16382443	5983361
Domates (Yer)	295124	6716
Dut	53580	10716
Elma	118090	7873
Erik	4930	657
Fasulye (Kuru)	1951816	693117
Fasulye (Taze)	513761	42474
Kayısı	62487	3013
Kiraz	32475	8119
Lahana (Beyaz)	393206	8970
Nohut	178644	148870
Tarımsal Ürün Çeşidi	Yeşil Su Ayak İzi, m ³ /yıl	Yeşil Su Ayak İzi, m ³ /ton
Mercimek	28357	28188
Mısır (Dane)	304111	32147
Patates	5482750	150319
Patlıcan	6826	409
Soğan (Yeşil)	31530	1087
Soğan (Kuru)	20084	2364
Şeker pancarı	3678504	55246
Üzüm (Sofralık)	2739452	101819
Toplam :	479.432.554	147.596.362
Yem Bitkileri		
Çayır otu	129844139	16977529
Fiğ (Yeşilot)	8957629	712960
Korunga	44832289	4151138
Mısır (Slaj)	3807492	71118
Tritikale	211978	67811
Yonca (Yeşilot)	69267748	2316182
Yulaf (Yazlık)	69545982	26283440
Toplam :	326467257	50580178

Tablo 5. Tarımsal Üretim Yeşil Su Ayak İzinin Ürün Çeşidine Göre Toplam Değere Oranı (%)

Tarımsal Ürün Çeşidi	Yeşil Su Ayak İzi, m ³ /yıl	Yeşil Su Ayak İzi, m ³ /ton
Arpa (Kışlık)	9298	11133
Ayçiçeği	0,481	0,770
Badem	0,001	0,004
Bezelye (Taze)	0,0005	0,0006
Buğday (Kışlık)	45698	58883
Ceviz	0,006	0,010
Çavdar	2033	3019
Domates (Yer)	0,037	0,003
Dut	0,007	0,005
Elma	0,015	0,004
Erik	0,001	0,0003
Fasulye (Kuru)	0,242	0,350
Fasulye (Taze)	0,064	0,021
Kayısı	0,008	0,002
Kiraz	0,004	0,004
Lahana (Beyaz)	0,049	0,005
Nohut	0,022	0,075
Tarımsal Ürün Çeşidi	Yeşil Su Ayak İzi, m ³ /yıl	Yeşil Su Ayak İzi, m ³ /ton
Mercimek	0,004	0,014
Mısır (Dane)	0,038	0,016
Patates	0,680	0,076
Patlıcan	0,001	0,0002
Soğan (Yeşil)	0,004	0,001
Soğan (Kuru)	0,002	0,001
Şeker pancarı	0,456	0,028
Üzüm (Sofralık)	0,340	0,051
Toplam :	59490	74477
Yem Bitkileri		
Çayır otu	16112	8567
Fiğ (Yeşilot)	1112	0,360
Korunga	5563	2095
Mısır (Slaj)	0,472	0,036
Tritikale	0,026	0,034
Yonca (Yeşilot)	8595	1169
Yulaf (Yazlık)	8630	13263
Toplam :	40510	25523



Toplam yeşil su ayak izi hesaplanırken yukarıda Tablo 4'te belirtilen değer Erzurum ili genelinde yetiştirilen Tarım İl Müdürlüğü ve TÜİK verilerinden alınan toplam ürün çeşidi için hesaplanan değeri ifade etmektedir. Elde edilen değerlerin toplam yeşil su ayak izindeki paylarının daha anlaşılır ve görünür olması açısından rakamlar % olarak Tablo 5'de verilmiştir.

Hesaplamalarda toplam yeşil su ayak izinden her bir ürün çeşidi için alınan payın net görülebilmesi için Erzurum ilinde yetiştirilen bütün ürünler için ortaya çıkan toplam rakam dikkate alınmıştır. Tablo 5 incelendiğinde en yüksek yeşil su ayak izinin %45,698 ile buğday üretiminde gerçekleştiği görülmektedir. Bu ürünü yeşil su ayak izi miktarında çayır otu, arpa, yonca ve yulaf izlemektedir. Bu durum tahıl ürünlerinin ve yem bitkilerinin yağışa bağımlılıklarının yüksek olduğunu göstermektedir.

Çalışmada hayvansal üretimden kaynaklanan su ayak izi de hesaplanmıştır. Bu yüzden yukarıdaki tabloda verilen yem bitkileri için ortaya çıkan yeşil su ayak izi (yıl boyunca tüketilen su miktarı) ile yeşil su ayak izi (verim dikkate alınarak ortaya çıkan ton ürün başına tüketilen su miktarı) tarımsal üretim için ortaya çıkan yeşil su ayak izi değerine dahil edilmeyecektir. Yem bitkileri için ortaya çıkan değer hayvansal üretim için ortaya çıkan su ayak izi hesaplamalarına dahil edilmiştir.

Bu durum dikkate alındığında Erzurum ili için;

- Toplam Tarımsal Yeşil Su Ayak İzi: 479.432.554 m³/yıl
- Toplam Tarımsal Yeşil Su Ayak İzi: 147.596.362 m³/ton olarak tespit edilmiştir.

4.1.2. Mavi Su Ayak İzi

Mavi su ayak izi, yüzeysel ve yeraltı su kaynaklarından çekilerek kullanılan tatlı su miktarını ifade eder. Tarımsal sulama, endüstriyel tüketim ve yerleşim alanlarında kullanılan içme-kullanma suyu bu bileşen kapsamında değerlendirilir. Çalışmanın bu kısmında tarımsal sulama suyunun mavi su ayak izi analiz edilmiştir; çünkü Erzurum ilindeki toplam mavi su kullanımının önemli bir kısmı tarımsal faaliyetlerden kaynaklanmaktadır.

Tarımsal mavi su tüketimi, bitkilerin evapotranspirasyon ihtiyacının yağışla karşılanamayan kısmının sulama ile sağlanması esasına dayanır. Bu nedenle her ürün için mavi su tüketimi (CWU_{blue}), aşağıdaki bileşenlere göre hesaplanmıştır:

- Referans evapotranspirasyon (ET_o),
- Ürün katsayısı (K_c),
- Büyüme dönemine bağlı evapotranspirasyon (ET_c),
- Etkili yağış (P_{eff}),
- Net ve brüt sulama suyu ihtiyacı (IR).

Mavi su ayak izi birim ürün başına Eşitlik 2 üzerinden belirlenmiştir. Erzurum için tarımsal mavi su ayak izi hesaplamalarında sulama yapılmakta olan ürünler dikkate alınmış; büyüme dönemlerinde yağışın yetersiz kaldığı aylar için ildeki sulama suyu ihtiyacı modellenmiştir. Özellikle yem bitkileri, sebzeler ve sulama gerektiren tahıllar bu kapsamda analiz edilmiştir.

Ayrıca endüstriyel tesisler ve yerleşim alanları için kullanılan mavi su miktarları da ildeki toplam mavi su ayak izine eklenmiştir. Bu bölümde tarımsal faaliyetlerden kaynaklı mavi su hesabı verilecek olup ilgili bölümlerde evsel kullanım kaynaklı ve endüstriyel kullanım kaynaklı mavi su hesabı yapılacaktır. Tarımsal üretim faaliyetler için ihtiyaç duyulan mavi su miktarının hesaplanmasında yeşil su hesaplamalarında kullanılan Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) tarafından geliştirilen Cropwat uygulaması ve iklim verilerinin alındığı Climwat uygulaması kullanılmıştır. Ayrıca çalışmalarda karşılaştırma ve veri doğrulama için T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü tarafından geliştirilen Sulama Yönetimi ve Bitki Su Tüketimi Hesaplama Sistemi (SUET) uygulaması kullanılmıştır. Mavi su ayak izi için elde edilen veriler aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 6. Tarımsal Üretimin Mavi Su Ayak İzi

Tarımsal Ürün Çeşidi	Mavi Su Ayak İzi, m ³ /yıl	Mavi Su Ayak İzi, m ³ /ton
Arpa (Kışlık)	91811727	27035255
Ayçiçeği	10592873	4167141
Badem	20250	13500
Bezelye (Taze)	4631	1593
Buğday (Kışlık)	281075587	89060706
Ceviz	130551	52220
Çavdar	16541699	6041526
Domates (Yer)	779553	17740
Dut	81840	4547
Elma	362481	24165
Erik	11421	1523
Fasulye (Kuru)	5369270	1906701
Fasulye (Taze)	1403951	116067
Kayısı	118727	5725
Kiraz	72307	18077
Lahana (Beyaz)	1014201	22672
Nohut	61358	60992
Tarımsal Ürün Çeşidi	Mavi Su Ayak İzi, m ³ /yıl	Mavi Su Ayak İzi, m ³ /ton
Mercimek	600111	63437
Mısır (Dane)	381370	317808
Patates	15176525	416092
Patlıcan	17598	1054
Soğan (Yeşil)	41972	1447
Soğan (Kuru)	26735	3147
Şeker pancarı	11058587	166085
Üzüm (Sofralık)	235581	8756
Toplam :	436990906	129527976
Yem bitkileri		
Çayır otu	496757095	64952549
Fiğ (Yeşilot)	21660615	1724022
Korunga	34542227	3198354
Mısır (Slaj)	9044767	168941
Tritikale	5175675	1655686
Yonca (Yeşilot)	182996679	6119062
Yulaf (Yazlık)	41002435	15496007
Toplam :	791179493	93314621

TARIMSAL SULAMA, ENDÜSTRİYEL TÜKETİM VE YERLEŞİM ALANLARINDA KULLANILAN İÇME-KULLANMA SUYU BU BİLEŞEN KAPSAMINDA DEĞERLENDİRİLİR. ÇALIŞMANIN BU KISMINDA TARIMSAL SULAMA SUYUNUN MAVİ SU AYAK İZİ ANALİZ EDİLMİŞTİR.

Tablo 6'da verilen değerler tarımsal üretim için ihtiyaç duyulan mavi su miktarını ve yem bitkileri üretimi için ihtiyaç duyulan mavi su ayak izini göstermektedir. Yem bitkileri için ihtiyaç duyulan değer hayvansal üretim su ihtiyacı içerisinde değerlendirileceğinden dolayı yem bitkileri için gerekli olan değerlerin çıkarılması sonucunda ortaya çıkan tarımsal üretim mavi su ayak izi ve ton ürün başına ihtiyaç duyulan sanal su ayak izi aşağıdaki gibidir.

Erzurum ili için;

- Toplam Tarımsal Mavi Su Ayak İzi: 436.990.906 m³/yıl
- Toplam Tarımsal Mavi Sanal Su Ayak İzi: 129.527.976 m³/ton olarak tespit edilmiştir.

Elde edilen değerlerin toplam mavi su ayak izindeki paylarının daha anlaşılır ve görünür olması açısından rakamlar % olarak Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Tarımsal Üretimin Mavi Su Ayak İzinin Ürün Çeşidine Göre Toplam Değere Oranı (%)

Tarımsal Ürün Çeşidi	Mavi Su Ayak İzi, m ³ /yıl	Mavi Su Ayak İzi, m ³ /ton
Arpa (Kışlık)	7475	12132
Ayçiçeği	0,862	1870
Badem	0,002	0,006
Bezelye (Taze)	0,0004	0,001
Buğday (Kışlık)	22886	39966
Ceviz	0,011	0,023
Çavdar	1347	2711
Domates (Yer)	0,063	0,008
Dut	0,007	0,002
Elma	0,030	0,011
Erik	0,001	0,001
Fasulye (Kuru)	0,437	0,856
Fasulye (Taze)	0,114	0,052
Kayısı	0,010	0,003
Kiraz	0,006	0,008
Lahana (Beyaz)	0,083	0,010
Nohut	0,005	0,027
Tarımsal Ürün Çeşidi	Mavi Su Ayak İzi, m ³ /yıl	Mavi Su Ayak İzi, m ³ /ton
Mercimek	0,049	0,028
Mısır (Dane)	0,031	0,143
Patates	1236	0,187
Patlıcan	0,001	0,0005
Soğan (Yeşil)	0,003	0,001
Soğan (Kuru)	0,002	0,001
Şeker pancarı	0,900	0,075
Üzüm (Sofralık)	0,019	0,004
Toplam :	35581	58125
Yem Bitkileri		
Çayır otu	40447	29147
Fiğ (Yeşilot)	1764	0,774
Korunga	2812	1435
Mısır (Slaj)	0,736	0,076
Tritikale	0,421	0,743
Yonca (Yeşilot)	14900	2746
Yulaf (Yazlık)	3338	6954
Toplam :	64419	41875

Hesaplamalarda toplam mavi su ayak izinden her bir ürün çeşidi için alınan payın net görülebilmesi için Erzurum ilinde yetiştirilen bütün ürünler için ortaya çıkan toplam rakam dikkate alınmıştır. Tablo 7 incelendiğinde en yüksek mavi su ayak izinin %40,447 ile çayır otu üretiminde gerçekleştiği görülmektedir. Bu ürünü mavi su ayak izi miktarında buğday, yonca arpa ve yulaf izlemektedir. Bu durum tahıl ürünlerinin ve yem bitkilerinin mevsimsel yağışların dışında yüzeysel ve yeraltı su kaynaklarına bağımlılıklarının yüksek olduğunu göstermektedir.

4.1.3. Tarımsal Sanal Su Ayak İzi

Tarımsal sanal su ayak izi, bir tarımsal ürünün üretim sürecinde kullanılan toplam su miktarını ifade eder ve ürünün yeşil, mavi ve gri su ayak izi bileşenlerinin toplamı olarak tanımlanır. Bu kavram, tarımsal ürünlerin gerçek su tüketimini değerlendirmenin yanı sıra, gıda ticareti ve ithalat-ihracat ilişkilerinde su kaynaklarının dolaylı kullanımını analiz etmek bakımından önemlidir.

Tarımsal sanal su ayak izi hesaplamasında öncelikle her ürün için yeşil (WF_{green}), mavi (WF_{blue}) ve varsa gri (WF_{grey}) su ayak izi bileşenleri ayrı ayrı belirlenmiştir. Gri su ayak izi, özellikle gübre ve pestisit kullanımı sonucu tarımsal drenaj sularındaki kirleticilerin alıcı ortamlarda seyreltilmesi için gereken su miktarını ifade eder.

Her ürün için sanal su değeri Eşitlik 5 üzerinden belirlenmiştir. Daha sonra her ürünün ekim alanı ve yıllık üretim miktarı dikkate alınarak il genelindeki toplam tarımsal sanal su ayak izi hesaplanmıştır. Bu hesaplama, Erzurum'un tarımsal üretim sisteminin toplam su tüketimini ve farklı ürünlerin su kullanım yoğunluğunu karşılaştırmalı olarak değerlendirme olanağı sağlamıştır. Çalışmada Erzurum ili tarımsal üretiminde kullanılan gübre türü ve miktarı saptanamadığından dolayı gri su ayak izi hesaplaması yapılamamıştır. Bu yüzden tarımsal sanal su ayak izi hesaplamasında yeşil ve mavi su ayak izi bileşenleri kullanılmıştır.

Ürünlerin üretim su gereksinimlerine göre:

$$VSW = 805899810 + 1228170399 \rightarrow VSW = 2034070209 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

$$VSW = 198176720 + 222842597 \rightarrow VSW = 421019317 \text{ m}^3/\text{ton}$$

olarak bulunmuştur.

4.1.4. Hayvansal Faaliyetlerin Su Ayak İzi

Erzurum ilinde 2020-2024 yıllarında TÜİK verilerine göre var olan hayvan sayıları tespit edilmiş ve bu yıllara ait ortalama hayvan sayıları Tablo 8'de verilmiştir.



Tablo 8. 2020-2024 Yıllarında TÜİK Verilerine Göre Erzurum İli Hayvan Sayıları

Hayvan türü, adet	Hayvan sayısı
2 yaş üzeri inekve manda	357524
2 yaş üzeri tosun, boğa ve öküz	106806
2 yaş ve altı dana, buzağı ve düve	323107
Koyun	815827
Keçi	88749
At, katır ve eşek	6787
Kümes hayvanları	186148

Şekil 2. Erzurum ili hayvan varlığı



Hayvan türlerine bağlı olarak yıllık su tüketim değerleri Mekonnen ve Hoekstra tarafından 2010 yılında yapılan çalışmada aşağıdaki gibi verilmiştir.

Tablo 9. Hayvan Türüne Bağlı Olarak Değişen Hayvan Başı Ortalama Yıllık Su Tüketimi

Hayvan türü	Hayvan başına ortalama yıllık su tüketimi (m ³ /yıl)
Dişi büyükbaş	2056
Erkek büyükbaş	630
Keçi	32
Koyun	68
Kümes hayvanı	33
At	1599

Hayvan tür ve sayısı ile hayvan başına tüketilen ortalama yıllık su tüketimi değerleri ilişkilendirildiğinde yıllık olarak Erzurum ilinde var olan hayvanların içme suyu miktarı tespit edilmiştir.

Bu değer toplam hayvan varlığı dikkate alındığında 28006447 m³/yıl olarak bulunur. Hayvanların bakımı, temizliği ve alan temizliği için içme suyunun yaklaşık olarak %15'inin kullanıldığı düşünüldüğünde servis suyu olarak 4200967 m³/yıl değerinde suya ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Bu iki su tüketim bileşenin dışında hayvansal faaliyetlerin su ayak izi hesaplamalarında yem bitkileri için tüketilen yeşil ve mavi su miktarları da dikkate alınır. Yem bitkileri için ortaya çıkan yeşil ve mavi su ayak izi hesaplamaları tarımsal faaliyetlerin su ayak izi bölümünde gösterilen yöntem ile tespit edilmiştir. Bu yüzden bu bölümde yalnızca rakamsal büyüklükleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

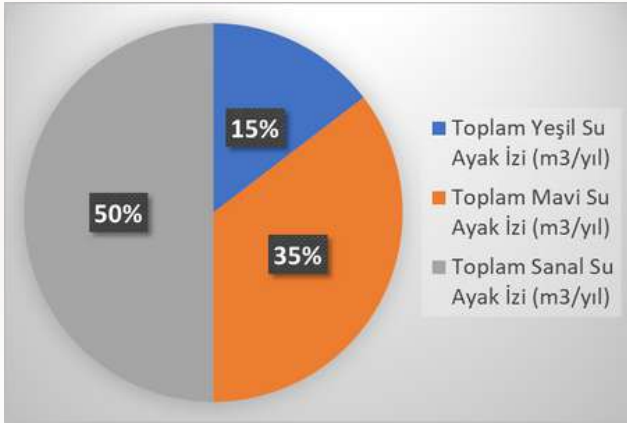
Tablo 10. Yem Bitkileri Yeşil Ve Mavi Su Ayak İzi Değerleri

Toplam Yeşil Su Ayak İzi (m ³ /yıl)	326467255
Toplam Yeşil Su Ayak İzi (m ³ /ton)	50580178
Toplam Mavi Su Ayak İzi (m ³ /yıl)	791179493
Toplam Mavi Su Ayak İzi (m ³ /ton)	93314622
Toplam Sanal Su Ayak İzi (m ³ /yıl)	1117646750
Toplam Sanal Su Ayak İzi (m ³ /ton)	143894799

Elde edilen sonuçlara göre Hayvansal faaliyetler için ortaya çıkan su ayak izi aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} \text{Hayvansal Faaliyetler Su Ayak İzi } m^3/\text{yıl} &= \\ &= \text{İçme Suyu} + \text{Servis Suyu} + \text{Yem bitkileri} \\ \text{Hayvansal Faaliyetler Su Ayak İzi } m^3/\text{yıl} &= \\ &= 28006447 + 4200967 + 1117646750 \\ \text{Hayvansal Faaliyetler Su Ayak İzi} &= \\ &= 1149854164 \text{ m}^3/\text{yıl} \end{aligned}$$

olarak bulunmuştur.

Şekil 3. Yem bitkileri su ayak izi bileşenleri

Toplam Hayvansal Faaliyet Su Ayak İzi:
1.149.854.164 m³/yıl

4.2. Yerleşim Alanlarının Su Ayak İzi

Yerleşim alanları, doğrudan kullanılan içme-kullanma suyu, bireylerin oluşturduğu kirlilik yükü ve tüketilen gıdalar ile ürünler üzerinden dolaylı su tüketimi nedeniyle önemli bir su ayak izi bileşenidir. Bu çalışmada Erzurum şehir merkezinde yaşayan nüfusun doğrudan su tüketimi, hanelerden kaynaklanan kirlilik yükünden oluşan gri su ayak izi ve bireylerin gıda tüketimi üzerinden oluşan sanal su ayak izi hesaplanmıştır.

4.2.1 Yerleşim Alanlarında Doğrudan Su Tüketimine Bağlı Mavi Su Ayak İzi

Doğrudan su tüketimini ifade eden bu bileşen, hanelerde içme, yemek hazırlama, duş, temizlik, bahçe sulama gibi faaliyetler için kullanılan şehir şebeke suyunu kapsamaktadır.

Hesaplamalarda kişi başı günlük su tüketim değeri dikkate alınmış ve yıllık toplam tüketim, şehir nüfusu ile çarpılarak bulunmuştur. Erzurum özelinde kentsel nüfusun yoğunluğu ve iklim koşulları, kişi başı tüketim düzeyini etkileyen temel faktörlerdir. Bu değer, şehirdeki toplam mavi su talebinin önemli bir kısmını oluşturur. Çalışmada Erzurum ili için kişi başı günlük su tüketimi literatür ile uyumlu olarak 250 lt/kişi-gün değeri alınmıştır. 2015-2024 yıllarında TÜİK tarafından yayınlanan nüfus bilgileri aşağıdaki gibidir.

Tablo 11. 2015-2024 Yılları Erzurum İli Nüfus Değerleri (TÜİK)

Yıl	2015	2016	2017	2018	2019
Nüfus	762321	762021	760476	767848	762062
Yıl	2020	2021	2022	2023	2024
Nüfus	758279	756893	749754	749993	745005

10 yıllık verinin ortalaması 757466 olarak bulunmuştur. Hesaplamalarda ortalama değer alınmıştır. Bu değerler yardımıyla yerleşim merkezinde tüketilen su miktarı;

$$Q = N * q = 757466 \text{ kişi} * 250 \text{ L/gün} - \text{kişi} \rightarrow$$

$$Q = 189366500 \text{ L/gün} \rightarrow Q = 189366,5 \text{ m}^3/\text{gün}$$

$$Q = 189366,5 \text{ m}^3/\text{gün} \times 365 \text{ gün/1 yıl} \rightarrow$$

$$Q \cong 69118772,5 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

Erzurum ili için;

Toplam Evsel Mavi Su Ayak İzi: 69.118.773 m³/yıl

4.2.2. Yerleşim Alanlarının Gri Su Ayak İzi

Gri su ayak izi, yerleşim alanlarında oluşan evsel atık suların alıcı ortamda seyreltilmesi için gereken su miktarını temsil eder. Bu çalışmada gri su ayak izi; kişi başı günlük atıksu oluşumu, ortalama kirlilik konsantrasyonları (BOD, COD veya azot-fosfor parametreleri) ve alıcı ortam için belirlenmiş maksimum konsantrasyon değerleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Evsel atık suların yüksek organik madde ve besin maddesi içerdiği dikkate alındığında, yerleşim kaynaklı gri su ayak izi şehir çevresindeki yüzey suları üzerinde önemli bir yük oluşturmaktadır. Bu nedenle hesaplamalar, ildeki kentsel atıksu arıtma tesislerinin arıtma verimliliğini de dolaylı olarak yansıtan bir gösterge niteliğindedir. TÜİK verilerine göre Erzurum ilinde atıksularının arıtımı yapılan nüfusun atıksuları, arıtımı yapılamayan nüfusa oranı 4:1'dir. Yani toplam nüfusun %80'inin atıksuları arıtılmaktadır. Tüketilen suyun %100'ünün atık suya dönüştüğü kabulü ile

Arıtılmayan debi

$$Q_{arıtılmayan} = Q * 0,2 \rightarrow Q_{arıtılmayan} = 189366,5 * 0,2 \rightarrow$$

$$Q_{arıtılmayan} = 37873,3 \text{ m}^3/\text{gün} \cong 37873 \text{ m}^3/\text{gün}$$

Günlük kirlilik yükleri (arıtılmayan kısmın)

Formül: $L = C * Q$

C: konsantrasyon (mg/L=g/m³),

Q: debi (m³/gün).

Dönüşüm: 1 mg/L = 1 g/m³ = 0.001 kg/m³

Tipik konsantrasyon değerleri (evsel atıksu için ortalama) – literatürden (Metcalf & Eddy, ATV, Türkiye uygulamaları):

Tablo 12. Evsel Atıksu İçin Ortalama Konsantrasyon Değerleri

BOD ₅	COD	TSS	Toplam N	Toplam P
300 mg/L	600 mg/L	350 mg/L	60 mg/L	10 mg/L

BOD₅:

$$L_{BOD} = 300 \text{ mg/L} * 37873 \text{ m}^3/\text{gün} * 0,001 \rightarrow L_{BOD} = 11361,9 \text{ kg/gün}$$

COD:

$$L_{COD} = 600 \text{ mg/L} * 37873 \text{ m}^3/\text{gün} * 0,001 \rightarrow L_{COD} = 22723,8 \text{ kg/gün}$$

TSS:

$$L_{TSS} = 350 \text{ mg/L} * 37873 \text{ m}^3/\text{gün} * 0,001 \rightarrow L_{TSS} = 13255,6 \text{ kg/gün}$$

Toplam N:

$$L_{TN} = 60 \text{ mg/L} * 37873 \text{ m}^3/\text{gün} * 0,001 \rightarrow L_{TN} = 2272,4 \text{ kg/gün}$$

Toplam P:

$$L_{TP} = 10 \text{ mg/L} * 37873 \text{ m}^3/\text{gün} * 0,001 \rightarrow L_{TP} = 378,7 \text{ kg/gün}$$

Yıllık kirlilik yükleri

$$L_{y\text{ıllık}} = 365 * L_{g\text{ünlük}}$$

$$L_{BOD} = 365 * 11361,9 \text{ kg/gün} = 4147093,5 \text{ kg/yıl} \cong 4147 \text{ ton/yıl}$$

$$L_{COD} = 365 * 22723,8 \text{ kg/gün} = 8294187 \text{ kg/yıl} \cong 8294 \text{ ton/yıl}$$

$$L_{TSS} = 365 * 13255,6 \text{ kg/gün} = 4838294 \text{ kg/yıl} \cong 4838 \text{ ton/yıl}$$

$$L_{TN} = 365 * 2272,4 \text{ kg/gün} = 829426 \text{ kg/yıl} \cong 829 \text{ ton/yıl}$$

$$L_{TP} = 365 * 378,7 \text{ kg/gün} = 138225,5 \text{ kg/yıl} \cong 138 \text{ ton/yıl}$$

Seçilen C_{max}/C_{nat} (tipik regülasyon/uygulama değerleri; mg/L)

• BOD₅:

$$C_{max} = 20 \text{ mg/L}, C_{nat} = 2 \text{ mg/L}$$

• Toplam N:

$$C_{max} = 10 \text{ mg/L}, C_{nat} = 0,5 \text{ mg/L}$$

• Toplam P:

$$C_{max} = 1 \text{ mg/L}, C_{nat} = 0,05 \text{ mg/L}$$

• Hoekstra formülü

$$WF_{grey} = \frac{L \text{ (kg/yıl)}}{C_{max} - C_{nat}} \text{ (m}^3/\text{yıl)}$$

Hesap sonuçları (arıtılmayan kısım için)**BOD₅:**

$$WF_{greyBOD} = \frac{4147093,5}{(0,02 - 0,002)} \rightarrow WF_{greyBOD} = 230394083,3 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

$$\text{Kişi başı} = \frac{230394083,3}{757466}$$

$$\rightarrow \text{Kişi başı} \cong 304,2 \text{ m}^3/\text{yıl} - \text{kişi} \cong 833,3 \text{ L/gün} - \text{kişi}$$

Toplam N:

$$WF_{greyN} = \frac{829426}{(0,01 - 0,0005)} \rightarrow WF_{greyN} = 873072368,4 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

$$\text{Kişi başı} = \frac{87308000}{757466} \rightarrow$$

$$\text{Kişi başı} \cong 115 \text{ m}^3/\text{yıl} - \text{kişi} \cong 316 \text{ L/gün} - \text{kişi}$$

Toplam P:

$$WF_{greyP} = \frac{138225,5}{(0,001 - 0,00005)} \rightarrow WF_{greyP} = 145500526,3 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

$$\text{Kişi başı} = \frac{145500526,3}{757466}$$

$$\rightarrow \text{Kişi başı} \cong 192 \text{ m}^3/\text{yıl} - \text{kişi} \cong 526 \text{ L/gün} - \text{kişi}$$

Water Footprint Network (WFN) (Hoekstra, Mekonnen, Chapagain, 2011) metodolojisinde yerleşim merkezi için gri WF, farklı kirleticiler için hesaplanan değerlerden en yüksek olanı alınır.

$WF_{greyBOD} > WF_{greyP} > WF_{greyN}$ olduğundan dolayı Erzurum ili evsel gri su ayak izi hesaplamalarında BOD bazlı gri su ayak izi değeri kullanılmıştır.

Dolayısıyla (seçtiğimiz sınırlarla):

- Yerleşim için gri su ayak izi:

$$WF_{grey,total} = WF_{grey,BOD} \cong 230394084 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

(BOD bazlı, en büyük)

- Kişi başı gri su ayak izi:

$$WF_{grey,total} \cong 304 \text{ m}^3/\text{kişi} - \text{yıl} \cong 833 \text{ L/kişi} - \text{yıl}$$

Toplam Evsel Gri Su Ayak İzi:

$$\mathbf{230.394.084 \text{ m}^3/\text{yıl}}$$

4.2.3. Yerleşim Alanlarının Sanal Su Ayak İzi

Sanal su ayak izi, bireylerin tükettiği gıdaların ve ürünlerin üretimi sırasında kullanılan suyu temsil eder ve dolaylı su tüketiminin en büyük bileşenlerinden biridir. Erzurum ilinde tüketim alışkanlıklarına göre et ürünleri, süt ürünleri, ekme ve tarım ürünleri tüketimleri dikkate alınmış; her bir gıda ürününün literatürde belirtilen sanal su içerikleri (m³/ton veya litre/kg) kullanılarak kişi başı ve toplam şehir sanal su ayak izi hesaplanmıştır.

Hesaplama Water Footprint Network (Anket Uluslararası Sanal Su Ayakizi Ağı) <https://www.waterfootprint.org/resources/interactive-tools/extended-water-footprint-calculator/> adresli internet sitesinden bulunan hesaplama aracı kullanılmıştır. Kullanılan hesaplama aracındaki anket Türkçe'ye çevrilmiş ve Erzurum il merkezinde ve ilçelerde yaşayan farklı gelir gruplarında ve farklı yaşlardaki 250 kişiye uygulanmıştır. Elde edilen anket sonuçları belirtilen hesaplama aracına girilerek sonuçlar alınmıştır. Hesaplanan sonuçların logaritmik ortalaması alınarak Erzurum ilinde yaşayan kişiler için ortalama temsili bir değer bulunmuştur. Ek 1'de verilen anket sonuçlarından elde edilen temsili ortalama değer aşağıda verilmiştir.

$$WF_{virtual, person} = 1627 \text{ m}^3/\text{yıl} - \text{kişi}$$

Anket sonuçlarından elde edilen yılda bir kişi için kullanılan 1627 m³ değerindeki dolaylı su kullanımı üç ana başlık altında toplanmaktadır ve bu başlıklar aşağıda verilmiştir.

Tablo 13. Kişi Başı Sanal Su Ayak İzi Bileşenleri

Su Ayak İzi	Birim	Miktar
Gıda su ayak izi	m ³ /yıl	1259
Evsel su ayak izi		201
Endüstriyel su ayak izi		167
Toplam su ayak izi		1627

Tablodan da görüldüğü gibi toplam su ayak izi içerisinde en önemli payı gıda kaynaklı su ayak izi almaktadır. Gıdadan kaynaklanan su ayak izi detaylandırıldığında aşağıdaki tablo ortaya çıkmaktadır.

Tablo 14. Kişi başı sanal su ayak izi gıda bileşen dağılımı

Kişi başı gıda su ayak izi dağılımı m ³ /yıl	
Tahıl	141
Et	620
Sebze	30
Meyve	53
Süt	123
Çay/kahve	117
Şeker	3
Yumurta	87
Diğer	85
Toplam	1259

Anket sonuçları incelendiğinde et ürünlerinin yüksek su gereksinimi nedeniyle toplam sanal su payı içerisinde önemli bir yer tuttuğu görülmektedir. Bu değeri Erzurum ili sosyokültürel ve ekonomik özelliklerinden dolayı tahıllar ve süt ürünleri için ihtiyaç duyulan su ihtiyacı izlemektedir.

Erzurum ilinde kişi başı ortaya çıkan su ayak izi değeri yerleşim merkezinin 2015-2024 yıllarına ait nüfus değerlerinin ortalaması olan 757466 kişi ile ilişkilendirildiğinde;

$$WF_{virtual,total} = WF_{virtual,person} * N \rightarrow$$

$$WF_{virtual,total} = 1627 \text{ m}^3/\text{yıl} - \text{kişi} * 757466 \text{ kişi} \rightarrow$$

$$WF_{virtual,total} = 1232398441 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

değeri elde edilir.

Toplam Sanal (dolaylı) Su Ayak İzi:

1.232.398.441 m³/yıl

Bu hesaplama, yerleşim alanlarının su kaynakları üzerindeki görünmeyen etkilerini ortaya çıkarmakta ve sürdürülebilir beslenme alışkanlıklarının geliştirilmesi açısından önemli bir değerlendirme sunmaktadır.



4.3. Endüstriyel Faaliyetlerin Su Ayak İzi

Erzurum'daki endüstriyel faaliyetler sınırlı olmakla birlikte, mevcut sektörler su tüketimi ve atıksu oluşumu açısından şehir su ayak izi üzerinde belirli bir etki yaratmaktadır. Başlıca sektörler arasında süt ürünleri tesisleri, yem fabrikaları, et işleme tesisleri, sabun-deterjan üretimi, tekstil faaliyetleri ve küçük ölçekli gıda işletmeleri yer almaktadır.

Endüstriyel su ayak izi hesaplamaları mavi su ayak izi ve gri su ayak izi olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır:

4.3.1. Endüstriyel Faaliyetlerin Mavi Su Ayak İzi

Erzurum Bilim, Sanayi ve Teknoloji İl Müdürlüğünden alınan 2024 yılı verilerine göre sektörel bazda üretim miktarları ve çekilen su miktarları tabloda verilmiştir.

Tablo 15. Erzurum ili 2024 yılı endüstri kolları, yıllık üretim ve su tüketimi değerleri

Tablo 15 incelendiğinde, farklı endüstri sektörlerinde yaklaşık olarak toplam 4637833 ton/yıl değerinde üretim yapılırken bu üretim değeri için yaklaşık olarak 6484395 m³/yıl değerinde su tüketimi gerçekleşmiştir. Endüstriyel faaliyetler incelendiğinde çoğu endüstrinin atık su oluşturma potansiyeli ya çok düşüktür ya da yoktur. Gri su ayak izi oluşturan endüstri faaliyetleri için ayrı bir başlık altında hesaplama yapılmıştır.

Tablo 15. Erzurum İli 2024 Yılı Endüstri Kolları, Yıllık Üretim Ve Su Tüketimi Değerleri

Endüstri	Üretim (ton/yıl)	Su Tüketimi (m ³ /yıl)	Mavi Su Ayak İzi (m ³ /yıl)
Süthane işletmeciliği ve peynir imalatı	5724	46 112 8	461128
Çiftlik hayvanları için hazır yem imalatı	376 564	193 39	19339
Sabun deterjan imalatı	1314	3059	3059
Et ve kümes hayvanları etlerinden üretilen ürünlerin imalatı	7656	16 445 5	164455
Madencilik	1737912	710968	710968
Şeker imalatı	183 062	757101	757101
Hazır yemeklerin imalatı	1000	200944	200944
Taş ve mermerin kesilmesi, şekil verilmesi ve bitirilmesi	83	106 535	106535
Çimento ve Hazır beton imalatı	718266	680627	680 627
İnşaat amaçlı beton ürünlerin imalatı	868 990	1071379	1071379
Ekmek, taze pastane ürünleri ve taze kek imalatı	131 499	595607	595607
Mobilya imalatı	1365	157002	157002
Metal sanayi	15141	313 154	313154
Matbaacılık	415	681 66	68166
Tekstil ürünlerini imalatı	3923	68574	68574
Muhtelif imalat	578878	265024	265024
Diğer plastik ürünlerin imalatı	6041	456781	456 781
Elektrikli aydınlatma ekipmanlarının imalatı	---	2099	2099
Plastik inşaat malzemesi imalatı	---	200 89	20 089
Motorlu kara taşıtlarının bakım ve onarımı	---	270 197	270197
Elektrik enerjisi üretimi	---	92 167	92167

Erzurum'da endüstriyel mavi su tüketimi en çok hazır beton ve inşaat amaçlı beton ürünlerin imalatı tesislerinde 1752006 m³/yıl değeri ile görülmektedir. Bu sektörde su, proses suyu (beton karışım suyu, mikser nemlendirme- ön yıkama suyu ve agrega nemlendirme suyu), temizlik kullanım suyu (ekipman ve üretim alanı temizlik suyu) ve yardımcı ekipmanlarda su kullanımı (toz bastırma suyu ve laboratuvar kullanımları vb) gibi 3 farklı alanda kullanılır.



Şeker imalatı, madencilik, unlu ürünlerin imalatı ve süthane işletmeciliği ve peynir imalatı sektörleri de hazır beton ve inşaat amaçlı beton ürünlerin imalatı tesislerinden sonra en fazla su tüketiminin gerçekleştiği sektörlerdir. Bu sektörlerde, proses suyu, temizlik işlemleri, ekipman yıkama süreçleri ve soğutma sistemleri önemli miktarda su tüketmektedir. Doğrudan üretim prosesine giren suya ek olarak tesis içi hijyen uygulamaları nedeniyle su kullanım yoğunluğu yüksektir.

Erzurum ilinde faaliyet gösteren farklı sektörlerde yıllık tüketilen su miktarı 6486395 m³/yıl değerine ulaşmaktadır. Endüstriyel faaliyetler sonucu tüketilen bu değer doğrudan endüstri mavi su ayak izini oluşturmaktadır. Tüketilen bu değer Erzurum ili Toplam Endüstriyel Mavi Su Ayak İzi değeri olarak alınmıştır.

Toplam Endüstriyel Mavi Su Ayak İzi:

6.486.395 m³/yıl

Sabun ve deterjan üretimi yapılan tesislerde ise kimyasal karışımların hazırlanması, ekipman temizliği ve proses suyu tüketimi mavi su ayak izini oluşturmaktadır. Bu sektörde yıllık su çekimi görece düşük olsa da kimyasal içerik nedeniyle gri su bileşeni önem kazanmaktadır.

4.3.2. Endüstriyel Faaliyetlerin Gri Su Ayak İzi

Endüstriyel gri su ayak izi hesaplamalarında her tesis için yıllık atıksu debisi ve atıksu içindeki kirletici konsantrasyonlar dikkate alınmıştır. Çalışmada sektörlere göre literatürde yer alan ortalama kirletici değerleri (C_{eff}) alınarak gri su ayak izi hesaplaması yapılmıştır.

İş kolu türlerine göre Erzurum ilinde faaliyet gösteren süt işletmeciliği ve peynir imalatı, hazır yem imalatı, temizlik maddesi imalatı, madencilik, et ve kümes hayvanları etlerinden üretilen ürünlerin imalatı, hazır yemek imalatı, şeker, şekerleme ve çikolata imalatı, taş ve mermerin kesilmesi, şekil verilmesi ve bitirilmesi imalatı gibi sektörlerin atık su oluşturduğu bilinmektedir. Hazır beton imalatında ve Taş ve mermerin kesilmesi, şekil verilmesi ve bitirilmesi imalatında atık su oluşumu gözlense de bu iş kollarında ortaya çıkan atık su yüksek miktarda çökebilen katı madde içermektedir. Üretimden çıkan bu tür sular tesis içerisinde bir çöktürme havuzunda bekletilerek çökebilen katı madde giderimi gerçekleştirilir ve su çevrim içi tekrar kullanıldığı için gri su ayak izi hesaplamasına dahil edilmemiştir. Yerinde ölçüm yapılmadığından gri su ayak izi hesaplanacak her bir iş kolu için literatür taraması yapılmış ve atık suyun tipik değerleri literatür ortalaması olarak alınmıştır.

Alıcı ortamda müsaade edilen maksimum değer Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğinde bulunan iş kollarına ait değerler alınmıştır. Sonuç olarak Erzurum Bilim, Sanayi ve Teknoloji İl Müdürlüğünden alınan 2024 yılı verilerine göre ortaya çıkan sektörler göre gri su ayak izi miktarları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 16. Erzurum İli 2024 Yılı Endüstri Kolları, Mavi Ve Gri Su Ayak İzi Değerleri

Endüstri	Mavi Su Ayak İzi (m ³ /yıl)	Gri Su Ayak İzi (m ³ /yıl)	Gri Su Ayak İzi/Mavi Su Ayak İzi
Süthane işletmeciliği ve peynir imalatı	461128	17292300	37,5
Çiftlik hayvanları için hazır yem imalatı	19339	241738	12,5
Sabun deterjan imalatı	3059	80339	26,3
Et ve kümes hayvanları etlerinden üretilen ürünlerin imalatı	164455	12334125	75,0
Madencilik	710968	9225573	13,0
Şeker imalatı	757101	19183425	25,3
Hazır yemeklerin imalatı	200944	5023600	25,0

Atık su oluşumu gözlenen 7 farklı iş kolundan yaklaşık 63381100 m³/yıl değerinde gri su ayak izi oluşmaktadır. Atık su oluşumu olana ve olmayan bütün endüstri kollarının faaliyeti sonucunda ortaya çıkan mavi su ayak izi miktarının 6484395 m³/yıl olduğu göz önünde bulundurulduğunda 2316994 m³/yıl mavi su ayak izi olan 7 farklı sektörden ortaya çıkan gri su ayak izi miktarının ne kadar büyük değerde olduğu net bir şekilde görülmektedir.

Tablodaki verilere göre Erzurum'da endüstriyel su ayak izi; özellikle gri su ayak izi baskınlığının belirgin olduğu bir yapıya sahiptir. Çoğu sektörde gri su ayak izi, mavi su ayak izini onlarca kat aşmaktadır. Bu durum su tüketiminden çok su kalitesi üzerindeki baskının ağır olduğunu göstermektedir. Erzurum endüstrisinin su ayak izi profili "su tüketimi düşük, kirlilik yükü yüksek" karakterindedir. Bu nedenle su yönetiminde öncelik, su tasarrufu değil atıksu kirliliğinin azaltılması olmalıdır.

Erzurum'da özellikle süt işleme tesislerinden kaynaklanan yüksek organik yük gri su ayak izi hesaplamalarında önemli bir etki yaratmaktadır. Yem fabrikalarında atıksu oluşumu sınırlı olmakla birlikte, yağ ve askıda katı madde kaynaklı kirlilik yükleri dikkate alınmıştır.

Genel olarak Erzurum'un endüstriyel su ayak izi, Türkiye'nin sanayileşmiş bölgelerine kıyasla daha düşük seviyededir; ancak mevcut sektörlerde proses iyileştirmeleri, su geri kazanımı ve atıksu arıtma kapasitesinin artırılması durumunda hem mavi hem de gri su bileşenlerinde azaltım sağlanması mümkündür.

Toplam Endüstriyel Gri Su Ayak İzi:

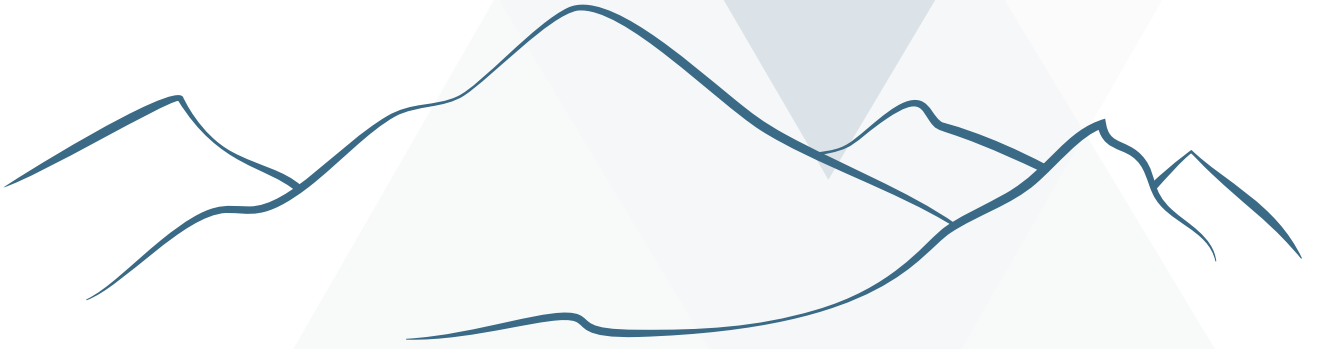
63.381.100 m³/yıl



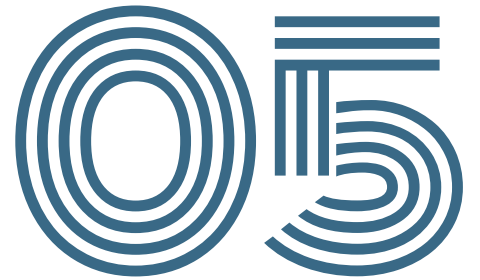




Narman Peribacaları



SU AYAKIZI
DEĞERLENDİRMESİ



5. SU AYAKIZI DEĞERLENDİRMESİ

5.1. Erzurum İli Su Ayak İzi - Water Footprint Network (WFN) Metodolojisine Göre Değerlendirme

Analiz, Erzurum iline ait verilerden ortaya çıkan su ayak izi değerleri ve Water Footprint Network (WFN) tarafından tanımlanan standart su ayak izi bileşenleri (Yeşil-Mavi-Gri + Sanal Su) dikkate alınarak hazırlanmıştır.

5.1.1. Erzurum İlinin Toplam Su Ayak İzi Bileşenleri

Toplam Su Ayak İzi: 3.841.578.063 m³/yıl

Tarımsal Su Ayak İzi:

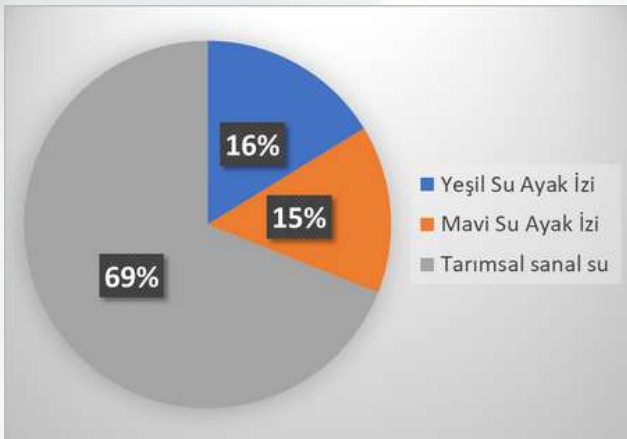
Yeşil Su Ayak İzi: **479432554 m³/yıl**

Mavi Su Ayak İzi: **436990906 m³/yıl**

Tarımsal sanal su (bitkisel üretimin gömülü suyu): **2034070209 m³/yıl**

Tarımsal su ayak izi hesaplamalarında elde edilen sonuçlar Şekil 3'te grafiksel olarak gösterilmiştir.

Şekil 4. Tarımsal su ayak izi dağılımı



Yeşil ve mavi suyun birbirine yakın olması, Erzurum tarımının hem yağışa dayalı hem de sulamaya bağımlı karma bir yapıda olduğunu gösterir. Sanal suyun çok yüksek olması, Erzurum'un önemli bir tarımsal su ihracatçısı (virtual water exporter) olduğunu gösterir; bu, Hoekstra'nın "ürünlerde gömülü su" tanımıyla tam uyumludur.

Hayvancılık Su Ayak İzi:

İçme suyu: 28.006.447 m³/yıl

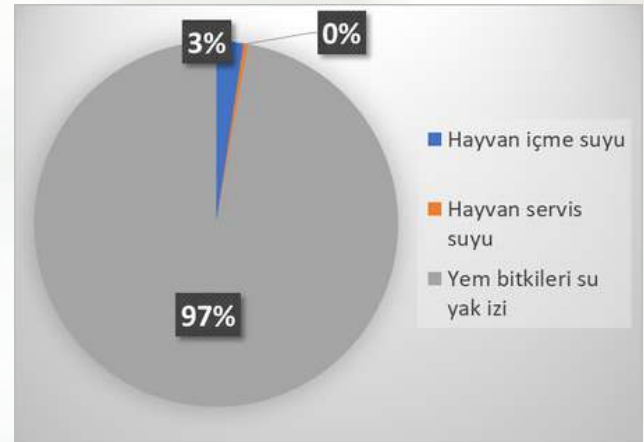
Servis/bakım suyu: 4.200.967 m³/yıl

Yem bitkileri su ayak izi: 1.117.646.749 m³/yıl

Toplam hayvancılık su ayak izi: 1.149.854.163 m³/yıl

Hayvancılık faaliyetleri sonucu ortaya çıkan su ayak izi hesaplamalarından elde edilen sonuçlar Şekil 4'te grafiksel olarak gösterilmiştir.

Şekil 5. Hayvancılık faaliyetleri su ayak izi dağılımı



Hayvansal ürünlerde su ayak izinin %80-95'i yem üretiminden gelir (Mekonnen & Hoekstra, 2012). Erzurum'da da literatür verilerine uyumlu benzer yapı görülmektedir. Yem bitkilerinin su ayak izinin toplam hayvansal su ayak izi içindeki payı yaklaşık olarak %97'dir. Bu sonuç hayvancılığın su ayak izi üzerindeki baskısını net biçimde destekler.

Eysel Su Ayak İzi:

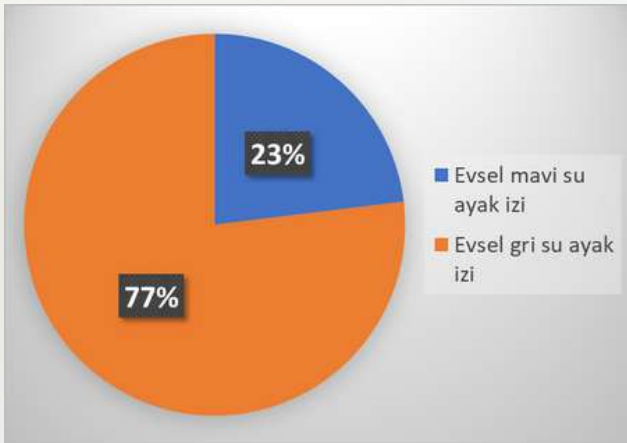
Eysel mavi su ayak izi: 69.118.773 m³/yıl

Eysel gri su ayak izi: 230.394.084 m³/yıl

Eysel sanal su ayak izi: 1.232.398.441 m³/yıl

Eysel faaliyetler sonucu ortaya çıkan su ayak izi hesaplamalarından elde edilen sonuçlar Şekil 5'de grafiksel olarak gösterilmiştir.

Şekil 6. Eysel su ayak izi dağılımı



Eysel gri suyun yüksek olması, kişi başı atıksu kirlilik yükünün ve seyreltme ihtiyacının yüksek olduğunu gösterir. Eysel sanal su, (gıda + tekstil + tüketim) ürünlerinin gömülü suyun çok yüksek olduğunu gösterir.

WFN tüketici su ayak izi çalışmalarında bireylerin toplam su ayak izinin %90'ı gıdalardan gelir; Erzurum'un yüksek sanal su değeriyle uyumludur.

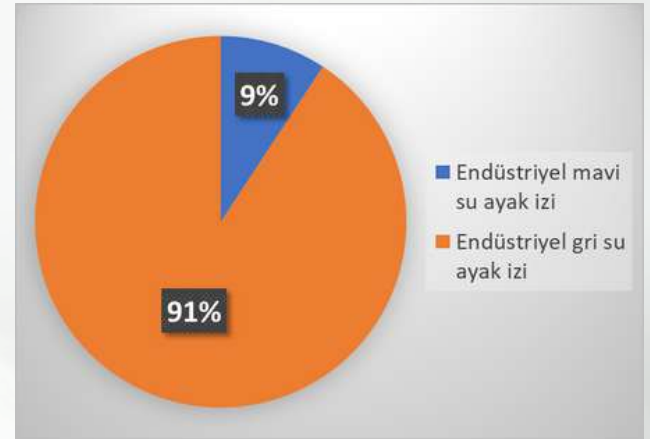
Endüstriyel Su Ayak İzi:

Endüstriyel mavi su ayak izi: 6.486.395 m³/yıl

Endüstriyel gri su ayak izi: 63.381.100 m³/yıl

Endüstriyel faaliyetler sonucu ortaya çıkan su ayak izi hesaplamalarından elde edilen sonuçlar Şekil 6'da grafiksel olarak gösterilmiştir.

Şekil 7. Endüstriyel su ayak izi dağılımı



Erzurum ili toplam su ayak izi içindeki payı (%1,82) düşüktür. Ancak gri su, endüstriyel kirlilik baskısının "mavi su tüketiminden daha önemli" olduğunu gösterir. Bu durum tam olarak WFN gri su yaklaşımına uygundur.

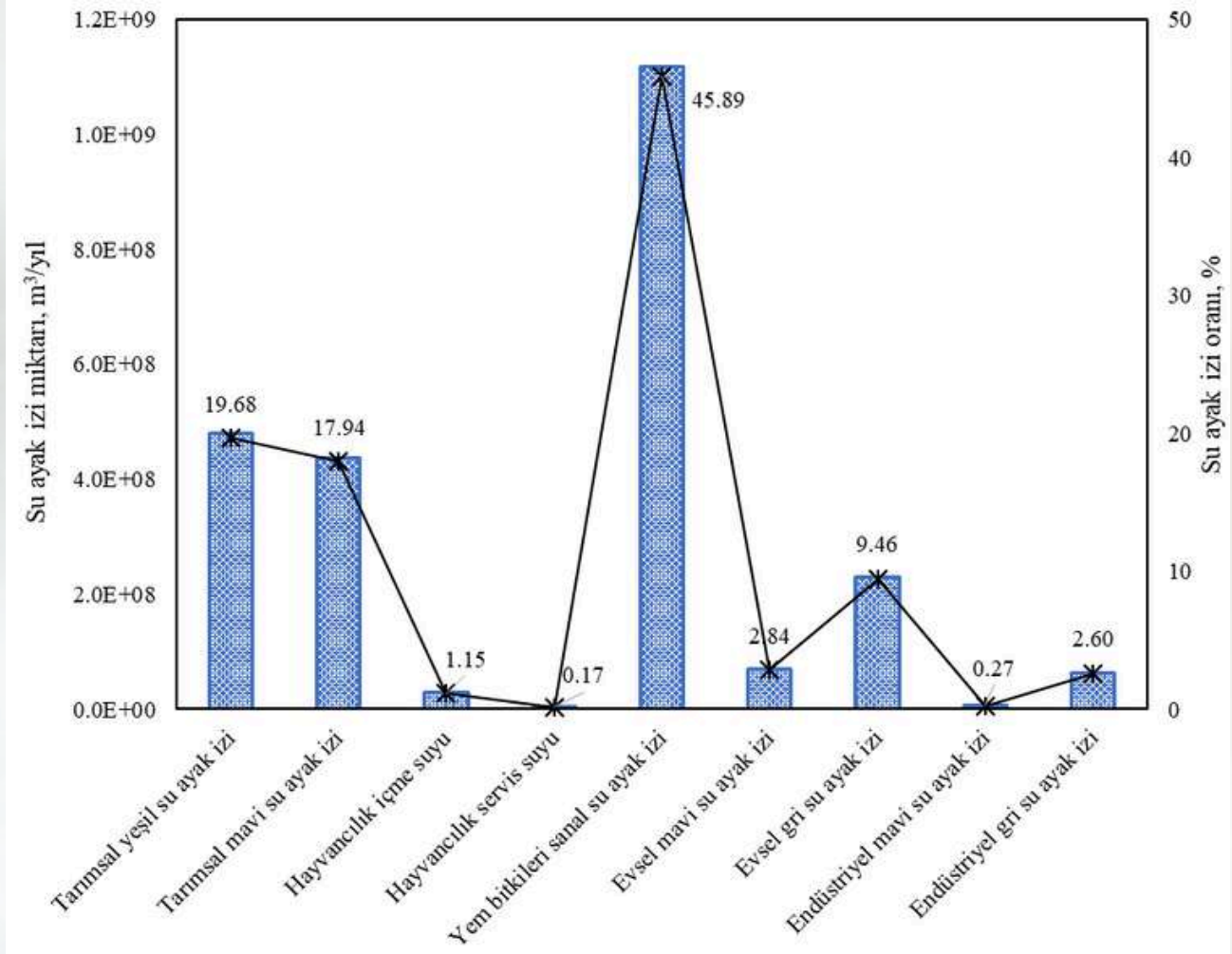
Elde edilen değerler bir bütün olarak ele alındığında toplam su ayak izini oluşturan bileşenler Tablo 17'deki gibidir.

Tablo 17. Erzurum İli Su Ayak İzi Bileşenleri Ve Yüzdesele Oranları

Bileşen	Değer (m ³ /yıl)	Toplam içindeki pay (%)
Tarımsal yeşil su ayak izi	479432554	19,687
Tarımsal mavi su ayak izi	436990906	17,94
Hayvancılık içme suyu	28006447	1,15
Hayvancılık servis suyu	4200967	0,17
Yem bitkileri toplam su ayak izi	1117646750	45,89
Evsel mavi su ayak izi	69118773	2,84
Evsel gri su ayak izi	230394084	9,46
Endüstriyel mavi su ayak izi	6486395	0,27
Endüstriyel gri su ayak izi	63381100	2,60
Toplam:	3841580062	100

Ortaya çıkan sonuçlar görsel olarak daha iyi bir şekilde anlaşılabilmesi için Şekil '8 de verilmiştir.

Şekil 8. Erzurum ili su ayak izi bileşenlerinin miktarları ve oranları



5.2. Water Footprint Network Yaklaşımına Göre Erzurum'un Profilinin Temel Özellikleri

Aşağıdaki değerlendirmeler yalnızca WFN literatürü (Hoekstra, Mekonnen 2004–2020) dikkate alınarak hazırlanmıştır.

1. Erzurum'un su ayak izi %80'den fazla oranda tarım ve hayvancılıktan kaynaklanmaktadır. WFN'e göre Türkiye ortalamasında tarımsal su ayak izi içinde yeşil su ayak izi payı %55–65 arasındadır. Erzurum değeri (%52) uyumludur. Ayrıca WFN'ye göre küresel su ayak izi dağılımı; yaklaşık olarak tarımsal su ayak izi %92, evsel su ayak izi %4 ve endüstriyel su ayak izi %4 şeklindedir. Erzurum'un dağılımı bu küresel WFN modeline çok yüksek oranda benzemektedir. Bu, su ayak izi stresinin "doğrudan üretim kaynaklı" olduğunun güçlü bir göstergesidir.

2. Mavi su ayak izi çok kritik seviyededir. Toplam mavi su: 479,4 milyon m³/yıl tarım + 69,1 milyon evsel + 6,34 milyon endüstri ≈ 554,84 milyon m³/yıl değerindedir. WFN'e göre mavi su, yenilenebilir yüzeysel ve yeraltı suyu çekişini temsil eder ve su kıtlığı riskinin asıl belirleyicisidir. Erzurum'da mavi suyun tarımda çok yüksek olması aşağıda belirtilen sebeplerin bir arada gerçekleştiği anlamına gelir.

- Sulama ihtiyacının yüksekliği,
- İklim değişikliğine bağlı yağış azalımı riskleri,

Bu durum WFN çerçevesinde yüksek mavi su kırılabilirliği riskini artırmaktadır.

3. Evsel sanal su ayak izi kişi başı yıllık yaklaşık 1627 m³ değerindedir. Bu durum Erzurum ilinde yaşayan insanların tüketim alışkanlıkları ile açıklanabilir. Tablo 14'te verilen değerler incelendiğinde gıda tüketiminde en yüksek su ayak izinin et tüketiminde olduğu görülmektedir. Erzurum ili tüketim alışkanlıklarında et tüketimi toplam tüketimden önemli pay sahibi olduğundan bu durum doğrudan sanal su ayak izi değerine yansımaktadır. Çalışmadan elde edilen sanal su miktarları Erzurum ilinin sanal su ayak izi değerinin yüksek olduğunu göstermektedir.

Erzurum'da:

Tarımsal sanal su = 2.034 milyar m³/yıl

Evsel sanal su = 1.232 milyar m³/yıl

Bu değerler çok yüksek olup WFN'in ürünlerde gömülü su kavramıyla tamamen uyumludur. Sonuç olarak Erzurum, tarımsal üretim yoluyla bölge dışına önemli miktarda su transfer eden bir ildir.

4. Gri su ayak izi değerleri kirlilik baskısını göstermektedir.

WFN gri suyu "Kirleticilerin çevresel standartlara çekilebilmesi için gereken minimum seyreltme suyu." şeklinde tanımlamaktadır. Erzurum'da TÜİK verileri göre nüfusun yaklaşık %80'inin atıksu

arıtma tesisine sahip olduğunu göstermektedir. Başka bir deyişle Erzurum ilinde oluşan atık su miktarının %80'ini arıtılıyor demektir. Evsel atık suyun tam arıtma ile sonuçlandığı kabul edilmiştir. Erzurum'da özellikle:

- Evsel gri ayak izi: 230 milyon m³/yıl
- Endüstriyel gri ayak izi: 63 milyon m³/yıl değerlerine ulaşmaktadır.

Bu yüksek büyüklükler, kirlilik yüklerinin doğal su kaynakları üzerinde oluşturduğu baskıyı işaret eder. WFN literatüründe yüksek gri su ayak izi;

- atıksu arıtma kapasitesinin yetersizliği,
- kişi başı kirlilik yükünün yüksekliği,
- ekosistem taşıma kapasitesinin zorlandığı anlamına gelir.

Erzurum ilinde su kaynaklarının çevresel sürdürülebilirliği açısından gri su ayak izinin miktarını azaltıcı tedbirlerin alınması gerekmektedir.

5.3. WFN Literatürü ile Mevcut Sonuçların Karşılaştırılması

- Erzurum'un su ayak izi yapısı WFN'in küresel çalışmalarındaki tarım-dominant modele tamamen uymaktadır.
- Tarım ve hayvancılık faaliyetleri için tüketilen su miktarı Erzurum ilinde tüketilen toplam su miktarının yaklaşık %80'ini oluşturmaktadır.
- Toplam mavi su tüketimi miktarı, WFN tanımına göre su kıtlığı ve çevresel sürdürülebilirlik açısından risk oluşturmaktadır.

- Gri su değerlerinin yüksekliği, kirlenme yükünün su kaynaklarına baskı oluşturduğunu göstermektedir; Erzurum ili su tüketimi verilerinden elde edilen bu durum WFN gri su yaklaşımıyla tutarlıdır.
- Erzurum ili su tüketimi verilerinden elde edilen gömülü (sanal) su miktarı çok yüksektir. Bu durum Erzurum'un tarımsal üretim açısından "su ihracatçısı" bir il olduğunu net olarak göstermektedir.

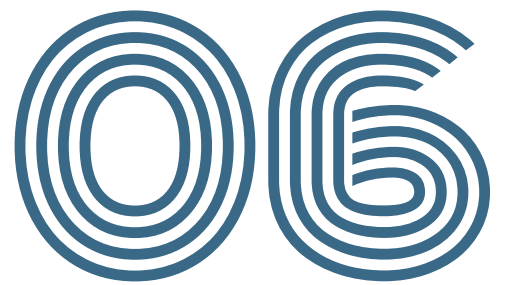








SONUÇ VE ÖNERİLER





7. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada Erzurum ilinin su ayak izi bileşenleri hem Water Footprint Network (WFN) metodolojisi hem de SUET (Sulama Yönetimi ve Bitki Su Tüketimi Sistemi) yaklaşımı kapsamında değerlendirilmiş ve ilin su tüketim yapısı çok boyutlu olarak analiz edilmiştir. Her iki metodolojinin birlikte ele alınması, su kullanımının hem küresel ölçekte kabul gören hesaplama bileşenleri (yeşil-mavi-gri su, sanal su) hem de yerel iklim koşullarına bağlı gerçek bitki su tüketimi, sulama ihtiyacı ve sulama etkinliği üzerinden bütüncül şekilde incelenmesini sağlamıştır.

WFN yaklaşımına göre Erzurum'un toplam su ayak izi; tarımsal, hayvansal, evsel ve endüstriyel bileşenler üzerinden hesaplanmış ve ilin su talebinin belirleyici unsurunun tarım ve hayvancılık olduğu görülmüştür. Yeşil ve mavi su ayak izi arasındaki dengeli fakat yüksek değerler, tarımın hem yağışa bağımlı hem de sulamaya ihtiyaç duyan karma bir yapıda olduğunu göstermektedir. WFN metodolojisi tarımsal su kullanımını küresel karşılaştırılabilir biçimde değerlendirmeye olanak sağlarken, bu çalışmada SUET yaklaşımının kullanılması ile sulama ihtiyacının gerçek bitki su tüketimine (ET_c), etkin yağışa (P_{eff}), sulama suyu verimine (IE) ve iklim koşullarına göre hesaplanması sağlanmıştır.

Böylece tarım sektörünün su ayak izinde görülen mavi su bileşeninin, yalnızca teorik değil yerel iklim verilerine ve bitki ihtiyaçlarına dayalı gerçekçi sulama gereksinimleriyle uyumlu olduğu ortaya konmuştur.

SUET metodolojisi, bitki su tüketiminin belirleyicileri olan referans evapotranspirasyon (ET_o), bitki katsayısı (K_c), etkin yağış, toprak su tutma kapasitesi ve sulama yöntemi verimliliği gibi parametreler üzerinden Erzurum'un tarımsal su tüketimini analiz etmeye olanak sağlamıştır. SUET hesaplamalarıyla belirlenen sulama gereksinimi, WFN mavi su ayak izi değerlerini desteklemiş; özellikle Erzurum'da belirgin sulama ihtiyacı olan ürünlerin (yem bitkileri ve tahıl üretimi) mavi su bileşeninde baskın paya sahip olduğu doğrulanmıştır. Böylece mavi suyun yüksekliği hem WFN hem de SUET yaklaşımıyla metodolojik olarak tutarlılık göstermiştir.

Tarımsal su ayak izi bileşenlerinin incelenmesi, yeşil su kullanımının yüksek olmasının doğal yağışlara bağlı üretim yapısını işaret ettiğini, buna karşılık mavi su kullanımının yeşil suya çok yakın boyutta gerçekleşmesinin sulamaya olan güçlü bağımlılığı gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Bu durum, Erzurum tarımının iklimsel değişkenlik ve su arzındaki dalgalanmalara karşı kırılgan bir yapıda olduğunu göstermekte, özellikle mavi su talebinin uzun vadeli sürdürülebilirlik açısından kritik bir unsur olduğunu işaret etmektedir. Bitkisel üretimden kaynaklanan çok yüksek sanal su ayak izi ise Erzurum'un önemli bir "sanal su ihracatçısı" olduğunu ve tarımsal ürünler aracılığıyla bölge dışına büyük miktarda gömülü su aktardığını göstermektedir. Bu, WFN'in küresel sanal su ticareti bulgularıyla tam uyumlu olup, tarım sektörünün sadece yerel değil bölgesel ve ulusal ölçekte de su kaynakları açısından stratejik bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Hayvansal üretimin su ayak izi incelendiğinde, WFN'in küresel hayvansal ürün değerlendirmeleriyle uyumlu şekilde toplam hayvancılık su ayak izinin yaklaşık %97'sinin yem bitkileri üretimine bağlı dolaylı su tüketiminden kaynaklandığı belirlenmiştir. Bu bulgu, WFN'in hayvansal ürün su ayak izi çalışmalarında ortaya konan temel tespitlerle örtüşmekte ve Erzurum'da hayvancılığın gerçek su gereksiniminin yem kaynaklı dolaylı tüketimle belirlendiğini ifade etmektedir. SUET yaklaşımı ile yem bitkilerinin gerçek sulama ihtiyacına dayalı analiz yapılabilmesi, hayvancılık sektörünün bölge su bütçesi üzerindeki etkisinin nasıl oluştuğunu daha net biçimde ortaya koymuştur.

Bu sonuçlar, hayvancılık kaynaklı su baskısının azaltılabilmesi için yem üretiminde sulama yönetiminin kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle yem üretimi ve hayvancılık politikaları su yönetimiyle doğrudan ilişkilidir.

Evsel su ayak izi bileşenleri değerlendirildiğinde, SUET metodolojisi doğrudan evsel su tüketimi ile ilişkili değildir. Evsel su ayak izi verileri, mavi su kullanımının bölgesel nüfus dikkate alındığında makul düzeylerde olduğunu; buna karşın gri su ayak izinin oldukça yüksek olması nedeniyle kentsel atıksu yükünün çevresel su kaynakları üzerinde önemli bir seyreltme ihtiyacı oluşturduğunu göstermektedir. Bu durum, atıksu arıtma kapasitesi, kentsel kirlilik yükü ve su kalitesi yönetimi açısından dikkat edilmesi gereken bir gösterge niteliğindedir. Evsel sanal su değerinin yüksekliği ise tüketim biçimlerinin —özellikle gıda tüketiminin— toplam evsel su ayak izinin belirleyici unsuru olduğunu göstermekte olup, bu bulgu WFN tüketici su ayak izi çalışmalarındaki genel eğilimlerle uyumludur.

Endüstriyel su ayak izi toplam içindeki payı düşük olmakla birlikte, endüstriyel gri su bileşeninin belirgin düzeyde yüksek olması, su kalitesi üzerinde sektör kaynaklı baskı bulunduğuna işaret etmektedir.



Bu durum, endüstriyel faaliyetler açısından kirlilik yükünün su miktarı tüketiminden daha önemli olduğunu göstermesi bakımından çevresel yönetim açısından kritik bir bilgi sunmaktadır.

Her iki metodolojiden elde edilen bulguların birlikte değerlendirilmesi, Erzurum'un su yönetiminde hem kaynak miktarı hem de kaynak kalitesi açısından baskı altında olduğunu göstermektedir. WFN sonuçları ilin su talebinin sektörlere göre dağılımını ve tüketimin küresel bağlamdaki yerini ortaya koyarken, SUET metodolojisi mavi su bileşeninin gerçek nedenlerini, bitki su tüketimi ve sulama verimliliği temelinde detaylandırarak sürdürülebilir sulama yönetimi için kritik bir zemin sunmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde Erzurum'un su ayak izi profili, Water Footprint Network'ün küresel su ayak izi dağılımına dair bulgularıyla güçlü bir paralellik göstermektedir. Erzurum'da su tüketiminin tarımsal ve hayvansal üretim ağırlıklı olması, sanal su ihracının yüksekliği, mavi su kullanımının baskınlığı ve gri su değerlerinin önemli düzeyde seyretmesi, ilin su kaynaklarına yönelik baskının çok boyutlu olduğunu ortaya koymaktadır. Bu kapsamda sürdürülebilir su yönetimi politikalarının özellikle tarımsal sulama verimliliğinin artırılması, yem üretimi ve hayvancılık süreçlerinin optimizasyonu,

kentsel atıksu arıtma kapasitesinin güçlendirilmesi ve ürün deseninin su kaynaklarıyla uyumlu biçimde yeniden planlanması gibi stratejilere odaklanması gerekmektedir.

Sonuç olarak Erzurum'un su ayak izi profili, WFN metodolojisine göre tarım ve hayvancılığın baskın su kullanıcıları olduğunu açık biçimde ortaya koyarken, SUET yaklaşımı tarımsal su tüketiminin teknik olarak nasıl oluştuğunu ayrıntılı biçimde açıklamakta ve mavi su kullanımının azaltılması için atılması gereken adımları daha belirgin hale getirmektedir. Bu nedenle Erzurum'da sürdürülebilir su yönetimi için iki metodolojiden elde edilen bulgular birlikte ele alınmalı; özellikle sulama verimliliğinin artırılması, ürün deseninin su bütçesiyle uyumlu hale getirilmesi, kentsel ve endüstriyel gri su yüklerinin azaltılması ve tarımsal üretimde su tasarrufu sağlayacak teknolojilerin yaygınlaştırılması öncelikli politika alanları olarak değerlendirilmelidir. Erzurum'un su ayak izi yapısının su arzı, su kalitesi ve sürdürülebilirlik açısından kritik unsurlar içerdiğini; su yönetimi politikalarının WFN standardına uygun biçimde hem mavi su kullanımını hem de gri su baskısını azaltmaya yönelik bütüncül yaklaşımlara ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Bu kapsamlı analiz ile bölgedeki su yönetimi stratejilerinin bilimsel temele dayalı olarak güçlendirilmesine katkı sağlanması hedeflenmiştir.

Gerçekleştirilen kapsamlı çalışma sonrasında elde edilen sonuçlar, Erzurum ili su kaynaklarının sürdürülebilir bir şekilde kullanılabilmesi ve gelecek kuşaklara aktarılabilmesi için aşağıda her bir su ayak izi türü özelinde belirtilen tedbir ve önerilerin kural koyucular tarafından dikkate alınmasını zorunlu kılmaktadır;

1) Tarımsal faaliyet kaynaklı mavi suyu azaltmak için sulama verimliliği

- Damla / yağmurlama sulama
- Sulama planlaması
- Kuraklığa dayanıklı tarım çeşitleri
- Tarla içi su yönetimi

2) Hayvancılıkta yem kaynaklı su ayak izini azaltmak

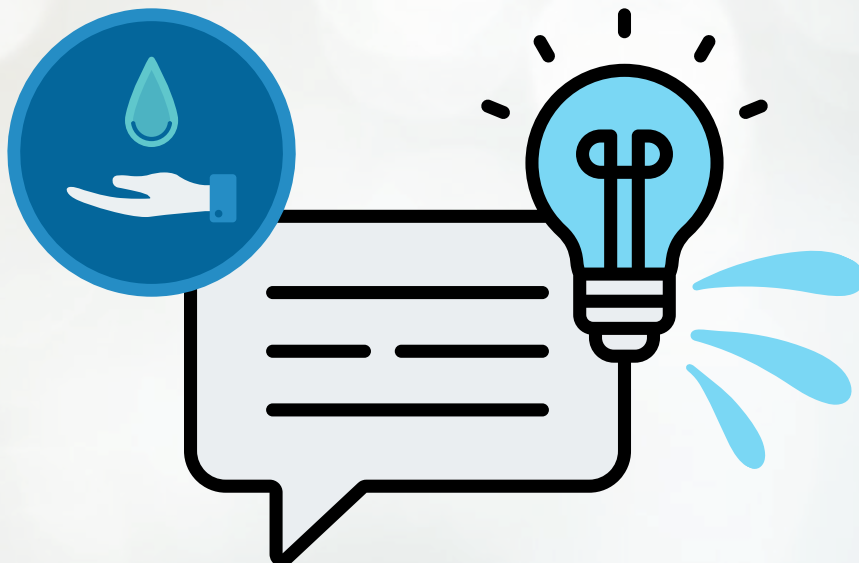
- Su tüketimi düşük yem türleri
- Yem verimliliğinin artırılması
- Hayvansal üretimde dönüşüm stratejileri

3) Gri suyu yönetmek için atıksu arıtma yatırımları

- BOD/TN/TP parametrelerinin düşürülmesine yönelik tesis modernizasyonu
- Evsel gri su geri kazanım sistemleri

4) Sanal su dengesi için ürün deseni planlaması

- Yüksek su tüketen ürünlerden düşük su tüketen ürünlere geçiş
- Sanal su ihracının azaltılması (özellikle mavi suya bağımlı ürünlerde)







KAYNAKÇA VE EKLER





KAYNAKÇA

- Aldaya, M. M., Garrido, A., Llamas, M. R., Varela-Ortega, C., Novo, P., & Rodríguez-Casado, R. (2017). Water footprint and irrigation water productivity in Turkey. *Journal of Cleaner Production*, 142, 390–399.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). FAO.
- Bayart, J. B., Bulle, C., Deschênes, L., Margni, M., Pfister, S., Vince, F., & Koehler, A. (2010). A framework for assessing off-stream freshwater use in LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(5), 439–453.
- Doğan, E., & Kırnak, H. (2010). Türkiye’de bitki su tüketimi tahmini için kullanılan modeller. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 16(4), 352–360.
- Egan, M. (2011). The Water Footprint Assessment Manual Setting The Global Standard, *Journal Social and Environmental Accountability Journal*, Volume 31, 2011 - Issue 2
- Ertürk, A. (2020). İllere göre sanal su tüketimi ve su ayak izi analizi. TÜBİTAK Araştırma Projesi Raporu.
- FAO. (1992). CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management (FAO Irrigation and Drainage Paper 46). FAO.
- FAO. (1998). CLIMWAT for CROPWAT: A climatic database for irrigation planning and management. FAO.
- Gerbens-Leenes, W., Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2013). The water footprint of poultry, pork and beef: A comparative study. *Water Resources and Industry*, 1–2, 25–36.
- Gökçe, B., 2025, Su Ayak İzi Kavramı Ve Kullanıcıların Su Tüketimlerinin Değerlendirilmesi: Akdeniz Üniversitesi Yerleşkesi Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya.
- Hoekstra, A. Y. (2003). Virtual water: An introduction. UNESCO-IHE Institute for Water Education.

- Hoekstra, A. Y. ve Chapagain, A. K., 2006. Integrated Assessment of Water Resources and Global Change, ISBN: 978-1-4020-5590-4, Springer Science, Holland, Dordrecht.
- Hoekstra, A. Y., & Hung, P. Q. (2005). Globalization of water resources: International virtual water flows in relation to trade. *Water Resources Research*, 41(W12402).
- Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(9), 3232–3237.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Earthscan.
- Hoekstra, A.Y. 2008. The water footprint of food. <https://www.waterfootprint.org/media/downloads/Hoekstra-2008-WaterfootprintFood.pdf>
- ISO. (2014). ISO 14046: Water footprint — Principles, requirements and guidelines. International Organization for Standardization.
- Kalya, E., 2022, Endüstriyel Atıksu Arıtma Tesislerinde
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2010). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products (Value of Water Research Report Series No. 47). UNESCO-IHE.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2012). A global assessment of the water footprint of farm animals and animal products. *Ecosystems*, 15(3), 401–415.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2015). Global gray water footprint and water pollution levels related to anthropogenic nitrogen loads. *Environmental Science & Technology*, 49(5), 3272–3281.
- Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Mia, M. M., & Bhuiyan, M. A. K. (2019). Climate variability and trends in reference evapotranspiration: Evidence from North-West Bangladesh. *Agricultural Water Management*, 216, 456–464.



- Pegram, G., Conyngham, S., Aksoy, A., Dıvrak, B. ve Öztok, D., 2014. Türkiye'nin su ayak izi raporu: su, üretim ve uluslararası ticaret ilişkisi, WWF-Türkiye, ISBN: 978-605-86596-7-4.
- Ridoutt, B. G., & Pfister, S. (2009). A revised approach to water footprint assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 13(4), 492-504.
- Ridoutt, B. G., Hendrie, G. A., & Noakes, M. (2012). Dietary strategies to reduce water footprints. *Journal of Cleaner Production*, 28, 132-139.
- Schewe, J., Heinke, J., Gerten, D., Haddeland, I., Arnell, N. W., Clark, D. B., ... Kabat, P. (2014). Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3245-3250.
- Sönmez, F., & Bozdoğan, E. (2018). Türkiye'nin su ayak izi değerlendirmesi. *Çevre ve Su Yönetimi Dergisi*, 4(1), 15-28.
- Su Ayak İzi Ve Enerji Hesabı, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray
- Tarım ve Orman Bakanlığı. SUET – Sulama Yönetimi ve Bitki Su Tüketimi Sistemi Teknik Dokümanı.
- Vanham, D., Comero, S., Gawlik, B., & Bidoglio, G. (2019). The water footprint of the EU's diet. *Nature Sustainability*, 2, 491-498.
- WWF, 2014. Türkiye'nin Su Ayak İzi Raporu. Su Üretim ve Uluslararası Ticaret İlişkisi

EKLER

EK 1: Şekiller

Şekil 1. Su Ayak İzi Bileşenlerine Göre Türkiye’de Üretimin ve Tüketimin Su Ayak İzi (WWF, 2014)

Şekil 2. Erzurum İli Hayvan Varlığı

Şekil 3. Yem Bitkileri Su Ayak İzi Bileşenleri

Şekil 4. Tarımsal Su Ayak İzi Dağılımı

Şekil 5. Hayvancılık Faaliyetleri Su Ayak İzi Dağılımı

Şekil 6. Evsel Su Ayak İzi Dağılımı

Şekil 7. Endüstriyel Su Ayak İzi Dağılımı

Şekil 8. Erzurum İli Su Ayak İzi Bileşenlerinin Miktarları ve Oranları



EK 2: Tablolar

- **Tablo 1.** Tarımsal Ürün Çeşitliliği Ve Ekimi Yapılan Ortalama Alan Büyüklüğü
- **Tablo 2.** Tarımsal Ürün Çeşitliliği Ve Toplam Ekim Alanındaki % Büyüklüğü
- **Tablo 3.** Tarımsal Ürün Çeşitliliği Ve Birim Alan Başına Elde Edilen Üretim Miktarı
- **Tablo 4.** Tarımsal Üretimin Yeşil Su Ayak İzi
- **Tablo 5.** Tarımsal Üretimin Yeşil Su Ayak İzinin Ürün Çeşidine Göre Toplam Değere Oranı (%)
- **Tablo 6.** Tarımsal Üretimin Mavi Su Ayak İzi
- **Tablo 7.** Tarımsal Üretimin Mavi Su Ayak İzinin Ürün Çeşidine Göre Toplam Değere Oranı (%)
- **Tablo 8.** 2020-2024 Yıllarında TÜİK Verilerine Göre Erzurum İli Hayvan Sayıları
- **Tablo 9.** Hayvan Türüne Bağlı Olarak Değişen Hayvan Başı Ortalama Yıllık Su Tüketimi
- **Tablo 10.** Yem Bitkileri Yeşil Ve Mavi Su Ayak İzi Değerleri
- **Tablo 11.** 2015-2024 Yılları Erzurum İli Nüfus Değerleri (TÜİK)
- **Tablo 12.** Evsel Atıksu İçin Ortalama Konsantrasyon Değerleri
- **Tablo 13.** Kişi Başı Sanal Su Ayak İzi Bileşenleri
- **Tablo 14.** Kişi Başı Sanal Su Ayak İzi Gıda Bileşen Dağılımı
- **Tablo 15.** Erzurum İli 2024 Yılı Endüstri Kolları, Yıllık Üretim Ve Su Tüketimi Değerleri
- **Tablo 16.** Erzurum İli 2024 Yılı Endüstri Kolları, Mavi Ve Gri Su Ayak İzi Değerleri
- **Tablo 17.** Erzurum İli Su Ayak İzi Bileşenleri Ve Yüzdesel Oranları

2026



ERZURUM SU AYAKIZI RAPORU



MEHMET
Sekmen
ERZURUM BÜYÜKŞEHİR BELEDİYE BAŞKANI



İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE SIFIR ATIK
DAİRE BAŞKANLIĞI

©Bu raporun tüm hakları saklıdır; Erzurum Büyükşehir Belediyesi,
İklim Değişikliği Daire Başkanlığı izni olmadan kopyalanamaz ve yayınlanamaz.