



**TARIMSAL SULAMADA GERİ
DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ ATIK SU KULLANIMININ
FASULYE (*Phaseolus vulgaris* L.) BİTKİSİ VE
TOPRAKTA AĞIR METAL KİRLİLİK YÜKÜNE
ETKİSİ**

Muhammet Gökhan GÜRBULAK

Danışman: Prof.Dr. Özlem KORKUT

Yüksek Lisans Tezi

Temel İşlemler ve Termodinamik Anabilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEMEL İŞLEMLER VE TERMODİNAMİK ANABİLİM DALI

**TARIMSAL SULAMADA GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ ATIK SU KULLANIMININ
FASULYE (*Phaseolus vulgaris* L.) BİTKİSİ VE TOPRAKTA AĞIR METAL
KİRLİLİK YÜKÜNE ETKİSİ**

(Effect of Recycled Wastewater Use in Agricultural Irrigation on Pollution Load in Bean
(*Phaseolus vulgaris* L.) and Soil)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammet Gökhan GÜRBULAK

Danışman: Prof.Dr. Özlem KORKUT
İkinci Danışman: Prof. Dr. Yasemin KUŞLU

Erzurum
Ocak 2025



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Graduate School of Natural and
Applied Sciences

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

**TARIMSAL SULAMADA GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ ATIK SU KULLANIMININ
FASULYE (*Phaseolus Vulgaris* L.) BİTKİSİ ve TOPRAKTA AĞIR METAL KİRLİLİK
YÜKÜNE ETKİSİ**

Prof. Dr. Özlem KORKUT danışmanlığında, Muhammet Gökhan GÜRBULAK tarafından hazırlanan bu çalışma, 24/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı Temel İşlemler ve Termodinamik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Mehmet Kerim GÜLLAP <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Özlem KORKUT <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
İkinci Tez Danışmanı:	Prof. Dr. Yasemin KUŞLU <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Tuba YETİM <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Tuba Hatice DOĞAN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır

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

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

Prof.Dr. Alper NUHOĞLU

Enstitü Müdürü
Aslı ıslak imzalıdır

Bu çalışma BAP Çok Disiplinli Araştırma Projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: FCD-2024-13438

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**Graduate School of Natural and
Applied Sciences**T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ****ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU**

Yüksek Lisans Tezi olarak Prof. Dr. Özlem KORKUT danışmanlığında sunulan “ *Tarımsal Sulamada Geri Dönüştürülmüş Atık Su Kullanımının Fasulye (Phaseolus Vulgaris L.) Bitkisi ve Toprakta Ağır Metal Kirlilik Yüküne Etkisi* ” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	7	30
Kuramsal Temeller	18	30
Materyal ve Metot	17	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	11	20
Sonuçlar ve Öneriler	5	20
Tezin Geneli	17	25

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

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

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Muhammet Gökhan GÜRBULAK	Prof. Dr. Özlem KORKUT
24.1.2025	24.1.2025
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

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

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

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanmasında bana destek olan ve katkı sağlayan öncelikle, tez danışmanım Prof. Dr. Özlem KORKUT'a, değerli rehberliği, bilimsel birikimi ve bana gösterdiği sabır için en içten teşekkürlerimi sunarım.

İkinci danışman hocam Prof. Dr. Yasemin KUŞLU'ya, araştırma sürecindeki değerli katkıları ve yönlendirmeleri için teşekkür ederim.

Tez çalışmamın tüm aşamalarında yanımda olan ve destekleri çalışmamın en önemli parçasını oluşturan dostum Arş. Gör. Dr. Hasan ER'e içtenlikle teşekkür ederim.

Arş. Gör. Dr. Büşra DURLU'ya analiz aşamasındaki yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışmanın her aşamasında yanımda olan Erdal KISA'ya sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca, bu süreçte bana her zaman destek olan, sabır gösteren ve moral kaynağım olan eşime, anneme, babama ve kardeşlerime sonsuz teşekkür ederim.

Son olarak bu çalışmaya FCD-2024-13438 numaralı Çok Disiplinli Araştırma Projesi ile finansal destek sağlayan Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Muhammet Gökhan GÜRBULAK

ÖZET
YÜKSEK LİSANS TEZİ
TARIMSAL SULAMADA GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ ATIK SU KULLANIMININ
FASULYE (*Phaseolus vulgaris* L.) BİTKİSİ VE TOPRAKTA AĞIR METAL
KİRLİLİK YÜKÜNE ETKİSİ

Muhammet Gökhan GÜRBULAK

Danışman: Prof. Dr. Özlem KORKUT

İkinci Danışman: Prof. Dr. Yasemin KUŞLU

Amaç: Bu çalışmanın amacı, bodur fasulye (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Gina-AD) yetiştiriciliğinde farklı sulama seviyelerinde geri dönüştürülmüş atık su kullanılmasının bitki ve toprakta ağır metal birikimine etkisini araştırmaktır.

Yöntem: Çalışma, Haziran – Eylül 2024 tarihleri arasında Atatürk Üniversitesi Bitkisel Üretim Uygulama ve Araştırma Merkezi sahasında gerçekleştirilmiştir. Su kaynağı olarak Erzurum Büyükşehir Belediyesi Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi (BAAT) çıkış suyu ve yeraltı suyu kullanılmıştır. Damla sulama yöntemiyle A sınıfı buharlaşma kabı okumalarının farklı düzeyleri (%100, %75, %50 ve %25) uygulanmıştır. Toprak ve fasulyeden alınan örneklerde Fe, Cd, Cu, Mn, Zn, Ni, Pb, Cr ve Hg element analizleri; ayrıca fasulyede *Escherichia coli* (*E. coli*) analizleri yapılmıştır.

Bulgular: Yapılan analizlerde toprakta en düşük ve en yüksek Fe, Cd, Cu, Mn, Zn, Ni, Pb, Cr ve Hg miktarları sırasıyla 38,71-48,34, 0,001-0,034, 3,37-5,24, 7,94-10,10, 67,26-125,80, 0,68-1,44, 0,94-1,93 ve 0,70-1,57 mg.kg⁻¹ olarak ölçülmüştür. Fasulyede en düşük ve en yüksek Fe, Cd, Cu, Mn ve Cr miktarları, sırasıyla, 132-351, 0,01-0,17, 1,00-11,50, 16,15-46,27 ve 0,01-1,19 mg.kg⁻¹ olarak ölçülmüştür. Sulama düzeyi ve su kalitesinin fasulyede Zn, Ni ve Pb içeriklerine etkisi p≤0,05 düzeyinde önemsiz bulunmuştur. Hg ise hem toprakta hem de fasulyede tespit edilememiştir. Toprak ve fasulyede ölçülen ağır metal içeriklerinin, Toprak Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği ve Dünya Sağlık Örgütü tarafından belirtilen sınır değerlerin altında olduğu saptanmıştır. Fasulyede yapılan mikrobiyolojik analizlerde *E. coli* oluşumu gözlenmemiştir.

Sonuç: BAAT çıkış suyunun kısa-sürelili sulama amaçlı kullanılması durumunda toprak ve bitkilerde ağır metal birikiminin belirlenen sınır değerlerini aşmayacağı belirlenmiştir. Bu bulgu, BAAT çıkış suyunun damla sulama yöntemiyle fasulye yetiştiriciliğinde alternatif su kaynağı olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: geri dönüştürülmüş atık su, kısıtlı sulama, fasulye (*Phaseolus vulgaris* L.), toprak kirliliği, ağır metal birikimi, *Escherichia coli*

Ocak 2025, 81 sayfa

ABSTRACT
MASTER'S THESIS
EFFECT OF RECYCLED WASTEWATER USE IN AGRICULTURAL IRRIGATION
ON POLLUTION LOAD IN BEAN (*Phaseolus vulgaris* L.) AND SOIL

Muhammet Gökhan GÜRBULAK

Supervisor: Prof. Dr. Özlem KORKUT

Co-supervisor: Prof. Dr. Yasemin KUŞLU

Purpose: The objective of this study is to investigate the effect of the use of recycled wastewater at different irrigation levels for dwarf bean (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Gina-AD) growth on heavy metal accumulation in the plants and the soil.

Method: Method: The study was carried out between June and September 2024 at the Atatürk University Plant Production Application and Research Center area. Groundwater and wastewater recycled by Erzurum Metropolitan Municipality Biological Wastewater Treatment Plant (BWTP) were used as water sources. Different levels of Class A evaporation pan measurements (100%, 75%, 50% and 25%) were applied with drip irrigation method. Elemental analyses including Fe, Cd, Cu, Mn, Zn, Ni, Pb, Cr, and Hg were performed on samples of soil and beans. In addition, analyses of *Escherichia coli* (*E. coli*) were conducted on the beans.

Findings: In the analyses, the lowest and highest concentrations of Fe, Cd, Cu, Mn, Zn, Ni, Pb, Cr, and Hg in the soil were found to be 38,71 – 48,34, 0,001 – 0,034, 3,37 – 5,24, 7,94 – 10,10, 67,26 – 125,80, 0,68 – 1,44, 0,94 – 1,93, and 0,70 – 1,57 mg.kg⁻¹, respectively. The lowest and highest concentrations of Fe, Cd, Cu, Mn, and Cr in beans were measured as 132-351, 0,01-0,17, 1,00-11,50, 16,15-46,27, and 0,01-1,19 mg.kg⁻¹, respectively. Effects of irrigation level and water quality on Zn, Ni, and Pb contents in green beans were found insignificant at $p \leq 0.05$. In both soil and green beans, Hg was not detected. It was ascertained that the concentrations of heavy metals in the soil and beans were found to be below the established limit values stipulated by the Soil Pollution Control Regulation and the World Health Organization. Microbiological analyses of the beans revealed the absence of *E. coli* formations.

Results: It was determined that the accumulation of heavy metals in soil and plants will not exceed the determined limit values when BWTP outlet water is used for short-term irrigation purposes. This finding indicates that using recycled water as an alternative water source in bean cultivation with the drip irrigation method is a viable option.

Key Words: recycled wastewater, restricted irrigation, bean (*Phaseolus vulgaris* L.), soil pollution, heavy metal accumulation, *Escherichia coli*

January 2025, 81 pages

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLolar DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
GİRİŞ	1
KAYNAK ÖZETLERİ	10
Geri Dönüştürülmüş Atık Su	10
Kısıtlı Sulama	15
Fasulye Bitkisi	16
<i>Escherichia Coli (E. coli)</i>	19
Ağır Metaller	20
MATERYAL ve METOD	26
Materyal	26
Araştırma Alanı	26
Sulama Suyu Kaynakları	30
Damla Sulama Sistemi	32
Metot	33
Deneme Deseni	33
Fide Hazırlığı ve Ekim	35
Hasat İşlemleri	37
Ağır Metal Analizi	38
Mikrobiyolojik Analiz	41
Verilerin Değerlendirilmesi	42
Duncan Çoklu Karşılaştırma Testi	42
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	44
Sulama Sularının Özellikleri	44
Bakteri Analizi	45
Ağır Metal Analizleri	46
Toprak Ağır Metal İçerikleri	46

Bitki Ağır Metal İçerikleri.....	51
SONUÇ VE ÖNERİLER	57
KAYNAKLAR.....	59
ÖZGEÇMİŞ.....	69



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Sulama suyu nitelik kriterleri	11
Tablo 2. Bazı gıdalarda <i>E. Coli</i> sınır değerleri	19
Tablo 3. Sulama suyunda izin verilebilen maksimum ağır metal ve toksik elementlerin konsantrasyonları.....	21
Tablo 4. Toprakta ağır metal sınır değerleri	22
Tablo 5. Bitkilerde izin verilebilir ağır metal içerikleri.....	22
Tablo 6. Araştırma bölgesine ilişkin meteorolojik veriler	28
Tablo 7. Denemede kullanılan sulama sularının kalite analiz sonuçları.....	44
Tablo 8. Farklı sulama seviyeleri ve sulama suyu kalitelerinde, 0-30 cm toprak derinliğinde tespit edilen ağır metallerin toprak içeriğine etkisi	47
Tablo 9. Farklı sulama seviyeleri ve sulama suyu kalitelerinde, 0-30 cm toprak derinliğinde toprakta tespit edilen ağır metallerin varyans analizi sonuçları	48
Tablo 10. Farklı sulama seviyeleri ve sulama suyu kalitelerinde ağır metallerin fasulye içeriğine etkisi	52
Tablo 11. Farklı sulama seviyeleri ve sulama suyu kalitelerinde, fasulye bitkisinde tespit edilen ağır metallerin varyans analizi sonuçları	53
Tablo 12. Farklı sulama seviyeleri ve arıtılmış atık suda fasulye bitkisinde tespit edilen ağır metallerin deneme konularına göre sıralaması	53
Tablo 13. Farklı sulama seviyeleri ve karma sulamada fasulye bitkisinde tespit edilen ağır metallerin deneme konularına göre sıralaması	53
Tablo 14. Farklı sulama seviyeleri ve temiz sulamada fasulye bitkisinde tespit edilen ağır metallerin deneme konularına göre sıralaması	54

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Sektörlere göre su kullanımı	1
Şekil 2. Türkiye’de yıllık kullanılabilir su miktarının yıllara göre değişimi.....	3
Şekil 3. Besiyerilere bakteri ekimi sonrası oluşan <i>E.coli</i> bakterileri, besiyerilere bakteri ekimi sonrası oluşan diğer koliform bakteriler	6
Şekil 4. Araştırma alanının uydu görüntüsü.	26
Şekil 5. Çalışmanın yürütüldüğü deneme alanından görünümeler	27
Şekil 6. Çalışma alanının uzun dönem ve deneme yıllarına ait minimum sıcaklık, maksimum sıcaklık, ortalama sıcaklık ve toplam yağış değişimleri	29
Şekil 7. Toprak örneği alma işlemleri	30
Şekil 8. Atık Su Arıtma Tesisine giren kanalizasyon suyu, Karasu Nehrine deşarj edilen arıtılmış su	31
Şekil 9. Arıtılmış atık suyun vidanjörle taşınması, depoya aktarım işlemi	31
Şekil 10. Damla sulama sistemi	32
Şekil 11. Deneme planı	34
Şekil 12. Viyollere tohum ekim işlemi.....	35
Şekil 13. Deneme alanına ekim için hazır olan fideler.....	36
Şekil 14. Fidelerin deneme alanına ekimi	36
Şekil 15. Çapalama işlemi öncesi, çapalama işlemi sonrası.....	37
Şekil 16. Fidelerde toplanmaya hazır duruma gelen fasulyeler, parsellerden toplanan fasulyeler	37
Şekil 17. Laboratuvarda kullanılan etüv, kurutma için etüve bırakılan toprak örnekleri.....	39
Şekil 18. Kurutulmuş fasulye örneklerinin öğütücü değirmenden geçirilme, öğütücü değirmenden geçirilen örneklerin numaralandırma çalışmaları	40
Şekil 19. Endüktif Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektrometrisi (Agilent 7800 ICP-MS).....	40
Şekil 20. Analizin yapıldığı çeker ocak,bakteri ekimi için kullanılan petri kapları.....	41
Şekil 21. Mikrobiyolojik analiz işlemleri.....	42
Şekil 22. Mikrobiyolojik analiz sonuçları	46
Şekil 23. Farklı sulama sulama seviyeleri ve sulama suyu kalitelerinde 0-30 cm toprak derinliğinde bazı ağır metallerin toprak içeriğine etkisinin grafiksel gösterimi.....	50
Şekil 24. Farklı sulama seviyeleri ve sulama suyu kalitelerinde bazı ağır metallerin fasulye bitki içeriğine etkisinin grafiksel gösterimi	55

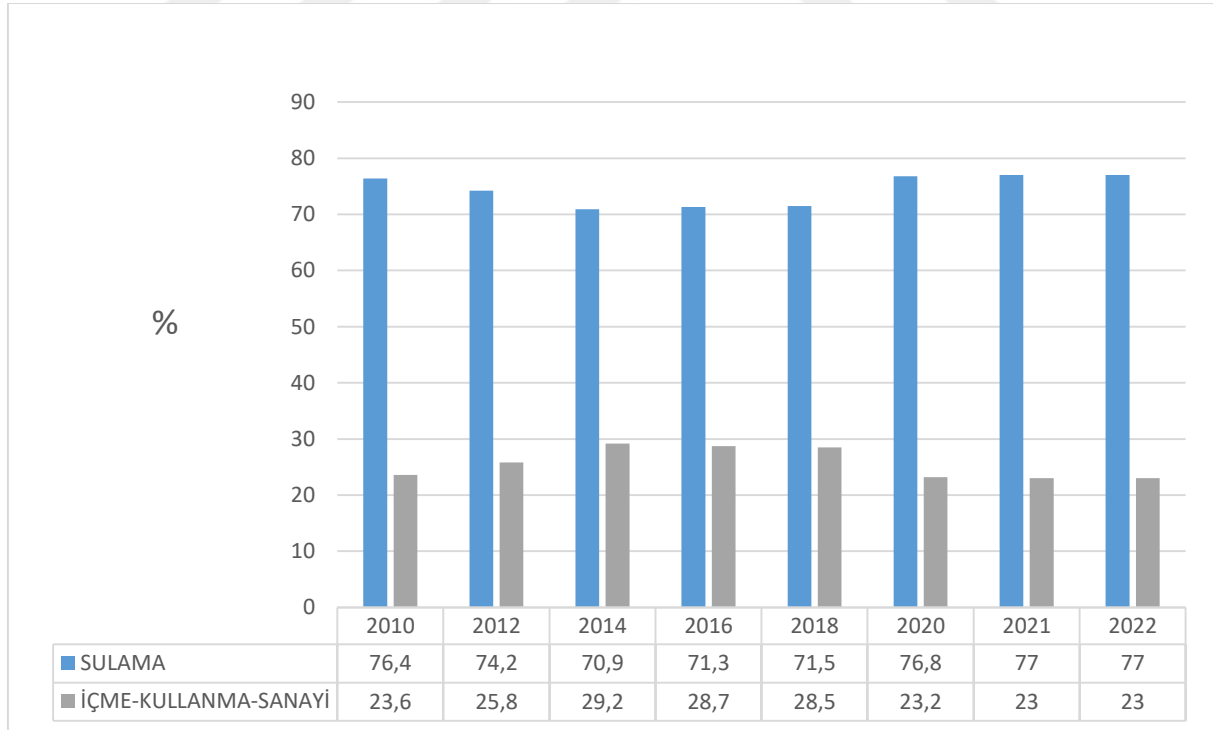
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

AKM	:Askıda Katı Madde
ASS	:Aralıklı Su Stresi
ATA-BUAM	:Atatürk Üniversitesi Bitkisel Üretim Uygulama ve Araştırma Merkezi
BAAT	:Biyolojik Atık Su Arıtma Tesisi
BOİ	:Biyolojik Oksijen İhtiyacı
EC	:Elektriksel İletkenlik
EPA	:Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı
ESP	:Değişebilir Sodyum Yüzdesi
FAO	:Gıda ve Tarım Örgütü
HRI	:Sağlık Risk İndeksi
KOİ	:Kimyasal Oksijen İhtiyacı
RSC	:Kalıcı Sodyum Karbonat Değeri
SAR	:Sodyum Absorbsiyon Oranı
SSP	:Çözünür Sodyum Yüzdesi
TÇM	:Toplam Çözünmüş Madde
TDS	:Toplam Çözünmüş Katı Madde
TN	:Toplam Azot
TP	:Toplam Fosfor
WHO	:Dünya Sağlık Örgütü
WWAP	:Dünya Su Değerlendirme Programı
μS	:Mikrosiemens
μL	:Mikrolitre
dS	:Desisiemens

GİRİŞ

Yaşam için gerekli olan su, uzun yıllardır küresel tartışmalarda önemli bir konu olmuştur. Kentleşme, hızlı nüfus artışı, su tüketimi ve iklim değişikliği, tatlı su kaynakları üzerindeki baskıda önemli rol oynayan ve dolayısıyla dünya çapında su krizinin daha da kötüleşmesine neden olan temel faktörlerdir. Bununla birlikte, büyük ölçüde tarımda sulamaya duyulan yoğun ihtiyaç nedeniyle, taze ve temiz suyun küresel mevcudiyeti azalmaktadır. Bu nedenle su kaynaklarının verimli kullanılması zorunlu hale gelmiştir (Alzabieh 2024).

Öte yandan tarım sektörü, nehirler ve yeraltı suyu gibi tatlı su kaynaklarından gelen suyun yaklaşık %70'ini tüketmektedir (Silva *et al.* 2023). Bu açıdan bakıldığında tarım sektöründe artırılmış su kullanımı, tatlı su kaynakları üzerindeki baskının hafifletilmesinde bir dönüm noktası olarak değerlendirilmektedir (Alzabieh 2024). Buna karşın sanayi ve enerji sektörlerinde bu oran %23'e, konutlardaki su kullanımı ise %8'e yükselmiştir (Aytemiz ve Kodaman 2006; Çetin vd 2008). Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nün 2023 yılında yayınlamış olduğu Faaliyet Raporu'na göre sektörlere göre su tüketimi Şekil 1'de verilmiştir (Anonim 2023).



Şekil 1. Sektörlere göre su kullanımı (Anonim 2023)

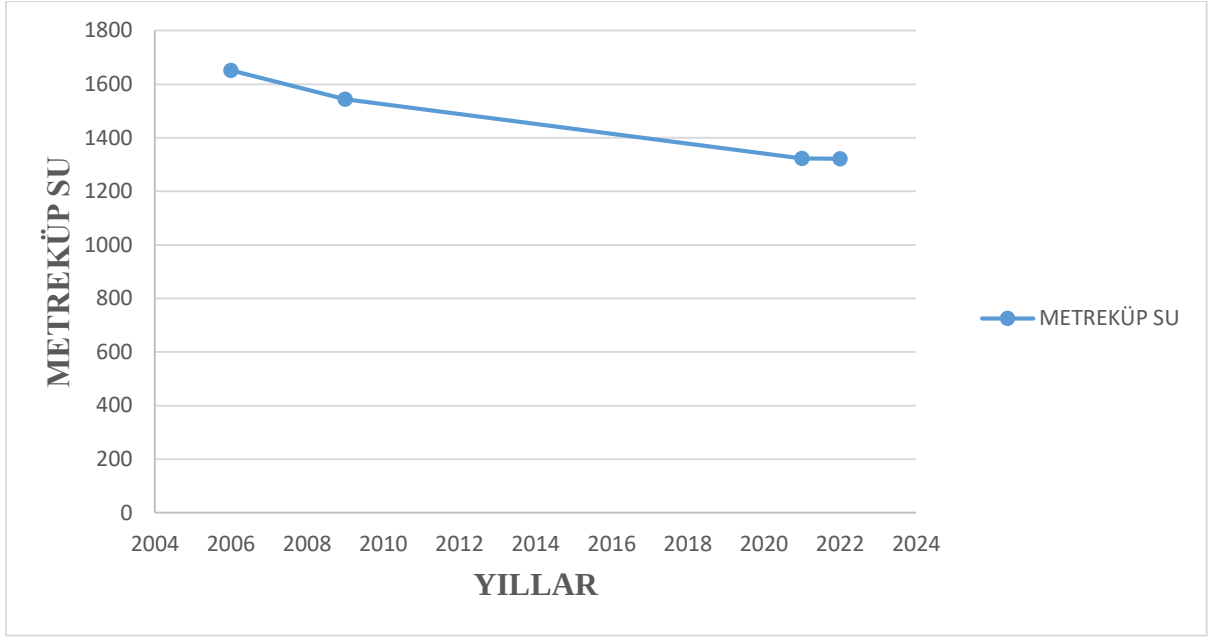
Birleşmiş Milletler Dünya Su Değerlendirme Programı (WWAP) raporlarına göre, 2025 yılında dünya nüfusunun üçte birinin ciddi su kıtlığı ile karşılaşacağı öngörülmektedir. 2050 yılında dünya nüfusunun 9-11 milyar arasında olacağı tahmin edilmekte ve nüfusun %57'sinin en az bir ay boyunca su sıkıntısı yaşayacağı belirtilmektedir (WWAP 2018).

Bir araştırma, Fransa, İspanya, İtalya, Yunanistan, Ukrayna ve Türkiye'nin 2070 yılına kadar iklim değişikliğinin su tüketimi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada, bu ülkeler arasında Türkiye'nin su kullanımında en fazla etkilenecek ülke olacağı vurgulanmıştır (Alcamo *et al.* 2007).

Falkenmark Göstergesi olarak bilinen endeks, bir ülkenin su ayak izini, hem yeraltı hem de yüzey suyunu ve toprak katmanlarında depolanan nemi içeren toplam yenilenebilir su kaynaklarının oranı olarak tanımlanır. Eğer kişi başına yıllık su temini 1700 m³'ün altına düşerse, bölge su tedarikinde stres altında kabul edilir. Kişi başına yıllık yenilenebilir su tedariki 1000 m³'ün altına indiğinde ise, bölge kronik su kıtlığı riski taşımaktadır. Bir bölgenin kişi başına yıllık yenilenebilir su tedariki 500 m³'ün altına düşmesi durumunda ise, bölge mutlak su kıtlığı ile karşı karşıya olduğu kabul edilmektedir (Ding and Ghosh 2017).

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nün 2022 yılı faaliyet raporundaki su kullanımına ilişkin verilerine göre, Türkiye'de yıllık ortalama yağış miktarı yaklaşık 574 mm olup, bu da yılda ortalama 450 milyar metreküplük suya denk gelmektedir. Mevcut teknik ve ekonomik koşullar göz önüne alındığında, farklı kullanım amaçları için değerlendirilebilecek yerüstü suyu potansiyeli yıllık ortalama 94 milyar metreküptür. Buna ek olarak, yeraltı suyu potansiyeli 18 milyar metreküple birlikte, ülkemizin toplam kullanılabilir su potansiyeli yıllık 112 milyar metreküpe ulaşmaktadır. Bununla birlikte, bu potansiyelin 57 milyar metreküplük kısmı kullanılmaktadır. Türkiye'de kişi başına düşen yıllık kullanılabilir su miktarı 2000 yılında 1.652 m³, 2009'da 1.544 m³, 2021'de ise 1.323 m³ olarak gerçekleşmiş, 2022'de ise 1.322 m³ olmuştur (Anonim 2023).

Bu azalma, sürekli bir düşüş eğilimi göstermektedir (Şekil 2). Eğer önümüzdeki yıllarda bu düşüş engellenemezse, ülkemizin su fakiri ülkeler kategorisine girmesi olasılığı artacaktır.



Şekil 2. Türkiye’de yıllık kullanılabilir su miktarının yıllara göre değişimi

Kuraklık, dünya genelinde her mevsim farklı derecelerde hissedilen ve giderek artan bir doğa olayıdır. Bu durum, özellikle tarımda ciddi ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Ülkemizde de iklim değişikliği nedeniyle kuraklık etkileri giderek daha belirgin hale gelmektedir. Bu sorunun çözülmesi için su kaynaklarının verimli kullanılması, su tüketiminin azaltılması ve kirleticilerin suya karışımının engellenmesi gibi tedbirlerin yanı sıra, tarımsal sulamada alternatif su kaynakları ve atık suyun yeniden kullanımı da önemli çözüm yollarıdır (Ekici 2024). Dünyada suyun büyük bir kısmı yalnızca bir kez kullanıldıktan sonra atıl duruma geçerken, arıtılmış atık suyun yeniden değerlendirilmesi, ülkemizde de artan bir ilgiyle ele alınmaktadır. Ancak bu tür suların kullanımı, bitki sağlığı, hidroloji, gübreleme ve çevresel etkilerle birlikte değerlendirilmelidir.

Evsel atık suların %99,9’unun saf su içerdiği göz önüne alındığında, bu suların bir kaynak olarak görülmesi gerektiği daha net anlaşılmaktadır. Tarımsal sulama açısından arıtılmış atık sular, içerdiği azot (N) ve fosfor (P) gibi maddeler nedeniyle oldukça değerli bir kaynaktır (Aslan 2007).

Türkiye’de, atık su arıtma tesislerinden elde edilen geri kazanılmış atık su miktarı 2018’de 4,24 milyar metreküpe ulaşmıştır (Cakmakci ve Sahin 2021). Arıtılmış atık sular, yalnızca güvenilir bir su kaynağı oluşturmakla kalmayıp aynı zamanda gübre ihtiyacını azaltarak besin geri dönüşümüne katkı sağlamaktadır (Elgallal *et al.* 2016; Feder 2021). Bu tür

sular, azot ve fosfor gibi besin maddelerinin yüksek konsantrasyonu sayesinde, inorganik gübreler için uygun maliyetli bir alternatif olabilir (Tahir vd 2018; Reda *et al.* 2020).

Dünya çapında tarımsal üretim mevcut ve gelecekteki eğilimlerine bakıldığında, mevcut gıda talebini karşılamak için sulamanın gerekli olduğu ve gelecekte sulamanın artması gerektiği açıktır (Feres and Connor 2004). Bu durum, su kıtlığının giderek artan bir sorun olduğu günümüzde, sulama suyu yönetiminin daha verimli hale getirilmesini zorunlu kılmaktadır. Sulama suyu yönetiminin temel hedefleri arasında su tasarrufu sağlamak ve su kullanım verimliliğini en üst düzeye çıkarmak yer almaktadır. Bu bağlamda, kısıtlı sulama, su kıtlı ı koşullarında sürdürülebilir tarımsal büyümeyi destekleyen etkili stratejilerden biri olarak görülmektedir (Reddy and Nayak 2018).

Kısıtlı sulama, sulama sezonu boyunca suyun kontrollü bir şekilde yönetildiği veya ihtiyaçtan daha az miktarların uygulandığı bir yöntemdir. Bu yöntemde, uygulanan toplam su miktarı, mahsulün potansiyel buharlaşma-terleme ihtiya ını karşılayacak seviyenin altında tutulmaktadır. Özellikle kurak bölgelerde, kısıtlı sulamanın temel amacı, suyun bitkisel üretimde sınırlayıcı bir faktör haline gelmesini önlemektir. Ancak, sulanabilir araziye kıyasla su temininin yetersiz olduğu durumlarda, kısıtlı sulama genellikle bir zorunluluk haline gelmektedir. Bu yöntemle sulamanın amacı, birim alan başına verimi maksimuma çıkarmaktan ziyade, uygulanan su birimi başına üretimi optimize etmektir. Kısıtlı sulamanın en büyük avantajlarından biri, sulanmayan alanı azaltarak toplam çiftlik verimini artırması ve su kullanım verimliliğini optimize etmesidir. Bu bağlamda, kısıtlı sulama, özellikle su kaynaklarının sınırlı olduğu tarımsal alanlarda su verimliliğini maksimum düzeye çıkaran bir yaklaşım olarak ön plana çıkmaktadır (Reddy and Nayak 2018).

Kısıtlı sulamanın uygulanmasında dikkate alınması gereken bazı önemli ilkeler bulunmaktadır. İlk olarak, bitkilerin suya en çok ihtiyaç duyduğu ve verim açısından kritik olan dönemlerde sulamanın tam yapılması gerekmektedir. Bu dönemlerde bitkilerin su ihtiya ı önceliklidir. Diğer taraftan, bitkilerin su stresine daha dayanıklı olduğu büyüme evrelerinde, sulama miktarı azaltılabilir veya tamamen durdurulabilir. Bu prensipler, sulama miktarının doğru bir şekilde belirlenmesini ve suyun etkin bir şekilde kullanılmasını sa lar (Allen *et al.* 1998; Burt *et al.* 2014).

Fasulye (*Phaseolus vulgaris* L.), Afrika ve Latin Amerika'nın gıda ve tarım sistemlerinde önemli baklagillerden biridir. İnsan gıdası olarak yenilebilir yeşil yaprakları, yeşil baklaları, olgun veya olgunla mamı  tohumları ve hayvan yemi olarak da tropik bölgelerde yaygın olarak yetiştirilen bir bitkidir (Broughton *et al.* 2003; De Luque *et al.* 2014).

Fasulye, ılıman iklim koşullarında daha iyi gelişim gösterir. Optimum yetiştirme sıcaklığı 18-30°C arasındadır. Derin, geçirgen ve organik madde açısından zengin toprakları tercih eder. Kök sisteminde bulunan simbiyotik *Rhizobium* bakterileri sayesinde atmosferik azotu bağlama yeteneğine sahiptir, bu da toprağın azot içeriğini artırır ve tarımsal sistemlerde sürdürülebilirliğe katkı sağlar (Singh 2001).

Fasulye, taze, kuru veya konserve formunda tüketilen değerli bir gıda maddesidir. Yüksek besin değeriyle dikkat çeker. İçerdiği protein, fosfor, demir ve B vitamini açısından oldukça zengindir. Fasulye taneleri, olgunlaşmamış bakla ve tohumlarında %10 oranında protein içerirken, olgun tanelerde kuru maddede %23-24 protein, %60 karbonhidrat, %5 ham selüloz, %1,7 yağ ve %3,6 kül bulunmaktadır (Costa *et al.* 2006).

Gıda mikrobiyolojik analizleri, gıda güvenliğinin temin edilmesi amacıyla gerçekleştirilen incelemelerdir. Gıda güvenliği, toplum sağlığı için kritik bir öneme sahiptir. Gıdalar, mikroorganizmaların çoğalması için uygun bir ortam sunarak bozulma ve zehirlenmelere neden olabilir. Bu nedenle, gıda kaynaklı zehirlenmeleri engellemek, halk sağlığını korumak ve enfeksiyonların yayılmasını önlemek için gıda mikrobiyolojik analizlerinin yapılması büyük önem taşır (Anonim 2019a).

Escherichia Coli (*E. coli*), insan ve hayvan bağırsaklarında doğal olarak bulunan, genellikle zararsız olan bir bakteri türüdür. Ancak, bazı *E. coli* suşları, özellikle Shiga toksini üreten *E. coli* (STEC), ciddi gıda zehirlenmelerine ve hastalıklara neden olabilir. Bu patojenik *E. coli* suşları, gıda kaynaklı hastalıkların başlıca etkenlerinden biridir ve genellikle kontamine olmuş su, süt ve et ürünleri ile yayılır (Anonymous 2024a).

Dünya Sağlık Örgütü'nün verilerine göre *E. coli*'nin gıda güvenliği açısından önemli olması, aşağıda belirtilen sebeplerle ilgilidir (Anonymous 2024b):

Gıda Kontaminasyonu: *E. coli*, sıklıkla çiğ etler (özellikle kıyma), süt, taze sebzeler ve su gibi gıda maddelerinde bulunur. Çapraz bulaşma (örneğin, çiğ etin pişmiş gıdalarla teması) ve yetersiz pişirme, bakterilerin insanlara geçmesine neden olabilir.

Hastalık Semptomları: *E. coli* enfeksiyonları, karın ağrısı, ishal (bazı durumlarda kanlı), ateş, bulantı ve kusma gibi belirtilerle kendini gösterir. Shiga toksini üreten *E. coli* (STEC) enfeksiyonları daha ciddi sonuçlara yol açabilir, böbrek yetmezliği gibi yaşamı tehdit eden komplikasyonlara neden olabilir.

E. coli, pişirme ile öldürülebilen bir bakteri türüdür. Genellikle 70-75°C sıcaklıkta, bakterinin çoğu öldürülür. Bu nedenle, et ürünlerinin iyi pişirilmesi, kontaminasyonun önlenmesinde önemli bir rol oynar. Ancak, çiğ sebzeler, meyveler ve su da potansiyel taşıyıcılar olabilir (Anonymous 2024c).

Koliform bakteriler, özellikle fekal kontaminasyonu gösterebilecek bir grup bakteri olarak, gıda güvenliği için önemlidir. Sebzeler ve diğer gıda maddeleri üzerinde koliform bakteri sınır değerleri genellikle gıda güvenliği standartlarına ve yerel yönetmeliklere bağlı olarak değişir (Anonymous 2024c). *E. coli* ve diğer koliformların, su ve gıdalarla tespiti için kullanılan besiyerilere bakteri ekimi sonrası üreyen bakterilere ait görseller Şekil 3'de verilmiştir (Anonim 2019b).



Şekil 3. (a) Besiyerilere bakteri ekimi sonrası oluşan *E.coli* bakterileri, (b) besiyerilere bakteri ekimi sonrası oluşan diğer koliform bakteriler (Anonim 2019b)

Ağır metaller, yüksek yoğunluklu ($> 5 \text{ g/cm}^3$) metalik ve yarı metalik (metalloidler) kimyasal elementlerdir. Çoğu düşük konsantrasyonlarda bile toksik ve kanserojendir (Dinis and Fiuza, 2010). Ağır metallerin çevredeki varlığı, artan deşarj toksisitesi ve alıcı sular üzerindeki diğer olumsuz etkileri nedeniyle büyük endişe kaynağı olmuştur. Sonuç olarak, bunların kirli sulardan uzaklaştırılması bilim insanları için önemli bir görevdir, çünkü bu kirleticiler canlı organizmalarda toksik konsantrasyonlarda birikerek insan besin zincirine girdiklerinde insan sağlığı için potansiyel bir tehdit oluşturmaktadır. Dünyanın bugün karşı karşıya olduğu en önemli çevresel zorluklardan biri, tehlikeli atık üretimini en aza indirme ve var olan, birikmiş atıkları iyileştirme çabaları olmuştur (Arpa 2000; Özdemir ve Yapar 2009).

Su sistemlerinde ağır metal kirliliği doğrudan atmosferik birikimden, jeolojik hava koşullarından veya tarımsal, kentsel veya endüstriyel atıkların salınmasından kaynaklanabilir. Topraklar, genişleyen sanayi alanlarından kaynaklanan emisyonlar, gübrelerin toprağa uygulanması, yüksek metal atıklarının ve boyaların bertarafı, hayvan gübresi, pestisitler,

kanalizasyon çamuru, atık su, kömür yanma kalıntıları, sulama ve atmosferik birikim nedeniyle ağır metallerin birikmesiyle kirlenmektedir (Parez 2017). Atıkların su ortamlarına sürekli deşarjı, çökeltilerde veya atık sulara ağır metaller gibi kirletici maddelerin birikmesine neden olabilir (Smith 2018). Doğal olarak, su ortamlarında metaller insan faaliyetlerinden bağımsız olarak hareket eder ve genellikle zarar verici etki yaratmaz. Ancak kanalizasyon atıkları, atık çamurun yeniden kullanımı ve gübre uygulamaları, işlenmiş topraktaki ağır metallerin ana kaynakları arasında yer almaktadır (Brown *et al.* 2019; Jones and Lee 2020).

Arıtılmamış veya etkisiz bir şekilde arıtılmış ağır metallerle kirlenmiş atık sular, çeşitli sağlık ve çevre etkilerine neden olur. Su ekosistemlerinde ağır metaller canlı organizmaların sayısını önemli ölçüde azaltır. Ağır metaller, suda yaşayan organizmaların büyümesi üzerinde olumsuz etkiye sahiptir ve biyolojik atık su arıtma tesislerinin etkili bir biçimde çalışmasına engel olabilir. Ağır metal kirleticilerin varlığı, toprak ve bu tür topraklarda yetişen bitkiler için büyük bir tehdit oluşturur; bu tür bitkilerin biyolojik birikim ve biyomagnifikasyon yoluyla besin zincirine girmeleri nedeniyle hayvanlar ve insanlar tarafından tüketilmesi ciddi zararlı etkilere neden olur (Sa'idi 2010).

Ağır metaller, çevreye hem doğal süreçlerle hem de insan kaynaklı faaliyetlerle yayılmaktadır. Doğal kaynaklar arasında; minerallerin ayrışması, erozyon ve jeolojik faaliyetler gibi süreçler yer alırken, insan kaynaklı yayılma çoğunlukla sanayi faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Özellikle metal üretimi, madencilik, tarımda kullanılan gübre ve böcek ilaçları, sanayi atıkları ve çöp sızıntıları ağır metallerin çevreye salınımını artıran başlıca faktörlerdir. Ayrıca, kömür yakma ve atık yakma gibi enerji üretim süreçleri de bu metallerin atmosfere karışmasına yol açmaktadır. Bu kirlilik, toprağa, su kaynaklarına ve havaya karışarak ekosistemlere zarar verebilir ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir (Zheng *et al.* 2024)

Demir ve çinko gibi bazı metaller insan sağlığı için gerekli olmasına rağmen, bu metallere ve esansiyel olmayan metallere (arsenik, kadmiyum, kurşun ve civa gibi) yüksek seviyelerde maruz kalmak insan sağlığına yönelik büyük tehditler olmaya devam etmektedir (Jarup 2003). Ağır metallere yüksek düzeyde maruz kalmanın olumsuz sağlık etkileri iyi araştırılmış olmasına, endüstriyel kaynaklardan kaynaklanan emisyonlar özellikle son birkaç on yılda azalmasına rağmen ağır metallere maruz kalma devam etmektedir (Jarup 2003). Ağır metaller, kirli gıda veya sıvıların (su) alınması, kirli havanın solunması ve dermal emilim gibi çeşitli yollarla vücuda girebilir ve çok çeşitli biyolojik süreçleri olumsuz yönde etkileyebilir (Tchounwou *et al.* 2012). Ağır metallerle ilgili riskler genellikle avantajlardan daha ağır

basılmaktadır. Örneğin, üç değerlikli krom sağlığa faydalı olmasına rağmen, altı değerlikli kromun kanserojen olduğu ve solunması halinde akciğer kanserine neden olabileceği tespit edilmiştir (Sun *et al.* 2015). Kurşun zehirlenmesi ağırlıklı olarak bebeklerde zihinsel bozukluklarla ilişkilendirilmiştir (Hou *et al.* 2013).

Ağır metaller canlı organizmalarda ve insan vücudunda çeşitli süreçlerle biyolojik olarak birikir ve olumsuz etkilere neden olur. İnsan vücudunda bu ağır metaller taşınır ve proteinlere bağlanan vücut hücreleri ve dokularda bölümlere ayrılır, nükleik asitler bu makromolekülleri yok eder ve hücresel işlevlerini bozar. Bu nedenle, ağır metal toksisitesinin insan vücudunda çeşitli sonuçları olabilir. Zihinsel bozukluğa yol açan merkezi sinir fonksiyonunu etkileyebilir, kan bileşenlerine zarar verebilir ve akciğerlere, karaciğere, böbreklere ve çeşitli hastalık durumlarını teşvik eden diğer hayati organlara zarar verebilir. Ayrıca, vücutta uzun süreli ağır metal birikimi, Parkinson hastalığı ve Alzheimer hastalığı gibi bazı hastalıklara yol açarak, fiziksel, kas ve nörolojik dejeneratif süreçlerin ilerlemesini yavaşlatabilir (Monisha *et al.* 2014). Ağır metaller, besin zincirinde ve besin ağında biyolojik olarak birikerek toksik etkilere neden olarak ekosistemleri bozabilir ve insanlar için önemli sağlık riskleri oluşturabilir (Mukherjee *et al.* 2020).

İçme suyundaki arsenik ve bakır, alüminyum, çinko, selenyum gibi diğer ağır metallerin yüksek seviyelerinin insan sağlığı üzerinde zararlı etkileri olduğu tespit edilmiştir. ABD EPA içme suyu standartlarını arsenik için 0,01 ppm, bakır için 1,3 ppm, alüminyum için 0,2 ppm, çinko için 3 ppm, kadmiyum için 0,003 ppm, selenyum için 0,01 ppm ve kurşun için 0,01 ppm olarak belirlemiştir. İçme suyundaki yüksek arsenik seviyeleri el ve ayaklarda uyuşukluğa, körlüğe, akciğer, karaciğer ve prostat kanserine neden olur. İçme suyundaki arsenik seviyesini azaltmak için çeşitli teknikler kullanılmaktadır (Somasani 2012).

Bitkiler insan beslenmesinin önemli bir bileşenidir ve demir, çinko ve manganez gibi metaller de dahil olmak üzere sağlıklı beslenme için gerekli olan vitamin ve minerallerin önemli bir kaynağıdır (Alaimo *et al.* 2008). Yüksek metal ve besin içeriği nedeniyle bitkiler aynı zamanda besin zincirinde kadmiyum, kurşun ve arsenik dahil olmak üzere ağır metal ve metaloid kirliliğinin de ana kaynağıdır (Gilbert *et al.* 2011; Clemens *et al.* 2013; Antoniadis *et al.* 2017). Ağır metallerin ve metaloidlerin bitki sistemlerinde nasıl alınıp detoksifiye edildiğine dair daha iyi bir anlayış kazanarak, yenilebilir dokularda ağır metal ve metaloid birikimini en aza indirecek ve insan sağlığına yönelik riskleri en aza indirecek ürünler tasarlanmalıdır (Cooper 2018).

Ağır metallerin çoğu toprak kirliliğine yol açar ve insanlar için ölümcül olabilir. Ağır metaller, farklı çevresel bileşenlerle reaksiyona girerek toksik hale gelebilir. İnsanlar ve diğer canlılar, kirlenmiş toprakta yetişen besin zinciri aracılığıyla bu maddelere maruz kalabilir (Alam *et al.* 2024). Olumsuz etkiler, ağır metallerin toksik özellikleri, toprak ekolojisini ve tarımsal üretimi tehdit etmesi nedeniyle bitkiler ve tarım ürünleri de dahil olmak üzere toprak organizmalarında görülebilir. Ağır metallerin çevreye salınması, yüksek toksisiteleri, biyolojik birikimleri ve bozunmazlıkları nedeniyle uzun vadede oluşabilecek sağlık tehlikelerinin başlıca nedenlerindendir (Tchounwou *et al.* 2012; Umar *et al.* 2021).

Çökeltilerdeki ağır metallerin varlığı, daha sonra besin zincirleri aracılığıyla insan sağlığını tehdit edebilecek su canlıları için genellikle yüksek toksik potansiyele sahiptir. Ayrıca, düzenli atık depolama alanlarındaki çamur ve katı atık bertarafı, sızıntı suyu aracılığıyla ağır metallerin yayılmasına neden olabilir. Bu sızıntı suyu doğrudan çevredeki toprağa salındığında, komşu ekosistemlere zarar verebilir (Blais *et al.* 2008; Tong *et al.* 2023).

Potansiyel tehlikeler açısından literatürde genellikle yer alan ve kirlenmiş toprağa düşen ağır metaller Cd, Cr, Pb, Zn, Fe ve Cu'dur (Akoto *et al.* 2008).

Araştırmanın amacı, su kıtlığı ve atık su yönetimi sorunlarının giderek daha önemli hale geldiği günümüzde, ATA-BUAM deneme alanında 2024 yılı Mayıs-Eylül ayları arasında, geri dönüştürülmüş atık su ve temiz su farklı oranlarda (25%, 50%, 75%, 100%) kullanılarak fasulye bitkisi yetiştirilmiştir. Bu kapsamda su tasarrufu, atık suyun kullanılabilirliği ve insan sağlığı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Araştırmada, kullanılan suların fasulye bitkisi üzerinde nasıl bir etkisi olduğu, özellikle ağır metal birikimi ve *E. coli* koliform oluşumu değerlendirilmiştir. Böylece, su tasarrufu sağlamak amacıyla atık su kullanımının, tarımsal sulamada uygulanabilirliğini ve bu suyun insan sağlığına olan potansiyel zararlarını (özellikle ağır metal birikimi ve patojen oluşumu açısından) araştırılması amaçlanmıştır.

KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde geri dönüştürülmüş atık su, kısıtlı sulama ve fasulye bitkisi ile daha önce yapılan çalışmalar incelenmiştir.

Geri Dönüştürülmüş Atık Su

Geri dönüştürülmüş atık suların tarımsal sulama ve diğer çeşitli alanlarda kullanımı, dünya çapında uzun bir geçmişe sahip bir uygulamadır (Carrow and Duncan 2000). Ülkemizde de bu alanda çeşitli yasal düzenlemeler yapılmış olup, bunlardan biri de Atık Su Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği'dir. Bu tebliğ, geri dönüştürülmüş atık suların sulama amacıyla kullanımına dair bazı kriterler belirlemiştir. Tebliğin EK-7 maddesinde, geri dönüştürülmüş atık suların yeniden kullanımıyla ilgili önemli parametreler şu şekilde sıralanmıştır:

- ❖ Su içindeki çözünmüş maddelerin toplam konsantrasyonu ve elektriksel iletkenlik
- ❖ Sodyum iyonu konsantrasyonu ve sodyum iyonunun diğer katyonlarla oranı
- ❖ Bor, ağır metaller ve toksik olabilecek diğer maddelerin konsantrasyonu
- ❖ Belirli durumlarda Ca^{2+} ve Mg^{2+} iyonlarının toplam konsantrasyonu
- ❖ Toplam katı madde, organik madde yükü ve yağ gibi yüzen maddelerin miktarı
- ❖ Patojen organizmaların sayısı

Atık suyun tarımsal sulama amacıyla kullanılabilmesi için gerekli olan kalite kriterlerinin belirlendiği, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Tablo 1'de gösterilmiştir (Anonim 2004).

Tablo 1. Sulama suyu nitelik kriterleri (Anonim 2004)

Sulama Suyu Kalite Kriterleri	1.sınıf (çok iyi)	2. sınıf (iyi)	3. sınıf (kullanılır)	4.sınıf (ihtiyatla kullanılmalı)	5.sınıf (zararlı, uygun değil)
EC, $\mu\text{mhos/cm}$	0-250	250-750	750-2000	2000-3000	>3000
Sodyum Yüzdesi, %Na	<20	20-40	40-60	60-80	>80
SAR	<10	10-18	18-26	>26	
RSC meq/L	<1,25 <66	1,25-2,5	>2,5		
mg/L		66-133	>133		
Klorür(Cl), meq/L	0-4	4-7	7-12	12-20	>20
mg /L	0-142	142-249	249-426	426-710	>710
Sülfat (SO ₃), meq/L	0-4	4-7	7-12	12-20	>20
mg/L	0-192	192-336	336-575	576-960	>960
Top. Tuz kon. mg /L	0-175	175-525	525-1400	1400-2100	>2100
Bor (B), mg /L	0-0,5	0,5-1,12	1,12-2,0	2,0	
Sulama suyu sınıfı	C ₁ S ₁	C ₁ S ₂ -C ₂ S ₁	C ₁ S ₃ -C ₃ S ₁	C ₁ S ₄ -C ₄ S ₁	
N0 ₃ veya NH ₄ , mg /L	0-5	5-10	10-30	30-50	>50
Fiz. koliform, 1/100 ml	0-2	2-20	20-10 ²	10 ² -10 ³	>10 ³
BOİ ₅ , mg /L	0-25	25-50	50-100	100-200	>200
AKM, mg /L	20	30	45	60	>100
pH	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	6-9	<6 veya >9
Sıcaklık, °C	30	30	35	40	>40
	Düşük	Orta	Yüksek	Çok yüksek	
Na (alkalilik) zararı (S)	1	2	3	4	
Tuzluluk zararı (C)					

*SAR: Sodyum adsorbsiyon oranı, RSC: Sodyum karbonat kalıntısı, BOİ₅: Biyolojik oksijen ihtiyacı, AKM: Askıdaki katı madde

Tuzluluk, su veya toprakta bulunan tuzların toplamını ifade eder ve bu değer toplam çözünmüş madde (TÇM) olarak ölçülür. Elektriksel iletkenlik (EC), dS/m ya da $\mu\text{S/m}$ birimlerinde ölçülen TÇM'in bir başka gösterim biçimidir. EC ile TÇM arasında aşağıdaki ilişki bulunur:

$$EC < 5 \text{ dS/m olduğunda, } TÇM \approx EC \times 640$$

$$EC > 5 \text{ dS/m olduğunda, } TÇM \approx EC \times 800$$

Tuzluluk arttıkça, toprağın suyu ile bitki hücresi arasındaki osmotik fark azalır. Bu durum, bitkinin hücresindeki suyu toprağa geri salmasına yol açar, bu da bitkinin gelişimini engeller. TÇM değeri 500 mg/L'nin altında olduğunda bitkilerde herhangi bir olumsuz etki gözlemlenmezken, 500-1000 mg/L aralığında hassas bitkiler etkilenebilir. Bitkilerin tuzluluğa

karşı hassasiyetleri belirlenmiş ve fasulye bitkisi bu grupta hassas olarak değerlendirilmiştir (Anonim 2010a).

Sebze ve tarla bitkileri, SAR (Sodyum Absorbsiyon Oranı) değeri çok yüksek olmadığı takdirde sodyum ve klorürden büyük oranda etkilenmez. Fasulye bitkisi ise bu kapsamda hassas olarak değerlendirilmiş ve SAR değeri 8-18 aralığında belirlenmiştir. Bu durumda, bitkinin büyümesinin engellenmesi ve bodur kalma riski ortaya çıkabilir. Ayrıca, bitkilerin bor elementine karşı dayanıklılıkları değerlendirilmiş olup, yüksek bor dozları bitki büyümesini olumsuz etkileyebilir. Yüksek bor seviyeleri, yapraklarda yanma, sararma gibi belirtilerle kendini gösterir. Toprakta veya sulama suyunda bor seviyesinin kritik sınırların üzerinde olması, bitki yapraklarında sararma, yanma ve çatlama, olgunlaşmamış yapraklarda dökülme ve büyüme hızının azalması gibi etkilerle verim kaybına neden olabilir. Fasulye bitkisi bor elementine karşı hassas olarak değerlendirilmiş olup, bu element için referans aralığı 0.5-1.0 mg/L olarak belirlenmiştir (Anonim 2010a).

Evsel atık sular, askıda, koloidal ve çözünmüş halde organik ve inorganik maddeler içerir. Atık suyun özellikleri, iklimsel koşullar, yaşam standartları ve kültürel alışkanlıklar gibi faktörlerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Ayrıca, şehir kanalizasyon sistemlerine endüstriyel atıkların eklenmesi, evsel atık su özelliklerini önemli ölçüde değiştirebilir. Bu değişimler, kişi başına günlük su kullanımına bağlı olarak değişir. Bu nedenle, atık suyun özellikleri sadece şehirlerarasında değil, her bir yerleşim birimi için mevsimsel hatta saatlik değişkenlik gösterebilir (Belmonte *et al.* 2011).

Parwin and Paul (2020), mutfak atık sularının sulama amacıyla yeniden kullanım potansiyelini incelemiştir. Çalışmada, Hindistan'daki bir eğitim enstitüsünden toplanan numuneler, fiziksel, kimyasal ve bakteriyolojik özelliklerine göre karakterize edilmiştir. Elde edilen veriler, Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) ve diğer sulama standartlarıyla karşılaştırılmıştır. Ayrıca, sodyum adsorpsiyon oranı (SAR), kalıntı sodyum karbonat, sodyum yüzdesi (Na%), magnezyum tehlikesi (MH), Kelly oranı (KR) ve geçirgenlik indeksi gibi parametrelerle de değerlendirilmiştir. Karakterizasyon sonucunda, mutfak atık sularının örneklerinde karbonat, florür, krom ve *Escherichia Coli* bulunmadığı; pH, klorür, demir, bakır, magnezyum, kurşun, nikel, sodyum, kalsiyum, çinko, alüminyum ve sodyum adsorpsiyon oranı gibi parametrelerin ise izin verilen sınırlar içinde olduğu belirlenmiştir.

El-Ouahmani *et al.* (2024), arıtılmış atık sularla uzun vadede (10 yıl) sulanan bir golf sahasında toprağın ve çim yapraklarının kirlenme derecesini değerlendirmiştir. İki sulama yöntemi (yağmurlama ve damlama) ile yapılan analizlerde, toprağın Fe ve Mn bakımından

kirlenme gösterdiği ve Cd ile Cr seviyelerinin birinci bölgede anlamlı şekilde daha yüksek olduğu bulunmuştur. Ancak, tüm ağır metaller toprak için FAO/WHO standartlarının altında kalmıştır. Çim yapraklarında ise Fe ve Mn seviyeleri yüksek olup, Mn içeriği birinci bölgede daha yüksek bulunmuştur. Çim yapraklarındaki ağır metallerin tümü birikmiş olup, özellikle Fe ve Cd içeriği FAO/WHO standartlarını aşmıştır. Uzun süreli sulama, toprak ve çim yapraklarında ağır metal birikimine yol açabileceğinden, arıtılmış atık su kullanımında Cd ve Fe'ye dikkat edilmeli ve damlama sulama sistemi kontaminasyonu azaltabileceği sonucuna varılmıştır.

Nawaz *et al.* (2021), Chakara Atık Su Arıtma Tesisi'nden alınan atık suyun sulama amacıyla kullanıldığında bitki büyümesi ve tane verimi üzerinde olumsuz etkiler yarattığını göstermiştir. Artan atık su konsantrasyonu, bitkinin metabolik faaliyetlerini ve fotosentez oranını baskılar. Ayrıca, yüksek atık su konsantrasyonu Cr, Ni, Cd ve NO₃-N gibi metallerin biyoyararlanımını artırarak bitkilerde birikmesine neden olmuştur. Bu durum, özellikle tahıl kısmı için sağlık risklerini artırmakta ve buğdayın çocuklar için tehlikeli olmasına yol açmaktadır. Atık suyun uygun şekilde arıtılmadan kullanılması, insan sağlığı açısından ciddi riskler oluşturabileceği belirtilmiştir.

Alobaidy *et al.* (2010), Al-Rustamiyah Atık su Arıtma Tesisi'ndeki belediye arıtılmış atık sularının sulama için uygunluğunu değerlendirmiştir. Su kalitesi, Sodyum Adsorpsiyon Oranı (SAR), Çözünür Sodyum Yüzdesi (SSP) ve Kalıntı Sodyum Karbonat (RSC) parametreleri kullanılarak belirlenmiştir. İletkenlik (EC) ve SAR değerlerinin ABD tuzluluk diyagramında çizilmesi, numunelerin çoğunun C3-S1 bölgesine girdiğini ve bu suların değiştirilebilir sodyum tehlikesi olmaksızın sulama için uygun olduğunu göstermiştir. Ancak, klorür tehlikesi nedeniyle sulamada hafif ve orta derecede kısıtlamalar bulunmaktadır. Sonuç olarak, arıtılmış atık su, çoğunlukla sulama için uygun olarak sınıflandırılmaktadır.

Kızıloğlu *et al.* (2007), Erzurum'da gerçekleştirdikleri çalışmalarda, atık su ile sulanan lahana bitkilerinin verim ve besin içeriği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Araştırma sonuçlarına göre, atık su uygulamasının, bitkilerde verim ve besin elementlerinin (N, P, K, Fe, Mn, Zn, Cu, B ve Mo) artmasına neden olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, toprakta tuzluluk, organik madde, değişebilir Na, K, Ca, Mg, alınabilir P ve mikro elementlerde artış gözlemlenirken, pH seviyelerinde azalma tespit edilmiştir. Ayrıca, arıtılmış ve arıtılmamış atık su ile yapılan sulama denemelerinde, arıtılmamış atık su ile sulanan bitkilerde daha yüksek verim ve besin elementi düzeylerinin bulunduğunu, ancak toprakta tuzluluk ve ağır metal birikiminin

gözlemlenmediğini ifade etmişlerdir. Sonuç olarak, arıtılmış suyun uzun vadede, arıtılmamış suyun ise kısa vadede tarımsal sulama için kullanılabileceği belirtilmiştir.

Abdelrahman *et al.* (2011), Umman'da, arıtılmış ve temiz su ile yapılan sulamaların toprak tuzu ve nem içeriği üzerine etkilerini araştırmış ve bitki olarak mısır bitkisini kullanmışlardır. Bu çalışmada, temiz su ile sulanan topraklarda nem oranı daha yüksek bulunurken, arıtılmış atık suyla sulanan topraklardan daha fazla tuzun çözündüğü gözlemlenmiştir. Arıtılmış suyun, mısır bitkilerinin büyüme ve kimyasal bileşimi üzerinde temiz suya kıyasla önemli bir etkisi olmamış, ancak N seviyesinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonucu, bölgede arıtılmış atık su kullanılarak mısır bitkisi yetiştirilebileceği belirtilmiştir.

Tunc and Sahin (2015), dört farklı su kalitesinin toprakların fiziksel ve kimyasal özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar, atık suyun toprakta EC (elektriksel iletkenlik), organik karbon içeriğini arttırırken, değişebilir sodyum yüzdesini düşürdüğünü ve agregat stabilitesinin arttığını göstermiştir. Ayrıca, atık su uygulamalarını da toprak nemi arttırmasına rağmen, infiltrasyon hızında azalma gözlemlenmiştir.

Manas *et al.* (2009), arıtılmış atık su ile marul bitkisini sulamanın toprak ve bitki üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, arıtılmış atık suyun toprak organik madde ve besin elementlerini artırdığı, arıtılmış atık suyun sulama da kullanılabileceğini ancak ağır metal birikimi ve mikroorganizmaların varlığı nedeniyle dikkatli bir yönetim gerekliliği vurgulanmıştır.

Feder (2021) tarafından gerçekleştirilen bir araştırmada, şeker kamışı üretiminde arıtılmış atık suyun verim ve kalite üzerindeki etkileri incelenmiştir. İki yıl süresince yapılan bu çalışmada, arıtılmış atık su ile temiz su kullanımı arasındaki farkların şeker kamışı verimi, brix değeri, lif ve sakkaroz oranları açısından belirgin bir farklılık yaratmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, toprak hidrolik iletkenliği ve organik karbon seviyelerinde de her iki sulama yöntemi arasında önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Bu bulgular, arıtılmış atık suyun bitkiler için besin maddesi sağlama ve su ihtiyacını karşılama noktasında faydalı olabileceğini göstermektedir.

Pakistan'ın Mianwali kentinde tatlı su sulamasıyla üretilen sebzeler ile arıtılmamış atık su ile sulanan sebzeler karşılaştırıldığında, arıtılmamış atık su ile sulanan sebzelerde önemli miktarda ağır metal (özellikle Pb ve Cd) birikimi olduğu ve tüketiciler için sağlık riskleri oluşturduğu belirlenmiştir. (Aslam *et al.* 2024)

Samarah *et al.* (2020), dört arpa çeşidini (ACSAD176, Rum, Athroh, Yarmouk) dört sulama işlemine maruz bırakmış ve arıtılmış atık su kullanılarak yapılan tam veya ek sulamanın, verim bileşenlerini yağmurla beslenen ve tatlı su kullanılarak ek sulama altında yetiştirilenlere kıyasla artırdığını görmüşlerdir. Yine bu çalışmada atık su kullanılarak yapılan arpa sulamanın topraktaki veya hasat edilen tanelerdeki ağır metal (Zn, Cd ve Pb) konsantrasyonlarını değiştirmedeği bulunmuştur.

Arıtılmış atık su ile yapılan yetersiz sulama uygulamasının baklagillerin biyokütle üretimi ve ürün su verimliliği üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla bir çalışma yapılmıştır. %100, %75, %50, %25 ve %0 tam sulama ve yağmurla sulama uygulamasında yarım su tedariki kullanılarak bitki büyüme döneminde uygulanan yetersiz sulamanın, tam sulama yapılan yere göre verim üretimini ve su verimliliğini artırdığını açıkça göstermiştir (Hirich and Choukr-Allah 2014).

Kısıtlı Sulama

Dünyadaki su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde, tarımda suyun sürdürülebilir kullanımını sağlamak son derece önemlidir. Bu bağlamda, sulama suyunun tarım alanlarına verimli bir şekilde ulaşması, su kayıplarını en aza indirmeye yönelik stratejiler büyük bir öneme sahiptir. Ayrıca, birim sudan azami fayda sağlamak için kısıtlı sulama tekniklerinin uygulanması teşvik edilmektedir. Bunun yanında, su tüketimi düşük bitkilerin tercih edilmesi, sulama suyu ücretlerinin su kullanımına dayalı olarak hesaplanması, damla sulama gibi su verimliliği yüksek sulama tekniklerinin teşvik edilmesi ve çiftçilerin su kullanımı konusunda modern bilgilerle donatılması gerektiği ifade edilmektedir (Acar vd 2020).

ABD'nin batı kesiminde, tarımda su kullanımı %85'in üzerinde olup, bölgedeki su açığı ciddi çevresel sorunlar yaratmaktadır. 2002-2004 yılları arasında yapılan bir çalışmada, kuru fasulye bitkisinin su kullanım verimliliği, tam sulama (su stresi olmayan) ve aralıklı su stresi koşullarında incelenmiştir. Çalışma, 2003 ve 2004 yıllarında farklı sulama miktarları kullanarak yapılan denemelerde, su verimliliği açısından önemli farklar ortaya koymuştur. 2003 yılında, su kullanımı tam sulama koşulunda 661 mm, aralıklı su stresi koşulunda ise 378 mm olmuştur. Araştırmacılar, su kaynağının sınırlı olduğu bölgelerde, su tüketiminin %20 oranında kısıtlanabileceğini önermiştir (Munoz *et al.* 2007).

Demir ve Sahin (2017), arıtılmış evsel atık su ve farklı sulama uygulamalarının (tam sulama, kısıtlı sulama ve kısmi kök bölgesi kuruluğu) domates tarlasında toprağın kimyasal ve biyolojik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışma, toprak elektriksel iletkenliği (EC) ve değişebilir sodyum yüzdesi (ESP) değerlerinin kabul edilebilir seviyeler içinde olduğunu, organik madde içeriğinde önemli bir değişiklik olmadığını ve atık su ile sulamanın toprak verimliliğini artırabileceğini göstermiştir.

Kıymaz vd (2020), farklı düzeylerde su stresinin (Sarıköz, Sazova, Kırk Günlük ve Gina fasulye çeşitleri) büyüme parametreleri, tohum verimi ve makro-mikro besin elementleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Araştırma, serada saksılarda yürütülmüş ve su stresinin fasulye çeşitlerini farklı şekillerde etkilediği gözlemlenmiştir. Maksimum su stresi altında Gina çeşidinin, P, K, Ca, Mg, B, Cu, Mn ve Se gibi besin elementleri ile büyüme parametreleri açısından diğer çeşitlerden daha üstün olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, Gina çeşidinin su stresine diğer çeşitlere göre daha toleranslı olduğu ve kurak koşullarda su verimliliğini artırma potansiyeline sahip olduğu bulunmuştur.

Fasulye Bitkisi

Li (2021), Çin'deki fasulye üretimini araştırarak, iklim değişikliklerinin verim üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışma, 2005-2019 yılları arasında 25 ilin iklim, ekonomik, ekim davranışları ve teknik gelişmeleri dikkate alarak yapılmıştır. Sonuçlar, artan yağışın fasulye verimi üzerinde olumlu bir etki yarattığını, ancak sıcaklık artışının verimi olumsuz etkilediğini göstermektedir. Ayrıca, karbon emisyonlarının fasulye üretimi üzerinde doğrudan bir etkisi olmadığı, ancak dolaylı etkilerinin olabileceği belirtilmiştir. Sulama ve gübreleme uygulamalarının verim üzerinde sınırlı bir etkisi kaldığı, teknolojik gelişmelerin ise karışık bir etki yarattığı ve olumsuz etkileri dengeleyemediği ifade edilmiştir. Çalışma, fasulye üretiminde çevresel değişimlerin daha fazla dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Myers and Kmiecik (2017) çalışmalarında, ortak fasulyenin (*Phaseolus vulgaris* L.) çevresel uyum yetenekleri, yaygın üretimi ve besin değerlerini incelenmiştir. Çalışma, bu bitkinin dünya çapında geniş bir yetiştirilme alanına sahip olduğunu ve protein, karbonhidrat, vitamin ve mikro besinler açısından önemli bir kaynak olduğunu vurgulamaktadır. Ayrıca, bitkinin ılıman iklimde ve belirli büyüme koşullarında verimli bir şekilde üretilebileceği belirtilmiştir. Çalışmanın sonucunda, ortak fasulyenin ekonomik değerinin yüksek olduğu, ancak genetik çeşitliliği ve yetiştirilmesi hakkında daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğu ifade edilmiştir.

Verholiuk (2023) çalışmasında, Ukrayna’da yeşil fasulye yetiştiriciliğini inceleyerek, bitkinin biyolojik potansiyelini gerçekleştirmenin toprak ve iklim koşullarına bağlı olduğunu belirtmiştir. Araştırma, toprak ve iklim özelliklerine uygun ekim zamanı, tohum hazırlığı ve zararlılarla mücadele gibi faktörleri ele almıştır. Fasulye yetiştiriciliğinde başarı için, toprak sıcaklık ve nem seviyelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerektiği, tohum çimlenmesi ve bitki büyümesi için en iyi nem oranının %75-80 olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, zararlılar ve hastalıklarla mücadele için doğru ürün rotasyonunun yapılması ve yüksek kaliteli tohumların kullanılması önerilmiştir.

Karavidas *et al.* (2022) çalışmalarında, 1971-2021 yılları arasında yayınlanan literatürler ışığında, fasulye verimini etkileyen başlıca faktörlerin sulama, gübreleme, ekim sıklığı olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, uygun toprak işleme yöntemleri ve mevsimsel ekim stratejileri de verim artışı sağlar. Çalışmada, hastalık, zararlılarla mücadele ve yabancı ot gibi araştırma alanlarının ihmal edildiği de belirtilmiştir. Genel olarak, fasulye veriminin artırılması için, doğru agronomik uygulamaların ve çevresel faktörlere uygun yönetim stratejilerinin uygulanması gerektiği ifade edilmiştir.

Taha and Hashem (2019), Mısır’da killi toprakta 2017-2018 yıllarında Nebraska çeşidi taze fasulye bitkisinde %55, %70, %85 ve %100 olmak üzere dört farklı sulamanın verim ve su kullanımına etkisini araştırmışlardır. Araştırma sonunda en yüksek verimi %85 sulamada elde etmişlerdir ve bunu %100 sulama izlemiştir. En yüksek bakla verimi ve su kullanım randımanını yine %85’lik sulamadan elde etmişlerdir.

Boutraa and Sanders (2001), bazı fasulye çeşitleri üzerinde su stresi uygulamasının, verim bileşenlerine etkisini incelemişlerdir. Araştırma kapsamında, bitkiler çiçeklenme ve bakla dönemlerinde belirli su stresi koşullarına maruz bırakılmıştır. Su stresinin, bitki gelişimini ve verim öğelerini olumsuz yönde etkilediği gözlenmiştir.

Saleh *et al.* (2018), Çin’de iki farklı fasulye çeşidiyle gerçekleştirdikleri çalışmada, sulama suyu miktarının, bitki su tüketiminin %100, %80 ve %60’ı arasında değişen seviyelere göre etkilerini incelemişlerdir. Sonuçlara göre, %100 ve %80 seviyelerinde sulama yapılan denemelerde verim ve bakla kalitesi arasında belirgin fark bulunmazken, %80 sulama suyu miktarının verim ve kaliteyi arttırdığı, %60 su miktarına inildiğinde ise su kullanım verimliliğinin arttığı görülmüştür.

Marzouk *et al.* (2016), Mısır'da üç farklı fasulye çeşidiyle yürüttükleri çalışmada su stresinin fasulye verimi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, bitki su tüketiminin %100, %80 ve %60'ı kadar sulama yapılmıştır. En yüksek verimi, bitki su tüketiminin %100'ünün uygulandığı konularda elde etmişlerdir. Su kısıtlamalarının verimi olumsuz yönde etkilediği sonucuna varmışlardır.

Sezen *et al.* (2008), Tarsus'ta gerçekleştirdikleri bir araştırmada, sulama seviyelerinin ve sulama aralıklarının fasulye verimi ve kalite unsurları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Araştırmada, Gina çeşidi taze fasulye bitkisi kullanılmıştır. Sulama suyu seviyesi ile fasulye verimi arasında güçlü bir ilişki bulunmuş ve sulama seviyesinin bakla boyu, genişliği ve içindeki tane sayısı gibi kalite unsurlarını etkilediği saptanmıştır.

Onder *et al.* (2006), Hatay'da malç tipi ve sulama suyu seviyelerinin fasulye verimi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, denemelere en düşük 123 mm ile en yüksek 488 mm aralığında sulama suyu miktarları uygulanmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, sulama suyu miktarının fasulye verimi üzerinde önemli bir etkisi olduğu, ancak malç tipinin verim üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır.

Kazlı (2005), Kahramanmaraş'ta yarı ıslatmalı ve tam ıslatmalı sulama arasındaki farkları incelediği çalışmasında, yarı ıslatmalı sulamanın %13,2 su tasarrufu sağladığını, ayrıca her iki yöntem arasında verim ve bakla sayısı bakımından önemli bir fark bulunmadığını belirtmiştir.

Escherichia Coli (E. coli)

Türk Gıda Kodeksi Mikrobiyolojik Kriterler Yönetmeliği'nde belirtilen çeşitli formlardaki bazı gıdalarda *E. Coli* koliformlarının sınır değerleri Tablo 2'de sunulmuştur (Anonim 2011).

Tablo 2. Bazı gıdalarda *E. Coli* sınır değerleri

Gıda	Mikroorganizmalar	Numune alma planı		Limitler	
		n	c	m	M
Tüketime hazır doğranmış meyve ve sebzeler	<i>E. coli</i>	5	2	10 ² kob/g	10 ³ kob/g
Tüketime hazır pastörize edilmemiş meyve ve sebze suları	<i>E. coli</i>	5	2	10 ² kob/g	10 ³ kob/g
Yıkanmış, doğrama ve paketlenme işleminden geçmiş, ayrı ayrı veya karıştırılmış çiğ sebzeler ile dondurulmuş veya kurutulmuş sebzeler	<i>E. coli</i>	5	0	25 g-mL'de bulunmamalı	

n: Numune sayısı; c: m ile M limiti arasında değere sahip olmasına izin verilen numune sayısı. kob: Koloni oluşturan birim (katı besiyerinde). Eğer tespit edilen bütün değerler < m ise uygundur. En fazla c sayıdaki numunenin değeri, m ve M arasında ve geriye kalan değerler ise < m ise kabul edilir. Bir veya daha fazla numunedeki değer; >M veya c sayıdaki numuneden daha fazla sayıdaki numunenin değeri m ile M arasında ise uygun değildir.

Shodikin *et al.* (2022), Jember'deki geleneksel pazarlarda satılan uzun fasulyelerde *E. coli* bakterisinin kontaminasyonunu araştırmıştır. Çalışma, Jember'deki sekiz geleneksel pazardan alınan 40 uzun fasulye numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Mikrobiyolojik inceleme için en olası sayı (MPN) yöntemi kullanılmıştır. Sonuçlara göre, numunelerin tamamı (%100) koliform bakterilerle, %90'ı ise *E. coli* ile kontamine bulunmuştur. Bu bulgular, geleneksel pazarlarda satılan uzun fasulyelerin halk sağlığı açısından risk oluşturabileceğini göstermektedir.

Vergine *et al.* (2015), arıtılmış atık suyun sulamada kullanımının *E. coli*'nin toprak ve çevredeki etkilerini incelemek için saha denemeleri ve toprak sütunu testleri gerçekleştirmiştir. Çalışma, *E. coli*'nin sulama ile üst ve alt toprakta kalıcılığını değerlendirmiştir. Sonuçlar, *E. coli*'nin toprakta sınırlı bir süre kalıcı olduğu ve sulama olaylarının toprakta önemli bir birikime neden olmadığı gözlemlenmiştir.

Tripathi *et al.* (2019), atık suyla sulanan karnabahar ve patlıcanda koliform bakteri insidansını değerlendirmiştir. Hindistan Yeni Delhi’deki bir saha denemesinde, farklı filtrasyon yöntemleri (kum, disk ve kombinasyon) ve damla sulama sistemleri kullanılmıştır. Sonuçlar, filtrasyonun toplam koliform ve *E. coli* popölasyonlarını %12-25 oranında azalttığını göstermiştir.

Gutierrez and Montalla (2020), Filipinler’de Balili Nehri atık suyunun tarımsal sulamada kullanımını ve bunun su, toprak ve marul üzerindeki mikrobiyolojik etkilerini değerlendirmiştir. Araştırmada, membran filtre tekniği ve çok tüplü fermentasyon yöntemiyle toplam ve dışkı koliform bakterileri ölçölmüş, *E. coli* varlığı PCR yöntemiyle doğrulanmıştır. Koliform bakterilerin kabul edilebilir standartların çok üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, nehir suyunun doğrudan tarım alanlarına verilmesinin tehlikelerini ortaya koymaktadır. Ayrıca, marulun koliform kontaminasyonu açısından yüksek riskli bir ürün olduğu ve dışkı koliformlarının izole edilmesi, bu suyun sulama amacıyla kullanımının tüketici sağlığı için uygun olmadığını göstermektedir.

Ağır Metaller

Atık su Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği’nde belirtilen sulama sularındaki maksimum izin verilen ağır metal ve toksik element konsantrasyonlarına ait bilgilere Tablo 3’de yer verilmiştir (Anonim 2010a).

Tablo 3. Sulama suyunda izin verilebilen maksimum ağır metal ve toksik elementlerin konsantrasyonları (Anonim 2010a)

Elementler	Birim alana verilebilecek maksimum toplam miktarlar, kg/ha	İzin verilen maksimum konsantrasyonlar	
		Her tür toprak yapısında sürekli sulama uygulandığında (mg/L)	pH değeri 6,0 ile 8,5 arasında değişen killi topraklarda, 24 yıldan daha kısa bir süre sulama yapıldığında (mg/L)
Alüminyum	4600	5,0	20,0
Arsenik	90	0,1	2,0
Berilyum	90	0,1	0,5
Bor	680	-3	2,0
Kadmiyum	9	0,01	0,05
Krom	90	0,1	1,0
Kobalt	45	0,05	5,0
Bakır	190	0,2	5,0
Florür	920	1,0	15,0
Demir	4600	5,0	20,0
Kurşun	4600	5,0	10,0
Lityum	-	2,5	2,5
Manganez	920	0,2	10,0
Molibden	9	0,01	0,052
Nikel	920	0,2	2,0
Selenyum	16	0,02	0,02
Vanadyum	-	0,1	1,0
Çinko	1840	2,0	10,0

Toprakta ağır metallerin sınır değerleri, ‘Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik’ ile düzenlenmiştir (Anonim 2010b; Alloway 2013; Khan 2019; Bodur 2020). Toprakta ağır metal sınır değerleri Tablo 4’de sunulmuştur.

Tablo 4. Toprakta ağır metal sınır değerleri (mg/kg) (Anonim 2010b;Alloway 2013;Khan 2019;Bodur 2020)

Ağır Metal	Sınır Değer (mg/kg kuru toprak)
Cd	3
Cr	100
Cu	140
Fe	21000
Hg	1
Mn	600
Ni	75
Pb	300
Zn	300

WHO/FAO tarafından belirlenen bitkilerde izin verilebilir maksimum ağır metal eşik değerleri Tablo 5’de sunulmuştur (Lente *et al.* 2014).

Tablo 5. Bitkilerde izin verilebilir ağır metal içerikleri (mg/kg) (Lente *et al.* 2014)

Ağır Metal	Sınır Değer (mg/kg)
Cd	0,2
Cr	1,3
Cu	40
Fe	425
Hg	0,03
Mn	500
Ni	10
Pb	2
Zn	60

Hussain *et al.* (2019), arıtılmış kanalizasyon ve endüstriyel atık sularla sulanan sebzelerde ağır metal birikimi ve bunun insan sağlığına etkilerini değerlendirmişlerdir. Araştırmada, arıtılmış atık suyla sulanan sebzelerin yapraklarındaki Cd, Co, Cu, Mn ve Zn konsantrasyonlarının toksik sınırların altında olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar günlük metal alımı değerleri, hem arıtılmış atık su hem de musluk suyu ile sulanan bitkilerin tüketiminin insan sağlığı açısından risk oluşturmadığını göstermektedir. Yetişkinler için önerilen günlük Cu, Fe, Zn ve Mn alım sınırları sırasıyla 1,2–3 mg, 10–50 mg, 5–22 mg ve 2–20 mg arasında olup, bitkiler bu sınırları aşmamaktadır. Arıtılmış atık su ile sulanan topraktaki zenginleşme

faktörü ise $Zn > Ni > Pb > Cr > Cu > Co > Mn > Cd$ sırasına göre azalmıştır. Bu bulgular, arıtılmış atık suyun sulamada kontrollü bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Chung *et al.* (2011) tarafından yapılan çalışmada, üç yıl boyunca evsel atık suyla sulanan topraklarda Pb, Cd, Cu ve Zn gibi ağır metallerin kahverengi pirinç (*Oryza sativa* L.) üzerindeki yer değiştirmesi, alımı ve kalıntıları incelenmiştir. Sonuçlar, evsel atık suyun sulama amacıyla kullanılmasıyla toprak ve kahverengi pirinçte bu ağır metallerin seviyelerini arttığını göstermektedir. Ancak, kahverengi pirinçteki ağır metal konsantrasyonları, FAO/WHO'nun önerdiği tolerans seviyelerinin altında kalmıştır. Bununla birlikte, gıda zincirinde aşırı ağır metal birikimini önlemek için evsel atık sulardan kaynaklanan kirleticilerin sürekli izlenmesi ve kontrol edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır.

Qureshi *et al.* (2016), arıtılmış belediye atık suları ile sulamanın toprak ve gıda ürünlerindeki ağır metal birikimi üzerindeki etkilerini ve bu ürünlerin tüketiminin sağlık risklerini değerlendirmiştir. Araştırmada, marul, turp ve havuçta daha yüksek Fe, Zn, Cu ve Cr konsantrasyonları tespit edilmiş ancak tüm değerler Dünya Sağlık Örgütü ve Avrupa Birliği kriterlerinin altında kalmıştır. Sebzelelerdeki ağır metallerin biyoakümülyasyon faktörleri $Fe > Zn > Cu > Cr$ sırasını izlerken, sağlık risklerinin düşük olduğu belirtilmiştir. Çalışma, uygun sebze seçimlerinin ve toprak yönetiminin metal kontaminasyonuna maruz kalma riskini azaltabileceğini vurgulamaktadır.

Aftab *et al.* (2023), Pakistan Chenab Nagar ve Chiniot'ta atık suyla sulanan sebzelerde ve toprakta ağır metal kirliliğini incelemiştir. Çalışma, Cd, Cr, Co ve Pb seviyelerinin WHO ve FAO standartlarını aştığını, özellikle Cd'nin (0,38-1,205 mg/kg) tüm sebzelerde yüksek olduğunu göstermiştir. HRI analizinde Cd ve Cr en yüksek riskli metaller olarak tanımlanmıştır. Pb, Cd, Cr ve Co'nun su ve topraktan sebzelerin yenilebilir kısımlarına geçişi ciddi sağlık riskleri oluştururken, Ni ve Mn konsantrasyonlarının güvenli seviyelerde olduğu bulunmuştur. Çalışma, atık suyla sulanan sebzelerin tüketiminin çözüm bulunmadıkça halk sağlığı için tehdit oluşturacağını vurgulamaktadır.

Tariq (2021), atık suyla sulama sonucu toprak, su ve sebzelerde ağır metal birikimini ve bunun insan sağlığı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışma, atık sularda yaygın olarak bulunan Pb, Cd, As, Hg, Cr, Zn, Ni ve Cu gibi toksik elementlerin sebzelerde birikebileceğini ve besin zinciri yoluyla insanlara geçebileceğini göstermiştir. Araştırma sonuçlarına göre Cd ve Pb gibi metaller, düşük konsantrasyonlarda bile ciddi sağlık riskleri taşıırken, Zn ve Cu gibi metaller önerilen seviyelerin üzerinde toksik hale gelebilir.

Osman vd (2021) çalışmasında, atık suların sebze ve yem bitkilerinin sulamasında kullanımının toprak, bitki ve insan sağlığı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Meta analiz sonuçlarına göre, arıtılmamış atık sulardaki Ni, Cr, Cd, Pb ve Zn gibi ağır metaller, dünya standartlarını aşmış, arıtılmış sularda ise sınırların içinde kalmasına rağmen bu sularla sulanan toprak ve sebzelerde metal birikimi tehlikeli düzeylere ulaşmıştır. Tatlı suyla sulanan sebzelere kıyasla, atık suyla sulanan sebzelerde ağır metal konsantrasyonu 3-9 kat daha yüksek bulunmuş ve özellikle Cd ve Pb için HRI güvenli sınırların üzerinde tespit edilmiştir.

Hussain and Qureshi (2020) çalışmalarında, arıtılmış atık su ile damla sulamanın toprak, yapraklı bitki, kök bitki ve meyvesi yenen sebzelerdeki ağır metal birikimine etkisini incelenmişlerdir. Sonuçlara göre, marul ve ıspanakta Fe birikimi en yüksek olurken, Zn ve Cr farklı sebzelerde en çok bulunan metaller olarak tespit edilmiştir. Patlıcan ve turpta ise ağır metal konsantrasyonları en düşük seviyede bulunmuştur.

Atta *et al.* (2023), Dera Ghazi Khan bölgesindeki kentsel atık ve endüstriyel atık suların tarımsal sulama için kullanımının toprak, bitkiler ve insan sağlığı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Araştırmada, sulama suyunda pH, TDS (toplam çözünmüş katı madde), EC ve Al, As, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn, Ni gibi ağır metallerin konsantrasyonları ölçülmüş; bu metallerin toprak ve bitkilere transferi değerlendirilmiştir. Toprakta ağır metal seviyeleri WHO/FAO sınırları içinde bulunmasına rağmen, Cr ve Pb toprakta en yaygın metaller olarak tespit edilmiştir. Bitkilerde ise Cr, Ni, Mn ve Pb konsantrasyonları güvenli sınırları aşmıştır.

Kama *et al.* (2023), arıtılmış atık su ile sulamanın toprak-ürün sistemi üzerindeki etkilerini ve ağır metallerin (Zn, Cu, Pb, Cd) topraktan bitkilere transferini incelemişlerdir. Sera koşullarında yapılan deneyde, mısır ile soya fasulyesi tekli ve birlikte ekim (intercropping) sistemlerinde, yeraltı suyu ve arıtılmış atık su kullanılarak sulanmıştır. Arıtılmış atık su ve birlikte ekim sisteminin, toprak besin içeriğini artırdığı ve bitki büyümesini desteklediği görülmüştür. Zn, Pb ve Cd bitki yapraklarında daha yüksek konsantrasyonlarda bulunurken, Cu köklerde daha fazla birikmiştir. Ayrıca, arıtılmış atık su ile sulama, ürünlerde besin içeriğini artırmış, ancak ağır metal konsantrasyonlarının insan tüketimi için kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu belirlenmiştir. Ekim yapılmayan topraklarda, arıtılmış atık suyun Cu ve Pb birikimi üzerindeki etkisi daha belirgin olmuştur. Çalışma, intercropping sisteminin Cd hariç ağır metallerin topraktan bitkiye transferini kolaylaştırdığını ortaya koymuş ve arıtılmış atık suyun tarımsal sistemlerde güvenli kullanımına dair öneriler sunmuştur.

Elala (2021) çalışmasında, Mısır'ın Giza bölgesinde atık su ile sulanan toprak ve sebzelerde (bakla, lahana, soğan, sarımsak, kabak, biber, patlıcan, patates, bamya, yeşil fasulye) ağır metal (Zn, Ni, Pb, Cu, Cr, Cd) konsantrasyonları incelenmiş ve bu sebzelerin tüketiminden kaynaklanabilecek insan sağlığı riskleri değerlendirilmiştir. Çalışma, su, toprak ve sebze örneklerinde metal içeriğinin önemli ölçüde farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Atık su, bakteriyolojik yönergeler açısından sulama için uygun bulunmazken, çoğu fizikokimyasal parametre ve toprak ile su örneklerindeki ağır metal konsantrasyonları önerilen sınırlar içinde kalmıştır.

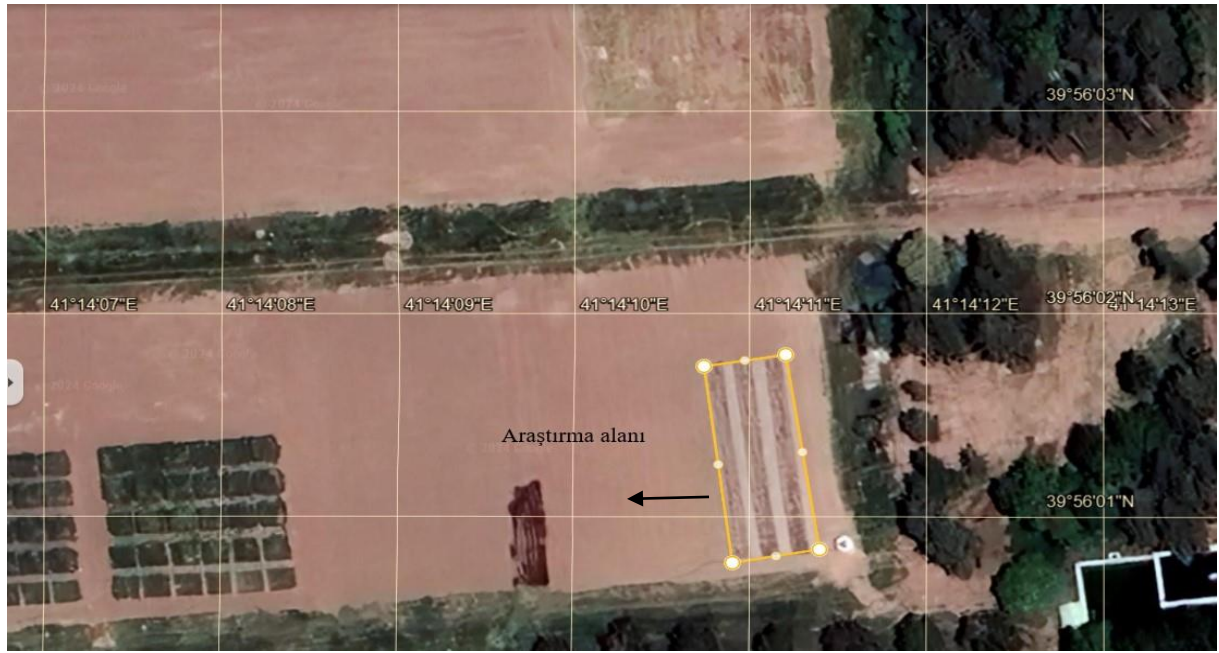
Akgün (2018) tarafından, leonardit ile Giresun sahillerinde doğal olarak yetişen deniz marulu (*Ulva lactuca*) ve kahverengi deniz yosunu (*Cystoseira barbata*) türlerinden elde edilen sıvı ve katı organik gübrelerin, toprağın fiziko-kimyasal özellikleri ve fasulye (*Phaseolus vulgaris* L.) bitkisinin gelişimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, organik gübreler farklı kombinasyonlarla toprağa uygulanmış ve metal analizleri ICP-MS cihazı ile gerçekleştirilmiştir. En yüksek azot, sodyum, potasyum, magnezyum ve kalsiyum değerleri belirli deneme gruplarında gözlemlenmiş olup, bitkideki metal analizleri sonucunda da en yüksek değerlerin sıvı gübre (USG) ve leonardit (LG) uygulamalarında elde edildiği belirtilmiştir.

MATERYAL ve METOD

Materyal

Araştırma Alanı

Araştırmalar, Erzurum ilindeki ATA-BUAM deneme alanında gerçekleştirilmiştir. Bu araştırma alanı, deniz seviyesinden yaklaşık 1830 metre yükseklikte olup, koordinatları $39^{\circ}56.01'$ Kuzey enlemi ve $41^{\circ}14.11'$ Doğu boylamı olarak belirlenmiştir. Denemenin yapıldığı araştırma alanına ait uydu görüntüsü Şekil 4'de, çalışmanın yürütüldüğü deneme alanından görünüm Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 4. Araştırma alanının uydu görüntüsü (Anonymous 2024d).



Şekil 5. Çalışmanın yürütüldüğü deneme alanından görünüm

Araştırma Alanının İklim Özellikleri

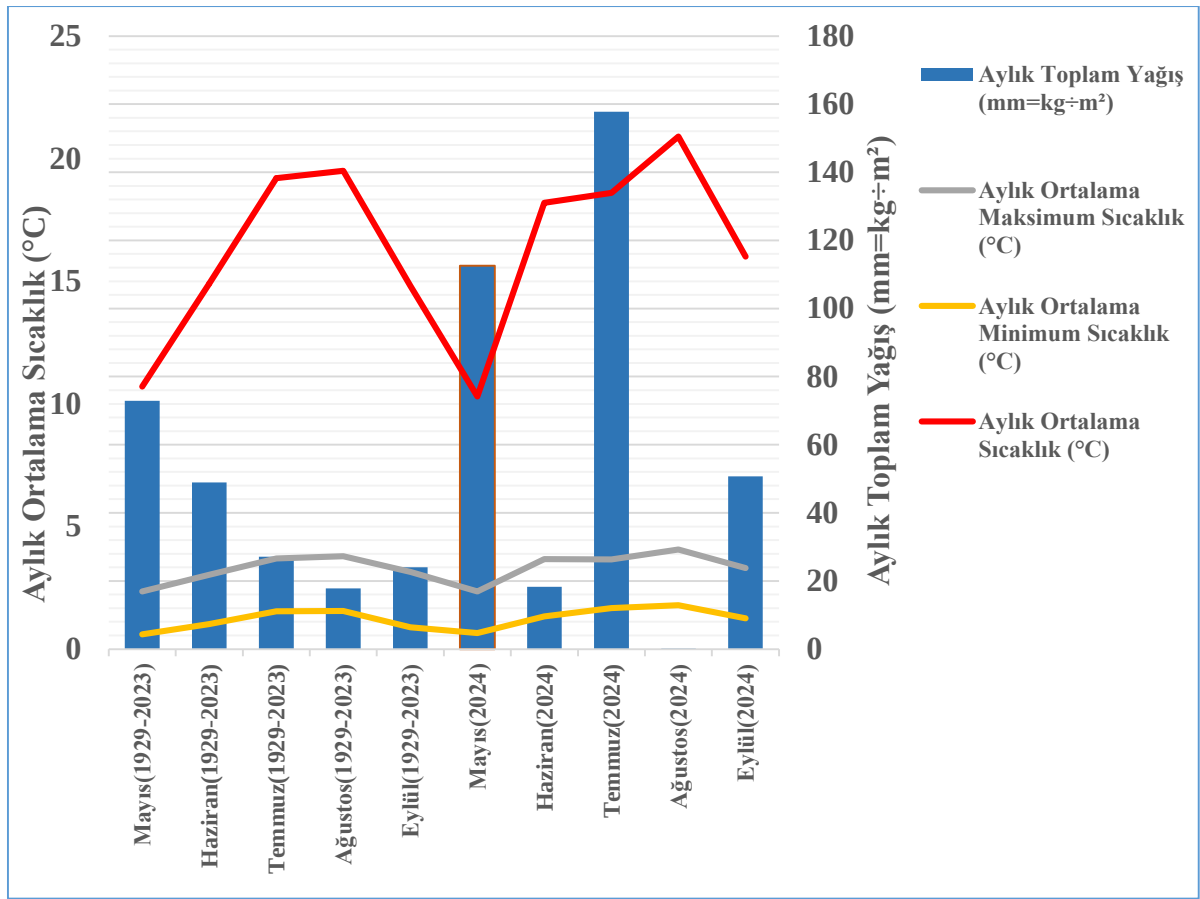
Denemenin yapıldığı alan ile ilgili 2024 yılında yayınlanan ve uzun yıllara ait olan veriler, Erzurum Meteoroloji 12. Bölge Müdürlüğü'nden alınmıştır (Tablo 6).

Erzurum ili, karasal iklim kuşağında yer almakta olup, sert karasal iklim özelliklerine sahiptir. Yaz ayları kurak ve serin, kış ayları ise genellikle soğuk ve kar yağışlı geçmektedir. Gündüz ve gece arasındaki sıcaklık farkı oldukça fazladır. 1929-2023 yılları arasındaki uzun dönem ortalamalarına göre, yıllık ortalama hava sıcaklığı 5,8 °C, en yüksek sıcaklık 36,5 °C, en düşük sıcaklık ise -37,2 °C olarak kaydedilmiştir. Yıllık yağış miktarı ise 431,5 mm'dir. Araştırmanın gerçekleştirildiği dönemde ise aylık ortalama sıcaklık 16,8 °C, en yüksek sıcaklık 29,2 °C, aylık toplam yağış ortalaması ise 67,9 mm olarak ölçülmüştür (Anonim 2024) (Tablo 6).

Tablo 6. Araştırma bölgesine ilişkin meteorolojik veriler

	Parametre	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ortalama
Uzun Yıllar (1929-2023)	Aylık Ortalama Sıcaklık (°C)	10,7	14,9	19,2	19,5	14,8	15,82
	Aylık Ortalama Maksimum Sıcaklık (°C)	16,9	21,8	26,6	27,3	22,7	23,06
	Aylık Ortalama Minimum Sıcaklık (°C)	4,3	7,3	11,1	11,2	6,4	8,06
	Günlük Toplam Güneşlenme Süresi Aylık Ortalaması (saat)	7,99	10,18	11,31	10,70	9,10	9,86
	Aylık Toplam Yağış (mm=kg÷m ²)	72,9	48,9	27,1	17,8	24	38,14
	Aylık Toplam Açık Yüzey Buharlaşması (mm)	118,37	174,83	242,62	206,90	146,17	177,78
	Aylık Ortalama Nispi Nem (%)	62,57	57,95	51,53	47,91	50,47	54,09
	Aylık Ortalama Sıcaklık (°C)	10,3	18,2	18,6	20,9	16	16,8
	Aylık Ortalama Maksimum Sıcaklık (°C)	16,9	26,4	26,3	29,2	23,8	24,52
	Aylık Ortalama Minimum Sıcaklık (°C)	4,7	9,6	12	12,9	9	9,64
2024	Günlük Toplam Güneşlenme Süresi Aylık Ortalaması (saat)	6,4	10,9	9,1	11	8	9,08
	Aylık Toplam Yağış (mm=kg÷m ²)	112,6	18,3	157,8	0,1	50,7	67,9
	Aylık Toplam Açık Yüzey Buharlaşması (mm)	134	145,9	145,4	197,4	123,6	149,26
	Aylık Ortalama Nispi Nem (%)	65,1	47,6	61,8	45,5	56,9	55,38
	Aylık Ortalama Sıcaklık (°C)						
	Aylık Ortalama Maksimum Sıcaklık (°C)						
	Aylık Ortalama Minimum Sıcaklık (°C)						

Araştırma bölgesine ilişkin çalışma alanının uzun dönem ve deneme yıllarına ait minimum sıcaklık, maksimum sıcaklık, ortalama sıcaklık ve toplam yağış değişimlerinin grafiksel gösterimi Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Çalışma alanının uzun dönem ve deneme yıllarına ait minimum sıcaklık, maksimum sıcaklık, ortalama sıcaklık ve toplam yağış değişimleri

Araştırma Alanının Toprak Özellikleri

Deneme öncesinde, başlangıç toprak özelliklerini belirlemek amacıyla tarlayı temsil edecek şekilde 0-30 cm derinliğinden toprak örnekleri alınmıştır. Bu derinlik, özellikle tarım yapılan alanlarda toprak organik karbonunun yoğun olarak bulunduğu ve bitki köklerinin aktif olduğu katman olarak büyük öneme sahiptir. Ayrıca, toprak sağlığı ve karbon döngüsü açısından kritik bir alan olup, bitki büyümesiyle doğrudan ilişkilidir (Fu et al., 2024). Alınan örneklerle, toprağın kimyasal özellikleri ve ağır metal içerikleri incelenmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Toprak örneği alma işlemleri

Sulama Suyu Kaynakları

Bu çalışmada, ATA-BUAM deneme alanına ait sulama suyu şebekesinden temin edilen su ve Erzurum Büyükşehir Belediyesi Su ve Kanalizasyon İdaresi (ESKİ) BAAT çıkış noktasından alınan arıtılmış atık su kullanılmıştır.

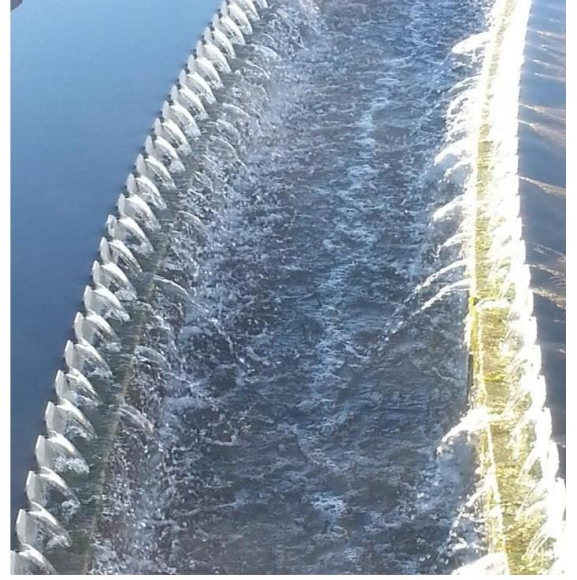
Kanalizasyon sistemi aracılığıyla Erzurum BAAT tesisine gelen atık suyun işlem aşamaları;

- ❖ 8 cm aralıklı kepçe tipi kaba ızgaradan geçirme,
- ❖ 2 cm aralıklı kaba ızgaradan geçirme,
- ❖ 6,8 metre uzunluğundaki terfi pompalarıyla yükseltme,
- ❖ 6 mm aralıklı ince ızgaradan geçirme,
- ❖ Kum-yağ tutucusundan geçirme,(burada, inorganik maddeler havuz dibine çökerken, yağ ve köpük yüzeyde birikir).
- ❖ Ön çöktürme havuzlarında dinlendirme,
- ❖ Havalandırma tanklarında nitrifikasyon ve denitrifikasyon (bu işlemlerle azot, karbon, fosfor ve diğer kirleticiler giderilir).
- ❖ Son çöktürme ünitesinde dinlendirme ve tahliye şeklinde sıralanabilir. Tesiste arıtılmış su Karasu Nehri'ni besleyen Pulur Çayına deşarj edilmektedir (Şekil 8) (Anonim 2016).

Çalışmada kullanılan arıtılmış atık su, Karasu Nehri'ne deşarj edilen noktadan alınmıştır. Geri kazanılan atık su, deneme alanına vidanjörler aracılığıyla taşınmış ve atık su bloğu yakınındaki su tankında depolanmıştır. Depo kapasitesi ise 10 tondur (Şekil 9).



(a)



(b)

Şekil 8. (a) Atık Su Arıtma Tesisine giren kanalizasyon suyu, (b) Karasu Nehrine deşarj edilen arıtılmış su (Anonim 2016)



(a)



(b)

Şekil 9. (a) Arıtılmış atık suyun vidanjörle taşınması, (b) depoya aktarım işlemi

Damla Sulama Sistemi

Parsellerin ölçüleri 800 x 150 cm olup, her bir parsel arasına dikey olarak 100 cm ve yatay olarak 50 cm aralık bırakılmıştır. Damla sulama sisteminde, suyun iletimi için PE borulardan yapılan ana boru, manifold ve yan borular kullanılmıştır. Ana boru ve yan boruların çapı 50 mm olarak belirlenmiştir. Damla sulama lateralleri, her iki bitki sırasına birer tane yerleştirilmiştir. Denemede, damlatıcı aralığı 33 cm, lateral aralığı 70 cm ve damlatıcı debisi 4 L/h olarak ayarlanmıştır. Çalışmada, 16 mm çapında içten geçişli damlatıcılar kullanılmıştır. Hem geri dönüştürülmüş arıtılmış atık su, hem de temiz su uygulama bloklarında, her blok için ayrı olarak hidrosiklon, kum-çakıl filtre ve elek filtre düzenekleri, kontrol ünitesine yerleştirilmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. Damla sulama sistemi

Metot

Deneme Deseni

Deneme, şansa bağlı tesadüfi bloklar deseni deney planına göre ve her bir durumda üç tekerrürle gerçekleştirilmiştir. Araştırmada ana parseller, arıtılmış atık su (AS), temiz su (TS) ve %50 arıtılmış atık su + %50 temiz su (KS) olmak üzere üç sulama yöntemine göre ayrılmıştır. A sınıfı buharlaşma kabından (E_o) elde edilen yığışimli buharlaşma miktarlarına göre belirlenen sulama yöntemleri (S) alt parselleri oluşturmuştur (Şekil 11). A sınıfı buharlaşma kabından (E_o) okunan değer 35 ± 5 mm'e ulaştığında sulamalar yapılmıştır.

Deneme konuları aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur.

Ana Konular (Su kalitesi);

AS: Arıtılmış atık su uygulamaları

TS: Temiz su uygulamaları

KS: %50 Arıtılmış atık su + %50 Temiz su

Alt Konular (Sulama seviyeleri);

A sınıfı buharlaşma kabından (E_o) elde edilen yığışimli buharlaşma miktarlarına göre belirlenen sulama konuları (S) ve sulama yöntemlerine göre parseller oluşturmuştur.

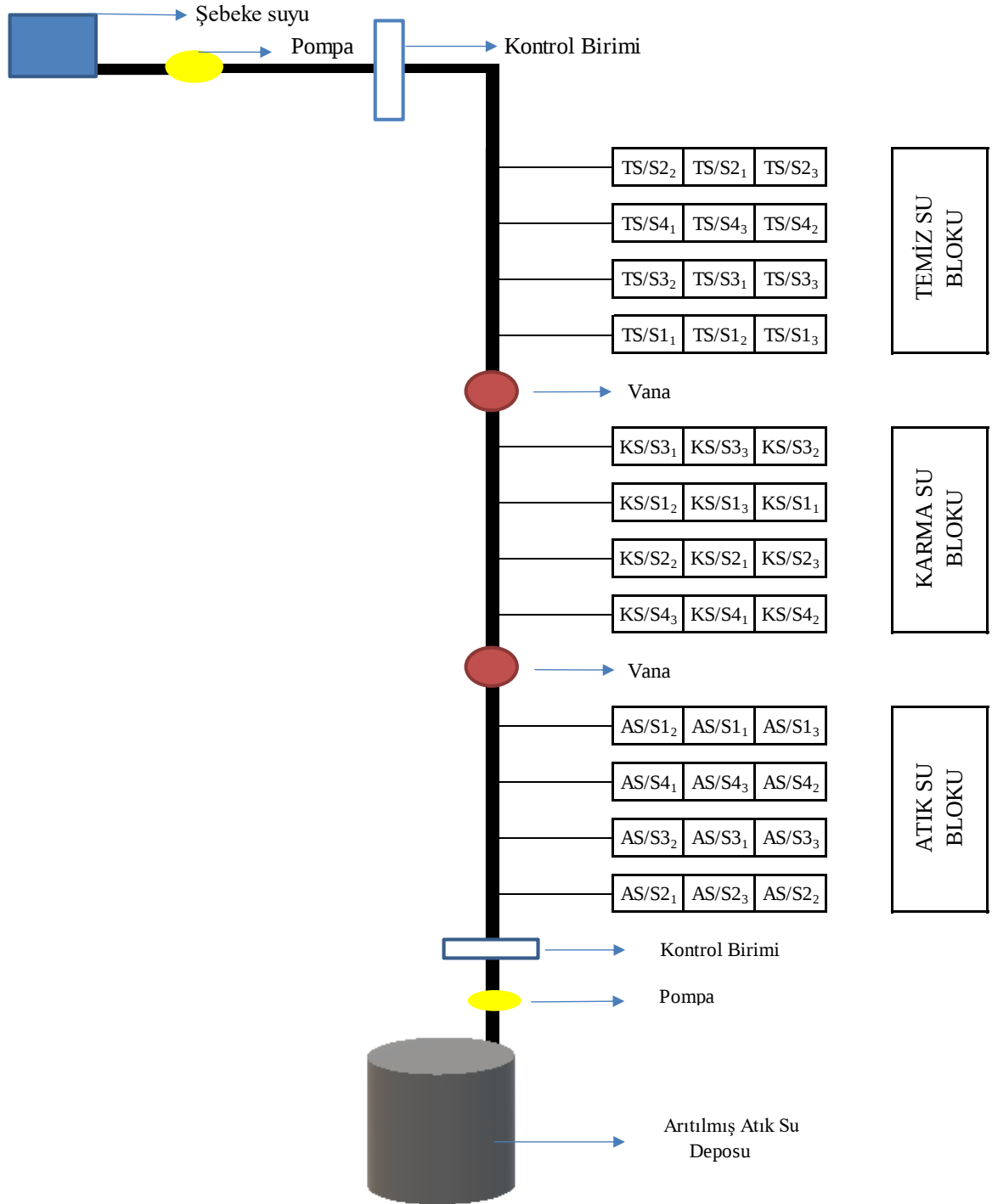
Sulama Alt Konuları;

S1: A sınıfı buharlaşma kabı kullanılarak elde edilen birikimli buharlaşma miktarlarının %100'ü kadar sulama uygulama konusu,

S2: A sınıfı buharlaşma kabı kullanılarak elde edilen birikimli buharlaşma miktarlarının %75'i kadar sulama uygulama konusu,

S3: A sınıfı buharlaşma kabı kullanılarak elde edilen birikimli buharlaşma miktarlarının %50'si kadar sulama uygulama konusu,

S4: A sınıfı buharlaşma kabı kullanılarak elde edilen birikimli buharlaşma miktarlarının %25'i kadar sulama uygulama konusu.



Şekil 11. Deneme planı

Fide Hazırlığı ve Ekim

Tohumlardan fide elde etmek için, Atatürk Üniversitesi Bitkisel Üretim Uygulama ve Araştırma Merkezi seralarında, viyollere, toprak, perlit, torf ve kum karışımı hazırlanarak, hazırlanan karışıma tohumlar ekilmiştir. 15 günlük süre boyunca günlük sulaması yapılarak fidelerin büyümesi izlenmiş, fideler 4 gerçek yaprak oluşturduktan sonra deneme alanına ekimi yapılmıştır. Viyollere tohum ekim işlemlerine ait görseller Şekil 12’de, deneme alanına ekim için hazır olan fidelere ait görseller Şekil 13’de, fidelerin deneme alanına ekim işlemlerine ait görseller Şekil 14’de verilmiştir.



Şekil 12. Viyollere tohum ekim işlemi



Şekil 13. Deneme alanına ekim için hazır olan fideler



Şekil 14. Fidelerin deneme alanına ekimi

Tarlanın yabancı ot durumu göz önüne alınarak, çalışma boyunca alanda iki kez çapalama yapılarak yabancı otlar temizlenmiştir. Çapalama işlemi öncesi ve sonrasına ait görseller Şekil 15’de verilmiştir.



(a)



(b)

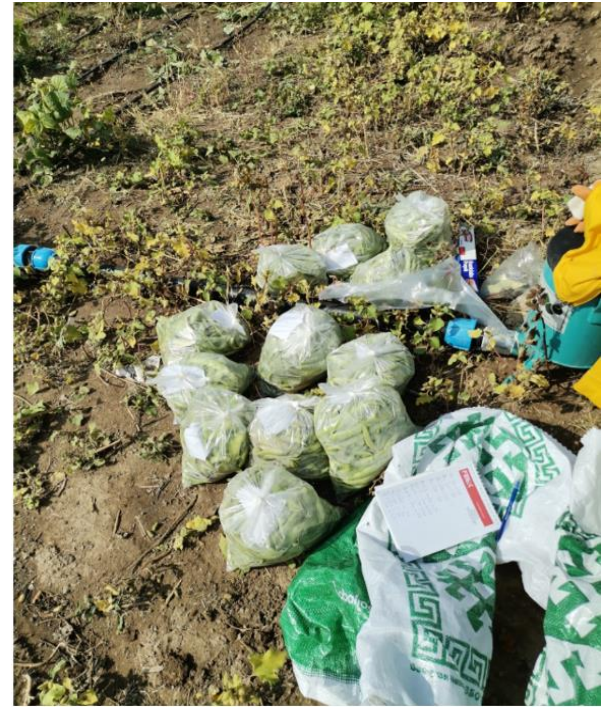
Şekil 15. (a) Çapalama işlemi öncesi, (b) çapalama işlemi sonrası

Hasat İşlemleri

Yetişen fasulyelerin hasadı, deneme konularına göre belirlenen farklı parsellerden toplanarak gerçekleştirilmiştir. Fidelerde toplanmaya hazır hale gelen ve farklı parsellerden toplanıp gruplandırılan fasulyelere ait görseller Şekil 16’da yer almaktadır.



(a)



(b)

Şekil 16. (a) Fidelerde toplanmaya hazır duruma gelen fasulyeler, (b) parsellerden toplanan fasulyeler

Ağır Metal Analizi

Hasat sonrası 0-30 cm derinliklerden alınan toprak örneklerine, araştırmada kullanılan arıtılmış atık su ile temiz su örneklerine ve fasulye bitkisinden alınan örneklere Fe, Cd, Cu, Mn, Zn, Ni, Pb, Cr ve Hg gibi ağır element analizleri yapılmıştır.

Hasat işlemi tamamlandıktan sonra, bitkiye uygulanan su miktarı ve sulama yöntemine göre seçilen parsellerden alınan toprak örnekleri, her parselden ayrı ayrı bir ızgara düzeni yöntemiyle toplanmıştır. Örnekleme noktalarının düzeni için temel gereksinimlerden biri, örnekleme alanının bölgedeki ağır metallerin kirlilik durumunu yansıtacak şekilde temsili ve homojen olmasıdır (Mao *et al.* 2023). Her örnekleme noktası arasında düzenli aralıklar bulunan sistematik bir örnekleme deseni, her örnekleme alanı içinde geniş bir aralığı kapsayacak şekilde kullanılmıştır. Her parsel için 0-30 cm derinlikten, yaklaşık 500 g ağırlığında toplam 5 yüzey toprak örneği toplanmış ve toplanan örnekler homojenlik için bileşik örnekler oluşturmak üzere bir araya getirilmiştir (Chen *et al.* 2016; Nde *et al.* 2021; Mao *et al.* 2023).

Laboratuvarda, kurutulması amacıyla 24 saat boyunca 105°C sıcaklıkta etüvde bekletilmiş, seramik havan ve tokmak kullanılarak parçalanmış ve 2 mm'lik bir elekten geçirilmiştir (Şekil 17) (Mao *et al.* 2019). Daha sonra, toprak örnekleri Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (DAYTAM) Endüktif Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektrometrisi (ICP-MS) (Agilent 7800 ICP-MS) kullanılarak analiz edilmiştir.

Temiz ve arıtılmış atık sudan alınan örnekler numaralandırılmıştır. İlk olarak ICP-MS cihazının optimizasyonu yapılmıştır ve cihazın kullanım talimatlarına uygun olarak işlemler gerçekleştirilmiştir. 'Sample List' oluşturulurken izlenen sıraya göre; ilk olarak kalibrasyon blankı için %2 HNO₃ ve %1 HCl içeren saf su kullanılmıştır, ardından validasyon kriterlerine uygun olarak en az 5 kalibrasyon standardı hazırlanmıştır. Kalibrasyon standartları, belirli bir seyreltilmiş çözeltiden derişige göre sıralanmıştır. Bununla birlikte, ultra saf su kullanılarak sample blank hazırlanarak kalite kontrol noktası olarak başka bir multimiks standardından hazırlanan 50 ppb'lik çözelti okutulmuştur. Cihazın tüm kontrolleri ve hazırlık işlemleri tamamlandıktan sonra, çeşitli lokasyonlardan alınan örnekler analiz edilmiştir. Bu örnekler, yöntem geçerliliği sağlandıktan sonra analiz edilip sonuçlar hesaplanmıştır. (Taner vd 2021)

Bitkiye uygulanan su miktarı ve sulama yöntemine bağlı olarak, her parselden ayrı ayrı ve rastgele seçilerek numaralandırılan fasulye örnekleri sera ortamında kurutulmuş, ardından öğütücü değirmenden geçirilmiştir (Şekil 18). Tüm örnekler ayrı ayrı kaplara alınmış ve numaralandırılarak Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezine gönderilmiştir. ICP-MS ile gıdalarda ağır metal analizi yapılırken, bazı örnekler öncelikle

yakma işlemi ile hazırlanmıştır (Şekil 19). Bu işlemde, örnekler yaklaşık 450-500°C sıcaklıkta fırında yakılarak organik bileşenler yok edilmiştir. Ardından, örnekler asidik çözücülerle (örneğin, nitrik asit) çözündürülmüştür. Çözünür hale gelen metal elementler, ICP-MS cihazına aktarılmıştır ve burada iyonize edilerek kütlesine göre ayrılmıştır. Bu sayede, örnekteki ağır metallerin konsantrasyonları belirlenmiş ve sonuçlar raporlanmıştır (Chen *et al.* 2016; Mao *et al.* 2019).



(a)



(b)

Şekil 17. (a) Laboratuvarda kullanılan etüv, (b) kurutma için etüve bırakılan toprak örnekleri



(a)



(b)

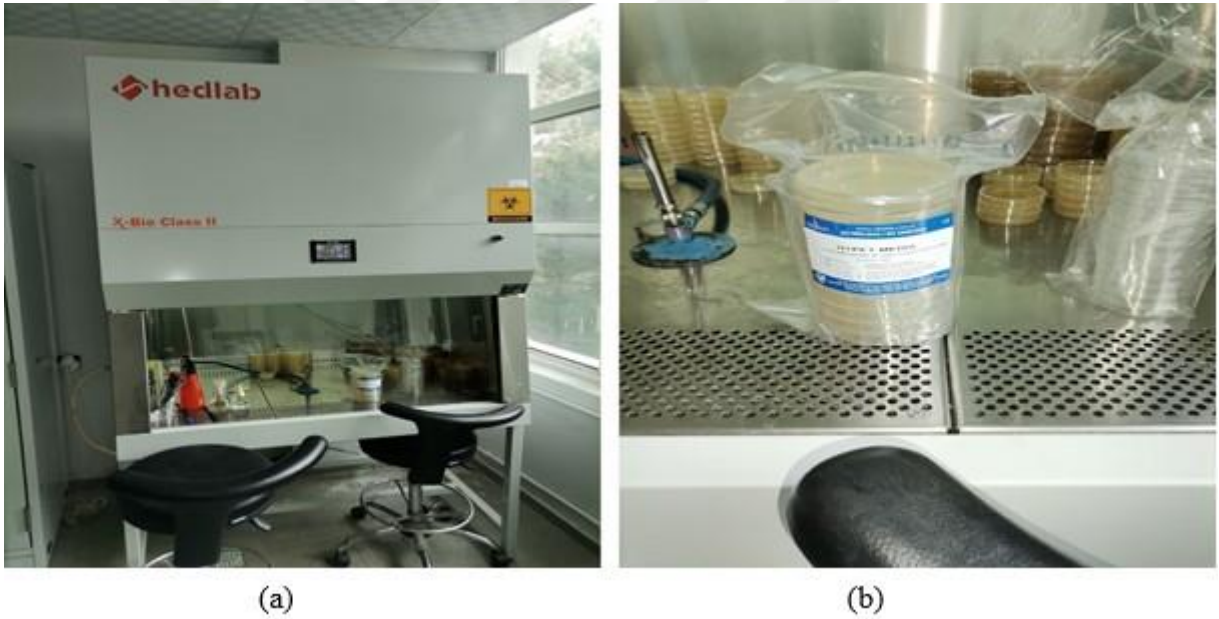
Şekil 18. (a) Kurutulmuş fasulye örneklerinin öğütücü değirmenden geçirilme, (b) öğütücü değirmenden geçirilen örneklerin numaralandırma çalışmaları



Şekil 19. Endüktif Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektrometrisi (Agilent 7800 ICP-MS)

Mikrobiyolojik Analiz

Escherichia Coli ve koliform miktarının tayini için yapılacak olan ekim işlemi sırasında kullanılan tüm araç ve gereçler, 121°C’de 15 dakika süreyle otoklavda sterilize edilmiştir. Bakteri ekimi için Kromojenik *Escherichia Coli* / Koliform Agar (ECC Agar) içeren petri kapları kullanılmıştır (Şekil 20). Fasulye örneklerindeki hedef mikroorganizmaların izolasyonu ve sayımı için bitki örnekleri, steril su eklenmiş petri kaplarına alınarak, steril bistüri ile küçük parçalara ayrılmıştır. Ardından, bu kaplardan 50 µL su alınıp Kromojenik *Escherichia Coli* / Koliform Agar (ECC Agar) içeren petri kaplarına, uygun seyreltiden yapılan yayma yöntemiyle ekim gerçekleştirilmiş ve petri kapları 35°C±2°C’de 18-24 saat süreyle inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon sonrasında, mavi-turkuaz-mor renkteki koloniler *E. coli* olarak, somon-pembe-kırmızı renkteki koloniler ise diğer koliform grubu bakteriler olarak kabul edilmiştir (Anonim 2019b). Mikrobiyolojik analiz işlemlerine ait görseller Şekil 21’de verilmiştir.



Şekil 20. (a) Analizin yapıldığı çekir ocağı, (b) bakteri ekimi için kullanılan petri kapları



Şekil 21. Mikrobiyolojik analiz işlemleri

Verilerin Değerlendirilmesi

Araştırma bulguları, SPSS yazılımı kullanılarak varyans analizi ile değerlendirilmiş, gruplar arasındaki ortalama farklılıkları ise Duncan çoklu karşılaştırma testi ile analiz edilmiştir (Er 2024).

Duncan Çoklu Karşılaştırma Testi

Duncan testi, ANOVA (Varyans Analizi) sonuçlarına dayalı olarak uygulanan çoklu karşılaştırma testidir. ANOVA testi, birden fazla grubun ortalamaları arasındaki farkların istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirler. Eğer ANOVA testi $p < 0,05$ ise, bu, karşılaştırılan gruplar arasındaki farkların tesadüfi olma olasılığının %5'ten az olduğunu, dolayısıyla sıfır hipotezinin reddedilmesi gerektiğini ve gruplar arasında anlamlı bir fark olduğu sonucuna varılmasını sağlar. Bu, gruplar arasındaki farkların gerçek olduğunu gösterir (Kuehl 2000). Ancak bu farkların hangi grup çiftlerinde meydana geldiğini belirlemek için Duncan testi yapılır (Duncan 1955).

Duncan testinin temeli, grup ortalamalarının bir ‘kritik değeri’ aşması gerektiği ilkesine dayanır. Testin amacı, farklı grupların birbirinden anlamlı şekilde farklı olup olmadığını görmek için, her bir grup ortalamasını karşılaştırmak ve belirli bir güven aralığı içinde olup olmadıklarını saptamaktır(Kuehl 2000).

a, b, c, d değerleri grupların karşılaştırma sonuçlarını ifade eder ve bu sonuçlar şu şekilde yorumlanır: Bu harfler, her bir grup için test sonucunda elde edilen anlamlılık farklarını temsil eder. Duncan testi, gruplar arasındaki farklılıkları gruplar arasındaki ortalamalarla karşılaştırarak, gruplara harfler verir (Zar 2010). Aynı harfi taşıyan gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur (Field 2013). Farklı harfler taşıyan gruplar arasında ise anlamlı bir fark vardır (Zar 2010; Montgomery 2017).



ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, temiz ve arıtılmış atık su kullanılarak dört farklı sulama seviyesi (%100, %75, %50, %25) ile yüzey damla sulama yöntemleriyle yetiştirilen fasulye bitkisinin ağır metal ve mikrobiyolojik analizleri incelenmiştir.

Sulama Sularının Özellikleri

Bitkinin deneme alanına ekim döneminden son toplamının yapıldığı dönem olan Haziran, Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında temiz su ve arıtılmış atık sudan alınan su örneklerine ait bazı kalite parametre değerleri, Tablo 7 'de verilmiştir.

Tablo 7. Denemede kullanılan sulama sularının kalite analiz sonuçları

Parametre	Atık su	Temiz Su	Parametre	Atık su	Temiz Su
pH	6,98	7,95	Zn (mg/l)	0,06	-
EC (dS/m)	0,60	0,32	Pb (mg/l)	0,0023	-
Ca (me/l)	2,31	0,93	Cd (mg/l)	-	-
Mg (me/l)	0,86	0,70	Cr (mg/l)	-	-
Na (me/l)	2,85	0,30	TN (mg/l)	6,86	-
K (me/l)	0,91	0,094	TP (mg/l)	1,54	-
CO ₃ (me/l)	-	-	AKM (mg/l)	10,59	-
HCO ₃ (me/l)	3,79	1,45	KOİ (mg/l)	20	-
Cl (me/l)	1,78	0,46	BOİ ₅ (mg/l)	4,01	-
SO ₄ (me/l)	0,13	0,12	SAR (%)	2,26	0,33
B (mg/l)	0,060	0,025	RSC (me/l)	0,62	-0,18
Fe (mg/l)	0,052	0,042	% Na	41,13	14,82
Cu (mg/l)	0,003	-	Fekal koliform (EMS/100 ml)	168	-
Mn (mg/l)	0,011	-	Toplam koliform (EMS/100 ml)	644	-

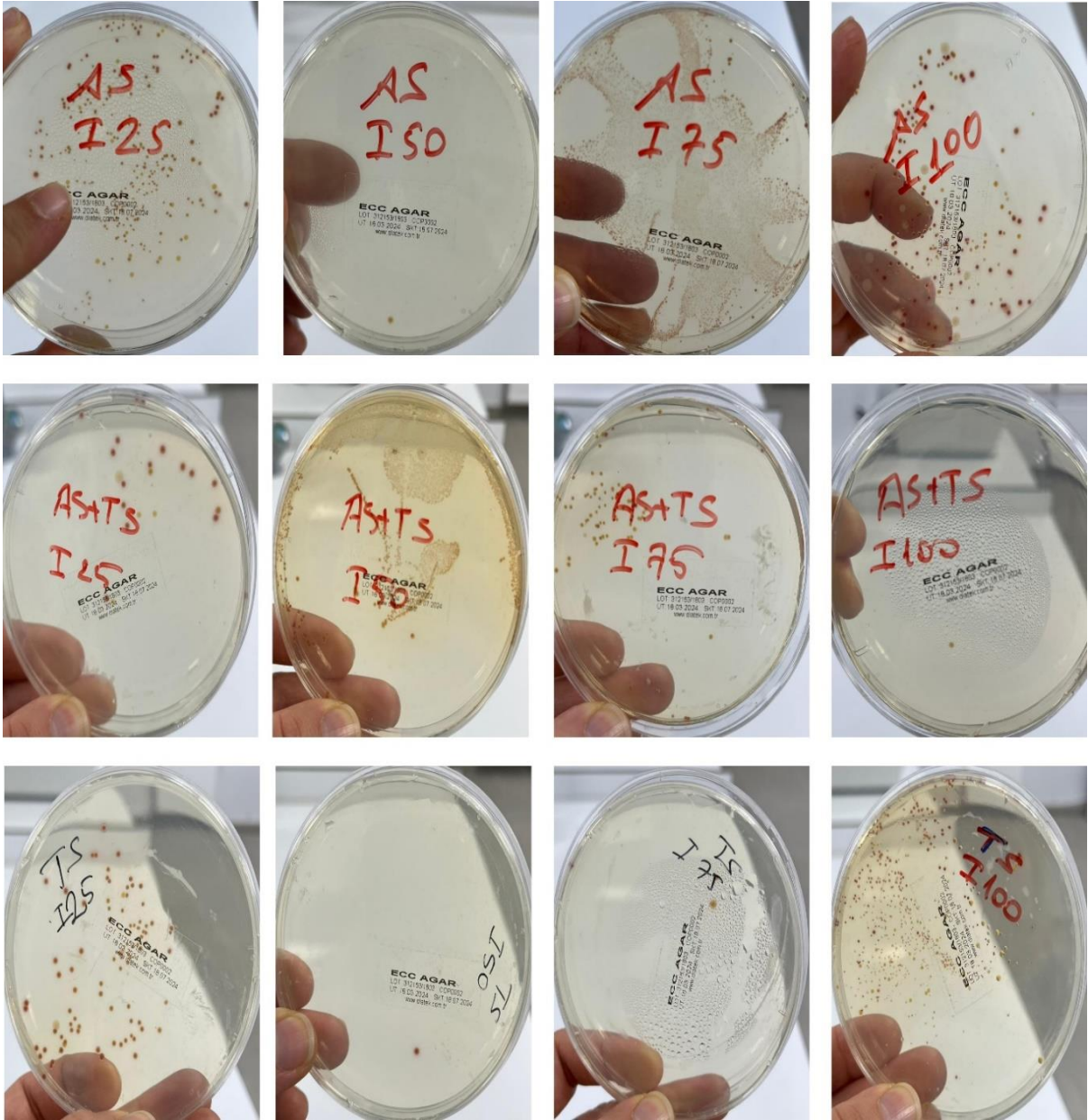
‘-’: Tespit edilmemiştir.

Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'nde verilen sulama suyu nitelik kriterleri (Tablo 1) ile Atık su Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği'nde belirtilen sulama sularındaki maksimum izin verilen ağır metal ve toksik element konsantrasyonları (Tablo 3), denemede kullanılan arıtılmış atık su ve temiz su kalite analiz sonuçları (Tablo 7) ile karşılaştırılmış, kullanılan suların tüm kalite özellikleri toprak, bitki ve sulama sistemleri için kullanılabilir sınırlar içinde olduğu belirlenmiştir.

Bakteri Analizi

Her bir deneme konusundan rasgele toplanan fasulyelere besiyeri ile mikrobiyolojik analiz yapılarak *E. coli* oluşumu araştırılmıştır.

Yapılan analizler sonucunda, petri kaplarındaki besiyerlerinde *E. coli* üremesi gözlemlenmemiş, ancak diğer koliform grubu bakterilerin ürediği tespit edilmiştir. Bu bakteriler, mikroorganizmanın türüne bağlı olarak pembe, somon-pembe veya kırmızımsı tonlarda üreme göstermiştir. Mikrobiyolojik analiz sonuçlarına ait görseller Şekil 22'de verilmiştir. Bu renk grubu toplam koliform oluşumu olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 22. Mikrobiyolojik analiz sonuçları

Ağır Metal Analizleri

Toprak Ağır Metal İçerikleri

Ağır metaller, atık suların toprakla buluşması sonucu çevre üzerinde ciddi riskler oluşturan önemli kirleticilerdir. Bu metallerin toprakta birikerek ekosistemleri bozduğu ve kirlenmiş topraklarda yetişen bitkiler aracılığıyla insan sağlığına zarar verebilecek toksik maddelerin yayılmasına yol açabileceği bilinmektedir.

Arıtılmış atık su ve temiz su koşullarında gerçekleştirilen denemede, farklı sulama seviyelerinin etkileri incelenmiştir. Deneme sonucunda, 0-30 cm toprak derinliklerinde Fe, Cd, Cu, Mn, Zn, Ni, Pb, Cr ve Hg elementlerine ait toprak analiz sonuçları elde edilmiş ve bu veriler

Tablo 8’de detaylı bir şekilde sunulmuştur. Ayrıca farklı sulama seviyeleri ve sulama suyu kalitelerinde 0-30 cm toprak derinliğinde, bazı ağır metallerin toprak içeriğine etkisinin grafiksel gösterimi Şekil 23’de verilmiştir.

Tablo 8. Farklı sulama seviyeleri ve sulama suyu kalitelerinde, 0-30 cm toprak derinliğinde tespit edilen ağır metallerin toprak içeriğine etkisi (mg/kg)

SK	SS	Fe	Cd	Cu	Mn	Zn	Ni	Pb	Cr	Hg
	S1	48,34 a	0,029 a	4,52 a	10,10 a	125,8 a	1,44 a	1,93 a	1,57 a	-
	S2	41,86 a	0,028 a	3,94 b	9,48 b	123,0 a	0,91 b	1,36 b	0,92 b	-
AS	S3	41,14 a	0,021 b	3,97 b	9,49 b	80,17 b	0,87 c	1,09 c	0,93 b	-
	S4	38,97 b	0,009 c	3,49 c	8,70 c	71,80 c	0,77 d	1,06 c	0,78 c	-
	ORT	42,5775	0,02175	3,98	9,4425	100,193	0,9975	1,36	1,05	-
	S1	42,18 b	0,034 a	5,24 a	8,78 a	111,6 a	0,81 a	1,03	0,86 a	-
	S2	43,59 a	0,024 b	4,25 b	8,73 a	111,4 a	0,74 b	1,07	0,87 a	-
KS	S3	42,97 b	0,012 c	3,73 c	8,81 a	78,29 b	0,74 b	1,04	0,85 a	-
	S4	43,36 a	0,001 d	3,37 d	8,26 b	67,26 c	0,69 c	1,04	0,81 b	-
	ORT	43,025	0,01775	4,1475	8,645	92,1375	0,745	1,045	0,8475	-
	S1	42,16 a	0,026 a	4,54 a	8,85 a	101,2 a	0,77 a	1,14 a	0,84 a	-
	S2	38,71 c	0,021 b	3,65 b	8,62 a	100,6 a	0,72 b	0,99 b	0,76 b	-
TS	S3	40,63 b	0,016 c	3,70 b	8,70 a	73,67 b	0,68 c	1,06 a	0,72 c	-
	S4	40,26 b	0,001 c	3,45 c	7,94 b	70,53 c	0,69 c	0,94 b	0,70 c	-
	ORT	40,44	0,016	3,835	8,5275	86,5	0,715	1,0325	0,755	-

SK: sulama suyu kalitesi, SS: sulama suyu seviyesi. - : tespit edilmedi, AS: arıtılmış atık sulama, TS: temiz sulama, KS: karma sulama. S1: %100 sulama, S2: % 25 kısıtlı sulama, S3: %50 kısıtlı sulama, S4: %75 kısıtlı sulama. Aynı sütundaki farklı küçük harfler (a,b,c,d) Duncan Testine göre $p \leq 0.05$ 'te sulama seviyeleri ortalamaları arasındaki anlamlı farklılıkları göstermektedir.

Deneme sonunda, 0-30 cm toprak derinliklerinde Fe, Cd, Cu, Mn, Zn, Ni, Pb, Cr ağır elementlerine ait farklı sulama seviyeleri (SS) ile sulama suyu kalitelerinin (SK) varyans analiz sonuçları Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Farklı sulama seviyeleri ve sulama suyu kalitelerinde, 0-30 cm toprak derinliğinde toprakta tespit edilen ağır metallerin varyans analizi sonuçları

VK	SD	F Değeri							
		Fe	Cd	Cu	Mn	Zn	Ni	Pb	Cr
SS	4	2,654*	2,621 ^{ns}	2,494*	2,674*	1,617*	2,139*	4,236*	4,079*
SK	3	2,872*	1,492 ^{ns}	0,257*	5,431*	0,201*	4,121*	0,79*	6,099*
SSxSK	12	2,259*	0,839 ^{ns}	0,162*	0,197*	0,037*	0,963*	0,279*	2,316*

VK: varyasyon katsayısı, SD: serbestlik derecesi, SS: sulama suyu seviyesi, SK: sulama suyu kalitesi. ns: istatistiksel olarak önemsizdir, *: p<0.05 istatistiksel olarak önemlidir.

Deneme sonrası toprak örneklerine yapılan ağır metal analizleri sonucunda, ağır metallerin deneme konularına göre büyüklük sıralaması Zn>Fe>Mn>Cu>Pb>Cr>Ni>Cd şeklinde belirlenmiştir. Ayrıca, Hg elementi hiçbir denemede tespit edilememiştir.

Denemede ölçülen Fe miktarları Tablo 8’de verilmiştir. Toprak örneklerinde belirlenen Fe miktarı içerikleri 38,71-48,34 mg/kg arasında değerler alırken, en yüksek değer arıtılmış atık su uygulaması olan S1 konusunda elde edilmiştir. AS grubunda S1, S2 ve S3 konularında Fe içeriği benzer olup istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur. Ancak, S4 grubunda Fe içeriği anlamlı bir şekilde daha düşüktür. AS grubunda Fe konsantrasyonu diğerlerine göre en yüksektir ve KS, TS gruplarından anlamlı şekilde farklıdır. Bu durum, arıtılmış atık suyun Fe içeriğini artırdığını ve sulama suyu kalitesinin bu metalin toprakta birikiminde rol oynadığını göstermektedir.

Denemede ölçülen Cd miktarları Tablo 8’de verilmiştir. Toprak örneklerinde belirlenen Cd miktarı içerikleri 0,034-0,001 mg/kg arasında değerler alırken, en yüksek KS uygulaması olan S1 konusunda gözlenmiştir. S1 grubunda en yüksek Cd içeriği gözlenirken, sulama seviyesi azaldıkça Cd konsantrasyonu da düşmüştür. Özellikle S4 grubunda Cd içeriği belirgin şekilde en düşüktür. Bu, Cd’nin su içeriği ile mobilizasyonunun azaldığını gösterebilir. AS grubu diğer su kalitelerine göre daha yüksek Cd konsantrasyonuna sahiptir. Bu, arıtılmış atık suyun Cd içeriğini artırabileceğine işaret etmektedir.

Denemede ölçülen Cu miktarları Tablo 8’de verilmiştir. Toprak örneklerinde belirlenen Cu miktarları 3,37-5,24 mg/kg arasında değerler alırken, en yüksek KS uygulaması olan S1 konusunda gözlenmiştir. En yüksek Cu içeriği S1 grubunda gözlenmiş, sulama seviyesinin azalması ile bu değer düşmüştür. S3 ve S4 grupları arasında anlamlı bir fark olmamakla birlikte, her iki grup S1 ve S2’den daha düşüktür. KS grubundaki S4’deki düşük seviye, KS’nin sulama için daha güvenli hale gelebileceğini ancak başlangıçta yüksek bakır içeriği nedeniyle dikkatli bir şekilde izlenmesi gerektiğini göstermektedir.

Denemede ölçülen Mn miktarları Tablo 8’de verilmiştir. Toprak örneklerinde belirlenen Mn miktarları 7,94-10,10 mg/kg arasında değerler alırken, en yüksek arıtılmış atık su uygulaması olan S1 konusunda elde edilmiştir. Mn konsantrasyonu S1 grubunda en yüksektir ve sulama seviyesi azaldıkça Mn içeriğinde azalma görülmüştür. Mn’nin mobilizasyonu su miktarına bağlıdır, bu nedenle düşük sulama seviyelerinde düşüş gözlenmiştir. AS grubu en yüksek Mn içeriğine sahipken, diğer gruplar arasında önemli farklılıklar yoktur. Bu, atık suyun Mn birikimini artırabileceğini göstermektedir.

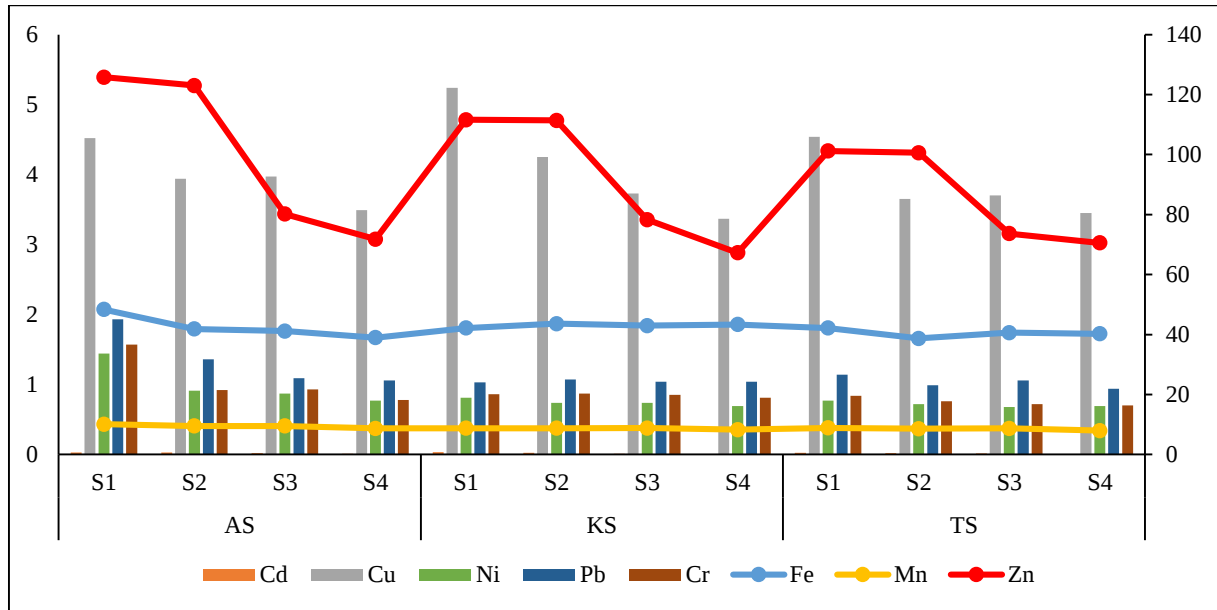
Denemede ölçülen Zn miktarları Tablo 8’de verilmiştir. Toprak örneklerinde belirlenen Zn miktarları 67,26-125,80 mg/kg arasında değerler alırken, en yüksek arıtılmış atık su uygulaması olan S1 konusunda elde edilmiştir. S1 grubunda en yüksek Zn konsantrasyonu ölçülmüş, sulama seviyesinin azalması ile bu değer düşmüştür. S3 ve S4 grupları, S1’e göre önemli ölçüde daha düşük Zn içeriğine sahiptir. AS grubu Zn içeriğinde en yüksek değere sahiptir. KS ve TS gruplarında Zn değerleri AS’ye göre düşük düzeydedir.

Denemede ölçülen Ni miktarları Tablo 8’de verilmiştir. Toprak örneklerinde belirlenen Ni miktarları 0,68-1,44 mg/kg arasında değerler alırken, en yüksek arıtılmış atık su uygulaması olan S1 konusunda elde edilmiştir. Ni içeriği, sulama seviyesi azaldıkça düşüş göstermiştir. S1 grubunda en yüksek değerler gözlenmiştir. Bu durum, Ni’nin toprakta su varlığı ile mobilize olduğunu göstermektedir. AS grubu Ni konsantrasyonu diğer gruplara göre daha yüksek bulunmuştur. Atık suyun Ni birikimi üzerindeki etkisi açıkça gözlenmektedir.

Denemede ölçülen Pb miktarları Tablo 8’de verilmiştir. Toprak örneklerinde belirlenen Pb miktarları 0,94-1,93 mg/kg arasında değerler alırken, en yüksek arıtılmış atık su uygulaması olan S1 konusunda elde edilmiştir. S1 grubunda en yüksek Pb içeriği görülmüştür, S4 grubunda ise en düşük seviyededir. KS uygulamasında Pb içeriği açısından istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır. AS grubu, diğer su kalitelerine göre daha yüksek Pb konsantrasyonuna sahiptir. Bu, atık suyun toprakta Pb birikimini artırabileceğini göstermektedir.

Denemede ölçülen Cr miktarları Tablo 8’de verilmiştir. Toprak örneklerinde belirlenen Cr miktarları 0,70-1,57 mg/kg arasında değerler alırken, en yüksek arıtılmış atık su uygulaması olan S1 konusunda gözlenirken en düşük ise temiz su uygulaması olan S4 konusunda belirlenmiştir. Cr konsantrasyonu S1 grubunda en yüksektir. Sulama seviyesi azaldıkça Cr içeriğinde anlamlı bir düşüş görülmüştür. S4 grubunda ise en düşük değer gözlenmiştir. AS grubunda Cr içeriği diğerlerine göre yüksektir. Bu, arıtılmış atık suyun Cr birikimine yol açtığını göstermektedir.

Denemede ölçülen Hg miktarları Tablo 8’de verilmiştir. Toprak örneklerinde Hg oluşumu gözlemlenmemiştir.



Şekil 23. Farklı sulama sulama seviyeleri ve sulama suyu kalitelerinde 0-30 cm toprak derinliğinde bazı ağır metallerin toprak içeriğine etkisinin grafiksel gösterimi (mg/kg)

Sonuç olarak, sulama suyu seviyesi ve kalitesi, ağır metal birikimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Özellikle arıtılmış atık suyun ağır metal konsantrasyonlarını artırdığı gözlenmiştir. Sulama suyu miktarındaki düşüş ise, genel olarak topraktaki ağır metal birikimlerini azaltmıştır. Bu durum, ağır metallerin su içeriğine bağımlı mobilizasyonları ile açıklanabilmektedir. Arıtılmış atık su ile sulanan konularda ağır metal içeriklerinde artış görülse de Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn ve Hg içeriklerinin Toprak Kirliliğinin Kontrolü Yönetmelik ve Dünya Sağlık Örgütü’nün (WHO) belirttiği limit değerlerinin oldukça altında yer aldığı saptanmıştır (Iyama *et al.* 2021).

Geri dönüştürülmüş atık suların tarımsal sulamada kullanımı, toprakta ağır metal birikimini artırabileceği çeşitli araştırmalarla ortaya konulmuştur (Ma *et al.* 2015; Er 2024). Birçok çalışmada, atık su ile sulanan toprakların ağır metal içeriklerinin temiz suyla sulananlara

kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Gu *et al.* 2019; Nawaz *et al.* 2021). Bununla birlikte, bazı araştırmalar, atık suyla sulanan topraklardaki ağır metal düzeylerinin uluslararası yönetmeliklerde belirtilen sınırların altında kaldığını bildirmektedir (Lente *et al.* 2014; Khaskhoussy *et al.* 2022). Ayrıca, arıtılmış atık su ile uygulanan kısıtlı sulama yöntemlerinin, topraktaki ağır metal birikimini azalttığı ve en yüksek su kısıtlaması uygulanan koşullarda en düşük ağır metal konsantrasyonlarının gözlemlendiği rapor edilmiştir (Tripathi *et al.* 2016; Demir ve Şahin 2017; Tunc and Sahin 2017; Biswas and Mojid 2018). Bu bağlamda, ham atık suyun tarımsal sulamada kullanımı, sağlık ve ekolojik denge açısından potansiyel riskler oluşturabileceği için, atık suların arıtılarak kullanılması toprakta ağır metal birikimini minimize etmek adına önemli bir çözüm olarak değerlendirilebilir.

Bitki Ağır Metal İçerikleri

Ağır metaller, tüm canlı organizmalar için hayati bir öneme sahiptir. Hem yaşamsal faaliyetlerin sürdürülmesinde rol oynamaları hem de canlı bünyesindeki varlıklarının eksikliği veya fazlalığı nedeniyle ortaya çıkabilecek olumlu ya da olumsuz etkiler bu önemin temelini oluşturur. Çevresel ortamlarda ve canlı organizmaların dokularında yoğunlaşan bu metaller, etkili dozlarda bulunmaları durumunda ciddi sağlık sorunlarına ve ölümlere yol açabilecek toksik maddeler olarak kabul edilir. Eser miktarda dahi zehir etkisi gösterebilen ağır metaller arasında Cd, Cr, Pb, Mn, Ni, Zn, Fe, Hg ve Cu gibi elementler öne çıkar. Ancak, bu metallerin izin verilen sınır değerleri aşılmadığı sürece toksisite oluşturmadığı bilinmektedir. Bu nedenle, bitkilerdeki ağır metal içeriklerinin izlenmesi, hem sağlık hem de çevre açısından büyük bir önem taşımaktadır.

Denemede fasulye bitkisinde ağır metal birikimine ilişkin Fe, Cu, Ni, Zn, Cr, Mn, Cd, Hg ve Pb içerikleri Tablo 10'da verilmiştir. Ayrıca farklı sulama seviyeleri ve sulama suyu kalitelerinde bazı ağır metallerin fasulye bitki içeriğine etkisinin grafiksel görünümü Şekil 24'de verilmiştir.

Tablo 10. Farklı sulama seviyeleri ve sulama suyu kalitelerinde ağır metallerin fasulye içeriğine etkisi (mg/kg)

S.K.	S.S	Fe	Cd	Cu	Mn	Zn	Ni	Pb	Cr	Hg
AS	S1	351 a	0,13 a	11,5 a	46,27 a	0,01	0,01	0,01	1,19 a	-
	S2	254 b	0,13 a	7,11 b	24,14 b	0,01	0,01	0,01	0,39 b	-
	S3	234 c	0,13 a	6,08 c	21,45 c	0,01	0,01	0,01	0,36 b	-
	S4	216 d	0,01 b	5,13 d	18,42 d	0,01	0,01	0,01	0,01 c	-
	ORT	263,75	0,1	7,455	27,57	0,01	0,01	0,01	0,4875	-
KS	S1	283 a	0,17 a	9,51 a	36,77 a	0,01	0,01	0,01	0,23 a	-
	S2	219 b	0,10 b	8,20 b	29,85 b	0,01	0,01	0,01	0,09 b	-
	S3	217 b	0,07 c	7,12 c	16,86 c	0,01	0,01	0,01	0,01 c	-
	S4	214 c	0,01 d	4,22 d	21,36 d	0,01	0,01	0,01	0,01 c	-
	ORT	233,25	0,0875	7,2625	26,21	0,01	0,01	0,01	0,085	-
TS	S1	201 a	0,03 a	6,88 a	24,22 a	0,01	0,01	0,01	0,07 a	-
	S2	200 a	0,02 a	6,04 b	21,35 b	0,01	0,01	0,01	0,01 b	-
	S3	134 b	0,01 b	4,95 c	18,21 c	0,01	0,01	0,01	0,01 b	-
	S4	132 b	0,01 b	1,00 d	16,15 d	0,01	0,01	0,01	0,01 b	-
	ORT	166,75	0,0175	4,7175	19,9825	0,01	0,01	0,01	0,025	-

SK: sulama suyu kalitesi, SS: sulama suyu seviyesi. - : tespit edilmedi, AS: arıtılmış atık sulama, TS: temiz sulama, KS: karma sulama. S1: %100 sulama, S2: % 25 kısıtlı sulama, S3: %50 kısıtlı sulama, S4: %75 kısıtlı sulama. Aynı sütundaki farklı küçük harfler (a,b,c,d) Duncan Testine göre $p \leq 0.05$ 'te sulama seviyeleri ortalamaları arasındaki anlamlı farklılıkları göstermektedir.

Deneme sonunda, fasulye bitkisinde Fe, Cd, Cu, Mn, Zn, Ni, Pb, Cr ağır elementlerine ait farklı sulama seviyeleri (SS) ile sulama suyu kalitelerinin (SK) varyans analiz sonuçları Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 11. Farklı sulama seviyeleri ve sulama suyu kalitelerinde, fasulye bitkisinde tespit edilen ağır metallerin varyans analizi sonuçları

VK	SD	F Değeri							
		Fe	Cd	Cu	Mn	Zn	Ni	Pb	Cr
SS	4	2,691*	2,247*	14,773*	9,988*	2,805 ^{ns}	4,032*	10,811*	1,135*
SK	3	5,185*	3,390*	7,794*	3,382*	0,300 ^{ns}	0,163 ^{ns}	0,183 ^{ns}	2,182*
SSxSK	12	0,300*	0,588*	0,866*	1,516*	0,912 ^{ns}	1,364 ^{ns}	1,680 ^{ns}	0,564*

VK: varyasyon katsayısı, SD: serbestlik derecesi, SS: sulama suyu seviyesi, SK: sulama suyu kalitesi. ns: istatistiksel olarak önemsizdir, *: p<0.05 istatistiksel olarak önemlidir.

Farklı sulama seviyeleri ve sulama kalitelerinde fasulye bitkisinde tespit edilen ağır metallerin deneme konularına göre sıralaması Tablo 12-14’de verilmiştir. Hg değeri hiçbir denemede tespit edilememiştir.

Tablo 12. Farklı sulama seviyeleri ve arıtılmış atık suda fasulye bitkisinde tespit edilen ağır metallerin deneme konularına göre sıralaması (mg/kg)

Sulama seviyeleri	AS
S1	Fe>Mn>Cu>Cr>Cd>Zn=Ni=Pb
S2	Fe>Mn>Cu>Cr>Cd>Zn=Ni=Pb
S3	Fe>Mn>Cu>Cr>Cd>Zn=Ni=Pb
S4	Fe>Mn>Cu>Cr=Cd=Zn=Ni=Pb

Tablo 13. Farklı sulama seviyeleri ve karma sulamada fasulye bitkisinde tespit edilen ağır metallerin deneme konularına göre sıralaması (mg/kg)

Sulama seviyeleri	KS
S1	Fe>Mn>Cu>Cr>Cd>Zn=Ni=Pb
S2	Fe>Mn>Cu>Cd>Cr>Zn=Ni=Pb
S3	Fe>Mn>Cu>Cd>Cr=Zn=Ni=Pb
S4	Fe>Mn>Cu>Cr=Cd=Zn=Ni=Pb

Tablo 14. Farklı sulama seviyeleri ve temiz sulamada fasulye bitkisinde tespit edilen ağır metallerin deneme konularına göre sıralaması (mg/kg)

Sulama seviyeleri	TS
S1	Fe>Mn>Cu>Cr>Cd>Zn=Ni=Pb
S2	Fe>Mn>Cu>Cd>Cr=Zn=Ni=Pb
S3	Fe>Mn>Cu>Cr=Cd=Zn=Ni=Pb
S4	Fe>Mn>Cu>Cr=Cd=Zn=Ni=Pb

Denemenin fasulye bitkisi Fe içeriği 351-132 mg/kg arasında değerler alırken en yüksek değer arıtılmış atık su uygulaması olan S1 konusunda, en düşük ise temiz su uygulamasının S4 konusunda gözlenmiştir. En yüksek Fe içeriği %100 sulama S1 seviyesinde gözlemlenmiştir ve sulama miktarı azaldıkça S2, S3, S4 konularında Fe içeriği azalmıştır. Bu, demirin toprak çözeltisinden bitki tarafından alınmasının yeterli su koşullarına bağlı olduğunu gösterir. AS kullanımı Fe içeriğini artırırken, TS kullanımında bu içerik daha düşüktür. KS ise AS'ye kıyasla düşük, ancak TS'ye göre yüksek Fe içeriği göstermiştir.

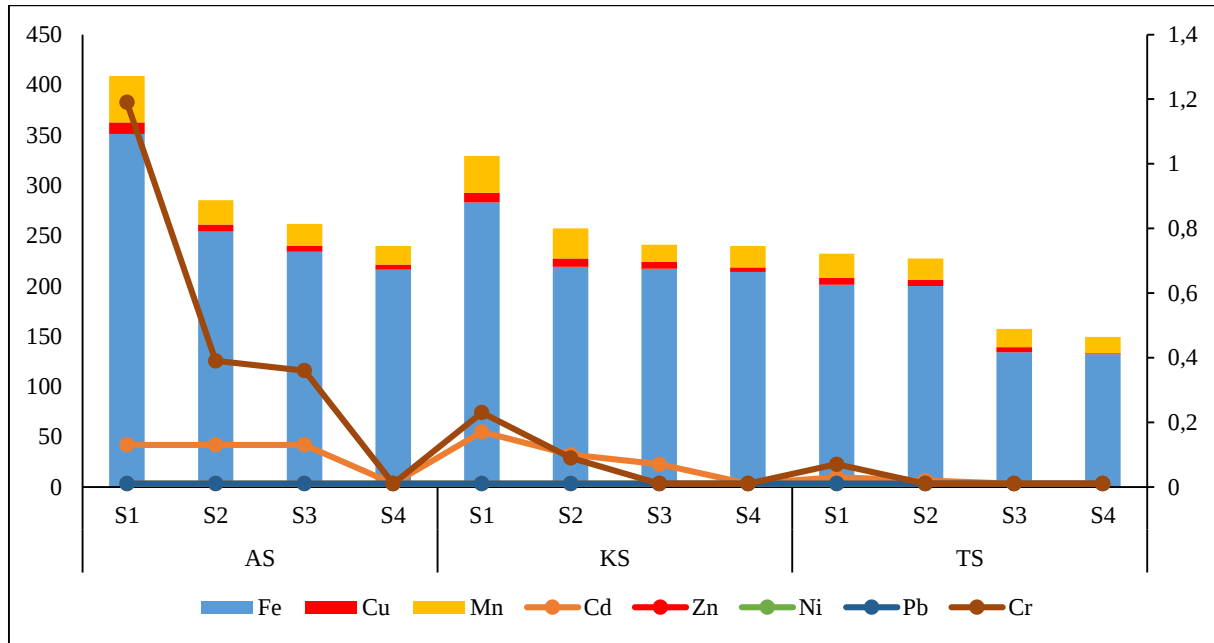
Denemenin fasulye bitkisi Cd içeriği 0,17-0,01 mg/kg arasında değerler alırken en yüksek değer karma sulama S1 konusunda görülürken, bunu arıtılmış atık su uygulaması olan S1, S2 ve S3 konuları takip etmiştir. Cd içeriği arıtılmış atık su uygulaması S1, S2 ve S3 seviyelerinde değişiklik göstermemiş, ancak S4 seviyesinde belirgin şekilde azalmıştır. Bu, Cd'nin su eksikliği koşullarında daha az alınabildiğini gösterebilir. S4'deki düşük seviye, sulama için daha güvenli hale gelebileceğini ancak başlangıçta yüksek Cd içeriği nedeniyle dikkatli bir şekilde izlenmesi gerektiğini göstermektedir.

Denemenin fasulye bitkisi Cu içeriği 11,50-1,00 mg/kg arasında değerler alırken en yüksek değer arıtılmış atık su uygulaması olan S1 konusunda, en düşük ise temiz su uygulamalarının S4 konusunda belirlenmiştir. Bakır içeriği %100 sulamada S1 en yüksek seviyede bulunmuş, sulama miktarının azalmasıyla S2, S3, S4 konuları kademeli olarak düşmüştür. Sulama seviyesinin düşmesi, bakırın bitkiye taşınmasını sınırlamış olabilir. AS sulama bakır içeriğini artırırken, TS kullanımı Cu içeriğini en düşük seviyeye çekmiştir. KS uygulaması AS ve TS arasında bir içerik göstermiştir.

Denemenin fasulye bitkisi Mn içeriği 46,27-16,15 mg/kg arasında değerler alırken en yüksek değer arıtılmış atık su uygulaması olan S1 konusunda, en düşük ise temiz su uygulamalarının S4 konusunda belirlenmiştir. Mn içeriği en yüksek S1 konusunda gözlemlenmiş, S4 konusuna kadar kademeli bir azalma göstermiştir. Mn, bitkide su ile taşınımı

kolay olan bir element olduğu için bu sonuç beklenir. AS kullanımında Mn içeriği en yüksek, TS kullanımında ise en düşüktür.

Denemenin fasulye bitkisi Cr içeriği 1,19-0,01 mg/kg arasında değerler alırken en yüksek değer AS uygulaması olan S1 konusunda gözlenmiştir. Denemede AS uygulamasının S2 ile S3 konuları, KS uygulamasının S3, S4 ve TS uygulamalarının S2, S3 ve S4 konuları benzerlik göstermiştir. TS uygulaması, AS ve KS uygulamalarının altında değerler gözlenmiştir. Bu durum Cr içeriğinin arıtılmış atık su ile arttığını göstermektedir. Denemede fasulye bitkisine ait Zn, Ni ve Pb içerikleri incelendiğinde sulama seviyelerinden veya su kalitesinden belirgin bir şekilde etkilenmediği gözlenmiştir.



Şekil 24. Farklı sulama seviyeleri ve sulama suyu kalitelerinde bazı ağır metallerin fasulye bitki içeriğine etkisinin grafiksel gösterimi (mg/kg)

Tablo 10 incelendiğinde farklı sulama seviyeleri ve su kalitelerinin bitki ağır metal içerikleri üzerinde anlamlı etkiler gösterdiğini ortaya koymaktadır ($p \leq 0.05$). Genel olarak, sulama seviyesi azaldıkça Fe, Cu ve Mn gibi ağır metal içeriklerinde belirgin bir düşüş gözlemlenirken, Cd, Zn, Ni ve Pb gibi metallerde önemli bir değişim görülmemiştir. Ayrıca incelemelerde Hg oluşumu gözlemlenmemiştir. AS en yüksek ağır metal içeriklerine neden olurken, TS en düşük seviyeleri sağlamıştır. Bu sonuçlar, sulama uygulamalarında hem su miktarı hem de kalite yönetiminin bitki üzerindeki ağır metal birikimini minimize etmek için kritik olduğunu göstermektedir. Literatürde yapılan diğer çalışmalar incelendiğinde; Yazdani (2019), arıtılmış atık suyla sulanan aspir bitkisinde Cd (0,035-0,09 mg/kg), Pb (0,028-0,046 mg/kg), Fe (45-160 mg/kg), Mn (32-38 mg/kg) ve Cu (14-19 mg/kg) içeriklerinin WHO sınır değerlerini aşmadığını, sulama suyunun ise özellikle Fe, Cu ve Mn içeriklerini önemli ölçüde

etkilediğini bildirmiştir. Yazdani *et al.* (2018), temiz su, atık su ve 1:1 oranında karıştırılmış suyla sulanan ayçiçeği bitkisinde Mn, Cu, Fe, Pb, Cd ve As içeriklerinin arttığını ancak bu değerlerin WHO sınırları içinde kaldığını belirtmiştir. Birçok araştırmacı atık su üzerine yürüttükleri çalışmalarında atık su ile sulanan bitkilerde ağır metal içeriğini bir miktar artırdığını, ancak önerilen değerlerden daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir (AbdelRahman *et al.* 2011; Ashraf *et al.* 2021).



SONUÇ VE ÖNERİLER

Ağır metal analiz araştırmaları incelendiğinde, ağır metal içeriklerinin genel olarak arıtılmış atık su ile sulama yapılan alanlarda arttığı tespit edilmiştir. Sulama suyu kalitesi ve sulama düzeylerinin toprakta ağır metal birikimi üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Tam sulama yapılan parsellerde, arıtılmış atık su kullanımıyla en yüksek ağır metal konsantrasyonları elde edilmiştir. Deneme sonrası yapılan ölçümlerde, arıtılmış atık su kullanılan parsellerde ağır metal konsantrasyonlarında artış gözlenmekle birlikte, Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg ve Zn içeriklerinin Toprak Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından belirtilen sınır değerlerin oldukça altında olduğu saptanmıştır. Bu durum, arıtılmış atık suyun kısa süreli kullanımı ve içeriğindeki ağır metallerin düşük seviyelerde olmasından kaynaklanmıştır.

Tarım, su kaynaklarına bağımlıdır ve iklim değişikliği yağış rejimini etkileyerek tarımsal üretimi tehdit etmektedir. Bu nedenle, suyun etkin kullanımı, geri dönüştürülerek yeniden kullanımı ve sınırlı su ile üretim yöntemlerinin uygulanması büyük önem taşımaktadır. Ülkemizde de kuraklık stresine karşı verim artırıcı stratejiler geliştirilmesi ve atık suyun tarımda değerlendirilmesi çevresel ve ekonomik açıdan avantaj sağlamaktadır. Deneme sonuçlarına göre fasulye bitkisinin ağır metal içerikleri sulama suyu kalitesi ve sulama seviyelerinden belirgin şekilde etkilenmiştir. Özellikle Fe, Cu, Mn, Cd ve Cr içeriklerinde arıtılmış atık su (AS) kullanımının değerleri artırdığı, temiz su (TS) uygulamasının ise daha düşük içerikler sağladığı gözlenmiştir. Karma sulama (KS) uygulamaları, ağır metal içeriklerinde AS ve TS arasında bir denge sağlamıştır. Ağır metallerin alımı, sulama seviyesiyle de doğrudan ilişkili olup, tam sulama (%100) yapılan uygulamalarda en yüksek değerlere ulaşırken, sulama miktarının azalmasıyla (%75'e kadar) içeriklerde önemli düşüşler kaydedilmiştir. Özellikle Fe, Cu ve Mn içerikleri, sulama seviyesindeki değişimlere duyarlı bulunmuş, buna karşın Zn, Ni ve Pb içerikleri sulama koşullarından anlamlı şekilde etkilenmemiştir. Sulama suyunun kalitesi ve miktarının, ağır metal alımında belirleyici bir faktör olduğunu ve bitki beslenmesi ile çevresel kirlilik risklerini doğrudan etkilediğini göstermektedir. Ayrıca, Pb, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni ve Zn içeriklerinin Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve Toprak Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği sınır değerleri altında kalması, arıtılmış atık su kullanımının kısa vadede risk oluşturmadığını, ancak dikkatli bir şekilde yönetilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Karma sulama (1:1 oranında temiz su ve atık su) uygulamaları, hem ağır metal içeriklerini azaltmak hem de su kaynaklarını daha sürdürülebilir şekilde kullanmak için uygun bir alternatif olarak değerlendirilebilir.

Çalışma sonucunda, her bir parselden rastgele alınan örneklerle *E. coli* bakteri analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler neticesinde, *E. coli* koloni oluşumuna rastlanmamıştır. Sulama suyu kalitesinin bitki ve insan sağlığı üzerinde önemli bir etkisinin olduğu ve arıtılmış atık suyun bu bağlamda kontrollü bir şekilde kullanılabilir olduğu söylenebilir.



KAYNAKLAR

- Abdelrahman, H. A., Alkhamisi, S. A., Ahmed, M., Ali, H., 2011. Effects of treated wastewater irrigation on element concentrations in soil and maize plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42(17), 2046-2063.
- Acar, B., Uğurlu, N., Yurteri, Y. D., Güven, M. S., Samadlı, R., Avcı, N. E., Hasırcı, O. S., 2020. Aspects for agricultural water management in water stress conditions: Case study of Konya Plain, Turkey. *International Journal of Environmental Agriculture Research (IJOEAR)*, 6(12), 91-94.
- Aftab, K.; Iqbal, S.; Khan, M. R.; Busquets, R.; Noreen, R.; Ahmad, N.; Kazimi, S. G. T.; Karami, A. M.; Al Suliman, N. M. S.; & Ouladsmame, M., 2023. Wastewater-Irrigated Vegetables Are a Significant Source of Heavy Metal Contaminants: Toxicity and Health Risks. *Molecules*, 28(3), 1371. <https://doi.org/10.3390/molecules28031371>.
- Akgün, H., 2018. Leonardit ve organik deniz yosunu gübrelerinin fasulye bitkisinin gelişimi ile toprağın fiziko-kimyasal özelliklerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Giresun Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Giresun Üniversitesi.
- Akoto, O.; Ephraim, J. H.; Darko, G., 2008. Heavy Metal Contamination of Surface Soils around the Rail Service Workshop in Kumasi, Ghana. *International Journal of Environmental Research*, 2(4).
- Alaimo, K., Packnett, E., Miles, R. A., Kruger, D. J., 2008. Fruit and vegetable intake among urban community gardeners. *Journal of Nutrition Education and Behavior*, 40(2), 94-101.
- Alam, O., Zheng, X., Du, D., Qiao, X., Dai, L., Li, J., Xia, J., Ye, J., Zhong, S., 2024. A critical review on advances in remediation of toxic heavy metals contaminated solids by chemical processes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(4), Article 113149. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113149>
- Alcamo, J., Moreno, J.M., Novaky, B., 2007. Ln: ML Parry OF Canizani, JP Palutikof et al. (eds) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 541-580.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56*, FAO, Rome.
- Alloway, B. J., 2013. *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability*. Springer.
- Alobaidy, A. H. M. J., Al-Sameraiy, M. A., Kadhem, A. J., ve Abdul Majeed, A., 2010. Evaluation of Treated Municipal Wastewater Quality for Irrigation. *Journal of Environmental Protection*, 1, 216-225. <https://doi.org/10.4236/JEP.2010.13026>.
- Alzabieh, H., 2024. Environmental Impact Of Using Treated Wastewater In Irrigation: Systematic study in GCC countries. Retrieved from <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:mdh:diva-69228>.
- Anonim, 2004. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği. Resmî Gazete Sayısı: 25687. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=7221&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5> (Erişim tarihi: 11.12.2024).

- Anonim, 2010a. Atık su Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği. Resmî Gazete Tarihi: 20.03.2010, Resmî Gazete Sayısı: 27527. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2010/03/20100320-7.htm> (Erişim tarihi: 12.01.2025).
- Anonim, 2010b. Toprak kirliliğinin kontrolü ve noktasal kaynaklı kirlenmiş sahalara dair yönetmelik. Resmî Gazete, Sayı 27605. Erişim adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2010/06/20100608-3.htm> (Erişim tarihi: 12.01.2025).
- Anonim, 2011. Mikrobiyolojik Kriterler Yönetmeliği, 29 Aralık 2011, Resmi Gazete (Sayı: 28157). Erişim adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2011/12/20111229m3-6.htm> (Erişim tarihi: 01.01.2025).
- Anonim, 2016. Erzurum Büyükşehir Belediyesi Eski Genel Müdürlüğü Atık Su Arıtma Tesisi. Erişim: <https://www.eski.gov.tr/atik-su-aritma-tesis> (Erişim tarihi: 11.11.2024).
- Anonim, 2019a. Gıda Mikrobiyoloji Analizleri. Erişim adresi: https://diatek.com.tr/Makale-Yontem/Mikrobiyolojik-Analiz/Gida-Mikrobiyoloji-Analizleri_3485.htm (Erişim tarihi: 20.11.2024).
- Anonim, 2019b. Gıda-Besiyeri İle Mikrobiyolojik Analizler. Erişim adresi: https://www.diatek.com.tr/pdf/products/1_GIDA%20-%20Besiyeri%20%C4%B0le%20Mikrobiyolojik%20Analizler.pdf (Erişim tarihi: 20.11.2024).
- Anonim, 2023. Tarım ve Orman Bakanlığı, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Faaliyet 2022 Raporu. Erişim adresi: <https://www.dsi.gov.tr/dsi2022faaliyetraporu.pdf> (Erişim tarihi: 12.01.2025).
- Anonim, 2024. Meteoroloji Genel Müdürlüğü. Erzurum İklim Verileri. Erişim adresi: <https://bulut.mgm.gov.tr/share/preview/Mz5nrUtjBztRBArY> (Erişim tarihi: 10.01.2025).
- Anonymous, 2024a. CDC. <https://www.cdc.gov/ecoli/index.html> (Erişim tarihi: 01.12.2024).
- Anonymous, 2024b. Escherichia Coli and Food Safety. World Health Organization. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/e-Coli> (Erişim tarihi: 31.12.2024).
- Anonymous, 2024c. FSIS. <https://www.fsis.usda.gov/> (Erişim tarihi: 01.12.2024).
- Anonymous, 2024d. Google Earth. Erzurum. Erişim adresi: https://earth.google.com/web/search/Erzurum/@39.93387764,41.23684895,1783.49522504a,212.16062902d,35y,0h,0t,0r/data=CiwiJgokCQtXCqjDZzRAEQpXCqjDZzTAGdE5xIZSuUhAIabBuoTjR0rAQgIIAUICCABKDQj_____8BEAA (Erişim tarihi: 20.11.2024).
- Antoniadis, V., Shaheen, S.M., Boersch, J., Frohne, T., Du Laing, G., Rinklebe, J., 2017. Bioavailability and risk assessment of potentially toxic elements in edible vegetables and soils around a highly contaminated former mining site in Germany. *Journal of Environmental Management*, 186, 192-200.
- Arpa, Ç., Say, R., Satiroğlu, N., Bektaş, S., Yürüm, Y., Genç, Ö., 2000. Kuzey Anadolu smektitleri ile sucul sistemlerden ağır metal giderimi. *Turk J. Chem.*, 24, 209–215.
- Ashraf, M., Ahmad, M. B., Shahzad, S. M., Imtiaz, M., Atif, M., Asif, M., Aziz, A., 2021. Characterization of wastewater and soil and vegetable plants exposed to long-term wastewater irrigation. *Soil, Environment*, 40(1).

- Aslam, M.A., Abbas, M.S., Mustaqeem, M., Bashir, M., Shabbir, A., Saeed, M.T., Irfan, R.M., 2024. Comprehensive assessment of heavy metal contamination in soil-plant systems and health risks from wastewater-irrigated vegetables. *Colloids and Surfaces C: Environmental Aspects*, 2, 100044. ISSN 2949-7590.
- Aslan, V., 2007. Türkiye’de Su Potansiyeli ve Atık suların Geri Kullanımı. TMMOB 2. Su Politikaları Kongresi, Ankara.
- Atta, M., Zehra, S., Dai, D., Ali, H., Naveed, K., Ali, I., Sarwar, M., Ali, B., Iqbal, R., Bawazeer, S., Abdel-Hameed, U., Ali, I., 2023. Amassing of heavy metals in soils, vegetables and crop plants irrigated with wastewater: Health risk assessment of heavy metals in Dera Ghazi Khan, Punjab, Pakistan. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1080635>.
- Aytemiz, L., Kodaman, T., 2006. Sınırtaşan Sular Kullanımı ve Türkiye-Suriye ilişkileri. TBMM Su Politikaları Kongresi Bildiriler Kitabı, Mart 2006, 527-536.
- Belmonte, M., Hsieh, C.F., Figueroa, C., Campos, J.L., Vidal, G., 2011. Effect of Free Ammonia Nitrogen on the Methanogenic Activity of Swine wastewater. *Electronic Journal of Biotechnology*, 14(3), 4s.
- Biswas, S. K. and Mojid, M. A., 2018. Changes in soil properties in response to irrigation of potato by urban wastewater. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(7), 828-839.
- Blais, J. F., Djedidi, Z., Cheikh, R. B., Tyagi, R. D., Mercier, G., 2008. Metals precipitation from effluents: Review. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 12(3), 135-149. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-025X\(2008\)12:3\(135\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-025X(2008)12:3(135))
- Bodur, B.; Kılıç, M. D.; Yayla, M.; Mercan, S.; 2020; İstanbul’daki otoyol kenarı toprak örneklerinin ağır metal konsantrasyonlarının ve jeo-birikim indeksinin değerlendirmesi. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*, 11(1), 1-13.
- Boutraa, T. and Sanders, F. E., 2001. Influence of water stress on grain yield and vegetative growth of two cultivars of bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 187, 251-257.
- Broughton, W. J., Hernandez, G., Blair, M. W., Beebe, S. E., Gepts, P. and Vanderleyden, J., 2003. Beans (*Phaseolus* spp.) model food legumes. *Plant Soil*, 252, 55–128.
- Brown, C., Wilson, A. and Harris, P., 2019. Soil amendments and their contribution to heavy metal pollution. *Environmental Toxicology Review*, 12(2), 75-89. <https://doi.org/10.1016/j.etoxrev.2019.02.006>.
- Burt, C., Styles, D. and Hansen, T., 2014. Efficient Water Management in Irrigated Agriculture. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(6), 04014033. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000789](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000789).
- Cakmakci, T. and Sahin, U., 2021. Improving silage maize productivity using recycled wastewater under different irrigation methods. *Agricultural Water Management*, 255, 107051.
- Carrow, R. N. and Duncan, R. R., 2000. Wastewater and Seawater use for Turf grasses: Potential Problems and Solutions. *Irrigation Association of Australia 2000 Conference Proceeding*, 23–25 May 2000, Melbourne, 678–683.

- Chen, H., Teng, Y., Lu, S., Wang, Y., Wu, J., Wang, J., 2016. Source apportionment and health risk assessment of trace metals in surface soils of Beijing metropolitan, China. *Chemosphere*, 144, 1002–1011. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.09.081>.
- Chung, B., Song, C., Park, B., Cho, J., 2011. Heavy Metals in Brown Rice (*Oryza sativa* L.) and Soil After Long-Term Irrigation of Wastewater Discharged from Domestic Sewage Treatment Plants. *Pedosphere*, 21, 621-627. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(11\)60164-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60164-1).
- Clemens, S., Aarts, M.G., Thomine, S., Verbruggen, N., 2013. Plant science: the key to preventing slow cadmium poisoning. *Trends in Plant Science*, 18(2), 92-99. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.08.003>.
- Cooper, A. M., 2018. Understanding Plant Signaling Response to and Accumulation of Heavy Metals and Arsenic. <https://escholarship.org/uc/item/54q841gc>.
- Çetin, Ö., Eylen, M., Üzen, N., 2008. İklim Değişikliğine Karşı GAP Bölgesinde Etkin Sulama Stratejileri. *TMMOB İklim Değişimi Sempozyumu*, 264-281, 13-14 Mart, Ankara.
- de Almeida Costa, G. E., da Silva Queiroz-Monici, K., Reis, S. M. P. M., de Oliveira, A. C., 2006. Chemical composition, dietary fibre and resistant starch contents of raw and cooked pea, common bean, chickpea and lentil legumes. *Food Chemistry*, 94(3), 327-330.
- De Luque, J., Rodríguez, J., Bernardo, C., 2014. Major constraints and trends for common bean production and commercialization; establishing priorities for future research. *Agron. Colomb.*, 32, 423–431.
- Demir, A. D., ve Şahin, U., 2017. Arıtılmış atık su kullanılarak yapılan farklı sulama uygulamalarının domates verimi, kalitesi, su verimliliği ve toprak ve meyve mineral içerikleri üzerindeki etkileri. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 24856-24879. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0139-3>
- Ding, G. K. C. and Ghosh, S., 2017. Sustainable water management—A strategy for maintaining future water resources. In *Encyclopedia of Sustainable Technologies* (pp. 91-103). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10171-X>
- Dinis, M. D. and Fiuza, A., 2010. Environmental exposure assessments of heavy metals: Measures to eliminate or reduce exposure to critical receptors. *NATO Advanced Research Workshop on Environmental Heavy Metal Pollution and Its Effects on the Mental Development of Children*, 1, 27-50.
- Duncan, D. B., 1955. Multiple range and multiple F tests. *Biometrics*, 11(1), 1-42. <https://doi.org/10.2307/2527796>
- Ekici, M., 2024. Bitkisel üretimde arıtılmış atık su kullanımının çiftçi bakış açısıyla değerlendirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye.
- Elela, A., Farrag, K., El-Behairy, U., Abou-Hadid, A., 2021. Accumulation and Risk Assessment of Heavy Metals in Vegetables Irrigated with Wastewater in Giza Governorate, Egypt. *Arab Universities Journal of Agricultural Sciences*. <https://doi.org/10.21608/AJS.2021.68206.1350>.
- Elgallal, M., Fletcher, L., Evans, B., 2016. Assessment of potential risks associated with chemicals in wastewater used for irrigation in arid and semiarid zones: a review. *Agric. Water Manag.*, 177, 419–431.

- El-Ouahmani, N., Chahouri, A., Zekhnini, A., Azim, K., Choukr-Allah, R., Yacoubi, B., 2024. Effects of irrigation with municipal treated wastewater on soils heavy metals accumulation and turf leaves under drip and sprinkler systems (Case study: Agadir, Southern Morocco). *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 10(3). <https://doi.org/10.30486/ijrowa.2021.1901411.1085>.
- Er, H., 2024. Farklı sulama suyu kalitesi ve kısıtlı sulama koşullarında bitki büyümesini teşvik eden bakteri (PGPB) uygulamalarının aspir bitkisinin (*Carthamus tinctorius* L.) su kullanım etkinliği, verim ve kalite parametreleri üzerine etkisi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi.
- Feder, F., 2021. Irrigation with treated wastewater in humid regions: Effects on Nitisols, sugarcane yield and quality. *Agricultural Water Management*, 247, 106733.
- Fereres, E., and Connor, D.J., 2004. Sustainable water management in agriculture. In: Cabrera, E., and Cobach, R. (eds.) *Challenges of the new water policies for the XXI century*, Lisse, The Netherlands: AA Balkema, 157-170.
- Field, A., 2013. *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics* (4th Edition). SAGE Publications.
- Fu, P.; Clanton, C.; Demuth, K.; Goodman, V.; Griffith, L.; Khim-Young, M.; Maddalena, J.; LaMarca, K.; Wright, L.; Schurman, D.; Kellner, J., 2024. Accurate Quantification of 0-30 cm Soil Organic Carbon in Croplands over the Continental United States Using Machine Learning. *Remote. Sens.*, 16, 2217. <https://doi.org/10.3390/rs16122217>.
- Gilbert-Diamond, D., Cottingham, K.L., Gruber, J.F., Punshon, T., Sayarath, V., Gandolfi, A.J., Baker, E.R., Jackson, B.P., Folt, C.L., Karagas, M.R., 2011. Rice consumption contributes to arsenic exposure in US women. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 108(51), 20656-20660. <https://doi.org/10.1073/pnas.1109127108>.
- Gu, X., Xiao, Y., Yin, S., Liu, H., Men, B., Hao, Z., Qian, P., Yan, H., Hao, Q., Niu, Y., et al. 2019. Impact of long-term reclaimed water irrigation on the distribution of potentially toxic elements in soil: An in-situ experiment study in the North China Plain. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(4), 649. <https://doi.org/10.3390/ijerph16040649>
- Gutierrez, R., and Montalla, V., 2020. Environmental and Microbiological Assessment of Small-Scale Vegetable Farming Systems Irrigated With Wastewater from Upper Balili River, La Trinidad Benguet, Philippines. In: *Wastewater Treatment and Reuse: Past, Present, and Future*, 1-15. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45263-6_1.
- Hirich, R. A., and Choukr-Allah, R., 2014. Faba bean (*Vicia faba* L.) production under deficit irrigation with treated wastewater applied during vegetative stage. *Desalination and Water Treatment*, 52(10-12), 2214-2219.
- Hou, S., Yuan, L., Jin, P., Ding, B., Qin, N., Li, L., Liu, X., Wu, Z., Zhao, G., Deng, Y., 2013. A clinical study of the effects of lead poisoning on the intelligence and neurobehavioral abilities of children. *Theor Biol Med Model*, <https://doi.org/10.1186/1742-4682-10-13>.
- Hussain, A., Priyadarshi, M., Dubey, S., 2019. Experimental study on accumulation of heavy metals in vegetables irrigated with treated wastewater. *Applied Water Science*, 9, 1-11.
- Hussain, M. I., and Qureshi, A., 2020. Health risks of heavy metal exposure and microbial contamination through consumption of vegetables irrigated with treated wastewater at

- Dubai, UAE. Environmental Science and Pollution Research, 27, 11213–11226. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07522-8>
- Iyama, W. A., Okpara, K., Techato, K., 2021. Assessment of heavy metals in agricultural soils and plant (*Vernonia amygdalina delile*) in Port Harcourt metropolis, Nigeria. Agriculture, 12(1), 27.
- Jarup, L., 2003. Hazards of heavy metal contamination. British Medical Bulletin, 68, 167-182.
- Jones, R. and Lee, K., 2020. The role of agricultural runoff in heavy metal accumulation in water bodies. Journal of Environmental Science, 38(7), 1123-1135. <https://doi.org/10.1016/j.jesci.2020.04.015>.
- Kama, R., Liu, Y., Song, J., Hamani, A., Zhao, S., Li, S., Diatta, S., Yang, F., Li, Z., 2023. Treated Livestock Wastewater Irrigation Is Safe for Maize (*Zea mays*) and Soybean (*Glycine max*) Intercropping System Considering Heavy Metals Migration in Soil–Plant System. International Journal of Environmental Research and Public Health, 20. <https://doi.org/10.3390/ijerph20043345>.
- Karavidas, I., Ntatsi, G., Vougeleka, V., Karkanis, A., Ntanasi, T., Saitanis, C., Agathokleous, E., Ropokis, A., Sabatino, L., Tran, F., et al. 2022. Agronomic practices to increase the yield and quality of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.): A systematic review. Agronomy, 12(2), 271. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020271>
- Kazlı, A., 2005. Tam ve Yarı Islatmalı Damla Sulamanın Fasulye (*Phaseolus vulgaris* L.)'nin verimi ve bitki gelişimi üzerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Khan, Z. I.; Safdar, H.; Ahmad, K.; Wajid, K.; 2019; Health risk assessment through determining bioaccumulation of iron in forages grown in soil irrigated with city effluent. Environmental Science and Pollution Research, 26(14), 14277-14286.
- Khaskhoussy, K., Kahlaoui, B., Misle, E., Hachicha, M., 2022. Impact of irrigation with treated wastewater on physical-chemical properties of two soil types and corn plant (*Zea mays*). Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 22(2), 1377-1393.
- Kıymaz, S., Kuşlu, Y., Büyükcangaz, H., 2020. The effects of water deficit on concentration of macro and micronutrients of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars. Fresenius Environmental Bulletin, 29(7), 4944-4953.
- Kiziloglu, F.M., Turan, M., Sahin, U., Angin, I., Anapali, O., Okuroglu, M., 2007. Effects of wastewater irrigation on soil and cabbage-plant (*Brassica oleracea* var. capitata cv. yalova-1) chemical properties. J. Plant Nutr. Soil Sci., 170, 166-172.
- Kuehl, R. O., 2000. Designs of experiments: Statistical principles of research design and analysis (2nd ed.). Duxbury Press.
- Lente, I., Ofosu-Anim, J., Brimah, A. K., Atiemo, S., 2014. Heavy metal pollution of vegetable crops irrigated with wastewater in Accra, Ghana. West African Journal of Applied Ecology, 22(1), 41-58.
- Li, S., Siz, S., Şarkı, Z., Zhang, L., Liu, Y., 2021. Impacts of Climate and Environmental Change on Bean Cultivation in China. Atmosphere, 12(12), 1591. <https://doi.org/10.3390/atmos12121591>.
- Ma, S.C., Zhang, H.B., Ma, S.T., Wang, R., Wang, G.X., Shao, Y., Li, C.X., 2015. Effects of mine wastewater irrigation on activities of soil enzymes and physiological properties, heavy metal uptake and grain yield in winter wheat. Ecotoxicology and Environmental Safety, 113, 483-490.

- Manas, P., Castro, E., de las Heras, J., 2009. Irrigation with treated wastewater: effects on soil, lettuce (*Lactuca sativa* L.) crop and dynamics of microorganisms. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 44(12), 1261-1273.
- Mao, C., Song, Y., Chen, L., Ji, J., Li, J., Yuan, X., Yang, Z., Ayoko, G. A., Frost, R. L., Theiss, F., 2019. Human health risks of heavy metals in paddy rice based on transfer characteristics of heavy metals from soil to rice. *Catena*, 175, 339–348. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.029>.
- Mao, X., Güneş, J., Şağile, H., Jiang, X., Yu, H., Zhai, S., Hamoud, Y.A., 2023. Environmental Assessment of Soils and Crops Based on Heavy Metal Risk Analysis in Southeastern China. *Agronomy*, 13, 1107. <https://doi.org/10.3390/agronomy13041107>.
- Marzouk, N. M., RE, A., Salman, S., El Baky, M. A., 2016. Effect of Water Stress on Yield and Quality Traits of Different Snap Bean Varieties Grown in an Arid Environment. *Middle East J*, 5(4), 629-635.
- Monisha, J., Tenzin, T., Naresh, A., Blessy, B. M., Krishnamurthy, N. B., 2014. Toxicity, mechanisms, and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 7(2), 60-72.
- Montgomery, D.C., 2017. *Design and Analysis of Experiments* Arisona, State University. Ninth Edition, John Wiley & Sons, New York, 640 p.
- Mukherjee, I., Singh, B., Singh, R. P., Kumari, D., Jha, P. K., Mehta, P., 2020. Characterization of heavy metal contamination and assessment of ecological and human health risks in an anthropogenically and geologically impacted semi-arid region of Eastern India. *Total Environmental Science*, 705, Article 135801.
- Munoz-Perea, C. G., Allen, R. G., Westermann, D. T., Wright, J. L., Singh, S. P., 2007. Water use efficiency among dry bean landraces and cultivars in drought-stressed and non-stressed environments. *Euphytica*, 155(3), 393-402.
- Myers, J.R., Kmiecik, K., 2017. Common Bean: Economic Importance and Relevance to Biological Science Research. In: Pérez de la Vega, M., Santalla, M., Marsolais, F. (eds) *The Common Bean Genome. Compendium of Plant Genomes*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63526-2_1
- Nawaz, H., Anwar-ul-Haq, M., Akhtar, J., Arfan, M. (2021). Cadmium, chromium, nickel and nitrate accumulation in wheat (*Triticum aestivum* L.) using wastewater irrigation and health risks assessment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208, 111685. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111685>.
- Nde, S.C., Modiselle, E., Nabulo, G., Chirwa, E. M. N., 2021. Modelling the dynamics of the cancer risk due to potentially toxic elements in agricultural soils, in the upper Crocodile River catchment, North-West province, South Africa. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 211, 111961. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111961>.
- Onder, S., Bozkurt, S., Sayilkan, G., Onder, D., Kara, M., 2006. Effects of water stress and mulch on green bean yield and yield components in greenhouse condition. *Asian Journal of Plant Sciences*, 5(1), 127-132.
- Osman, Y., Al-Assaf, A., Tadros, M., Albalawneh, A., 2021. Atık Su ile Sulanan Toprak ve Gıda Ürünlerinde Ağır Metal ve Mikrop Birikimi ve Potansiyel İnsan Sağlığı Riski: Bir Meta Veri Analizi. Su, <https://doi.org/10.3390/w13233405>.

- Özdemir, G. ve Yapar, S., 2009. Bakırın adsorpsiyon ve desorpsiyon davranışı Namontmorillonit üzerindeki iyonlar: Ramnolipidlerin ve pH'ın etkisi. *Tehlikeli Maddeler Dergisi*, 166, 1307–1313.
- Parez, N.A., 2017. Bingöl ili İ.S.-Türkiye’de atık suların Çapakçur Nehri ve çevresindeki toprak üzerindeki etkisi.
- Parwin, R., and Paul, K. K., 2020. Assessment of kitchen wastewater quality for irrigation. *Applied Water Science*, 10(240). <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01278-0>.
- Qureshi, A., Hussain, I., İsmail, S., Khan, Q., 2016. Evaluating heavy metal accumulation and potential health risks in vegetables irrigated with treated wastewater. *Chemosphere*, 163, 54-61. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.07.073>.
- Reda, M., El-Sayed, A. E. K., Almutairi, A., 2020. Fatty Acid Profiles and Fuel Properties of Oils from Castor Oil Plants Irrigated by Microalga-treated Wastewater. *Egyptian Journal of Botany*, 60(3), 797-804.
- Reddy, S. and Nayak, P., 2018. Crop production with limited irrigation: A review. *Agricultural Reviews*, 39, 12-21. <https://doi.org/10.18805/AG.R-1680>.
- Sa’idi, M., 2010. Experimental studies on the effect of heavy metal presence in industrial wastewater on biological treatment. *International Journal of Environmental Sciences*, 1(4), 666.
- Saleh, S., Liu, G., Liu, M., Ji, Y., He, H., Gruda, N., 2018. Effect of Irrigation on Growth, Yield, and Chemical Composition of Two Green Bean Cultivars. *Horticulturae*, 4(1), 3.
- Samarah, N.H., Bashabsheh, K.Y., Mazahrih, N.T., 2020. Treated wastewater outperformed freshwater for barley irrigation in arid lands. *Italian Journal of Agronomy*, 15(3), 1610, ISSN 1125-4718.
- Sezen, S. M., Yazar, A., Akyildiz, A., Dasgan, H. Y., Gencel, B., 2008. Yield and Quality Response of Drip Irrigated Green Beans Under Full and Deficit Irrigation. *Scientia Horticulturae*, 117(2), 95-102.
- Shodikin, M., Sutejo, I., Agustina, D., Raharjo, A., Kumudhaningsih, A., 2022. Bacterial Contamination of Escherichia Coli in Long Beans at Traditional Markets. *Jurnal Kesehatan Prima*, 16(1), 10-17. <https://doi.org/10.32807/jkp.v16i1.706>.
- Silva, J. R. M., De Oliveira Celeri, M., Borges, A. C., Fernandes, R. B. A., 2023. Greywater as a Water Resource in Agriculture: The Acceptance and Perception from Brazilian Agricultural Technicians. *Agricultural Water Management*, 280, 108227. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108227>.
- Singh, S. P., 2001. *Common Bean Improvement in the Twenty-First Century*. Springer Science and Business Media.
- Smith, J., Johnson, M., Taylor, L., 2018. Heavy Metal Contamination in Aquatic Environments: Sources and Impacts. *Environmental Pollution Journal*, 45(3), 234-245. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.05.023>.
- Somasani, S. L., 2012. Removal of heavy metals from drinking water by adsorption onto limestone with a focus on copper and aluminum applications. *Masters Theses & Specialist Projects*, Western Kentucky University.

- Sun, H., Brocato, J., Costa, M., 2015. Oral Krom Maruziyeti ve Toksisite. *Current Environmental Health Reports*, 2, 295–303. <https://doi.org/10.1007/s40572-015-0054-z>.
- Taha, N. M. and Hashem, F. A., 2019. Reducing Water Stress in Green Bean Using Glycinebetaine Application. *Middle East Journal of Applied Sciences*, 9(1), 252-266.
- Tahir, S., Gül, S., Aslam Ghorı, S., Sohail, M., Batool, S., Jamil, N., Naeem Shahwani, M., ve Butt, M. U. R., 2018. Biochar, atık su sulama altında ıspanakta büyüme performansını ve ağır metal birikimini etkiler. *İnandırıcı gıda tarımı*, 4(1), 1467253-1467261.
- Taner, O., Kayış, A. F., Yalçınkaya, Ö., 2021. Atık Sularda ICP-MS Cihazı ile Cıva Tayini ve Geçerli Kılınması. 21. Yüzyılda Fen ve Teknik / Science and Technique in the 21st Century, 7(12), Yaz/Summer.
- Tariq, F., 2021. Heavy Metals Concentration in Vegetables Irrigated with Municipal Wastewater and Their Human Daily Intake in Erbil City. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 100475. <https://doi.org/10.1016/J.ENMM.2021.100475>.
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., Sutton, D. J., 2012. Ağır Metal Toksisitesi ve Çevre. *Deneysel Ekotoksikoloji*, 101, 133–164. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6.
- Tong, F., Huang, Q., Liu, L., Fan, G., Shi, G., Lu, X., Gao, Y., 2023. Interactive effects of inorganic-organic compounds on passivation of cadmium in weakly alkaline soil. *Agronomy-Basel*, 13(10), 2647. <https://doi.org/10.3390/agronomy13102647>
- Tripathi, V. K., Rajput, T. B. S., Patel, N., 2016. Biometric Properties and Selected Chemical Concentration of Cauliflower Influenced by Wastewater Applied Through Surface and Subsurface Drip Irrigation System. *Journal of Cleaner Production*, 139, 396-406.
- Tripathi, V., Rajput, T., Patel, N., Nain, L., 2019. Impact of Municipal Wastewater Reuse Through Micro-Irrigation System on the Incidence of Coliforms in Selected Vegetable Crops. *Journal of Environmental Management*, 251, 109532. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109532>.
- Tunc, T. ve Sahin, U., 2015. The Changes in the Physical and Hydraulic Properties of a Loamy Soil Under Irrigation with Simpler-Reclaimed Wastewaters. *Agricultural Water Management*, 158, 213-224.
- Tunc, T. ve Sahin, U., 2017. Yield and Heavy Metal Content of Wastewater-Irrigated Cauliflower and Soil Chemical Properties. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(10), 1194-1211.
- Umar, M. F., Rafatullah, M., Abbas, S. Z., Ibrahim, M. N. M., Ismail, N., 2021. Enhanced benzene bioremediation and power generation by double chamber benthic microbial fuel cells fed with sugarcane waste as a substrate. *Journal of Cleaner Production*, 310, Article 125783. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125783>
- Vergine, P., Saliba, R., Salerno, C., Laera, G., Berardi, G., Pollice, A., 2015. Fate of the fecal indicator *Escherichia coli* in irrigation with partially treated wastewater. *Water Research*, 85, 66-73.
- Verholiuk, S., 2023. Features Of Growing Vegetable Beans In The Open Ground. *Agriculture and Forestry*. <https://doi.org/10.37128/2707-5826-2023-3-18>.
- WWAP, 2018. WWAP. UN-Water. The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions for Water. UNESCO, Paris, 1-139.

- Yazdani, A. A., Saffari, M., Ranjbar, G. H., 2018. Application of Treated Wastewater on Yield and Heavy Metals Content of Seeds in Sunflower Cultivars. *Australian Journal of Crop Science*, 12(5), 731-737.
- Yazdani, A. A., Saffari, M., Ranjbar, G., 2019. Effect of Application of Treated Wastewater on Seed Yield and Heavy Metals Content of Safflower Cultivars. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 21(5), 1277-1286.
- Zar, J. H., 2010. *Biostatistical Analysis* (5th ed.). Prentice-Hall/Pearson, Upper Saddle River, xiii, 944 p.
- Zheng, X., Lin, H., Du, D., Li, G., Alam, O., Cheng, Z., Liu, X., Jiang, S., Li, J., 2024. Remediation of heavy metals polluted soil environment: A critical review on biological approaches. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 284, Article 116883. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116883>



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Muhammet Gökhan GÜRBULAK
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Erzurum Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği (2017)
Yüksek lisans:	
Doktora:	
Yabancı Dil Bilgisi	
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	