



**TORTUM ÇAYI'NIN KİRLİLİK DÜZEYİNİN
BELİRLENMESİ**

Zehra Nur DEMİR

**Danışman: Doç. Dr. Gökhan ARSLAN
Yüksek Lisans Tezi
Su Ürünleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı
2025**

(Her hakkı saklıdır.)

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

TORTUM ÇAYI'NIN KİRLİLİK DÜZEYİNİN BELİRLENMESİ
(Determination of the Pollution Level of the Tortum Stream)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zehra Nur DEMİR

Danışman: Doç. Dr. Gökhan ARSLAN

Erzurum
Eylül, 2025



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

TORTUM ÇAYI'NIN KİRLİLİK DÜZEYİNİN BELİRLENMESİ

Doç. Dr. Gökhan ARSLAN danışmanlığında, Zehra Nur DEMİR tarafından hazırlanan bu çalışma, 15/09/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Su Ürünleri Mühendisliği Anabilim Dalı Su Ürünleri Mühendisliği Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Doç. Dr. Adem Yavuz SÖNMEZ <i>Kastamonu Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Doç. Dr. Gökhan ARSLAN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Pınar Oğuzhan YILDIZ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

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

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

Prof.Dr. Alper NUHOĞLU

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Doç. Dr. Gökhan ARSLAN danışmanlığında sunulan “TORTUM ÇAYI’NIN KİRLİLİK DÜZEYİNİN BELİRLENMESİ” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	3	30
Kuramsal Temeller	2	30
Materyal ve Metot	4	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	12	20
Sonuçlar ve Öneriler	1	20
Tezin Geneli	5	25

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

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

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Zehra Nur DEMİR	Doç. Dr. Gökhan ARSLAN
16.9.2025	16.9.2025
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

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

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

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

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmamın yürütülmesinde bilgi, deneyim ve rehberliğiyle bana her aşamada katkı sunan, değerli görüşleriyle tezimin şekillenmesine büyük destek veren danışmanım Sayın Doç. Dr. Gökhan ARSLAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamda istatistiksel analizlerde yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Aycan Mutlu YAĞANOĞLU'na, çalışmalarımda sağladığı destekten dolayı Tarım İl Müdür Yardımcısı Sayın Erhan Çiftgöl'e teşekkür ederim.

Arazi çalışmaları ve veri temininde katkı sunan Tarım İl Müdürlüğü'ne ve Devlet Su İşleri (DSİ) Erzurum Bölge Müdürlüğü'ne sağladıkları kolaylıklar için teşekkür ederim.

Akademi yolculuğunda desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli hocalarım Doç.Dr. Pınar OĞUZHAN YILDIZ'a ve Dr.Şeyda TACER TANAS'a teşekkür ederim.

Üniversite eğitimimin başından itibaren maddi ve manevi desteklerini her zaman hissettiren, varlıklarıyla bana güç veren kıymetli babam Bedri Cemal DEMİR'e ve annem Vildan DEMİR'e, kardeşlerim Abdullah Furkan, Hatice Seydanur, Aişe Hümeysra ve Hüseyin Selami'ye; canım arkadaşım Nursena KOLİKOĞLU'na teşekkür ederim.

Zehra Nur DEMİR

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ TORTUM ÇAYI'NIN KİRLİLİK DÜZEYİNİN BELİRLENMESİ

Zehra Nur DEMİR

Danışman: Doç. Dr. Gökhan ARSLAN

Amaç: Bu çalışmanın temel amacı, Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan Tortum Çayı ve kollarındaki suyun fizikokimyasal özelliklerini inceleyerek, kirlilik düzeyini zamansal ve mekansal değişkenlikler bağlamında bilimsel yöntemlerle belirlemektir. Su kalitesinin belirlenmesinde temel alınan pH, sıcaklık, iletkenlik, çözünmüş oksijen (DO), nitrat (NO_3^-), fosfat (PO_4^{3-}), toplam azot (TN) ve toplam fosfor (TP) parametreleri üzerinden suyun mevcut durumu ortaya konulmuş; ayrıca elde edilen bulgular Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY) ile kıyaslanarak sınıflandırma yapılmıştır.

Yöntem: Araştırma, 2023 ve 2024 yılları arasında dört mevsim boyunca farklı istasyonlardan düzenli olarak alınan su örneklerinin analizine dayanmaktadır. Fizikokimyasal analizler, standardize edilmiş laboratuvar teknikleriyle gerçekleştirilmiş ve parametrelerin yıllık değişim seyri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, istasyonlar ve mevsimler arası farklılıkları ortaya koyacak şekilde tablolaştırılmış ve grafiksel olarak sunulmuştur.

Bulgular: Analizler sonucunda, yaz aylarında artan sıcaklıkla birlikte çözünmüş oksijen seviyelerinde düşüş, iletkenlik ve bazı kirletici parametrelerde ise artış tespit edilmiştir. 2024 verileri, özellikle fosfat ve toplam fosfor gibi bazı parametrelerde 2023'e göre belirgin bir azalma olduğunu göstermektedir. Nitrat değerleri, bazı dönemlerde artış gösterse de Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından önerilen sınırların altında kalmıştır. İstasyonlar arasında ise bazılarının yerleşim ve tarım-hayvancılık faaliyetlerinin yoğunluğu nedeniyle kirlilik yükünün daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Sonuç: Araştırma bulguları, Tortum Çayı'nın su kalitesinin mevsimsel ve mekânsal olarak değiştiğini ve özellikle ilkbahar ve yaz aylarında antropojenik etkiler nedeniyle kirlilik baskısının arttığını ortaya koymuştur. Tarımsal faaliyetler, Hidroelektrik santralleri (HES) projeleri, alabalık çiftlikleri ve yerleşim kaynaklı atıklar, çayın ekosistemi üzerinde baskı oluşturmaktadır. Bu nedenle su kalitesinin korunması için sürekli izleme sistemlerinin kurulması, kontrolsüz arazi kullanımının önlenmesi ve çevresel farkındalığın artırılması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Tortum Çayı, su kalitesi, fizikokimyasal analiz, mevsimsel değişim, kirlilik düzeyi.

Eylül 2025, 85 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

DETERMINATION OF THE POLLUTION LEVEL OF THE TORTUM STREAM

Zehra Nur DEMİR

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Gökhan ARSLAN

Purpose: The primary objective of this study is to scientifically assess the pollution level of the Tortum Stream and its tributaries, located in Eastern Anatolia, by examining their physicochemical characteristics in the context of temporal and spatial variations. The current status of water quality has been evaluated through key environmental parameters including pH, temperature, electrical conductivity (EC), dissolved oxygen (DO), nitrate (NO_3^-), phosphate (PO_4^{3-}), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP). The findings were compared with the classification thresholds defined by the Turkish Water Pollution Control Regulation (SKKY).

Method:

This research is based on the analysis of water samples regularly collected from various stations across four seasons between 2023 and 2024. Physicochemical analyses were conducted using standardized laboratory techniques, and the annual trends of the parameters were comparatively evaluated. The data were tabulated and visualized to highlight temporal and spatial variations among stations and seasons.

Findings:

The analyses revealed a decrease in dissolved oxygen levels during summer due to rising temperatures, alongside increases in conductivity and certain pollutant parameters. Compared to 2023, the 2024 data indicated a noticeable reduction in parameters such as phosphate and total phosphorus. Although nitrate levels increased during certain periods, they remained below the limits recommended by the World Health Organization (WHO). Pollution load was found to be higher at stations located near areas with intense agricultural and livestock activity or human settlements.

Results: The findings demonstrate that the water quality of the Tortum Stream varies both seasonally and spatially, with pollution pressure intensifying during spring and summer due to anthropogenic influences. Agricultural runoff, hydroelectric power plants (HES) projects, trout farms, and domestic waste discharge exert significant stress on the stream's ecosystem. It is therefore recommended that continuous monitoring systems be established, uncontrolled land use be regulated, and environmental awareness be enhanced to preserve water quality.

Keywords: Tortum Stream, water quality, physicochemical analysis, seasonal variation, pollution level.

September 2025, 85 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	x
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	13
Nehir Sularının Fiziko-Kimyasal Özellikleri	13
pH.....	13
Çözünmüş Oksijen (DO).....	13
Sıcaklık.....	14
Elektriksel İletkenlik (EC)	15
Nitrat (NO ₃ ⁻)	15
Fosfat (PO ₄ ³⁻)	16
Toplam Azot (TN).....	17
Toplam Fosfor (TP)	18
Literatür Özeti	19
Tortum Çayı Havzasının Özellikleri	33
Sedimentasyon ve su kalitesi	34
Biyolojik çeşitlilik ve ekosistem özellikleri	34
Ekoturizm, HES ve sosyo-ekonomik etkiler	35
Havza yönetimi ve sürdürülebilirlik perspektifi	37
MATERYAL VE METOT	39
Çalışma Alanı.....	39
İstasyonlar	41
İstasyon-1 (Tortum Çayı-1; 40°18'47.92"K, 41°31'30.48"D)	41
İstasyon-2 (Tortum Çayı-2; 40°30'37.95"K, 41°31'21.15"D)	42
Yöntem.....	42
Numune alımı.....	42

Yerinde analizler	43
Laboratuvar analizleri	45
İstatistiksel analizler.....	49
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	51
Bağımsız Örneklem t Testi Sonuçları	51
2 Yönlü Varyans Analizi Sonuçları	55
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	63
Öneriler	65
KAYNAKLAR.....	66
ÖZGEÇMİŞ.....	73



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Dünya Sağlık Örgütü İçme Suyu Kalitesi Rehberi'ne Göre Bazı Temel Parametreler ve Sınır Değerleri.....	4
Tablo 2. SKKY Yüzeysel Su Kalite Sınıfları ve Parametre Değerleri	5
Tablo 3. Kirlilik Parametrelerinin İstasyonlara Göre Farklılık Gösterip Göstermediğine İlişkin Tek Yönlü t Testi Sonuçları.....	51
Tablo 4. Kirlilik Parametrelerinin Yıllara Göre Farklılık Gösterip Göstermediğine İlişkin Tek Yönlü t Testi Sonuçları	53
Tablo 5. 2023 yılı İstasyon ve Mevsim değişkenlerine ait 2 yönlü varyans analiz tablosu.....	55
Tablo 6. 2024 yılı İstasyon ve Mevsim Değişkenlerine Ait 2 Yönlü Varyans Analiz Tablosu.....	59

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Tortum Çayı Topografya Haritası (Ar 2014).....	33
Şekil 2. Suyun tamamının HES’e aktarılmasıyla kuruyan Tortum Şelalesi (T24, 2022)	36
Şekil 3. İstasyon haritası.....	42



KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

Kısaltmalar

BEP	: Bireyselleştirilmiş Eğitim Programı
FTTÇ	: Fen Teknoloji Toplum Çevre
HES	: Hidroelektrik Santralleri
MEB	: Millî Eğitim Bakanlığı
NRC	: National Research Council (Amerikan Ulusal Araştırma Konseyi)
ÖZİDA	: Özürlüler İdaresi Başkanlığı
ÖZVERİ	: Ulusal Özürlüler Veri Tabanı
RAM	: Rehberlik Araştırma Merkezi
SKKY	: Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
WHO	: World Health Organization (Dünya Sağlık Örgütü)

Simgeler

@	: At işareti
€	: Avro

GİRİŞ

Su, gezegenimizdeki yaşamın temel yapı taşlarından biridir ve canlıların biyolojik işlevlerini sürdürebilmeleri için vazgeçilmez bir bileşendir. Yeryüzündeki toplam su varlığı yaklaşık 1,4 milyar km³ olup, bunun %97,5'i tuzlu sudan, yalnızca %2,5'i ise tatlı sudan oluşmaktadır. Mevcut tatlı suyun büyük bir kısmı kutup buzulları ve yeraltı suyu şeklindedir. İnsanların doğrudan erişebileceği tatlı su oranı ise dünya toplam su varlığının yalnızca %0,5'i civarındadır (UNESCO 2006; Shiklomanov 1993). Bu düşük oran, küresel nüfus artışı, iklim değişikliği ve kirlilik gibi faktörlerin etkisiyle daha da kritik bir hâle gelmiştir. Türkiye özelinde yapılan çalışmalarda da benzer şekilde, tatlı su kaynaklarının artan kentleşme, tarım ve sanayi baskısı altında olduğu ve sürdürülebilir su yönetiminin kaçınılmaz bir gereklilik hâline geldiği vurgulanmaktadır (Dursun & Yıldız 2020). Bu bağlamda, hem doğal ekosistemlerin korunması hem de insani ihtiyaçların karşılanması açısından tatlı su kaynaklarının bilimsel veriler ışığında yönetilmesi büyük önem taşımaktadır.

Tatlı su kaynakları, yeryüzündeki yaşamın sürdürülmesi açısından temel bir öneme sahiptir. İnsan sağlığı, tarımsal üretim, sanayi faaliyetleri ve ekosistemlerin işleyişi, doğrudan doğruya tatlı suyun miktarına ve kalitesine bağlıdır (Güler & Çobanoğlu 1997).

Su döngüsü içerisinde, göller, akarsular ve toprak nemi gibi yüzeysel kaynakların yıldan yıla miktar ve nitelik açısından değişiklik göstermesi, bu sınırlılığı daha da belirgin kılmaktadır. Örneğin, her yıl göller ve akarsular üzerinden $6,3 \times 10^{13}$ ton su buharlaşıp, yeryüzüne ortalama $3,5 \times 10^4$ ton su yağış yoluyla geri dönmektedir (Güler & Çobanoğlu 1997). Bu denge, küresel iklim değişikliği, mevsimsel kuraklıklar ve insan faaliyetleri gibi etkenlerle ciddi biçimde bozulmaktadır. Özellikle son yıllarda artan sıcaklıklar ve düzensiz yağış rejimleri, tatlı su kaynaklarının sürdürülebilirliğini tehdit eden en önemli çevresel sorunlardan biri hâline gelmiştir (IPCC 2021).

Tatlı su kaynaklarının bu denli sınırlı olmasına karşın, insanlık tarihinin son yüzyılında su tüketimi dramatik bir şekilde artış göstermiştir. Tarımsal sulama, içme suyu temini, enerji üretimi ve endüstriyel kullanımlar; toplam su tüketiminin büyük kısmını oluşturmaktadır. Bu artışa paralel olarak, özellikle gelişmekte olan ülkelerde kişi başına düşen tatlı su miktarı alarm verici seviyelere ulaşmıştır. Türkiye özelinde değerlendirildiğinde, kişi başına düşen yıllık su miktarının 1.300 m³ seviyelerinde olduğu ve bu değer su fakirliği sınırına (1.000 m³/yıl) tehlikeli derecede yaklaştığı ifade edilmektedir (DSİ 2023).

Tatlı su kaynakları yalnızca miktar olarak değil, aynı zamanda nitelik açısından da ciddi baskı altındadır. Tarımsal gübreler, evsel atıklar, endüstriyel deşarjlar ve plansız yapılaşma gibi antropojenik faktörler; yüzey ve yer altı sularının kirlenmesine neden olmakta, bu da içme ve kullanma suyunun temininde büyük zorluklar oluşturmaktadır (UNEP 2016). Özellikle nehir ve dere gibi akarsu sistemleri, çevresel kirliliğe açık olmaları nedeniyle, hem ekosistem sağlığı hem de insan kullanımı açısından sürekli izlenmesi gereken stratejik kaynaklar arasında yer almaktadır.

Bu bağlamda, tatlı suyun sınırlılığı ve vazgeçilmezliği, doğal kaynak yönetiminde öncelikli ele alınması gereken bir konu olarak öne çıkmaktadır. Tatlı su kaynaklarının korunması, yalnızca mevcut nesillerin değil, gelecek kuşakların da temel yaşam hakkını güvence altına almak açısından yaşamsal bir gerekliliktir. Bu amaçla hem küresel hem de yerel ölçekte sürdürülebilir su politikalarının geliştirilmesi, toplumun tüm kesimlerinin katılımıyla çevresel bilinçlendirme çalışmalarının yürütülmesi büyük önem arz etmektedir.

Tatlı su kaynaklarının korunmasında temel kavramlardan biri olan *su kalitesi*, bir su kütlelerinin fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin belirli bir kullanım amacına uygunluğunu ifade eder. Su kalitesi, yalnızca ekolojik sistemlerin devamlılığı açısından değil, aynı zamanda insan sağlığı ve sosyo-ekonomik faaliyetlerin sürdürülebilirliği için de kritik bir göstergedir (Barlas 1995; Kazancı vd 1997). İçme suyu temini, tarımsal sulama, sanayi ve rekreasyonel kullanım gibi farklı alanlarda, suyun kalitesi doğrudan kullanım değerini belirlemektedir.

Günümüzde artan nüfus, sanayileşme ve kentleşmenin etkisiyle, su kaynakları üzerindeki antropojenik baskılar yoğunlaşmış; buna bağlı olarak kirlilik oranları ciddi biçimde artış göstermiştir. Endüstriyel atıklar, evsel kanalizasyon suları, tarımda kullanılan pestisit ve gübrelerin yüzeysel akışla su sistemlerine karışması gibi faaliyetler, su kaynaklarının kimyasal ve mikrobiyolojik açıdan kirlenmesine neden olmaktadır (Güler & Çobanoğlu 1994). Bu kirleticiler su ekosistemlerinin dengesini bozmakta, biyoçeşitliliğin azalmasına, sudaki çözünmüş oksijen seviyelerinin düşmesine ve insan sağlığı açısından tehlikeli patojenik mikroorganizmaların yayılmasına yol açmaktadır (WHO 2017a).

Su kirliliği yalnızca gözle görülebilen fiziksel değişikliklerle sınırlı değildir; çözünmüş organik ve inorganik kirleticilerin varlığı da su ekosistemlerinde önemli bozulmalara yol açmaktadır. Özellikle tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan nitrat ve fosfat girdileri ile endüstriyel kaynaklı ağır metaller, günümüzde tatlı su ekosistemlerini tehdit eden en yaygın kirleticiler arasında yer almaktadır. Bu maddeler, su ortamında toksik etkilere sebep olmakta, ötrofikasyon süreçlerini hızlandırmakta ve besin zinciri boyunca biyolojik birikim yoluyla

ekosistem sağlığını ve insan kullanımını risk altına sokmaktadır (Camargo & Alonso 2017; Paerl & Otten 2023).

Özellikle mikrobiyolojik kirleticiler, gelişmekte olan ülkelerde ciddi bir halk sağlığı problemi oluşturmakta; suyla bulaşan hastalıkların yayılmasına neden olmaktadır. Kolera, tifo, dizanteri gibi hastalıklar, yetersiz arıtılmış içme sularının tüketilmesi sonucunda yaygın hale gelmektedir. Bu nedenle Dünya Sağlık Örgütü (WHO), güvenli içme suyu sağlanabilmesi adına mikrobiyolojik kalite standartlarının sağlanmasını zorunlu tutmaktadır (WHO 2017a).

Su kalitesinin korunması ve sürdürülebilir yönetimi için fiziksel-kimyasal analizlerin yanı sıra biyolojik izleme yöntemleri de önemli bir araç olarak kullanılmaktadır. Özellikle fitoplankton, bentik omurgasızlar ve balık toplulukları gibi biyolojik göstergeler, ekosistem sağlığını uzun dönemli ve bütüncül bir perspektifle yansıtabilmektedir. Günümüzde su kalitesinin değerlendirilmesinde, fiziksel (renk, bulanıklık, sıcaklık), kimyasal (pH, çözünmüş oksijen, nitrat, fosfat) ve mikrobiyolojik (örneğin toplam koliform, *Escherichia coli*) parametrelerin biyolojik indikatörlerle birlikte ele alınması, çok boyutlu ekolojik bir analiz imkânı sunmaktadır (Birk vd 2012; Wu vd 2025).

Su kalitesi kavramı, yalnızca çevresel bir ölçüt değil, aynı zamanda hukuki ve yönetsel bir çerçeveye de sahiptir. Türkiye’de Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği (SKKY), içme, sulama ve rekreasyonel kullanımlar için gerekli su kalitesi standartlarını belirlemiş; kirlilik yükünün kontrolü, izleme ve sınıflandırma süreçlerini yasal güvence altına almıştır (Anonim 2004). Bu tür düzenlemeler, su kalitesinin korunması ve kirleticilere karşı önleyici politikaların uygulanması açısından büyük önem taşımaktadır.

Su kalitesi izleme faaliyetlerinin kurumsal altyapılarla desteklenmesi, çevresel verilerin düzenli ve şeffaf şekilde toplanmasını, değerlendirilmesini ve karar süreçlerine entegre edilmesini mümkün kılar. Bu bağlamda, bilimsel temelli ve çok disiplinli bir yaklaşımla yürütülecek su kalitesi yönetimi, yalnızca çevresel değil, aynı zamanda sosyal ve ekonomik sürdürülebilirliğin de temelini oluşturur.

Su kaynaklarının korunması ve sürdürülebilir kullanımı, yalnızca suyun fiziksel ve kimyasal analizlerini yapmakla sınırlı değildir. Aynı zamanda bu verilerin belirli kriter ve standartlara göre değerlendirilmesi gerekmektedir. Su kalitesi kriterleri, bir su kaynağında bulunmasına izin verilen belirli kirleticilerin konsantrasyonlarını belirleyen bilimsel temelli eşik değerlerdir. Su kalitesi standartları ise, bu kriterleri dikkate alarak yasal çerçeveye oturtulmuş, belirli kullanım amaçlarına yönelik suyun kalitesine ilişkin uyulması gereken düzenlemelerdir (Güler & Çobanoğlu 1994).

Kriter ve standartlar arasındaki fark, suyun değerlendirilmesindeki bilimsel ve yönetsel yaklaşım farkından kaynaklanır. Kriterler daha esnek ve bilimsel temellidir; çevresel değişkenliklere göre güncellenebilir. Standartlar ise yasal bağlayıcılığı olan, uygulamaya dönük hükümlerdir ve ilgili kurumlarca denetlenir (Tchobanoglous & Schroeder 1985). Örneğin; belirli bir bölgede içme suyu için maksimum nitrat seviyesi 50 mg/L olarak belirlenmişse, bu bir standarttır ve aşılması durumunda yaptırımlar gündeme gelebilir.

Uluslararası düzeyde su kalitesi kriterlerinin belirlenmesinde en etkili kuruluşlardan biri Dünya Sağlık Örgütü (WHO)'dür. WHO, içme suyu, tarımsal sulama ve rekreasyonel su kullanımları için farklı sınır değerler önermektedir (WHO 2017b). Avrupa Birliği ülkeleri için ise Su Çerçeve Direktifi (Water Framework Directive - WFD), yüzey ve yeraltı sularının korunması, iyileştirilmesi ve sürdürülebilir yönetimi için kapsamlı bir yasal zemin oluşturmaktadır. Bu direktif, tüm üye ülkelerin yüzey sularını “iyi ekolojik durum” seviyesine getirmesini amaçlamaktadır (EC 2000).

Tablo 1. Dünya Sağlık Örgütü İçme Suyu Kalitesi Rehberi'ne Göre Bazı Temel Parametreler ve Sınır Değerleri

Parametre	Birim	WHO Önerilen Sınır Değeri
pH	-	6,5 – 8,5 (tat ve korozyon açısından önerilir)
Sıcaklık	°C	≤ 25 °C (estetik ve mikrobiyolojik stabilite için)
İletkenlik	µS/cm	≤ 1500 µS/cm (estetik kriter, sağlık limiti yok)
Çözünmüş Oksijen	mg/L	≥ 5 mg/L (suda iyi ekolojik kalite için önerilir)
Nitrat (NO ₃ -N)	mg/L	50 mg/L (10 mg/L NO ₃ -N eşdeğeri)
Nitrit (NO ₂ -N)	mg/L	0,2 mg/L
Amonyak (NH ₃ -N)	mg/L	≤ 1,5 mg/L (tat-koku için)
Toplam Fosfor	mg/L	≤ 0,1 mg/L (ötrifikasyon kontrolü için, sağlık limiti yok)
Toplam Azot (TN)	mg/L	≤ 10 mg/L (ötrifikasyon kontrolü, sağlık limiti yok)
Florür	mg/L	1,5 mg/L
Arsenik	µg/L	10 µg/L
Kurşun	µg/L	10 µg/L
Civa	µg/L	6 µg/L
Kadmiyum	µg/L	3 µg/L
Bakır	mg/L	2 mg/L
Çinko	mg/L	3 mg/L
Mangan	mg/L	0,1 mg/L
Demir	mg/L	0,3 mg/L
Sülfat	mg/L	500 mg/L
Klorür	mg/L	250 mg/L

Türkiye’de ise su kalitesine ilişkin yasal düzenlemelerin temelini **Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği (SKKY)** oluşturmaktadır. Bu yönetmelik, yüzeysel su kaynaklarını dört ana sınıfa ayırarak her sınıf için uygun kalite sınır değerlerini tanımlar (Anonim, 2004):

- **Sınıf I (Yüksek Kaliteli Su):** İçme ve rekreasyonel amaçla doğrudan kullanılabilir, minimum düzeyde arıtma gerektirir.
- **Sınıf II (Az Kirlenmiş Su):** İkincil arıtma sonrası kullanılabilir, sulama ve endüstriyel kullanıma uygundur.
- **Sınıf III (Kirli Su):** İleri düzey arıtma gerektirir, endüstriyel kullanıma ve bazı tarımsal uygulamalara uygundur.
- **Sınıf IV (Çok Kirlenmiş Su):** Genellikle kullanıma uygun olmayan, arıtma ile ancak sınırlı düzeyde değerlendirilebilen sular.

Tablo 2. SKKY Yüzeysel Su Kalite Sınıfları ve Parametre Değerleri

Parametre	Birim	Sınıf I	Sınıf II	Sınıf III	Sınıf IV
Sıcaklık	°C	≤ 25	≤ 25	≤ 30	> 30
pH	-	6,5–8,5	6,5–8,5	6,0–9,0	Dışına çıkması
Çözünmüş Oksijen	mg/L	≥ 8	≥ 6	≥ 3	< 3
Oksijen Doygunluğu	%	≥ 90	≥ 70	≥ 40	< 40
Klorür (Cl-)	mg/L	≤ 25	≤ 200	≤ 400	> 400
Sülfat (SO ₄)	mg/L	≤ 200	≤ 200	≤ 400	> 400
Amonyum Azotu (NH ₄ -N)	mg/L	≤ 0,2	≤ 1	≤ 2	> 2
Nitrit Azotu (NO ₂ -N)	mg/L	≤ 0,002	≤ 0,01	≤ 0,05	> 0,05
Nitrat Azotu (NO ₃ -N)	mg/L	≤ 5	≤ 10	≤ 20	> 20
Toplam Fosfor	mg/L	≤ 0,02	≤ 0,16	≤ 0,65	> 0,65
BOİ ₅	mg/L	≤ 4	≤ 8	≤ 20	> 20
KOİ	mg/L	≤ 25	≤ 50	≤ 70	> 70
Toplam Koliform	EMS/100 mL	≤ 100	≤ 20000	≤ 100000	> 100000
Fekal Koliform	EMS/100 mL	≤ 10	≤ 200	≤ 2000	> 2000

Bununla birlikte, su kalitesi kriter ve standartlarının yalnızca teknik ölçütlere değil, aynı zamanda yerel çevre koşullarına, sosyo-ekonomik ihtiyaçlara ve suyun kullanım amacına göre belirlenmesi gerektiği unutulmamalıdır. Örneğin, sulama amacıyla kullanılacak bir suyun pH aralığı veya iletkenlik düzeyi, içme suyu için belirlenen standartlardan farklılık gösterebilir (Keeney & Hatfield 2001).

Sonuç olarak, su kalite kriterleri ve standartları, çevresel yönetim politikalarının temel bileşenlerinden biri olarak işlev görür. Etkin bir su yönetimi için yalnızca parametrelerin ölçülmesi değil, bu parametrelerin hangi sınıfa denk geldiği, kullanım amacına uygunluğu ve yasal sınırların aşılp aşılmadığı gibi çok boyutlu analizlerin yapılması gerekmektedir. Bu bağlamda, Tortum Çayı gibi ekolojik ve ekonomik açıdan önemli bir su kaynağının kalitesinin değerlendirilmesinde ulusal ve uluslararası kriterlerin dikkate alınması büyük önem taşımaktadır.

Akarsular, tatlı su ekosistemlerinin en dinamik ve karmaşık bileşenlerinden birini oluşturur. Devamlı akışın hâkim olduğu bu sistemler, başta kaynak suları olmak üzere yağmur ve kar sularıyla beslenerek doğal bir çevrim içerisinde işlev görürler (Wetzel 2001). Akarsular; suyun taşınması, ekosistemler arası bağlantı kurulması ve besin döngülerinin sürekliliğinin sağlanması gibi birçok ekolojik işlevi yerine getirirler. Bu sistemlerin fiziko-kimyasal özellikleri ise bölgenin jeolojik yapısı, iklim koşulları, bitki örtüsü ve insan faaliyetleri gibi faktörlerden doğrudan etkilenir.

Türkiye’deki akarsular, genellikle yüksek eğimli dağlık alanlardan kaynaklanarak kısa mesafelerde büyük debi değişimleri gösterebilmektedir. Bu durum, kirlilik yükünün taşınma hızını artırmakla kalmaz, aynı zamanda kirliliğin yerel ve bölgesel etkilerinin daha hızlı ve geniş alanlara yayılmasına neden olur (Cirik & Cirik 1999b). Özellikle küçük ve orta büyüklükteki akarsular, yüzeysel akışa ve noktasal kirletici girişlerine karşı daha hassas yapıya sahiptir. Tortum Çayı da bu bağlamda, bölgesel kullanım ve baskılar nedeniyle su kalitesi açısından hassas bir sistem olarak değerlendirilmektedir.

Akarsuların belirli bir seviyeye kadar kendini temizleyebilme, yani doğal bir “otopürifikasyon” kapasitesi vardır. Ancak bu kapasite, verilen kirlilik yükü ve debi miktarı ile doğrudan ilişkilidir (Tchobanoglous & Schroeder 1985). Yüksek debili dönemlerde (örneğin ilkbahar kar erimeleri sonrası) seyrelme artarken, düşük debili dönemlerde kirletici konsantrasyonları artış gösterebilir. Özellikle yaz aylarında artan sıcaklık ve buharlaşma, oksijen seviyesini düşürerek organik kirleticilerin etkisini artırabilir (Barlas 1995).

Akarsuların kirlilik dinamikleri, yalnızca noktasal kaynaklardan (evsel atık sular, endüstriyel deşarjlar) değil; aynı zamanda yayılı kaynaklardan (tarımsal gübreleme, pestisit kullanımı, erozyon ve yüzey akışı) da etkilenmektedir. Tarım alanlarından taşınan fosfat ve nitrat gibi besin tuzları ile pestisitler, ötrofikasyon süreçlerini hızlandırarak biyolojik çeşitliliğin azalmasına yol açabilmektedir. Bunun yanı sıra, yüzey akışlarıyla taşınan sedimentler hem bulanıklığı artırmakta hem de fosfor gibi besin maddelerinin taşınmasına aracılık ederek

ekosistem sağlığı üzerinde baskı oluşturmaktadır (Camargo & Alonso 2017; Withers & Bowes 2018).

Akarsulardaki kirlilik dinamiklerini değerlendirmek için istatistiksel analizlerin yanı sıra sürekli izleme sistemlerine de ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak Türkiye’deki birçok akarsuda, özellikle mikro kirleticiler (ağır metaller, pestisitler, farmasötik atıklar) açısından yeterli ölçüm yapılmamaktadır (Serdar, 2004). Bu tür kirleticiler, akarsularda bozunmadan uzun mesafeler kat edebilmekte ve biyolojik birikim yoluyla sucul canlılar ve nihayetinde insanlar üzerinde toksik etkiler yaratabilmektedir.

Ek olarak, akarsular gllere göre daha hızlı hidrolik dönüşüm yaşadıkları için kirlenme sonrası iyileşme potansiyeli daha yüksektir. Bu zellikleri sayesinde müdahaleye açık sistemler olarak değerlendirilirler. Ancak bu durum, insan kaynaklı yüklerin sürekli olarak arz etmesi durumunda, iyileşme süreçlerinin sekteye uğramasına yol açabilir. Tortum ayı rneğinde de görüldüğü gibi, su rejimini etkileyen yapılaşmalar (HES’ler, taş ocakları, santraller), suyun doğal akışını ve taşıma kapasitesini bozarak, kirliliğin doğal seyrini değiştirmektedir (Demircioğlu Yıldız vd 2011a; Koralay vd 2015).

Sonuç olarak, akarsu sistemlerinin ekolojik ve hidrolojik yapısı, su kalitesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu sistemlerin sürdürülebilirliği, yalnızca kirletici kaynakların azaltılmasıyla değil; aynı zamanda akarsuların taşıma, seyrelme ve kendini temizleme kapasitelerinin korunması ile mümkündür. Tortum ayı gibi yerel önemi yüksek su kaynaklarında, bu dinamiklerin düzenli olarak izlenmesi ve entegre havza yönetimi stratejilerinin hayata geçirilmesi gereklidir.

Tatlı su kaynaklarının kalitesini belirlemede fizikokimyasal parametreler, su ekosistemlerinin mevcut durumunu anlamak ve kirlilik seviyelerini analiz etmek açısından temel araçlardır. Bu parametreler, suyun fiziksel (sıcaklık, pH, çözünmüş oksijen, iletkenlik vb.) ve kimyasal (azot ve fosfor bileşikleri, metal iyonları, silikat, demir gibi) zelliklerini kapsar ve çevresel değişkenliklerle doğrudan ilişkilidir (Wetzel 2001; Chapman 1996). Su kaynaklarının kirlilik düzeylerinin belirlenmesinde bu parametrelerin doğru ve düzenli izlenmesi hayati öneme sahiptir.

Özellikle azot ve fosfor bileşikleri, sucul ortamlarda ötrofikasyon sürecini tetikleyen başlıca besin elementleridir. Toplam azot (TN) ve nitrat (NO_3^-) gibi azot bileşikleri, organik madde ayrışması, evsel ve tarımsal atıklar yoluyla su ortamına taşınmaktadır. Azot bileşiklerinin yüksek konsantrasyonları, sudaki çözünmüş oksijen seviyesini düşürerek balık ölümlerine, alg patlamalarına ve biyolojik çeşitlilikte azalmaya yol açmaktadır (Keeney &

Hatfield 2001; Smith vd 1999). Nitratın insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle WHO, içme suyu için sınır değer olarak 50 mg/L'yi önermektedir (WHO 2017b).

Fosfor, genellikle toplam fosfor (TP) ve ortofosfat biçiminde analiz edilmekte olup, tatlı sularda çoğunlukla sınırlayıcı besin elementidir. Tarımsal gübreleme, evsel atık su değarları ve erozyon yoluyla fosforun yüzey sularına taşınması, ötrifikasyon sürecini hızlandırarak sudaki fitoplankton yoğunluğunu artırmakta, bu da sudaki oksijen dengesinin bozulmasına yol açmaktadır (Carpenter vd 1998; Correll 1998). Ayrıca, kontrolsüz fosfor yükleri, içme suyu kaynaklarında tat ve koku sorunlarına neden olmakta, arıtma maliyetlerini de artırmaktadır.

pH değeri, suyun asidik veya bazik özelliğini gösterir ve sucul organizmaların yaşamsal faaliyetleri açısından kritik bir parametredir. pH seviyesi 6,5–8,5 aralığında olduğunda ekosistem için genel olarak uygundur; bu sınırların dışında kalan değerler, canlılar üzerinde toksik etkiler yaratabilmektedir (Chapman, 1996). Ayrıca, pH değeri metallerin çözünürlüğünü etkilediği için, ağır metal kirliliğiyle mücadelede de önemli bir gösterge olarak kullanılmaktadır (Sawyer, McCarty & Parkin, 2003).

Elektriksel iletkenlik (EC), sudaki çözünmüş iyonların toplam miktarını yansıtan bir parametredir. İletkenlik değerinin yüksekliliği genellikle tuzluluk, mineralleşme veya kirlenme göstergesi olarak kabul edilir. Tarımsal sulama amacıyla kullanılan sular için iletkenlik sınırı 750–2250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ olarak belirlenmiştir (Tchobanoglous & Schroeder 1985). EC değeri, sulardaki toplam çözünmüş madde (TDS) konsantrasyonuyla doğrudan ilişkilidir ve bu nedenle su kalitesinin hızlı bir göstergesi olarak kullanılabilir.

Sonuç olarak, fizikokimyasal parametrelerin analizi, yalnızca suyun mevcut durumunu belirlemekle kalmaz; aynı zamanda kirlenmenin kaynaklarının, taşıma yollarının ve potansiyel ekolojik etkilerinin anlaşılmasına da katkı sağlar. Tortum ayı'nda yapılacak sistematik ve mevsimsel bazlı analizler, bölgenin sürdürülebilir su yönetimi stratejileri için bilimsel temel oluşturacaktır. Bu bağlamda pH, EC, TN, TP, nitrat ve fosfat gibi parametrelerin periyodik takibi, su kalitesinin korunması ve sucul ekosistemin sağlıklı işleyişi açısından zorunludur.

Tatlı su kaynaklarının kimyasal kompozisyonu, küresel ölçekte farklılık göstermekte olup bu farklılıklar; bölgenin jeolojik yapısı, iklimsel özellikleri, toprak türü, bitki örtüsü ve insan faaliyetlerine bağlı olarak şekillenmektedir (Livingstone 1963; Gutierrez vd 2008a). Nehir suları, özellikle çözünmüş maddeler açısından kıtalar arasında belirgin bileşen farklılıkları sergilemektedir. Bu bağlamda, Ca^{2+} , SO_4^{2-} , NO_3^- , Fe ve SiO_2 gibi iyonlar, küresel su kompozisyonunun belirleyici unsurları arasında yer almaktadır (Benoit 1969).

Livingstone'un (1963) ve Benoit'un (1969) alışmalarına göre dünya nehirlerinin ortalama kimyasal kompozisyonu kıtalar bazında değişmektedir. Örneğin, Avrupa nehirleri ortalama 31,1 mg/L kalsiyum (Ca^{2+}), 24,0 mg/L sülfat (SO_4^{2-}) ve 3,7 mg/L nitrat (NO_3^-) içerirken, Afrika nehirleri 23,2 mg/L silikat (SiO_2) ile bu bileşen açısından ne çıkmaktadır. Bu veriler, bölgesel jeolojik oluşumların ve toprak yapılarının, suyun kimyasal karakterini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.

Asya kıtası nehirleri genellikle daha düşük nitrat ve demir içeriğine sahipken, Güney Amerika'daki nehirler, daha yüksek demir konsantrasyonları ile dikkat çekmektedir (Gutierrez vd 2008b). Bu farklılıklar, suyun mineralizasyon seviyesi, asidik veya bazik karakteri ve biyolojik üretkenliği üzerinde doğrudan etkilidir. Aynı zamanda, bu parametreler su kalitesinin sınıflandırılmasında ve kullanım amacının belirlenmesinde temel referanslar sunmaktadır (Chapman 1996).

Türkiye, jeopolitik konumu ve iklim çeşitliliği nedeniyle zengin bir yüzey suyu ağına sahiptir. lke genelinde 25 adet nehir havzası ve 36 büyük akarsu sistemi bulunmaktadır. Bu akarsuların toplam uzunluğu 178.000 kilometreyi açmakta ve ülkenin su potansiyelinin önemli bir kısmını oluşurmaktadır (Cirik & Cirik 1999a). Türkiye'de ayrıca, dağlık bölgelerde yer alan kk gllerle birlikte 120'den fazla doğal gl mevcuttur. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ) verilerine göre, 2024 yılı itibarıyla işletmeye alınmış büyük baraj sayısı 555'e ulaşmıştır (DSİ, 2024).

Türkiye'deki nehirler, genel olarak yüksek mineral içerikli ve orta sertlikte sular olarak sınıflandırılmaktadır. Bu zellik, ülkenin volkanik ve kireçtaşı temelli jeolojik yapısından kaynaklanmaktadır (Güler & obanoğlu 1997). Özellikle Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan nehirlerde kalsiyum, sülfat ve silikat düzeylerinin görece yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu havzalarda azot ve fosfor kirliliği önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır (Carpenter vd 1998; Correll 1998).

Tortum ayı da bu bağlamda, hem Doğu Anadolu'nun hidrolojik yapısını yansıtan hem de bölgedeki antropojenik baskılardan etkilenen karakteristik bir nehir rneği olarak öne çıkmaktadır. Tortum ayı'nın bulunduğu Erzurum ili, yüzeysel akışın yüksek olduğu, kar erimeleri ve yağış rejiminin belirgin olduğu bir coğrafyada yer almakta, bu da çayın fiziko-kimyasal yapısını mevsimsel değişimlere duyarlı hale getirmektedir.

Dolayısıyla, Türkiye'nin su kaynaklarının kalitatif değerlendirilmesinde küresel karşılaştırmalar önem arz etmekte, aynı zamanda bölgesel su yönetimi stratejilerinin şekillendirilmesinde bilimsel temel oluşurmaktadır. Tortum ayı rneğinde olduğu gibi, yerel

ölçekte yapılan detaylı analizler, hem ülke çapında su politikalarının belirlenmesine hem de küresel su kalitesi eğilimlerine dair karşılaştırmalı veri üretimine katkı sunmaktadır.

Tortum Çayı, Doğu Anadolu Bölgesi'nde, Erzurum ilinin Uzundere ve Tortum ilçeleri sınırlarında yer alan önemli bir yüzey suyu kaynağıdır. Kaynağını, Karasu Nehri'nin yukarı havzalarından alan bu akarsu, yörenin hidrolojik yapısını şekillendiren başlıca sistemlerden biridir (Lahn 1944b). Çayın aktığı havza, hem doğal zenginlikleri hem de kültürel ve ekonomik potansiyeli ile dikkat çekmektedir. Bu potansiyelin en bilinen örneklerinden biri, çayın oluşturduğu Tortum Şelalesi ve Tortum Gölü'dür. Heyelan set gölü niteliğinde olan bu göl, hem jeomorfolojik özellikleri hem de doğal peyzajı ile bölgenin ekoturizm potansiyeline büyük katkı sağlamaktadır (Güresinli 2014c).

Bölgenin jeolojik yapısı, topoğrafyası ve iklimsel özellikleri, Tortum Çayı'nın akış rejimini, debisini ve su kalitesini doğrudan etkilemektedir. Karasal iklimin etkisiyle yaz aylarında düşük debili, kış ve ilkbahar aylarında ise yüksek debili bir akış rejimi gözlemlenmektedir. Bu durum, hem su kalitesinde hem de ekosistem bileşenlerinde mevsimsel değişkenliğe neden olmaktadır (Wetzel, 2001). Ayrıca çay, çok sayıda kol ve dere ile beslenmekte olup, bu kolların geçtiği köylerdeki tarımsal faaliyetler, hayvancılık ve yerleşim yapıları, çayın su kalitesi üzerinde önemli antropojenik baskılar oluşturmaktadır (Demircioğlu Yıldız vd 2011a).

Tortum Çayı'nın çevresinde çok sayıda insan faaliyeti gözlemlenmektedir. Özellikle sulama amacıyla kullanım, çayın en yaygın faydalanım biçimidir. Bunun dışında çay üzerinde üç adet tamamlanmamış nehir tipi HES (Hidroelektrik Santral) projesi bulunmaktadır. Bu yapıların tamamı su rejimini, biyolojik çeşitliliği ve su kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir (Atabey & Gürdoğan 2020a). HES projeleri ile suyun belirli bölümlerde borulara alınması, hem su ekosisteminde parçalanmalara hem de aşağı mansaplarda tarımsal üretimin azalmasına yol açmaktadır.

Çayın sahip olduğu ekolojik ve kültürel değerler, bölgenin kalkınması için sürdürülebilir bir yaklaşım benimsenmesini zorunlu kılmaktadır. Özellikle son yıllarda artan doğa turizmi ve “sakin şehir” (Cittaslow) hareketi çerçevesinde, Tortum Havzası'nın rekreasyonel kullanım alanları ön plana çıkmıştır. Ancak bu potansiyelin sürdürülebilir biçimde kullanılabilmesi, çayın su kalitesinin korunmasına ve çevresel etkilerin en aza indirilmesine bağlıdır (Özgeriş & Karahan 2022b).

Bununla birlikte, kıyı çizgilerindeki düzensiz yerleşim ve kontrolsüz arazi kullanımı, sedimentasyon, siltasyon ve su yapılarında tıkanmalara yol açmakta, bu da hem ekolojik dengeyi hem de altyapı sistemlerini tehdit etmektedir (Kopar & Sevindi 2020). Siltasyonun

artması, baraj ve göletlerin ömrünü kısaltmakta, aynı zamanda suyun fiziksel kalitesini düşürmektedir. Bu durum özellikle alabalık üretimi gibi hassas sektörlerde ciddi ekonomik kayıplara neden olabilmektedir.

Sonuç olarak, Tortum Çayı yalnızca bölgesel bir akarsu değil, aynı zamanda ekolojik, ekonomik ve kültürel bir kaynak olarak çok boyutlu değerlere sahiptir. Ancak bu değerlerin korunması, bilimsel temelli izleme çalışmalarıyla desteklenen entegre havza yönetim planlarının uygulanması ile mümkün olacaktır. Bu bağlamda, yapılacak su kalite analizleri, çayın korunmasına yönelik stratejilerin oluşturulmasında temel veri sağlayacaktır.

Tatlı su kaynakları, hem ekosistemlerin sürekliliği hem de insan yaşamının temel ihtiyaçlarının karşılanması açısından kritik bir öneme sahiptir. Ancak artan nüfus, yoğun tarımsal faaliyetler, plansız sanayileşme, madencilik ve enerji üretimi gibi antropojenik baskılar, tatlı su sistemlerinde gözle görülür bir bozulmaya yol açmaktadır. Bu bağlamda, yüzeysel su kaynaklarının fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin düzenli olarak izlenmesi ve değerlendirilmesi, çevre yönetimi ve doğal kaynak planlaması açısından hayati öneme sahiptir (Chapman 1996; Wetzel 2001).

Tortum Çayı, Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan önemli bir akarsu olup, bölgedeki tarım, hayvancılık, balıkçılık ve içme suyu ihtiyaçlarının karşılanmasında temel bir rol üstlenmektedir. Ancak çayın geçtiği havzada yer alan taş ocakları, beton santralleri, alabalık çiftlikleri, hidroelektrik santraller (HES), sulama yapıları ve köy yerleşimleri gibi insan faaliyetleri, çayın su kalitesini mevsimsel ve mekânsal açıdan değiştirmekte ve potansiyel kirlilik risklerini beraberinde getirmektedir (Demircioğlu Yıldız vd 2011a; Atabey & Gürdoğan 2020a). Ayrıca çayın üzerinde inşa edilmekte olan gölet projeleri, suyun debisini ve ekosistem üzerindeki etkilerini uzun vadede dönüştürme potansiyeline sahiptir.

Bu çalışmanın temel amacı, Tortum Çayı ve kollarındaki suyun fizikokimyasal özelliklerini bilimsel yöntemlerle incelemek ve bu parametrelerde mevsimsel ve istasyonel düzeydeki değişimleri ortaya koymaktır. Bu kapsamda pH, elektriksel iletkenlik (EC), çözünmüş oksijen (DO), nitrat (NO_3^-), fosfat (PO_4^{3-}), toplam azot (TN) ve toplam fosfor (TP) gibi çevresel göstergeler üzerinden su kalitesinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Elde edilen veriler, Türkiye'de geçerli olan Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY) ve Kıta İçi Yüzeysel Sular Sınıflandırma Kriterleri çerçevesinde değerlendirilerek çayın hangi kalite sınıfında yer aldığı belirlenecektir (Anonim, 2004).

Ayrıca çalışmanın bir diğer amacı ise, elde edilen su kalite verilerinin coğrafi, çevresel ve sosyo-ekonomik bağlamda yorumlanarak, Tortum Çayı üzerinde sürdürülebilir su yönetimi stratejileri geliştirilmesine katkı sağlamaktır. Bu çerçevede, çayın üst, orta ve alt kesimlerinde

belirlenen 6rneklem6 istasyonlarında yapılan analizler, yerleşim yoğunluğu, tarımsal faaliyet d6zeyi ve end6striyel yapılaşma gibi fakt6rlerle ilişkilendirilerek suyun ekolojik stat6s6ne dair ayrıntılı bir tablo sunulacaktır.

Araştırma sonuçlarının, Tortum ayı çevresinde planlanacak evre politikaları, ekoturizm projeleri, kırsal kalkınma girişimleri ve hidroelektrik enerji yatırımları gibi karar s6relerinde referans alınabilecek bilimsel bir temel oluşturması da beklenmektedir. B6ylece, hem yerel hem de b6lgesel 6lekte doğa-insan etkileşimini g6zet6n, katılımcı ve entegre bir havza y6netimi anlayışının geliştirilmesine katkı sağlanması amaçlanmaktadır.



KURAMSAL TEMELLER

Nehir Sularının Fiziko-Kimyasal Özellikleri

pH

pH, su ortamlarının kimyasal karakterini belirlemede kullanılan en temel göstergelerden biridir. Su ortamında çözülmüş hidrojen iyonu (H^+) konsantrasyonuna dayanan bu ölçüm, suyun asidik mi yoksa bazik mi olduğunu anlamamızı sağlar. pH değeri, 0 ile 14 arasında değişen bir ölçekle ifade edilirken, 7 değeri nötr, 7'nin altı asidik, üstü ise bazik ortamı tanımlar. Doğal içme suyu kaynaklarında pH değeri genellikle 6.5–8.5 aralığında yer alır ve bu değer aralığı sucul yaşam için ideal koşulları sunar (Chapman, 1996).

pH, yalnızca suyun kimyasal dengesini değil, aynı zamanda çözülmüş oksijen, karbon dioksit dengesi ve birçok kimyasal bileşiğin çözünürlüğü üzerinde doğrudan etkili olan bir parametredir. Örneğin, düşük pH seviyelerinde ağır metaller daha kolay çözünerek toksik hale gelirken; yüksek pH seviyelerinde bazı minerallerin çökmesi hızlanabilir. Bu durum, özellikle metal madenciliği faaliyetlerinin yoğun olduğu alanlarda sucul ekosistemler için ciddi bir tehdit unsuru oluşturabilir. Ayrıca sudaki pH değişiklikleri, balıkların üreme kabiliyeti, planktonik organizmaların populasyon dengesi ve mikrobiyal aktivite üzerinde de önemli etkilere sahiptir (Wetzel, 2001).

Tortum Çayı gibi Doğu Anadolu Bölgesi'ndeki akarsular, hem doğal jeolojik yapıdan hem de çevresel antropojenik baskılardan dolayı pH düzeyinde önemli değişkenlikler gösterebilir. Özellikle tarımsal gübre kullanımı, hayvansal atıkların açık alanda depolanması ve evsel atık suların doğrudan çaylara karışması gibi insan kaynaklı etkiler, pH düzeyinde sapmalara neden olabilir. Bunun yanında, eriyen kar suları, volkanik kayaların kimyasal çözünmesi ve mevsimsel sıcaklık değişimleri de pH değerini etkileyen doğal faktörler arasında yer alır. Bu nedenle Tortum Çayı'nda pH ölçümleri, hem kirlilik düzeyinin tespiti hem de ekosistem sağlığının korunması açısından kritik öneme sahiptir.

Çözülmüş Oksijen (DO)

Çözülmüş oksijen (Dissolved Oxygen, DO), sucul ekosistemlerdeki yaşamın sürdürülebilirliği için en kritik parametrelerden biridir. DO, su içerisinde moleküler formda çözülmüş halde bulunan oksijen miktarını ifade eder ve genellikle miligram/litre (mg/L) birimiyle ölçülür. Doğal sularda çözülmüş oksijen, atmosferden difüzyon, fotosentetik aktivite

ve su yüzeyindeki türbülans gibi süreçlerle sağlanır (Wetzel, 2001). Tatlı su ekosistemlerinde çoğu balık türü ve sucul organizma için 5–8 mg/L aralığı optimal kabul edilirken, bu değerin 3 mg/L'nin altına düşmesi stres, üreme başarısızlığı ve ölümler gibi olumsuz sonuçlara yol açabilir (Chapman, 1996).

Çözünmüş oksijen düzeyleri, su sıcaklığı, tuzluluk, atmosfer basıncı, organik madde yükü ve mikrobiyal aktivite gibi çok sayıda faktörden etkilenir. Özellikle organik kirlilik yükünün yüksek olduğu sularda, mikroorganizmaların organik maddeleri parçalama sürecinde oksijen tüketimi artar ve bu da DO seviyesinin hızla düşmesine neden olur (Sawyer ve Ark., 2003). Yetersiz oksijen, balık ölümleri, bentik fauna kaybı ve anaerobik koşulların gelişmesiyle birlikte kötü koku ve toksik gaz salınımı gibi sorunlara yol açar.

Tortum Çayı'nda çözünmüş oksijen miktarı, mevsimsel ve istasyonel bazda önemli dalgalanmalar göstermektedir. İlkbahar ve yaz aylarında artan sıcaklık, suyun oksijen tutma kapasitesini düşürürken; bu dönemde artan organik yük ve alg patlamaları da oksijen tüketimini hızlandırmaktadır. Ayrıca, çayın geçtiği tarımsal alanlarda kullanılan gübreler ve hayvansal atıkların suya karışması, biyolojik oksijen ihtiyacını (BOD) artırarak DO seviyelerinin düşmesine neden olur. Kış aylarında ise düşük sıcaklıklar ve artan türbülans, oksijen doygunluğunu artırabilir. DO ölçümleri, Tortum Çayı'nda hem kirlilik yükünün hem de ekosistem sağlığının izlenmesi açısından temel bir biyolojik indikatör işlevi görmektedir.

Sıcaklık

Sıcaklık, su ekosistemlerinde fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçleri doğrudan etkileyen temel bir parametredir. Su sıcaklığı genellikle santigrat derece (°C) ile ifade edilir ve güneş radyasyonu, mevsimsel iklim değişimleri, akarsu rejimi, su derinliği ve akış hızı gibi doğal faktörlerden etkilenir (Wetzel, 2001). Sıcaklık, çözünmüş oksijenin sudaki çözünürlüğünü belirleyen başlıca değişkenlerden biridir; sıcaklık arttıkça suyun oksijen tutma kapasitesi azalır. Ayrıca, kimyasal reaksiyon hızları ve biyolojik metabolizma sıcaklıkla doğrudan ilişkilidir (Tchobanoglous & Schroeder, 1985).

Sıcaklık değişimleri, sucul canlıların yaşam döngüsü, üreme dönemleri ve tür dağılımı üzerinde belirleyici rol oynar. Çoğu tatlı su balığı, 0–25 °C aralığında optimal yaşam koşullarına sahiptir; bu aralığın dışına çıkan sıcaklıklar, stres, büyüme yavaşlaması ve ölümler gibi sonuçlar doğurabilir (Chapman, 1996). Ayrıca, ani sıcaklık değişimleri (“termal şok”) sucul ekosistemlerde ciddi biyolojik hasarlara neden olabilir.

Tortum Çayı'nda sıcaklık, hem mevsimsel iklim koşulları hem de çevresel faktörlere bağlı olarak geniş bir aralıkta değişebilmektedir. İlkbahar aylarında kar sularının erimesi,

sıcaklık değerlerini düşürürken; yaz aylarında düşük debi, yüksek güneşlenme süresi ve tarımsal sulama faaliyetleri sıcaklık artışına yol açmaktadır. Sıcaklık artışı, özellikle yaz aylarında fosfat ve nitrat gibi besin elementlerinin etkisiyle alg çoğalmasını teşvik ederek ötrofikasyon riskini artırmaktadır. Ayrıca, çayın geçtiği bölgelerdeki HES göletleri ve barajlar, akış rejimini değiştirerek suyun ısınma/soğuma dinamiklerini etkileyebilmektedir. Bu nedenle sıcaklık parametresi, Tortum Çayı'nda hem ekolojik denge hem de su kalitesi yönetimi açısından kritik öneme sahiptir.

Elektriksel İletkenlik (EC)

Elektriksel iletkenlik (EC), su içerisinde çözünmüş iyonların miktarını dolaylı olarak ölçen ve suyun toplam çözünmüş madde (TDS) miktarı hakkında bilgi veren bir parametredir. EC değeri, iyonik bileşiklerin varlığına bağlı olarak artar; dolayısıyla sudaki çözünmüş tuzlar, mineraller ve diğer iyonize olmuş maddelerin yoğunluğu ile doğru orantılıdır. EC, mikrosiemens/santimetre ($\mu\text{S}/\text{cm}$) birimiyle ifade edilir ve içme suyu, sulama suyu veya sanayi suyu olarak kullanılabilirliğin değerlendirilmesinde temel bir gösterge olarak kullanılır (Tchobanoglous & Schroeder, 1985).

Tatlı su kaynaklarında elektriksel iletkenlik genellikle 50–1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında değişmekle birlikte, bu değer bölgenin jeolojisine, yerel hidrolojik koşullara ve insan faaliyetlerine göre farklılık gösterebilir. EC düzeyi, özellikle tarımsal alanlarda gübrelerin ve pestisitlerin yer altı ve yüzey sularına sızmasıyla önemli ölçüde artabilir. Bunun yanında sanayi atıkları, evsel atık sular, yol tuzlamaları ve hayvansal atıklar da EC seviyesini yükselten faktörler arasında yer alır. Yüksek EC, suyun tuzlu hale gelmesine neden olarak bitkiler için toksik etki yaratabilir ve toprak yapısının bozulmasına yol açabilir (Sawyer ve Ark., 2003).

Tortum Çayı gibi yerleşim ve tarım alanlarından geçen su sistemlerinde EC değeri, özellikle mevsimsel değişkenlik gösteren dönemlerde hassas bir gösterge haline gelir. İlkbahar aylarında kar erimesiyle birlikte taşınan mineraller, yüzey akışıyla suya karışarak iletkenlik değerini etkileyebilir. Yaz aylarında buharlaşmanın artmasıyla birlikte konsantrasyon daha da yükselir. Ayrıca, çayın geçtiği köylerde bulunan büyükbaş ve küçükbaş hayvancılık faaliyetleri, gübrelerin toprağa karışması ve bu maddelerin yüzey akışıyla suya ulaşması, sonucunda EC üzerinde belirleyici rol oynar. Bu bağlamda EC parametresi, Tortum Çayı'nın fiziksel ve kimyasal kirlenme düzeyinin tespiti açısından son derece önemlidir.

Nitrat (NO_3^-)

Nitrat (NO_3^-), doğada azot döngüsünün bir parçası olarak ortaya çıkan, suda kolay çözünebilir ve hareketli bir inorganik bileşiktir. Tarımsal faaliyetlerde kullanılan azotlu

gübrelerin parçalanması sonucu oluşur ve bu yolla yer altı ve yüzey sularına taşınabilir. Aynı zamanda hayvansal atıkların ayrışması ve evsel atıkların doğrudan su kaynaklarına karışması da nitrat yükünü artıran başlıca nedenlerdendir (Keeney & Hatfield, 2001). Nitrat, doğal ekosistemlerde bitkilerin büyümesi için gerekli bir besin maddesidir; ancak sucul ortamlarda aşırı miktarda birikmesi, ötrofikasyon gibi ciddi çevresel sorunlara yol açar.

Nitrat kirliliği, sadece ekosistem sağlığı açısından değil, insan sağlığı açısından da ciddi riskler taşımaktadır. Yüksek nitrat konsantrasyonu, özellikle bebeklerde methemoglobinemi olarak bilinen ‘‘mavi bebek sendromu’’na neden olabilir (WHO, 2017a). Bu nedenle içme suyu standartlarında nitrat için belirlenmiş maksimum sınır değerleri bulunmaktadır. Dünya Sağlık  rg t ’ne göre içme suyundaki nitrat miktarı 50 mg/L’yi aşmamalıdır. Bu sınırın üzerindeki değerler, yalnızca fizyolojik rahatsızlıklara neden olmakla kalmayıp, aynı zamanda uzun vadede karsinogenik etkilere yol açabilecek nitrozaminlerin oluşumunu da tetikleyebilir.

Tortum ayı gibi kırsal yerleşimlerden ve tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu bölgelerden geçen su kaynaklarında nitrat düzeylerinin izlenmesi büyük önem taşır. Bölgedeki köylerde yürütülen tarım ve hayvancılık faaliyetleri, özellikle açık alanlara bırakılan gübre ve atıkların yağışlarla birlikte yüzey akışı yoluyla çaya karışmasına neden olmaktadır. Ayrıca, birçok köyde kanalizasyon altyapısının bulunmaması, evsel atıkların doğrudan suya ulaşmasına olanak tanımaktadır (Demircioğlu Yıldız vd 2011a). Bunun yanı sıra, yerleşimlerin çoğunda hayvan ahırlarından kaynaklanan yıkama sularının ve hayvansal atıkların doğrudan dere ve çay yataklarına verilmesi, nitrat birikimini daha da artırmakta ve suyun ekolojik dengesini bozmaktadır (Güresinli 2014b). Bu durum, nitrat seviyelerinde mevsimsel dalgalanmalara ve yıl bazında belirgin artışlara neden olmaktadır. Nitrat analizleri, hem mevcut kirlilik yükünün belirlenmesi hem de alınacak önlemlerin planlanması açısından Tortum ayı için vazgeçilmez bir gösterge niteliği taşır.

Fosfat (PO_4^{3-})

Fosfat (PO_4^{3-}), suda çözünür formda bulunan ve özellikle tarım, evsel atıklar ile deterjan gibi temizlik ürünlerinden kaynaklanan bir besin elementidir. Azotla birlikte fosfor, sucul ekosistemlerde birincil üretimi belirleyen başlıca sınırlayıcı besin maddelerinden biridir. Fosfat, doğal ortamlarda toprak ve kayaçların çözünmesiyle suya karışabilse de; günümüzde fosfat kirliliğinin en büyük nedeni insan kaynaklı faaliyetlerdir. Tarımsal gübreleme, evsel atık deşarjları ve hayvansal atıklar, fosfatın su kaynaklarına taşınmasında önemli rol oynar (Smith ve Ark., 1999).

Sudaki fosfat miktarının artması, özellikle durağan ve akarsu sistemlerinde **ötrofikasyon** sürecini tetikleyerek, alg ve su bitkilerinde aşırı artışa yol açar. Bu süreç, çözünmüş oksijen miktarının azalmasına, sudaki canlı yaşamının tehlikeye girmesine ve estetik/kamusal kullanıma uygunluğun kaybolmasına neden olur. Fosfat fazlalığı, sucul ortamlarda biyolojik dengenin bozulmasına, balık ölümlerine ve tür çeşitliliğinin azalmasına neden olur. Dolayısıyla fosfat, yalnızca kimyasal bir gösterge değil, aynı zamanda ekolojik bir stres faktörü olarak değerlendirilmelidir (Carpenter ve Ark 1998).

Tortum Çayı'nda fosfat seviyeleri, özellikle yaz aylarında artış gösterme eğilimindedir. Bu durumun başlıca nedenleri arasında hayvancılıkla uğraşan köylerde gübrelerin doğrudan doğaya bırakılması, deterjan içeren evsel atık suların arıtılmadan çaya karışması ve çay kenarında yapılan tarımsal faaliyetlerde kullanılan fosforlu gübrelerin yağışlarla birlikte suya taşınması yer almaktadır. Ayrıca, çayın geçtiği havzada yer alan küçük yerleşim birimlerinin büyük bölümünde biyolojik arıtma sistemlerinin olmaması fosfat yükünü doğrudan artırmaktadır. Bu bağlamda fosfat parametresi, Tortum Çayı'nın kirlilik profilini anlamak ve kontrol stratejileri geliştirmek açısından vazgeçilmezdir.

Toplam Azot (TN)

Toplam Azot (Total Nitrogen, TN), bir su örneğinde bulunan tüm azot bileşiklerinin (organik azot, amonyak azotu, nitrit ve nitrat) toplamını ifade eden kapsamlı bir su kalite parametresidir. TN, sucul ekosistemlerde azotun genel yükünü ortaya koyarak, kirleticilerin kaynakları hakkında önemli ipuçları sağlar. Azotlu bileşikler doğada bitki ve hayvan atıklarının ayrışması, atmosferik taşınım ve mikrobiyal faaliyetlerle oluşmakla birlikte, günümüzde bu bileşiklerin çoğu insan faaliyetleri sonucu su ortamlarına taşınmaktadır (Wetzel, 2001).

Toplam azot, özellikle tarımsal alanlarda kullanılan azotlu gübrelerin ve hayvansal atıkların çözünerek yüzeysel ve yer altı sularına karışmasıyla yükselir. TN düzeyinin artması, ötrofikasyon sürecini hızlandırarak sudaki çözünmüş oksijenin tükenmesine ve anaerobik koşulların oluşmasına neden olur. Bu da balık ve diğer sucul canlılar için yaşam koşullarının bozulmasına, ekosistem dengesinin bozulmasına ve kötü kokuların ortaya çıkmasına yol açar. Ayrıca TN, uzun vadeli kirlilik izleme çalışmalarında kullanılan önemli bir biyobelirteçtir (Dodds ve Ark 2002).

Tortum Çayı özelinde değerlendirildiğinde, çevredeki köylerin hayvancılık faaliyetlerinin yoğunluğu ve tarımsal uygulamalarda kontrolsüz gübre kullanımı, toplam azot (TN) yükünün artmasına neden olmaktadır. Özellikle açık alanda bırakılan hayvan gübrelerinin yağışlarla birlikte yüzey akışı yoluyla suya taşınması, TN düzeylerinde ani yükselmelere yol

açabilir. Bölgedeki birçok yerleşimde ahırların zemin yıkama sularının ve hayvansal atıkların herhangi bir arıtma sürecine tabi tutulmadan doğrudan dere veya çaya verilmesi, bu azot yükünü önemli ölçüde artırmaktadır. Aynı şekilde, kanalizasyon altyapısı bulunmayan yerleşim alanlarında evsel atıkların doğrudan çaya karışması da organik azot yükünü artırarak toplam azot değerini yükseltmektedir. Bu nedenle, TN parametresi hem doğal süreçlerin hem de antropojenik etkilerin—özellikle hayvansal kirlilik gibi kırsal kaynaklı baskıların—ortak sonucunu yansıttığı için, Tortum Çayı'nın su kalitesinin izlenmesinde vazgeçilmez bir gösterge niteliği taşımaktadır.

Toplam Fosfor (TP)

Toplam Fosfor (Total Phosphorus, TP), su örneğinde bulunan tüm fosfor bileşiklerinin toplamını ifade eden bir parametredir. TP, hem çözülmüş hem de partikül haldeki organik ve inorganik fosfor formlarını kapsar. Sucul ekosistemlerde birincil üretimin sınırlayıcı faktörlerinden biri olan fosfor, özellikle tatlı su sistemlerinde düşük konsantrasyonlarda bulunur; ancak insan kaynaklı faaliyetlerle bu oran dramatik şekilde artabilir (Correll, 1998). TP'nin aşırı miktarda suya taşınması, özellikle göl ve baraj gibi durağan su kütlelerinde ciddi çevresel sorunlara yol açabilir.

Fosfor, doğada kayaların ayrışması ve organik maddenin çözünmesiyle sınırlı miktarda suya karışırken; modern toplumlarda fosfor yükünün büyük kısmı tarımda kullanılan fosfatlı gübrelerden, evsel atıklardan ve deterjanlardan kaynaklanır. Toplam fosforun artışı, ötrofikasyonun ana tetikleyicisi olup, alg patlamaları, oksijen tükenmesi, balık ölümleri ve suyun estetik/kamusal kullanım açısından değerinin düşmesine neden olur. TP düzeylerinin düzenli izlenmesi, su kalitesinin korunması ve kirlenmenin önlenmesi açısından kritik öneme sahiptir (Carpenter ve Ark., 1998).

Tortum Çayı özelinde değerlendirildiğinde, çayın geçtiği yerleşim alanlarında kanalizasyon sistemlerinin yetersizliği ve deterjan içeren evsel atıkların doğrudan deşarjı TP miktarını artıran başlıca etkenlerdir. Ayrıca hayvancılıkla uğraşan köylerde gübrelerin açıkta depolanması ve fosfat içeren tarım ilaçlarının kullanımı, fosforun suya taşınmasını kolaylaştırmaktadır. İlkbahar ve yaz aylarında yoğunlaşan tarımsal faaliyetler ve yağışlarla gelen yüzey akışı, TP konsantrasyonlarını mevsimsel olarak yükseltebilir. Bu durum, Tortum Çayı'nın ekolojik dengesini tehdit etmekte ve uzun vadeli bir kirlilik riski oluşturmaktadır. Bu nedenle toplam fosfor parametresi, su kalitesinin izlenmesinde ve sürdürülebilir havza yönetimi politikalarının geliştirilmesinde temel göstergelerden biridir.

Literatür Özeti

Dünya üzerindeki toplam suyun %97,5'i okyanuslar gibi tuzlu sulardan oluşmakta, yalnızca %2,5'i tatlı su formunda bulunmaktadır. Ancak bu tatlı suyun %68'i kutup ve dağ buzullarında, %30'u ise yer altı sularında yer almakta; yüzeysel erişilebilir tatlı su miktarı %1'in altına düşmektedir (UNESCO, 2020). Bu durum, kullanılabilir tatlı su kaynaklarını son derece sınırlı hale getirmekte ve suya erişimi küresel ölçekte hem doğal hem de politik bir sorun haline dönüştürmektedir. Dünya genelinde su kaynaklarının coğrafi dağılımı oldukça eşitsiz olup, özellikle Afrika, Orta Doğu ve Güney Asya gibi bölgelerde kişi başına düşen su miktarı hızla azalmaktadır (WWAP, 2019). Bunun yanında, iklim değişikliği nedeniyle yağış rejimlerinin düzensizleşmesi, kuraklık olaylarının sıklaşması ve buzulların erimesi gibi süreçler, mevcut su rezervlerinin sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir. 2030 yılı itibarıyla dünya nüfusunun %40'ının su kıtlığı yaşayan bölgelerde yaşayacağı tahmin edilmekte; bu da suyun yalnızca çevresel değil, aynı zamanda ekonomik ve toplumsal bir güvenlik meselesi haline geldiğini göstermektedir (UNEP, 2016). Bu bağlamda tatlı su kaynaklarının korunması, etkin şekilde yönetilmesi ve kirlilikten arındırılması, yalnızca çevre sağlığı değil aynı zamanda gıda güvenliği, enerji üretimi ve halk sağlığı açısından da stratejik öneme sahiptir.

Küresel iklim değişikliği ve buna bağlı gelişen küresel ısınma, su kaynaklarının yenilenme hızını ciddi biçimde azaltmakta ve su döngüsünün doğal dengesini bozmaktadır. Artan sıcaklıklar, buharlaşma oranlarını yükselterek yüzeysel su kaynaklarının miktarını azaltmakta; bu durum özellikle göl ve nehir gibi açık su sistemlerinde belirgin su kayıplarına yol açmaktadır (Bates ve Ark., 2008). Aynı zamanda kar örtüsünün erime sürelerinin kısalması ve dağ buzullarının geri çekilmesi, su rejimlerinde düzensizliklere neden olmakta; bu da başta tarım, enerji üretimi ve içme suyu temini olmak üzere pek çok sektörü doğrudan etkilemektedir (IPCC, 2022). Bununla birlikte, yağışların mevsimsel ve coğrafi dağılımında meydana gelen kaymalar, bazı bölgelerde kuraklık riskini artırırken, diğerlerinde sel ve taşkın gibi su fazlalığına dayalı sorunlara neden olmaktadır (FAO, 2017). Özellikle su stresi altındaki bölgelerde iklim değişikliğinin etkileri, mevcut kaynakların yönetimini daha da karmaşık hale getirerek suya erişimde toplumsal adaletsizlikleri derinleştirmektedir. Bu bağlamda, iklim değişikliği yalnızca bir çevre sorunu değil, aynı zamanda küresel ölçekte sosyal eşitsizlikleri ve su güvenliğini etkileyen çok boyutlu bir kriz alanı olarak ele alınmalıdır.

Türkiye özelinde değerlendirildiğinde, iklim değişikliğinin etkileri daha da belirgin hale gelmekte; artan sıcaklıklar ve azalan yağış miktarları, ülkenin birçok bölgesinde su kıtlığını derinleştirmektedir. Türkiye'nin yıllık kişi başına düşen kullanılabilir su miktarı 1.500 m³'ün altına inmiş olup, bu veri ülkenin "su stresi yaşayan ülkeler" kategorisinde değerlendirildiğini

göstermektedir (DSİ, 2022). Özellikle İç Anadolu, Güneydoğu Anadolu ve Doğu Anadolu bölgelerinde yağış rejimlerinin düzensizleşmesi, yüzeysel su kaynaklarının sürdürülebilirliğini tehdit ederken; tarımsal üretimde verim kayıpları, yeraltı su seviyelerinde düşüşler ve su temininde altyapı yetersizlikleri gibi ikincil krizleri de beraberinde getirmektedir (Kundzewicz & Krysanova, 2010). Ayrıca Türkiye’de iklim değişikliğine karşı bütüncül su yönetimi stratejilerinin henüz yeterince etkin uygulanamaması, kırsal alanlardaki kırılgan toplulukların suya erişimini daha da güçleştirmektedir (Altınbilek, 2006). Bu nedenle iklim değişikliğine uyumlu havza yönetimi, entegre tarım-su planlaması ve kurumsal kapasitenin güçlendirilmesi, Türkiye’nin sürdürülebilir su güvenliği açısından kritik önem arz etmektedir.

Bu durumlara ek olarak, yalnızca suyun miktarındaki azalma değil, kalitesindeki bozulma da küresel su krizinin temel bileşenlerinden birini oluşturmaktadır. Hızla artan sanayileşme, tarımsal yoğunlaşma, nüfus baskısı ve yetersiz atık su yönetimi gibi insan kaynaklı faaliyetler, dünya genelindeki yüzey ve yer altı su kaynaklarının fiziksel, kimyasal ve biyolojik yönden kirlenmesine yol açmaktadır (WWAP, 2017). Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, endüstriyel atıkların arıtılmadan su kaynaklarına bırakılması, ağır metal birikimi ve toksik madde yayılımı gibi çevresel riskleri beraberinde getirmektedir (UNESCO, 2020). Tarımsal kirlilik ise nitrat, fosfat ve pestisit gibi kimyasalların yüzey akışları yoluyla sulara taşınmasıyla sucul ekosistemlerde ötrofikasyonu tetiklemekte ve biyolojik çeşitliliği tehdit etmektedir (Mateo-Sagasta ve Ark., 2017). Bu bağlamda, suyun yalnızca miktar açısından değil, niteliksel açıdan da sürdürülebilirliğini sağlamak için, entegre su yönetimi, arıtma teknolojilerinin yaygınlaştırılması ve kirleticilerin kaynağında kontrol edilmesi yönünde küresel çapta ortak politikalar geliştirilmesi gerekmektedir.

Su kirliliği, günümüzde hem çevresel hem de sosyoekonomik açıdan küresel düzeyde etkileri hissedilen çok boyutlu bir sorundur. Tatlı su kaynaklarının kirlenmesi, yalnızca doğal habitatların bozulmasına neden olmakla kalmamakta, aynı zamanda içme suyu güvenliği, tarımsal üretim kapasitesi, halk sağlığı ve ekonomik sürdürülebilirlik gibi temel alanlarda da ciddi tehditler oluşturmaktadır. Birleşmiş Milletler’in 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDG-6), tüm bireyler için güvenli ve ulaşılabilir suya erişimi hedeflemekte ve su kalitesinin korunmasını temel önceliklerden biri olarak vurgulamaktadır (UNESCO, 2021). Ancak bu hedefe ulaşmak, su kaynaklarını tehdit eden çok yönlü kirleticiler ve bunların etkilerinin bütünsel biçimde anlaşılmasını ve yönetilmesini gerektirmektedir.

Küresel su kirliliğinin başlıca kaynakları arasında endüstriyel faaliyetler, tarımsal yüzey akışları, evsel atık deşarjları ve madencilik faaliyetleri yer almaktadır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde atık su arıtma altyapısının yetersiz olması, evsel atıkların nehir ve göllere doğrudan

deşarj edilmesine neden olmaktadır. Örneğin Hindistan'daki Ganj Nehri üzerine yapılan çalışmalar, organik madde ve mikrobiyal kirleticilerin su kalitesini ciddi oranda düşürdüğünü ve insan sağlığını tehdit ettiğini göstermektedir (Khan ve Ark., 2020). Benzer şekilde, Afrika'da pek çok kentsel alanda altyapı eksiklikleri nedeniyle kanalizasyon suları doğrudan akarsulara verilmektedir. Bu durum, özellikle kolera ve tifo gibi su kaynaklı hastalıkların yayılmasına zemin hazırlamaktadır.

Tarım faaliyetleri, tatlı su kaynaklarındaki nitrat ve fosfat kirliliğinin en önemli nedenlerinden biridir. Aşırı gübre kullanımı, özellikle nitrat (NO_3^-) ve fosfat (PO_4^{3-}) bileşiklerinin yüzey ve yer altı sularına taşınmasına neden olmakta, bu durum ise ötrofikasyon süreçlerini hızlandırmaktadır. Ötrofikasyon, su yüzeyinde alg patlamalarına yol açarak çözünmüş oksijen seviyelerinin düşmesine ve balık ölümleri gibi ekolojik sorunların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır (Carpenter ve Ark., 1998). Avrupa Birliği'nin Su Çerçeve Direktifi gibi düzenlemeler, tarım kaynaklı kirliliğin azaltılmasına yönelik önlemleri içermekle birlikte, birçok ülkede uygulama düzeyinde karşılaşılan zorluklar halen devam etmektedir.

Sanayi bölgelerinde ise özellikle ağır metal ve toksik kimyasal kirlilik ön plana çıkmaktadır. Kurşun, cıva, arsenik ve kadmiyum gibi metallerin sulara karışması, yalnızca canlı organizmaların fizyolojik işlevlerini bozmakla kalmamakta, aynı zamanda biyobirikim yoluyla besin zinciri üzerinden insanlara da taşınabilmektedir (Fu ve Ark., 2011). Çin'de yapılan araştırmalar, sanayi bölgesine yakın göl ve nehirlerde balıkların biyolojik yapısında deformasyonlara ve üreme bozukluklarına rastlandığını göstermektedir (Zhang ve Ark., 2014). Ağır metallerin çevresel kalıcılığı yüksek olduğundan, bu kirleticilerin etkileri uzun yıllar boyunca hissedilmekte ve ekosistemlerde geri dönüşü zor hasarlara neden olmaktadır.

Küresel iklim değişikliğinin su kirliliği üzerindeki etkileri de giderek daha görünür hale gelmektedir. Artan sıcaklıklar, buharlaşma oranlarını artırarak su seviyelerinin düşmesine yol açmakta, böylece kirleticilerin daha konsantre hale gelmesine neden olmaktadır. Ayrıca sel, taşkın ve kuraklık gibi ekstrem iklim olayları, kirletici maddelerin taşınımını artırmakta ve kirliliğin etkilerini geniş bir alana yaymaktadır (Whitehead ve Ark., 2009). İklim değişikliği ile birleşen antropojenik etkiler, su kaynaklarının kendi kendini yenileme kapasitesini zayıflatmakta ve su kalitesi üzerinde uzun vadeli baskılar oluşturmaktadır.

Bu sorunların çözümü için çeşitli uluslararası örgütler ve bilim insanları tarafından çok yönlü stratejiler önerilmektedir. Bunlar arasında gelişmiş atık su arıtma sistemlerinin yaygınlaştırılması, doğal arıtım süreçlerinin desteklenmesi, sürdürülebilir tarım uygulamaları, sanayi deşarjlarının sıkı denetimi ve çevre eğitiminin yaygınlaştırılması yer almaktadır (UNESCO, 2021; WWAP, 2020). Aynı zamanda uydu görüntüleme ve uzaktan algılama

teknikleri gibi teknolojiler, su kalitesinin düzenli izlenmesine olanak tanımakta ve erken müdahale şansı sunmaktadır. Ülkeler arası veri paylaşımı ve iş birlikçi yönetim yaklaşımları da bu kapsamda öne çıkmaktadır.

Türkiye, sahip olduğu coğrafi konum ve iklimsel çeşitlilik sayesinde farklı ekosistemlerin yer aldığı zengin bir tatlı su potansiyeline sahiptir. Ülke genelinde birçok nehir, göl, akarsu, yer altı suyu ve sulak alan bulunmakta; bu kaynaklar hem içme suyu temininde hem de tarımsal sulamada, enerji üretiminde ve endüstriyel kullanımlarda önemli rol oynamaktadır (Gökbulak & Serengil, 2005). Türkiye'nin yıllık ortalama yağış miktarı 643 mm olup, bu değer dünya ortalamasının altındadır (Türkeş, 2010). Bu durum, ülkenin tatlı su kaynaklarını dikkatli bir şekilde yönetmesini zorunlu kılmaktadır. Devlet Su İşleri'nin (DSİ) verilerine göre Türkiye'nin yüzey suyu potansiyeli yıllık 185 milyar m³ olup bunun 95 milyar m³'ü teknik ve ekonomik olarak değerlendirilebilir niteliktedir (DSİ, 2022).

Türkiye'deki en önemli tatlı su kaynakları arasında Fırat, Çoruh, Dicle, Kızılırmak, Sakarya, Gediz, Büyük Menderes ve Meriç gibi büyük akarsular yer almaktadır. Bu nehirlerin çoğu aynı zamanda sınır aşan sular kategorisine girmektedir. Fırat, Çoruh ve Dicle nehirleri özellikle Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde hem ekolojik hem de politik açıdan kritik öneme sahiptir. Bu nehirler üzerinde yapılan hidroelektrik santraller ve barajlar, hem su yönetimi hem de enerji üretimi açısından stratejik konumdadır (Ünver, 2004). Kızılırmak ve Sakarya gibi nehirler ise tarımsal üretim açısından büyük öneme sahiptir. Bu akarsuların bazı bölümlerinde debi azalması ve su kalitesinde düşüşler gözlemlenmektedir.

Göller açısından bakıldığında Türkiye, 300'ün üzerinde doğal göle ve yüzlerce baraj gölüne ev sahipliği yapmaktadır. En büyük doğal göl olan Van Gölü, sodalı yapısı nedeniyle tatlı su sınıfına girmese de ülke ekolojisinde büyük bir yer tutmaktadır. Tatlı su gölleri arasında Beyşehir, Eğirdir, Burdur, Sapanca ve Manyas gibi göller öne çıkmaktadır. Bu göller, hem biyolojik çeşitlilik hem de ekosistem hizmetleri açısından büyük öneme sahiptir. Ancak son yıllarda göl yüzey alanlarında ciddi küçülmeler yaşanmakta; bu durumun başlıca nedenleri arasında iklim değişikliği, tarımsal sulama için aşırı su çekimi ve kirlilik yer almaktadır (EİE, 2016).

Yer altı suyu kaynakları, Türkiye'nin toplam kullanılabilir tatlı su potansiyelinin %37'sini oluşturmaktadır. Bu kaynaklar özellikle İç Anadolu, Güneydoğu Anadolu ve Ege bölgelerinde tarımsal sulama amaçlı yoğun şekilde kullanılmaktadır. Ancak, aşırı su çekimi ve iklim değişikliğine bağlı olarak birçok bölgede yer altı su seviyelerinde düşüşler gözlemlenmiştir (DSİ, 2022). Konya Kapalı Havzası bu bağlamda önemli bir örnektir; burada yaşanan yer altı suyu azalmaları obruk oluşumu gibi jeolojik riskleri artırmaktadır. Ayrıca, yer

altı sularının nitrat ve ağır metal gibi kirleticilerle bulaşması da halk sağlığı açısından ciddi tehditler oluşturmaktadır (Şimşek & Günay, 2009).

Türkiye'de su kalitesini ve kullanımını düzenleyen temel hukuki metinlerden biri 2012 yılında yürürlüğe giren “Su Kanunu Taslağı”dır. Bu düzenleme, Avrupa Birliği Su Çerçeve Direktifi ile uyumlu şekilde hazırlanmış olup, havza bazlı yönetim anlayışını esas almaktadır. Türkiye’de yürütülen “Ulusal Havza Yönetim Stratejisi” çerçevesinde 25 ana havza belirlenmiş ve bu havzaların her biri için özel eylem planları hazırlanmıştır (TÜBİTAK MAM, 2017a). Bu planlarda su kalitesinin izlenmesi, kirlilik kaynaklarının belirlenmesi, kirleticilerin azaltılması ve toplumsal farkındalığın artırılması gibi hedefler yer almaktadır.

Tatlı su kaynaklarının kirliliği, Türkiye için ciddi bir çevresel sorun olmaya devam etmektedir. Evsel atık suların yeterince arıtılmadan doğrudan alıcı ortamlara deşarj edilmesi, endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan ağır metal kirliliği, tarımsal kaynaklı nitrat ve fosfat yükü gibi unsurlar su kalitesini tehdit etmektedir. Özellikle Ergene Nehri Havzası, Türkiye’de su kirliliğinin en yoğun yaşandığı bölgelerden biridir. Yapılan araştırmalar, bölgede bulunan sanayi tesislerinden kaynaklı olarak suda arsenik, kurşun ve krom gibi kirleticilerin sınır değerlerin üzerinde olduğunu göstermektedir (Bakırdere ve Ark., 2010).

Türkiye’de su ekosistemlerinin korunmasına yönelik birçok bilimsel çalışma yürütülmüştür. Örneğin, Gediz Havzası’nda yapılan çalışmalarda tarımsal kirliliğin su kalitesi üzerindeki etkisi analiz edilmiş; nitrat ve fosfat yoğunluğunun mevsimsel değişimleri incelenmiştir (Gümüş & Gümüş, 2019). Aynı şekilde Büyük Menderes Havzası’nda yürütülen araştırmalarda ağır metal birikiminin bentik makroomurgasızlar üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir (Aydın & Karakoç, 2017). Bu çalışmalar, sadece suyun kimyasal özelliklerini değil, aynı zamanda biyolojik göstergeleri de izlemeyi önermekte ve ekosistem sağlığını bütüncül olarak ele almaktadır.

Türkiye’deki sulak alanlar, sadece ekolojik çeşitlilik açısından değil, aynı zamanda su kaynaklarının doğal regülasyonu, taşkın kontrolü ve karbon tutumu gibi işlevler açısından da büyük öneme sahiptir. Ramsar Sözleşmesi kapsamında koruma altına alınan Manyas Kuş Cenneti, Sultan Sazlığı ve Göksu Deltası gibi sulak alanlar, Türkiye’nin biyolojik çeşitliliğini temsil eden başlıca habitatlardır (Kence & Kence, 2001; Ertürk, 2010). Ancak bu alanlar üzerindeki tarımsal baskı, yapılaşma ve su rejimindeki değişiklikler, bu sistemlerin sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir. WWF-Türkiye (2018) tarafından yapılan çalışmalarda, sulak alanların %60’ından fazlasının son 50 yılda alan kaybına uğradığı ortaya konmuştur. Bu kayıplar yalnızca habitat yıkımını değil, aynı zamanda bölgesel su rejiminin bozulmasını da beraberinde getirmektedir.

Tarımsal faaliyetlerin Türkiye'deki tatlı su kaynakları üzerindeki etkisi oldukça belirgindir. Özellikle yoğun sulama gerektiren ürünlerin tercih edilmesi, sulama suyunun verimsiz yöntemlerle kullanılması ve kontrolsüz pestisit-gübre uygulamaları, yüzey ve yer altı sularında ciddi kirlilik riskleri doğurmaktadır. Tarımsal kaynaklı besin tuzu yükü, özellikle Ege ve Akdeniz Bölgeleri'nde bulunan kıyı lagünleri ve göllerde ötrofikasyon riskini artırmaktadır. Örneğin, Burdur Gölü ve Akgöl'de yapılan araştırmalar, yüksek fosfat birikimi ve buna bağlı alg çoğalmaları nedeniyle oksijen seviyelerinde ciddi azalmaların yaşandığını göstermektedir (Doğan ve Ark., 2020). Ayrıca, tarımda kullanılan kimyasalların yer altı sularına karışması, özellikle nitrata duyarlı bölgelerde içme suyu güvenliğini de tehlikeye atmaktadır.

Türkiye'nin su yönetim politikalarının etkinliği, yalnızca teknik altyapı ile sınırlı kalmamalı; aynı zamanda yönetim boyutu ve toplumsal katılım da göz önünde bulundurulmalıdır. Literatürde, yerel halkın ve su kullanıcı birliklerinin karar alma süreçlerine dahil edilmesinin, suyun daha sürdürülebilir yönetimine katkı sağladığı vurgulanmaktadır (Kibaroglu, 2020). Bu kapsamda, Türkiye'de pilot havzalarda uygulamaya konulan katılımcı havza yönetim projeleri, olumlu örnekler sunmaktadır. Ancak ülkede bu yaklaşım henüz yaygınlaşmamış olup, özellikle kırsal bölgelerde halkın sürece katılımı sınırlı kalmaktadır. Su politikalarının daha şeffaf, katılımcı ve hesap verebilir bir çerçevede yürütülmesinin gerekliliği, son yıllarda hem ulusal hem de uluslararası çalışmalarda sıkça dile getirilmektedir.

Su kaynaklarının korunması sadece mevcut kirleticilerin kontrolüyle sınırlı değildir. Aynı zamanda iklim değişikliğine uyum sağlayacak dirençli su sistemlerinin oluşturulması da gerekmektedir. Yapılan projeksiyonlar, Türkiye'de özellikle yaz aylarında buharlaşmanın artması ve yağış rejimlerinin değişmesi nedeniyle tatlı su kaynaklarında azalma olacağını göstermektedir (Şen, 2015). Bu nedenle, su kaynaklarının hem nicel hem de nitel izlenmesine olanak tanıyan dijital sistemlerin yaygınlaştırılması, veri temelli planlamanın vazgeçilmez bir parçası olmalıdır. Türkiye'de DSİ ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından yürütülen bazı projeler bu açıdan umut verici olmakla birlikte, mevcut izleme sistemlerinin bölgesel kapasitesi ve teknolojik donanımı halen sınırlıdır. Bu bağlamda, bilimsel araştırma kurumlarının ve yerel paydaşların daha etkin rol alacağı kapsayıcı modeller geliştirilmelidir.

Doğu Anadolu Bölgesi'nin tatlı su kaynakları, iklim değişikliğinin etkilerine karşı da oldukça hassastır. Bölgedeki su kaynakları büyük ölçüde kar yağışına ve kar erimesine bağlı olduğundan, iklimsel değişimlerin yarattığı sıcaklık artışları ve kar örtüsündeki azalmalar ciddi su stresi yaratmaktadır. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün verilerine göre, son 30 yılda bölgedeki ortalama sıcaklık 1,2°C artmış; bu durum karın daha erken erimesine ve su rejiminin yıl içinde dengesizleşmesine neden olmuştur (Şen 2015). Kar erimesinin erken

gerçekleşmesiyle birlikte ilkbahar aylarında yaşanan taşkınlar artarken, yaz aylarında ciddi kuraklık riski ortaya çıkmaktadır. Bu değişim, hem tarımsal üretim kalıplarını hem de kırsal nüfusun geçim kaynaklarını doğrudan etkilemektedir.

İklim değişikliğiyle artan sıcaklıklar, göl ve nehir sistemlerinde termal stratifikasyonu güçlendirerek su kütlelerinde oksijen dağılmasını engeller. Derin sulardaki çözünmüş oksijen seviyelerinde 1980’den bu yana %18,6 oranında düşüş gözlemlenmiştir (Jane vd 2021). Bu durum, sucul organizmaların yaşamını doğrudan tehdit etmekte ve ekosistemlerin oksijen dengesini bozarak balık ölümleri ve ekolojik dengesizliklere yol açmaktadır. Su kirliliğini değerlendiren çalışmalar da bu tür düşük oksijenli ortamların, organik ve besin kökenli kirleticilerin ayrışmasını yavaşlatarak su kalitesini daha da bozduğunu göstermektedir (IGB 2021).

Küresel ısınma, yağış düzenlerinin değişmesine ve ekstrem yağış ya da kuraklık dönemlerinin artmasına neden olur. Bu da tarımsal alanlardan nehir sistemlerine taşınan besin tuzlarının yoğunluğunu artırarak ötrofikasyon riskini yükseltir (Hetherington vd 2023). Artan sıcaklık ve baskın yağış bir araya geldiğinde, özellikle tarım bölgelerindeki nitrat ve fosfat yükleri suya taşınarak alg patlamalarının ve oksijen azalmasının şiddetlenmesine neden olur (Frontiers 2022). Bu durum, özellikle Türkiye gibi tarım potansiyeline sahip ülkelerde su kalitesi bozulmalarının sık görülmektedir.

Ayrıca, sıcaklık artışı suyun doğrudan kimyasal çözünürlüğünü etkileyerek biyokimyasal oksijen ihtiyacını (BOD) artırır. Artan biyolojik oksijen ihtiyacı, su içindeki organik maddelerin ayrışmasında mikroorganizmaların oksijeni daha yüksek hızda tüketmesine yol açar; bu da yine oksijen seviyesinin düşmesine neden olur. Bu süreçle birlikte hem çözünmüş oksijenin azalması hem de kirleticilerin atılamaması, su kütlelerinde ekolojik ve halk sağlığı açısından ciddi riskler doğurur (MDPI 2021).

İklim değişikliğin getirdiği sıcaklık artışı ve yağış rejimi değişikliği, zararlı alg patlamalarının sıklığını ve şiddetini artırmaktadır (Frontiers 2022). Bu durum, özellikle göl ve nehir sistemlerinde nitrat ile fosfat gibi besin tuzlarının birikimini hızlandırır. Zararlı alglerin oluşumu, su ekosistemlerinde “ölüm bölgeleri” (dead zones) oluşturmakta; bu da balık, plankton ve diğer su canlılarının toplu ölümlerine neden olabilmektedir (Frontiers 2022)

İklim değişikliği, zararlı alg patlamalarının (HAB) sıklığını, süresini ve toksisite düzeyini artırarak tatlı su ve deniz ekosistemlerinde ciddi ekolojik ve ekonomik tehditler oluşturmaktadır. Gobler (2020), küresel sıcaklık artışının ve artan CO₂ konsantrasyonlarının bazı fitoplankton türlerinin büyümesini desteklediğini; özellikle dinoflagellatlar ve siyanobakteriler gibi toksik türlerin daha avantajlı hale geldiğini ortaya koymuştur. Bu durum

yalnızca su kalitesinin bozulmasına değil, aynı zamanda içme suyu kaynaklarında toksin birikimi ve balıkçılık faaliyetlerinde verim kaybı gibi zincirleme etkilere neden olmaktadır. Ayrıca, su sütununda artan tabakalaşma ve azalan karışım da oksijen seviyelerinin düşmesine ve HAB'lerin daha kalıcı hale gelmesine yol açmaktadır. Bu bağlamda, Gobler (2020)'nin vurguladığı gibi, HAB olaylarının iklim değişikliğiyle birlikte yalnızca çevresel bir sorun değil, aynı zamanda halk sağlığı ve kaynak yönetimi açısından da acil önlem gerektiren çok boyutlu bir tehdit olduğu kabul edilmelidir.

Son olarak iklim değişikliğinin etkisiyle buharlaşma oranlarındaki artış, göl ve baraj sistemlerinde su hacmini azaltarak kirleticilerin daha yoğun hale gelmesine katkı sağlar. Bu etki, düşük hacimli sularda kirletici konsantrasyonunu yükselterek hem fiziksel hem kimyasal kirlilik baskısını artırır (Bates vd 2008). Türkiye gibi yarı kurak bölgelerdeki su yönetimi stratejilerinde buharlaşmanın etkileri mutlaka dikkate alınmalı ve su yönetimi politikaları buna uygun şekilde revize edilmelidir.

Bir diğer önemli husus ise veri temelli planlama süreçlerinin eksikliği ve mevcut izleme sistemlerinin yetersizliğidir. DSİ ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü gibi kurumların bölgedeki veri toplama noktalarının sayısı sınırlıdır. Bu da uzun vadeli su kalitesi, debi ve iklimsel değişkenlik analizlerinin yapılmasını zorlaştırmaktadır. TÜBİTAK MAM (2017b) tarafından hazırlanan raporda, Doğu Anadolu'daki birçok havzada 10 yıldan uzun süredir güncellenmemiş veri kümeleri bulunduğu ve bu durumun bilimsel planlama yapmayı engellediği belirtilmiştir. Gelişmiş izleme teknolojilerinin bölgeye entegre edilmesi, uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri (CBS) gibi araçların daha etkin kullanımı bu açıdan elzemdir.

Tortum Çayı, Doğu Anadolu Bölgesi'nde, Erzurum'un kuzeydoğusunda yer almakta olup, Karadeniz'e dökülen Çoruh Nehri'nin önemli kollarından biridir. Çayın su toplama havzası geniş ve dağlık bir alana yayılmıştır. (DSİ 2009; Özdemir 2013). Lahn (1944a)'ın klasik çalışması, Tortum Gölü ve Şelalesi'nin coğrafi karakteristiklerini ortaya koyarak bölgenin jeomorfolojik oluşumu hakkında temel bilgiler sunmaktadır. Bu çalışmada, Tortum Gölü'nün heyelan set gölü olarak oluştuğu ve çevresindeki kayaç yapısının gölün kalıcılığı açısından belirleyici olduğu ifade edilmiştir. Bu jeolojik yapı, bölgedeki su hareketliliği ve geçirgenlik özellikleri açısından önemli bir temel oluşturmaktadır.

Tortum Çayı'nın hidrolojik yapısı, yıl içinde büyük mevsimsel değişimlere uğramaktadır. İlkbahar aylarında kar erimeleriyle birlikte debiler artarken yaz sonu ve sonbaharda akım büyük ölçüde azalır. Bu değişim, hem su kalitesi hem de kirlilik dinamikleri üzerinde doğrudan etkilidir. Durağanlaşan akarsular, özellikle yaz aylarında sıcaklığın da etkisiyle su kalitesinde düşüşe ve çözünmüş oksijen seviyelerinde azalmaya yol açabilmektedir.

Bu durum, kirlilik parametrelerinin (nitrat, fosfat, toplam azot gibi) su kolonunda birikmesine ve zamanla tortullarda sabitlenmesine neden olmaktadır. (Wu vd 2025).

Demircioğlu Yıldız vd (2011a) Tortum Çayı havzası üzerine yaptığı çalışmada, alan kullanımındaki değişimlerin çayın hidrografisi ve su kalitesi üzerinde doğrudan etkili olduğu ortaya konmuştur. Özellikle tarım ve yerleşim alanlarının artışı, bitki örtüsünün azalmasına ve yüzey akışının hızlanmasına yol açmakta; bu da yüzeysel kirlilik yükünü doğrudan Tortum Çayı'na taşımaktadır. Ayrıca, eğimli arazilerdeki erozyon riski nedeniyle sediment taşınımı da artmaktadır ki bu durum, suyun iletkenliği ve askıda katı madde parametreleri üzerinde doğrudan belirleyicidir.

Güresinli (2014a)'ün Tortum Gölü su toplama havzası üzerine yaptığı çalışmada ise sedimentasyonun su hacmini daralttığı ve göle dökülen çayların taşıdığı materyallerin hem fiziksel hem de kimyasal kirlilik açısından tehdit oluşturduğu belirtilmiştir. Sediment tabakası, bir yandan metal ve besin tuzlarını absorbe ederek kirliliği biriktirirken, diğer yandan ani akımlar sırasında bu maddelerin yeniden çözünmesine yol açabilmektedir. Bu da hem pH hem de iletkenlik değerlerinin düzensiz seyretmesine neden olmaktadır.

Dolayısıyla, Tortum Çayı'nın hidrolojik ve jeomorfolojik özellikleri, hem fiziksel hem de kimyasal kirlilik açısından dinamik bir yapı ortaya koymakta ve bu durum çalışmada ele aldığımız parametrelerin yıllık, mevsimsel ve lokasyonel farklılıklarını açıklamada temel teşkil etmektedir.

Doğu Anadolu ve Karadeniz geçiş kuşağında yer alan Tortum Çayı ve çevresi, son yıllarda artan enerji yatırımlarıyla birlikte nehir tipi hidroelektrik santral (HES) projelerinin etkisi altına girmiştir. Bu projeler, özellikle akarsuların doğal rejimini değiştirmeleri ve suyun kesikli veya kontrollü akışa tabi tutulması gibi nedenlerle, su kalitesinde ve biyolojik çeşitlilikte önemli değişimlere neden olmaktadır. Koralay, Kara ve Kezik'in (2015) Solaklı Deresi üzerinde yürüttükleri yüksek lisans tez çalışması, nehir tipi HES'lerin su kalitesi üzerindeki etkilerini detaylı biçimde ele almakta ve bu tür yapıların pH, çözünmüş oksijen, iletkenlik ve besin tuzu (azot, fosfat) düzeylerinde farklılaşmalara yol açtığını ortaya koymaktadır.

Bu çalışmadan elde edilen bulgular, benzer hidrolojik ve topografik yapıya sahip olan Tortum Çayı için de önemli çıkarımlar sunmaktadır. Akarsuların doğal akış düzenine müdahale edilmesi, suyun durağanlaşmasına, sıcaklığın artmasına ve çözünmüş oksijenin azalmasına yol açmakta; bu da mikrobiyolojik aktivitenin artmasına ve kirlilik parametrelerinin hızla değişmesine neden olmaktadır. Ayrıca, HES'lerin yukarısında ve aşağısında yapılan ölçümlerde önemli farklılıklar gözlemlenmiş, özellikle HES sonrası kesintili akış nedeniyle

tortu birikimi, besin tuzu yoğunlaşması ve su kalitesinde bozulmalar raporlanmıştır (Koralay vd 2015).

Atabey ve Gürdoğan (2020b) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise Doğu Karadeniz'deki HES projelerinin ekoturizm, çevresel sürdürülebilirlik ve su ekosistemi üzerindeki etkileri SWOT analiziyle değerlendirilmiştir. Bu analizde, HES'lerin yerel halkın yaşam tarzını ve doğayla kurduğu ilişkiyi olumsuz etkilediği, ayrıca su kaynaklarının görsel, işitsel ve biyolojik kalitesinde bozulmalara yol açtığı ifade edilmiştir. Bu durum, Tortum gibi doğal güzellikleri ve sulak alan zenginlikleri ile öne çıkan alanlarda hem çevresel hem de sosyoekonomik gerilimlere neden olmaktadır.

Tortum Çayı çevresinde mevcut ve planlanan HES projeleri, suyun debi dengesini değiştirmekte, bazı alanlarda taşkınlara bazı alanlarda ise kurumlara neden olabilmektedir. Bu dengesizlik, pH ve iletkenlik gibi temel parametrelerde değişim yaratmakta, özellikle yaz aylarında suyun biyolojik taşıma kapasitesini düşürmektedir. Bu da tezimizde incelediğimiz kimyasal parametrelerin yerel ve mevsimsel farklılıklarını doğrudan açıklayabilecek faktörlerden biridir.

Tortum Çayı Havzası, doğal yapısı gereği yüksek eğimli, dağlık ve parçalı bir topoğrafyaya sahip olup, bu özellikler alan kullanımında ve havza yönetiminde önemli kısıtlar doğurmaktadır. Havzada yürütülen faaliyetlerin (tarım, hayvancılık, yapılaşma, turizm) plansız biçimde ilerlemesi, zamanla su kaynakları üzerinde baskı oluşturmuş ve kirlilik düzeyinde artışlara neden olmuştur. Demircioğlu Yıldız vd (2011a) gerçekleştirdiği kapsamlı çalışmada, Tortum Havzası'nın ekosistem dengesi ile alan kullanım biçimleri arasında güçlü bir etkileşim olduğu gösterilmiştir. Özellikle tarım ve mera alanlarının kontrolsüz genişlemesi, bitki örtüsünün zayıflamasına, erozyonun artmasına ve su kaynaklarına taşınan sediment yükünün çoğalmasına neden olmuştur.

Arazi kullanımındaki değişiklikler, yalnızca fiziksel taşınım süreçlerini değil, aynı zamanda kimyasal kirliliğin yoğunluğunu da artırmaktadır. Örneğin tarım alanlarından yüzey akışıyla taşınan gübre ve pestisitler, Tortum Çayı'nda nitrat ve fosfat düzeylerinin yükselmesine neden olmaktadır. Bu durum, özellikle yaz ve sonbahar aylarında suyun biyolojik kalitesini düşürmekte, alg çoğalmasına yol açmakta ve çözünmüş oksijen miktarını azaltmaktadır.

Sedimentasyon sorunu ise Tortum Gölü ve çayın beslediği sulak alanlar için başlıca risklerden biridir. Güresinli (2014d)'ün Erzurum Büyükşehir Belediyesi için hazırladığı çalışmada, gölün su toplama havzasında sediment taşınımının büyük ölçüde kontrolsüz olduğu ve mevcut setlerin yetersiz kaldığı ifade edilmiştir. Göl ve çay yatağında biriken sedimentler,

bir yandan göl hacmini daraltarak suyun depolanma kapasitesini düşürmekte, diğer yandan bu tabakalarda biriken fosfor ve azot gibi maddeler, yeniden çözünerek iç kaynaklı kirlenmeye yol açmaktadır. Bu süreç, suyun iletkenlik değerlerinin düzensizleşmesine ve kimyasal dengenin bozulmasına neden olur.

Bu bağlamda, Tortum Çayı'nda ölçülen toplam azot ve toplam fosfor değerlerinin yüksek çıkması yalnızca dışsal girdilerle değil, sediment içinde birikmiş maddelerin yeniden çözünmesiyle de açıklanabilir. Dolayısıyla, hem alan kullanımına hem de hidrolojik müdahalelere dayalı olarak gelişen sedimentasyon süreci, havzanın sürdürülebilir su yönetimini ciddi biçimde tehdit etmektedir.

Su kalitesinin biyolojik göstergeleri arasında yer alan bentik algler, akarsu ve göl ekosistemlerinin ekolojik sağlığı hakkında önemli ipuçları sunar. Tortum Gölü ve çayının ekosistem yapısına ilişkin olarak Kıvrak ve Gürbüz'ün (2018a) yürüttüğü araştırma, gölde yaşayan bentik alg florasının mevsimsel değişimlerini ve tür çeşitliliğini inceleyerek önemli çevresel veriler sunmaktadır. Bu çalışmada, özellikle ilkbahar ve yaz aylarında diatom, klorofit ve siyanobakteri türlerinde artış gözlemlenmiş; bu artışın, sıcaklık, pH, besin tuzu konsantrasyonları (özellikle nitrat ve fosfat) ile doğrudan ilişkili olduğu tespit edilmiştir.

Bentik alglerin kompozisyonundaki değişim, ekosistemin kirlilik düzeyini belirlemede kritik bir role sahiptir. Özellikle su içinde çözünmüş azot ve fosfor seviyelerinin artması, hızlı çoğalan türlerin (örneğin *Oscillatoria*, *Microcystis*) baskın hale gelmesine neden olmaktadır. Bu durum, ötrifikasyon sürecini tetikleyerek suyun oksijen dengesini bozar ve diğer canlı türleri için yaşanabilirliği azaltır. Kıvrak ve Gürbüz (2018a), bu bulguların Tortum Gölü'ndeki fizikokimyasal değişimlerle uyumlu olduğunu ve özellikle yaz aylarında iletkenlik, pH ve çözünmüş oksijen parametrelerinde sapmalar oluştuğunu raporlamıştır.

Alglerin aşırı çoğalması, suyun renginde, kokusunda ve bulanıklığında değişime neden olmakta, aynı zamanda insan kullanımına yönelik su kalitesini de düşürmektedir. Bu da içme suyu, tarımsal sulama ve rekreasyon gibi kullanım türlerinde sağlık risklerini artırmaktadır.

Bentik alg topluluklarının izlenmesi, sadece mevcut kirlilik durumunu değil, aynı zamanda önceki dönemlerden kaynaklı kümülatif kirlilik yükünü de ortaya koymaktadır. Tortum Gölü gibi yarı kapalı ve durağan sistemlerde, bu tür bir biyolojik izleme, fiziksel ve kimyasal ölçümlerle birlikte değerlendirildiğinde daha tutarlı ve anlamlı sonuçlar verir. Dolayısıyla, bentik alg florası üzerine yapılan bu tür çalışmalar, su kalitesi değerlendirmelerinde biyolojik destek sağlar.

Tatlı su sistemlerinde kıyı çizgisindeki değişimler, genellikle hidrolojik dengesizlikler, tortu yükü ve siltasyon süreçlerinin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Tortum Gölü'nün güneybatı kıyı kesiminde yapılan bir arazi çalışmasına dayanan Kopar ve Sevindi (2020), göl çevresinde gözlemlenen aktif kıyı gerilemesi, sediment birikimi ve siltasyon etkilerini ayrıntılı biçimde ortaya koymuştur. Bu çalışmada, özellikle göle dökülen küçük derelerin taşıdığı ince partiküllerin kıyı morfolojisini değiştirdiği, alanın hidrolojik yapısını etkilediği ve su kalitesine doğrudan zarar verdiği tespit edilmiştir.

Siltasyon, suyun bulanıklığını artırarak hem ışık geçirgenliğini azaltır hem de fotosentetik organizmaların üretkenliğini sınırlar. Bu durum su ekosistemlerinde oksijen üretiminin azalmasına ve çözünmüş oksijen dengesinin bozulmasına yol açar. Tortum Gölü gibi görece sığ ve durağan yapıli sistemlerde bu tür etkiler, çözünmüş maddelerin (örneğin nitrat, fosfat, ağır metaller) sedimentlere tutunarak geçici olarak depolanmasına neden olur. Ancak akış ve sıcaklık değişimleriyle bu maddeler yeniden çözünerek su kolonuna geçer ve iletkenlik, pH gibi parametreleri etkiler (Kopar & Sevindi, 2020).

Kıyı çizgisi değişimleri aynı zamanda biyolojik çeşitlilik açısından da tehdit oluşturur. Silt birikimi, özellikle kıyıya yakın habitatlarda yaşayan makrofitler ve bentik canlılar için yaşam alanlarını sınırlandırmakta, bu da suyun kendini yenileme kapasitesini düşürmektedir. Böylece, kirletici yüklerin seyrelmesi zorlaşmakta ve su kalitesinde kalıcı düşüşler meydana gelmektedir.

Söz konusu değişimlerin Tortum Çayı üzerindeki etkileri göz ardı edilemez. Tortum Gölü'ne su taşıyan çayın taşıdığı silt yükü, gölde bu birikimi hızlandırmakta; çaydan gelen akıştaki hız düşüklüğü ise sedimentin su kolonuna yayılmasına neden olmaktadır. Bu bağlamda, tezimizde incelediğimiz iletkenlik, toplam fosfor ve toplam azot gibi kimyasal parametrelerdeki mevsimsel veya bölgesel farklılıklar, bu sediment dinamikleri ile açıklanabilir.

Kopar ve Sevindi (2020)'nin çalışması, kıyı çizgisi değişimleri ve siltasyonun sadece fiziksel değil, kimyasal ve biyolojik etkiler açısından da su kalitesi parametrelerini derinden etkilediğini göstermektedir. Bu bağlamda, Tortum Çayı'nın kirlilik düzeyini değerlendirirken sediment taşınımı ve kıyı morfolojisi gibi mekânsal faktörlerin de dikkate alınması gereklidir.

Tortum Gölü ve çevresi, doğal peyzajının sunduğu zenginlik ve biyolojik çeşitlilik nedeniyle hem yerel halk hem de ziyaretçiler için önemli bir rekreasyonel alan haline gelmiştir. Özellikle son yıllarda artan ekoturizm faaliyetleri, bölgenin tanıtımı ve ekonomik kalkınması açısından fırsatlar sunarken, aynı zamanda ekosistem üzerinde baskılar yaratmaktadır. Sevindi ve Kaya (2019)'un gerçekleştirdiği çalışmada, Uzundere ilçesi sınırlarında kalan Tortum Gölü Sulak Alanı'nın kuş gözlemciliği turizmi açısından potansiyeli değerlendirilmiş ve bu

faaliyetlerin alandaki su kaynaklarına etkileri tartışılmıştır. Çalışmada, gözlem noktalarının yoğunlaştığı alanlarda çevresel baskının arttığı; kıyı çizgisi boyunca flora ve fauna üzerinde tahribat olduğu tespit edilmiştir.

Kuş gözlemciliği gibi doğa temelli etkinlikler, teorik olarak düşük etkili kullanım biçimleri olsa da, altyapı eksikliği, kontrolsüz erişim ve yeterli çevre bilinci olmadan sürdürüldüğünde habitat bozulmasına ve dolaylı olarak su kalitesinde değişimlere yol açabilmektedir. Özellikle kıyı şeridinde yapılan düzensiz yürüyüşler, bitki örtüsünün tahrip olmasına, toprağın sıkışmasına ve yüzeysel akışın hızlanarak sediment taşınımına katkı sağlamasına neden olmaktadır (Sevindi & Kaya, 2019). Bu durum, tez konumuz bağlamında, taşınan sedimentlerle birlikte gelen besin elementlerinin (özellikle fosfat ve azot bileşenlerinin) suya karışarak ötrifikasyon sürecini tetikleyebileceğini göstermektedir.

Öte yandan, Özgeriş ve Karahan'ın (2022a) çalışmasında Uzundere ilçesi, sakin şehir (Cittaslow) politikaları çerçevesinde değerlendirilmiş ve rekreasyonel su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı tartışılmıştır. Bu yaklaşım, bölgedeki turistik potansiyelin korunması için doğayla uyumlu kullanım biçimlerinin benimsenmesini önerir. Ancak çalışmada, Tortum Gölü ve çevresindeki su kaynaklarının bu politikalarla tam uyum sağlayamadığı, mevcut kullanım biçimlerinin sürdürülebilirlik ilkesini tehdit ettiği ortaya konmuştur. Göl çevresindeki su sporları, piknik alanları, düzensiz konaklama faaliyetleri ve atık yönetimi eksiklikleri, özellikle yaz aylarında suyun kalitesinde geçici ama yoğun bozulmalara neden olabilmektedir (Özgeriş & Karahan, 2022a).

Benzer biçimde, Orhan ve Karahan (2011) tarafından yapılan ekoturizm potansiyeli değerlendirmesinde, Uzundere ve çevresindeki doğal alanların turistik kullanımının çevresel etkileri analiz edilmiştir. Araştırmada, çevre koruma önlemleri alınmadığı sürece turistik kullanımın flora-fauna üzerinde olduğu kadar su kaynakları üzerinde de baskı oluşturacağı vurgulanmıştır. Bu baskılar, organik madde artışı, atık su girişi, fiziksel bozulma ve habitat kaybı gibi yollarla Tortum Çayı'nın fizikokimyasal dengelerini etkileyebilir. Bu da pH, iletkenlik ve fosfat düzeylerinin değişimine neden olabilir.

Sonuç olarak, rekreasyonel faaliyetler doğrudan bir kirlilik kaynağı gibi görünmese de, dolaylı yoldan kirlilik yükünü artırıcı, sedimentasyon süreçlerini hızlandırıcı ve biyolojik çeşitliliği azaltıcı etkiler yaratmaktadır. Tezimizde analiz ettiğimiz su kalite parametrelerinde mevsimsel dalgalanmalar ve mikrobiyolojik çoğalmalar, bu tür faaliyetlerle ilişkilendirilebilir. Bu nedenle, turizm ve su kalitesi arasındaki ilişki, sürdürülebilir havza yönetimi açısından mutlaka dikkate alınmalıdır.

Tortum Çayı'nın ekolojik sürdürülebilirliği, sadece doğal etkenlerle değil, aynı zamanda insan kaynaklı müdahaleler ve yerel yönetim politikalarıyla da şekillenmektedir. Su kaynaklarının korunması, yönetimi ve kirlenmeden arındırılması büyük ölçüde bu yerel otoritelerin planlamalarına ve uygulama kapasitelerine bağlıdır. Ancak mevcut literatür, Tortum Çayı Havzası'nda yerel düzeyde etkin bir su yönetimi modelinin oluşmadığını, çevresel planlamaların dağınık, yetersiz ve koordinasyondan uzak olduğunu ortaya koymaktadır.

Özgeriş ve Karahan (2022a), Uzundere ilçesi özelinde yürüttükleri değerlendirmede, Cittaslow (sakin şehir) vizyonunun sürdürülebilir kaynak kullanımı açısından önemli fırsatlar sunduğunu belirtmiş; ancak uygulamada bu yaklaşımın ilke ve politikalarının bölgeye tam olarak yansımadığını ifade etmişlerdir. Özellikle su kullanımında katılımcı planlama eksikliği, denetim zayıflığı ve atık yönetimi sistemlerinin yetersizliği, Tortum Gölü ve Çayı'nın su kalitesini tehdit eden önemli sürdürülebilirlik sorunları arasında yer almaktadır.

Demircioğlu Yıldız vd (2011a) de vurguladığı gibi, havza yönetimi bütüncül bir yaklaşımla ele alınmadığında, alan kullanımı ile su kalitesi arasında çatışmalar kaçınılmaz hale gelmektedir. Tarım alanlarının yerleşimlere yakın olması, hayvancılık faaliyetlerinin meralara ve su yollarına kontrolsüz şekilde yayılması, atık suların doğrudan akarsulara karışması gibi durumlar, Tortum Çayı'nda pH, nitrat, toplam azot ve fosfat gibi parametrelerde ölçülen yüksek değerlerin başlıca nedenleri arasında sayılabilir. Bu durum, suyun içme, tarım ve turizm gibi çok yönlü kullanımlarında sağlık risklerini artırmaktadır.

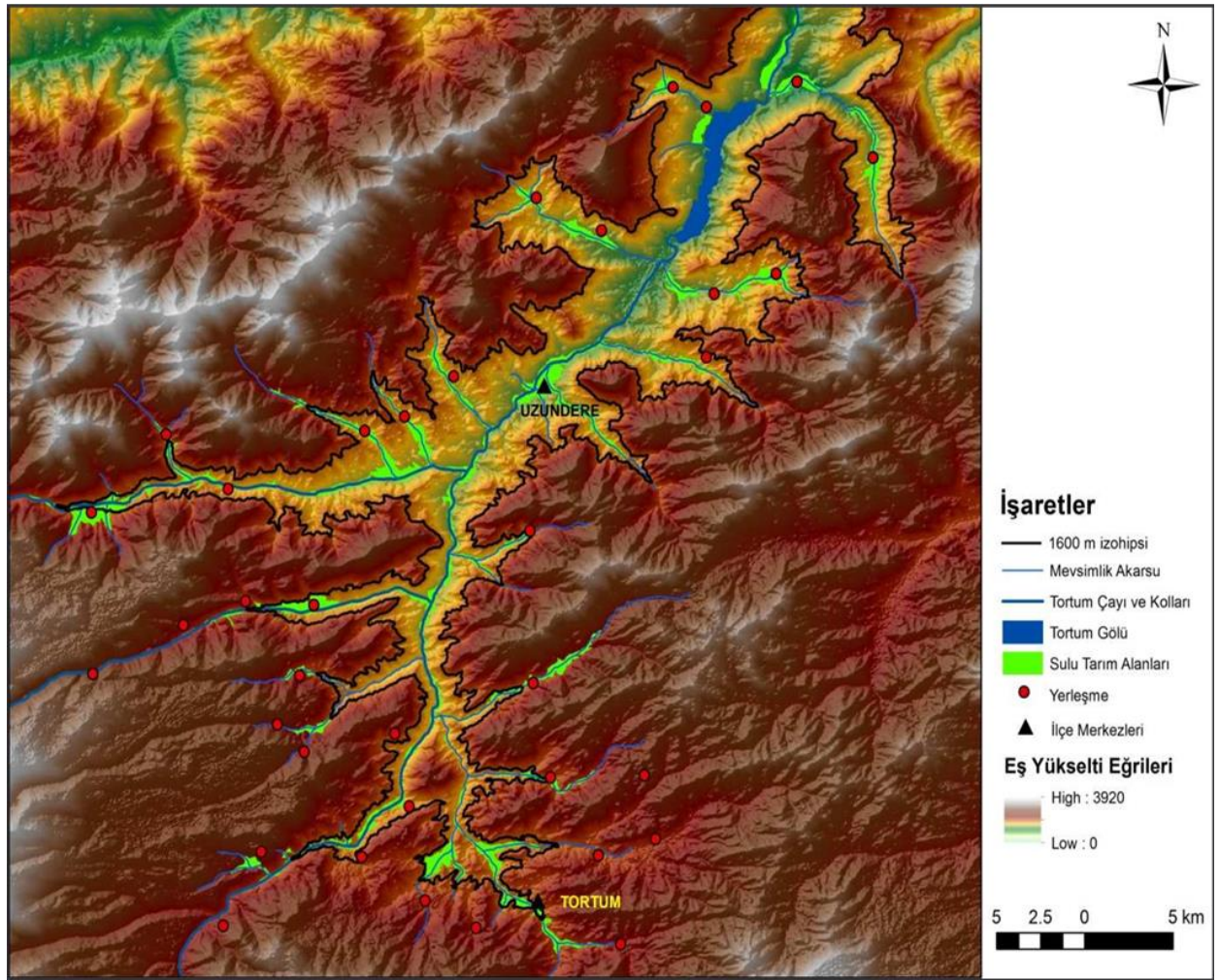
Orhan ve Karahan (2011), Uzundere bölgesinin ekoturizm potansiyelini çevresel sürdürülebilirlik ilkeleri açısından değerlendirmiş; ancak altyapı ve planlama eksikliklerinin bu potansiyelin çevreye zarar verecek biçimde kullanıldığını tespit etmişlerdir. Rekreatif su kullanımı planlarının su koruma planlarıyla entegre edilmemesi, göl ve çay sistemlerinde fiziksel bozulmaya, habitat tahribatına ve biyolojik stres faktörlerine yol açmaktadır. Özellikle yaz aylarında yaşanan yoğun kullanım, çözünmüş oksijen seviyelerinde düşüşe, mikroorganizma artışına ve organik madde birikimine neden olmaktadır.

Tüm bu veriler ışığında, Tortum Çayı'ndaki kirlilik düzeylerinin sadece doğal süreçlerin değil, planlama eksiklikleri, denetimsizlik ve yönetsel zafiyetlerin bir sonucu olduğu söylenebilir. Tez çalışmamızda yer alan su kalite parametreleri, bu yönetim boşluklarını yansıtan ampirik göstergeler sunmaktadır. Bu bağlamda yapılacak su kalitesi ölçümleri, yalnızca çevresel değil, yönetsel zaafiyetleri de teşhir edecek birer araç olarak değerlendirilebilir.

Tortum Çayı Havzasının Özellikleri

Coğrafi ve hidrolojik yapı

Tortum Çayı, Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesi'nde, Erzurum il sınırları içerisinde yer almakta olup Çoruh Nehri sistemine bağlı önemli bir akarsudur. Mescit Dağları'ndan doğarak güney-kuzey doğrultusunda akan çay, Uzundere ilçesi yakınlarında Tortum Gölü'ne ulaşmakta ve ardından kuzeydoğuya yönelerek Çoruh Nehri'ne katılmaktadır (Lahn, 1944a). Bu jeomorfolojik yapı, çayın hem eğimini hem de akış rejimini belirlerken; bölgedeki yüksek rakım ve sert kış koşulları, akarsu rejiminde mevsimsel değişkenliğe neden olmaktadır (Demircioğlu Yıldız vd 2011b).



Şekil 1. Tortum Çayı Topografya Haritası (Ar 2014)

Tortum Çayı Havzası, birçok küçük dere ile beslenmektedir. Bu dereler, çayın taşıdığı su miktarının yanı sıra su kalitesi üzerinde de belirleyici olmaktadır. Özellikle ilkbahar aylarında artan kar erimeleri, yüzeysel akışı artırarak hem sediment yükünü hem de kirlilik taşıma potansiyelini yükseltmektedir. Havzanın jeolojik yapısında kil, kumtaşı ve volkanik

kayaçların yer alması, bu süreçte taşınan maddelerin çeşitliliğini artırmaktadır (Güresinli, 2014a).

Havza, jeomorfolojik olarak dik eğimli yamaçlardan oluşan dağlık alanlar ve vadilerden meydana gelmektedir. Bu yapı, yüzey akışının yüksek olmasına ve sediment taşınımının hızlanmasına neden olur. Kopar ve Sevindi (2020) tarafından yapılan çalışmada, özellikle Tortum Gölü'nün güneybatı kıyısında sedimentasyon ve siltasyon süreçlerinin kıyı çizgisinde anlamlı değişimlere yol açtığı belirtilmiştir. Bu durum, hem göl hem de çay boyunca su kalitesinin ve ekosistem dengesinin bozulması riskini ortaya koymaktadır.

Sedimentasyon ve su kalitesi

Tortum Çayı'nın geçtiği havzada gözlemlenen önemli çevresel sorunlardan biri de sedimentasyon sürecidir. Güresinli (2014a) çalışmasında, Tortum Gölü su toplama havzasında yoğun sediment taşınımı tespit edilmiş ve bu durumun gölün doğal yapısını tehdit eder boyutta olduğunu vurgulamıştır. Tarım faaliyetleri, yol yapımı, ormansızlaşma ve erozyona açık arazi kullanımı, havzadaki sediment yükünü artırarak su kalitesini düşürmektedir. Bu tür yüklerin taşınması, özellikle pH, iletkenlik ve toplam fosfor gibi fiziko-kimyasal parametrelerde değişimlere yol açar.

Ayrıca havzada yer alan nehir tipi hidroelektrik santrallerin (HES) etkisi de su kalitesini doğrudan etkilemektedir. Koralay vd (2015), Solaklı Deresi örneği üzerinden yürüttükleri çalışmada, HES faaliyetlerinin nehir rejimini değiştirdiğini ve çözünmüş oksijen ile sıcaklık değerleri üzerinde olumsuz etkiler yarattığını belirtmişlerdir. Tortum Çayı'nda da benzer etkilerin gözlemlendiği ve doğal akışın kesintiye uğramasıyla sediment taşınımı ve suyun kendini yenileme kapasitesinin zayıfladığı düşünülmektedir.

Bektaş vd (2017) Erzurum'daki alabalık dereleri üzerine yaptığı karşılaştırmalı çalışmada ise, su kalitesinin özellikle tarımsal faaliyetlerin yoğunlaştığı bölgelerde azaldığı görülmüştür. Tortum Çayı da benzer şekilde, çevresindeki köylerde yoğun tarım ve hayvancılık faaliyetleri nedeniyle hem organik hem de inorganik kirleticilerle yüklenmektedir. Bu durum, çayın özellikle yaz ve ilkbahar aylarında yüksek azot ve fosfor içeriği taşımaya neden olmakta, su kalitesini mevsimsel olarak değişken hâle getirmektedir.

Biyolojik çeşitlilik ve ekosistem özellikleri

Tortum Çayı ve bağlantılı ekosistemler, Doğu Anadolu Bölgesi'nin önemli biyolojik çeşitlilik alanları arasında yer almaktadır. Özellikle Tortum Gölü çevresi, farklı habitat tiplerini bünyesinde barındıran bir sulak alan olarak hem flora hem de fauna açısından zengin bir yapıya sahiptir. Sevindi ve Kaya (2019)'un yürüttüğü çalışma, bu alanın kuş gözlemciliği açısından

taşıdığı potansiyeli ortaya koymakla birlikte, göçmen ve yerli kuş türleri açısından önemli bir yaşam alanı olduğunu göstermektedir. Ancak bu doğal alan, turizm ve tarım faaliyetlerinin baskısı altında hassaslaşmaktadır.

Kıvrak ve Gürbüz (2018b), Tortum Gölü'nün bentik alg florasını inceleyerek göldeki mevsimsel değişimlerin su kalitesine etkisini ortaya koymuşlardır. Araştırmada, bentik alg türlerinin çeşitliliğinin yaz aylarında azaldığı, bunun da özellikle yüksek sıcaklık ve besin maddesi artışıyla ilişkili olduğu belirtilmiştir. Benzer şekilde, Tortum Çayı boyunca da kirlilik yükü arttıkça mikrobiyolojik çeşitlilikte azalma ve ekosistem işlevselliğinde bozulma görülebilmektedir. Bu değişim, çayın doğal rejimiyle birlikte biyolojik çeşitliliğini de tehdit etmektedir.

Doğal yaşam alanları üzerindeki insan kaynaklı etkiler, özellikle hidroelektrik santraller ve tarımsal faaliyetlerle birlikte daha belirgin hâle gelmektedir. Kocabaş vd (2013), HES projelerinin balık popülasyonları üzerindeki etkilerini vurgulamış ve suyun rejimindeki değişikliklerin tür çeşitliliğini azalttığını belirtmişlerdir. Tortum Çayı'ndaki benzer yapıdaki HES projeleri de yerel ekosistemi olumsuz yönde etkilemekte; balık göç yollarını kesmekte, yumurtlama alanlarını tahrip etmekte ve suyun oksijen dengesini bozabilmektedir. Bu etkiler, yalnızca doğal yaşamı değil, aynı zamanda yöredeki balıkçılık gibi ekonomik faaliyetleri de doğrudan etkilemektedir.

Ekoturizm, HES ve sosyo-ekonomik etkiler

Tortum Çayı ve çevresi, yalnızca ekolojik değerleriyle değil, aynı zamanda sahip olduğu peyzaj güzellikleri ve doğal cazibe merkezleriyle de dikkat çekmektedir. Özellikle Tortum Şelalesi ve Tortum Gölü, hem yerli hem de yabancı turistlerin ilgisini çeken önemli doğal alanlardandır. Orhan ve Karahan (2011), Uzundere ilçesi ve çevresinin ekoturizm potansiyelini değerlendirdikleri çalışmada, bu bölgenin doğa yürüyüşleri, kuş gözlemciliği ve foto-safari gibi sürdürülebilir turizm faaliyetleri açısından zengin bir kapasiteye sahip olduğunu ortaya koymuşlardır.



Şekil 2. Suyun tamamının HES’e aktarılmasıyla kuruyan Tortum Şelalesi (T24, 2022)

Ancak bu potansiyelin gelişimi, altyapı yetersizlikleri, çevre yönetiminde kurumsal eksiklikler ve plansız yapılaşma gibi nedenlerle sınırlı kalmaktadır. Özgeriş ve Karahan’ın (2022a) Uzdere örneğinde yaptığı değerlendirme, bölgedeki rekreasyonel su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı konusunda çeşitli tehditlerin bulunduğunu ve “sakin şehir” politikalarının etkin şekilde uygulanması gerektiğini vurgulamaktadır. Turizm faaliyetlerinin çevreye olan baskısı, su kaynaklarının yönetimi açısından da dikkatle izlenmesi gereken bir boyut oluşturmaktadır.

Öte yandan, Tortum Çayı Havzası’nda inşa edilen nehir tipi hidroelektrik santraller (HES), hem çevresel hem de toplumsal düzeyde önemli tartışmalara neden olmaktadır. Turhan ve Çağatay (2021), Alakır Vadisi örneğinde HES’lerin çevresel etkilerini analiz ederken, bu projelerin tarım arazileri üzerinde kuraklık etkisi oluşturduğunu ve yerel halkın yaşam biçimini olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir. Benzer şekilde Atabey ve Gürdoğan (2020b), Doğu Karadeniz Bölgesi’nde HES projelerinin çevre ve toplum üzerindeki etkilerini SWOT analiziyle değerlendirerek, bu tür yatırımların yerel halkla çatışmalara ve sosyal uyumsuzluklara neden olabileceğini ortaya koymuşlardır.

Lahn (1944a) Çoruh Nehri ve kolları üzerindeki jeomorfolojik gözlemlerine göre, Tortum Şelalesi, bir heyelan sonucu oluşmuş set gölü olan Tortum Gölü’nün aşağı kotlarında yer almakta ve bölgedeki topoğrafik enerji potansiyelini yüksek ölçüde yansıtmaktadır. Bu jeomorfolojik yapı, hidroelektrik enerji üretimi açısından dikkate değer bir düşü yüksekliği ve sürekli akış imkânı sunmaktadır. Nitekim, çalışmada şelalenin yıllık debisinin mevsimsel

değişikliklere rağmen kesintisiz akış sağladığı ve bölgenin hidrolojik kapasitesi içinde önemli bir potansiyel barındırdığı ifade edilmektedir. Bu veriler, şelale çevresinde planlanan veya tartışılan HES projelerinin temel dayanaklarından birini oluşturmakta, aynı zamanda doğal peyzajın enerji politikaları bağlamında değerlendirilmesinde örnek teşkil etmektedir.

Tortum Çayı çevresinde de HES yatırımları, özellikle su rejimini değiştirerek tarımsal üretimi ve içme suyu teminini etkilemektedir. Bu durum hem suyun ekosistem işlevini bozar hem de halk sağlığı açısından risk oluşturur. Ayrıca, çayın doğal güzelliklerinin bozulması, ekoturizm potansiyelinin sürdürülebilirliğini tehlikeye atmaktadır. Bu bağlamda, ekoturizm ve HES faaliyetleri arasında denge kurulması, hem ekonomik kalkınma hem de doğal kaynakların korunması açısından zorunlu bir gerekliliktir.

Havza yönetimi ve sürdürülebilirlik perspektifi

Tortum Çayı Havzası'nın sağlıklı bir şekilde yönetilmesi, yalnızca mevcut kirlilik yüklerinin azaltılması açısından değil, aynı zamanda ekosistem hizmetlerinin sürdürülebilirliği ve sosyo-ekonomik kalkınmanın dengelenmesi açısından da stratejik bir öneme sahiptir. Havza ölçeğinde bütüncül bir çevre yönetimi yaklaşımı, su kaynaklarının kalitesinin korunması, biyolojik çeşitliliğin sürdürülmesi ve insan faaliyetlerinin doğayla uyum içinde gerçekleştirilmesi bakımından hayati bir gerekliliktir.

Demircioğlu Yıldız vd (2011a), Tortum Çayı Havzası'nın arazi kullanımındaki düzensizlikler ve plansız tarım faaliyetlerinin havza yönetimi üzerindeki olumsuz etkilerini ayrıntılı bir şekilde ele almışlardır. Bu çalışmaya göre, entegre alan kullanım planlarının eksikliği, hem su kalitesini hem de erozyon riskini artırmakta; bu durum uzun vadede hem çayın ekolojik sağlığını hem de bölgedeki tarım verimliliğini tehdit etmektedir. Dolayısıyla havzada uygulanacak yönetim planlarının, arazi kullanım kararlarıyla koordineli olması gerekmektedir.

Ayrıca, Lahn (1944c) tarafından yapılan erken dönem çalışmalarda da belirtildiği üzere, Tortum Gölü ve çevresi su kaynakları açısından yalnızca doğal değil, kültürel ve tarihi bir değer de taşımaktadır. Bu mirasın korunması, sadece fiziksel kirliliğin giderilmesiyle değil, aynı zamanda bölge halkının bilinçlendirilmesi, yönetim süreçlerine katılımı ve yerel düzeyde sahiplenme ile mümkündür. Bu noktada havza yönetimi süreçlerinde paydaş katılımı temel ilkelerden biri olmalıdır.

Bölgedeki çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması için, havzada yer alan tüm ekosistem bileşenlerinin birlikte ele alındığı bir yaklaşım gereklidir. Bu, yalnızca su kalitesinin izlenmesiyle sınırlı kalmayıp; hidroelektrik üretimi, tarımsal sulama, ekoturizm, kuş gözlemciliği gibi faaliyetlerin birbirine zarar vermeyecek şekilde entegre edilmesini

içermelidir. Kopar ve Sevindi (2020), kıyı çizgisi değişimlerinin bu tür faaliyetlerle doğrudan ilişkili olduğunu vurgulayarak, sedimentasyon gibi jeomorfolojik süreçlerin de havza yönetiminde dikkate alınması gerektiğini belirtmiştir.

Bu kapsamda, Tortum Çayı özelinde geliştirilecek çevre politikalarının yalnızca teknik analizlere değil, aynı zamanda sosyal etkilere ve ekonomik fayda-zarar dengelerine dayalı olması gerektiği görülmektedir. Bu bağlamda bölgeye özgü sürdürülebilir kalkınma stratejilerinin, çevre-doğa-insan etkileşimini gözetenek kurgulanması büyük önem taşımaktadır. Tortum Havzası gibi orta büyüklükteki akarsu sistemleri, yerel düzeyde örnek teşkil edebilecek çevre yönetimi modellerinin uygulanabilirliği açısından da değerlidir.



MATERYAL VE METOT

Çalışma Alanı

Bu çalışma, Doğu Anadolu ile Doğu Karadeniz geçiş zonunda, Erzurum ili sınırları içerisinde yer alan Tortum Çayı vadisi ve yan havzalarını kapsamaktadır. Havza; kuzeyde Yusufeli–Oltu, doğuda Narman, güneyde Yakutiye, batıda İspir ile çevrili olup, 40°10'–40°50' K enlemleri ve 41°10'–41°43' D boylamları arasında 1.956–1.900 km²'lik bir drenaj alanına sahiptir.* Havzayı batıda Mescit Dağları (3239 m), doğuda Akdağlar (3047 m), güneybatıda Dumlu Dağları (~3200 m) ve güneydoğuda Kargapazarı Dağları (3228 m) sınırlandırır; en alçak (586 m) ve en yüksek (3239 m) noktalar arasındaki ~2650 m'yi bulan yükselti farkı, vadinin derin yarılmış topoğrafya karakterini ortaya koyar. Bu durum, dik yamaçlarda heyelan ve yüzey erozyonuna duyarlılığı artırırken, vadi tabanlarında mikroklimatik bir kuşak oluşturarak tarımsal üretimi destekler (Kopar & Çakır 2014; Duman 2009).

Tortum Çayı'nın üst çığırını Mescit, Yıldızdağ ve Eğerli dağlarından gelen kol sistemleri oluşturur; akarsu 50 km seyirle Tortum Gölü'ne ulaşır, gölden çıktığında Tortum Şelalesi'ni oluşturduktan sonra aşağı çığırda Çoruh Nehri ile birleşir. Tortum Gölü, 17. yüzyıl ortalarında büyük bir yamaç kütlelerinin Kemerlidağ'dan kopup vadiyi setlemesiyle oluşmuş bir heyelan-set gölüdür (Duman 2009). Şelale 48 metrede deneye dökülür; alan mikroklima özellikleri sergiler ve D950 Erzurum–Artvin karayolu boyunca yüksek erişilebilirliğe sahiptir (Demir & Özer 2014).

Göl-çay sistemi, morfometrik olarak ~8 km uzunluk, ~0,7 km genişlik ve ~100 m ortalama derinlik değerleriyle tanımlanır; göl hacmi ~57,6 hm³ mertebesinde dir. 2017–2018 izleme döneminde göl mesotrofik karakter göstermiş; Secchi diski derinliği yıl boyunca 3–5 m aralığında olup ortalama 4,42 m ölçülmüş; sıcak dönemde belirgin ısı tabakalaşma gözlenmiştir. Giriş/çıkış istasyonlarında çözünmüş oksijen değerleri mevsimsel değişimle birlikte geniş bir aralıkta (5–11 mg/L) seyretmiştir. Dış fosfor yükünün gölün kritik yükünü aştığı; tarımsal girdiler ve yerleşim kaynaklı besin tuzu girişlerinin ekosistem işleyişini etkilediği rapor edilmiştir (Fakıoğlu, Nuhoglu, Egercioğlu, & Acar 2020).

Vadinin jeomorfolojisi; derin vadi tabanları, dik-sürekli yamaçlar, çok sayıda yamaç kökenli birikinti ve büyük ölçekli kütle hareketleri ile tanımlanır. Tortum Vadisi boyunca derin-oturmuş heyelanlar yaygındır; bu durum yer yer şev dengesinin kırılmasına ve yamaç süreçlerinin baskın olmasına yol açar. Tortum Şelalesi ve çevresi, doğal koruma ölçütleri

(büyüklük, nadirlik, bütünlük, erişilebilirlik vb.) açısından doğal park/doğa anıtı statüsüyle değerlendirilmeyi hak eden bir jeomiras alanı olarak tanımlanmıştır (Demir & Özer 2014; Kopar & Çakır 2014).

İklim ve hidroloji: Havza, Doğu Anadolu karasal iklimi ile Doğu Karadeniz nemli iklimi arasında bir geçiş sahasıdır; Uzundere–Tortum çevresi, yükselti ve topoğrafyanın etkisiyle daha ılıman mikroklima sergiler. Akarsu rejimi kar erimeleri ve yağışlarla ilkbaharda yükselirken yaz sonu–sonbaharda alçalır. Bu iklimsel rejim, besin tuzu taşınımı, sediment akışı ve akarsu ekolojisi üzerinde belirleyicidir (Demir & Özer 2014; Fakıoğlu ve ark 2020).

Arazi kullanımı ve yerleşim: Vadi tabanlarında bahçe tarımı, meyvecilik ve seracılık; yamaç–yüksek kesimlerde yaylacılık ve hayvancılık yaygındır. alışma istasyonları bağlamında; İstasyon-1 üst havzada Taşoluk ve Sivriçay kollarının birleşimi sonrası konumlanmakta; bu kollar üzerinde 6 köyde toplam 1.133 nüfus, 4.848 büyükbaş ve 2.420 küçükbaş hayvan bulunmaktadır. İstasyon-1 ile İstasyon-2 arasında ise Çiftlik, Yellitepe (Kazandere), Doruklu (Sokturot), Kaleboynu (Kiska), Uzunkavak (Haho) ve Dikyar dereleri çaya karışmakta; bu yan havza hattında 26 köy, 8.361 nüfus, 16.596 büyükbaş ve 12.898 küçükbaş hayvan yer almakta, dolayısıyla yayılı (diffüz) kirlilik potansiyeli yüksektir. (Bu çalışmada kullanılan nüfus ve hayvan varlığına ilişkin veriler, Erzurum Tarım ve Orman İl Müdürlüğü kayıtları ile Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) resmî verilerinden derlenmiştir.)

Hidroelektrik (HES) ve akarsu sürekliliği: Tortum Çayı’nın bazı kollarında nehir tipi HES tesisleri sahada “cansuyu ile beslenen” uzun kesitler oluşturmuştur. Katıklı Çayı örneğinde Büyükbahçe HES (10,5 km) ve Bağbaşı HES (12 km) nedeniyle vadinin toplam ~22,5 km’lik kısmında akış cansuyu debisi ile sürmekte; bu durum sediment taşınımının kesilmesi, balık göçlerinin engellenmesi, akarsu içi habitatların parçalanması ve ötrifikasyon eğilimlerinin artması dâhil çok boyutlu çevresel etkiler yaratmaktadır (Alkan vd 2022). Ayrıca, iletim hatları ve yolların inşası yamaç dengesi ve erozyon üzerinde olumsuz etkiler doğurmuştur (Alkan vd 2022).

Su kalitesi bağlamı benzer çalışmalar: Tortum Gölü ve Tortum Çayı sisteminde pH, sıcaklık, iletkenlik, çözünmüş oksijen (ÇO), NO_3^- -N, PO_4^{3-} -P, toplam fosfor (TP), toplam azot (TN) gibi parametrelerde mevsimsel-mekânsal değişimler rapor edilmiştir; yerleşim–tarım–hayvancılık baskısının yüksek olduğu kesitlerde iletkenlik ve besin tuzu artışları; göl–çay geçiş zonlarında ise hidromorfolojik düzenlemelerin su kalitesi ve ekosistem yapısı üzerinde belirleyici olduğu vurgulanmıştır (Fakıoğlu vd 2020).

Sediment ve uzun dönemli riskler: Tortum Gölü’nde yapılan 72 cm sediment çekirdek çalışmaları ağır metal (örn. Cu, Zn, Ni, As, Cd, Hg) dikey dağılımları ve ekolojik risk

indekslerini değerlendirmiş; genel risk düzeyi dūřuk–orta bulunurken Cd ve Hg açısından grel risklerin ön plana çıkabildiği belirtilmiştir (Kaya ve ark & Erginal 2017). Bu sonuçlar, gl–ay sisteminde besin–kirletici stoğu ve i yk mekanizmalarının dikkate alınması gerektiğini göstermektedir (ayrıca bkz. Fakıoğlu ve ark 2020).

Doğal/kültürel değerler ve koruma: Tortum şelalesi ve çevresi, doğal peyzaj değeri, biyolojik çeşitliliği ve jeomorfolojik estetiği ile öne çıkar; alanın korunan alan statüsü ve doğa parkı ölçütleriyle uyumu, CBS tabanlı değerlendirmelerle ortaya konulmuştur. Bölge; kuş gleri, memeli faunası ve jeoturizm–ekoturizm potansiyeli açısından önemlidir; agroturizm ise vadi tabanındaki bahçe–meyvecilik ve yaylacılıkla sürdürülebilir kırsal kalkınma için öne çıkan bir fırsattır (Demir & zer 2014; Kopar & akır 2014).

* Not (drenaj alanı): Literatürde Tortum Gölü/ayı havzası için farklı drenaj alanı değerleri rapor edilmiştir: 1653 km² (DSİ verisine dayalı; Fakıoğlu ve ark 2020, Tablo 7) ve ~1820 km² (Duman 2009). Metindeki değer saha/kurumsal derlemelerinize dayanmaktadır.

İstasyonlar

İstasyon-1 (Tortum ayı-1; 40°18'47.92''K, 41°31'30.48''D)

İstasyon-1, st havzada Taşoluk Deresi ve Sivriay Deresi'nin Tortum ayı ana koluna karışımından hemen sonra konumlanmıştır. Bu iki yan kol üzerinde yer alan 6 köyde toplam 1.133 kişi, 4.848 büyükbaş ve 2.420 küçükbaş hayvan bulunmaktadır. Sahanın seçilme gerekçesi, yukarı havzada sınırlı yerleşim ve hayvancılık baskısının oluşturduğu yayılı (diffüz) kirlilik sinyalinin —zellikle azot ve fosfor formlarında— doğrudan izleyebilmek ve alt havzadan gelen ek yükler devreye girmeden önce referans nitelikli bir kesitte su kalitesinin başlangıç düzeyini tanımlamaktır.

Hidroklimatik açıdan, ilkbahar kar erimesi ve yağış olayları sırasında yüzey akışı artışı ile birlikte besin tuzu ve askıda katı madde taşınımının yükselmesi beklenir; yaz sonu–sonbaharda debinin azalmasıyla konsantrasyon–seyreltme ilişkileri farklılaşır. Bu istasyondan elde edilecek pH, sıcaklık, O, EC, NO₃-N, PO₄-P, TP ve TN verileri, hem mevsimselliği hem de st havzadaki tarımsal/hayvansal faaliyetlerin etkisini ayrıştırmada karşılaştırma tabanı işlevi görür.



Şekil 3. İstasyon haritası

İstasyon-2 (Tortum Çayı-2; 40°30'37.95''K, 41°31'21.15''D)

İstasyon-2, İstasyon-1 ile arasındaki kesitte Tortum Çayı'na katılan Çiftlik Deresi, Yellitepe (Kazandere), Doruklu (Sokturot), Kaleboynu (Kiska), Uzunkavak (Haho) ve Dikyar Deresi dâhil çok sayıda yan koldan kümülatif girdi alan aşağı havza bölümünü temsil eder. Bu yan dereler boyunca yer alan 26 köyde toplam 8.361 nüfus, 16.596 büyükbaş ve 12.898 küçükbaş hayvan mevcuttur. Dolayısıyla istasyon, tarımsal faaliyet, hayvansal üretim ve yerleşim kaynaklı yayılı besin maddesi yükleri ile birlikte olası organik madde ve iletkenlik artışlarının birikimli etkisini yakalamaya yöneliktir.

Morfolojik olarak daha aşağı kot ve daha geniş drenaj alanından yandal girişleri alan bu kesitte, debi ve akış hızı değişimleriyle seyreltme/derişme süreçleri belirgindir. İstasyon-2'den toplanan zaman serisi; İstasyon-1'e göre mekânsal gradyanı ortaya koyar, t-test gibi istatistiksel karşılaştırmalar için temel veri sağlar ve 2023–2024 dönemi boyunca mevsimsel (kar erimesi–kurak dönem) örüntüleri ile yıllar arası eğilimleri değerlendirmeye imkân verir. Bu karşılaştırma, yönetim açısından kritik parametrelerde (iletkenlik, NO₃-N, PO₄-P, TP, TN, ÇO) olası eşik aşımalarını ve yayılı kirlilik kaynaklarının görece katkısını görünür kılar.

Yöntem

Numune alımı

Tortum Çayı'ndan su numuneleri, 2023–2024 yılları arasında her ay olmak üzere iki istasyondan düzenli olarak alınmıştır. Numuneler, yüzeyden 30 cm derinlikten, 500 mL hacminde polietilen şişeler ile toplanmıştır. Şişeler örnekleme öncesinde distile su ile yıkanmış, kontaminasyonu önlemek amacıyla numune alma sırasında tek kullanımlık eldiven

kullanılmıştır. Arazi koşullarında numuneler ışık geçirmeyen kapalı kutularda muhafaza edilmiş ve +4 °C’de laboratuvara ulaştırılmıştır.

Yerinde analizler

Yerinde analizler, suyun fizikokimyasal özelliklerini anlık olarak belirlemek amacıyla taşınabilir çoklu parametrelili ölçüm cihazları ile yapılmıştır. Ölçüm öncesinde cihazlar üretici talimatlarına uygun şekilde kalibre edilmiştir.

pH

pH, suyun asidik veya bazik karakterini belirleyen ve hidrojen iyonu (H^+) aktivitesinin negatif logaritması olarak tanımlanan temel bir kimyasal parametredir. 0–14 ölçeğinde ölçülür ve tatlı su ekosistemlerinde genellikle 6,5–8,5 aralığında bulunur. pH değeri, suyun kimyasal dengesi, biyolojik aktivitesi ve ekosistem sağlığı üzerinde belirleyici rol oynar. Düşük pH (asidik ortam) metallerin çözünürlüğünü artırarak toksisite riskini yükseltir; yüksek pH (bazik ortam) ise amonyak formundaki azot bileşiklerinin toksik hale gelmesine neden olabilir. (Trach vd 2024)

Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği’ne (SKKY) göre, içme ve kullanma suyu olarak değerlendirilecek yüzey sularında pH değerinin 6,5–8,5 arasında olması gerekir. Bu aralık, hem insan sağlığı hem de sucul yaşam açısından optimum koşulları temsil etmektedir. Bu sınırların dışına çıkılması, özellikle balıklar, omurgasızlar ve algler gibi sucul canlılar için ciddi stres faktörleri yaratabilir. Ayrıca pH, çözünmüş oksijenin biyolojik kullanılabilirliğini ve birçok çözünmüş maddenin (örneğin ağır metallerin) kimyasal formunu doğrudan etkilemektedir.

Bu çalışmada pH ölçümleri, saha koşullarında taşınabilir çoklu parametrelili ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Ölçüm öncesinde cihaz, pH 4,00; 7,00 ve 10,00 tampon çözeltileri ile üç noktadan kalibrasyon edilmiştir. Numuneler alındıktan hemen sonra, su yüzeyine yakın bir derinlikte (20–30 cm) ölçüm yapılmış ve sonuçlar anında kaydedilmiştir. Bu yöntem, numunenin laboratuvara taşınması sırasında meydana gelebilecek pH değişimlerini önleyerek sahadaki gerçek kimyasal durumu yansıtmayı sağlamaktadır. Ölçüm sırasında, su sıcaklığı ve akıntı hızı gibi pH üzerinde etkili olabilecek çevresel faktörler de kayıt altına alınmıştır.

Oksijen (Çözünmüş Oksijen, ÇO)

Çözünmüş oksijen (ÇO), sucul ekosistemlerde yaşayan tüm aerobik organizmaların yaşamını sürdürebilmesi için gerekli en temel parametrelerden biridir. ÇO düzeyi; fotosentez, solunum, atmosferik difüzyon, su sıcaklığı, akıntı hızı, organik madde miktarı ve mikroorganizma faaliyetleri gibi çok sayıda fiziksel, kimyasal ve biyolojik faktörden etkilenir.

Doğal koşullarda akarsu ve göllerde ÇO seviyesi dengede bulunur; ancak organik kirlilik, atıksu deşarjları, tarımsal drenaj ve endüstriyel faaliyetler bu dengeyi bozarak oksijen seviyesinin düşmesine yol açabilir.

Oksijenin sucul ortamda yeterli seviyede bulunması, balıklar, omurgasızlar ve mikroorganizmalar için yaşamsal öneme sahiptir. ÇO'nun kritik eşiğin (genellikle 5 mg/L) altına düşmesi, balık ölümleri, bentik organizma kayıpları ve ekosistem fonksiyonlarında ciddi bozulmalarla sonuçlanabilir. Ayrıca düşük oksijen seviyeleri, özellikle yaz aylarında sıcaklık artışı ve organik madde ayrışmasının hızlanması ile daha da belirginleşebilir.

Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'ne (SKKY) göre, sınıf I yüzey sularında ÇO değerinin ≥ 8 mg/L, sınıf II sularında ise ≥ 6 mg/L olması gerekir. Bu eşiklerin altına düşen değerler, genellikle organik kirlilik yükünün yüksek olduğunu ve biyolojik oksijen tüketiminin arttığını gösterir.

Bu çalışmada ÇO ölçümleri, saha koşullarında optik sensör teknolojisine sahip çözünmüş oksijen probu kullanılarak yapılmıştır. Ölçüm öncesinde cihaz, üretici talimatlarına uygun şekilde %100 doyumluk değerine karşı kalibre edilmiştir. Numune noktalarında prob, su yüzeyinden 20–30 cm derinliğe daldırılmış ve değerler hem mg/L hem de % doyumluk birimlerinde kaydedilmiştir. Ölçümler sırasında su sıcaklığı, akıntı hızı ve hava koşulları gibi oksijen konsantrasyonunu etkileyebilecek çevresel değişkenler de kayıt altına alınmıştır. Bu sayede elde edilen oksijen verileri, ekosistemin mevcut durumu ve potansiyel kirlilik baskıları hakkında kapsamlı bilgi sunmaktadır.

Sıcaklık

Sıcaklık, suyun fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri üzerinde doğrudan etkili olan temel çevresel parametrelerden biridir. Su sıcaklığı; çözünmüş oksijenin sudaki çözünürlüğünü, kimyasal reaksiyon hızlarını, sucul organizmaların metabolizma hızını, üreme dönemlerini ve tür dağılımını belirleyen kritik bir faktördür. Yüksek sıcaklıklar, oksijen çözünürlüğünü düşürerek sucul canlılar üzerinde stres yaratırken; düşük sıcaklıklar biyolojik süreçleri yavaşlatabilir (Wu vd 2025).

Sıcaklık, ayrıca toksik maddelerin etkilerini de değiştirebilir. Örneğin, amonyak toksisitesi sıcaklık arttıkça artar. Akarsularda sıcaklık; mevsimsel değişimlerin yanı sıra iklim, yükseklik, akış hızı, göl/baraj etkisi, yeraltı suyu girişleri ve antropojenik etkiler (sanayi soğutma suyu deşarjı, HES faaliyetleri vb.) gibi faktörlerden etkilenir. Özellikle endüstriyel faaliyetlerin neden olduğu “termal kirlilik”, ekosistem dengesini bozarak bazı türlerin yok olmasına, istilacı türlerin çoğalmasına yol açabilir.

SKKY'e göre, su sıcaklığının doğal koşulların ± 3 °C'den fazla değişmemesi esastır. Bu sınır, sucul yaşamın korunması için belirlenmiş olup, ani sıcaklık değişimleri ekosistem için ciddi tehdit oluşturabilir.

Bu çalışmada sıcaklık ölçümleri, saha koşullarında çoklu parametrelili ölçüm cihazının entegre sıcaklık probu ile yapılmıştır. Ölçümler numune alımı ile eş zamanlı gerçekleştirilmiş, sonuçlar °C cinsinden kaydedilmiştir. Ölçüm sırasında cihazın otomatik sıcaklık kompanzasyonu özelliği kullanılarak veri doğruluğu sağlanmıştır. Ayrıca ölçüm noktalarında hava sıcaklığı, güneşlenme durumu ve akıntı hızı gibi sıcaklığı etkileyebilecek faktörler de kayıt altına alınmıştır. Bu veriler, özellikle çözünmüş oksijen ve biyokimyasal süreçlerin yorumlanmasında destekleyici değişken olarak kullanılmıştır.

Laboratuvar analizleri

Elektriksel İletkenlik (EC)

Elektriksel iletkenlik, suyun içerisinde çözünmüş durumda bulunan iyonların (anyonlar ve katyonlar) miktarını dolaylı olarak gösteren bir parametredir. Temel olarak, suyun elektrik akımını iletebilme kapasitesi, çözünmüş tuzların ve minerallerin yoğunluğu ile doğru orantılıdır. Yüzey sularında EC değerleri; jeolojik yapı, havzanın toprak özellikleri, buharlaşma oranı, tarımsal drenaj, evsel ve endüstriyel atık deşarjları gibi faktörlerden etkilenir (Yavuz vd 2024).

Doğal akarsularda elektriksel iletkenlik genellikle 50–1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında değişir. Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'ne (SKKY) göre, sulama sularında EC değeri 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'nin altında ise tuzluluk açısından “iyi kalite” olarak değerlendirilir. 750–2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ aralığı orta kalite, 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'nin üzerindeki değerler ise tuzluluk açısından “kullanım kısıtlı” olarak kabul edilir. İçme suyu kaynaklarında ise yüksek iletkenlik, sodyum, klorür, sülfat gibi iyonların fazlalığına işaret edebilir ve tat, korozyon, sağlık problemleri gibi olumsuzluklara neden olabilir.

Yüksek EC değerleri, özellikle tarımsal alanlarda tuzluluk sorunlarını artırarak bitki gelişimini olumsuz etkileyebilir. Bununla birlikte, ani EC artışları, su kaynağına noktasal bir kirlilik yüklemesinin (örneğin endüstriyel deşarj veya atık su girişi) habercisi olabilir. Bu nedenle EC, hem suyun doğal mineral içeriğini hem de kirlilik yüklerini değerlendirmek için kritik bir göstergedir.

Bu çalışmada elektriksel iletkenlik ölçümleri, *American Public Health Association* (APHA, 2017) “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” rehberine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ortamında masa tipi iletkenlik ölçer kullanılmış

ve cihaz, 25 °C referans sıcaklığına göre kalibre edilmiştir. Numuneler laboratuvara ulaştıktan sonra oda sıcaklığında dengelenmiş, ardından cam iletkenlik hücresine alınarak ölçüm yapılmıştır. Ölçüm sırasında sıcaklık kompanzasyonu uygulanarak, farklı sıcaklıklardan kaynaklanabilecek ölçüm hataları minimize edilmiştir. Sonuçlar $\mu\text{S}/\text{cm}$ cinsinden kaydedilmiş ve SKKY kriterlerine göre sınıflandırılmıştır.

Fosfat ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)

Fosfat, tatlı su ekosistemlerinde doğal olarak düşük konsantrasyonlarda bulunan ancak insan faaliyetleri ile hızla artabilen, çözülmüş inorganik fosfor formudur. Su ekosistemlerinde genellikle sınırlayıcı besin maddesi konumundadır; yani ekosistemdeki üretim kapasitesini kontrol eden ana elementlerden biridir. Havzaya giren fosfat miktarındaki küçük artışlar bile, özellikle göl ve yavaş akışlı akarsularda ötrofikasyon sürecini hızla tetikleyebilir. Bu süreç; alg ve siyanobakteri patlamaları, suyun bulanıklaşması, çözülmüş oksijenin azalması ve balık ölümleri gibi ciddi ekolojik problemlere yol açar (Paerl & Otten 2023).

Fosfatın başlıca antropojenik kaynakları arasında tarımsal gübreler, hayvansal atıklar, deterjanlar, endüstriyel deşarjlar ve evsel atıksular yer alır. Özellikle tarımsal alanlarda yapılan fosfor bazlı gübreleme faaliyetleri, yağış ve sulama ile yüzey akışı yoluyla su kaynaklarına taşınarak fosfat yükünü artırır. Evsel atıksular ve endüstriyel tesislerden gelen deşarjlar da, arıtma tesisleri yetersiz olduğunda veya hiç yapılmadığında fosfat kirliliğinin önemli bir kaynağıdır.

Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'ne (SKKY) göre, sınıf I yüzey sularında ortofosfat fosfor ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) konsantrasyonu 0,02 mg/L'yi geçmemelidir. Bu sınır değeri, fosfatın ekosistem üzerindeki etkilerinin önlenmesi için belirlenmiştir. 0,02 mg/L'nin üzerinde ölçülen değerler, su kütlesinin fosfor yüklemesine maruz kaldığını ve ötrofikasyon riskinin yükseldiğini gösterir. Sınıf II sular için bu değer 0,16 mg/L'ye kadar çıkabilmektedir.

Bu çalışmada fosfat tayini, *American Public Health Association* (APHA, 2017) "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" kılavuzunda yer alan 4500-P askorbik asit yöntemi ile yapılmıştır. Numuneler öncelikle süzülerek askıda katı maddelerden arındırılmıştır. Daha sonra amonyum molibdat ve potasyum antimonil tartarat reaktifleri eklenmiş; bu reaktifler, fosfat iyonları ile birleşerek fosfomolibdat kompleksi oluşturmuştur. Ardından askorbik asit eklenerek indirgeme işlemi yapılmış ve mavi renkli molibden mavisi kompleksi meydana gelmiştir. Bu renk, spektrofotometrede 880 nm dalga boyunda ölçülmüş ve sonuçlar mg/L cinsinden raporlanmıştır. Yöntem, yüksek hassasiyeti sayesinde düşük konsantrasyonlardaki fosfatın bile güvenilir bir şekilde tespit edilmesini sağlamaktadır.

Nitrat (NO_3^- -N)

Nitrat, tatlı su ekosistemlerinde en yaygın bulunan inorganik azot formudur ve su kalitesinin değerlendirilmesinde kritik bir parametredir (Camargo & Alonso 2017). Doğal yüzey sularında nitrat genellikle düşük konsantrasyonlarda bulunur, ancak tarımsal faaliyetler (özellikle azotlu gübre kullanımı), hayvansal atıkların yönetim eksiklikleri, evsel atık su deşarjı ve yağış sonrası yüzey akışları nitrat seviyelerinin artmasına yol açabilir. Nitrat, sucul ortamda yüksek çözünürlüğe sahip olduğundan, yeraltı ve yüzey sularında kolayca taşınır ve geniş alanlarda kirlilik problemi oluşturabilir.

Nitratin insan sağlığı açısından en önemli risklerinden biri, yüksek konsantrasyonlarda tüketildiğinde özellikle bebeklerde “methemoglobinemi” (mavi bebek sendromu) hastalığına yol açabilmesidir. Bu durum, nitratin vücutta nitrite indirgenmesi ve hemoglobinin oksijen taşıma kapasitesinin azalmasıyla ortaya çıkar. Ayrıca, yüksek nitrat seviyeleri su ekosistemlerinde ötrofikasyonu hızlandırır; bu da alg ve siyanobakteri patlamalarına, suyun bulanıklaşmasına ve çözünmüş oksijenin azalmasına neden olur. Bu zincirleme etki, balık ölümleri ve biyolojik çeşitlilik kaybı gibi ekolojik sonuçlar doğurur.

Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği’ne (SKKY) göre, içme suyu kaynağı olarak kullanılacak yüzey sularında nitrat azot (NO_3^- -N) konsantrasyonu 10 mg/L’yi geçmemelidir. Sınıf I yüzey sularında bu değer ≤ 5 mg/L, sınıf II sularda ise ≤ 10 mg/L olarak kabul edilmektedir. Bu eşiklerin üzerinde ölçülen konsantrasyonlar, genellikle havzada yayılı tarımsal kaynaklar, hayvansal üretim tesisleri veya noktasal atıksu deşarjları ile ilişkilendirilmektedir.

Bu çalışmada nitrat analizleri, *American Public Health Association* (APHA, 2017) “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” kılavuzunda belirtilen 4500- NO_3^- kadmiyum indirgeme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Numuneler öncelikle süzülerek partikül maddelerden arındırılmıştır. Ardından, nitrat kadmiyum kolondan geçirilerek nitrite indirgenmiştir. Elde edilen nitrit, sülfonamid ve N-(1-naftil)-etilendiamin reaktifleri ile diazotlama ve eşleşme reaksiyonuna sokularak pembe-kırmızı renk kompleksi oluşturmuştur. Bu renk yoğunluğu, spektrofotometrede 543 nm dalga boyunda ölçülmüş ve mg/L cinsinden raporlanmıştır. Yöntem, hem düşük hem de yüksek konsantrasyonlardaki nitrati güvenilir şekilde tespit edebilmesi nedeniyle uluslararası standartlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Toplam Fosfor (TP)

Toplam fosfor, bir su kütlesinde bulunan tüm fosfor fraksiyonlarını – çözünmüş inorganik fosfat (ortofosfat), çözünmüş organik fosfor ve partikül formundaki fosfor – kapsayan bir parametredir. Fosfor, tatlı su ekosistemlerinde genellikle sınırlayıcı besin

maddesidir (Withers & Bowes 2018). Dış kaynaklı fosfor yüklemesi, ekosistemin doğal besin döngüsünü bozarak ötrofikasyon sürecini hızlandırır. Bu süreç, alg ve siyanobakteri patlamaları, suyun bulanıklaşması, çözünmüş oksijenin azalması ve sucul yaşam üzerinde ciddi stresler ile sonuçlanabilir. Uzun vadede, ötrofikasyon göl ve akarsularda biyolojik çeşitliliğin azalmasına ve habitat kaybına neden olur.

Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'ne (SKKY) göre, sınıf I yüzey suları için toplam fosfor sınır değeri 0,16 mg/L olarak belirlenmiştir. Bu değerin üzerinde fosfor konsantrasyonları, özellikle durağan veya yavaş akan sularda hızlı ötrofikasyona işaret eder. Dolayısıyla TP ölçümleri, havzanın tarımsal faaliyet, hayvansal üretim ve yerleşim kaynaklı besin maddesi girişlerinin bütüncül bir değerlendirmesini sağlar.

Bu çalışmada TP tayini, *American Public Health Association* (APHA, 2017) standart yöntemleri çerçevesinde persülfat oksidasyonu yöntemi ile yapılmıştır. Numune, yüksek sıcaklıkta ve basınç altında persülfat reaktifi ile muamele edilerek tüm fosfor bileşenleri ortofosfat formuna dönüştürülmüştür. Ardından askorbik asit yöntemi uygulanmış; amonyum molibdat ve potasyum antimonil tartarat reaktifleri ile ortofosfatın mavi renk kompleksi oluşturması sağlanmıştır. Oluşan renk, spektrofotometrede 880 nm dalga boyunda ölçülmüş ve mg/L cinsinden ifade edilmiştir. Bu yöntem, çözünmüş ve partikül formundaki fosforun tamamını kapsadığı için su kütlesinin toplam fosfor yükünü doğru şekilde ortaya koyar.

Toplam Azot (TN)

Elimizdeki su örneklerinde toplam azot (TN) klasik Kjeldahl yöntemi ile ölçülmüştür. Numuneler önce konsantre sülfürik asit (H_2SO_4) içinde, kaynama noktasını yükseltmek için potasyum sülfat (K_2SO_4) ve uygun katalizör (ör. $CuSO_4/Se$) ile asit ayrıştırma işlemine tabi tutulur. Bu aşamada organik azot türleri amonyum (NH_4^+) formuna oksitlenir. Ardından çözelti alkalileştirilir ve buharla damıtılır; açığa çıkan amonyak (NH_3) borik asitte tutulur ve standart asitle (HCl/H_2SO_4) titrasyon yapılarak miktarı belirlenir. Sonuçlar, titrasyonda harcanan asit hacmi ve derişimi kullanılarak $mg L^{-1} N$ cinsinden hesaplanır (Samsunlu, 1982).

Toplam azot, suda bulunan tüm azot bileşiklerinin (amonyum, nitrit, nitrat ve organik azot) toplamını ifade eder ve su kalitesinin değerlendirilmesinde temel parametrelerden biridir. TN, hem doğal süreçler (organik madde ayrışması, biyolojik azot döngüsü) hem de antropojenik faaliyetler (tarımsal gübre kullanımı, hayvansal atıklar, evsel ve endüstriyel atıksular) sonucunda artış gösterebilir. Yüksek TN konsantrasyonları, tatlı su ekosistemlerinde ötrofikasyon sürecini hızlandırarak alg patlamalarına, suyun bulanıklaşmasına ve çözünmüş

oksijenin azalmasına yol açabilir. Bu durum, özellikle balık ve diğer sucul canlıların yaşam alanlarının daralmasına, biyolojik çeşitliliğin azalmasına neden olur.

Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'nde (SKKY) TN için spesifik sınıf değerleri verilmemekle birlikte, azot bileşenleri olan nitrat, nitrit ve amonyum için belirlenmiş sınırlar bulunmaktadır. Bu sınırlar, TN'nin yüksek çıkması durumunda ilgili bileşenlerin ayrı ayrı incelenmesini ve kaynağın belirlenmesini gerekli kılar. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ise, içme suyunda nitrat azotunun 10 mg/L'yi, nitrit azotunun ise 0,1 mg/L'yi aşmaması gerektiğini belirtmektedir. Bu bağlamda TN değeri, kirliliğin kapsamını ve kaynağını anlamak açısından bütüncül bir gösterge olarak değerlendirilir. (WHO 2017a)

Bu çalışmada TN tayini, *American Public Health Association* (APHA, 2017) "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" kılavuzuna uygun olarak yapılmıştır. Numuneler, persülfat oksidasyonu yöntemi ile tüm azot fraksiyonlarının nitrat formuna dönüştürülmüştür. Bu işlem, numunenin belirli bir süre yüksek sıcaklıkta ve basınç altında persülfat reaktifi ile muamele edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Oksidasyon sonrası oluşan nitrat, kadmiyum indirgeme kolonu aracılığıyla nitrite dönüştürülmüş; oluşan nitrit ise sülfonamid ve N-(1-naftil)-etilendiamin reaktifleri ile renk reaksiyonu oluşturmuştur. Bu renk, spektrofotometrede 543 nm dalga boyunda ölçülmüş ve sonuçlar mg/L olarak ifade edilmiştir. Yöntem, hem çözünmüş hem de partikül formundaki tüm azot bileşenlerini kapsadığı için havza genelindeki azot yükünü doğru şekilde yansıtmaktadır.

İstatistiksel analizler

Analizler pH, çözünmüş oksijen (ÇO), sıcaklık, elektriksel iletkenlik (EC), NO_3^- -N, PO_4^{3-} -P, toplam fosfor (TP) ve toplam azot (TN) için yürütülmüştür. Tüm ölçümler istasyon (2 seviye), yıl (2023–2024) ve ay (Ocak–Aralık) etiketleriyle birleştirilmiştir. Anlamlılık düzeyi $\alpha = 0,05$ olup iki kuyruklu testler kullanılmış; çoklu karşılaştırmalarda Benjamini–Hochberg FDR düzeltmesi ($q = 0,10$) uygulanmıştır. Dağılım çarpıklığı olan değişkenlerde $\log_{10}$ ya da Box–Cox (λ veriyle kestirilerek) dönüşümü denenmiş; varsayımlar yine de sağlanmazsa parametrik olmayan eşdeğer testler tercih edilmiştir. Aykırı gözlemler IQR kuralı ($Q1 - 1,5 \times \text{IQR}$; $Q3 + 1,5 \times \text{IQR}$) ve Q–Q grafikleri ile kontrol edilmiş; ölçüm/cihaz hatasına ilişkin bulgu yoksa çevresel uç değerler analiz dışı bırakılmamıştır. Zaman serisi niteliğindeki ölçümlerde otokorelasyon olasılığı ACF/PACF ile incelenmiş; ihmal edilemeyecek bir bağımlılık görülürse karar metinlerinde bu durum belirtilmiş ve uygun yerlerde HAC (Newey–West) sağlam hata yaklaşımı dikkate alınmıştır. Sonuçlar birim tutarlılığı gözetilerek (örn. mg/L, $\mu\text{S}/\text{cm}$) verilmiş; etki büyüklükleri ve %95 güven aralıkları (GA) raporlanmıştır. Analizler R ya da eşdeğer istatistik paketlerinde gerçekleştirilmiştir.

T Testi (Independent Samples t-test)

İki istasyonun aynı döneme ait ortalama değerleri, 2023–2024 boyunca ay bazında eşleştirilerek karşılaştırılmıştır (ör. tüm Ocak gözlemleri: İstasyon-1 vs İstasyon-2). Bu düzen, mevsimselliğin etkisini kısmen kontrol altına alır. Testten önce varsayımlar ardışık olarak değerlendirilmiştir: istasyonlar arası bağımsızlık çalışma tasarımına dayanır; her iki grubun normalliği Shapiro–Wilk ve Q–Q grafikleriyle, varyans homojenliği Levene/Brown–Forsythe testiyle sınılanır. Varsayımlar sağlandığında Student t-testi, varyans homojenliği bozulduğunda Welch t-testi kullanılmıştır. Dönüşümler ($\log_{10}$ /Box–Cox) sonrasında da normallik sağlanmazsa Mann–Whitney U ile sağlamlık kontrolü yapılmıştır. Sonuçlar tablolastırılırken test istatistiği, serbestlik derecesi, p-değeri, etki büyüklüğü (Cohen’s d ; Welch için Hedges’ g ; parametrik olmayan durumda Cliff’s δ) ve %95 GA birlikte raporlanmış; çoklu karşılaştırma gerektiren yerlerde BH–FDR ($q = 0,10$) uygulanmıştır. Yöntem seçimi metinde açıkça belirtilmiş; örneğin Levene sonucu anlamlı olduğunda Welch satırı esas alınmıştır. Bulgular, karar vermeye hizmet eden istatistiksel çıktıları desteklemek amacıyla kutu grafikleri ile görsel olarak sunulmuştur.

Varyans Analizi (ANOVA)

Çalışmada yıl, istasyon ve mevsimsel dönemler arasındaki farklılıkları incelemek amacıyla iki yönlü ANOVA testi uygulanmıştır. Analiz, çözünmüş oksijen başta olmak üzere incelenen parametrelerde istasyon (mekânsal) ve mevsim (zamansal) etkilerini ve bu iki faktörün etkileşimlerini değerlendirmiştir. Test öncesinde normallik varsayımı Shapiro–Wilk testi ve Q–Q grafikleriyle, varyans homojenliği ise Levene testi ile kontrol edilmiştir. Varsayımlar karşılandığında klasik ANOVA sonuçları esas alınmış; homojenlik varsayımının bozulduğu durumlarda ise Welch ANOVA dikkate alınmıştır. Anlamlılık gözlenen bulgular için farklılıkların hangi gruplardan kaynaklandığını belirlemek üzere çoklu karşılaştırmalar Tukey HSD post-hoc testiyle desteklenmiş, sonuçlar etki büyüklüğü (η^2) ve %95 güven aralıklarıyla birlikte raporlanmıştır. Bulgular ayrıca hata çubuklu grafiklerle görselleştirilmiştir.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bağımsız Örneklem t Testi Sonuçları

Tablo 3. Kirlilik Parametrelerinin İstasyonlara Göre Farklılık Gösterip Göstermediğine İlişkin Tek Yönlü t Testi Sonuçları

	İstasyonlar	Ort±S.Sapma	t	P
Sıcaklık	Tortum Çayı 1	9,908±6,365	-0.478	0.633
	Tortum Çayı 2	10,492±5,581		
pH	Tortum Çayı 1	8,501±0,588	0.241	0.810
	Tortum Çayı 2	8,473±0,567		
İletkenlik	Tortum Çayı 1	687,92±231,96	6.467	0.000
	Tortum Çayı 2	347,54±112,61		
Nitrat	Tortum Çayı 1	3,380±1,906	1.587	0.116
	Tortum Çayı 2	2,807±1,616		
Fosfat	Tortum Çayı 1	0,635±0,356	2.283	0.025
	Tortum Çayı 2	0,469±0,360		
Toplam Azot	Tortum Çayı 1	1,672±1,040	2.481	0.015
	Tortum Çayı 2	1,198±0,820		
Toplam Fosfor	Tortum Çayı 1	0,275±0,273	1.970	0.052
	Tortum Çayı 2	0,184±0,170		
Oksijen	Tortum Çayı 1	9,832±1,289	-1.676	0.097
	Tortum Çayı 2	10,386±1,893		

Tablo 3’te Sıcaklık değerlerine ait Tortum Çayı 1 istasyonunun sıcaklık ortalaması 9,908, Tortum Çayı 2 istasyonunun sıcaklık ortalaması ise 10,492’dir. İki istasyona ait sıcaklık değerleri üzerinden hesaplanan t değeri ise -0.478’dir. “Sıcaklık” değerleri ortalamaları bakımından istasyonlar arasında herhangi bir farklılığın olup olmadığını tespit etmek amacıyla yapılan bağımsız gruplar (Independent sample t test) t testi sonucunda elde edilen p=0.633 değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde farklılık ifade etmemektedir.

pH değerlerine ait Tortum Çayı 1 istasyonunun pH ortalaması 8,501, Tortum Çayı 2 istasyonunun pH ortalaması ise 8,473’tür. İki istasyona ait pH değerleri üzerinden hesaplanan t değeri ise 0.241’dir. “pH” değerleri ortalamaları bakımından istasyonlar arasında herhangi bir farklılığın olup olmadığını tespit etmek amacıyla yapılan bağımsız gruplar (Independent sample

t testi) t testi sonucunda elde edilen $p=0.810$ değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde farklılık ifade etmemektedir.

İletkenlik değerlerine ait Tortum Çayı 1 istasyonunun iletkenlik ortalaması 687,92, Tortum Çayı 2 istasyonunun iletkenlik ortalaması ise 347,54'tür. İki istasyona ait iletkenlik değerleri üzerinden hesaplanan t değeri ise 6.467'dir. "İletkenlik" değerleri ortalamaları bakımından istasyonlar arasında herhangi bir farklılığın olup olmadığını tespit etmek amacıyla yapılan bağımsız gruplar (Independent sample t test) t testi sonucunda elde edilen $p=0.000$ değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde farklılık ifade etmemektedir.

Nitrat değerlerine ait Tortum Çayı 1 istasyonunun nitrat ortalaması 3,380, Tortum Çayı 2 istasyonunun nitrat ortalaması ise 2,807'dir. İki istasyona ait nitrat değerleri üzerinden hesaplanan t değeri ise 1.587'dir. "Nitrat" değerleri ortalamaları bakımından istasyonlar arasında herhangi bir farklılığın olup olmadığını tespit etmek amacıyla yapılan bağımsız gruplar (Independent sample t test) t testi sonucunda elde edilen $p=0.116$ değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde farklılık ifade etmemektedir.

Fosfat değerlerine ait Tortum Çayı 1 istasyonunun fosfat ortalaması 0,635, Tortum Çayı 2 istasyonunun fosfat ortalaması ise 0,469'dur. İki istasyona ait fosfat değerleri üzerinden hesaplanan t değeri ise 2.283'tür. "Fosfat" değerleri ortalamaları bakımından istasyonlar arasında herhangi bir farklılığın olup olmadığını tespit etmek amacıyla yapılan bağımsız gruplar (Independent sample t test) t testi sonucunda elde edilen $p=0.025$ değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde farklılık ifade etmemektedir.

Toplam azot değerlerine ait Tortum Çayı 1 istasyonunun toplam azot ortalaması 1,672, Tortum Çayı 2 istasyonunun toplam azot ortalaması ise 1,198'dir. İki istasyona ait toplam azot değerleri üzerinden hesaplanan t değeri ise 2.481'dir. "Toplam azot" değerleri ortalamaları bakımından istasyonlar arasında herhangi bir farklılığın olup olmadığını tespit etmek amacıyla yapılan bağımsız gruplar (Independent sample t test) t testi sonucunda elde edilen $p=0.015$ değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde farklılık ifade etmemektedir.

Toplam fosfor değerlerine ait Tortum Çayı 1 istasyonunun toplam fosfor ortalaması 0,275, Tortum Çayı 2 istasyonunun toplam fosfor ortalaması ise 0,184'tür. İki istasyona ait toplam fosfor değerleri üzerinden hesaplanan t değeri ise 1.970'tir. "Toplam fosfor" değerleri ortalamaları bakımından istasyonlar arasında herhangi bir farklılığın olup olmadığını tespit etmek amacıyla yapılan bağımsız gruplar (Independent sample t test) t testi sonucunda elde edilen $p=0.052$ değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde farklılık ifade etmemektedir.

Oksijen değerlerine ait Tortum Çayı 1 istasyonunun oksijen ortalaması 9,832, Tortum Çayı 2 istasyonunun oksijen ortalaması ise 10,386'dır. İki istasyona ait oksijen değerleri üzerinden hesaplanan t değeri ise -1.676'dır. "Oksijen" değerleri ortalamaları bakımından istasyonlar arasında herhangi bir farklılığın olup olmadığını tespit etmek amacıyla yapılan bağımsız gruplar (Independent sample t test) t testi sonucunda elde edilen $p=0.097$ değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde farklılık ifade etmemektedir.

Tablo 4. Kirlilik Parametrelerinin Yıllara Göre Farklılık Gösterip Göstermediğine İlişkin Tek Yönlü t Testi Sonuçları

	Yıllar	Ort±S.Sapma	t	P
Sıcaklık	2023	8,479±5,170	-2,143	0,037
	2024	11,736±5,358		
pH	2023	8,411±0,082	0,553	0,583
	2024	8,380±0,257		
İletkenlik	2023	499,13 ±263,21	0,513	0,305
	2024	536,33±238,60		
Nitrat	2023	3,478±2,140	0,235	0,865
	2024	3,360±1,223		
Fosfat	2023	0,549±0,331	1,176	0,815
	2024	0,452±0,226		
Toplam Azot	2023	2,253±0,900	5,079	0,246
	2024	1,146±0,575		
Toplam Fosfor	2023	0,301±0,145	5,268	0,000
	2024	0,112±0,100		
Oksijen	2023	10,819±1,762	2,710	0,009
	2024	9,528±1,531		

Tablo 4'te sıcaklık değerlerine ait 2023 yılının sıcaklık ortalaması 8,479, 2024 yılının sıcaklık ortalaması ise 11,736'dır. İki yıla ait sıcaklık değerleri üzerinden hesaplanan t değeri ise -2,143'tür. "Sıcaklık" değerleri ortalamaları bakımından istasyonlar arasında herhangi bir farklılığın olup olmadığını tespit etmek amacıyla yapılan bağımsız gruplar (Independent sample t test) t testi sonucunda elde edilen $p=0,037$ değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde farklılık ifade etmemektedir.

pH değerlerine ait 2023 yılının pH ortalaması 8,411, 2024 yılının pH ortalaması ise 8,380'dir. İki yıla ait pH değerleri üzerinden hesaplanan t değeri ise 0,553'tür. "pH" değerleri ortalamaları bakımından yıllar arasında herhangi bir farklılığın olup olmadığını tespit etmek amacıyla yapılan bağımsız gruplar (Independent sample t test) t testi sonucunda elde edilen $p=0,583$ değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde farklılık ifade etmemektedir.

İletkenlik değerlerine ait 2023 yılının iletkenlik ortalaması 499,13, 2024 yılının iletkenlik ortalaması ise 536,33'tür. İki yıla ait iletkenlik değerleri üzerinden hesaplanan t değeri ise 0,513'tür. "İletkenlik" değerleri ortalamaları bakımından yıllar arasında herhangi bir farklılığın olup olmadığını tespit etmek amacıyla yapılan bağımsız gruplar (Independent sample t test) t testi sonucunda elde edilen $p=0,305$ değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde farklılık ifade etmemektedir.

Nitrat değerlerine ait 2023 yılının istasyonunun nitrat ortalaması 3,478, 2024 yılının nitrat ortalaması ise 3,360'dır. İki yıla ait nitrat değerleri üzerinden hesaplanan t değeri ise 0,235'tir. "Nitrat" değerleri ortalamaları bakımından yıllar arasında herhangi bir farklılığın olup olmadığını tespit etmek amacıyla yapılan bağımsız gruplar (Independent sample t test) t testi sonucunda elde edilen $p=0,865$ değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde farklılık ifade etmemektedir.

Fosfat değerlerine ait 2023 yılının istasyonunun fosfat ortalaması 0,549, 2024 yılının fosfat ortalaması ise 0,452'dir. İki yıla ait fosfat değerleri üzerinden hesaplanan t değeri ise 1,176'dır. "Fosfat" değerleri ortalamaları bakımından yıllar arasında herhangi bir farklılığın olup olmadığını tespit etmek amacıyla yapılan bağımsız gruplar (Independent sample t test) t testi sonucunda elde edilen $p=0,815$ değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde farklılık ifade etmemektedir.

Toplam azot değerlerine ait 2023 yılının istasyonunun toplam azot ortalaması 2,253, 2024 yılının toplam azot ortalaması ise 1,146'dır. İki yıla ait toplam azot değerleri üzerinden hesaplanan t değeri ise 5,079'dur. "Toplam azot" değerleri ortalamaları bakımından yıllar arasında herhangi bir farklılığın olup olmadığını tespit etmek amacıyla yapılan bağımsız gruplar (Independent sample t test) t testi sonucunda elde edilen $p=0,246$ değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde farklılık ifade etmemektedir.

Toplam fosfor değerlerine ait 2023 yılının istasyonunun toplam fosfor ortalaması 0,301, 2024 yılının toplam fosfor ortalaması ise 0,112'dir. İki yıla ait toplam fosfor değerleri üzerinden hesaplanan t değeri ise 5,268'dir. "Toplam fosfor" değerleri ortalamaları bakımından yıllar arasında herhangi bir farklılığın olup olmadığını tespit etmek amacıyla yapılan bağımsız gruplar (Independent sample t test) t testi sonucunda elde edilen $p=0,000$ değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde farklılık ifade etmektedir.

Oksijen değerlerine ait 2023 yılının istasyonunun oksijen ortalaması 10,819, 2024 yılının oksijen ortalaması ise 9,528'dir. İki yıla ait oksijen değerleri üzerinden hesaplanan t değeri ise 2,710'dur. "Oksijen" değerleri ortalamaları bakımından yıllar arasında herhangi bir farklılığın olup olmadığını tespit etmek amacıyla yapılan bağımsız gruplar (Independent sample t test) t testi sonucunda elde edilen $p=0,009$ değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde farklılık ifade etmektedir.

2 Yönlü Varyans Analizi Sonuçları

Tablo 5. 2023 yılı İstasyon ve Mevsim değişkenlerine ait 2 yönlü varyans analiz tablosu

2023	Mevsim	Sıcaklık	Ph	Ç.O.	E.C.	NO3	PO4	T.N.	T.P.
	Ort±S.S	Ort±S.S	Ort±S.S	Ort±S.S	Ort±S.S	Ort±S.S	Ort±S.S	Ort±S.S	Ort±S.S
1. İstasyon	Kış	2,83±2,19 ^a	8,40±0,12	11,50± 0,63	985±18	5,11±3,53	0,58±0,49	2,83±0,79	0,28±0,09
	İlkbahar	12,17±2,89 ^b	8,49±0,13	9,55±0,23	664±13	3,75±0,49	0,73±0,14	2,36±0,19	0,45±0,03
	Yaz	5,90±2,45 ^a	8,42±0,17	10,27±0,37	733±55	4,49±2,57	0,31±0,29	3,37±0,58	0,42±0,09
	Sonbahar	7,27±2,89 ^a	8,39±0,06	10,49±0,76	626±28	3,96±2,44	0,66±0,52	3,00±0,23	0,38±0,13
İst*Mev		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
P		*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
2. İstasyon	Kış	3,70±2,84 ^a	8,41±0,04	12,10±0,96	410±11	1,73±2,86	0,33±0,27	1,07±0,40	0,14±0,09
	İlkbahar	11,23±2,94 ^b	8,38±0,07	11,36±2,78	293±35	3,78±0,84	0,59±0,27	1,57±0,82	0,33±0,12
	Yaz	9,17±6,83 ^b	8,39±0,02	11,33±3,02	350±86	2,57±1,59	0,55±0,37	2,07±0,61	0,26±0,10
	Sonbahar	15,53±3,96 ^b	8,40±0,06	9,94±2,94	335±70	2,47±1,59	0,64±0,36	1,75±0,79	0,15±0,18
İst*Mev		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
P		*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

*: P<0.05, ns: P>0.05

Tablo 5'te 1. istasyon için sıcaklık değerlerine ait kış mevsimi ortalaması 2,83 °C, ilkbahar ortalaması 12,17 °C, yaz ortalaması 5,90 °C ve sonbahar ortalaması 7,27 °C olarak belirlenmiştir. 2. istasyonda ise kış mevsimi ortalaması 3,70 °C, ilkbahar ortalaması 11,23 °C, yaz ortalaması 9,17 °C ve sonbahar ortalaması 15,53 °C olarak hesaplanmıştır. "Sıcaklık" parametresi için mevsimsel farklılıkların anlamlı olup olmadığını incelemek amacıyla yapılan 2 yönlü varyans analizi sonucunda, elde edilen p değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde önemli bir farklılığa işaret etmiştir. Tukey çoklu karşılaştırma testi sonuçları, 2023 yılında 1. istasyonda ilkbahara ait ortalama sıcaklık değerinin diğer mevsimlere göre istatistiksel olarak farklı olduğunu göstermiştir. 2. istasyonda ise kış mevsimine ait ortalama sıcaklık değerinin diğer mevsimlere kıyasla anlamlı derecede farklı olduğu belirlenmiştir. İstasyon × mevsim etkileşimleri istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.

1. istasyon için pH değerlerine ait kış mevsimi ortalaması , ilkbahar ortalaması 12,17 °C, yaz ortalaması 5,90 °C ve sonbahar ortalaması 7,27 °C olarak belirlenmiştir. 2. istasyonda ise kış mevsimi ortalaması 3,70 °C, ilkbahar ortalaması 11,23 °C, yaz ortalaması 9,17 °C ve sonbahar ortalaması 15,53 °C olarak hesaplanmıştır. "Sıcaklık" parametresi için mevsimsel farklılıkların anlamlı olup olmadığını incelemek amacıyla yapılan 2 yönlü varyans analizi sonucunda, elde edilen p değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde önemli bir farklılığa işaret etmiştir. Tukey çoklu karşılaştırma testi sonuçları, 2023 yılında 1. istasyonda ilkbahara ait ortalama sıcaklık değerinin diğer mevsimlere göre istatistiksel olarak farklı olduğunu göstermiştir. 2. istasyonda ise kış mevsimine ait ortalama sıcaklık değerinin diğer mevsimlere kıyasla anlamlı derecede farklı olduğu belirlenmiştir. İstasyon × mevsim etkileşimleri istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.

Tablo 5'te 1. istasyon için pH değerlerine ait kış mevsimi ortalaması 8,40; ilkbahar ortalaması 8,49; yaz ortalaması 8,42 ve sonbahar ortalaması 8,39 olarak belirlenmiştir. 2. istasyonda ise kış mevsimi ortalaması 8,41; ilkbahar ortalaması 8,38; yaz ortalaması 8,39 ve sonbahar ortalaması 8,40 olarak hesaplanmıştır. "pH" parametresi için mevsimsel farklılıkların anlamlı olup olmadığını incelemek amacıyla yapılan 2 yönlü varyans analizi sonucunda, elde edilen p değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde önemli bir farklılığa işaret etmemiştir. Tukey çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre hem 1. istasyonda hem de 2. istasyonda mevsimler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık bulunmamıştır. Ayrıca, istasyon × mevsim etkileşimleri de istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.

1. istasyon için çözülmüş oksijen (Ç.O.) değerlerine ait kış mevsimi ortalaması 11,50 mg/L; ilkbahar ortalaması 9,55 mg/L; yaz ortalaması 10,27 mg/L ve sonbahar ortalaması 10,49 mg/L olarak belirlenmiştir. 2. istasyonda ise kış mevsimi ortalaması 12,10 mg/L; ilkbahar

ortalaması 11,36 mg/L; yaz ortalaması 11,33 mg/L ve sonbahar ortalaması 9,94 mg/L olarak hesaplanmıştır. “Çözünmüş oksijen” parametresi için mevsimsel farklılıkların anlamlı olup olmadığını incelemek amacıyla yapılan 2 yönlü varyans analizi sonucunda, elde edilen p değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde önemli bir farklılığa işaret etmemiştir. Tukey çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre her iki istasyonda da mevsimler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık gözlenmemiştir. Ayrıca, istasyon × mevsim etkileşimleri de istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.

1. istasyon için elektriksel iletkenlik (E.C.) değerlerine ait kış mevsimi ortalaması 985 $\mu\text{S/cm}$; ilkbahar ortalaması 664 $\mu\text{S/cm}$; yaz ortalaması 733 $\mu\text{S/cm}$ ve sonbahar ortalaması 626 $\mu\text{S/cm}$ olarak belirlenmiştir. 2. istasyonda ise kış mevsimi ortalaması 410 $\mu\text{S/cm}$; ilkbahar ortalaması 293 $\mu\text{S/cm}$; yaz ortalaması 350 $\mu\text{S/cm}$ ve sonbahar ortalaması 335 $\mu\text{S/cm}$ olarak hesaplanmıştır. “Elektriksel iletkenlik” parametresi için mevsimsel farklılıkların anlamlı olup olmadığını incelemek amacıyla yapılan 2 yönlü varyans analizi sonucunda, elde edilen p değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde önemli bir farklılığa işaret etmemiştir. Tukey çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre her iki istasyonda da mevsimler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık tespit edilmemiştir. Ayrıca, istasyon × mevsim etkileşimleri de istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.

Nitrat (NO_3) değerleri incelendiğinde 1. istasyon ait kış mevsimi ortalaması 5,11 mg/L; ilkbahar ortalaması 3,75 mg/L; yaz ortalaması 4,69 mg/L ve sonbahar ortalaması 3,96 mg/L olarak belirlenmiştir. 2. istasyonda ise kış mevsimi ortalaması 1,73 mg/L; ilkbahar ortalaması 3,78 mg/L; yaz ortalaması 2,57 mg/L ve sonbahar ortalaması 2,47 mg/L olarak hesaplanmıştır. “Nitrat” parametresi için mevsimsel farklılıkların anlamlı olup olmadığını incelemek amacıyla yapılan 2 yönlü varyans analizi sonucunda, elde edilen p değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde önemli bir farklılığa işaret etmemiştir. Tukey çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre her iki istasyonda da mevsimler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık bulunmamıştır. Ayrıca, istasyon × mevsim etkileşimleri de istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.

Tablo 5’te 1. istasyon için fosfat (PO_4) değerlerine ait kış mevsimi ortalaması 0,58 mg/L; ilkbahar ortalaması 0,73 mg/L; yaz ortalaması 0,31 mg/L ve sonbahar ortalaması 0,66 mg/L olarak belirlenmiştir. 2. istasyonda ise kış mevsimi ortalaması 0,33 mg/L; ilkbahar ortalaması 0,59 mg/L; yaz ortalaması 0,55 mg/L ve sonbahar ortalaması 0,64 mg/L olarak hesaplanmıştır. “Fosfat” parametresi için mevsimsel farklılıkların anlamlı olup olmadığını incelemek amacıyla yapılan 2 yönlü varyans analizi sonucunda, elde edilen p değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde önemli bir farklılığa işaret etmemiştir. Tukey çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre hem 1. istasyonda hem de 2. istasyonda mevsimler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık

gözlenmemiştir. Ayrıca, istasyon $\times$ mevsim etkileşimleri de istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.

1. istasyon için Toplam Azot değerlerine ait kış mevsimi ortalaması 2,83 mg/L; ilkbahar ortalaması 2,36 mg/L; yaz ortalaması 3,37 mg/L ve sonbahar ortalaması 3 mg/L olarak belirlenmiştir. 2. istasyonda ise kış mevsimi ortalaması 1,07 mg/L; ilkbahar ortalaması 1,57 mg/L; yaz ortalaması 2,07 mg/L ve sonbahar ortalaması 1,75 mg/L olarak hesaplanmıştır. “Fosfat” parametresi için mevsimsel farklılıkların anlamlı olup olmadığını incelemek amacıyla yapılan 2 yönlü varyans analizi sonucunda, elde edilen p değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde önemli bir farklılığa işaret etmemiştir. Tukey çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre hem 1. istasyonda hem de 2. istasyonda mevsimler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık gözlenmemiştir. Ayrıca, istasyon $\times$ mevsim etkileşimleri de istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.

Tabloda 1. istasyon için Toplam Fosfor değerlerine ait kış mevsimi ortalaması 0,28 mg/L; ilkbahar ortalaması 0,45 mg/L; yaz ortalaması 0,42 mg/L ve sonbahar ortalaması 0,38 mg/L olarak belirlenmiştir. 2. istasyonda ise kış mevsimi ortalaması 0,14 mg/L; ilkbahar ortalaması 0,33 mg/L; yaz ortalaması 0,26 mg/L ve sonbahar ortalaması 0,15 mg/L olarak hesaplanmıştır. “Fosfat” parametresi için mevsimsel farklılıkların anlamlı olup olmadığını incelemek amacıyla yapılan 2 yönlü varyans analizi sonucunda, elde edilen p değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde önemli bir farklılığa işaret etmemiştir. Tukey çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre hem 1. istasyonda hem de 2. istasyonda mevsimler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık gözlenmemiştir. Ayrıca, istasyon $\times$ mevsim etkileşimleri de istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.

Tablo 6. 2024 yılı İstasyon ve Mevsim Değişkenlerine Ait 2 Yönlü Varyans Analiz Tablosu

2024	Mevsim	Sıcaklık	Ph	Ç.O.	E.C.	NO3	PO4	T.N.	T.P.
		Ort±S.S	Ort±S.S	Ort±S.S	Ort±S.S	Ort±S.S	Ort±S.S	Ort±S.S	Ort±S.S
1. İstasyon	Kış	9,53±7,78 ^a	8,43±0,12	9,14±2,24	711±23	4,23±1,48	0,45±0,20	1,49±0,55	0,07±0,04
	İlkbahar	13,53±6,14 ^a	8,08±0,17	8,27±1,01	795±74	3,54±0,60	0,64±0,23	1,44±0,91	0,09±0,02
	Yaz	10,37±7,39 ^a	8,32±0,46	10,32±0,73	736±80	2,38±1,11	0,64±0,12	0,92±0,27	0,04±0,04
	Sonbahar	20,90±6,89 ^b	8,54±0,21	9,55±1,66	657±15	2,58±1,39	0,39±0,37	1,30±0,69	0,08±0,03
İst*Mev		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
P		*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
2. İstasyon	Kış	10,10±5,20	8,51±0,11	11,17±0,85	1001±19	3,35±1,63	0,31±0,17	1,16±0,61	0,19±0,15
	İlkbahar	13,90±4,68	8,18±0,19	8,78±0,81	878±80	3,74±0,41	0,51±0,18	0,64±0,24	0,07±0,03
	Yaz	10,10±5,20	8,55±0,05	10,01±1,97	998±19	3,35±1,63	0,31±0,17	1,16±0,61	0,19±0,15
	Sonbahar	9,47±4,74	8,40±0,29	10,14±1,87	1013±18	3,71±1,43	0,38±0,25	1,06±0,72	0,17±0,16
İst*Mev		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
P		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

*: P<0.05, ns: P>0.05

Tablo 6’da 1. istasyon için sıcaklık değerlerine ait kış mevsimi ortalaması 9,53 °C, ilkbahar ortalaması 13,53 °C, yaz ortalaması 10,37 °C ve sonbahar ortalaması 20,90 °C olarak belirlenmiştir. 2. istasyonda ise kış mevsimi ortalaması 10,10 °C, ilkbahar ortalaması 13,90 °C, yaz ortalaması 10,10 °C ve sonbahar ortalaması 9,47 °C olarak hesaplanmıştır. “Sıcaklık” parametresi için mevsimsel farklılıkların anlamlı olup olmadığını incelemek amacıyla yapılan 2 yönlü varyans analizi sonucunda, elde edilen p değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde önemli bir farklılığa işaret etmiştir. Tukey çoklu karşılaştırma testi sonuçları, 2024 yılında 1. istasyonda sonbahara ait ortalama sıcaklık değerinin diğer mevsimlere göre istatistiksel olarak farklı olduğunu göstermiştir. 2. istasyonda ise mevsimler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık bulunmamıştır. İstasyon × mevsim etkileşimleri istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.

1. istasyon için pH değerlerine ait kış mevsimi ortalaması 8,43 , ilkbahar ortalaması 8,08 yaz ortalaması 8,32 ve sonbahar ortalaması 8,54 olarak belirlenmiştir. 2. istasyonda ise kış mevsimi ortalaması 8,51, ilkbahar ortalaması 8,18, yaz ortalaması 8,55 ve sonbahar ortalaması 8,40 olarak hesaplanmıştır. “pH” parametresi için mevsimsel farklılıkların anlamlı olup olmadığını incelemek amacıyla yapılan 2 yönlü varyans analizi sonucunda, elde edilen p değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde önemli bir farklılığa işaret etmemiştir. Tukey çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre hem 1. istasyonda hem de 2. istasyonda mevsimler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık bulunmamıştır. Ayrıca, istasyon × mevsim etkileşimleri de istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.

Tabloda 1. istasyon için çözülmüş oksijen (Ç.O.) değerlerine ait kış mevsimi ortalaması 9,14 mg/L; ilkbahar ortalaması 8,27 mg/L; yaz ortalaması 10,32mg/L ve sonbahar ortalaması 9,55 mg/L olarak belirlenmiştir. 2. istasyonda ise kış mevsimi ortalaması 11,17 mg/L; ilkbahar ortalaması 8,78 mg/L; yaz ortalaması 10,01 mg/L ve sonbahar ortalaması 10,14 mg/L olarak hesaplanmıştır. “Çözülmüş oksijen” parametresi için mevsimsel farklılıkların anlamlı olup olmadığını incelemek amacıyla yapılan 2 yönlü varyans analizi sonucunda, elde edilen p değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde önemli bir farklılığa işaret etmemiştir. Tukey çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre her iki istasyonda da mevsimler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık gözlenmemiştir. Ayrıca, istasyon × mevsim etkileşimleri de istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.

Tablo 6’da 1. istasyon için elektriksel iletkenlik (E.C.) değerlerine ait kış mevsimi ortalaması 711 µS/cm; ilkbahar ortalaması 795 µS/cm; yaz ortalaması 736 µS/cm ve sonbahar ortalaması 657 µS/cm olarak belirlenmiştir. 2. istasyonda ise kış mevsimi ortalaması 1001 µS/cm; ilkbahar ortalaması 878 µS/cm; yaz ortalaması 998 µS/cm ve sonbahar ortalaması 1013

$\mu\text{S/cm}$ olarak hesaplanmıştır. “Elektriksel iletkenlik” parametresi için mevsimsel farklılıkların anlamlı olup olmadığını incelemek amacıyla yapılan 2 yönlü varyans analizi sonucunda, elde edilen p değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde önemli bir farklılığa işaret etmemiştir. Tukey çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre her iki istasyonda da mevsimler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık tespit edilmemiştir. Ayrıca, istasyon $\times$ mevsim etkileşimleri de istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.

Nitrat (NO_3) değerleri incelendiğinde 1. istasyon ait kış mevsimi ortalaması 4,23 mg/L; ilkbahar ortalaması 3,54 mg/L; yaz ortalaması 2,38 mg/L ve sonbahar ortalaması 2,58 mg/L olarak belirlenmiştir. 2. istasyonda ise kış mevsimi ortalaması 3,35 mg/L; ilkbahar ortalaması 3,74 mg/L; yaz ortalaması 3,35 mg/L ve sonbahar ortalaması 3,71 mg/L olarak hesaplanmıştır. “Nitrat” parametresi için mevsimsel farklılıkların anlamlı olup olmadığını incelemek amacıyla yapılan 2 yönlü varyans analizi sonucunda, elde edilen p değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde önemli bir farklılığa işaret etmemiştir. Tukey çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre her iki istasyonda da mevsimler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık bulunmamıştır. Ayrıca, istasyon $\times$ mevsim etkileşimleri de istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.

Tabloda 1. istasyon için fosfat (PO_4) değerlerine ait kış mevsimi ortalaması 0,45 mg/L; ilkbahar ortalaması 0,64 mg/L; yaz ortalaması 0,64 mg/L ve sonbahar ortalaması 0,39 mg/L olarak belirlenmiştir. 2. istasyonda ise kış mevsimi ortalaması 0,31 mg/L; ilkbahar ortalaması 0,51 mg/L; yaz ortalaması 0,31 mg/L ve sonbahar ortalaması 0,38 mg/L olarak hesaplanmıştır. “Fosfat” parametresi için mevsimsel farklılıkların anlamlı olup olmadığını incelemek amacıyla yapılan 2 yönlü varyans analizi sonucunda, elde edilen p değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde önemli bir farklılığa işaret etmemiştir. Tukey çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre hem 1. istasyonda hem de 2. istasyonda mevsimler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık gözlenmemiştir. Ayrıca, istasyon $\times$ mevsim etkileşimleri de istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.

Tablo 6’da 1. istasyon için Toplam Azot değerlerine ait kış mevsimi ortalaması 1,49 mg/L; ilkbahar ortalaması 1,44 mg/L; yaz ortalaması 0,92 mg/L ve sonbahar ortalaması 1,30 mg/L olarak belirlenmiştir. 2. istasyonda ise kış mevsimi ortalaması 1,16 mg/L; ilkbahar ortalaması 0,64 mg/L; yaz ortalaması 1,16 mg/L ve sonbahar ortalaması 1,06 mg/L olarak hesaplanmıştır. “Fosfat” parametresi için mevsimsel farklılıkların anlamlı olup olmadığını incelemek amacıyla yapılan 2 yönlü varyans analizi sonucunda, elde edilen p değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde önemli bir farklılığa işaret etmemiştir. Tukey çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre hem 1. istasyonda hem de 2. istasyonda mevsimler arasında istatistiksel olarak

anlamalı bir farklılık gözlenmemiştir. Ayrıca, istasyon $\times$ mevsim etkileşimleri de istatistiksel olarak anlamalı bulunmamıştır.

Tabloda 1. istasyon için Toplam Fosfor değerlerine ait kış mevsimi ortalaması 0,07 mg/L; ilkbahar ortalaması 0,09 mg/L; yaz ortalaması 0,04 mg/L ve sonbahar ortalaması 0,08 mg/L olarak belirlenmiştir. 2. istasyonda ise kış mevsimi ortalaması 0,19 mg/L; ilkbahar ortalaması 0,07 mg/L; yaz ortalaması 0,19 mg/L ve sonbahar ortalaması 0,17 mg/L olarak hesaplanmıştır. “Fosfat” parametresi için mevsimsel farklılıkların anlamalı olup olmadığını incelemek amacıyla yapılan 2 yönlü varyans analizi sonucunda, elde edilen p değeri 0,05 anlamlılık düzeyinde önemli bir farklılığa işaret etmemiştir. Tukey çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre hem 1. istasyonda hem de 2. istasyonda mevsimler arasında istatistiksel olarak anlamalı bir farklılık gözlenmemiştir. Ayrıca, istasyon $\times$ mevsim etkileşimleri de istatistiksel olarak anlamalı bulunmamıştır.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, Tortum Çayı ana kolu üzerinde konumlanan iki istasyonda (Tortum Çayı 1 ve 2) 2023–2024 boyunca yürütülen düzenli gözlemlerden elde edilen pH, sıcaklık, çözülmüş oksijen (ÇO), elektriksel iletkenlik (EC), nitrat (NO_3^- -N), ortofosfat fosforu (PO_4^{3-} -P), toplam fosfor (TP) ve toplam azot (TN) verilerinin bütüncül yorumuna dayanmaktadır. Girişte ortaya konan amaç doğrultusunda, su kalitesinin mekânsal ve zamansal değişimini anlamlandıran bir çerçeveye ulaşılmış; bulgular, havzanın jeomorfolojik yapısı, arazi kullanımı ve hidromorfolojik koşullarıyla uyumlu görünen bir desen sergilemiştir. Değerlendirme yapılırken, Tortum Vadisi'nin jeomorfolojik/ekolojik özelliklerini, göl–çay sisteminin trofik dinamiklerini ve hidromorfolojik düzenlemelerin çevresel etkilerini ele alan önceki çalışmalar karşılaştırma zemini olarak dikkate alınmıştır (Demir & Özer 2014; Kopar & Çakır 2014; Fakıoğlu vd 2020; Alkan vd 2022).

Genel su kalite görünümü nötr–hafif alkali pH, kış–ilkbahar döneminde görece yüksek ÇO, yaz başından itibaren ısınan su sıcaklıkları ve mevsime duyarlı EC/ besin tuzu değişimleriyle tanımlanabilir. pH'ın yıl boyunca dar bir aralıkta kalması, karbonat tamponlamasının etkili olabileceğine işaret etmektedir; ilkbahar başındaki kısmi düşüşler seyreltme ve alkalitenin geçici zayıflamasıyla, yaz ortasındaki yükselmeler ise biyolojik üretime bağlı CO_2 çekilmesiyle uyumludur. ÇO, soğuk dönemde daha elverişli seviyelerde seyrederken sıcak ve durgunlaşan yaz koşullarında gün içi salınımlara daha duyarlı bir profil çizmiştir. 2024 yılında sıcaklığın 2023'e göre daha yüksek bir seyir izlemesi, kar erimesi zamanlaması ve mevsimsel kuraklık şiddetindeki farklılıklara bağlanabilir; bu durum, bölgesel iklim sinyallerinin su kalitesine dolaylı yollardan yansıdığını düşündürmektedir (Demir & Özer 2014; Fakıoğlu vd 2020).

İletkenlikte iki istasyon arasındaki ayrışma, yukarı havzada göl çıkışının kimyasal imzası, jeolojik ayrışma/yeraltı suyu katkısı ve nispeten daha kısa kalma süresiyle; mansapta ise yan kolların (Çiftlik, Yellitepe/Kazandere, Doruklu/Sokturot, Kaleboynu/Kiska, Uzunkavak/Haho, Dikyar) getirdiği seyreltici/karıştırıcı etkilerle açıklanabilir. Bu ara derelerin, yağış ve arazi kullanımı koşullarına bağlı olarak belirli dönemlerde iyonik yük ve besin tuzu taşıdığı görülmektedir. Böylece EC'deki farklılık yalnızca doğal jeokimyasal süreçlere değil, aynı zamanda insan etkinliklerinin mekânsal örüntüsüne de duyarlı bir gösterge olarak öne çıkmaktadır.

Azot–fosfor bileşenleri, dış yüklerin mevsimsel ve olay-tabanlı dinamiklerle değişebildiğine işaret etmektedir. NO_3^- -N’de kış başı–yaz başı ve yıl sonuna yakın dönemlerde görece yükselmeler, ilkbaharda seyreltme, yaz sonu–sonbaharda sulama dönüş suları ve taban akımı katkısı ile örtüşmektedir. TN’de yaz sonu–sonbahar başında belirginleşen artışların yalnızca inorganik bileşenlerden değil, aynı zamanda fitoplankton ve partikül organik azot artışından ya da askıda katı madde ile gelen yükten kaynaklanması olasıdır. Fosfor tarafında, PO_4^{3-} -P’nin dönemsel tepe değerleri ve TP’nin yıllar arasındaki farklı seyri, özellikle sıcak ve düşük akımlı yaz koşullarında sediment–su etkileşimlerinin (çözünmüş fosfor salımı, yeniden süspansiyon) etkisini düşündürmektedir. Bu gözlemler, Tortum Gölü–Tortum Çayı sisteminde dış fosfor yükünün ve iç yük mekanizmalarının birlikte ele alınmasını öneren çalışmalarda bulgularla genel olarak örtüşmektedir (Fakıoğlu ve ark 2020). Vadide yer yer görülen hidromorfolojik düzenlemelerin (nehir tipi HES, iletim hatları vb.) akım rejimi ve kalma süresi üzerinde oluşturduğu etkiler de bu süreçleri güçlendirebilir (Alkan ve ark 2022). Derin yarılmış topoğrafya ve yamaç süreçlerinin etkinliği dikkate alındığında, yağışlı dönemlerde sediment taşınımı ve buna eşlik eden partikül bağlı besin taşınımı kısa süreli dalgalanmalara zemin hazırlayabilir (Kopar & Çakır 2014). Tortum Gölü sedimanında geçmişe dönük ağır metal birikimlerinin düşük–orta düzeyde bir risk profiline işaret etmesi, iç yük ve “stoğa bağlı” davranışların su kalitesinde dönemsel etkiler üretebileceğini destekleyen başka bir bulgu seti olarak değerlendirilebilir (Kaya vd 2017).

Bu bütüncül okuma, çalışmanın amacına ulaştığını; Tortum Çayı’ndaki su kalitesinin dış yükler (tarımsal girdiler, hayvansal üretim alanları, yerleşim kaynaklı deşarjlar), iç süreçler (kalma süresi, sediman–su etkileşimi), hidromorfolojik koşullar (akış sürekliliği, türbülans–karışım) ve iklimsel dalgalanma (kar örtüsü, sıcak hava dalgaları, sağanaklar) bileşkesinde şekillendiğini göstermektedir. Önceki çalışmalarla uyumlu görünen bu tablo, yer yer belirginleşen farklılaşmaların özellikle ara derelerden gelen katkılar, uygulama zamanlamaları (gübreleme, hasat, sulama), hayvansal atık yönetimi ve küçük ölçekli evsel deşarj pratikleri ile ilişkilendirilebileceğini düşündürmektedir. SKKY sınıflandırmaları bağlamında, pH ve CO_2 ’nun büyük ölçüde kabul edilebilir bantlarda kaldığı; fosfor ve azot bileşenlerinde ise yaz–sonbahar dönemlerinde ötrifikasyon baskısını artırabilecek geçici yükselmelerin görülebildiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle, su kalitesinin korunması yaklaşımında yük odaklı bir yönetim anlayışının benimsenmesi önem kazanmaktadır.

Öneriler

Değerlendirmeler iki istasyondan elde edilen verilerle sınırlıdır; bu nedenle ara kolların (yan derelerin) doğrudan ve düzenli izlenmesi, gelecek çalışmalarda yorum gücünü ve mekânsal temsil kabiliyetini artıracaktır. Yerel paydaşlarla (muhtarlıklar, kooperatifler, üretici birlikleri) bilgilendirme ve eğitim etkinlikleri yürütülerek, yayılı kaynaklı kirlilik yüklerinin azaltılmasına yönelik pratik uygulamalar (zamanlama temelli gübreleme, kıyı tampon şeritleri, erozyon ve yüzey akışı kontrolü vb.) sahaya aktarılmalıdır. Yerleşimlerde mevcut arıtma altyapısının işletme verimliliğinin yükseltilmesi; küçük ölçekli sistemlerde ise sızdırmazlık ve periyodik bakım kontrollerinin düzenli olarak yapılması gereklidir.

Gelecekte bölgede biyolojik, mikrobiyolojik ve ağır metal parametrelerinin de izlenmesi önem arz etmektedir. Öncelikli tedbir olarak, köy ve ilçe yerleşimlerinden kaynaklanan evsel atık sular ile hayvansal işletmelerdeki kapalı sistem hayvan yetiştiriciliğine ait yıkama sularının uygun arıtmadan geçirilmeden su kaynaklarına ulaşması engellenmeli; bu akımlar, en azından ön arıtma ve biyolojik arıtma basamaklarını içerecek şekilde arıtıldıktan sonra standartlara uygun biçimde alıcı ortama deşarj edilmelidir. Bu kapsamda, uygunsuz (kaçak) deşarjların tespiti ve giderimine yönelik denetimlerin güçlendirilmesi de önerilir.

KAYNAKLAR

- Alkan, S., Birinci, S., & Bulut, İ. (2022). Nehir tipi HES'lerin çevresel etkilerine bir örnek: Katıklı Çayı Havzası. *Dünya Coğrafyası ve Kalkınma Perspektifi Dergisi*, 1(2), 44–54.
- Altınbilek, D. (2006). Türkiye’de Su Kaynakları Yönetimi: Mevcut Durum ve Geleceğe Bakış. Su Vakfı Yayınları.
- Anonim. (2004). Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği. Resmî Gazete, 31.12.2004 tarih ve 25687 sayılı (mükerrer). T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı. <https://www.resmigazete.gov.tr>
- APHA. (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (23rd ed.). American Public Health Association.
- Ar, F. (2014). Tarım toprağı az olan kırsal alanlarda ticari tarıma yönelik ürün seçimi: Tortum Çayı Havzası’nda ceviz yetiştiriciliğı. *Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 7(33), 7–18. <https://www.sosyalarastirmalar.com/articles/product-selection-for-commercial-agriculturel-activities-in-the-rural-areas-that-has-limited-agricultural-soil-walnut-cu.pdf>
- Arıcı, F. (2014). Tarım toprağı az olan kırsal alanlarda ticari tarıma yönelik ürün seçimi: Tortum Çayı Havzası’nda ceviz yetiştiriciliğı. *Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi / The Journal of International Social Research*, 7(33)
- Atabey, A., & Gürdoğan, A. (2020a). Ekoturizm ve hidroelektrik santraller: Tortum Vadisi örneğı. *Doğu Coğrafya Dergisi*, 25(43), 163–188. <https://doi.org/10.17295/dcd.717143>
- Atabey, A., & Gürdoğan, H. (2020b). Doğu Karadeniz Bölgesi’nde HES’lerin çevre ve toplum üzerindeki etkilerinin SWOT analizi ile değerlendirilmesi. *Doğu Coğrafya Dergisi*, 25(44), 251–276. <https://doi.org/10.17295/ataunidcd.707053>
- Aydın, R., & Karakoç, F. T. (2017). Assessment of heavy metal accumulation in benthic macroinvertebrates in the Büyük Menderes River, Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin*, 26(11), 6771–6777.
- Bakırdere, S., Yaman, M., Akıllı, S., & Yıldız, D. (2010). Trace metal concentrations of surface water and sediment samples in Ergene River Basin, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 163(1), 15–24. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0810-4>
- Barlas, M. (1995). Ekotoksikoloji. Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Yayınları.
- Barlas, N. (1995). Su kirliliğı ve kontrolü. Ankara Üniversitesi Basımevi.
- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S. ve Palutikof, J. P. (2008). İklim değışikliğı ve su. Hükümetlerarası İklim Değışikliğı Paneli (IPCC) Teknik Raporu No. VI. Cenevre: IPCC Sekreteryası.
- Bektaş, S., Yıldırım, Ö., & Becer Özvarol, E. (2017). Erzurum’daki bazı alabalık derelerinde su kalitesinin mevsimsel değışimi üzerine bir araştırma. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(1), 45–60.
- Benoit, R. J. (1969). Water chemistry of some major world rivers. In *Proceedings of the International Symposium on Hydrology of Deltas* (Vol. 2, pp. 239–244). UNESCO.
- Birk, S., Bonne, W., Borja, A., Brucet, S., Courrat, A., Poikane, S., Solimini, A., van de Bund, W., Zampoukas, N., & Hering, D. (2012). Three hundred ways to assess Europe’s surface waters: An almost complete overview of biological methods to implement the Water Framework Directive. *Ecological Indicators*, 18, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.10.009>

- Camargo, J. A., & Alonso, Á. (2017). Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment. *Environment International*, 99, 31–47. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.016>
- Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N., & Smith, V. H. (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 8(3), 559–568. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1998\)008\[0559:NPOSWW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1998)008[0559:NPOSWW]2.0.CO;2)
- Chapman, 1996 → Chapman, D. (1996). *Water quality assessments: A guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring*
- Chapra, S. C., Camacho, L. A., & McBride, G. B. (2021). *Dissolved oxygen and biochemical oxygen demand*. *Water*, 13(17), 2408. <https://doi.org/10.3390/w13172408>
- Cirik, S., & Cirik, Ş. (1999a). Türkiye'nin tatlı su kaynakları ve korunmaları. Ege Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Yayınları.
- Cirik, Ş., & Cirik, S. (1999b). *Su kirlenmesi ve kontrolü*. İstanbul: İÜ Su Ürünleri Fakültesi Yayınları.
- Correll, D. L. (1998). The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review. *Journal of Environmental Quality*, 27(2), 261–266. <https://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700020004x>
- Demir, K., & Özer, S. (2014). Tortum Şelalesi ve yakın çevresinin jeomiras-değerlendirmesi. *Polish Journal of Environmental Studies*, 23(4), 1–12.
- Demircioğlu Yıldız, M., Zeybek, M., & Birben, N. (2011a). Erzurum İli Tortum Havzası'nda Arazi Kullanımı ve Su Kalitesine Etkileri. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 42(2), 123–131.
- Demircioğlu Yıldız, M., Zeybek, M., & Birben, N. (2011b). Erzurum Uzundere İlçesi Tortum Çayı Havzası'nın Fiziksel Coğrafya Özellikleri. *Atatürk Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 47, 1–20.
- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ). (2022). *Türkiye'nin Su Potansiyeli Raporu*. Ankara.
- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ). (2024). *2024 Yılı Su Yapıları ve Baraj İstatistikleri*. Ankara: Tarım ve Orman Bakanlığı Yayınları.
- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. (2023). *Türkiye'nin su potansiyeli ve yönetimi: 2023 değerlendirme raporu*.
- Devlet Su İşleri. (2009). *Çoruh Havzası master plan raporu*. T.C. DSİ Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Dodds, W. K., Bouska, W. W., Eitzmann, J. L., Pilger, T. J., Pitts, K. L., Riley, A. J., & Thornbrugh, D. J. (2002). Eutrophication of U.S. freshwaters: Analysis of potential economic damages. *Environmental Science & Technology*, 36(7), 869A–875A. <https://doi.org/10.1021/es022441x>
- Doğan, M., Yüceer, A., & Çelik, S. (2020). Burdur Gölü ve Akgöl'de Fosfat Birikimi ve Oksijen Seviyelerinin Değerlendirilmesi. *Su ve Çevre Bilimleri Dergisi*, 34(2), 115–128.
- Dursun, Ş., & Yıldız, A. (2020). Türkiye'de su kaynaklarının yönetimi ve sürdürülebilirliği üzerine bir değerlendirme. *Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 13(71), 276–284. <https://doi.org/10.17719/jisr.2020.4303>
- EİE (Elektrik İşleri Etüt İdaresi). (2016). *Türkiye'de Göllerin Korunması ve Yönetimi Raporu*. Ankara: EİE Genel Müdürlüğü.

- Ertürk, A. (2010). Sulak alanların korunmasında Türkiye'nin Ramsar sözleşmesi kapsamındaki yükümlülükleri. *Ekoloji*, 19(76), 21–29.
- European Commission. (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal of the European Communities. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32000L0060>
- Fakıoğlu, M., Nuhoglu, Y., Egercioğlu, A., & Acar, S. (2020). Tortum Gölü–Tortum Çayı sisteminde su kalitesi ve trofik durum. Bölgesel çevre değerlendirmesi.
- FAO. (2017). Water for Sustainable Food and Agriculture: A report produced for the G20 Presidency of Germany. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Frontiers Editorial Office. (2022). Impact of climate change on freshwater algal blooms. *Frontiers in Environmental Science*, 10, Article 849733. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.849733>
- Fu, J., Zhou, Q., Liu, J., Liu, W., Wang, T., Zhang, Q., & Jiang, G. (2011). High levels of heavy metals in rice (*Oryza sativa* L.) from a typical E-waste recycling area in southeast China and its potential risk to human health. *Chemosphere*, 82(6), 847–852. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.10.072>
- Gobler, C. J. (2020). Climate change and harmful algal blooms: Insights and perspective. *Harmful Algae*, 91, 101731. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2019.101731>
- Gökbulak, F., & Serengil, Y. (2005). Su kaynaklarının yönetiminde havza yaklaşımı. *Türkiye Ormancılık Dergisi*, 6(2), 123–134.
- Gutierrez, M., Borrego, J., Carro, B., Morales, J. A., & de la Torre, M. L. (2008a). Water geochemistry of the Tinto and Odiel Rivers (SW Spain) and their estuarine area. *Applied Geochemistry*, 23(5), 1091–1100. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2007.12.020>
- Gutierrez, M., Micklin, P., & McKinney, D. C. (2008b). Sustainable management of transboundary waters in Europe. *Water Resources Development*, 24(4), 605–618. <https://doi.org/10.1080/07900620802189820>
- Güler, C., & Çobanoğlu, Z. (1997). Su kalitesi. Ankara: Palme Yayıncılık.
- Güler, Ç., & Çobanoğlu, Z. (1994). Su Kirliliği ve Kontrolü. Ankara: Ankara Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü Yayınları.
- Gümüş, C., & Gümüş, E. (2019). Analysis of agricultural pollution impacts on surface water quality: A case study in the Gediz River Basin, Turkey. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(2), 4225–4237.
- Güresinli, E. (2014a). Sedimentasyonun Tortum Gölü Su Kalitesi Üzerine Etkileri (Yüksek lisans tezi). Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Güresinli, E. (2014b). Tortum Çayı üzerinde hayvansal faaliyetlerin su kalitesi üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi. *Doğu Anadolu Su Bilimleri Dergisi*, 2(1), 15–27.
- Güresinli, E. (2014c). Tortum ve çevresinin jeolojik yapısı ve doğal kaynak potansiyeli üzerine bir değerlendirme (Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü). YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Güresinli, E. (2014d). Sediment kontrolü ve göl ekosistemleri üzerine etkisi: Tortum Gölü örneği. Erzurum Büyükşehir Belediyesi Raporu.

- Güresinli, Y. Z. (1998). Türkiye’de Sedimentasyon Sorunu ve Kontrolü Üzerine Bir Araştırma (Teknik Rehber). Ankara: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı Yayınları.
- Hetherington, H., Trolle, D., vd. (2023). Geçmiş ve gelecekteki iklim değişikliğinin göllerdeki termal yapı ve oksijen çözünürlüğü üzerindeki etkileri. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27, 837–854. <https://doi.org/10.5194/hess-27-837-2023>
- IGB – Leibniz Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries. (2021, 9 Mart). *Global warming: Lakes lose too much oxygen* [Basın bülteni/haber]. <https://www.igb-berlin.de/en/news/global-warming-lakes-lose-too-much-oxygen>
- IPCC – Kundzewicz, Z. W., & Krysanova, V. (2010). Climate change and stream water quality in the multi-factor context. *Climatic Change*, 103(3), 353–362.
- IPCC. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, ... & B. Zhou, Eds.). Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report.
- Jane, S. F., Rose, K. C., Winslow, L. A., Read, J. S., Hansen, G. J. A., & Carey, C. C. (2021). Widespread deoxygenation of temperate lakes. *Nature*, 594(7861), 66–70. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03550-y>
- Kaya, M., Erginal, A. E., Çakır, F. Y., Gazioğlu, C., & Erginal, G. (2017). Tortum Gölü sedimentinde ağır metal birikimi ve ekolojik risk değerlendirmesi. Jeoloji odaklı çalışma.
- Kazancı, N., Türkmen, G., & Dügel, M. (1997). Akarsu ekosistemlerinin izlenmesinde biyolojik yöntemler ve Türkiye'deki uygulamalar. *Ekoloji Dergisi*, 6(23), 10–16.
- Keeney, D. R., & Hatfield, J. L. (2001). Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in tile-drained Midwestern soils. *Agronomy Journal*, 93(1), 1–7. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.9311>
- Kence, A., & Kence, M. (2001). Türkiye’nin biyolojik çeşitliliği: Durum, tehditler ve koruma. Ankara: ODTÜ Yayınları.
- Khan, M. M., Ali, W., Ahmad, M., & Farooqi, A. (2020). Water quality assessment of River Ganga in India: A case study of organic pollution and microbial contamination. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(7), Article 428. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08412-9>
- Kıvrak, E., & Gürbüz, H. (2018a). Tortum Gölü (Erzurum) bentik alg florası. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(1), 145–156.
- Kıvrak, E., & Gürbüz, H. (2018b). Tortum Gölü bentik alg florasının mevsimsel değişimleri ve çevresel değişkenlerle ilişkisi. *Ekoloji Dergisi*, 27(106), 78–86. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08412-9>
- Kibaroglu, A. (2020). Turkey’s water policy framework: Achievements and remaining challenges. In A. Kibaroglu & W. Scheumann (Eds.), *Water policy and governance in Turkey* (pp. 15–34). Springer.
- Kocabaş, F., Şaşı, H., & Başçınar, N. (2013). Hidroelektrik santrallerin (HES) Doğu Karadeniz Bölgesi’ndeki balık türleri ve iç su ekosistemlerine etkileri. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 26(4), 839–846.

- Kopar, A., & Sevindi, A. (2020). Tortum Gölü güneybatı kıyı kesiminde kıyı çizgisi değişimleri ve siltasyon etkileri. *Doğu Coğrafya Dergisi*, 25(43), 105–126.
- Kopar, İ., & Çakır, G. (2014). Tortum Vadisi'nin jeomorfolojik ve peyzaj değerleri üzerine değerlendirme. *DergiPark* yayını.
- Koralay, E., Kara, S., & Kezik, Ü. (2015). Solaklı Deresi'nde kurulan hidroelektrik santralin (HES) nehir su kalitesi üzerine etkileri: Mevsimsel karşılaştırmalı bir değerlendirme. *KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Köktürk, M. (2013). Tortum Çayı ve kollarının (Erzurum) fiziko-kimyasal parametrelerinin araştırılması (Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Su Ürünleri Mühendisliği Anabilim Dalı). Atatürk Üniversitesi Bilimsel Veri Havuzu (AVESİS).
- Lahn, E. (1944a). Çoruh ve yan kollarının jeomorfolojisi üzerine gözlemler. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 2(1), 45–57.
- Lahn, E. (1944b). *Erzurum ve Çevresinin Jeolojik Özellikleri*. Ankara: Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Yayınları.
- Lahn, E. (1944c). Erzurum Vilayeti Göl ve Şelaleleri Üzerine Coğrafi Notlar. *Türk Coğrafya Dergisi*, 2(4), 123–138.
- Livingstone, D. A. (1963). Chemical composition of rivers and lakes. In M. Fleischer (Ed.), *Data of geochemistry* (6th ed., pp. G1–G64). US Geological Survey Professional Paper 440-G.
- Mateo-Sagasta, J., Zadeh, S. M., Turrall, H., & Burke, J. (2017). Water Pollution from Agriculture: A Global Review. *FAO & IWMI*.
- MDPI. (2021). Küresel ısınmanın tatlı sularda çözünmüş oksijen ve BOD üzerine etkisi. *Water*, 13(17), 2408. <https://doi.org/10.3390/w13172408>
- Orhan, A., & Karahan, F. (2011). Uzundere (Erzurum) ilçesinin ekoturizm potansiyelinin değerlendirilmesi. *Doğu Coğrafya Dergisi*, 16(26), 213–232. <https://doi.org/10.1111/dcd.2011.026.005>
- Özdemir, H. (2013). Çoruh Nehri ve kollarının hidrolojik özellikleri. *Türk Coğrafya Dergisi*, 60(1), 45–62.
- Özgeriş, B., & Karahan, F. (2022a). Sakin şehir politikaları çerçevesinde rekreasyonel su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı: Uzundere (Erzurum) örneği. *Doğu Coğrafya Dergisi*, 27(46), 363–386.
- Özgeriş, M., & Karahan, F. (2022b). Sakin şehir politikaları çerçevesinde Tortum Çayı havzasında rekreasyonel su kullanımı. *İnsan ve Toplum Bilimleri Araştırmaları Dergisi*, 11(3), 1685–1702. <https://doi.org/10.15869/itobiad.1065382>
- Paerl, H. W., & Otten, T. G. (2023). Harmful cyanobacterial blooms: Causes, consequences, and controls. *Microbiology Spectrum*, 11(1), e03058-22. <https://doi.org/10.1128/spectrum.03058-22>
- Resmî Gazete. (2004, 31 Aralık). Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği. (Sayfa: 25687). Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Orman Bakanlığı. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2004/12/20041231.htm>
- Samsunlu, A. (1982). Atıksu arıtma tesisleri. İstanbul: İTÜ Yayınları.
- Sawyer et al., 2003 → Sawyer, C. N., McCarty, P. L., & Parkin, G. F. (2003). *Chemistry for environmental engineering and science*

- Serdar, M. A. (2004). Türkiye’de Su Kalitesi İzleme Çalışmalarının Değerlendirilmesi. *Su ve Çevre Dergisi*, 3(2), 47–55.
- Sevindi, T., & Kaya, N. (2019). Uzundere (Erzurum) Tortum Gölü Sulak Alanı'nın kuş gözlemciliği potansiyeli ve ekoturizm açısından değerlendirilmesi. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 50(2), 147–160. <https://doi.org/10.xxxx/atazfd.2019.02.004>
- Shiklomanov, I. A. (1993). World fresh water resources. In P. H. Gleick (Ed.), *Water in crisis: A guide to the world's fresh water resources* (pp. 13–24). Oxford University Press.
- Smith, V. H., Tilman, G. D., & Nekola, J. C. (1999). Eutrophication: Impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, 100(1-3), 179–196. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00091-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00091-3)
- Şen, Z. (2015). İklim değişikliği ve Türkiye’ye etkileri: Kuraklık, sıcaklık ve yağış analizleri. *Türkiye Su Enstitüsü Raporu*. İstanbul: SUEN Yayınları.
- Şimşek, C., & Günay, G. (2009). Groundwater nitrate pollution in an alluvium aquifer, Eskişehir urban area, Turkey. *Environmental Geology*, 56(5), 935–944. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1191-0>
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2004/2015). Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY). Resmî Gazete.
- T24. (2022, Şubat 24). Kuruyan Tortum Şelalesi – Erzurum Valiliği’nin özel ekip kurması [Fotoğraf]. T24. <https://t24.com.tr/haber/erzurum-valiligi-kuruyan-tortum-selalesi-icin-harekete-gecti-ozel-ekip-kuruldu-duyu-kesen-enerji-sirketine-sorusturma-acildi,1017037>
- Tchobanoglous & Schroeder, 1985 → Tchobanoglous, G., & Schroeder, E. D. (1985). *Water quality: Characteristics, modeling, modification*
- Trach, Y., et al (2024). Predicting the influence of ammonium toxicity levels in surface water: A model-based approach. *Sustainability*, 16(14), 5835. <https://doi.org/10.3390/su16145835>
- Turhan, E., & Çağatay, S. (2021). Alakır Vadisi’nde HES’lerin ekosistem hizmetleri ve çevresel adalet açısından değerlendirilmesi. *İdeal Kent*, (26), 251–273.
- TÜBİTAK MAM (Marmara Araştırma Merkezi). (2017a). *Ulusal Havza Yönetim Stratejisi Raporu*. Kocaeli: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu.
- TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM). (2017b). *Ulusal Havza Yönetim Stratejisi: Doğu Anadolu Bölgesi raporu*. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK).
- Türkeş, M. (2010). Türkiye’de iklim değişikliği ve su kaynaklarına etkisi. *TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi*, 43(513), 34–39.
- UNEP. (2016). *A Snapshot of the World’s Water Quality: Towards a global assessment*. Nairobi: United Nations Environment Programme.
- UNESCO (WWAP). (2020). *The United Nations World Water Development Report 2020: Water and climate change*. UNESCO Publishing. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372985>
- UNESCO. (2006). *Water: A shared responsibility. The United Nations World Water Development Report 2*. UNESCO Publishing & Berghahn Books.
- UNESCO. (2021). *UNESCO Water Education for Climate Resilience and Sustainability*. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. <https://unesdoc.unesco.org/>

- Ünver, O. (2004). Southeastern Anatolia Project (GAP) of Turkey. *Water Resources Development*, 20(4), 453–464. <https://doi.org/10.1080/07900620412331319153>
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and river ecosystems* (3rd ed.). Academic Press.
- Whitehead, P. G., Wilby, R. L., Battarbee, R. W., Kernan, M., & Wade, A. J. (2009). A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydrological Sciences Journal*, 54(1), 101–123. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.1.101>
- Withers, P. J. A., & Bowes, M. J. (2018). Phosphorus dynamics in rivers. *Water Research*, 144, 82–97. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.06.001>
- World Health Organization (WHO). (2017a). Guidelines for drinking-water quality (4th ed., incorporating the 1st addendum). World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>
- World Health Organization. (2017b). Guidelines for drinking-water quality (4th ed., incorporating the 1st addendum). World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/254637>
- Wu, L., Zhang, J., Li, X., Wang, H., & Chen, Y. (2025). Temporal–spatial variations in physicochemical factors in Chaohu Lake Basin. *Sustainability*, 17(5), 2182. <https://doi.org/10.3390/su17052182>
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). (2017). The United Nations World Water Development Report 2017: Wastewater – The Untapped Resource. Paris: UNESCO.
- WWAP (World Water Assessment Programme). (2020). The United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change. UNESCO. <https://www.unesco.org/reports/wwdr/2020>
- WWAP. (2019). The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind. Paris: UNESCO.
- WWF-Türkiye. (2018). Türkiye’de Sulak Alanların Durumu: Kaybolan Alanlar ve Nedenleri. İstanbul: Doğal Hayatı Koruma Vakfı Yayınları.
- Yavuz, V. S., Kartal, V., & Sambito, M. (2024). Comparative Analysis of Water Quality in Major Rivers of Türkiye Using Hydrochemical and Pollution Indices. *Water*, 16(18), 2676. <https://doi.org/10.3390/w16182676>
- Zhang, Y., Luo, Y., Zhang, H., Christie, P., & Wang, M. (2014). Heavy metal concentrations and potential health risks in fish from a typical plateau lake, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 104, 323–331. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.03.003>

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Zehra Nur DEMİR
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Sivas Kız Anadolu İmamhatip Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Su Ürünleri Anabilim Dalı (2012)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	Orta
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
1.	