



T.C.
KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI



EVSEL ARITILMIŞ ATIK SULARININ ÇEVRESEL YENİDEN KULLANIMI

TAŞKIN KIRGEZEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KIRŞEHİR

2026



T.C.
KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI



EVSEL ARITILMIŞ ATIK SULARININ ÇEVRESEL YENİDEN KULLANIMI

TAŞKIN KIRGEZEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

Prof. Dr. Sultan KIYMAZ

KIRŞEHİR

2026

KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI
ETİK BEYANI

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesini okuduğumu ve anladığımı ve Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tez olarak sunduğum bu çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda bu konuda hakkımda yapılacak tüm yasal işlemleri ve aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

03/07/2026

Taşkın KIRGEZEN

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa No

İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	I
TEŞEKKÜR.....	III
ÖZET.....	IV
ABSTRACT	V
TABLolar DİZİNİ	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	IX
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
3. MATERYAL VE METOT	7
3.1. Materyal	7
3.1.1. Çalışma alanının tanımı ve konumu	7
3.1.2. Çalışma alanının iklim özellikleri ve tarımsal yapısı	8
3.2. Metot	11
3.2.1. Su örneklerinin alınması ve analiz yöntemleri	11
3.2.2. Toprak örneklerinin alınması ve analiz yöntemleri	14
3.2.3. İstatistiksel analiz.....	19
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	21
4.1. Karışık Model Yaklaşımında Sabit Etkiye İlişkin Analiz Bulguları.....	21
4.1.1. İstasyonlara ait su örneklerinin tanımlayıcı istatistikleri	21
4.1.2. Fizikokimyasal Parametrelerin Mevsimsel Değişimlerine İlişkin Doğrusal Karışık Model Analizi	29
4.1.3. Mikrobiyolojik parametrelerin mevsimsel değişimlerine ilişkin doğrusal karışık model analizi.....	33
4.1.4. Ağır metal parametrelerin mevsimsel değişimlerine ilişkin doğrusal karışık model analizi.....	34
4.2. Toprakların Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerine İlişkin Bulgular	38
4.2.1. Toprakların bünye özellikleri	38
4.2.2. Arıtılmış atıksu ile sulanan toprakların fiziksel ve kimyasal özellikleri	40
4.3. Toprakların Besin Elementi İçeriklerine İlişkin Bulgular.....	45
4.3.1. Arıtılmış atıksu ile sulanan toprakların yararılışlı besin elementi içerikleri ...	45
4.3.2. Kontrol grubu toprakların yararılışlı besin elementi içerikleri.....	49

4.4. Toprakların Ağır Metal İçeriklerine İlişkin Bulgular	52
4.4.1. Arıtılmış atıksu ile sulanan topraklarına ağır metal içerikleri	52
4.4.2. Kontrol grubu toprakların ağır metal içerikleri	55
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	61
KAYNAKLAR	65
EKLER.....	75
EK-1	75
EK-2	76
ÖZGEÇMİŞ.....	77

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisansa başlamamda ve yüksek lisans ders sürecinde kendisini tanıdığım günden bu yana gösterdiği sabır ve sabırlı hali ile her zaman bana örnek olmasının yanı sıra bir bilim insanının nasıl çalışması gerektiğini kendisinden öğrendiğim değerli danışmanım Prof. Dr. Sultan KIYMAZ'a büyük bir içtenlikle teşekkür ederim. Tezimin her aşamasında gerek sorularıyla gerekse altı ayda bir yapılan tez izleme komitesi sunumlarında tezin şekillenmesinde ve nihai hale gelmesinde katkıları olan değerli jüri üyelerim Prof. Dr. Ahmet ERTEK ve Prof. Dr. Sedat BOYACI'ya teşekkürlerimi içtenlikle sunarım. Kırşehir Doğa Koruma ve Milli Parklar Şube Müdürü Hasan Tezer'e, Atıksu Arıtma Tesisi ile ilgili teknik destek sağlayan Boztepe Belediye Başkanlığı ve çalışanlarına; su örneklerinin laboratuvar analizlerini yapan Kayseri DSİ 12. Bölge Müdürlüğü ve çalışanlarına ve toprak örneklerinin analizlerinin gerçekleştirilmesinde destek veren Atatürk Toprak Su ve Tarımsal Meteoroloji Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü ile Müdür Yardımcısı Dr. Mehmet Ali Gürbüz'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Ziraat Mühendisi Onur İNCE'ye, Dr. Öğr. Üyesi Alper GÜNGÖR'e, istatistiksel analizlerin yapılmasında katkı sağlayan Dr. Öğr. Üyesi ASLI AKILLI'ya, tez yazma sürecinde tecrübelerinden faydalandığım dostlarım Oğuz YUCEL ve Melih GÜNAY'a, son olarak her koşulda desteğini benden esirgemeyen aileme çok teşekkür ederim.

Temmuz, 2026

Taşkın KIRGEZEN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EVSEL ARITILMIŞ ATIK SULARININ ÇEVRESEL YENİDEN KULLANIMI

Taşkın KIRGEZEN

KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Prof. Dr. Sultan KIYMAZ
Yıl: 2026, Sayfa: 77

Jüri: Prof. Dr. Sultan KIYMAZ
Prof. Dr. Ahmet ERTEK
Prof. Dr. Sedat BOYACI

Arıtılmış evsel atıksular, uygun ileri arıtım süreçlerinin ardından tarımsal sulama ve çevresel amaçlarla kullanılabilen stratejik bir alternatif su kaynağıdır. Bu çalışma, Kırşehir-Boztepe Atıksu Arıtma Tesisi çıkış suyunun çevresel ve tarımsal yeniden kullanım olanaklarını araştırmak amacıyla yürütülmüştür. Araştırma kapsamında; tesisin giriş-çıkış üniteleri ile deşarjın yapıldığı Boztepe drenaj kanal güzergahından bir yıl boyunca (Şubat 2024–Ocak 2025) aylık periyotlarla alınan su numunelerinde; fizikokimyasal, mikrobiyolojik ve ağır metal parametreleri sulama suyu kalitesi kriterlerine göre analiz edilmiştir. Ayrıca, tesis çıkış suyunun deşarj edildiği kanal hattı boyunca bu sularla sulanan tarım arazileri ile kanalın etki alanı dışında kalan (kontrol) arazilerin fiziksel ve kimyasal özellikleri ile ağır metal içerikleri; zamansal ve mekânsal değişimler açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Su izleme sonuçları, kısıtlı arıtma kapasitesi nedeniyle deşarj kanalının Sınıf III (Kirlili Su) statüsünde olduğunu ve yüksek sertlik gösterdiğini ortaya koymuştur. Mikrobiyolojik açıdan fekal ve toplam koliform sayılarının sulama suyu sınır değerlerini kritik düzeyde aşarak patojenik risk oluşturduğu; ağır metal boyutunda ise arsenik (As) ve alüminyum (Al) konsantrasyonlarının FAO kriterlerindeki yasal eşik sınırların üzerinde seyrettiği belirlenmiştir. Toprak analizleri, atıksu kullanımının kontrol grubuna kıyasla toprak organik madde miktarını istatistiksel olarak anlamlı düzeyde artırdığını (%1.40’tan %1.82’ye; $p = 0.008$) ortaya koymuştur. Besin elementi analizlerinde, uygulama grubundaki demir (Fe) miktarı 9.11 mg/kg ile “yeterli” seviyeye yükselirken, kontrol grubunun 3.33 mg/kg ile “yetersiz” seviyede kaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, yoğun sulama ve drenaj etkisine bağlı olarak kalsiyum (Ca) miktarında ileri düzeyde ($p < 0.001$) azalma kaydedilmiştir. Topraktaki ağır metal birikimi ulusal yasal sınırlar içinde kalsa da, kadmiyum (Cd) miktarının (1.05 mg/kg), uluslararası (FAO/WHO) kritik eşiği (0.8 mg/kg) aşmaya başladığı ve birikim eğilimi sergilediği saptanmıştır. Sonuç olarak; arıtılmış atıksu kullanımı toprak verimliliğini desteklemekle birlikte, sucul ve karasal ekosistemlerdeki kümülatif kirlilik riski nedeniyle arıtma verimliliğinin ileri teknolojilerle artırılması ve periyodik izleme programlarının uygulanması sürdürülebilir yönetim açısından bir zorunluluktur.

Anahtar Kelimeler: Arıtılmış evsel atık su, Çevresel yeniden kullanım, Tarımsal sulama, Toprak özellikleri, Su kalitesi.

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

ENVIRONMENTAL REUSE OF TREATED MUNICIPAL WASTEWATER

Taşkın KIRGEZEN

KIRŞEHİR AHI EVRAN UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE
DEPARTMENT OF BIOSYSTEM ENGINEERING

Supervisor: Prof. Dr. Sultan KIYMAZ
Year: 2026, **Pages:** 77
Juries: Prof. Dr. Sultan KIYMAZ
Prof. Dr. Ahmet ERTEK
Prof. Dr. Sedat BOYACI

Treated municipal wastewater is a strategic alternative water resource that can be utilized for agricultural irrigation and environmental purposes following appropriate advanced treatment processes. This study was conducted to investigate the environmental and agricultural reuse potential of the effluent from the Kırşehir-Boztepe Wastewater Treatment Plant. Within the scope of the research, water samples were collected monthly for one year (February 2024–January 2025) from the plant inlet-outlet units and the Boztepe drainage channel route where the effluent is discharged. Physicochemical, microbiological, and heavy metal parameters of these samples were analyzed according to irrigation water quality criteria. Additionally, the physical and chemical properties along with heavy metal contents of agricultural soils irrigated with this water along the channel line and control soils outside the channel's impact area were comparatively examined in terms of temporal and spatial variations. Water monitoring results revealed that due to limited treatment efficiency, the discharge channel was classified as Class III (Polluted Water) and exhibited high hardness. Microbiologically, fecal coliform (FC) and total coliform (TC) counts critically exceeded irrigation water thresholds, posing severe pathogenic risks, while arsenic (As) and aluminum (Al) concentrations remained above the regulatory limits specified by FAO criteria. Soil analyses demonstrated that the application of treated wastewater statistically increased soil organic matter content significantly from 1.40% to 1.82% ($p = 0.008$) compared to the control group. Nutrient analyses indicated that available iron (Fe) content in the application group rose to a "sufficient" level of 9.11 mg/kg, whereas the control group remained at an "insufficient" level of 3.33 mg/kg. Additionally, a highly significant decrease ($p < 0.001$) was recorded in calcium (Ca) content, attributed to intense irrigation and drainage effects. Although soil heavy metal accumulation remained within national regulatory thresholds, cadmium (Cd) concentrations (1.05 mg/kg) began to exceed the international (FAO/WHO) critical threshold (0.8 mg/kg), displaying an accumulation trend. Consequently, while the use of treated wastewater supports soil fertility, upgrading treatment efficiency through advanced technologies and implementing periodic monitoring programs are imperative for sustainable management due to cumulative pollution risks in both aquatic and terrestrial ecosystems.

Key Words: Treated municipal wastewater, Environmental reuse, Agricultural irrigation, Soil properties, Water quality.

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 3.1. Çalışma alanına ait iklim verileri	10
Tablo 3.2. Su örnekleme istasyonlarının adları ve coğrafi koordinatları	11
Tablo 3.3. Su analiz parametreleri ve analiz yöntemleri	14
Tablo 3.4. Çalışma alanı toprak örnekleme noktalarının koordinatları	16
Tablo 4.1. Atıksu arıtma tesisi ve deşarj hattı su örneklerinin fizikokimyasal parametrelerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler	26
Tablo 4.2. Atıksu arıtma tesisi ve deşarj hattı su örneklerinin mikrobiyolojik parametrelerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler	27
Tablo 4.3. Atıksu arıtma tesisi ve deşarj hattı su örneklerinin ağır metal parametrelerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler	29
Tablo 4.4. Atıksu arıtma tesisi ve deşarj hattı fizikokimyasal parametrelerinin mevsimsel değişimlerine ilişkin doğrusal karışık model analiz sonuçları	32
Tablo 4.5. Atıksu arıtma tesisi ve deşarj hattı mikrobiyolojik parametrelerinin mevsimsel değişimlerine ilişkin doğrusal karışık model analiz sonuçları	34
Tablo 4.6. Atıksu arıtma tesisi ve deşarj hattı ağır metal parametrelerinin mevsimsel değişimlerine ilişkin doğrusal karışık model analiz sonuçları	38
Tablo 4.7. Arıtılmış atıksu ile sulanan ve kontrol grubu toprak örneklerinin bünye özellikleri (0–30 cm)	40
Tablo 4.8. Arıtılmış atıksu ile sulanan toprakların fiziksel ve kimyasal özelliklerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler	41
Tablo 4.9. Arıtılmış atıksu ile sulanan toprakların fiziksel ve kimyasal özelliklerine ait dönemsel farkların normallik testi sonuçları	42
Tablo 4.10. Arıtılmış atıksu ile sulanan toprakların fiziksel ve kimyasal özelliklerine ait dönemsel değişimlerin eşleştirilmiş t-testi sonuçları.....	43
Tablo 4.11. Kontrol grubu toprakların fiziksel ve kimyasal özelliklerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler	44
Tablo 4.12. Kontrol grubu toprakların fiziksel ve kimyasal özelliklerine ait dönemsel farkların normallik testi sonuçları	45
Tablo 4.13. Kontrol grubu toprakların fiziksel ve kimyasal özelliklerine ait dönemsel değişimlerin eşleştirilmiş karşılaştırma sonuçları	45
Tablo 4.14. Arıtılmış atıksu ile sulanan toprakların yarıyışlı besin elementi içeriklerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler	47
Tablo 4.15. Arıtılmış atıksu ile sulanan toprakların yarıyışlı besin elementi içeriklerine ait dönemsel farkların normallik testi sonuçları	48
Tablo 4.16. Arıtılmış atıksu ile sulanan toprakların yarıyışlı besin elementi içeriklerine ait dönemsel değişimlerin karşılaştırma sonuçları	49
Tablo 4.17. Kontrol grubu toprakların yarıyışlı besin elementi içeriklerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler	50
Tablo 4.18. Kontrol grubu toprakların yarıyışlı besin elementi içeriklerine ait dönemsel farkların normallik testi sonuçları	51
Tablo 4.19. Kontrol grubu toprakların yarıyışlı besin elementi içeriklerine ait dönemsel değişimlerin karşılaştırma sonuçları.....	52
Tablo 4.20. Arıtılmış atıksu ile sulanan toprakların ağır metal içeriklerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler	53
Tablo 4.21. Arıtılmış atıksu ile sulanan toprakların ağır metal içeriklerine ait dönemsel farkların normallik testi sonuçları	53

Tablo 4.22. Arıtılmış atıksu ile sulanan toprakların ağır metal içeriklerine ait dönemsel değişimlerin karşılaştırma sonuçları	55
Tablo 4.23. Kontrol grubu toprakların ağır metal içeriklerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler	56
Tablo 4.24. Kontrol grubu toprakların ağır metal içeriklerine ait dönemsel farkların normallik testi sonuçları.....	56
Tablo 4.25. Kontrol grubu toprakların ağır metal içeriklerine ait dönemsel değişimlerin eşleştirilmiş t-testi sonuçları.....	58

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 3.1. Tesisin genel yerleşim planı ve uydu görünümü	7
Şekil 3.2. Atıksu arıtma tesisi iş akım şeması	8
Şekil 3.3. Çalışma alanı su örnekleme noktaları ve coğrafi konumu	12
Şekil 3.4. Su analizlerinde kullanılan numune kapları	12
Şekil 3.5. Çalışma alanı su örnekleme çalışmalarına ait arazi görseller (1-4. istasyonlar)	13
Şekil 3.6. Çalışma alanı su örnekleme çalışmalarına ait arazi görselleri (5-8. istasyonlar)	13
Şekil 3.7. Çalışma alanı toprak örnekleme noktaları ve coğrafi konumu	16
Şekil 3.8. Mayıs dönemi arazi çalışmaları ve örnekleme noktaları	17
Şekil 3.9. Haziran dönemi arazi çalışmaları ve örnekleme noktaları	18
Şekil 3.10. Toprak örneklerinin analize hazırlanması	18
Şekil 3.11. Laboratuvar analiz aşamaları ve ölçüm süreçleri	19

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
>	: Büyüktür
° ' "	: Derece, Dakika, Saniye
<	: Küçüktür
≤	: Küçük veya Eşit
°C	: Santigrat (Derece)
%	: Yüzde

Kısaltmalar	Açıklama
P ₂ O ₅	: Alınabilir Fosfor (Toprak Parametresi)
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
APHA	: Amerikan Halk Sağlığı Birliği
NH ₄	: Amonyum
Sb	: Antimon
As	: Arsenik
AKM	: Askıda Katı Madde
AAT	: Atıksu Arıtma Tesisi
AATTUT	: Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usüller Tebliği
EU	: Avrupa Birliği
Cu	: Bakır
HCO ₃	: Bikarbonat
BOİ ₅	: Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı
FAO	: Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü
B	: Bor
Hg	: Cıva
Zn	: Çinko
ÇO	: Çözünmüş Oksijen
K ₂ O	: Değişebilir Sodyum (Toprak parametresi)
Fe	: Demir
DSİ	: Devlet Su İşleri

DTPA	:	Dietilentriaminpentaasetik asit
LMM	:	Doğrusal Karışık Model (Linear Mixed Model)
EC	:	Elektriksel İletkenlik
EPA	:	Environmental Protection Agency-Çevre Koruma Ajansı
EMS	:	En Muhtemel Sayı
F	:	Flor
PO ₄	:	Fosfat
P	:	Fosfor (Su Kalite Parametresi)
pH	:	Hidrojen Potansiyeli
SAS	:	İstatistiksel Analiz Sistemi (Statistical Analysis System)
ICP-OES	:	İndüktif Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektrometrisi (ICP-OES)
Sn	:	Kalay
Ca	:	Kalsiyum
CaCO ₃	:	Kalsiyum Karbonat (Kireç)
KAAY	:	Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği
kg/da	:	Kilogram/Dekar
km ³	:	Kilometreküp
KOİ	:	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
Cr	:	Krom
Pb	:	Kurşun
GPS	:	Küresel Konumlama Sistemi
L	:	Litre
Mg	:	Magnezyum
Mn	:	Manganez
MBR	:	Membran Biyorektörler
MGM	:	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
m ³	:	Metreküp
µg/L	:	Mikrogram/Litre
µS/cm	:	Mikrosiemens/Santimetre
mg/kg	:	Miligram/Kilogram

mg/L	:	Miligram/Litre
NO ₃	:	Nitrat
Ni	:	Nikel
NO ₂	:	Nitrit
OM	:	Organik Madde
K	:	Potasyum (Su Kalite Parametresi)
Se	:	Selenyum
Na	:	Sodyum
SPSS	:	Sosyal Bilimler İçin İstatistik Paketi (Statistical Package for the Social Sciences)
SKYY	:	Su Kalitesi Kontrol Yönetmeliği
SYGM	:	Su Yönetimi Genel Müdürlüğü
SO ₄	:	Sülfat
S	:	Ters Ozmoz (Reverse Osmosis)
Ti	:	Titanyum
TÇM	:	Toplam Çözünmüş Madde
TS	:	Toplam Sertlik
TKKNKKSDY	:	Toprak Kirliliği Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik
TÜİK	:	Türkiye İstatistik Kurumu
SUEN	:	Türkiye Su Enstitüsü
UF	:	Ultrafiltrasyon
V	:	Vanadyum
WHO	:	World Health Organisation-Dünya Sağlık Örgütü
YSKY	:	Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği

1. GİRİŞ

Su, tüm canlıların yaşamsal faaliyetlerini sürdürebilmesi için en temel doğal kaynaklardan biridir. Dünyadaki toplam su miktarı yaklaşık 1.4 milyar km³ olup, bunun %97.5'i okyanus ve denizlerde tuzlu su, %2.5'i ise tatlı su olarak bulunmaktadır. Tatlı suyun yalnızca çok küçük bir kısmı (%0.5–1) kullanım için uygun olup, bunun da büyük bir kısmı yeraltı ve kutup bölgelerinde hapsedilmiştir; bu durum, kullanılabilir tatlı su miktarının son derece sınırlı olduğunu göstermektedir (DSİ, 2010; Erdağ, 2015).

Küresel ölçekte su kaynakları üzerindeki baskılar; hızlı nüfus artışı, tarımsal ve endüstriyel taleplerin yükselmesi, iklim değişikliği ve kirlilik gibi faktörlerle giderek artmaktadır. Türkiye'de uzun yıllar alansal normallere göre yıllık ortalama yağış miktarı yaklaşık 574 mm olup, bu değer yıllık ortalama 450 milyar m³ hacminde bir su kütesine karşılık gelmektedir (DSİ, 2024; MGM, 2024). Mevcut teknik ve ekonomik koşullar çerçevesinde, çeşitli maksatlara yönelik olarak tüketilebilecek (kullanılabilir) yerüstü suyu potansiyeli yıllık ortalama 94 milyar m³ olarak hesaplanmaktadır. Buna ek olarak, 18 milyar m³ düzeyinde olduğu belirlenen emniyetli çekilebilir yeraltı suyu potansiyeli ile birlikte, Türkiye'nin toplam kullanılabilir net su potansiyeli yılda yaklaşık 112 milyar m³'tür (DSİ, 2024). Bu toplam potansiyelin günümüz itibarıyla ancak yaklaşık 57 milyar m³'lük kısmı aktif olarak tarım, içme-kullanma ve sanayi sektörlerinde tüketime kazandırılmaktadır. Türkiye'de kişi başına düşen yıllık su miktarının 2021 yılında 1.323 m³ olduğu ve bu değer 2030 yılında 1.120 m³'e gerileyeceğinin öngörülmesi, ülkemizi su stresi yaşayan ülkeler kategorisinde kritik bir konuma getirmektedir (Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), 2018; Devlet Su İşleri (DSİ), 2022; Öztekin, 2023).

Bu sınırlılıklar karşısında arıtılmış evsel atık suların yeniden kullanımı, döngüsel ekonomi modelinin bir parçası olarak alternatif ve stratejik bir su kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Arıtılmış atık suların en yaygın kullanım alanı, küresel tatlı su tüketiminin %70'inden sorumlu olan tarım sektörüdür (FAO, 2010; Qadir ve ark., 2020). Atık suların tarımsal sulamada değerlendirilmesi, sadece tatlı su kaynaklarını korumakla kalmayıp, içeriğindeki azot ve fosfor gibi besin maddeleri sayesinde kısa vadede bitki gelişimini olumlu etkileyerek gübre maliyetlerini de düşürmektedir (Kukul ve ark., 2007; Pedrero ve ark., 2010). Ancak atık suyun toprakla uzun süreli etkileşimi; pH değişimleri, tuzluluk artışı, ağır metal birikimi ve mikrobiyolojik riskler gibi toprak kalitesini ve halk sağlığını doğrudan tehdit eden kısıtları da beraberinde getirmektedir (Kitis, 2004; Yiğit,

2007; Keser, 2013; Becerra-Castro ve ark., 2015; Khaskhoussy ve ark., 2015; Can ve Dulkadiroğlu, 2021).

Günümüzde su kıtlığı ile mücadelede stratejik bir öneme sahip olan arıtılmış atık suların yeniden kullanımı, ileri arıtma teknolojileri ve bütüncül yönetim stratejileriyle desteklenmelidir. Sistemin sürdürülebilirliği ve halk sağlığının korunması açısından, su kalitesinin periyodik olarak izlenmesi ve sürecin uluslararası normlara uygun şekilde yürütülmesi gerekmektedir (Dünya Sağlık Örgütü (WHO), 2006; Salgot ve Folch, 2018). Bu doğrultuda, teknik altyapının güçlendirilmesi ve yasal mevzuatlarla uyumlu bir denetim mekanizmasının kurulması, atık su geri kazanım projelerinin başarısı için temel teşkil etmektedir. Bu küresel ve ulusal gereklilikler doğrultusunda, yerel ölçekteki kısıtlılıkların ve geri kazanım potansiyelinin somut verilerle ortaya konulması büyük önem arz etmektedir.

Bu çalışma, Kırşehir-Boztepe Atıksu Arıtma Tesisi çıkış suyunun yeniden kullanım olanaklarını araştırmak amacıyla yürütülmüştür. Araştırma kapsamında, tesisin giriş-çıkış üniteleri ile deşarjın yapıldığı Boztepe drenaj kanalı güzergâhından bir yıl boyunca (Şubat 2024–Ocak 2025) aylık periyotlarla alınan su numunelerinde fizikokimyasal, mikrobiyolojik ve ağır metal parametreleri sulama suyu kalitesi kriterlerine göre analiz edilmiştir. Ayrıca tesis çıkış suyunun deşarj edildiği kanal hattı boyunca bu sularla sulanan tarım arazileri ile kanalın etki alanı dışında kalan (kontrol) arazilerin fiziksel ve kimyasal özellikleri ile ağır metal içerikleri, zamansal ve mekânsal değişimler açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Elde edilen bulguların; ulusal mevzuat standartları ile Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO) rehber ilkeleri ışığında değerlendirilerek, bölgede sürdürülebilir tarımsal faaliyetlerin planlanması, su kaynaklarının korunması ve veriye dayalı bütüncül çevresel yönetim politikalarının geliştirilmesi amacıyla bilimsel bir altyapı sunması hedeflenmektedir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Mevcut tez çalışmasında arıtılmış atıksular, çevresel ve tarımsal uygulamalar bağlamında incelenmektedir. Günümüzde nüfus artışı ve iklim değişikliği baskısı altındaki su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, arıtılmış atıksuların geri kazanımını stratejik bir zorunluluk haline getirmiştir. Literatürde bu süreç; atıksuyun ilave bir kaynak değil, kullanım amacına göre kalite standartları belirlenmesi gereken teknik bir "ürün" olarak tanımlanmasına European Commission (EU), 2016) ve "Döngüsel Ekonomi" modelinin temel taşına dönüşmesine yol açmıştır.

Küresel ölçekte arıtılmış sular; sadece tarımsal sulamada değil, kentsel peyzaj, sanayi süreçleri ve ekosistem destekleme gibi çok geniş bir yelpazede değerlendirilmektedir (Çevre Koruma Örgütü (EPA), 2004; Pedrero ve ark., 2010; Silva, 2023). Özellikle suyun "Gıda-Enerji-Su" bağı (Nexus) çerçevesinde ele alınması, arıtılmış suyun içindeki azot ve fosfor gibi besin elementlerinin doğal gübre kaynağı olarak görülmesini sağlamıştır.

Genişleyen bu küresel yelpazede, arıtılmış atıksuların kalitesini belirleyen en temel unsur tesiste uygulanan proses teknolojileridir. Geleneksel aktif çamur sistemleri karbonlu organik maddelerin gideriminde yüksek başarı gösterse de tarımsal yeniden kullanım için kritik olan mikrobiyolojik güvenlik ve besin maddesi dengesini optimize etmekte yetersiz kalabilmektedir.

Bu bağlamda, Membran Biyoreaktörler (MBR) ve peşi sıra uygulanan Ultrafiltrasyon (UF) ile Ters Ozmoz (RO) gibi ileri arıtma teknolojileri, askıda katı maddeleri ve patojenleri tamamen uzaklaştırarak uluslararası en katı sulama standartlarına uygun su üretilmesini mümkün kılmaktadır (Rizzo ve ark., 2020; Mineo ve ark., 2025). Ancak ileri arıtma proseslerinin devreye alınması, tesislerin enerji sarfiyatını ve işletme maliyetlerini artıran ekonomik bir kısıtı da beraberinde getirmektedir. Döngüsel ekonomi perspektifinden bakıldığında, arıtma esnasında açığa çıkan anaerobik çamur stabilizasyonu ve biyogaz üretimi, tesislerin kendi enerjisini karşılama potansiyelini doğurmakta ve böylece döngünün ekonomik sürdürülebilirliğine katkı sağlamaktadır (Kehrein ve ark., 2020).

Uluslararası alanda ABD, İsrail, Avustralya, Japonya, Birleşik Arap Emirlikleri ve Batı Avrupa ülkelerinde atık suların yeniden kullanımı yaygındır (Polat, 2013; Saraoğlu, 2014). Avrupa'da kullanım bölgelere göre farklılık göstermektedir; Güney Avrupa'da projelerin %44'ü tarımsal, %37'si kentsel/çevresel amaçlı, Kuzey Avrupa'da

ise %51 çevresel, %33 sanayi amaçlıdır. Portekiz’de arıtılmış atık su ile sulanan alan 35 000–100 000 ha arasında, Kıbrıs’ta 38 200 ha, İtalya’da ise 28 285 ha civarındadır (Sato ve ark., 2013). ABD’nin Florida eyaletinde, 2001 yılında 461 arıtma tesisinden çıkan arıtılmış suların %19’u tarımsal alanlarda, %44’ü halka açık yeşil alanlarda, %16’sı yüzey suyu artırımı, %15’i endüstriyel uygulamalarda ve %6’sı sulak alanlarda kullanılmıştır (Bozdoğan, 2009; Saraoğlu, 2014).

İran’da yapılan çalışmalar, özellikle mısır ve yonca gibi yem bitkilerinde bu suların kullanımıyla gübre ihtiyacının önemli ölçüde azaldığını kanıtlamıştır (EPA, 2004). Arıtılmış atıksu kullanımının toprak fizikokimyasal özellikleri üzerindeki etkileri literatürde geniş yer bulmaktadır.

Minhas ve ark. (2015), arıtılmış atıksu ile uzun süreli sulama yapılan alanlarda toprağın organik madde içeriğinin arttığını ve kimyasal gübre ihtiyacının %25-40 oranında azaldığını saptamıştır. Ancak bu olumlu etkinin yanı sıra, atıksu içeriğindeki sodyum iyonlarının toprak agregat stabilitesini bozarak geçirgenliği azaltabildiği rapor edilmiştir. Özellikle killi topraklarda değişebilir Sodyum Yüzdesi (DSY) değerindeki artış, toprak tuzluluğunun yönetilmesi gereken en kritik parametrelerden biri olarak öne çıkmaktadır (Yurtseven, 2016).

Atıksu kalitesinin makro düzeydeki fizikokimyasal etkilerinin ötesinde, mikroskobik düzeyde toprak biyolojisi ve enzim aktiviteleri üzerindeki dinamikleri de modern literatürün derinlemesine incelediği konular arasındadır. Arıtılmış atıksu bünyesinde yer alan çözünmüş organik karbon (DOC) ve mikro besin elementleri, toprakta bulunan faydalı mikroorganizmalar için sürekli bir besin girdisi oluşturarak toprak solunumunu ve mikrobiyal biyokütleyi (MBC) kısa ve orta vadede stimüle etmektedir (Chen ve ark., 2008).

Özellikle toprağın verimlilik göstergeleri olan dehidrogenaz, üreaz ve fosfataz enzim aktivitelerinde, temiz suyla sulanan alanlara kıyasla dikkate değer artışlar saptanmıştır (Chen ve ark., 2008). Ne var ki, atıksuda kalabilen eser miktardaki sürfaktanlar veya dezenfeksiyon yan ürünleri (trihalometanlar vb.), uzun vadeli maruziyette hassas toprak mikroflora popülasyonlarında fonksiyonel baskılanmaya ve biyoçeşitlilik kayıplarına yol açabilmektedir (Masinga ve ark., 2024). Bu nedenle, arıtılmış atıksuların tarımsal topraklara uygulanmasında sadece klasik kimyasal parametrelerin değil, toprak sağlık göstergesi olan biyolojik ve biyokimyasal indekslerin de periyodik olarak izlenmesi gerekliliği vurgulanmaktadır.

Doğan (2003) ve Fesliyen (2017) tarafından Şanlıurfa’da yürütülen çalışmada, evsel ve sanayi atık sularının döküldüğü Karakoyun Deresi ile sulanan soğan bitkisinde arsenik (As), bakır (Cu) ve kadmiyum (Cd) elementlerinin sulama suları için izin verilen sınır değerlerinin üzerinde olduğu tespit edilmiştir.

Ergene Havzası’nda yürütülen bir çalışmada, 13 adet evsel atık su arıtma tesisinden çıkan arıtılmış atık suların sulamada kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışma sonuçları, biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ5), bulanıklık ve fekal koliform değerlerinin sulama suyu kullanımında sınırlayıcı olduğunu göstermiş ve tesislere hızlı kum filtresi ve ultraviyole (UV) dezenfeksiyon ünitesinin eklenmesi gerektiği ifade edilmiştir (Duman, 2017). Benzer şekilde Kayseri İleri Biyoloji Atıksu Arıtma Tesisi çıkış suyunun, Mayıs–Eylül ayları arasında sulama suyu gereksinimi fazla olan Süksün alanında kullanılabilmesi için tesise kum filtre ve UV dezenfeksiyon ünitelerinin eklenmesi önerilmiştir.

Gülocak ve Kıymaz (2022), Kırklareli il merkezinde kanalizasyon sularının mevcut arıtma tesislerinde arıtılarak Kırklareli Deresi’ne deşarj edilmesinin, sulama suyu kalitesi ve kirlilik durumuna etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, SKKY kriterlerine göre su örneklerinin fiziksel ve inorganik-kimyasal parametreler açısından mevsimsel olarak IV. kalite sınıfına girdiği, ABD Tuzluluk Laboratuvarı Sınıflama Sistemine göre ise C3S1 sınıfında olduğu ve tuzluluk nedeniyle dikkatle kullanılması gerektiği belirlenmiştir.

Konya’da yürütülen bir çalışmada ise, kentsel atık sularının mısır bitkisi yetiştiriciliğine etkileri incelenmiş; çiçeklenme ve vejetasyon süresinde değişim, hasat indeksinde düşüş ve kuru madde üretiminde artış gözlemlenmiş, koçan boyu ve eni gibi bazı verim unsurlarının etkilenmediği tespit edilmiştir (Çay, 2013; Polat, 2013; Saraoğlu, 2014). Çalışmada, arıtılmış ve seyreltilmiş atık suların mısır yetiştiriciliğinde kullanılabileceği, ancak tuzluluk kontrolü, mikrobiyolojik ve ağır metal arıtımı yapılmadan kullanımının uygun olmadığı vurgulanmıştır.

Türkiye özelinde konunun havza yönetimi ölçeğinde ele alınması, bölgesel su bütçelerinin korunması açısından hayati bir düzleme oturmaktadır. Özellikle Büyük Menderes, Gediz ve Konya Kapalı Havzası gibi yoğun tarımsal faaliyetlerin yürütüldüğü ve iklim projeksiyonlarına göre yüksek kuraklık riski altında olan bölgelerde, arıtılmış atıksular akiferlerin yapay olarak beslenmesi ve yeraltı su seviyelerinin stabilizasyonu için stratejik bir alternatif kaynak haline gelmiştir (SUEN, 2021; SYGM, 2022).

Yapılan sosyo-ekonomik ve algı çalışmalarında, üreticilerin arıtılmış atıksu kullanımına yönelik yaklaşımları incelenmiş; su kıtlığının şiddetli yaşandığı kurak bölgelerde gübre tasarrufu ve kesintisiz su temini avantajları nedeniyle bu alternatif kaynağın kabul oranının %75'in üzerine çıktığı saptanmıştır (Topçu ve ark., 2021). Ancak halk sağlığı endişeleri ve kültürel bariyerler, bu suların özellikle taze tüketilen sebze tarımında (marul, domates vb.) kullanımını kısıtmakta, daha ziyade endüstri bitkileri (pamuk, şeker pancarı) ve yem bitkileri üretimine yönlendirilmesine neden olmaktadır. Bu durum, yerel yönetimlerin ve tarım il müdürlüklerinin çiftçilere yönelik sürekli eğitim ve şeffaf veri paylaşımı mekanizmaları kurmasını zorunlu kılmaktadır. Bu durum, yerel yönetimlerin ve tarım il müdürlüklerinin çiftçilere yönelik sürekli eğitim ve şeffaf veri paylaşımı mekanizmaları kurmasını zorunlu kılmaktadır.

Türkiye'de 2023 yılında ilan edilen "Ulusal Su Verimliliği Seferberliği" kapsamında, arıtılmış atıksuların sulamadaki payının 2030'a kadar %15'e çıkarılması hedeflenmektedir.

Ulusal mevzuat açısından bu uygulamalar; 2872 sayılı Çevre Kanunu ve 2022 yılında revize edilen Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği (AATTUT) ile denetim altına alınmıştır. Bu kuramsal ve yasal çerçeve ışığında, Boztepe Atıksu Arıtma Tesisi çıkış sularının çevresel ve tarımsal etkilerinin incelenmesi; bölgedeki su stresinin azaltılması, toprak sağlığının korunması ve sürdürülebilir tarımsal döngünün yerel ölçekte tesisi açısından kritik bir bilimsel değer taşımaktadır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

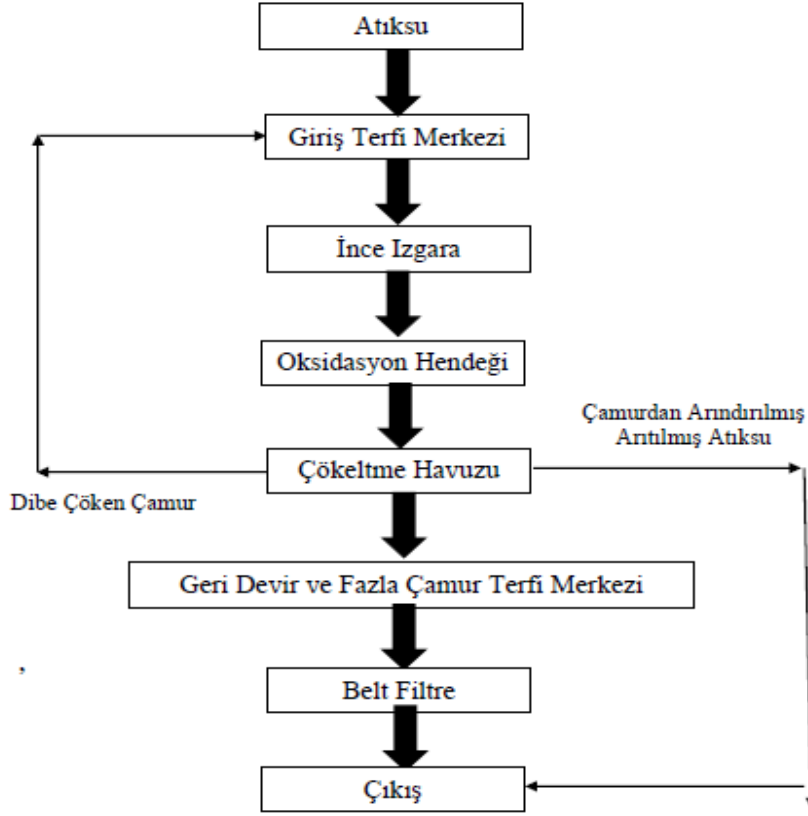
3.1.1. Çalışma alanının tanımı ve konumu

Çalışma alanı, Kırşehir ilinin Boztepe ilçesinde yer almaktadır. Kırşehir merkezine yaklaşık 15 km uzaklıkta bulunan Boztepe ilçesindeki bu tesis, bölgedeki evsel atıksuların arıtılarak yeniden kullanıma kazandırılması açısından önemli bir noktada yer almaktadır. Çalışmanın ana materyalini oluşturan Boztepe Atıksu Arıtma Tesisi; Bağbaşı mevkiinde, 590 ada 66 parsel numaralı, toplam 3 718.99 m² yüzölçümlü alan üzerinde konumlanmıştır. Tesis, ilçeden kaynaklanan evsel nitelikli atık suların arıtılması amacıyla 7 700 eşdeğer nüfusa hizmet verecek şekilde tasarlanmış olup, günlük 500 m³ arıtma kapasitesine sahiptir (Demirhan, 2020).

Tesisin genel yerleşim planı ve coğrafi konumu Şekil 3.1’de, tesisin proses iş akım şeması ise Şekil 3.2’de sunulmuştur. Araştırma kapsamında; tesis giriş noktası, çökeltme havuzu, tesis çıkışı ve arıtılmış suyun deşarj edildiği Boztepe Drenaj Kanalı boyunca belirlenen noktalardan alınan atık su örnekleri, çalışmanın ana materyalini oluşturmuştur.



Şekil 3.1. Tesisin genel yerleşim planı ve uydu görünümü



Şekil 3.2. Atıksu arıtma tesisi iş akım şeması

3.1.2. Çalışma alanının iklim özellikleri ve tarımsal yapısı

Çalışma alanına ait 2024-2025 yılları ile uzun yıllık (2008-2025) dönem meteorolojik verileri Tablo 3.1’de incelendiğinde; uzun yıllık ortalama sıcaklığın 10.7 °C olduğu, araştırma yıllarını kapsayan 2024 ve 2025 yıllarında ise sırasıyla 11.8 °C ve 11.2 °C ile bu değerin üzerinde sıcaklıkların kaydedildiği belirlenmiştir. İlgili dönemde en yüksek sıcaklık 2025 yılı Temmuz ayında 40.1 °C, en düşük sıcaklık ise 2024 yılı Kasım ayında -17.0 °C olarak ölçülürken; her iki yılda da yıllık maksimum ve minimum sıcaklık ekstremeleri uzun yıllık uç değerleri aşmıştır. Bölgenin uzun yıllık ortalama toplam yağışı 330.1 mm olarak hesaplanmıştır. Araştırma döneminde 2024 yılı toplam yağış miktarı (326.8 mm) uzun yıllık ortalamaya yakın bir seyir izlemiş; buna karşın 2025 yılında toplam yağış miktarı 165.0 mm'ye gerileyerek belirgin bir kuraklık periyoduna girildiğini göstermiştir. Aylık bazda en yüksek toplam yağış 2024 yılı Mayıs ayında (72.6 mm) düşerken, 2025 yılı Ağustos ayında hiç yağış kaydedilmemiştir. Bölgenin nispi nem değerleri uzun yıllık ortalamada %64.7 olup; en yüksek nem oranına kış aylarında (%90.4 ile Aralık 2024), en düşük nem oranına ise yaz aylarında (%37.8 ile Temmuz 2025) ulaşıldığı tespit edilmiştir (MGM, 2026).

Tablo 3.1’de ortaya konan iklim parametreleri, özellikle de yağış yetersizliği ve belirginleşen kuraklık eğilimi, çalışma alanındaki tarımsal faaliyetlerin karakterini ve ürün desenini doğrudan şekillendirmektedir. Nitekim iklimsel kısıtlamaların ve kuraklık baskısının belirgin şekilde hissedildiği Boztepe ilçesinde yaklaşık 300 bin dekar ekim alanı bulunmakta olup, bu alanların %60’ında arpa ile ekmeklik ve makarnalık buğday tarımı yapılmaktadır. Son yıllarda alternatif yem bitkisi olarak tritikale ekimi de yaygınlaştırılmaktadır. İlçede yaklaşık 25 500 dekar sulanabilir arazi varlığı bulunsada altyapı ve teknoloji kısıtlamaları nedeniyle ekim alanlarının çok büyük bir kısmında kuru tarım yapılmakta, bu durum üretimi doğrudan iklim şartlarına bağımlı kılmaktadır. Kuru tarım alanlarında ekim nöbetine uygun olarak yoğun şekilde mercimek ve nohut yetiştiriciliği tercih edilmektedir. Bögede sanayi hammaddesi olarak en çok yağlık ayçiçeği üretimi gerçekleştirilmektedir. Ayrıca üreticilere sağlanan kimyon, çörek otu ve susam tohumları hibe destekleri ile ürün çeşitliliği artırılmaktadır. Bahçecilik ve bağcılık faaliyetleri kapsamında ise yeni üzüm bağları kurulmakta ve badem yetiştiriciliği desteklenmektedir (Kırşehir İl Tarım ve Orman Müdürlüğü, 2024).

Tablo 3.1. Çalışma alanına ait iklim verileri

Meteorolojik parametreler	Yıllar	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
Aylık maksimum sıcaklık (°C)	2024	12.9	16.0	24.8	29.1	29.0	35.0	34.8	36.9	31.5	27.8	18.9	14.2	36.9
	2025	12.9	11.3	25.1	25.2	31.7	31.7	40.1	35.0	35.0	27.2	22.6	11.8	40.1
	2008-2025	12.0	14.5	20.8	24.5	29.1	32.2	36.1	35.6	32.5	26.5	19.5	13.8	36.1
Aylık minumum sıcaklık (°C)	2024	-9.8	-7.9	-5.0	-0.7	-1.0	7.6	11.0	9.4	5.5	-2.8	-17.0	-8.5	-17.0
	2025	-9.2	-14.5	-6.9	-11.9	1.6	7.0	7.8	9.2	3.9	-2.7	-3.9	-8.6	-14.5
	2008-2025	-16.5	-14.6	-8.8	-3.5	1.3	6.5	9.2	9.4	4.0	-1.3	-7.0	-11.0	-16.5
Aylık ortalama sıcaklık (°C)	2024	1.8	4.4	5.3	13.8	13.4	21.5	22.6	22.5	18.7	11.3	4.4	2	11.8
	2025	1.9	-2.2	7.7	8.0	15.1	18.5	24.2	22.5	17.1	11.6	8.2	1.6	11.2
	2008-2025	-0.7	0.7	5.0	9.9	14.3	18.6	21.8	22.0	17.8	11.9	6.0	1.6	10.7
Aylık toplam yağış (mm)	2024	38.0	11.2	36.4	19.6	72.6	11.8	11.6	42.8	43.4	5.6	11.2	22.6	326.8
	2025	9.4	9.2	6.4	32.8	44.2	9.8	3.0	0.0	6.4	13.6	7.4	22.8	165.0
	2008-2025	39.5	23.3	38.3	27.2	47.4	37.3	6.5	8.3	16.6	22.9	25.8	37.2	330.1
Aylık ortalama nispi nem (%)	2024	85.7	71.7	71.5	55.6	68.6	48.2	50.4	47.0	58.3	61.3	75.7	90.4	65.4
	2025	84.0	80.1	57.2	74.7	58.1	46.0	37.8	45.4	51.7	64.1	66.5	88.4	62.8
	2008-2025	84.4	77.2	69.2	62.0	62.2	58.3	48.1	46.6	49.8	61.7	71.5	85.3	64.7

3.2. Metot

3.2.1. Su örneklerinin alınması ve analiz yöntemleri

Çalışma kapsamında su örnekleri; Boztepe Biyolojik Arıtma Tesisi (giriş, çökeltim havuzu çıkışı ve tesis çıkışı) ile tesis sonrası deşarjın yapıldığı Boztepe drenaj kanalı boyunca belirlenen istasyonlar dahil olmak üzere toplam sekiz farklı noktadan alınmıştır. Numune alma işlemleri, Şubat 2024–Ocak 2025 tarihleri arasındaki bir yıllık süreçte aylık periyotlarla gerçekleştirilmiştir. Örneklem istasyonları; tesisin giriş, çökeltim havuzu çıkışı ve tesis çıkış noktalarını kapsayacak şekilde belirlenmiştir. Ayrıca, arıtılmış atık suların alıcı ortamdaki çevresel etkilerini belirlemek amacıyla; deşarj hattı üzerinde yer alan tarım ve mera alanları, hayvancılık tesisleri ve Seyfe Gölü girişini temsil eden noktalar da örneklem istasyonları olarak belirlenmiştir. Su örneklerinin alındığı istasyonların adları ve coğrafi koordinatları Tablo 3.2’de, istasyonların çalışma alanı içerisindeki konumları ise Şekil 3.3’te sunulmuştur.

Tablo 3.2. Su örneklem istasyonlarının adları ve coğrafi koordinatları

İstasyon No	İstasyonların Adları	Koordinatlar	
		Kuzey (K)	Doğu (D)
1	Tesis girişi (Ham atıksu)	39°16'13.29"	34°17'2.49"
2	Çökeltme havuzu	39°16'12.56"	34°17'2.44"
3	Tesis çıkışı (Arıtılmış su)	39°16'12.08"	34°17'2.50"
4	Kanal deşarj noktası (Boztepe drenaj kanalı başlangıcı)	39°15'6.44"	34°19'5.09"
5	Kanal hattı	39°15'6.29"	34°19'24.00"
6	Mandıra tesis alanı	39°15'4.10"	34°20'12.77"
7	Mera arazisi başlangıcı	39°15'0.62"	34°20'57.92"
8	Seyfe Gölü'ne en yakın nokta	39°14'53.77"	34°21'55.46"

Örneklem noktalarının coğrafi koordinatları, Küresel Konumlama Sistemi (GPS) ile belirlenmiştir. Su örnekleri; 0.5 L, 1 L ve 2 L hacmindeki polietilen (plastik) kaplara alınmış (Şekil 3.4) ve her bir numune, ilgili istasyon numarasına göre etiketlenmiştir. Numune alma işlemleri, Ayyıldız (1990) tarafından belirtilen esaslar doğrultusunda, su yüzeyinin yaklaşık 30–40 cm derinliğinden gerçekleştirilmiştir. Arazi çalışmaları sırasında su örneklerinin alındığı istasyonlara ait görseller Şekil 3.5'te (1-4. istasyonlar) ve Şekil 3.6'da (5-8. istasyonlar) sunulmuştur.

Alınan su örnekleri, buz kutuları içerisinde (+4 °C’de) muhafaza edilmiş ve analiz edilmek üzere TÜRKAK tarafından TS EN ISO/IEC 17025 standardına göre akredite edilmiş olan Kayseri DSİ 12. Bölge Müdürlüğü Su Analiz Laboratuvarı’na ulaştırılmıştır.

Alınan su örneklerinde gerçekleştirilen fiziksel, kimyasal, organik, bakteriyolojik, anyon-kasyon ve ağır metal analizlerine ait detaylı yöntemler, cihaz altyapıları ve referans standartlar Tablo 3.3'te özetlenmiştir. Elde edilen analiz verileri; güncel Yüzeysel Su Kalitesi Yönetimi Yönetmeliği (YSKYY, 2012) bünyesindeki Yerüstü Su Kaynaklarının Sınıflarına Göre Su Kalitesi Kriterleri (YSKK), Atık Su Arıtma Tesisi Teknik Usuller Tebliği (AATTUT) ve Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) sulama suyu kalite kriterleri çerçevesinde karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.3. Çalışma alanı su örnekleme noktaları ve coğrafi konumu



Şekil 3.4. Su analizlerinde kullanılan numune kapları



Şekil 3.5. Çalışma alanı su örnekleme çalışmalarına ait arazi görseller (1-4. istasyonlar)



Şekil 3.6. Çalışma alanı su örnekleme çalışmalarına ait arazi görselleri (5-8. istasyonlar)

Tablo 3.3. Su analiz parametreleri ve analiz yöntemleri

Analiz Grubu	Parametreler	Analiz Yöntemi / Ölçüm Cihazı	Referans Standart / Metot Kodu
Fizikokimyasal	pH, EC, ÇO	Potansiyometrik, Elektrometrik ve Amperometrik Yöntemler / pH-metre, EC-metre ve Oksijen-metre	APHA (1989); Tüzüner (1990)
Fizikokimyasal	AKM, TÇM	Süzme, Gözeneğe Bağlı Tutma ve 103-105 °C Etüvde Kurutma / Gravimetrik Yöntem	APHA (1989); Tüzüner (1990)
Fizikokimyasal	Toplam Sertlik	EDTA Kompleksometrik Titrasyon Yöntemi	APHA (1989); Tüzüner (1990)
Organik ve Bakteriyolojik	KOİ, BOİ ₅ , Yağ ve Gres, Fekal Koliform, Toplam Koliform	Açık Reflüks, 5 Günlük İnkübasyon, Gravimetrik ve Membran Filtrasyon Yöntemleri	APHA (2005); Tüzüner (1990)
Besin Elementleri	NO ₃ , NO ₂ , NH ₄ , PO ₄ , P	Spektrofotometrik ve Akış Analiz Yöntemleri / UV-VIS Spektrofotometre	TS ISO 7890-3; TS EN 26777; TS EN ISO 11732; TS EN ISO 6878
Ana Anyonlar	Cl, SO ₄ , F	Sıvı İyon Kromatografisi Yöntemi / İyon Kromatografisi (IC)	TS EN ISO 10304-1 (2009)
Alkalinite İyonları	CO ₃ , HCO ₃	Asit Titrasyon Yöntemi (İndikatörlü/Potansiyometrik)	TS EN ISO 9963-1 (2001)
Katyonlar	Ca, Mg, Na, K	Titrimetrik, Emisyon Spektrometrisi ve İyon Kromatografisi / Alev Fotometresi (Flame Photometry)	TS EN ISO 6059; TS ISO 9964-1; TS EN ISO 14911
Ağır Metaller ve Eser Elementler	Pb, Cu, Zn, Cr, Fe, Mn, Co, Ni, B, Sn, Al, Cd, V, Ti, Hg, As, Se, Sb	Plazma Parçalama ve Kütle Spektrometrisi / ICP-MS Cihazı	US EPA Method 200.8 (1994)

3.2.2. Toprak örneklerinin alınması ve analiz yöntemleri

Çalışma kapsamında toprak örnekleri, Boztepe Atıksu Arıtma Tesisi'nden deşarj edilen arıtılmış suların toprak özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla; Boztepe Drenaj Kanalı çevresinde sulama yapılan tarım arazileri ile sulama yapılmayan kontrol arazilerinden alınmıştır. Örnekleme çalışmaları; sulama sezonunun etkilerini yansıtabilecek şekilde 15 Mayıs 2024 (sulama öncesi/ekim öncesi) ve 15 Ekim 2024 (sulama sonrası/hasat sonrası) tarihlerinde olmak üzere iki farklı dönemde gerçekleştirilmiştir.

Toprak örnekleri, araştırma alanını temsil edecek şekilde belirlenen 20 farklı noktadan, rastgele örnekleme yöntemiyle 0–30 cm derinlikten alınmıştır. Her iki dönemde toplam 40 adet bozulmuş toprak örneği alınmıştır. Örnekleme noktalarının belirlenmesinde; Boztepe bölgesindeki arazilerin bünye özellikleri ve tarım uygulamalarının benzerliği dikkate alınmış, çalışma alanı toprak örnekleme noktalarının koordinatlar GPS kullanılarak kaydedilmiştir (Tablo 3.4, Şekil 3.7).

Örnekleme süreci, literatürde önerilen esaslara (Ayyıldız, 1983; Tüzüner, 1990; Kacar, 1994) uygun olarak yürütülmüştür. Her bir noktadan yaklaşık 1 kg ağırlığında alınan örnekler, polietilen torbalara yerleştirilerek ilgili istasyon numarasına göre etiketlenmiştir. Arazi çalışmaları sırasında toprak örneklerinin alındığı yerlere ait görseller Şekil 3.8'de ve Şekil 3.9'da sunulmuştur. Alınan toprak örnekleri, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Ziraat Fakültesi Biyosistem Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bitki artıklarından arındırılmış, oda sıcaklığında (gölgede) kurutulduktan sonra tokmakla dövülüp 2 mm'lik çelik elekten geçirilerek analize hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.10). Hazırlanan numunelerin fiziksel, kimyasal, besin elementi ve ağır metal analizleri, Atatürk Toprak Su ve Tarımsal Meteoroloji Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Analiz süreçlerine ve laboratuvar çalışmalarına ilişkin görseller Şekil 3.11'de sunulmuştur. Analizler sonucunda elde edilen veriler; literatürde kabul edilen yeterlilik sınırları (Ülgen ve Yurtsever, 1995), uluslararası rehberler (FAO/WHO, 2001) ve Toprak Kirliliği Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik (TKKNKKSDY, 2010) kriterleri doğrultusunda değerlendirilmiştir.

Tablo 3.4. Çalışma alanı toprak örnekleme noktalarının koordinatları

Örnek No	Kuzey (K)	Doğu (D)	Kontrol No	Kuzey (K)	Doğu (D)
T1	39°15'6.35"	34°19'8.10"	K1	39°14'43.96"	34°19'16.18"
T2	39°15'5.75"	34°19'36.86"	K2	39°14'33.15"	34°19'49.01"
T3	39°15'4.72"	34°20'4.67"	K3	39°14'10.57"	34°20'32.59"
T4	39°15'4.02"	34°20'37.29"	K4	39°14'14.02"	34°21'13.03"
T5	39°14'59.74"	34°21'14.42"	K5	39°14'12.40"	34°21'44.58"
T6	39°14'59.10"	34°21'12.29"	K6	39°15'25.55"	34°21'20.78"
T7	39°15'3.25"	34°20'35.71"	K7	39°15'28.94"	34°20'35.87"
T8	39°15'3.87"	34°20'4.61"	K8	39°15'26.61"	34°20'9.69"
T9	39°15'4.50"	34°19'37.75"	K9	39°15'39.95"	34°19'37.95"
T10	39°15'4.26"	34°19'9.88"	K10	39°15'27.77"	34°18'45.23"



Şekil 3.7. Çalışma alanı toprak örnekleme noktaları ve coğrafi konumu



Şekil 3.8. Mayıs dönemi arazi çalışmaları ve örnekleme noktaları



Şekil 3.9. Haziran dönemi arazi çalışmaları ve örnekleme noktaları



Şekil 3.10. Toprak örneklerinin analize hazırlanması



Şekil 3.11. Laboratuvar analiz aşamaları ve ölçüm süreçleri

Yapılan analizler ve uygulanan yöntemler sırasıyla şu şekilde gerçekleştirilmiştir: pH tayini, toprak saturasyon çamurunda cam elektrotlu pH metre ile yapılmıştır. Elektriksel iletkenlik (EC), toprak saturasyon ekstraktının 25 °C'deki elektriksel iletkenliği dS/m cinsinden Richards (1954) yöntemine göre ölçülmüştür. Toprak bünyesi, Bouyoucos (1951) hidrometre yöntemi ile belirlenmiş; bünye sınıfları Soil Survey Manual (1951) standartlarına göre değerlendirilmiştir. Kireç (CaCO_3) içerikleri, Scheibler kalsimetresi kullanılarak belirlenmiştir (Kacar, 1995). Organik madde Walkley-Black metoduna göre tayin edilmiştir (Black 1965). Alınabilir fosfor (P_2O_5), Olsen metoduna göre ölçülmüştür (Olsen, 1953). Değişebilir potasyum (K_2O), kalsiyum (Ca) ve magnezyum (Mg), 1N Amonyum Asetat (pH=7) metoduna göre analiz edilmiştir (Kacar, 1995). Alınabilir ağır metaller (Mn, Fe, Cu, Zn), Dietilentriaminpenta asetik asit (DTPA) ekstraksiyon metoduna göre belirlenmiştir (Lindsay ve Norvell, 1978). Toplam ağır metaller (Cd, Co, Cr, Ni, Zn, Al) ise asit karışımı ile mikro dalga cihazında bozundurulduktan (veya yaş yakma yapıldıktan) sonra ICP-OES (Varian 710 Model) cihazı ile tayin edilmiştir (Kacar, 1995).

3.2.3. İstatistiksel analiz

Su örneklerinde incelenen parametrelerin ölçülen değerleri bakımından mevsimler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık olup olmadığı, Doğrusal Karışık Model (Linear Mixed Model, LMM) yöntemiyle araştırılmıştır. Modelde; örnekleme istasyonları rastgele etki (random effect), mevsimler ise sabit etki (fixed effect) olarak tanımlanmıştır. Ölçümler arasındaki bağımlılık, bileşik simetri (Compound Symmetry) kovaryans yapısı varsayımı altında dikkate alınmıştır (Eyduran ve ark., 2014;

Ser ve Bati, 2015; Romić ve ark., 2020). Mevsimsel farklılıkların hangi gruplardan kaynaklandığını belirlemek amacıyla Bonferroni çoklu karşılaştırma testi uygulanmış ve analizlerde Tip I hata düzeyi ($\alpha = 0.05$) olarak kabul edilmiştir.

Toprak özelliklerine ait tanımlayıcı istatistikler (ortalama, minimum, maksimum ve standart sapma) hesaplanmış; verilerin normal dağılıma uygunluğu Kolmogorov-Smirnov ve Shapiro-Wilk testleri ile belirlenmiştir (Paz-González ve ark., 2000). Normal dağılım göstermeyen değişkenlere logaritmik dönüşüm uygulanmıştır. Mayıs ve Ekim ayı ölçümleri arasındaki istatistiksel farkların değerlendirilmesinde eşleştirilmiş *t*-testi (paired *t*-test) kullanılmıştır. Tüm analizler SAS ve SPSS 29.0 paket programları aracılığıyla gerçekleştirilmiştir (Shek ve Ma, 2011).

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Karışık Model Yaklaşımında Sabit Etkiye İlişkin Analiz Bulguları

4.1.1. İstasyonlara ait su örneklerinin tanımlayıcı istatistikleri

Araştırma kapsamında belirlenen istasyonlardan alınan su örneklerinin fizikokimyasal parametrelerine ait tanımlayıcı istatistikler Tablo 4.1'de, mikrobiyolojik özelliklerine ilişkin bulgular Tablo 4.2'de ve ağır metal içeriklerine ait değerler ise Tablo 4.3'te sunulmuştur.

Tablo 4.1 incelendiğinde, pH değerlerinin 7.30–8.76 (ortalama 7.69) arasında değişim gösterdiği ve suyun hafif alkali karakterde olduğu saptanmıştır. Saptanan bu değerler, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY, 2004) bünyesindeki genel deşarj standartlarında (pH: 6.0–9.0) öngörülen limitler ile tam uyum içerisinde. Benzer şekilde bu bulgular, Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (YSKY, 2021) kapsamında yerüstü su kütleleri için öngörülen Sınıf I (Yüksek Kaliteli Su/Çok İyi Su Durumu) kriterleri (pH: 6.5–8.5) ile büyük oranda örtüşmektedir.

Örneklerin elektriksel iletkenlik (EC) değerleri ise 68–144 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (ort. 119.17 $\mu\text{S}/\text{cm}$) gibi oldukça düşük seviyelerde ölçülmüştür. Bu veriler, suyun düşük mineralizasyonlu yapısını ortaya koymakta olup, YSKY (2021) Tablo 2'ye ve SKKY (2004) sulama suyu kriterlerine göre Sınıf I ($<250 \mu\text{S}/\text{cm}$) karakterini koruduğunu, tarımsal sulama açısından herhangi bir tuzluluk kısıtı teşkil etmediğini ve alıcı ortamın doğal yapısını bozmayacak nitelikte olduğunu göstermektedir.

Sistemin organik yük giderim performansı incelendiğinde; ortalama BOİ_5 (31.64 mg/L) ve KOİ (63.95 mg/L) değerlerinin saptandığı görülmektedir. Boztepe ilçesinin mevcut nüfus yoğunluğu (<10.000) dikkate alınarak yapılan değerlendirmede; bu değerlerin SKKY, (2004) Tablo 21.2 kapsamında belirlenen yasal deşarj limitlerinin ($\text{BOİ}_5 \leq 50 \text{ mg/L}$, $\text{KOİ} \leq 125 \text{ mg/L}$) altında kaldığı ve tesisin yasal mevzuata uygun bir çıkış suyu sağladığı saptanmıştır. Atıksuyun ham BOİ_5 konsantrasyonunun, literatürde evsel atıksular için bildirilen tipik 110–350 mg/L aralığı ile (Metcalf ve ark

., 2003) paralellik gösterdiği belirlenmiştir. Ancak, tesis çıkışı sonrasında alıcı ortam niteliğinde olan Boztepe toprak drenaj kanalının yapısı ile çevredeki tarım-hayvancılık işletmelerinden ve mera alanlarından kaynaklanan yüzey akışları nedeniyle, Askıda Katı Madde (AKM) konsantrasyonunun yer yer uç seviyelere (maksimum 489.50 mg/L; ortalama 98.75 mg/L) ulaştığı görülmüştür.

Ortalama AKM konsantrasyonunun yönetmelik sınırının (70–100 mg/L) hemen eşliğinde bulunması, kanal güzergahı boyunca gerçekleşen sediman taşınımı ve dışsal

yayılı atık girdileriyle açıklanmaktadır. Alıcı ortam su kalitesi üzerindeki etkiler Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (YSKY, 2021) kriterlerine göre değerlendirildiğinde; çözülmüş oksijen (ÇO) konsantrasyonunun ortalama 3.16 mg/L olarak belirlenmesi, su kalitesinin genel olarak Sınıf III (Kirli Su) kategorisinde yer aldığını göstermektedir. Bununla birlikte, ölçülen minimum ÇO değerinin 0.27 mg/L seviyesine kadar düşmesi, kanaldaki su kalitesinin yer yer Sınıf IV (Çok Kirli Su) sınırlarına gerilediğine ve oksijen doygunluğunun kritik düzeyde yetersiz kaldığına işaret etmektedir. Alıcı ortamda reaerasyon (yeniden havalanma) süreçleriyle bu seviyenin ilerleyen bölümlerde artacağı öngörülse de ÇO değerlerindeki bu geniş aralık; mevsimsel sıcaklık değişimleri, tesisten gelen organik yük dalgalanmaları ve mikrobiyal aktivite yoğunluğu ile ilişkilendirilmektedir (Gülocak, 2019). Ortalama 829.30 mg/L olan toplam çözülmüş madde (TÇM) ve 3.09 mg/L düzeyindeki yağ-gres içeriğinin, literatürde arıtılmış evsel atıksular için bildirilen tipik çıkış değerleri (0.5–10 mg/L) ile uyumlu olduğu saptanmıştır (Metcalf ve ark., 2003). Bu durum, toprak kanalın doğal filtrasyon kapasitesi ile çevresel antropojenik etkiler arasındaki dengeyi yansıtmaktadır. Sonuç olarak; tesis çıkışında yasal limitleri karşılayan arıtılmış suyun, alıcı ortam olan toprak kanalın killi/tınlı bünyesel yapısı ve çevredeki yayılı kirlilik yükleri nedeniyle göle ulaştığı noktada, özellikle düşük oksijen dinamiği yönünden 'Hassas Alan' riskleri taşıdığı saptanmıştır.

Kanal güzergâhı boyunca saptanan iyonik kompozisyon, FAO (Ayers ve Westcot, 1985) ve ulusal sulama suyu kalite kriterleri ışığında değerlendirilmiştir. Katyon bileşiminde kalsiyum (Ca) 82.91–201.93 mg/L (ort. 151.78 mg/L), magnezyum (Mg) 13.69–49.90 mg/L (ort. 23.32 mg/L), sodyum (Na) 41.19–212.26 mg/L (ort. 98.29 mg/L) ve potasyum (K) 11.73–58.87 mg/L (ort. 30.24 mg/L) konsantrasyonlarında ölçülmüştür.

Anyon bileşiminde ise klorür (Cl) 45.55–204.03 mg/L (ort. 111.24 mg/L) ve bikarbonat (HCO_3^-) 85.06–1009.94 mg/L (ort. 553.05 mg/L) aralıklarında saptanmıştır. Elde edilen bu iyonik yüklerin, evsel atıksu literatüründe (Metcalf ve ark., 2003) bildirilen tipik değer aralıklarıyla (Ca: 50–220 mg/L; Mg: 10–60 mg/L; Cl: 40–250 mg/L; HCO_3^- : 200–1200 mg/L) büyük ölçüde uyum gösterdiği belirlenmiştir. Söz konusu iyonik değerler FAO (Ayers ve Westcot, 1985) kriterleri ışığında değerlendirildiğinde; özellikle Na (ort. 98.29 mg/L) ve Cl (ort. 111.24 mg/L) ortalama konsantrasyonlarının, hassas kültür bitkileri için belirlenen kritik spesifik iyon toksisitesi eşikleri ($\text{Na} < 69 \text{ mg/L}$; $\text{Cl} < 106 \text{ mg/L}$) aşarak "orta derecede kısıtlı kullanım" kategorisine girdiği görülmektedir.

Anyon bileşiminde baskın olan bikarbonat (HCO_3^-) değerinin ortalama 553.05 mg/L (9.07 meq/L) ile FAO tarafından bildirilen "ciddi kısıtlı" ($>8.5 \text{ meq/L}$ veya 520

mg/L) kullanım sınıfına dahil olması dikkat çekicidir (Ayers ve Westcot, 1985). Bu yüksek bikarbonat düzeyi, özellikle alıcı ortam konumundaki toprak kanalın kil ve killi tın bünyeli yapısı üzerinde kalsiyumun karbonat (CaCO_3) şeklinde çökmesine yol açmaktadır. Bu durum, toprak gözenekliliğini azaltma ve sodyum iyonunun (Na) toprak agregat yapısını bozarak dispersiyona (geçirgenlik kaybı) neden olma riskini artırmaktadır (Hem, 1985). Toplam sertlik ortalama 475.02 mg/L CaCO_3 (283.75–684.99 mg/L) olarak ölçülmüş olup, literatürde kabul gören su sertlik sınıflandırmalarına göre suyun büyük oranda "Çok Sert" karakterde olduğu belirlenmiştir. Kanal güzergâhı üzerindeki bazı lokal noktalarda toplam sertliğin 500 mg/L CaCO_3 eşliğini ve bikarbonatın 1.000 mg/L sınırını aşması, hassas bitki türleri için iyonik stres riski oluşturabileceğine işaret etmektedir (Ayers ve Westcot, 1985). Sonuç olarak, ölçülen iyonik parametreler evsel atıksu karakterizasyonu açısından beklenen sınırlar dahilinde olsa da yüksek bikarbonat ve sodyum seviyeleri, göl sulak alanına deşarj edilmeden önce veya uzun vadeli tarımsal kullanımda toprak tuzluluğu, alkalileşme, geçirgenlik kaybı ve bitki toksisitesi açısından bölgede periyodik bir izleme programı yürütülmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Arıtılmış atıksuların alıcı ortamlara deşarjında azot ve fosfor bileşiklerinin ötrofikasyonu tetiklemeyecek seviyelerde tutulması, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY, 2004) ve Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği (KAAY, 2006) çerçevesinde temel bir ilkedir. Boztepe ilçesinin mevcut kentsel nüfus yoğunluğunun 10.000 eşdeğer nüfusun (E.N.) altında olması nedeniyle, KAAY Madde 11 uyarınca hassas alanlar için öngörülen ileri azot ve fosfor giderim limitleri (TN ve TP) tesis için yasal olarak zorunlu tutulmamaktadır. Bununla birlikte, deşarın gerçekleştirildiği drenaj kanalın ötrofikasyona maruz hassas bir göl sulak alanını beslediği göz önüne alındığında; ekolojik dengenin korunması adına KAAY (2006) ve Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (YSKY, 2021) rehber standartlarında Toplam Fosfor (TP) için 2 mg/L, Toplam Azot (TN) için 15 mg/L ve Amonyum (NH_4) için yaklaşık 5 mg/L eşik değerleri bu çalışmada kritik ekolojik referans noktaları olarak dikkate alınmıştır (Metcalf ve ark., 2003; Henze ve ark., 2008).

Uluslararası düzeyde de Dünya Sağlık Örgütü (WHO) kılavuzları ve Avrupa Birliği (AB) Kentsel Atıksu Arıtımı Direktifi (91/271/EEC), benzer şekilde hassas alıcı ortamlara yapılan deşarjlarda nütrient yüklerinin kontrol altında tutulmasını ekolojik sürdürülebilirlik açısından tavsiye etmektedir.

Çalışma kapsamında ölçülen besi elementi konsantrasyonları incelendiğinde; ortalama nitrit 0.99 mg/L, nitrat 31.42 mg/L, amonyum 47.46 mg/L, toplam fosfor (P)

3.20 mg/L ve fosfat 24.78 mg/L olarak bulunmuştur. Saptanan bu değerlerin hem ulusal mevzuat hem de uluslararası kriterlerdeki sınırların belirgin şekilde üzerinde olması, tesisin ileri biyolojik arıtma (nitrifikasyon/denitrifikasyon ve fosfor giderimi) performansının kısıtlı olduğunu kanıtlamaktadır. Özellikle amonyum değerlerinin yüksekliği, biyolojik süreçlerdeki havalandırma yetersizliğine veya şok yüklemelere işaret etmekte olup, ulusal literatürdeki benzer bulgularla (Gülocak, 2019; Gülocak ve Kıymaz., 2022) paralellik göstermektedir.

Resmi çevre envanterlerinde ve atıksu eylem planlarında İkincil Arıtma (Geleneksel İkincil Biyolojik Arıtma) proses tipine sahip olduğu bildirilen Boztepe Atıksu Arıtma Tesisinin mevcut işletme performansı ve arıtım mekanizmaları analiz edildiğinde; sistemin sadece organik karbon giderimi odağında ($BOİ_5$) ve ($KOİ$) yasal deşarj limitlerini başarıyla karşıladığı görülmektedir. Ancak, tesis çıkış suyunda saptanan ortalama 47.46 mg/L amonyum (NH_4) ve 3.20 mg/L toplam fosfor (TP) konsantrasyonları, tesisin mevcut altyapısında ileri biyolojik nütrient (azot ve fosfor) uzaklaştırma döngülerinin yer almadığını veya aktif olarak işletilemediğini göstermektedir.

Geleneksel ikincil aktif çamur sistemlerinde, amonyumun nitrata dönüştürülmesi (nitrifikasyon) için gereken yüksek hidrolik bekletme süresi ve yoğun havalandırma (çözünmüş oksijen) koşullarının tam olarak sağlanamaması, çıkış suyundaki amonyum yükünün yüksek kalmasının temel proses gerekçesidir. Benzer şekilde, sistemde spesifik bir anaerobik fazın ya da kimyasal koagülasyon ünitesinin bulunmaması nedeniyle fosfor parametresindeki kısmi düşüş, yalnızca heterotrof mikroorganizmaların rutin hücresel sentez faaliyetleri (biyolojik büyüme) esnasındaki metabolik tüketim ile sınırlı kalmaktadır. Sonuç olarak, tasarım karakteri itibarıyla 'İkincil Arıtma' düzeyinde olan tesisin çıkış suyunun, deşarj edildiği kanal vasıtasıyla hassas sulak alan ekosistemlerine ulaştığı dikkate alındığında; periyodik bir izleme programının yürütülmesi ve uzun vadede tesise ileri biyolojik (nitrifikasyon/denitrifikasyon) veya kimyasal nütrient giderim modüllerinin entegre edilmesi ekolojik risklerin minimize edilmesi açısından zorunluluk arz etmektedir.

Amonyum (NH_4) için ekolojik rehber değer olarak önerilen 5 mg/L eşliğinin aşılması, alıcı ortamdaki sucul fauna için doğrudan kronik toksisite riski oluşturmaktadır (Metcalf ve ark., 2003; Henze ve ark., 2008). Drenaj kanal içerisindeki yoğun bitki örtüsü, azot ve fosfor bileşiklerini asimilasyon yoluyla bünyesine alarak kısmi bir doğal arıtma sağlasa da; kanala yönelen yüksek besin elementi girdisi, deşarjın ulaştığı sulak alan

ekosisteminde ötrofikasyon (alg patlaması) riskini doğrudan tetiklemektedir (Correll, 1998). Türkiye'deki geleneksel doğal arıtma ve yapay sulak alan sistemlerindeki amonyum giderimi literatürde %58–88 gibi yüksek bir aralıkta rapor edilmesine rağmen (Korkusuz, 2004), bu çalışmada toprak kanalda ölçülen yüksek amonyum (NH_4) ve özellikle deterjan/organik atık kaynaklı olduğu değerlendirilen yüksek fosfat yükleri, mevcut sistemdeki doğal özümleme kapasitesinin yetersiz kaldığını göstermektedir. Bu durum, önceki bölümlerde belirtilen düşük çözünmüş oksijen (3.16 mg/L) seviyesiyle birleştiğinde; kanal tabanında biriken bitki artıklarının anaerobik (oksijensiz) ayrışma proseslerini hızlandırmakta, bu ise dip sedimanından suya geri besin maddesi salınımına (içsel yük) yol açarak sistemdeki besi elementi döngüsünü daha da ağırlaştırmaktadır.

Spesifik iyonlar açısından incelendiğinde; florür konsantrasyonu ortalama 1.29 mg/L olup, örnekleme noktalarında 0.03 ile 6.24 mg/L gibi geniş bir aralıkta değişim göstermiştir. Bu değer, TS 266 (2018) içme suyu standardı olan 1.5 mg/L sınırının altında kalsa da bazı lokal istasyonlarda saptanan 6.24 mg/L düzeyi yasal limitleri belirgin şekilde aşmaktadır. Drenaj (toprak) kanalın kil ve killi tın bünyesel yapısından kaynaklanabilecek jeojenik salınım veya lokal antropojenik girdilerle (özellikle tarımdaki fosfatlı gübre kullanımı) açıklanabilecek bu yüksek florür içeriği, suyun içme veya hassas tarımsal sulama amaçlı kullanımı açısından kronik toksisite riski barındırmaktadır. Bu nedenle, güzergâh boyunca tarımsal drenaj ve jeojenik kaynaklı florür girişlerinin kontrol altında tutulması, sürdürülebilir tarımsal üretim ve sulak alan ekosistem sağlığı açısından büyük önem taşımaktadır.

Diğer taraftan, sülfat değerleri (ort. 44.36 mg/L; 16.86–74.36 mg/L) arasında değişmiştir. Gülocak (2019)'da yürütülen bir çalışmada sülfat değerleri 77.77mg/L-114.07 mg/L olarak belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgu, evsel atıksular için literatürde bildirilen 10–200 mg/L değişim aralığıyla (Metcalf ve ark., 2003) tam uyum göstererek dengeli bir iyonik yükü temsil etmektedir.

Sonuç olarak; tesis çıkış suyu organik yük (BOI_5 : 31.64 mg/L, KOİ : 63.95 mg/L) ve pH açısından kentsel deşarj mevzuat sınırlarını karşılamaktadır. Ancak, arıtılmış suyun deşarj edildiği drenaj kanalı güzergâhı boyunca maruz kaldığı yüksek besi elementi (azot ve fosfor) yükleri ile lokal florür (F) artışları, son alıcı ortam konumundaki Seyfe Gölü Sulak Alanı'nın ekolojik sağlığı üzerinde ciddi bir ötrofikasyon ve kronik toksisite riski teşkil etmektedir. Diğer taraftan, arıtılmış atıksuyun tarımsal sulamada yeniden kullanımı ve çevresel geri kazanımı açısından yapılan değerlendirmede; suyun yüksek toplam sertlik performansı ile literatür standartlarında belirlenen spesifik iyon sınırlarını aşan

(Na), (Cl) ve özellikle 'ciddi kısıtlı' kullanım sınıfına giren yüksek (HCO_3) konsantrasyonları, bölgedeki killi/tınlı toprak yapısında uzun vadede geçirgenlik kaybı, alkalileşme ve hassas kültür bitkilerinde toksisite riskleri barındırmaktadır. Elde edilen bu bütüncül bulgular hem Seyfe Gölü ekosisteminin korunması hem de su kıtlığı yaşanan bölgede arıtılmış atıksuların emniyetli bir şekilde tarıma kazandırılması için mevcut ikincil arıtma tesisinde ileri arıtma teknolojilerine (biyolojik nütrient giderimi ve kimyasal koagülasyon) geçilmesinin hayati önem taşıdığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, kanal güzergâhı boyunca yayılı kirlilik kaynaklarının kontrol altına alınması ve su-toprak-bitki sisteminde periyodik bir izleme programının yürütülmesi, sürdürülebilir çevresel yeniden kullanım stratejilerinin başarısı açısından zorunluluk arz etmektedir.

Tablo 4.1. Atıksu arıtma tesisi ve deşarj hattı su örneklerinin fizikokimyasal parametrelerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler

Fizikokimyasal parametreler	Ortalama	Standart Sapma	Çarpıklık	Basıklık	Minimum	Maksimum
pH	7.69	0.33	1.76	3.44	7.30	8.76
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	119.17	22.22	-1.07	0.04	68.00	144.00
ÇO (mg/L)	3.16	3.21	1.30	0.84	0.27	11.00
Ca (mg/L)	151.78	35.17	-0.15	-0.76	82.91	201.93
Mg (mg/L)	23.32	8.68	1.68	2.72	13.69	49.90
Na (mg/L)	98.28	44.12	1.02	0.35	41.19	212.26
K (mg/L)	30.24	13.60	0.88	-0.09	11.73	58.87
HCO_3 (mg/L)	553.05	232.13	0.18	-0.77	85.06	1009.94
Cl (mg/L)	111.23	44.11	0.74	-0.37	45.55	204.03
NO_2 (mg/L)	0.99	2.23	3.16	10.25	0.03	9.76
NO_3 (mg/L)	31.42	17.48	2.21	4.56	14.35	84.79
NH_4 (mg/L)	47.46	28.30	-0.36	-0.67	0.03	91.17
SO_4 (mg/L)	44.36	14.23	0.01	-0.03	16.86	74.36
P (mg/L)	3.20	1.63	0.04	-1.17	0.73	6.10
PO_4 (mg/L)	24.78	13.10	1.06	0.02	8.41	52.33
F (mg/L)	1.29	1.67	2.01	3.34	0.03	6.24
AKM (mg/L)	98.75	106.46	2.32	6.52	10.00	489.50
TÇM (mg/L)	829.30	274.05	0.63	-0.96	457.96	1 367.08
TS ($\text{mg}/\text{L CaCO}_3$)	475.02	113.25	0.39	-0.68	283.75	684.99
BOI_5 (mg/L)	31.64	14.80	-0.62	-0.97	3.00	48.00
KOI (mg/L)	63.95	20.97	-1.23	-0.14	21.95	79.60
Yağ (mg/L)	3.08	1.15	0.14	-1.02	1.45	5.26

Fizikokimyasal parametrelerin ardından, istasyonların sanitasyon ve halk sağılığı riskleri açısından durumunu ortaya koyan mikrobiyolojik özelliklerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler Tablo 4.2’de detaylandırılmıştır. Çalışmada mikrobiyolojik kalite göstergesi olarak fekal koliform (FK) ve toplam koliform (TK) sayıları değerlendirilmiş olup, bu parametreler sulama suyunun hijyenik kalitesi ve olası patojenik bulaş riski açısından kritik önem taşımaktadır. Elde edilen bulgulara göre, FK sayıları numunelerde 128.67 ile 241 960.00 EMS/100 mL aralığında değişim göstermiş ve ortalama 105 826.01 EMS/100 mL olarak hesaplanmıştır (çarpıklık = -0.10; basıklık = -1.39).

TK sayıları ise 286,00 ile 284 140.00 EMS/100 mL aralığında bulunmuş ve ortalama 131 167.60 EMS/100 mL olarak belirlenmiştir (çarpıklık = -0.11; basıklık = -1.81). Her iki parametrede de gözlenen yüksek maksimum değerler, bazı dönemlerde kanalda yoğun bir mikrobiyolojik yük bulunduğunu göstermektedir. Genel olarak mikrobiyolojik yükün yüksekliği; dezenfeksiyon prosesindeki anlık dalgalanmalar, hayvansal atık girdileri veya yüzeysel akış kaynaklı kontaminasyon riskine işaret etmekte olup, sulama suyunun hijyenik açıdan düzenli izlenmesini zorunlu kılmaktadır.

Belirlenen TK ve FK sayıları, atıksuların tarımsal sulamada kullanımıyla ilgili ulusal mevzuatlarda (Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliğı) ve uluslararası rehberlerde (WHO, 2006) belirtilen sınır değerlerin (Sınıf A/Kategori A için <1 000 EMS/100 mL) oldukça üzerindedir. Bu durum, mevcut suyun çığ ya da taze tüketilen tarımsal kültür bitkilerinin sulanmasında doğrudan kullanılmasının halk sağılığı ve sanitasyon güvenliği açısından ciddi bir risk oluşturabileceğini ortaya koymaktadır.

Tablo 4.2. Atıksu arıtma tesisi ve deşarj hattı su örneklerinin mikrobiyolojik parametrelerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler

Mikrobiyolojik Parametreler (EMS/100 mL)	Ortalama	Standart Sapma	Çarpıklık	Basıklık	Minimum	Maksimum
FK	105 826.01	84 332.77	-0.102	-1.39	128.670	241 960.00
TK	131 167.60	102 570.57	-0.108	-1.81	286.00	284 140.00

EMS: En Muhtemel Sayı/100 mL

Araştırma kapsamında incelenen istasyonların ağır metal içeriklerine ait tanımlayıcı bulgular Tablo 4.3’te verilmiştir. Tablo incelendiğinde, kurşun (Pb) konsantrasyonu ortalama 2.47 µg/L olup, 0.60–21.65 µg/L aralığında değişmiş; yüksek çarpıklık (4.44) ve basıklık (20.70) değerleri, bazı örneklerde uç değerlerin bulunduğuna işaret etmiştir. Bakır (Cu) ve çinko (Zn) konsantrasyonlarında geniş dağılımlar

gözlenmiş, çinkoda ise ortalama 116.24 µg/L ve maksimum 296.91 µg/L değerleri kaydedilmiştir. Bu durumun, tesise gelen atıksu yükündeki evsel ve lokal endüstriyel kaynaklı dalgalanmalardan ileri geldiği düşünülmektedir. Krom (Cr), demir (Fe) ve mangan (Mn) konsantrasyonları hem ortalama hem de maksimum değerler açısından belirgin bir artış göstermiş; özellikle demir konsantrasyonu bazı örneklerde 737.62 µg/L ortalama ile 7 856.63 µg/L maksimum değerine ulaşmıştır.

İz elementler arasında yer alan kobalt (Co), nikel (Ni) ve vanadyum (V) değerlerinde ise örnekler bazında yüksek maksimum değerlerle (sırasıyla 21.28, 86.43 ve 47.52 µg/L) dalgalanmalar gözlenmiştir. Kalay (Sn), titanyum (Ti), arsenik (As), selenyum (Se), antimon (Sb), cıva (Hg), bor (B), kadmiyum (Cd) ve alüminyum (Al) için değişken konsantrasyonlar kaydedilmiş; özellikle arsenik (maksimum 109.13 µg/L) ve alüminyum (maksimum 5 964.63 µg/L) yüksek konsantrasyonlarda tespit edilmiştir.

Elde edilen veriler doğrultusunda, özellikle arsenik (109.13 µg/L), alüminyum (5 964.63 µg/L) ve demir (7 856.63 µg/L) konsantrasyonlarının yüksek çıkması yalnızca evsel atıksu girdileriyle açıklanamamaktadır. Bu metallerin kaynak çeşitliliği incelendiğinde; lokal küçük sanayi faaliyetleri (oto tamir atölyeleri, metal işleme tesisleri vb.), kentsel yüzey akışları ve Kırşehir-Boztepe bölgesinin karakteristik yerel jeolojik yapısından (toprak ve ana kayaç bileşimi) ileri geldiği değerlendirilmektedir (Minhas ve ark., 2015; Zema, 2019).

Bulguların tarımsal yeniden kullanım potansiyeli açısından değerlendirilmesi amacıyla FAO sulama suyu standart sınır değerleri (Ayers ve Westcot, 1985) baz alınmıştır. Yapılan karşılaştırmada, arsenik (109.13 µg/L) ve alüminyum (5 964.63 µg/L) için saptanan maksimum değerlerin, FAO tarafından tarımsal sulama suları için izin verilen maksimum eşik konsantrasyonları olan sırasıyla 100 µg/L (0.10 mg/L) ve 5 000 µg/L (5.0 mg/L) sınırlarını aştığı belirlenmiştir. Bu durum, söz konusu suların arıtma prosesinde metal giderim üniteleriyle desteklenmeden veya seyreltilmeden uzun vadeli tarımsal sulamada kullanılması halinde, sulanan arazilerde ağır metal birikimine yol açabileceğini göstermektedir. Toprak profilinde yaşanacak bu birikim, toprak kalitesini bozmanın yanı sıra bitkilerde bitki zehirlenmesi riski yaratabilecek ve besin zinciri vasıtasıyla halk sağlığını doğrudan tehdit edebilecek bir potansiyele sahiptir (Gatta ve ark., 2015; Zema ve ark., 2019).

Tablo 4.3. Atıksu arıtma tesisi ve deşarj hattı su örneklerinin ağır metal parametrelerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler

Ağır Metal Parametreleri	Ortalama	Standart Sapma	Çarpıklık	Basıklık	Minimum	Maksimum
Pb (µg/L)	2.47	4.21	4.44	20.70	0.60	21.65
Cu (µg/L)	5.47	4.30	1.79	2.54	1.52	17.81
Zn (µg/L)	116.24	81.87	0.52	-0.58	8.92	296.91
Cr (µg/L)	2.12	2.58	3.94	16.91	0.43	13.24
Fe (µg/L)	737.62	1 547.93	4.28	19.53	20.23	7 856.63
Mn (µg/L)	289.41	651.31	3.26	10.29	4.46	2 788.19
Co (µg/L)	1.84	4.36	4.07	17.20	0.29	21.28
Ni (µg/L)	8.35	16.64	4.51	21.29	2.06	86.43
Bor (µg/L)	0.26	0.17	2.85	11.04	0.07	1.00
Sn (µg/L)	4.94	2.69	0.32	-0.48	1.02	10.56
Al (µg/L)	404.38	1 161.20	4.75	23.36	9.36	5 964.63
Cd (µg/L)	0.75	0.88	1.71	.*	0.20	1.77
V (µg/L)	4.66	9.08	4.53	21.88	0.50	47.52
Ti (µg/L)	2.52	1.09	0.68	0.28	0.95	5.05
Hg (µg/L)	0.40	0.30	0.71	-1.51	0.11	0.89
As (µg/L)	43.16	25.71	1.32	1.20	16.09	109.13
Se (µg/L)	3.73	6.00	2.23	4.97	0.72	14.47
Sb (µg/L)	0.64	0.47	1.44	1.72	0.21	2.04

.* : Kadmium (Cd) parametresine ait basıklık değerinin hesaplanamamış olması, ilgili veri setindeki geçerli örnek (numune) sayısının istatistiksel basıklık formülünün çalışması için gereken minimum serbestlik derecesi sınırının altında kalmasından kaynaklanmaktadır.

4.1.2. Fizikokimyasal Parametrelerin Mevsimsel Değişimlerine İlişkin Doğrusal Karışık Model Analizi

Atıksu arıtma tesisi su örneklerine ait fizikokimyasal parametrelerinin mevsimsel değişimlerine ilişkin doğrusal karışık model analiz sonuçları Tablo 4.4'te sunulmuştur. pH değerleri yaz döneminde en yüksek (7.9236 ± 0.0510), sonbaharda ise en düşük (7.6312 ± 0.0363) olarak belirlenmiş ve mevsimler arasında anlamlı farklılık göstermiştir ($p = 0.0025$). Bu artış, yaz döneminde su sıcaklığının yükselmesi ve fotosentetik aktivitenin artması ile açıklanabilir. Elektriksel iletkenlik (EC) ve toplam çözünmüş madde (TDS) değerleri, kış ve sonbaharda daha düşük, ilkbahar ve yaz aylarında ise belirgin şekilde artış göstermiştir ($p < 0.05$). Bu durum, yaz aylarında buharlaşmanın artması ve iyonik konsantrasyonun yükselmesi ile ilişkilendirilebilir; Yürütülen benzer çalışmalarda, yüzey ve atıksuların EC değerlerinin mevsimsel değişebileceği benzer

şekilde rapor edilmiştir (Hem, 1985; FAO, 1992; Gülocak, 2019). Askıda katı madde (AKM) kış aylarında nispeten düşük seviyelerde iken, ilkbahar ve yazda yükselmiş, sonbaharda tekrar düşüş göstermiştir; ancak bu mevsimsel değişim istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p = 0.212$). Gözlenen artışlar, biyolojik aktivite ve giriş suundaki askıda katı madde yükü ile ilişkilendirilebilir.

Kasyon ve anyon parametrelerinden Ca, Na, K, Mg, HCO_3 ve Cl mevsimsel olarak anlamlı farklılık göstermiştir ($p < 0.05$). Ca ve Na en yüksek değerlerini ilkbaharda alırken, Mg ve K kış ve yaz aylarında pik değerler göstermiştir. HCO_3 konsantrasyonu ilkbaharda belirgin şekilde artmış, Cl ise ilkbahar ve yazda yükselmiştir. Bu değişimler, giriş suyunun mineral ve iyonik içeriğindeki mevsimsel farklılıklar ve akış koşullarıyla uyumludur. Benzer gözlemler, Gülocak (2019) tarafından yürütülen çalışmada da rapor edilmiştir.

Azot ve fosfor bileşikleri incelendiğinde, NH_4 ilkbaharda maksimum değere ulaşmış ($p < 0.001$), nitrit kış ve ilkbaharda artış göstermiştir ($p = 0.039$), nitrat ise yıl boyunca görece stabil kalmış ve anlamlı fark göstermemiştir ($p = 0.587$). Fosfor (P) ve fosfat (PO_4) değerleri özellikle ilkbaharda yüksek bulunmuş, yaz ve sonbaharda düşüş göstermiştir (sırasıyla $p = 0.010$ ve $p < 0.001$). Bu durum, biyolojik dönüşüm süreçlerinin (nitrifikasyon ve denitrifikasyon) sıcaklık ve çözünmüş oksijen koşullarına duyarlılığı ile açıklanabilir. Literatürde, Kırklareli ilinde yürütülen Gülocak (2019) yüksek lisans tezinde mevsimsel olarak alınan arıtılmış ve doğal su örneklerinde azot bileşenlerinin dönemsel farklılık gösterdiği, nitratın daha stabil kaldığı ve NH_4 ile nitrit düzeylerinin sıcaklık ve su kalitesi koşullarına göre değiştiği bildirilmiştir. Bu gözlemler, çalışmamızdan elde edilen bulguların bölgesel literatürle uyumlu olduğunu desteklemektedir.

BOI_5 , KOI ve yağ/gres değerlerinde ise mevsimsel farklılık anlamlı bulunmamış ve yıl boyunca stabil kalmıştır ($p > 0.05$), bu durum arıtma sisteminin bu parametrelerde mevsimsel değişimlere karşı tutarlı performans sergilediğini göstermektedir.

Öte yandan, arıtılmış atıksuların bünyesinde barındırdığı organik yük (BOI_5 , KOI) ile azot ve fosfor bileşikleri, bitkiler için önemli bir besin kaynağı (fertilizasyon/gübreleme etkisi) oluşturmaktadır. Çataloluk (2025), tuza toleranslı bir bitki olan mısır yetiştiriciliğinde en yüksek verimin 1 861 kg/da ile Konya AAT deşarj suyuyla sulanan parselden, ikinci en yüksek verimin ise 1 572 kg/da ile UF membran çıkışından elde edildiğini vurgulamıştır. Benzer şekilde Çay (2013) tarafından yapılan bitki analizlerinde, kentsel atıksu kullanımının mısır bitkisinin N içeriğini kök, toprak üstü aksam ve danede;

P içeriğini kök ve danede; Mg içeriğini ise kök ve danede belirgin şekilde artırdığı saptanmıştır. Toprak analizlerinde de atıksu kullanımıyla toprağın N, P, K ve organik madde içeriklerinin zenginleştiği vurgulanmıştır. Bu bulgular, çalışmamız kapsamında Boztepe drenaj kanalı hattı boyunca saptanan yüksek organik yük (BOİ₅: 31.64 mg/L, KOİ: 63.95 mg/L) ve azot-fosfor bileşiklerinin, tarımsal üretimde verim artırıcı ve bitkiyi besleyici bir potansiyele sahip olduğunu doğrudan doğrulamaktadır. Ancak atıksuyun bu besleyici gücü tarımsal açıdan bir avantaj gibi görünse de, drenaj kanal güzergâhı boyunca saptanan yüksek nütrient yükünün son alıcı ortam olan Seyfe Gölü ekosisteminde ötrofikasyon riski yaratacağı göz ardı edilmemelidir.

İyonik yük göstergesi olan florür (F) ve sülfat (SO₄) parametreleri de mevsimsel olarak değişim göstermiştir ($p < 0.05$). Florür ilkbaharda en yüksek değere ulaşmış, diğer mevsimlerde düşüş göstermiştir; sülfat ise kışta düşük, ilkbahar ve yazda yükselmiş, sonbaharda tekrar azalmıştır. Bu değişimler, tesis giriş suyunun mineral çözünürlüğü ve mevsimsel iyonik katkılarla açıklanabilir.

Genel olarak, çalışmadan elde edilen bulgular suyun iyonik ve besin elementlerinin mevsimsel olarak değişebileceğini, organik kirlilik ve yağ parametrelerinin ise stabil kaldığını göstermektedir. Mevsimsel farklılıkların gözlenmesi, çalışmanın yürütüldüğü alanın hidrojeokimyasal özellikleri, iklim koşulları ve yerel kirlilik kaynakları ile ilişkilendirilebilir.

Tablo 4.4. Atıksu arıtma tesisi ve deşarj hattı fizikokimyasal parametrelerinin mevsimsel değişimlerine ilişkin doğrusal karışık model analiz sonuçları

Mevsim	Ort.± SH	p	Ort.± SH	p	Ort.± SH	p
	pH		EC		ÇO	
Kış	7.744± 0.033 ^b	0.003	99.938±3.331 ^b	0.001	4.483±0.330	0.049
İlkbahar	7.724± 0.036 ^{bc}		121.250±3.673 ^a		4.286±0.363	
Yaz	7.924± 0.051 ^a		123.140±5.137 ^a		3.791±0.508	
Sonbahar	7.631± 0.036 ^c		121.020±3.673 ^a		3.025±0.363	
	Ca		Mg		Na	
Kış	116.300±4.617 ^a	< 0.001	17.999±1.331 ^b	< 0,001	65.379±5.527 ^b	< 0.001
İlkbahar	192.100±5.089 ^b		35.553±1.468 ^a		161.970±6.093 ^a	
Yaz	138.500±7.119 ^{bc}		22.642±2.053 ^b		78.7567±8.522 ^b	
Sonbahar	148.940±5.089 ^c		22.004±1.468 ^b		74.499±6.093 ^b	
	K		HCO ₃		Cl	
Kış	19.336±2.473 ^b	< 0.001	432.340±30.703 ^c	< 0.001	74.864±4.906 ^b	< 0.001
İlkbahar	47.263±2.726 ^a		868.240±33.848 ^a		173.420±5.409 ^a	
Yaz	24.343±3.813 ^b		661.690±47.344 ^b		90.667±7.565 ^b	
Sonbahar	24.462±2.726 ^b		323.010±33.848 ^c		90.839±5.409 ^b	
	NO ₂		NO ₃		NH ₄	
Kış	0.454±0.711	0.039	29.802±3.724	0.587	29.472±3.266 ^b	< 0.001
İlkbahar	3.136±0.784		37.488±4.105		60.988±3.601 ^a	
Yaz	0.057±1.096		35.035±5.742		38.3531±5.036 ^b	
Sonbahar	N.D.		34.011±4.105		36.692±3.601 ^b	
	SO ₄		P		PO ₄	
Kış	32.854±2.687 ^b	0.004	2.858±0.448 ^{ab}	0.010	14.689±1.767 ^b	< 0.001
İlkbahar	49.782±2.962 ^a		1.761±0.494 ^b		41.200±1.948 ^a	
Yaz	47.990±4.143 ^a		5.234±0.810 ^a		12.528±2.724 ^b	
Sonbahar	40.485±2.962 ^a		3.777±0.494 ^{ab}		21.543±1.948 ^b	
	F		AKM		TÇM	
Kış	1.130±0.410 ^b	0.001	70.250±37.468	0.212	621.390±26.694 ^c	< 0.001
İlkbahar	2.910±0.452 ^a		165.790±41.307		1.230,100±29.429 ^a	
Yaz	N.D. ^B		153.110±57.776		841.120±41.162 ^b	
Sonbahar	0.228±0.452 ^b		55.676±41.307		632.530±29.429 ^c	
	TS		BOİ ₅		KOİ	
Kış	364.510±15.303 ^a	< 0.001	26.688±4.089	0.744	55.276±3.966	0.512
İlkbahar	626.070±16.871 ^a		31.568±4.508		60.962±4.372	
Yaz	439.080±23.598 ^{bc}		32.401±6.306		65.179±6.115	
Sonbahar	462.510±16.871 ^b		26.363±4.508		62.251±4.372	
	Yağ-gres					
Kış	2.824±0.204	0.510				
İlkbahar	2.709±0.225					
Yaz	3.285±0.314					
Sonbahar	2.831±0.225					

Not: Aynı sütunda farklı harf taşıyan mevsimler arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlıdır (p < 0.05). Ort: Ortalama, SH: Standart Hata, N.D. (Not Detected): Tayin limitinin altında (Laboratuvarda cihaz ölçüm sınırının altında kalan değerleri ifade eder), pH (birimsiz), EC (µS/cm), TS (mg/L CaCO₃) ve diğer tüm parametrelerin birimi mg/L (miligram/litre) cinsindedir.

4.1.3. Mikrobiyolojik parametrelerin mevsimsel değişimlerine ilişkin doğrusal karışık model analizi

Atıksu arıtma tesisi su örneklerine ait mikrobiyolojik parametrelerinin mevsimsel değişimlerine ilişkin doğrusal karışık model analiz sonuçları Tablo 4.5'te sunulmuştur.

Yapılan analizler sonucunda, Toplam koliform (TK) değerlerinde mevsimler arasında istatistiksel olarak ileri düzeyde anlamlı bir farklılık saptanırken ($p<0.001$), Fekal koliform (FK) değerlerinde gözlenen artış eğilimi istatistiksel sınırdan kalmıştır ($p=0.366$). TK yükü yaz mevsiminde maksimum seviyeye ulaşmış olup (251.549 ± 21.117 EMS/100 mL), kış dönemine (36.914 ± 16.788 EMS/100 mL) oranla yaklaşık 7 katlık bir artış göstermiştir. Benzer şekilde FK yükü de yaz aylarında en yüksek değerine (172.277 ± 36.079 EMS/100 mL) ulaşmıştır. Bu mikrobiyolojik kirlilik yükü, AATTUT (2010) bünyesindeki sulama suyu kriterleri ile kıyaslandığında; A Sınıfı sulama suyu için öngörülen <10 EMS/100 mL ve B Sınıfı için öngörülen <100 EMS/100 mL sınır değerlerini oldukça aşmaktadır.

Uluslararası standartlar (WHO, 2006) açısından değerlendirildiğinde, özellikle gıda güvenliği ve halk sağlığı riski yaratan bu yüksek bakteri yükü, arıtılmış atıksuyun mevcut haliyle tarımsal sulamada kullanılmasının patojen yayılımı açısından ciddi bir tehdit oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Yaz aylarında saptanan bu mikrobiyolojik artış; artan su sıcaklığının bakteriyel üremeyi hızlandırması, düşük debi nedeniyle kirliliğin daha yoğun hale gelmesi ve Boztepe drenaj kanal güzergahı üzerindeki hayvancılık tesisleri ile mera alanlarından gelen organik atık girişlerinin artması ile açıklanabilir. Literatürde de arıtma tesislerinden çıkan suların mikrobiyolojik özelliklerinin sıcaklık, organik madde miktarı ve hidrolik koşullardan önemli ölçüde etkilendiği; bakteriyel yoğunlukların özellikle yaz aylarında artış gösterdiği bildirilmektedir (Chen ve ark., 2008).

TK sayılarının mevsimsel değişiminin FK'ye göre daha belirgin olması, bu grubun yalnızca dışkı kaynaklı olmayıp çevresel ortamlarda da yaygın bulunabilmesi ve uygun sıcaklıklarda çoğalma yeteneği ile ilişkilidir. FK değerlerinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmaması ise arıtma tesisinin yıl boyunca benzer işletme koşullarında çalışması ve birincil kirlenici yükün nispeten stabil kalması ile açıklanabilir (Wen ve ark., 2024).

Türkiye'de arıtılmış atıksu çıkışları üzerine yapılan çalışmalar da benzer sonuçlar ortaya koymaktadır. Kerç ve Evcimen (2011), koliform gideriminde askıda katı madde miktarı ve dezenfeksiyon süreçlerinin kritik olduğunu belirtirken; Alaton ve ark. (2007),

FK'nin atıksu geri kazanım potansiyelini belirlemede temel parametre olduğunu vurgulamıştır. Bunun yanı sıra İzmir Körfezi'nde yapılan bir araştırmada atıksu arıtma tesisinin devreye girmesinden sonra FK yoğunluklarında önemli azalma gözlemlendiği belirtilmiştir (Kaçar ve Güngör, 2010). Bu durum arıtma tesislerinin bakteriyolojik kirliliğin azaltılmasında önemli rol oynadığını göstermektedir.

Sonuç olarak, arıtılmış atıksu çıkışlarında mikrobiyolojik parametrelerin mevsimsel değişim gösterebildiği ve özellikle sıcak dönemlerde bakteriyel yoğunlukların artabildiği görülmektedir. Bu nedenle, arıtılmış atıksuların alıcı ortamlara deşarj edilmeden önce dezenfeksiyon kapasitesinin artırılması ve düzenli olarak izlenmesi, çevresel ekosistem ve halk sağlığının korunması açısından büyük önem taşımaktadır.

Tablo 4.5. Atıksu arıtma tesisi ve deşarj hattı mikrobiyolojik parametrelerinin mevsimsel değişimlerine ilişkin doğrusal karışık model analiz sonuçları

Mevsim	FK (EMS/100 mL)	<i>p</i>	TK (EMS/100 mL)	<i>p</i>
	Ort.±SH		Ort.±SH	
Kış	46 950.00±22 895.00	0.366	36 914.00±16 788.00 ^b	< 0.001
İlkbahar	93 360.00±7 285.57		130 354.00±16 788.00 ^{ab}	
Yaz	172 277.00±36 079.00		251 549.00±21 117.00 ^a	
Sonbahar	114 757.00 ±20 540.00		157 285.00±17 929.00 ^a	

Not: Aynı sütunda farklı harf taşıyan mevsimler arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlıdır ($p < 0.05$). Ort: Ortalama, SH: Standart Hata, EMS/100 mL: En muhtemel Sayı/100 Mililitre.

4.1.4. Ağır metal parametrelerin mevsimsel değişimlerine ilişkin doğrusal karışık model analizi

Atıksu arıtma tesisi su örneklerine ait ağır metal parametrelerinin mevsimsel değişimlerine ilişkin doğrusal karışık model analiz sonuçları Tablo 4.6'da sunulmuştur. Ayrıca çalışmada saptanan ağır metal konsantrasyonları; Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği (AATTUT, 2010) sulama suyu kriterleri ve FAO (Gıda ve Tarım Örgütü) tarımsal limitleri doğrultusunda değerlendirilmiştir.

Ulusal mevzuatımızda evsel atıksu deşarj standartlarında spesifik bir ağır metal limiti yer almadığından; mevcut yükün büyüklüğünü değerlendirebilmek amacıyla, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY) bünyesinde sanayi kollarına tanınan maksimum tolerans sınırları da bir gösterge olarak dikkate alınmıştır. Yapılan analizler sonucunda, incelenen metallerin miktarlarında gözlenen değişimlerin istatistiksel anlamlılığı ve bu değerlerin yasal sınırlarla olan ilişkisi aşağıda ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

Çinko (Zn) konsantrasyonları kış mevsiminde $29.855 \pm 20.238 \mu\text{g/L}$, ilkbaharda $174.860 \pm 20.238 \mu\text{g/L}$, yaz mevsiminde $184.460 \pm 31.279 \mu\text{g/L}$ ve sonbaharda $106.410 \pm 24.786 \mu\text{g/L}$ olarak ölçülmüş ve mevsimler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık göstermiştir ($p = 0.001$). Yaz mevsiminde $184.460 \pm 31.279 \mu\text{g/L}$ ile maksimum seviyeye ulaşan Zn değerleri, FAO tarafından sulama suyu için önerilen $2.000 \mu\text{g/L}$ sınır değerinin ve SKKY bünyesindeki endüstriyel deşarj üst limitlerinin ($5.000 \mu\text{g/L}$) oldukça altında kalmıştır. Bu bulgu, sıcaklık artışı ve askıda katı madde miktarındaki değişimlerin çinko mobilitesini artırdığını belirten literatür verileriyle (Fu ve Wang, 2011) ve Türkiye’de yaz döneminde benzer artışlar saptayan çalışmalarla (Gülocak, 2019; Kerç ve Evcimen, 2011) mevsimsel eğilim açısından paralellik göstermektedir.

Kalay (Sn) miktarlarında yaz döneminde gözlenen ve istatistiksel olarak ileri düzeyde anlamlı bulunan artış ($9.227 \pm 0.552 \mu\text{g/L}$; $p < 0.001$), uluslararası kabul görmüş sulama suyu kriterlerinin (FAO Sınır Değeri: $<5 \mu\text{g/L}$) oldukça üzerindedir. Yaz aylarında maksimum seviyeye ulaşan bu değerler, artan sıcaklığın sedimentten metal desorpsiyonunu tetiklemesi (Hoch, 2001) ve tesis çevresindeki tarım arazilerinde yoğunlaşan pestisit kullanımı ile hayvancılık tesislerindeki dezenfeksiyon işlemlerinden kaynaklanan antropojenik yüklerle açıklanabilir (Rüdel, 2003).

Cıva (Hg) konsantrasyonları ise kış ($0.197 \pm 0.078 \mu\text{g/L}$) ve ilkbahar ($0.676 \pm 0.102 \mu\text{g/L}$) dönemlerinde maksimum değerlerine ulaşmış olup, mevsimsel değişim istatistiksel olarak anlamlıdır ($p = 0.015$). Saptanan Hg düzeylerinin, ulusal mevzuatta sulama suyu için öngörülen katı sınır değerlerin (AATTUT Sınırı: $1 \mu\text{g/L}$) ve genel deşarj standartlarının (SKKY Sınırı: $50 \mu\text{g/L}$) altında kaldığı belirlenmiştir. Özellikle ilkbahar döneminde gözlenen yükselme, kış boyu mera alanlarında biriken atmosferik cıvanın, yağışlar ve kar erimeleriyle yüzey akışı formunda tesis hattına taşınmasından kaynaklanmaktadır (Mason ve Sullivan, 1998).

Antimon (Sb) konsantrasyonları da benzer şekilde yaz döneminde maksimum düzeye ulaşmış olup ($1.472 \pm 0.168 \mu\text{g/L}$), mevsimler arası fark istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p = 0.001$). Saptanan bu değer, uluslararası referans limitlerin (WHO Referans Değeri: $20 \mu\text{g/L}$) altında seyretmektedir. Elementin mevsimsel dalgalanması, çözünürlük değişimlerine ve çevredeki plastik bazlı tarımsal materyallerden sızan antropojenik girdilere işaret etmektedir (Filella ve ark., 2002).

Araştırma bulguları; özellikle Sn gibi ağır metallerin yasal sınırları çok yüksek oranlarda aşan ekstrem konsantrasyonlarının, arıtılmış atıksuyun mevcut haliyle alıcı ortama deşarj edilmesinin ve tarımsal sulamada kullanılmasının yeraltı su kalitesi, toprak

ekosistemi ve gıda güvenliği açısından riskler oluşturabileceğini ortaya koymaktadır. Tesis çıkış suyunun drenaj kanal vasıtasıyla iletilmesi, ağır metallerin yeraltı su kaynaklarına sızmasına ve derin akifer katmanlarına nüfuz etmesine neden olabilecek bir risk doğurmaktadır. Boztepe drenaj kanalı güzergâhı boyunca yer alan tarım arazilerinde bu suların sulama amaçlı kullanılması, ağır metallerin toprak matrisine penetre olması sonucunu doğurmaktadır.

Özellikle yaz aylarında saptanan Sn (9.227 µg/L) ve Zn (184.460 µg/L) değerlerinin, toprağın iyon değişim kapasitesi üzerindeki etkileri ve metallerin bitki kökleri vasıtasıyla hasat edilen ürünlere taşınma potansiyeli halk sağlığının korunması açısından düzenli izleme gerektirmektedir (Alloway, 2013).

Atıksu kullanımına bağlı olarak toprağa taşınan ağır metallerin mobilitesi ve yaratabileceği fitotoksosite riskleri, sulanan arazinin fizikokimyasal yapısı ile doğrudan ilişkilidir. Çataloluk (2025), atıksu kaynaklarındaki yüksek kirletici yükünün, tuza karşı hassas olan marul bitkisinin ticari baş ağırlığında doğrudan düşüşe yol açtığını tespit etmiştir. Mısır bitkisi özelinde derinlemesine analizler yürüten Çay (2013) ise, kentsel atıksu kullanımının sürekliliği ile birlikte Pb ve Ni gibi metallerin düşük miktarlarda da olsa bitkide birikme eğilimi gösterdiğini, Cd içeriğinin ise bitki dokularında yüksek seviyelere ulaştığını, Fe, Zn ve Cu içeriklerinin ise kök, gövde, yaprak ve danede birikim yarattığını saptamıştır. Buna karşın, çalışma alanımız olan Kırşehir-Boztepe lokasyonundaki toprakların yüksek CaCO₃ içeriği (% 15.1) ve hafif alkali pH yapısı (7.95), ağır metallerin toprak matrisine penetre olmasını sınırlandıran güçlü bir tamponlama kapasitesi oluşturmaktadır. Bu karakteristik jeolojik yapı, atıksu kullanımına bağlı metal birikim eğilimini ve olası asitlenmeyi engellemekle birlikte, uzun vadede element mobilitesini sınırlandırarak Çay (2013) ve Çataloluk (2025) çalışmasında belirtilen fitotoksosite ve verim kayıplarını bu bölge toprakları için baskılayabileceğini düşündürmektedir.

Kanal yoluyla son alıcı ortam konumundaki Seyfe Gölü ve sulak alan ekosistemine ulaşan bu kirlilik yükü, ağır metallerin durgun su ortamında sedimente çökerek uzun vadeli bir kirlilik rezervuarı oluşturma riskini artırmaktadır. Sulak alanların doğal filtreleme özelliği nedeniyle, bu metallerin sucul biyota (sazlıklar, omurgasızlar ve balıklar) üzerinde biyobirikim (biyoakümülyasyon) potansiyeli yaratması ve besin zinciri vasıtasıyla göçmen kuşlar ile bölgedeki yaban hayatına ulaşması kaçınılmaz bir ekolojik risk teşkil etmektedir (Vareda ve ark., 2019).

Çalışma kapsamında incelenen diğer ağır metal parametrelerinden Kurşun (Pb), Bakır (Cu), Krom (Cr), Demir (Fe), Mangan (Mn), Kobalt (Co), Nikel (Ni), Bor (B), Alüminyum (Al), Vanadyum (V) ve Titanyum (Ti) konsantrasyonlarının mevsimsel olarak istatistiksel açıdan anlamlı bir farklılık göstermediği saptanmıştır ($p > 0.05$). Bu durum, söz konusu metallerin sisteme giriş yüklerinin ve güzergâh boyunca gerçekleşen çevresel etkileşimlerin (toprak sızıntısı, hayvansal atık karışımı vb.) yıl boyunca belirli bir kararlılık sergilediğini ortaya koymaktadır. Arıtma tesisinin bu parametreler üzerindeki giderim performansı ve alıcı ortamdaki denge koşulları, mevsimsel değişkenlerden (sıcaklık dalgalanmaları veya yağış rejimleri) etkilenmeksizin benzer bir seyir izlemektedir. Literatürde de bazı metal türlerinin su döngüsü içerisinde belirli denge koşullarında seyredebileceği ve kararlı bir arka plan kirliliği oluşturabileceği belirtilmektedir (Salomons ve Förstner, 1984).

Tesisin ve güzergâhın bu 11 ağır metal üzerinde sergilediği bu operasyonel ve çevresel stabiliteye karşın; Sn, Hg, Zn ve Sb gibi parametrelerde saptanan mevsimsel sapmalar, havzadaki kirlilik yükünün homojen olmadığını kanıtlamaktadır. Bu bulgular, bölgedeki çevresel yönetim stratejilerinin sadece genel ağır metal yüküne değil, mevsimsel olarak risk teşkil eden ve yasal sınırları aşan spesifik kirleticilerin takip edilmesi gerektiğini bilimsel olarak ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak; klasik biyolojik arıtma sistemlerinin atıksu çıkış sularındaki ekstrem mikrobiyolojik kirlilik (TK ve FK) ile spesifik ağır metal yükünü (Sn, Hg, Zn, Sb) sulama suyu kriterlerine indirmede yetersiz kaldığı görülmektedir. Çataloluk (2025) farklı su kalitelerini AATTUT kriterlerine göre kıyasladığı araştırmasında geleneksel sistemlerin yetersiz kaldığını ve en güvenli yöntemin ultrafiltrasyon (UF) membran prosesi olduğunu ortaya koymuştur.

Benzer bir yaklaşımla, kentsel atıksuların mevcut içeriklerinden (pH, EC, SAR, AKM, KOİ, BOİ₅, TFK, Cd) dolayı doğrudan kullanımının yasal ve teknik olarak mümkün olmadığını belirten Çay (2013), sulama işletmelerinde mutlak surette tuzluluk kontrolü, mikrobiyolojik arıtım ve ağır metal arıtımı yapılması zorunluluğunu vurgulamıştır; aksi takdirde kontrolsüz karışımların kullanımının toprakların çoraklaşmasını, mikrobiyal kirlenme oranını ve kirliliğin sürekliliğini kaçınılmaz kılacağını doğrulamıştır.

Tüm bu bulgular, hassas alan statüsündeki Seyfe Gölü ekosistemini korumak ve bölgede güvenli tarımsal sulama sağlamak için önerilen ileri membran filtre

teknolojilerine (UF/RO) geçilmesi ve Boztepe drenaj kanalı boyunca yayılı kirlilik kontrolünün yapılması zorunluluğunu bilimsel ve ekolojik bakımdan desteklemektedir.

Tablo 4.6. Atıksu arıtma tesisi ve deşarj hattı ağır metal parametrelerinin mevsimsel değişimlerine ilişkin doğrusal karışık model analiz sonuçları

Mevsim	Ort.± SH	<i>p</i>	Ort.± SH	<i>p</i>	Ort.± SH	<i>P</i>
	Pb		Cu		Zn	
Kış	4.026 ± 0.623	0.445	5.328 ± 1.388	0.818	29.855 ± 20.238 ^b	0.001
İlkbahar	4.214 ± 0.578		7.573 ± 1.388		174.860 ± 20.238 ^a	
Yaz	5.113 ± 0.676		5.503 ± 2.693		184.460 ± 31.279 ^a	
Sonbahar	4.310 ± 0.648		5.552 ± 1.431		106.410 ± 24.786 ^a	
	Cr		Fe		Mn	
Kış	2.424 ± 0.389	0.101	146.050 ± 479.260	0.267	77.702 ± 194.570	0.155
İlkbahar	3.443 ± 0.302		1 418.550 ± 479.260		752.050 ± 194.570	
Yaz	3.526 ± 0.486		1 521.780 ± 740.740		364.150 ± 300.720	
Sonbahar	2.440 ± 0.434		873.530 ± 586.970		369.990 ± 238.290	
	Co		Ni		B	
Kış	0.574 ± 1.293	0.227	3.385 ± 5.033	0.290	0.397 ± 0.060	0.063
İlkbahar	4.581 ± 1.293		17.458 ± 5.033		0.290 ± 0.060	
Yaz	2.895 ± 1.999		13.998 ± 7.780		0.182 ± 0.092	
Sonbahar	2.318 ± 1.584		10.024 ± 6.165		0.127 ± 0.073	
	Sn		Al		Cd	
Kış	1.901 ± 0.357 ^c	< 0.001	36.909 ± 353.760	0.327	.*	-
İlkbahar	5.384 ± 0.357 ^b		974.590 ± 353.760		.*	
Yaz	9.227 ± 0.552 ^a		787.550 ± 546.780		.*	
Sonbahar	5.152 ± 0.437 ^b		518.010 ± 433.270		.*	
	V		Ti		Hg	
Kış	2.869 ± 2.528	0.423	2.661 ± 0.327	0.054	0.197 ± 0.078	0.015
İlkbahar	8.313 ± 2.528		2.794 ± 0.327		0.676 ± 0.102	
Yaz	9.083 ± 3.907		2.537 ± 0.506		N.D.	
Sonbahar	6.3748 ± 3.0962		1.321 ± 0.401		N.D.	
	As		Se		Sb	
Kış	50.962 ± 5.577	0.066	.*	-	0.716 ± 0.109 ^b	0.001
İlkbahar	48.345 ± 5.577		.*		0.494 ± 0.109 ^b	
Yaz	65.719 ± 8.619		.*		1.472 ± 0.168 ^a	
Sonbahar	34.929 ± 6.830		.*		0.4065 ± 0.133 ^b	

Not: Aynı sütunda farklı harf taşıyan mevsimler arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlıdır ($p < 0.05$). Ort: Ortalama, SH: Standart Hata, N.D. (Not Detected): Tayin limitinin altında (Laboratuvarda cihaz ölçüm sınırının altında kalan değerleri ifade eder), .* Mevsim gruplarındaki örnek (numune) sayısının istatistiksel karşılaştırma ve analizler için yetersiz olması nedeniyle, Kadmiyum (Cd) ve Selenyum (Se) parametrelerine ait mevsimsel tanımlayıcı istatistikler ve *p*-değerleri hesaplanamamıştır. Tabloda sunulan tüm ağır metal parametrelerinin birimi µg/L (mikrogram/litre) cinsindedir.

4.2. Toprakların Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerine İlişkin Bulgular

4.2.1. Toprakların bünye özellikleri

Toprakların fiziksel özelliklerinin başında gelen bünye sınıfları, sulama ve bitki besleme yönetimi açısından temel teşkil etmektedir. Tesis çıkış suyunun deşarj edildiği kanal hattı boyunca arıtılmış atıksu ile sulanan tarım arazileri (T1–T10) ile kanalın etki

alanı dışında kalan kontrol grubu topraklarından (K1–K10) alınan örneklerin kum, silt ve kil içerikleri ile bu değerlere göre belirlenen bünye sınıfları Tablo 4.7'de sunulmuştur.

Tablo 4.7 incelendiğinde, araştırma alanı toprak örneklerinin kum, silt ve kil içeriklerinin dağılımı ile bu dağılıma bağlı olarak belirlenen USDA bünye sınıfları görülmektedir. Elde edilen bulgular, çalışma alanı topraklarının homojen bir tekstür sergilemediğini, aksine lokasyonlar bazında belirgin varyasyonlar barındırdığını ortaya koymaktadır. Arıtılmış atıksu ile sulanan tarım arazilerinden alınan örneklerde (T1–T10), kil içeriklerinin %18.97 ile %58.55 gibi oldukça geniş bir aralıkta değişim gösterdiği saptanmıştır. Bu gruptaki 10 lokasyonun 7'sinde (T1, T4, T5, T7, T8, T9, T10) baskın bünye sınıfı Kil (C) olarak belirlenirken; T6 istasyonu Killi Tın (CL), T2 ve T3 istasyonları ise yüksek kum içeriğiyle (%71.72) karakterize olan Kumlu Tın (SL) sınıfında yer almıştır.

Kontrol grubu toprak örnekleri (K1–K10) incelendiğinde ise kil içeriğinin %29.80 ile %48.13 arasında değiştiği görülmektedir. Bu grupta kontrol arazilerinin büyük bir bölümünün (%70) Killi Tın (CL) karakterinde olduğu, K1, K2 ve K3 lokasyonlarının Kil (C) sınıfına dahil olduğu, K5 istasyonunun ise Kumlu Killi Tın (SCL) bünyesinde yer aldığı tespit edilmiştir.

Toprakların bünye (tekstür) özellikleri kısa vadeli tarımsal faaliyetler veya sulama uygulamaları gibi antropojenik etkilerle değişmeyen, jeolojik ve pedojenik süreçler tarafından belirlenen kalıcı bir fiziksel özelliktir (Soil Survey Staff, 1993). Dolayısıyla, atıksu deşarj hattı (T) ve kontrol (K) gruplarında gözlenen bu yapısal farklılıklar, sulama uygulamalarının bir sonucu olmayıp, çalışma alanının mikrotopografyası ve ana materyal heterojenliği ile açıklanmaktadır.

Bununla birlikte, hem atıksu hattında (% 70 Kil) hem de kontrol grubunda (% 70 Killi Tın ve Kil) ince unsurlu (killi) oranlarının baskın olması, sulama suyunun toprağa uzun vadeli etkileri açısından kritik önem taşımaktadır. Önceki bölümlerde (Bkz. Tablo 4.1) tartışıldığı üzere, sulama suyu olarak kullanılan arıtılmış atıksuyun sodyum ve özellikle FAO kriterlerine göre "ciddi kısıtlı" sınıfına giren bikarbonat yükü oldukça yüksektir. Kil ve killi tın bünyeli bu ağır yapı, yüksek bikarbonat etkisiyle kalsiyumun karbonat şeklinde çökmesine ve sodyum iyonlarının kil kompleksinde birikerek agregat stabilitesini bozmasına (dispersiyon) karşı son derece hassastır (Hem, 1985). İnce tekstürlü bu toprakların düşük infiltrasyon hızı ve yüksek su tutma kapasitesi, arıtılmış atıksu içeriğindeki iyonik yüklerin ve potansiyel tuzluluk riskinin profil içinde birikme potansiyelini artırmaktadır.

Sonuç olarak, bünye analizi bulguları, arıtılmış atıksu uygulaması yapılan arazilerde toprak fiziğinin ve geçirgenlik yapısının korunması adına periyodik tuzluluk ve sodyumlaşma takibinin zorunlu olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.7. Arıtılmış atıksu ile sulanan ve kontrol grubu toprak örneklerinin bünye özellikleri (0–30 cm)

Örnek No	% Kil	% Silt	% Kum	Bünye sınıfı
T1	58.55	20.65	20.80	Kil (C)
T2	18.97	9.31	71.72	Kumlu Tın (SL)
T3	18.97	9.31	71.72	Kumlu Tın (SL)
T4	56.47	18.57	24.97	Kil (C)
T5	50.22	18.57	31.22	Kil (C)
T6	37.72	26.90	35.38	Killi Tın (CL)
T7	48.13	26.90	24.97	Kil (C)
T8	54.38	20.65	24.97	Kil (C)
T9	54.38	24.82	20.80	Kil (C)
T10	56.47	20.65	22.88	Kil (C)
K1	41.88	26.90	31.22	Kil (C)
K2	48.13	26.90	24.97	Kil (C)
K3	48.13	26.90	24.97	Kil (C)
K4	39.80	26.90	33.30	Killi Tın (CL)
K5	29.80	22.73	47.88	Kumlu Killi Tın
K6	39.80	31.07	29.13	Killi Tın (CL)
K7	37.72	31.07	31.22	Killi Tın (CL)
K8	37.72	28.98	33.30	Killi Tın (CL)
K9	39.80	28.98	31.22	Killi Tın (CL)
K10	39.80	26.90	33.30	Killi Tın (CL)

Not: Bünye sınıfları ve kısaltmaları USDA (Soil Survey Staff, 1993) sistemine göre tanımlanmıştır.

4.2.2. Arıtılmış atıksu ile sulanan toprakların fiziksel ve kimyasal özellikleri

Arıtılmış atıksu ile sulanan toprakların fiziksel ve kimyasal özelliklerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler Tablo 4.8’de sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre; sezon başında ortalama % 67.70 (Min: 53.00, Max: 88.00) olan saturasyon değeri, sezon sonunda % 67.20 (Min: 54.00, Max: 78.00) seviyesinde gerçekleşmiştir. Toprakların ortalama pH (7.95) değerleri, FAO (1985) ve Ülgen ve Yurtsever (1995 tarafından bildirilen sınıflandırma kriterlerine göre 'Hafif Alkali' sınıfta yer almaktadır. Bu değerlerin her iki dönemde de 7.76–8.18 aralığında seyretmesi, çalışma alanı topraklarının kireçli ve tamponlama kapasitesi yüksek bir karaktere sahip olduğunu yansıtmaktadır. Bu kararlılık, kireçli toprakların dış müdahalelere ve asitlenmeye karşı gösterdiği direnci vurgulayan Kızılkaya ve ark. (2005) tarafından yapılan çalışma bulgularıyla benzerlik göstermektedir.

Arıtılmış atıksuların uzun vadeli tarımsal sulamada kullanılması, toprak profilinde çözünmüş tuzların ve spesifik iyonların birikme eğilimini artırmaktadır. Çalışmamızda Mayıs ayında ortalama 0.61 dS/m olan toprak EC değerinin sezon sonunda %8.2’lik bir

artışla 0.66 dS/m'ye yükselmesi ve sodyum (Na) ile klorür (Cl) iyonlarındaki dalgalanmalar bu birikim eğilimini doğrulamaktadır. Çataloluk (2025) tarafından gerçek tarla koşullarında yürütülen denemelerde de ham ve arıtılmış atıksu uygulamalarının toprakta tuzluluk parametrelerini (EC, Na, SAR, bor, klorür) belirgin şekilde artırdığı rapor edilmiştir. Benzer şekilde, kentsel atıksuların mısır yetiştiriciliğindeki etkilerini inceleyen Çay (2013)'da atıksu kaynaklı suların kullanımıyla toprak pH'nın hafif azalış gösterdiğini, buna karşın toprak EC değerlerinin ve sodyum iyonlarının kararlı bir artış eğilimine girdiğini saptamıştır. Hem literatür bulguları hem de Çay (2013) çalışmasıyla paralellik gösteren bu kısıtlı iyon birikimi, Boztepe drenaj hattı topraklarımızda ölçülen EC değerinin (0.66 dS/m) 'Tuzsuz'(0-2 dS/m) kategoride kalması nedeniyle, kısa vadede bitki gelişimi açısından belirgin bir risk teşkil etmemektedir (Ülgen ve Yurtsever, 1995).

Tablo 4.8. Arıtılmış atıksu ile sulanan toprakların fiziksel ve kimyasal özelliklerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler

Değişken	Birim	n	Dönem	M	SD	Ortanca	Min	Max
Saturasyon	-	10	Ekim	67.20	8.15	68.50	54.00	78.00
			Mayıs	67.70	12.49	65.50	53.00	88.00
pH	-	10	Ekim	7.95	0.11	7.99	7.78	8.18
			Mayıs	7.95	0.13	7.92	7.76	8.15
EC	dS/m	10	Ekim	0.66	0.09	0.67	0.53	0.79
			Mayıs	0.61	0.14	0.58	0.45	0.91
CaCO ₃	%	10	Ekim	15.20	6.46	15.49	6.04	29.47
			Mayıs	14.93	6.64	14.27	7.19	31.18
OM	%	10	Ekim	1.81	0.49	1.70	1.26	2.63
			Mayıs	1.40	0.45	1.36	0.95	2.22

Not. M = Aritmetik Ortalama; SD = Standart Sapma; Min = Minimum; Max = Maksimum. n = 10 toprak örneği.

Toprağın saturasyon oranı (% 67.2), numunelerin ağır bünyeli (killi-tınlı) bir yapıya sahip olduğunu; CaCO₃ içeriği ise (% 15.1) toprağın 'Çok Kireçli' kategorisinde yer aldığını göstermektedir. Bu yüksek CaCO₃ miktarı, pH değişimlerine karşı güçlü bir direnç (tamponlama kapasitesi) oluşturarak atıksu kullanımına bağlı asitlenmeyi engellemekte; ancak bazı mikro besin elementlerinin (özellikle demir, çinko, mangan ve bor) bitki tarafından alınımını kısıtlayabilmektedir (Ülgen ve Yurtsever, 1995).

Ekim ve Mayıs dönemleri arasındaki fark değerlerinin istatistiksel dağılım özelliklerini belirlemek amacıyla uygulanan Shapiro-Wilk normallik testi sonuçları Tablo 4.9'da sunulmuştur. Analiz sonucuna göre; saturasyon ($p = 0.629$), pH ($p = 0.505$), EC (p

= 0.579), CaCO₃ ($p = 0.490$) ve organik madde ($p = 0.721$) değişkenlerine ait fark puanlarının tamamının $p > 0.05$ düzeyinde olduğu ve normal dağılım gösterdiği saptanmıştır. Bu bulgular doğrultusunda, parametrik test varsayımlarının karşılandığı belirlenmiş ve değişimlerin anlamlılığı eşleştirilmiş örneklem t -testi ile analiz edilmiştir (Tablo 4.10).

Tablo 4.9. Arıtılmış atıksu ile sulanan toprakların fiziksel ve kimyasal özelliklerine ait dönemsel farkların normallik testi sonuçları

Değişken	N	W	p	Karar
Saturasyon	10	0.9467	0.629	Normal dağılım ($p > 0.05$)
pH	10	0.9356	0.505	Normal dağılım ($p > 0.05$)
EC	10	0.9423	0.579	Normal dağılım ($p > 0.05$)
CaCO ₃	10	0.9341	0.490	Normal dağılım ($p > 0.05$)
OM	10	0.9544	0.721	Normal dağılım ($p > 0.05$)

Not. W = Shapiro-Wilk test istatistiği. $n = 10$ toprak örneği. $p > 0.05$ olduğunda fark puanları normal dağılım göstermektedir; bu durumda eşleştirilmiş örneklem t -testi uygulanmıştır. $p < 0.05$ olduğunda Wilcoxon işaretli sıralar testi tercih edilmiştir.

Arıtılmış atıksu ile sulanan toprakların fiziksel ve kimyasal özelliklerinde zamana bağlı meydana gelen değişimlerin istatistiksel önem düzeyi, eşleştirilmiş örneklem t -testi ile analiz edilmiş ve sonuçlar Tablo 4.10'da özetlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre; Ekim ve Mayıs dönemleri arasında incelenen saturasyon, pH, EC ve kireç parametreleri bakımından istatistiksel olarak anlamlı bir fark tespit edilmemiştir ($p > 0.05$). Bu bulgu, arıtılmış atıksu deşarjının ve drenaj hattı üzerindeki çevresel faktörlerin, toprağın temel yapısal özelliklerini, kalsiyum karbonat dengesini ve tuzluluk düzeyini kısa vadede belirgin bir şekilde değiştirmediğini ortaya koymaktadır. Buna karşın, organik madde miktarında Mayıs (% 1.40) ve Ekim (% 1.81) dönemleri arasında istatistiksel olarak yüksek düzeyde anlamlı bir artış ($t = 3.399$; $p = 0.008 < 0.01$) tespit edilmiştir. Söz konusu değişimin etki büyüklüğü (Cohen's $d = 1.075$) 'büyük' kategorisinde yer almaktadır. Organik maddedeki %29.29'luk yükselişin, arıtılmış atıksu içeriğindeki organik karbonun yanı sıra drenaj kanalı hattı boyunca konumlanan hayvancılık işletmelerinden kaynaklı organik yüklerden ileri geldiği değerlendirilmektedir. Organik maddedeki artışın toprak fiziksel özelliklerini iyileştirdiği bilinmekle birlikte (Brady ve Weil, 2017), mevcut değerlerin Ülgen ve Yurtsever (1995) sınıflandırmasına göre halen 'Az' (% 1-2)

düzeyinde kalması, toprağın sürdürülebilir bir yapı için düzenli olarak organik takviyeye ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Özetle; toprak özellikleri mevzuat sınırları dahilinde seyretmekte olup, atıksu uygulaması organik madde miktarını artırarak toprak kalitesinin iyileşmesine katkı sunmaktadır.

Tablo 4.10. Arıtılmış atıksu ile sulanan toprakların fiziksel ve kimyasal özelliklerine ait dönemsel değişimlerin eşleştirilmiş t-testi sonuçları

Değişken	Test	Test İstatistiği	sd	p	Etki Büyüklüğü	Sonuç
Satürasyon	Eşleştirilmiş <i>t</i>	<i>t</i> = -0.117	9	0.910	Cohen's <i>d</i> = 0.037	Anlamlı fark yok
pH	Eşleştirilmiş <i>t</i>	<i>t</i> = 0.168	9	0.871	Cohen's <i>d</i> = 0.053	Anlamlı fark yok
EC	Eşleştirilmiş <i>t</i>	<i>t</i> = 1.294	9	0.228	Cohen's <i>d</i> = 0.409	Anlamlı fark yok
CaCO ₃	Eşleştirilmiş <i>t</i>	<i>t</i> = 0.407	9	0.694	Cohen's <i>d</i> = 0.129	Anlamlı fark yok
OM	Eşleştirilmiş <i>t</i>	<i>t</i> = 3.399	9	0.008**	Cohen's <i>d</i> = 1.075	Anlamlı fark var

Not. *sd* = serbestlik derecesi. Etki büyüklüğü: Eşleştirilmiş *t*-testi için Cohen's *d* (küçük = 0.20, orta = 0.50, büyük = 0.80); Wilcoxon testi için *r* (küçük = 0.10, orta = 0.30, büyük = 0.50) rapor edilmiştir (Cohen, 1988). **p* < 0.05, ***p* < 0.001, ****p* < 0.001.

4.2.3. Kontrol grubu toprakların fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kontrol grubu toprak topraklarının fiziksel ve kimyasal özelliklerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler Tablo 4.11'de sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre; Ekim dönemi satürasyon ortalamasının (*M* = 61.00), Mayıs dönemine (*M* = 52.90) kıyasla istatistiksel olarak anlamlı düzeyde yüksek olduğu saptanmıştır (*p* < 0.001). Bu durumun, sonbahar yağış rejimi ve ilkbahardaki yüksek evapotranspirasyon kayıpları arasındaki dengeden kaynaklandığı değerlendirilmektedir; ayrıca % 52-61 aralığındaki değerler toprağın 'Ağır Bünyeli' yapısını göstermektedir. Ekim dönemi ortalama EC değerleri (*M* = 0.74 dS/m), Mayıs dönemine (*M* = 0.56 dS/m) oranla anlamlı düzeyde yüksek bulunmuştur (*p* = 0.049, Tablo 4.12). Sezon sonundaki bu artış, yaz aylarındaki yoğun buharlaşma sonucu toprak yüzeyinde biriken çözünabilir tuzların profildeki mevcudiyeti ile ilişkilendirilmektedir. Mayıs döneminde gözlenen düşüşün ise, ilkbahar yağışlarının sağladığı yıkama etkisiyle tuz konsantrasyonunun azalmasından ileri geldiği düşünülmektedir. Her iki dönemde de elde edilen değerlerin Richards (1954) ve Ülgen ve Yurtsever (1995) tarafından bildirilen sınır değerlere göre 2 dS/m'nin altında kalan bu

sonuçlar, toprakların 'tuzsuz' sınıfında yer aldığını ve kullanılan sulama suyunun toprakta henüz bir tuzluluk riski oluşturmadığını kanıtlamaktadır.

Toprakların pH değeri her iki dönemde de (7.81-7.78) 'Hafif Alkali' karakter sergilemiş ve dönemler arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p > 0.05$). pH düzeylerinin 7.57–8.04 aralığında sabit kalması, Ülgen ve Yurtsever (1995) kriterleriyle uyumlu olup; bu stabilite, arazinin 'Fazla Kireçli' (% 15.19-% 16.36) yapısının sağladığı güçlü tamponlama kapasitesiyle açıklanmaktadır. Kireç içeriği, büyük ölçüde ana materyalin jeolojik yapısıyla belirlenen ve kısa vadeli mevsimsel değişimlerden belirgin biçimde etkilenmeyen bir toprak özelliğidir. Organik madde içeriğinde ise Ekim dönemi ortalaması (%1.73), Mayıs döneminden (%1.30) yüksek olsa da fark istatistiksel anlamlılık eşiğine ulaşmamıştır ($p = 0.068$, Tablo 4.12). Ancak p değerinin sınırda olması ve orta-büyük etki büyüklüğü, sonbaharda biriken bitki artıklarının ilkbahardaki mikrobiyal dekompozisyon süreciyle azalma eğilimine girdiğine ve arazinin genel olarak 'az' (%1-2) organik madde seviyesine sahip olduğuna işaret etmektedir (Brady ve Weil, 2017).

Sonuç olarak, kontrol noktalarındaki toprakların fiziksel ve kimyasal profili; hafif alkali, tuzsuz ve kireçli bir yapı göstermekte olup, gözlenen dönemsel farklılıklar toprağın tarımsal sınıfını değiştirmeyen mevsimsel dinamiklerden kaynaklanmaktadır.

Tablo 4.11. Kontrol grubu toprakların fiziksel ve kimyasal özelliklerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler

Değişken	Birim	N	Dönem	M	SD	Ortanca	Min	Max
Saturasyon	-	10	Ekim	61.00	6.02	62.00	53.00	71.00
			Mayıs	52.90	6.82	53.00	38.00	64.00
pH	-	10	Ekim	7.8050	0.1132	7.8300	7.66	7.99
			Mayıs	7.7780	0.1377	7.7750	7.57	8.04
EC	dS/m	10	Ekim	0.7431	0.2309	0.6824	0.51	1.32
			Mayıs	0.5588	0.1270	0.5530	0.35	0.75
CaCO ₃	%	10	Ekim	16.3553	6.9946	14.6157	6.11	28.75
			Mayıs	15.1933	8.1672	15.0646	1.21	29.59
OM	%	10	Ekim	1.7313	0.8218	1.7097	0.32	2.98
			Mayıs	1.2959	0.5124	1.0734	0.90	2.42

Not. M = Aritmetik Ortalama; SD = Standart Sapma; Min = Minimum; Max = Maksimum. n = 10 toprak örneği.

Ekim ve Mayıs dönemleri arasındaki fark değerlerinin istatistiksel dağılım özelliklerini belirlemek amacıyla uygulanan Shapiro-Wilk normallik testi sonuçları Tablo 4.12’de sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre; saturasyon, pH, kireç ve organik madde değişkenlerinde normallik varsayımı karşılanırken ($p > 0.05$), elektriksel iletkenlik (EC)

değişkeninde normal dağılım göstermediği ($W = 0.8312$, $p = 0.035$) saptanmıştır. Bu doğrultuda EC için parametrik olmayan Wilcoxon işaretli sıralar testi, diğer değişkenler için ise eşleştirilmiş örneklem t -testi uygulanmıştır (Tablo 4.13).

Tablo 4.12. Kontrol grubu toprakların fiziksel ve kimyasal özelliklerine ait dönemsel farkların normallik testi sonuçları

Değişken	n	W	p	Karar
Saturasyon	10	0.9285	0.433	Normal dağılım ($p > 0.05$)
pH	10	0.8646	0.086	Normal dağılım ($p > 0.05$)
EC	10	0.8312	0.035	Normal dağılım ($p < 0.05$)
CaCO ₃	10	0.9679	0.871	Normal dağılım ($p > 0.05$)
OM	10	0.9574	0.756	Normal dağılım ($p > 0.05$)

Not. W = Shapiro-Wilk test istatistiği. $n = 10$ toprak örneği. $p > 0.05$ olduğunda fark puanları normal dağılım göstermektedir; bu durumda eşleştirilmiş örneklem t -testi uygulanmıştır. $p < 0.05$ olduğunda Wilcoxon işaretli sıralar testi tercih edilmiştir.

Tablo 4.13. Kontrol grubu toprakların fiziksel ve kimyasal özelliklerine ait dönemsel değişimleri eşleştirilmiş karşılaştırma sonuçları

Değişken	Test	Test İstatistiği	sd	p	Etki Büyüklüğü	Sonuç
Saturasyon	Eşleştirilmiş t	$t = 5.035$	9	< 0.001***	Cohen's $d = 1.592$	Anlamlı fark var
pH	Eşleştirilmiş t	$t = 0.644$	9	0.535	Cohen's $d = 0.204$	Anlamlı fark yok
EC	Wilcoxon	$W = 8.0$	-	0.049*	$r = 0.623$	Anlamlı fark var
CaCO ₃	Eşleştirilmiş t	$t = 1.525$	9	0.162	Cohen's $d = 0.482$	Anlamlı fark yok
OM	Eşleştirilmiş t	$t = 2.078$	9	0.068	Cohen's $d = 0.657$	Anlamlı fark yok

Not. sd = serbestlik derecesi. Etki büyüklüğü: Eşleştirilmiş t -testi için Cohen's d (küçük = 0.20, orta = 0.50, büyük = 0.80); Wilcoxon testi için r (küçük = 0.10, orta = 0.30, büyük = 0.50) rapor edilmiştir (Cohen, 1988). * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

4.3. Toprakların Besin Elementi İçeriklerine İlişkin Bulgular

4.3.1. Artırılmış atıksu ile sulanan toprakların yarayışlı besin elementi içerikleri

Artırılmış evsel atıksu ile sulanan toprakların besin elementlerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler Tablo 4.14'te verilmiştir. Elde edilen bulgular, literatürde kabul edilen yeterlilik sınırları (Ülgen ve Yurtsever, 1995; FAO, 2021) ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Makro Elementler (P₂O₅, K₂O, Ca, Mg): Fosfor (P₂O₅) içeriği Ekim döneminde 8.88 kg/da, Mayıs döneminde 11.67 kg/da olarak saptanmıştır. Mayıs ayındaki artış

istatistiksel anlamlılık eşiğine ulaşmasa da ($p = 0.070$), değerler literatürdeki 'yeterli' (8-12 kg/da) sınırlar içerisinde kalmıştır. Bu eğilim, ilkbaharda artan toprak sıcaklığına bağlı olarak hızlanan organik fosfor mineralizasyonu ile ilişkilendirilmektedir (Havlin ve ark., 2014). Potasyum (K_2O) içerikleri (192.13–215.33 kg/da), 'Çok Yüksek' (> 40 kg/da) kategorisinde yer almakta olup, potasyumun kil mineralleri tarafından güçlü fiksasyonu nedeniyle dönemler arası anlamlı bir fark saptanmamıştır (Sparks, 2003). Kalsiyum (Ca) içeriğinde gözlenen değişim ise istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0.001$). Ekim ($M = 5\,991.81$ mg/kg) ve Mayıs ($M = 7\,165.97$ mg/kg) dönemleri arasındaki bu 'çok yüksek' ($> 3\,500$ mg/kg) düzeydeki artış; ilkbahar yağışlarıyla kireçli ana materyalden çözünen kalsiyum karbonatın toprak çözeltisine geçişiyle açıklanabilir (Brady ve Weil, 2017). Magnezyum (Mg) içerikleri (1 382.97–1 431.21 mg/kg) ise 'çok yüksek' (> 250 mg/kg) ve stabil bir profil sergilemiştir ($p = 0.381$). Sulama sezonu sonunda (Ekim), başlangıç dönemine (Mayıs) oranla fosfor ve potasyum değerlerinde gözlenen azalma, atıksu ile gelen besin takviyesine rağmen bitkisel üretimin (hasat) topraktaki besin stoklarını hızlı bir şekilde tükettiğini göstermektedir.

Araştırma alanındaki mikro elementler içerikleri FAO, 2021 yeterlilik sınırları (Fe: 4.5; Cu: 0.2; Zn: 0.5-1, Mn: 2.0 mg/kg) ile kıyaslanmıştır. Buna göre; araştırma alanındaki toprakların Demir (9.11- 8.51 mg/kg), Bakır (2.33-2.45 mg/kg) ve Mangan (6.07-6.30 mg/kg) konsantrasyonlarının bitki gelişimi için 'yeterli' düzeyde olduğu ve mevsimsel olarak istatistiksel anlamda bir değişim göstermemiştir ($p > 0.05$). Alkali pH koşulları ve organik madde kompleksleri bu elementlerin kararlılığını desteklemektedir (Lindsay and Norvell, 1978; Alloway, 2013). Ancak çinko (Zn) içeriklerinin her iki dönemde de 1 mg/kg'ın altında ($M = 0.60-0.64$ mg/kg) seyretmesi, alkali ve kireçli topraklarda yaygın görülen 'yetersiz/noksan' riskine işaret etmektedir (Alloway, 2008).

Tablo 4.14. Arıtılmış atıksu ile sulanan toprakların yarayışlı besin elementi içeriklerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler

Değişken	Birim	n	Dönem	M	SD	Ortanca	Min	Max
P ₂ O ₅	kg/da	10	Ekim	8.88	4.26	8.63	2.17	15.65
			Mayıs	11.66	5.95	10.98	3.76	24.70
K ₂ O	kg/da	10	Ekim	192.13	65.50	179.16	107.18	283.72
			Mayıs	215.33	44.05	209.03	159.42	309.76
Ca	mg/kg	10	Ekim	5 991.81	797.32	5 680.95	5 040.25	7 339.39
			Mayıs	7165.97	681.61	6965.10	6122.65	8319.02
Mg	mg/kg	10	Ekim	1 382.97	408.59	1 325.21	812.72	1 985.21
			Mayıs	1 431.21	490.01	1 427.98	827.41	2 141.39
Fe	mg/kg	10	Ekim	9.11	2.66	8.76	6.05	15.000
			Mayıs	8.51	2.47	8.10	5.42	12.71
Cu	mg/kg	10	Ekim	2.33	0.64	2.20	1.61	3.73
			Mayıs	2.45	0.52	2.43	1.72	3.24
Zn	mg/kg	10	Ekim	0.60	0.20	0.60	0.27	0.86
			Mayıs	0.64	0.28	0.68	0.26	1.07
Mn	mg/kg	10	Ekim	6.07	0.97	5.72	5.15	8.38
			Mayıs	6.30	1.33	5.97	4.21	9.26

Not. M = Aritmetik Ortalama; SD = Standart Sapma; Min = Minimum; Max = Maksimum. n = 10 toprak örneği.

Ekim ve Mayıs dönemleri arasındaki fark değerlerinin istatistiksel dağılım özelliklerini belirlemek amacıyla uygulanan Shapiro-Wilk normallik testi sonuçları Tablo 4.15'te sunulmuştur. Yapılan analiz sonucunda; fosfor ($p = 0.090$), potasyum ($p = 0.215$), kalsiyum ($p = 0.437$), magnezyum ($p = 0.504$), demir ($p = 0.113$), çinko ($p = 0.359$) ve mangan ($p = 0.464$) değişkenlerine ait fark puanlarının $p > 0.05$ düzeyinde olduğu ve normal dağılım sergilediği saptanmıştır. Bu bulgular doğrultusunda, söz konusu değişkenler için parametrik test varsayımlarının karşılandığı belirlenmiş ve dönemler arası karşılaştırmalarda eşleştirilmiş örneklem t -testi kullanılmıştır. Buna karşın, Bakır (Cu) değişkenine ait fark puanlarının istatistiksel dağılımının $p < 0.05$ ($p = 0.012$) düzeyinde anlamlı olduğu ve normal dağılım göstermediği tespit edilmiştir. Bu nedenle, Bakır (Cu) verilerinin dönemler arası karşılaştırmasında parametrik olmayan (non-parametrik) Wilcoxon işaretli sıralar testi tercih edilmiştir (Tablo 16).

Tablo 4.15. Arıtılmış atıksu ile sulanan toprakların yararışlı besin elementi içeriklerine ait dönemsel farkların normallik testi sonuçları

Değişken	N	W	p	Karar
P ₂ O ₅	10	0.8661	0.090	Normal dağılım ($p > 0.05$)
K ₂ O	10	0.8993	0.215	Normal dağılım ($p > 0.05$)
Ca	10	0.9289	0.437	Normal dağılım ($p > 0.05$)
Mg	10	0.9355	0.504	Normal dağılım ($p > 0.05$)
Fe	10	0.8746	0.113	Normal dağılım ($p > 0.05$)
Cu	10	0.7938	0.012	Normal dağılım ($p < 0.05$)
Zn	10	0.9203	0.359	Normal dağılım ($p > 0.05$)
Mn	10	0.9316	0.464	Normal dağılım ($p > 0.05$)

Not. W = Shapiro-Wilk test istatistiği. n = 10 toprak örneği. . $p > 0.05$ ise fark puanları normal dağılım göstermektedir ve eşleştirilmiş örneklem t-testi uygulanmıştır. $p < 0.05$ ise Wilcoxon işaretli sıralar testi tercih edilmiştir.

Araştırma alanındaki toprakların besin elementi içeriklerinde Mayıs ve Ekim dönemleri arasında meydana gelen değişimleri belirlemek amacıyla uygulanan istatistiksel analiz sonuçları Tablo 4.16’da verilmiştir. Buna göre; makro besin elementleri (fosfor, potasyum, kalsiyum, magnezyum) ile mikro besin elementlerin (Fe, Cu, Zn ve Mn) düzeylerinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark saptanmamıştır ($p > 0.05$). Bu bulgu; arıtılmış atıksu deşarjı ve beraberindeki çevresel girdilerin, bir sulama sezonu gibi kısa bir vadede bu elementlerin toprak stoklarında belirgin bir değişim yaratmadığını göstermektedir. Özellikle bitki tarafından yoğun tüketilen fosfor ($p = 0.070$) ve potasyum ($p = 0.181$) değerlerindeki sayısal azalmanın istatistiksel anlamlılık eşiğine ulaşmaması, atıksu ile sağlanan sürekli besin girdisinin bitkisel tüketimi dengelediği şeklinde yorumlanabilir. Buna karşın, kalsiyum miktarında Mayıs ve Ekim dönemleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık saptanmıştır ($p < 0.001$). Bu değişimin etki büyüklüğü (Cohen's $d = 3.718$), literatürde tanımlanan 'çok büyük' seviyesinin üzerinde olup, kalsiyumun toprak çözeltisindeki baskınlığını kanıtlamaktadır. Bu bulgu, toprak besin elementlerinin çoğunluğunun kısa vadeli mevsimsel değişimlere karşı dirençli olduğunu; buna karşın kalsiyum dinamiklerinin kireçli topraklarda hidrolojik döngüden belirgin biçimde etkilendiğini kanıtlamaktadır.

Bilimsel literatüre göre, arıtılmış atıksuların organik maddece zengin yapısı, toprakta besin elementlerinin şelatlanarak bitki tarafından alınabilirliğini artırmakta, ancak drenaj hattı boyunca karışıma dahil olan hayvansal atıklar özellikle metalik mikro

elementlerin (Fe, Zn) toprak profilindeki dengesini değiştirmektedir (Kabata-Pendias, 2011). Sonuç olarak; alandaki besin elementi varlığı tarımsal üretim için elverişli olup, atıksuyun gübreleme maliyetlerini düşürücü bir potansiyele sahip olduğu, ancak dengeli bir besleme için çinko gibi mikro element takviyesine ihtiyaç duyulabileceği öngörülmektedir.

Tablo 4.16. Arıtılmış atıksu ile sulanan toprakların yararılı besin elementi içeriklerine ait dönemsel değişimlerin karşılaştırma sonuçları

Değişken	Test	Test İstatistiği	sd	p	Etki Büyüklüğü	Sonuç
P₂O₅	Eşleştirilmiş <i>t</i>	<i>t</i> = -2.059	9	0.070	Cohen's <i>d</i> = 0.651	Anlamli fark yok
K₂O	Eşleştirilmiş <i>t</i>	<i>t</i> = -1.451	9	0.181	Cohen's <i>d</i> = 0.459	Anlamli fark yok
Ca	Eşleştirilmiş <i>t</i>	<i>t</i> = -11.758	9	<.001***	Cohen's <i>d</i> = 3.718	Anlamli fark var
Mg	Eşleştirilmiş <i>t</i>	<i>t</i> = -0.922	9	0.381	Cohen's <i>d</i> = 0.291	Anlamli fark yok
Fe	Eşleştirilmiş <i>t</i>	<i>t</i> = 0.527	9	0.611	Cohen's <i>d</i> = 0.167	Anlamli fark yok
Cu	Wilcoxon	<i>W</i> = 12.0	-	0.131	<i>r</i> = 0.478	Anlamli fark yok
Zn	Eşleştirilmiş <i>t</i>	<i>t</i> = -0.676	9	0.516	Cohen's <i>d</i> = 0.214	Anlamli fark yok
Mn	Eşleştirilmiş <i>t</i>	<i>t</i> = -0.755	9	0.469	Cohen's <i>d</i> = 0.239	Anlamli fark yok

Not. *sd* = serbestlik derecesi. Etki büyüklüğü: Eşleştirilmiş *t*-testi için Cohen's *d* (küçük = 0.20, orta = 0.50, büyük = 0.80); Wilcoxon testi için *r* (küçük = 0.10, orta = 0.30, büyük = 0.50) rapor edilmiştir (Cohen, 1988). **p* < 0.05, ***p* < 0.01, ****p* < 0.001.

4.3.2. Kontrol grubu toprakların yararılı besin elementi içerikleri

Kontrol grubu topraklarının besin elementi içeriklerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler Tablo 4.17'de sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre; fosfor (P₂O₅) içerikleri Ekim ve Mayıs dönemlerinde sırasıyla 11.16 kg/da ve 11.88 kg/da olarak ölçülürken, potasyum (K₂O) içerikleri 171.77 kg/da ile 192.03 kg/da arasında değişim göstermiştir. Kalsiyum (Ca) ve magnezyum (Mg) konsantrasyonları her iki dönemde de yüksek seyretmiş; Ca değerleri ortalama 6 767.19 – 7 214.65 mg/kg, Mg değerleri ise 739.46 - 750.54 mg/kg seviyelerinde gerçekleşmiştir. Mikro elementler incelendiğinde; demir (Fe) 3.33- 3.36 mg/kg, bakır (Cu) 1.20-1.39 mg/kg ve mangan (Mn) 6.36 – 7.33 mg/kg ortalama değerleri ile mevsimsel bir artış eğilimi sergilemiştir. Buna karşın çinko (Zn) içeriklerinin her iki dönemde de oldukça stabil kalarak 0.63 – 0.64 mg/kg seviyelerinde olduğu saptanmıştır. Genel olarak, kontrol arazisi topraklarının besin elementi profilinin

Mayıs döneminde, Ekim dönemine kıyasla (Zn hariç) sınırlı bir artış eğiliminde olduğu görülmektedir.

Tablo 4.17. Kontrol grubu toprakların yarıyıllı besin elementi içeriklerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler

Değişken	Birim	n	Dönem	M	SD	Ortanca	Min	Max
P₂O₅	kg/da	10	Ekim	11.16	6.87	7.71	4.49	21.37
			Mayıs	11.88	7.16	9.20	2.61	24.28
K₂O	kg/da	10	Ekim	171.77	105.09	150.02	81.80	459.96
			Mayıs	192.03	149.66	134.86	88.80	591.25
Ca	mg/kg	10	Ekim	6 767.19	818.71	6 894.73	5 245.56	7 843.07
			Mayıs	7 214.65	1 807.77	7 673.23	2 263.33	8 464.35
Mg	mg/kg	10	Ekim	739.46	260.41	665.64	527.30	1 423.92
			Mayıs	750.54	181.79	698.43	589.27	1 203.41
Fe	mg/kg	10	Ekim	3.33	1.54	2.78	1.51	6.31
			Mayıs	3.66	2.08	2.94	0.82	8.02
Cu	mg/kg	10	Ekim	1.20	0.24	1.14	0.78	1.68
			Mayıs	1.39	0.32	1.27	1.13	2.10
Zn	mg/kg	10	Ekim	0.64	0.23	0.64	0.28	0.94
			Mayıs	0.63	0.31	0.54	0.33	1.27
Mn	mg/kg	10	Ekim	6.36	1.16	6.61	5.04	8.21
			Mayıs	7.33	3.71	6.15	5.30	17.75

Not. M = Aritmetik Ortalama; SD = Standart Sapma; Min = Minimum; Max = Maksimum. n = 10 toprak örneği.

Ekim ve Mayıs dönemleri arasındaki fark değerlerinin istatistiksel dağılım özelliklerini belirlemek amacıyla uygulanan Shapiro-Wilk normallik testi sonuçları Tablo 4.18’de sunulmuştur. Yapılan analiz sonucunda P₂O₅, K₂O, Mg, Fe, Cu ve Zn değişkenlerine ait *p* değerlerinin 0.05’ten büyük olduğu (*p* > 0.05) saptanmış ve bu değişkenlerin normal dağılım sergilediği belirlenerek karşılaştırmalarda parametrik bir yöntem olan eşleştirilmiş örneklem *t*-testi kullanılmasına karar verilmiştir. Buna karşın, Ca ve Mn değişkenlerine ilişkin fark puanlarının normal dağılmadığı (*p* < 0.05) tespit edilmiş, bu iki değişkenin analizinde ise parametrik olmayan Wilcoxon işaretli sıralar testi tercih edilmiştir.

Tablo 4.18. Kontrol grubu toprakların yarayışlı besin elementi içeriklerine ait dönemsel farkların normallik testi sonuçları

Değişken	<i>n</i>	<i>W</i>	<i>P</i>	Karar
P ₂ O ₅	10	0.9556	0.734	Normal dağılım (<i>p</i> > 0.05)
K ₂ O	10	0.9241	0.392	Normal dağılım (<i>p</i> > 0.05)
Ca	10	0.7587	0.005	Normal dağılım değil (<i>p</i> < 0.05)
Mg	10	0.8940	0.188	Normal dağılım (<i>p</i> > 0.05)
Fe	10	0.9800	0.965	Normal dağılım (<i>p</i> > 0.05)
Cu	10	0.9382	0.533	Normal dağılım (<i>p</i> > 0.05)
Zn	10	0.9372	0.522	Normal dağılım (<i>p</i> > 0.05)
Mn	10	0.6957	0.001	Normal dağılım değil (<i>p</i> < 0.05)

Not. *W* = Shapiro-Wilk test istatistiği. *n* = 10 toprak örneği. *p* > 0.05 ise eşleştirilmiş örneklem t-testi, *p* < 0.05 ise Wilcoxon işaretli sıralar testi uygulanmıştır.

Araştırma alanından elde edilen tanımlayıcı istatistik sonuçları; makro ve mikro besin elementleri açısından Ülgen ve Yurtsever (1995) ile FAO (2021) tarafından belirlenen verimlilik sınıfları esas alınarak yorumlanmıştır. Tablo 4.19’da sunulan analiz sonuçlarına göre; P₂O₅, K₂O, Ca, Mg, Fe, Zn ve Mn düzeylerinde dönemler arası istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık saptanmamıştır (*p* > 0.05). Bu durum, kontrol arazisindeki temel besin elementlerinin iki dönem arasında kararlı bir seyir izlediğini göstermektedir. Makro besin elementlerinden ortalama fosfor (11.16- 11.88 kg/da) ve potasyum (171.77-192.03 kg/da) içerikleri, dönemler arası istatistiksel olarak anlamlı bir fark göstermemiş (*p* > 0.05); bu değerlerin tarımsal literatürdeki sınırlarla kıyaslandığında sırasıyla 'yeterli' (8-12 kg/da) ve 'çok zengin' (> 100 kg/da) sınıflarında yer aldığı belirlenmiştir. Benzer şekilde kalsiyum (6 767-7 214 mg/kg) ve magnezyum (739-750 mg/kg) içerikleri, kireçli ana materyale sahip bölge toprakları için tipik olan "yüksek/yeterli" kategorisinde sırasıyla > 3500 mg/kg ve > 250 mg/kg olan kritik sınır değerlerin üzerinde kararlı bir seyir izlemiştir. Mikro elementler bazında Fe (3.33-3.66 mg/kg) ve Mn (6.35-7.32 mg/kg) içerikleri, FAO (2021) tarafından belirlenen yeterlilik sınırları (Fe:4.5; Mn: 2.0 mg/kg) ile kıyaslandığında bitki gelişimi için uygun seviyede bulunmuştur. Özellikle, çinko (Zn) değerlerinin (*M*_{Ekim} = 0.64; *M*_{Mayıs} = 0.63 mg/kg), belirlenen 0.5-1 mg/kg referans aralığında kalarak dönemler arasında en stabil parametre olduğu belirlenmiştir. Buna karşın bakır (Cu) konsantrasyonu Ekim ayında ortalama 1.20 mg/kg iken, Mayıs ayında istatistiksel olarak çok ileri düzeyde anlamlı bir artışla (*t*(9)= -

4.237; ($p < 0.05$) 1.39 mg/kg seviyesine yükselmiştir. FAO'nun 0.2 mg/kg olan yeterlilik sınırının üzerinde seyreden ve yüksek bir etki büyüklüğü ($d = 1.340$) ile desteklenen bu artış, ilkbaharda yükselen toprak sıcaklığının organik madde-Cu komplekslerinin ayrışmasını hızlandırmasıyla (Alloway, 2008) açıklanabilir.

Tablo 4.19. Kontrol grubu toprakların yarıyıllı besin elementi içeriklerine ait dönemsel değişimlerin karşılaştırma sonuçları

Değişken	Test	Test İstatistigi	SD	p	Etki Büyüklüğü	Sonuç
P₂O₅	Eşleştirilmiş t	$t = -0.278$	9	0.788	Cohen's $d = 0.088$	Anlamlı fark yok
K₂O	Eşleştirilmiş t	$t = -1.054$	9	0.319	Cohen's $d = 0.333$	Anlamlı fark yok
Ca	Wilcoxon	$W = 10.0$	-	0.084	$r = 0.546$	Anlamlı fark yok
Mg	Eşleştirilmiş t	$t = -0.325$	9	0.752	Cohen's $d = 0.103$	Anlamlı fark yok
Fe	Eşleştirilmiş t	$t = -1.186$	9	0.266	Cohen's $d = 0.375$	Anlamlı fark yok
Cu	Eşleştirilmiş t	$t = -4.237$	9	0.002**	Cohen's $d = 1.340$	Anlamlı fark var
Zn	Eşleştirilmiş t	$t = 0.130$	9	0.899	Cohen's $d = 0.041$	Anlamlı fark yok
Mn	Wilcoxon	$W = 23.0$	-	0.695	$r = 0.124$	Anlamlı fark yok

Not. sd = serbestlik derecesi. Etki büyüklüğü: Eşleştirilmiş t -testi için Cohen's d (küçük = 0.20, orta = 0.50, büyük = 0.80); Wilcoxon testi için r (küçük = 0.10, orta = 0.30, büyük = 0.50) rapor edilmiştir (Cohen, 1988). * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

4.4. Toprakların Ağır Metal İçeriklerine İlişkin Bulgular

4.4.1. Artırılmış atıksu ile sulanan toprakların ağır metal içerikleri

Artırılmış atıksu ile sulanan tarım arazilerinden alınan toprak örneklerinin ağır metal içeriklerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler Tablo 4.20'de sunulmuştur. Elde edilen bulgulara göre; kadmiyum (Cd) içerikleri Ekim ayında ortalama 1.05 mg/kg iken Mayıs ayında 0.94 mg/kg seviyesine gerilemiştir. Kobalt (Co) değerleri dönemler arasında kararlı bir seyir izleyerek 9.95-10.53 mg/kg aralığında gerçekleşmiştir. Krom (Cr) konsantrasyonu Ekim ayında ortalama 59.34 mg/kg olarak ölçülürken, Mayıs ayında 51.76 mg/kg'a düşmüştür. Buna karşın nikel (Ni) içeriklerinde bir artış eğilimi gözlenmiş; Ekim ayında 47.78 mg/kg olan Ni ortalaması Mayıs ayında 57.07 mg/kg seviyesine yükselmiştir. Çinko (Zn) içerikleri ise Ekim ve Mayıs dönemlerinde sırasıyla 54.70 mg/kg ve 50.25 mg/kg olarak saptanmıştır. Genel olarak, nikel haricindeki ağır metal

konsantrasyonlarının Mayıs döneminde sınırlı düzeyde bir düşüş sergilediği görülmektedir.

Tablo 4.20. Arıtılmış atıksu ile sulanan toprakların ağır metal içeriklerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler

Değişken	Birim	N	Dönem	M	SD	Ortanca	Min	Max
Cd	mg/kg	10	Ekim	1.05	0.16	1.05	0.85	1.30
			Mayıs	0.94	0.15	0.97	0.64	1.09
Co	mg/kg	10	Ekim	9.95	1.29	9.85	7.30	12.00
			Mayıs	10.53	1.86	10.43	6.70	12.46
Cr	mg/kg	10	Ekim	59.34	6.39	59.98	49.95	68.00
			Mayıs	51.76	8.35	52.75	36.33	60.69
Ni	mg/kg	10	Ekim	47.78	6.23	48.70	34.10	54.90
			Mayıs	57.07	10.15	57.58	35.92	67.20
Zn	mg/kg	10	Ekim	54.70	8.73	55.08	42.15	69.55
			Mayıs	50.25	9.27	51.15	31.86	60.62

Not. M = Aritmetik Ortalama; SD = Standart Sapma; Min = Minimum; Max = Maksimum. n = 10 toprak örneği.

Ekim ve Mayıs dönemlerine ait ağır metal içeriklerinin fark değerinin normal dağılım gösterip göstermediği Shapiro-Wilk testi ile incelenmiştir (Tablo 4.21). Yapılan analiz sonucunda; Cd ($p = 0.133$), Cr ($p = 0.112$), Ni ($p = 0.164$) ve Zn ($p = 0.057$) değişkenlerinin p -değerlerinin 0.05'ten büyük olduğu ($p > 0.05$) ve normal dağılım varsayımını karşıladığı saptanmıştır. Bu değişkenlerin dönemler arası karşılaştırmalarında parametrik bir test olan eşleştirilmiş örneklem t-testi kullanılmasına karar verilmiştir. Buna karşın, Co ($p = 0.014$) değişkeninin normal dağılmadığı ($p < 0.05$) tespit edilmiş; bu parametrenin analizinde parametrik olmayan Wilcoxon işaretli sıralar testi tercih edilmiştir.

Tablo 4.21. Arıtılmış atıksu ile sulanan toprakların ağır metal içeriklerine ait dönemsel farkların normallik testi sonuçları

Değişken	N	W	p	Karar
Cd	10	0.8807	0.133	Normal dağılım ($p > 0.05$)
Co	10	0.7995	0.014	Normal dağılım değil ($p < 0.05$)
Cr	10	0.8742	0.112	Normal dağılım ($p > 0.05$)
Ni	10	0.8886	0.164	Normal dağılım ($p > 0.05$)
Zn	10	0.8495	0.057	Normal dağılım ($p > 0.05$)

Not. W = Shapiro-Wilk test istatistiği. $p > 0.05$ ise eşleştirilmiş örneklem t-testi, $p < 0.05$ ise Wilcoxon işaretli sıralar testi uygulanmıştır. n = 10 toprak örneği.

Arıtılmış evsel atıksu ile sulanan tarım arazilerinin ağır metal içeriklerindeki mevsimsel değişimleri belirlemek amacıyla yapılan eşleştirilmiş karşılaştırma sonuçları Tablo 4.22’de sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre; nikel (Ni), krom (Cr) ve kadmiyum (Cd) düzeylerinde Ekim ve Mayıs dönemleri arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar saptanmıştır. Özellikle nikel (Ni) konsantrasyonunda gözlenen değişim dikkat çekicidir; Ekim ayında 47.78 mg/kg olan Ni seviyesi, Mayıs ayında istatistiksel olarak çok ileri düzeyde anlamlı bir artışla ($p = 0.003$, $d = 1.298$) 57.07 mg/kg’a yükselmiştir. Ülkemizdeki Toprak Kirliliği Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmeliklere (Resmi Gazete No: 27605) göre pH > 6 olan topraklarda Ni için sınır değeri 75 mg/kg olarak kabul edilmektedir. Mevcut bulgular (57.07 mg/kg) henüz bu sınırın altında kalsa da, nikel miktarındaki 'çok büyük' ($d = 1.298$) etki büyüklüğüne sahip bu artış eğilimi, atıksuyun Ni içeriğinin veya topraktaki metal hareketliliğinin yakından takip edilmesi gerektiğini göstermektedir. Buna karşın; krom (59.34’den 51.76 mg/kg’a; $p = 0.008$, $d = 1.071$) ve kadmiyum (1.05’ten 0.94 mg/kg’a; $p = 0.037$, $d = 0.773$) içeriklerinde Mayıs döneminde istatistiksel olarak anlamlı azalışlar kaydedilmiştir. Bu metallerdeki düşüş, bitki tarafından alım, toprak profilinde yıkanma veya metalin biyoyararlanımındaki değişimler gibi süreçlerle açıklanabilir. Kobalt (Co) ve çinko (Zn) değişkenlerinde ise dönemler arası anlamlı bir fark saptanmamıştır ($p > 0.05$).

Arıtılmış evsel atıksu ile sulanan tarım arazilerinden alınan toprak örneklerinde yapılan analizler, ağır metal dinamiklerinin sulama sezonu boyunca değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular FAO/WHO (2001) tarafından belirlenen ekolojik sınır değerler (Cd: 0.8 mg/kg; Zn: 50 mg/kg; Ni: 50 mg/kg) ile kıyaslandığında; özellikle sezon sonunda (Ekim) kadmiyum (1.05 mg/kg) ve çinko (54.70 mg/kg) konsantrasyonlarının uluslararası limitlerin üzerinde olduğu, nikel (47.78 mg/kg) değerinin ise kritik eşiğe oldukça yaklaştığı tespit edilmiştir. Öte yandan bu veriler, ülkemizde Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik (2010) sınır değerleri (pH > 7 için Cd: 3 mg/kg; Zn: 300 mg/kg; Ni: 75 mg/kg) ile değerlendirildiğinde, tüm parametrelerin ulusal mevzuattaki 'maksimum izin verilebilir' sınırların altında kaldığı görülmektedir.

Bu durum, çalışma alanındaki toprakların yasal olarak henüz 'kirli toprak' statüsünde olmadığını, ancak FAO/WHO (2001) gibi daha hassas koruma eşiği sunan rehberlere göre bir 'birikim ve kirlenme eğilimi' içerisinde olduğunu kanıtlamaktadır. Özellikle kadmiyum (Cd) ve çinko (Zn) değerlerindeki bu eğilim; sadece arıtılmış atıksu kullanımıyla değil, kanal güzergahı boyunca karışıma dahil olan hayvancılık işletmesi

atıkları (Zn kaynağı) ve tarım arazilerinden süzülen fosforlu gübre kalıntıları (Cd kaynağı) gibi dışsal faktörlerle açıklanabilir. Bilimsel literatüre göre, topraktaki Cd miktarının 0.8-1.0 mg/kg eşiğini aşması, bu metalin bitkiler tarafından kolayca absorbe edilerek gıda zincirine aktarılması riskini doğurmaktadır (Alloway, 2013). Sonuç olarak, drenaj hattındaki antropojenik kirletici yüklerin etkisiyle toprak profilinde metal birikiminin tetiklendiği ve bu durumun uzun vadede sulak alan ekosistemi üzerinde toksik etkiler yaratma potansiyeli taşıdığı söylenebilir.

Tablo 4.22. Arıtılmış atıksu ile sulanan toprakların ağır metal içeriklerine ait dönemsel değişimlerin karşılaştırma sonuçları

Değişken	Test	Test İstatistigi	sd	p	Etki Büyüklüğü	Sonuç
Cd	Eşleştirilmiş t	$t = 2.446$	9	0.037*	Cohen's $d = 0.773$	Anlamli fark var
Co	Wilcoxon	$W = 12.0$	-	0.131	$r = 0.478$	Anlamli fark yok
Cr	Eşleştirilmiş t	$t = 3.387$	9	0.008**	Cohen's $d = 1.071$	Anlamli fark var
Ni	Eşleştirilmiş t	$t = -4.106$	9	0.003**	Cohen's $d = 1.298$	Anlamli fark var
Zn	Eşleştirilmiş t	$t = 2.176$	9	0.058	Cohen's $d = 0.688$	Anlamli fark yok

Not. sd = serbestlik derecesi. Etki büyüklüğü: Eşleştirilmiş t-testi için Cohen's d (küçük = 0.20, orta = 0.50, büyük = 0.80); Wilcoxon testi için r (küçük = 0.10, orta = 0.30, büyük = 0.50) rapor edilmiştir (Cohen, 1988). * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

4.4.2. Kontrol grubu toprakların ağır metal içerikleri

Kontrol grubuna ait toprak örneklerinin ağır metal içeriklerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler Tablo 4.23'te sunulmuştur. Elde edilen bulgulara göre; kadmiyum (Cd) içerikleri Ekim ayında ortalama 0.97 mg/kg iken Mayıs ayında mg/kg seviyesinde gerçekleşmiştir. Kobalt (Co) değerleri dönemler arasında 9.31- 10.43 mg/kg aralığında değişim gösterirken, krom (Cr) konsantrasyonu Ekim ayında ortalama 57.77 mg/kg olarak ölçülmüş, Mayıs ayında ise 38.22 mg/kg seviyesine gerilemiştir. Nikel (Ni) içerikleri her iki dönemde de oldukça benzer seyrederek ortalama 47.38 – 47.51 mg/kg düzeylerinde saptanmıştır. Çinko (Zn) içerikleri ise Ekim döneminde 48.61 mg/kg iken Mayıs döneminde 36.99 mg/kg olarak ölçülmüştür. Genel olarak kontrol grubu topraklarında nikel haricindeki ağır metal konsantrasyonlarının Mayıs döneminde, Ekim dönemine kıyasla daha düşük seviyelerde olduğu görülmektedir.

Tablo 4.23. Kontrol grubu toprakların ağır metal içeriklerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler

Değişken	Birim	N	Dönem	M	SD	Ortanca	Min	Max
Cd	mg/kg	10	Ekim	0.9750	0.1253	1.0000	0.8000	1.2000
			Mayıs	0.6876	0.2397	0.7106	0.2256	1.2074
Co	mg/kg	10	Ekim	10.430	1.905	10.850	6.800	12.450
			Mayıs	9.313	2.903	9.309	3.901	14.388
Cr	mg/kg	10	Ekim	57.775	5.885	56.725	47.700	68.400
			Mayıs	38.228	14.539	38.672	11.374	69.186
Ni	mg/kg	10	Ekim	47.385	8.311	49.950	33.900	57.400
			Mayıs	47.515	13.828	46.244	20.989	75.354
Zn	mg/kg	10	Ekim	48.615	6.724	48.100	37.750	61.400
			Mayıs	36.997	13.227	37.104	12.351	64.922

Not. M = Aritmetik Ortalama; SD = Standart Sapma; Min = Minimum; Max = Maksimum. Tüm değişkenler mg/kg birimindedir. n = 10 toprak örneği.

Kontrol grubu toprakların ağır metal içeriklerinde Ekim ve Mayıs dönemleri arasında meydana gelen değişimlerin (fark değerlerinin) normallik dağılımına ilişkin Shapiro-Wilk testi sonuçları Tablo 4.24'te sunulmuştur. Analiz sonuçları; Cd ($p = 0.397$), Co ($p = 0.195$), Cr ($p = 0.700$), Ni ($p = 0.077$) ve Zn ($p = 0.173$) değişkenlerine ait p -değerlerinin 0.05'ten büyük olduğunu ($p > 0.05$) ve tüm parametrelerin normal dağılım sergilediğini ortaya koymuştur. Bu bulgular doğrultusunda, incelenen tüm ağır metal değişkenlerinin dönemler arası karşılaştırmalarında parametrik bir test olan eşleştirilmiş örneklem t-testi kullanılmıştır (Tablo 4.25).

Tablo 4.24. Kontrol grubu toprakların ağır metal içeriklerine ait dönemsel farkların normallik testi sonuçları

Değişken	N	W	p	Karar
Cd	10	0.9246	0.397	Normal dağılım ($p > 0.05$)
Co	10	0.8955	0.195	Normal dağılım ($p > 0.05$)
Cr	10	0.9526	0.700	Normal dağılım ($p > 0.05$)
Ni	10	0.8602	0.077	Normal dağılım ($p > 0.05$)
Zn	10	0.8907	0.173	Normal dağılım ($p > 0.05$)

Not. W = Shapiro-Wilk test istatistiği. n = 10 toprak örneği. Tüm değişkenlerde normallik varsayımı karşılanmıştır ($p > 0.05$); bu nedenle beş değişkenin tamamında eşleştirilmiş örneklem t-testi uygulanmıştır.

Kontrol grubuna ait toprak örneklerinin ağır metal içeriklerindeki dönemler arası değişimleri belirlemek amacıyla yapılan eşleştirilmiş t -testi sonuçları Tablo 4.25'te

sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre; kadmiyum (Cd), krom (Cr) ve çinko (Zn) düzeylerinde Ekim ve Mayıs dönemleri arasında istatistiksel olarak ileri düzeyde anlamlı farklılıklar saptanmıştır ($p < 0.01$). Ekim ayında ortalama 0.97 mg/kg olan kadmiyum seviyesi Mayıs ayında 0.68 mg/kg'a ($p = 0.005$), krom seviyesi 57.77 mg/kg'dan 38.22 mg/kg'a ($p = 0.002$) ve çinko seviyesi 48.61 mg/kg'dan 36.99 mg/kg'a ($p = 0.007$) gerilemiştir. Bu üç metaldeki azalışa ilişkin etki büyüklüğü katsayıları ($d > 1.11$), değişimin oldukça yüksek bir etki gücüne sahip olduğunu göstermektedir. Buna karşın, kobalt (Co) ve nikel (Ni) içeriklerinde dönemler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir değişim gözlenmemiştir ($p > 0.05$). Özellikle nikel değerlerinin (M_{Ekim} ; 47.38mg/kg; $M_{Mayıs}$ = 47.51) dönemler arasında en kararlı seyreden parametre olduğu ($p = 0.0975$, $d = 0.010$) belirlenmiştir.

Araştırma alanındaki ağır metal içeriklerinin Ekim ve Mayıs dönemleri arasındaki mevsimsel değişimi, her iki çalışma grubu için farklı dinamikler ortaya koymuştur. Artırılmış atıksu ile sulanan arazilerde nikel (Ni) seviyesinde gözlenen istatistiksel artış ($p = 0.003$, $d = 1.298$), kontrol noktalarında Ni seviyesinin oldukça stabil seyretmesiyle ($p = 0.975$) zıtlık oluşturmaktadır. Bu durum, nikel birikiminin doğrudan atıksu uygulaması ve kanal güzergahındaki antropojenik girdilerle ilişkili olduğunu kanıtlamaktadır. Atıksu ile sulanan alanlarda kadmiyum (Cd) miktarının Ekim ayında (1.05 mg/kg), FAO/WHO (2001) tarafından belirlenen 0.8 mg/kg'lık kritik eşiği aşması, bu metalin gıda zinciri üzerinden insan sağlığını tehdit edebilecek bir biyoakümüülasyon riskine işaret etmektedir (Alloway, 2013).

Kontrol grubunda ise Cd, Cr ve Zn içeriklerinin Ekim döneminde, Mayıs dönemine kıyasla anlamlı derecede yüksek bulunması ($p < 0.01$), alandaki metal hareketliliğinde mevsimsel iklimsel süreçlerin de etkili olduğunu göstermektedir. Özellikle sonbahar döneminde toprak nem içeriğinin azalması ve bitki alımının yavaşlaması, topraktaki metal fraksiyonlarının konsantrasyonunu artırmış olabilir (Kabata-Pendias, 2011). Krom (Cr) ve çinko (Zn) içeriklerinde Mayıs ayında gözlenen azalışta ise, ilkbahar yağışlarının yarattığı "seyrelme etkisi" ile aktif bitki büyümesi döneminde topraktan metal uzaklaştırılmasının etkili olduğu düşünülmektedir (Fendorf, 1995; Alloway, 2008). Kontrol noktalarındaki metallerin konsantrasyonları; krom (38.22-57.77 mg/kg), çinko (36.99-48.61 mg/kg) ve kadmiyum (0.68-0.97 mg/kg) aralığında değişim göstermiştir. Bu değerlerin, hem dünya (WHO/FAO, 2001; Cr: 100 mg/kg, Zn: 50 mg/kg, Cd: 0.8 mg/kg) hem de Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik (TKKNKSDY, 2010; Cr: 100 mg/kg, Zn: 150-300

mg/kg, Cd: 3 mg/kg) sınır değerlerinin oldukça altında kaldığı görülmektedir. Benzer şekilde nikel (47 mg/kg) ve kobalt (10 mg/kg) seviyeleri de kabul edilebilir limitler (Ni için sınır değer: 75 mg/kg) dahilindedir.

Sonuç olarak, her iki gruptaki ağır metal konsantrasyonları ülkemizdeki Toprak Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (2010) sınırlarının altında kalsa da uluslararası FAO/WHO (2001) rehberlerine göre özellikle kadmiyum yönünden bir birikim eğilimi mevcuttur. Sulanan alanlarda nikelin artış eğilimi göstermesi, kontrol grubunda ise metal seviyelerinin mevsimsel dalgalanmalara karşın kararlı sınırlar içerisinde kalması; arıtılmış su doğrudan tarlalarda kullanılsa bile drenaj hattındaki dışsal kirlenici yüklerin toprak profilinde metal birikimini tetiklediğini göstermektedir. Bu durumun devam etmesi, kanalın son varış noktası olan göl sulak alan ekosisteminde uzun vadeli toksik etkiler yaratma potansiyeli taşımaktadır.

Tablo 4.25. Kontrol grubu toprakların ağır metal içeriklerine ait dönemsel değişimlerin eşleştirilmiş t-testi sonuçları

Değişken	Test	Test İstatistiği	sd	p	Etki Büyüklüğü	Sonuç
Cd	Eşleştirilmiş <i>t</i>	<i>t</i> = 3.740	9	0.005**	Cohen's <i>d</i> = 1.183	Anlamli fark var
Co	Eşleştirilmiş <i>t</i>	<i>t</i> = 1.394	9	0.197	Cohen's <i>d</i> = 0.441	Anlamli fark yok
Cr	Eşleştirilmiş <i>t</i>	<i>t</i> = 4.328	9	0.002**	Cohen's <i>d</i> = 1.369	Anlamli fark var
Ni	Eşleştirilmiş <i>t</i>	<i>t</i> = -0.032	9	0.975	Cohen's <i>d</i> = 0.010	Anlamli fark yok
Zn	Eşleştirilmiş <i>t</i>	<i>t</i> = 3.512	9	0.007**	Cohen's <i>d</i> = 1.111	Anlamli fark var

Not. *sd* = serbestlik derecesi. Etki büyüklüğü: Cohen's *d* (küçük = 0.20, orta = 0.50, büyük = 0.80) rapor edilmiştir (Cohen, 1988). **p* < 0.05, ***p* < 0.01, ****p* < 0.001.

Elde edilen sonuçlar bir bütün olarak değerlendirildiğinde, arıtılmış atık su (AAS) ile sulama yapıldığında topraktaki ağır metal çeşitliliğinin değişen metal parametrelerine ve mevsime bağlı olarak farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Özellikle Krom (51.76-59.34 mg/kg), Çinko (50.24-54.70 mg/kg) ve Kadmiyum (0.94-1.05 mg/kg) konsantrasyonlarının hem dünya (FAO/WHO, 2001) hem de Türkiye (TKKY, 2010) sınır değerlerinin oldukça altında kalması, AAS'nin kısa/orta vadeli kontrollü kullanımının toprak güvenliğini koruduğuna işaret etmektedir. Ancak, kontrol arazisinde nikel seviyeleri dönemler arasında durağan bir seyir izlerken, AAS ile sulanan arazide Nikel (Ni) içeriğinin Mayıs döneminde istatistiksel olarak anlamlı (*p*=0.003, *d*=1.298) ve büyük

bir etki büyüklüğü ile artış göstermesi dikkat çekicidir. Bu bulgu, AAS sulamasının toprağa sürekli bir nikel girdisi sağladığını veya topraktaki nikel mobilizasyonunu teşvik ettiğini rapor eden literatürdeki benzer çalışmalarla (Rusan ve ark., 2007) uyumluluk göstermektedir.

Öte yandan, AAS sulanan alandaki Kadmiyum (Cd) ve Krom (Cr) seviyelerinde Mayıs ayında kaydedilen anlamlı düşüşler, ilkbahar dönemindeki yoğun yağışların neden olduğu 'seyrelme etkisi' ve bitki büyüme hızının pik yaptığı aylardaki bitkisel uzaklaştırma süreçleriyle (Kabata-Pendias, 2011) açıklanabilmektedir. Sonuç olarak; AAS kullanımı toprakta spesifik olarak nikel birikimini teşvik etse de, incelenen tüm ağır metal parametreleri bakımından toprağın tarımsal açıdan güvenli sınırları koruduğu görülmüştür. Bu durum, arıtılmış evsel atık suların, özellikle nikel gibi birikim eğilimi gösteren metaller özelinde periyodik olarak izlenmesi şartıyla, sürdürülebilir ve güvenli bir alternatif sulama kaynağı olarak kullanılabileceğini kanıtlamaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Mevcut tez çalışması kapsamında, Kırşehir-Boztepe Atıksu Arıtma Tesisinden çıkan evsel arıtılmış atıksuların sulama suyu kalitesi ile bu suların tarımsal amaçlı yeniden kullanım olanakları ve çevresel etkileri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Araştırma sürecinde tesis çıkış suyundan, deşarjın yapıldığı toprak drenaj kanalı güzergâhından ve bu sularla sulanan tarım arazilerinden elde edilen bulgular, su ve toprak matrisleri yönünden makro düzeyde stratejik çıktılar ortaya koymuştur.

Araştırma kapsamında su örneklerinden elde edilen fizikokimyasal, mikrobiyolojik ve ağır metal bulguları bir bütün olarak değerlendirildiğinde; çözünmüş oksijen (ÇO) seviyeleri, su kaynağının ulusal mevzuat (YSKY, 2021) kapsamında genel olarak Sınıf III (Kirli Su) kategorisinde yer aldığını, ancak ölçülen minimum değerler doğrultusunda yer yer Sınıf IV (Çok Kirli Su) sınırlarına gerilediğini ortaya koymaktadır. Suyun pH ve elektriksel iletkenlik (EC) değerleri tarımsal açıdan güvenli sınırlar içinde kalsa da saptanan ortalama 475.02 mg CaCO₃/L düzeyindeki 'çok sert' su karakteristiği, uzun vadeli ve sürekli kullanım senaryolarında damla sulama altyapılarında kireçlenme, kesit daralması ve meme tıkanmaları gibi ciddi mühendislik ve işletme problemlerine yol açabilecek niteliktedir.

Suyun tarımsal yeniden kullanım potansiyeli önündeki en kritik mikrobiyolojik kısıtı ise yüksek koliform yükü oluşturmaktadır. Fekal Koliform (FK) ve Toplam Koliform (TK) seviyelerinin ulusal ve uluslararası tarımsal sulama rehber değerlerinin çok üzerinde seyretmesi, suyun mevcut haliyle tarımda kullanılmasının önündeki en büyük hijyenik kısıtlılığı teşkil etmekte ve özellikle çiğ ya da taze tüketilen ürünler için akut patojenik bulaş riski barındırmaktadır.

Ağır metal parametreleri arasında yer alan arsenik (As), alüminyum (Al) ve demir (Fe) konsantrasyonlarının izin verilen tarımsal sulama eşik değerlerini aşması; uzun vadeli ve kontrolsüz kullanım durumunda toprak kalitesinde bozulmalara yol açma ve kültür bitkilerinde fitotoksisite riski yaratma potansiyeli taşımaktadır.

Araştırma kapsamında toprak örneklerinden elde edilen fizikokimyasal, besin elementleri ve ağır metal bulguları bir bütün olarak değerlendirildiğinde; arıtılmış atıksu (AAS) uygulanan alanlarda organik madde miktarında sezon sonunda istatistiksel olarak yüksek düzeyde anlamlı bir artış (%1.40'tan %1.81'e; $p = 0.008$) saptanmıştır. Buna karşın kontrol grubunda gözlenen organik madde artışı istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p = 0.068$). Bu bulgu, atıksu kullanımının toprak verimliliğini organik

karbon yönünden sistemik olarak desteklediğini kanıtlamaktadır. Ancak toprağın yüksek kireçli (%15.1) yapısı, yüksek pH koşullarında çözünürlüğü azalan mikro besin elementlerinin katyon değişim kapasitesi ve yarayışlılığı üzerinde baskılayıcı bir unsur olarak görülmektedir (Alloway, 2008). Her iki grupta da toprakların pH (7.95) ve EC (0.65 dS/m) değerleri ülke mevzuatı ve FAO sınırları içerisinde kalarak tarımsal üretim için uygun, hafif alkali ve tuzsuz bir seyir izlemiştir.

Besin elementleri açısından ise çalışma alanındaki toprakların genel olarak fosfor ve potasyum yönünden yeterli ve zengin, kalsiyum ve magnezyum açısından yüksek düzeyde olduğu belirlenmiştir. Ancak alkali ve kireçli toprak yapısı nedeniyle çinko (Zn) miktarının her iki grupta da yetersiz düzeyde kaldığı saptanmıştır. Toprakların ağır metal birikimi boyutu incelendiğinde, hem atıksu uygulanan alanda (1.05 mg/kg) hem de kontrol grubunda (0.97 mg/kg) kadmiyum (Cd) miktarının sezon sonunda FAO/WHO (2001) kritik eşiği olan 0.8 mg/kg'ı istatistiksel olarak anlamlı bir farkla aşmaya başladığı tespit edilmiştir. Bu durum, bölgedeki ağır metal baskısının sadece atıksu kaynaklı olmadığını, yaygın tarımsal faaliyetlerin ve kullanılan fosforlu gübrelerin de birikimli bir yük oluşturduğunu; ancak atıksuyun bu birikimi daha da artırdığını ortaya koymaktadır. Sezon sonunda kadmiyum miktarının belirlenen kritik eşiği aşması, uzun vadede gıda zinciri üzerinden insan sağlığına yönelik bir risk potansiyeli doğurmaktadır.

Ayrıca, deşarj kanalının son varış noktası olan Seyfe gölü ve sulak alan ekosistemine taşınan yüksek mikrobiyolojik yük ile kararlı formdaki ağır metal konsantrasyonları, sucul biyoçeşitlilik ve havza ekolojisi üzerinde birincil derecede bir çevresel tehdit oluşturmaktadır.

Elde edilen bu bilimsel çıktılar ışığında; bölgede sürdürülebilir tarımsal faaliyetlerin yapılandırılması, toprak sağlığının uzun vadede korunması ve çevresel risklerin minimize edilmesi adına çoklu kurumsal mekanizmaların ve teknik stratejilerin hayata geçirilmesi gerekmektedir:

Tesis çıkışında saptanan ve maksimum 241 960.00 EMS/100 mL seviyesine ulaşarak ortalama 10^5 EMS/100 mL düzeyinde seyreden ekstrem koliform yükünün bertaraf edilmesi amacıyla, Boztepe Belediyesi bünyesindeki mevcut dezenfeksiyon altyapısı hızla modernize edilmelidir. Klasik klorlama ünitelerindeki temas süresi ve dozaj optimizasyonunun yanı sıra, mikrobiyolojik olarak bu derece yüksek patojenik yoğunluğa sahip AAS örneklerinde yan ürün riski oluşturmayan ve hem bakteri hem de virüs gideriminde yüksek verimlilik sağlayan Yüksek Yoğunluklu Ultraviyole (UV) Dezenfeksiyon sistemlerinin ileri arıtma kademesi olarak sisteme entegre edilmesi

gerekmektedir. Bulgularımızda saptanan mikrobiyolojik risklerin ortadan kaldırılarak arıtılmış suyun ulusal ve uluslararası en üst sulama suyu kriterlerine (Sınıf A/Kategori A, <1.000 EMS/100 mL) ulaştırılması ve halk sağlığı kısıtlılıklarının aşılması açısından bu teknolojik dönüşüm bir zorunluluk arz etmektedir.

Tesisin mevcut geleneksel ikincil biyolojik sisteminin yüksek amonyum (47.46 mg/L), toplam fosfor (3.20 mg/L) ve sulama kriterlerini aşan arsenik (109.13 µg/L) gibi spesifik parametreleri gidermedeki kısıtlılığı dikkate alınarak, deşarj ve tarımsal yeniden kullanım standartlarının tam sağlanması amacıyla tesis altyapısı modernize edilmelidir. Bu doğrultuda, ekonomik ve teknik işletilebilirliği düşük olan ileri membran teknolojileri yerine; tesis bünyesinde bütüncül bir azot döngüsünün tesisi için anoksik/anaerobik reaktör hacimleri (ileri biyolojik nütrient giderim modülleri) oluşturulmalıdır (Henze ve ark., 2008). Ayrıca, çıkış suyundaki fosfor yükü ile arsenik (As), alüminyum (Al) ve nikel (Ni) gibi metal fraksiyonlarının eş zamanlı olarak giderilmesi amacıyla çıkış hattına kimyasal koagülasyon-flokülasyon (metal çöktürme) ünitelerinin entegrasyonu planlanmalıdır. Bu teknik revizyonların yanı sıra, tesise yönelen lokal küçük sınai atıksu deşarjları, kirliliğin kaynağında kontrolü amacıyla Kırşehir Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü tarafından daha sıkı ve periyodik denetimlere tabi tutulmalıdır.

Bölgede sürdürülebilir ve emniyetli bir tarımsal geri kazanım stratejisinin yürütülmesi amacıyla; Kırşehir İl Tarım ve Orman Müdürlüğü ile Boztepe İlçe Tarım ve Orman Müdürlüğü koordinasyonunda çiftçilere yönelik periyodik eğitim ve yayım çalışmaları düzenlenmelidir. Bulgularımızda saptanan ve ortalama 10^5 EMS/100 mL düzeyinde seyreden ekstrem koliform yükü nedeniyle, deşarj kanalı güzergâhı boyunca çiğ ya da taze tüketilen yapraklı sebzelerin sulanması halk sağlığı ve sanitasyon güvenliği açısından kesinlikle engellenmelidir. Mevcut AAS kalitesi dikkate alınarak, bu suyun sadece bölgede ekim alanı geniş olan şeker pancarı gibi endüstri bitkileri ile mısır ve yonca gibi yem bitkilerinin sulanmasında değerlendirilmesi sınırlandırılmalıdır. Diğer taraftan, su örneklerinde saptanan ortalama 475.02 mg CaCO₃/L düzeyindeki 'çok sert' su karakteristiğinin damla sulama altyapılarında yol açabileceği kireçlenme ve damlatıcı tıkanması risklerini önlemek amacıyla kum/sediman tutucu gelişmiş hidrosiklon ve disk filtre sistemleri kurulmalı; sulama sezonu sonlarında ise seyreltik asit yıkama protokolleri periyodik olarak uygulanmalıdır.

AAS'nin toprakla uzun süreli etkileşimi sonucunda oluşabilecek Değişebilir Sodyum Yüzdesi (DSY) artışı, alkalileşme, tuzluluk ve nikel (Ni) gibi spesifik ağır metal birikimi risklerinin önlenmesi amacıyla; Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi iş birliğiyle

sulama sahalarından dönemsel toprak karot numuneleri alınmalı ve periyodik izleme programları dahilinde toprak matrisindeki değişimler kronik toksisiteye karşı yakından takip edilmelidir.

Drenaj hattının beslediği son alıcı ortam niteliğindeki Seyfe Gölü Sulak Alanı ekosistemindeki ötrofikasyon riskini, taban sedimantasyon proseslerini ve su kalitesi süreçlerini izlemek amacıyla; Kırşehir Doğa Koruma ve Milli Parklar İl Şube Müdürlüğü koordinasyonunda dönemsel sucul flora-fauna taramaları ile sediman analizleri gerçekleştirilmelidir. Böylece hassas alıcı ortamın ekolojik dengesi, zamanla katlanarak artabilecek birikimli (kümülatif)  evresel kirlilik baskısına karşı yasal ve teknik koruma altına alınmalıdır.

Sonuc olarak, bu araştırma kapsamında elde edilen bütüncül  ıktılar; Boztepe  l eęinde sürdürülebilir atıksu yönetimi, tarımsal geri kazanım uygulamaları ve alıcı ortam ekolojik koruma stratejilerinin yapılandırılmasında önemli bir bilimsel referans niteliği taşımaktadır.

KAYNAKLAR

- AATTUT. (2010). *Atık Su Arıtma Tesisi Teknik Usuller Tebliği*. T.C. Resmî Gazete, Sayı: 27527, Ankara.
- Alaton, İ. A., Tanık, A., Övez, S., İskender, G., Gürel, M., & Orhon, D. (2007). Reuse potential of urban wastewater treatment plant effluents in Turkey: a case study on selected plants. *Desalination*, 215, 159-165.
- Alloway, B.J. (2008) Micronutrients and Crop Production: An Introduction. In: Alloway, B.J., Ed., Micronutrient deficiencies in global crop production, *Springer*, New York, 1- 39. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-6860-7_1
- Alloway, B.J. (2013) Heavy Metals in Soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. 3rd Edition, *Springer* Netherlands, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
- APHA, AWWA, & WEF. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (21st ed.). American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington, DC.
- APHA. (1989). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (17th ed.). American Public Health Association.
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29 Rev. 1). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Ayyıldız, M. (1983). Sulama suyu analizleri ve tuzluluk problemleri. *Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları* No: 879, Ders Kitabı: 224, Ankara.
- Ayyıldız, M. (1990). Sulama suyu kalitesi ve tuzluluk problemleri. *Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları* No: 1196, Ders Kit. No: 344, Ankara.
- Becerra-Castro, C., Lopes, A. R., Vaz-Moreira, I., Silva, E. F., Manaia, C. M., & Nunes, O. C. (2015). Wastewater reuse in irrigation: a microbiological perspective on implications in soil fertility and human and environmental health. *Environment international*, 75, 117–135. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.001>
- Black, CA. (1965) *Methods of Soil Analysis: Part I Physical and Mineralogical Properties Part II Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Madison Wisconsin USA.
- Bouyoucos, G.J. (1951), A recalibration of the hydrometer method for making mechanical Analysis of Soils1. *Agronomy Journal*, 43(9), 434-438. <https://doi.org/10.2134/agronj1951.00021962004300090005x>

- Bozdoğan, E. (2009). *Kentsel Atık Suların Yapay Sulak Alanda Arıtılması ve Açık Yeşil Alan Sulamalarında Kullanılabilme Olanaklarının Araştırılması*, (Doktora tezi). Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson Education, New York.
- Can, S.H, & Dulkadiroğlu, H. (2021). Arıtılmış atıksuların tarımda kullanımı ve insan sağlığı yönünden risk değerlendirmesi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(2), 124–134. <https://doi.org/10.17100/nevbiltek.969541>
- Chen, W., Wu, L., Frankenberger, W. T., Jr, & Chang, A. C. (2008). Soil enzyme activities of long-term reclaimed wastewater-irrigated soils. *Journal of Environmental Quality*, 37(5 Suppl), S36–S42. <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0315>
- Correll, D.L. (1998), The Role of Phosphorus in the Eutrophication of Receiving Waters: A Review. *Journal of Environmental Quality*, 27: 261-266. <https://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700020004x>
- Çataloluk, Z. B. (2025). *Arıtılmış atıksuların tarımsal sulama amaçlı yenidenkullanımında su kalitesinin önemi ve ürün verimine etkileri*. (Yüksek Lisans Tezi). Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.
- Çay, Ş. (2013). *Konya kentsel atık sularının tarımsal sulamada kullanılması ve mısır bitkisi yetiştiriciliğine etkileri* (Doktora Tezi). Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarımsal Yapılar ve Sulama Anabilim Dalı.
- Demirhan, N.C. (2020). Boztepe-Kırşehir atık su arıtma tesisi, iş akım şeması ve proses özeti., Kırşehir.
- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ)., (2022). *2021 Yılı Faaliyet Raporu*. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı. Erişim linki: https://cdniys.tarimorman.gov.tr/api/File/GetFile/425/Sayfa/759/1107/DosyaGaleri/2021_yili_faaliyet_raporu.pdf Erişim Tarihi: 30 Temmuz 2025
- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ). (2010). *2009 yılı faaliyet raporu*. T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı. Erişim linki: <https://cdniys.tarimorman.gov.tr/api/File/GetFile/425/KonuIcerik/759/1107/DosyaGaleri/ds%C4%B1-2009-faal%C4%B1yet-raporu.pdf>, Erişim Tarihi: 22 Şubat 2025

- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ). (2024). *Türkiye'nin Toprak ve Su Kaynakları Potansiyeli*. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. <https://dsi.gov.tr>. Erişim Tarihi: 07 Haziran 2025
- Doğan, M. (2003). Şanlıurfa'da Karakoyun deresi atık suları ile sulanan soğanda (*Allium cepa* L.) toksik element birikimi üzerine bir araştırma. *Ekoloji Dergisi*, 12(48), 1–3.
- Duman, H. (2017). *Arıtılmış kentsel atık suların sulamada yeniden kullanımı; Kayseri atıksu arıtma tesisi örneği* (Uzmanlık Tezi). T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2004). *Guidelines for water reuse* (EPA/625/R-04/108). Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.
- Erdağ, R. (2015). Türkiye'nin sınıraşan sular sorunu. *Yalova Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 5(9), 27–52.
- European Commission (EU). (2016). *Guidelines on integrating water reuse into water planning and management in the context of the WFD*. Brussels, Belgium: European Union.
- Eysel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik. (2010). T.C. Resmî Gazete, (27661), 3 Ağustos 2010.
- Eyduran, E., Tatlıyer, A., Waheed, A., & Tarıq, M. (2014). Determination of the most appropriate covariance structure for data with missing observations in repeated measures design. *KSÜ Doğa Bilimleri Dergisi*, 16(3), 32-37. <https://doi.org/10.18016/ksujns.69277>
- Fendorf, S. E. (1995). Surface reactions of chromium in soils and waters. *Geoderma*, 67(1-2), 1-71. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(94\)00062-F](https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)00062-F)
- Fesliyen, K. (2017). *Eysel atıksuların sulama amaçlı yeniden kullanılması*. (Yüksek Lisans Tezi). Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Filella, M., Belzile, N., & Chen, Y. W. (2002). Antimony in the environment: a review focus on natural waters. *Earth-Science Reviews*, 57(1-2), 125-176. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00070-8](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00070-8)
- Food and Agriculture Organization (FAO), Rome, Italy <https://doi.org/10.4060/cb9910en>.
- Food and Agriculture Organization (FAO)& World Health Organization (WHO). (2001). *Codex Alimentarius Commission: Food additives and contaminants* (Joint FAO/WHO Food Standards Programme, *Alinorm* (01/12A). Rome, Italy.

- Food and Agriculture Organization (FAO). (1985). *Water quality for agriculture* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29, Rev. 1). Rome, Italy.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (1992). *Wastewater treatment and use in agriculture* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 47). Rome, Italy.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2010). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW)*. Rome, Italy.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2021). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture: Systems at breaking point (SOLAW 2021)*.
- Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 407–418. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>
- Gatta, P., Libutti, A., Disciglio, G., Gagliardi, A., Lonigro, A., & Tarantino, E. (2015). Treated agro-industrial wastewater irrigation of tomato crop: Effects on qualitative/quantitative characteristics of production and microbiological properties of the soil. *Agricultural Water Management*, 149(2), 33-43. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.016>.
- Gülocak, H. (2019). *Kırklareli yöresindeki atıksuların tarımda sulama amaçlı kullanılabilirliğinin belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırşehir, 125s.
- Gülocak, H., & Kıymaz, S. (2022). Determination of usability of wastewater for irrigation purposes in agriculture in Kırklareli region. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 10(sp1), 2772–2782.
- Gülocak, H., & Kıymaz, S. (2022). Investigation of the possibilities of using the wastewater of Kırklareli region in agriculture. *MAS Journal of Applied Sciences*, 7(Özel Sayı), 1121–1131. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7451699>
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management* (8th ed.). Pearson.
- Hem, J. D. (1985). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water* (3rd ed.). U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254. <https://doi.org/10.3133/wsp2254>
- Henze, M., van Loosdrecht, M. C. M., Ekama, G. A., & Brdjanovic, D. (2008). *Biological wastewater treatment: Principles, modelling and design*. IWA Publishing.

- Hoch, M. (2001). Organotin compounds in the environment — an overview. *Applied Geochemistry*, 16(7-8), 719-743. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(00\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(00)00067-6)
- Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace elements in soils and plants* (4. baskı). CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA. <https://doi.org/10.1201/b10158>
- Kacar, B. (1994). *Bitki ve toprağın kimyasal analizleri III*. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları No:3, Ankara.
- Kacar, B. (1995) *Bitki ve Toprağın Kimyasal Analizleri. III. Toprak Analizleri*. Ankara Üniversitesi Ziraat Fak. Eğitim, Araştırma ve Geliştirme Vakfı Yayınları No: 3, Ankara.
- Kaçar, A., & Güngör, F. (2010). Comparison of fecal coliform bacteria before and after wastewater treatment plant in the Izmir Bay (Eastern Aegean Sea). *Environmental Monitoring and Assessment*, 162, 355–363. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0801-4>
- Kehrein, P., van Loosdrecht, M., Osseweijer, P., & Posada, J. (2020). Exploring resource recovery potentials for the aerobic granular sludge process by mass and energy balances – energy, biopolymer and phosphorous recovery from municipal wastewater. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 6(8), 2164–2179. <https://doi.org/10.1039/D0EW00310G>
- Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği. (2006). T.C. Resmî Gazete (Sayı: 26047, 8 Ocak 2006).
- Kerç, A., & Evcimen, S. (2011). Application of UV disinfection in municipal wastewater treatment plants for agricultural reuse in Turkey. *Desalination and Water Treatment*, 26(1–3), 39–44. <https://doi.org/10.5004/dwt.2011.2107>
- Keser, G. (2013). Effects of irrigation with wastewater on the physiological properties and heavy metal content in *Lepidium sativum* L. and *Eruca sativa* (Mill.). *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(7), 6209–6217. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-3018-x>
- Khaskhoussy, K., Kahlaoui, B., Nefzi, B. M., Jozdan, O., Dakheel, A., & Hachicha, M. (2015). Effect of treated wastewater irrigation on heavy metals distribution in a Tunisian soil. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 5(3), 805–810. <https://doi.org/DOI: 10.48084/etasr.563>
- Kızılkaya, R., Aşkın, T., Bayraklı, B., & Sağlam, M. (2005). Arıtılmış atık suların tarımda kullanımının toprak özellikleri üzerine etkisi. *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 20(3), 115-121.

- Kitis, M. (2004). Disinfection of wastewater with peracetic acid: A review. *Environment International*, 30(1), 47-55. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(03\)00147-8](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00147-8).
- Korkusuz, E. A. (2004). *Domestic wastewater treatment in pilot-scale constructed wetlands implemented in the Middle East Technical University*, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Ankara.
- Kukul, Y. S., Çalışkan, A. D. Ü. & Anaç, S. (2007). Arıtılmış atık suların tarımda kullanılması ve insan sağlığı yönünden riskler. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 44(3), 101-116.
- Lindsay, W.L. and Norvell, W.A. (1978). Development of a Dtpa Soil Test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42, 421-428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
- Masinga, P., Simbanegavi, T. T., Makuvara, Z., Marumure, J., Chaukura, N., & Gwenzi, W. (2024). Emerging organic contaminants in the soil-plant-receptor continuum: transport, fate, health risks, and removal mechanisms. *Environmental monitoring and assessment*, 196(4), 367. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12282-7>
- Mason, R. P., & Sullivan, K. A. (1998). The role of terrestrial runoff and direct atmospheric deposition in the mercury budgets of estuarine and coastal waters. *Biogeochemistry*, 42(1), 141-173. <https://doi.org/10.1023/A:1005934524457>
- Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003). *Wastewater engineering: Treatment and reuse* (4th ed.). McGraw-Hill, New York.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM). (2024). *Türkiye yıllık alansal yağış normalleri (1991-2020)*. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Ankara. <https://mgm.gov.tr>
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM). (2026). *Resmi İklim Verileri ve Meteorolojik Rasat Sonuçları (2024-2025 Dönemi)*. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Mineo, A., Mofatto, P. M. B., Carnesi, M., Cosenza, A., Di Trapani, D., & Mannina, G. (2025). Membrane bioreactor and ultrafiltration for water reuse: A pilot scale study on urban wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 77, 108435. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.108435>
- Minhas, P.S., Khajanchi-Lal, Yadav, R. K., Dubey, S. K. & Chaturvedi, R. K. (2015). Long term impact of waste water irrigation and nutrient rates: I. Performance, sustainability and produce quality of peri urban cropping systems. *Agricultural Water Management*, 156, 100-109. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.012>

- Olsen, S. R. (1953). İnorganic phosphorus in alkaline and calcareous soils. *American Society of Agronomy Journal Monograph*, 4, 89-122.
- Öztek, Z. (2023). *Sürdürülebilir kalkınma ve sağlık* (Yayın No. 13-2023/2). Sağlık ve Sosyal Yardım Vakfı. ssyv.org.tr. Erişim Tarihi: 25 Haziran 2025
- Paz-González, A ., Vieira, S.R., Castro, M.T.,(2020).The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon., *Geoderma*, 273-292 [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00066-5)
- Pedrero, F., Kalavrouziotis, I., Alarcón, J. J., Koukoulakis, P., & Asano, T. (2010). Use of treated municipal wastewater in irrigated agriculture — Review of some practices in Spain and Greece, *Agricultural Water Management*, 97(9), 1233–1241. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.03.003>
- Polat, A. (2013). Su kaynaklarının sürdürülebilirliği için arıtılan atıksuların yeniden kullanımı. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 6(1), 58–62.
- Qadir, M., Drechsel, P., Jiménez Cisneros, B., Kim, Y., Pramanik, A., Mehta, P., & Olaniyan, O. (2020). Global and regional potential of wastewater as a water, nutrient and energy source. *Natural Resources Forum*, 44(1), 40–51. <https://doi.org/10.1111/1477-8947.12187>.
- Richards, L. A. (1954). *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. USDA Agricultural Handbook No: 60, Washington, DC.
- Rizzo L, Gernjak W, Krzeminski P, Malato S, McArdell CS, Perez JAS, Schaar H, &Fatta-Kassinos D. (2020). Best available technologies and treatment trains to address current challenges in urban wastewater reuse for irrigation of crops in EU countries. *Science of the Total Environment*, 710, 136312 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136312>.
- Romić, D., Castrignanò, A., Romić, M., Buttafuoco, G., Bubalo Kovačić, M., Ondrašek, G., & Zovko, M. (2020). Modelling spatial and temporal variability of water quality from different monitoring stations using mixed effects model theory. *The Science of the Ttotal Environment*, 704, 135875. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135875>.
- Rusan, M. J. M., Hinnawi, S., & Rousan, L. (2007). *Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality*. *Desalination*, 215(1-3), 143-153.<https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.10.032>.

- Rusan, M. J. M., Hinnawi, S., Rousan, L. (2007) Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. *Desalination* 215, 143–152. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.10.032>
- Rüdel, H. (2003). Case study: bioavailability of tin and organotin compounds. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 56(1), 180-189. [https://doi.org/10.1016/s0147-6513\(03\)00061-7](https://doi.org/10.1016/s0147-6513(03)00061-7).
- Salgot, M., & Folch, M. (2018). Wastewater treatment and water reuse. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2, 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.03.005>.
- Salomons, W., & Förstner, U. (1984). *Metals in the Hydrocycle*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-69325-0>.
- Saraoğlu, E. (2014). *Aritılmış atıksuların tarımsal sulamada yeniden kullanımı: Ülkemizden ve dünyadan uygulama örnekleri*, 39. Uzmanlık Tezi, T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Ankara,
- Sato, T., Qadir, M., Yamamoto, S., Endo, T., & Zahoor, A. A. (2013). Regional, country-level need for data on wastewater generation, treatment, and use. *Agricultural Water Management*, 130, 1–13.
- Ser, G., & Bati, CT. (2015). Eksik veri analizinde çoklu atama yönteminin değerlendirilmesi: Hayvancılıkta tekrarlı ölçüm verisi üzerine bir uygulama. *Türk Tarım-Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3(12): 926-932.
- Shek, D.T., & Ma, C.M. (2011). Family processes and suicidal ideation among chinese adolescents in hong kong. *The Scientific World Journal*, 11, 27 - 41.
- Silva, J. A. (2023). Wastewater treatment and reuse for sustainable water resources management: A systematic literature review. *Sustainability*, 15(14), 10940. <https://doi.org/10.3390/su151410940>.
- SKKY. (2004). *Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği*, 31.12.2004 tarihli ve 25687 sayılı Resmi Gazete.
- Soil Survey Staff. (1993). *Soil Survey Manual*. U.S. Department of Agriculture Handbook No: 18, Washington D.C.
- Sparks, D.L. (2003) *Environmental Soil Chemistry*. 2nd Edition, Academic Press, Oxford. <https://doi.org/10.1016/B978-012656446-4/50001-3>
- SUEN (2021). *Konya kapalı havzasında arıtılmış atıksuların tarımsal amaçla yeniden kullanımına dair pilot uygulama proje raporu*. Türkiye Su Enstitüsü & WATERMED 4.0 Konsorsiyumu.

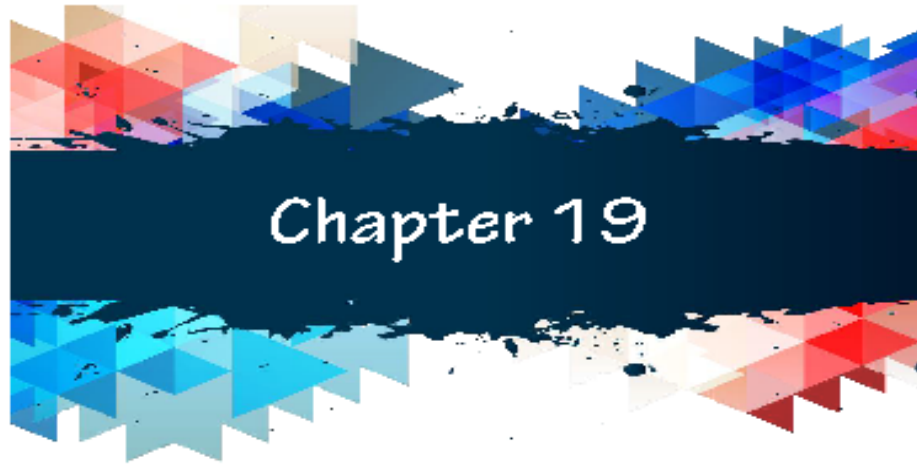
- SYGM (2022). *Konya havzası nehir havza yönetim planı ve yeraltı suyu tedbirler programı*. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik* (2010). *T.C. Resmî Gazete*, Sayı: 27605, Tarih: 8 Haziran 2010.
- TSE (2026). *Su kalitesi standartları kataloğu* (Tablo 3.1'de atıf yapılan tüm TS EN/ISO analiz metotları). Ankara: TSE.
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2018). *Nüfus projeksiyonları, 2018-2080* (Haber Bülteni Sayı: 30567).
- Tüzüner, A. (1990). *Toprak ve su analiz laboratuvarları el kitabı*. Tarım, Orman ve Köyişleri Bakanlığı, Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü, Ankara.
- US EPA. (1994). *Method 200.8: Determination of Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (Revision 5.4)*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Cincinnati, OHIO.
- Ülgen, N., Yurtsever, N. (1995). *Türkiye Gübre Rehberi*. T.C. Başbakanlık Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü Toprak ve Gübre Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü Yayınları, Genel Yayın No: 186, Teknik Yayın No: 28, Ankara.
- Ülgen, N., Yurtsever, N., 1995. Türkiye Gübre ve Gübreleme Rehberi (4. Baskı). T.C. Başbakanlık Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü Toprak ve Gübre Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü Yayınları. Genel Yayın No: 209, Teknik Yayınlar No: T.66, s.230, Ankara.
- Vareda JP, Valente AJM, & Durães L. (2019) Assessment of heavy metal pollution from anthropogenic activities and remediation strategies: A review. *Journal Environment Management*, 246, 101-118. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.126>
- Wen, L., Cui, Y., Huang, L., Wei, C., Wang, G., Zhang, J., Jiang, Y., Wei, Y., & Shen, P. (2024). Changes of composition and antibiotic resistance of fecal coliform bacteria in municipal wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Sciences*, 146, 241–250. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.07.018>.
- WHO. (2006) Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater. Volume 2, *Wastewater Use in Agriculture*. World Health Organization, Geneva. <https://www.who.int/watersanitationhealth/publications/gsuweg2/en/>. Erişim Tarihi: 13 Nisan 2025

- Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği*. (2021). T.C. Resmî Gazete (Sayı: 31675, 30 Kasım 2021).
- Yiğit, N.Ö. (2007). *Membran Biyoreaktörü ile (MBR) evsel atıksu arıtımı* (Doktora Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- YSKYY. (2012). *Yüzeysel Su Kalitesi Yönetimi Yönetmeliği*. T.C. Resmî Gazete, Sayı: 28483, Ankara
- Yurtseven, E. (2016). *Sulama Suyu Kalitesi ve Tuzluluk. Ders Notları*, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Ankara.
- Zema, D.A., Esteban Lucas-Borja, M., Andiloro, S., Tamburino, V., & Zimbone, S.M. (2019). Short-term effects of olive mill wastewater application on the hydrological and physico-chemical properties of a loamy soil. *Agricultural Water Management*, 221, 312–321. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.011>.

EKLER

EK-1

Kitap Bölümü



Reuse of Treated Wastewater

Taşkın Kirgezen¹ & Sultan Kıymaz²

¹ Forest Engineer, Kırşehir Ahi Evran University Institute of Natural Sciences Department of Biosystems Engineering, Kırşehir, Turkey, Orcid no: 0009-0008-8463-5885

² Prof. Dr., Kırşehir Ahi Evran University Faculty of Agriculture Department of Biosystems Engineering, Kırşehir, Turkey.; Orcid no: 0009-0002-9228-7525

EK-2

İzin Yazısı

T.C
KIRŞEHİR İLİ
BOZTEPE BELEDİYE BAŞKANLIĞI

Sayı : 27838191- 139
Konu : Veri Talebi hk.

16.02.2026

KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
Öğrenci İşleri Dairesi Başkanlığına

İlgi: 15.01.2026 tarih ve E.844264 sayılı yazınız.
İlgi sayılı yazınızda bahsedilen; Üniversitenizin Fen Bilimleri Enstitüsü Biyosistem Ana Bilim Dalı 231051003 numaralı Yüksek Lisans Programı Öğrencisi Taşkın KIRGEZEN'in "Evsel Arıtılmış Atık Sularının Çevresel Yeniden Kullanımı" adlı tez çalışmalarında kullanılmak üzere Başkanlığımız ait Arıtma Tesisinden Su Numunesi almasında her hangi bir sakınca yoktur.
Bilgilerinize rica ederim.

Musa CEYLAN
Belediye Başkanı

Adres: Bağbaşı Mah. Belediye Cad. No: 62 BOZTEPE / KIRŞEHİR
M.YILMAZ Telefon : (386) 512 30 04 Faks : (386) 512 32 70

Ayrıntılı Bilgi:

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER	
Adı Soyadı:	Taşkın KIRGEZEN
Uyruğu:	T.C.
Orcid Numarası:	0009-0008-8463-5885

EĞİTİM BİLGİLERİ	
Lisans	
Üniversite:	İstanbul Üniversitesi
Fakülte:	Orman Fakültesi
Bölümü:	Orman Mühendisliği
Mezuniyet Yılı:	2013
Yüksek Lisans	
Üniversite:	Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi
Enstitü:	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı:	Biyosistem Mühendisliği
Mezuniyet Yılı:	2026

Tezden Üretilen Makaleler ve Bildiriler
Kırgezen, T., & Kıymaz, S. (2024). Reuse of Treated Wastewater. Advances in Agriculture, Forestry and Aquaculture Science, 307-319. (Editors Prof. Ali Musa Bozdoğan, Ph.D., Prof. Nigar Yarpuz Bozdoğan, Ph.D. Prof. Dr. Nilda Ersoy, Ph.D.) Platanus Publishing. ISBN 978-625-6636-52-9 https://doi.org/10.5281/zenodo.14581896.