



**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**SIZINTI SULARINDAN GÜBRE FORMUNDA AZOT GERİ
KAZANIMI VE TARIMSAL POTANSİYELİNİN
İNCELENMESİ**

Doktora Tezi

Ömer YENİ

Danışman
Prof. Dr. Ayşe KULEYİN

SAMSUN
2025

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**SIZINTI SULARINDAN GÜBRE FORMUNDA AZOT GERİ
KAZANIMI VE TARIMSAL POTANSİYELİNİN
İNCELENMESİ**

Doktora Tezi

Ömer YENİ

Danışman

Prof. Dr. Ayşe KULEYİN

Bu çalışmanın bir bölümü Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından
PYO.MUH.1908.22.035 proje numarası ile desteklenmiştir.

SAMSUN
2025

TEZ KABUL VE ONAYI

Ömer YENİ tarafından, **Prof. Dr. Ayşe KULEYİN** danışmanlığında hazırlanan **“SIZINTI SULARINDAN GÜBRE FORMUNDA AZOT GERİ KAZANIMI VE TARIMSAL POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ”** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 31.07.2025 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	Sonuç
Başkan	Prof. Dr. Ayşe KULEYİN Ondokuz Mayıs Üniversitesi Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Prof. Dr. Feryal AKBAL Ondokuz Mayıs Üniversitesi Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Prof. Dr. Coşkun GÜLSER Ondokuz Mayıs Üniversitesi Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Prof. Dr. Melayib BİLGİN Aksaray Üniversitesi Toprak Kirliliği ve Katı Atık Uzaklaştırma Teknolojisi Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Prof. Dr. Fulya Aydın TEMEL Giresun Üniversitesi Çevre Teknolojileri Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

Prof. Dr. Faik Ahmet SESLİ
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Doktora tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi ?

Evet ☐ (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır ☒

25 /08 / 2025
Ömer YENİ

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı : SIZINTI SULARINDAN GÜBRE FORMUNDA AZOT GERİ KAZANIMI VE TARIMSAL POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 25.08.2025 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 5

Tek kaynak oranı : % 1 çıkmıştır.

25 /08 / 2025
Prof. Dr. Ayşe KULEYİN

ÖZET

SIZINTI SULARINDAN GÜBRE FORMUNDA AZOT GERİ KAZANIMI VE TARIMSAL POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ

Ömer YENİ

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Doktora, Ağustos/2025

Danışman: Prof. Dr. Ayşe KULEYİN

Bu çalışmada, Samsun Büyükşehir Belediyesi Katı Atık Düzenli Depolama Sahası'ndan elde edilen sızıntı suyunda bulunan amonyum azotunun ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) geri kazanımı hedeflenmiş ve bu amaçla struvit ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ve amonyum sülfat (AS) formunda iki farklı azotlu gübre elde edilmiştir. Amonyum azotunun geri kazanılması ile elde edilen bu gübrelere struvitin sera koşullarında ıspanak (*Spinacia oleracea L.*) bitkisi üzerindeki etkileri araştırılmış; bu gübrenin performansı ticari Mono Amonyum Fosfat (MAP) gübresi ile karşılaştırılmıştır.

AS çöktürme deneylerinde, %3 H_2SO_4 ilavesiyle %79,31 oranında $\text{NH}_4^+\text{-N}$ geri kazanımı elde edilmiş; düşük pH ($\approx 1,5$) ve 10 dakikalık temas süresinin verim üzerinde önemli rol oynadığı belirlenmiştir. Struvit çöktürmesinde 4:1:2,5 ($\text{Mg}^{2+}:\text{NH}_4^+:\text{PO}_4^{3-}$) molar oranı ile %89'a varan geri kazanım sağlanmıştır.

Struvit gübresinin ıspanak (*Spinacia oleracea L.*) bitkisi üzerinde etkisinin incelendiği çalışmada deneysel uygulamaların başlamasından gübreleme tarihine kadar geçen 24 gün boyunca bitkilerin gelişimi izlenmiş, ardından 40 günlük gübreleme süreci yürütülmüştür. Deneme kapsamında biri gübresiz kontrol grubu olmak üzere toplam dört uygulama grubu oluşturulmuş; diğer gruplara sırasıyla 5, 10 ve 15 kg N/da düzeylerinde azot olacak şekilde gübre uygulanmıştır. Deneme süresi boyunca bitki gelişimi, su tüketimi ve sulama düzenli olarak takip edilmiş; deneme sonunda bitki ve toprak örneklerinde makro besin elementleri (N, P, K, Mg, Ca, Fe) ve ağır metaller (Cd, Co, Cr, Ni, Pb, Zn, Cu) analiz edilmiştir.

Sera deneme sonuçlarına göre, 5 kg N/da struvit ve 10 kg N/da MAP uygulamaları bitki morfolojisi açısından en yüksek verimi sağlamıştır. Struvit, Mg ve Fe alımında; MAP ise P ve Ca alımında daha etkili bulunmuştur. Her iki gübre, Cd, Pb, Cr ve Ni gibi toksik metallerin bitkideki birikimini azaltmış ve su kullanım verimliliğini artırmıştır.

Toprak analizlerinde, P, Fe, Mg gibi elementlerde artış gözlenirken, K içeriğinde azalma ve bazı ağır metallerde hafif yükselme tespit edilmiştir. Sonuçlar, geri kazanılmış gübrelere sürdürülebilir tarım ve döngüsel ekonomi açısından güçlü bir alternatif oluşturduğunu ortaya koymuştur.

Anahtar Sözcükler: Sızıntı suyu, Azot geri kazanımı, Struvit, Amonyum sülfat

ABSTRACT

RECOVERY OF NITROGEN FROM LEACHATE IN FERTILIZER FORM AND EVALUATION OF ITS AGRICULTURAL POTENTIAL

Ömer YENİ

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Environmental Engineer

Ph.D., August/2025

Supervisor: Prof. Dr. Ayşe KULEYİN

This study aimed to recover ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) from leachate obtained from the Samsun Metropolitan Municipality Solid Waste Regular Landfill. Two different nitrogen fertilizers were produced: struvite ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}$) and ammonium sulfate (AS). The effects of struvite, obtained by recovering ammonium nitrogen, on spinach (*Spinacia oleracea* L.) under greenhouse conditions were investigated, and the performance of this fertilizer was compared with that of commercial Mono Ammonium Phosphate (MAP) fertilizer.

In AS precipitation experiments, 79,31% $\text{NH}_4^+\text{-N}$ recovery was achieved with the addition of 3% H_2SO_4 . It was determined that low pH (≈ 1.5) and a 10-minute contact time played an important role in yield. Up to 89% recovery was achieved with a molar ratio of 4:1:2,5 ($\text{Mg}^{2+}:\text{NH}_4^+:\text{PO}_4^{3-}$) in struvite precipitation.

In a study examining the effects of struvite fertilizer on spinach (*Spinacia oleracea* L.), plant development was monitored for 24 days from the start of experimental treatments until fertilization, followed by a 40 day fertilization period. A total of four treatment groups were formed within the trial, one of which was a no-fertilizer control group. The other groups received nitrogen fertilizer at levels of 5, 10, and 15 kg N/da, respectively. Plant development, water consumption, and irrigation were regularly monitored throughout the trial. At the end of the trial, plant and soil samples were analyzed for macronutrients (N, P, K, Mg, Ca, Fe) and heavy metals (Cd, Co, Cr, Ni, Pb, Zn, Cu).

According to greenhouse trial results, 5 kg N/da struvite and 10 kg N/da MAP applications provided the highest yields in terms of plant morphology. Struvite was found to be more effective in Mg and Fe uptake, while MAP was found to be more effective in P and Ca uptake. Both fertilizers reduced plant accumulation of toxic metals such as Cd, Pb, Cr, and Ni and increased water use efficiency.

Soil analyses revealed increases in elements such as P, Fe, and Mg, decreases in K content, and slight increases in some heavy metals. The results demonstrate that recycled fertilizers represent a strong alternative for sustainable agriculture and a circular economy.

Keywords: Leachate, Nitrogen recovery, Struvite, Ammonium sulfate

ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışma, sızıntı sularından gübre formunda azot geri kazanımını ve potansiyelinin incelenmesini değerlendirmek amacıyla hazırlanmıştır. Araştırma, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı bünyesinde yürütülmüş olup, bir bölümü PYO.MUH.1908.22.035 nolu Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından desteklenmiştir.

Tez çalışması on bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, çalışmanın amacı, kapsamı ve literatürdeki yeri açıklanarak araştırmanın genel çerçevesi çizilmiştir. İkinci bölümde, düzenli depolama sahalarından kaynaklanan sızıntı sularının kimyasal ve fiziksel bileşimi, kirlilik potansiyeli ve bölgesel farklılıklar değerlendirilmiştir. Üçüncü bölümde, sızıntı suyunun arıtımında döngüsel ekonomi yaklaşımıyla azot geri kazanımına odaklanılmıştır. Dördüncü bölümde, struvit çöktürme yöntemi teorik ve uygulamalı yönleriyle ele alınmıştır. Beşinci bölümde, depolama sahası sızıntı sularından besin maddelerinin geri kazanımına yönelik teknolojiler ve bu süreçlerin verimlilikleri incelenmiştir. Altıncı bölümde, struvit kullanımının çevresel ve ekonomik etkileri tartışılmıştır. Yedinci bölümde, sızıntı suyundan elde edilen struvitin kontrollü salınım özellikleri ile tarımsal uygulamalardaki performansı araştırılmıştır. Sekizinci bölümde, çalışma alanı ve kullanılan deneysel yöntemler detaylandırılarak materyal ve metot açıklanmıştır. Dokuzuncu bölümde deneysel bulgular sunulmuş ve tartışılmış; onuncu bölümde ise çalışmanın genel sonuçları ortaya konmuştur.

Doktora eğitimim süresince bilgi, deneyim ve desteğini esirgemeyen, akademik rehberliğinden her zaman büyük fayda sağladığım danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ayşe KULEYİN'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez izleme komitesinde yer alarak çalışmama değerli katkılarda bulunan sayın hocalarım Prof. Dr. Feryal AKBAL ve Prof. Dr. Coşkun GÜLSER'e de ayrıca teşekkür ederim.

Saha çalışmalarında desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve sürece katkı sağlayan, çalıştığım kurum olan Vezirköprü Belediyesi'ndeki mesai arkadaşım Ziraat Mühendisi Furkan KENANLI'ya ve değerli ekip arkadaşlarına teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında maddi ve manevi desteklerini her zaman yanımda hissettiğim, bana daima güç veren, pes etmemeyi öğreten, varlıklarıyla yaşamıma değer katan canım annem Müseppiye YENİ'ye, babam Mustafa YENİ'ye ve kardeşim Bekir YENİ'ye sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca doktora eğitimim boyunca bana destek olan tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ömer YENİ



İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	ii
TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLOLAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. DÜZENLİ DEPOLAMA SIZINTI SUYU BİLEŞİMİ ve KİRLİLİK POTANSİYELİ.....	4
2.1. Düzenli Depolama Sızıntı Suyunun Özellikleri	5
2.2. Düzenli Depolama Sızıntı Suyunun Bileşimini Etkileyen Faktörler	8
3. DÜZENLİ DEPOLAMA SIZINTI SUYUNUN ARITIMI: DÖNGÜSEL EKONOMİ YAKLAŞIMIYLA AZOT GERİ KAZANIMI.....	11
3.1. Azot Geri Kazanımında Mevcut Yöntemler ve Teknolojik Gelişmeler.....	13
3.2. İleri Teknolojilerle Atıksulardan Verimli Azot Geri Kazanımı	14
3.2.1. Sıyırma ve Adsorpsiyon.....	15
3.2.2. Struvit Çökmesi ile Atıksulardan Azot Geri Kazanımı	15
3.2.3. İyon Değişimi ve Adsorpsiyon	17
3.2.4. Membran Tabanlı Sistemler	18
4. MAGNEZYUM AMONYUM FOSFAT (STRUVİT) ÇÖKTÜRME YÖNTEMİ (MgNH ₄ PO ₄ ·6H ₂ O).....	19
4.1. Magnezyum Amonyum Fosfat Çöktürmesinin Teorik Temelleri	20
4.2. Struvit Çöktürmesine Etki Eden Faktörler	21
4.2.1. pH'nin Struvit Oluşumuna Etkisi	21
4.2.2. Magnezyum Kaynağının Struvit Oluşumuna Etkisi	22
4.2.3. Mol Oranının Struvit Oluşumuna Etkisi	25
4.2.4. İyonların Struvit Oluşumuna Etkisi	25
4.2.5. Organik Maddelerin Struvit Oluşumuna Etkisi	28
5. DEPOLAMA SAHASI SIZINTI SULARINDAN BESİN MADDELERİNİN GERİ KAZANIMI.....	30
5.1. Struvit (Magnezyum Amonyum Fosfat)	31
5.2. Amonyum Sülfat (AS)	32
6. STRUVİT KULLANIMININ ÇEVRE VE EKONOMİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ	34
7. SIZINTI SULARINDAN ELDE EDİLEN STRUVİTİN KONTROLLÜ SALINIM ÖZELLİKLERİ VE TARIMSAL UYGULAMALARDAKİ ETKİNLİĞİ.....	36
8. MATERYAL VE METOT.....	38
8.1. Atık Karakterizasyonu ve Sızıntı Suyu Oluşumu	38
8.2. Deneysel Tasarım	41
8.3. Deneysel Yöntem	42
8.3.1. Struvit Eldesi	42
8.3.2. Amonyum Sülfat Eldesi	44
8.4. Struvitin Gübre Potansiyelinin Değerlendirilmesi.....	44
8.5. Sürdürülebilir Ispanak Yetiştiriciliğinde Geri Kazanılmış Gübrelerin Kullanımı ve Toprak Fiziksel Özelliklerinin Tarımsal Verimlilik Üzerindeki Etkisi.....	46
8.5.1. Ispanak (<i>Spinacia oleracea</i> L.) Bitkisinin Tarımsal Önemi ve Geri Kazanılmış Gübrelerle Beslenme Potansiyeli.....	46
8.5.2. Toprak Fiziksel Özellikleri ve Tarımsal Verimlilik Üzerindeki Etkileri	47

8.5.3. Serada Gerçekleştirilen Tarımsal Uygulamalar ve Deneysel Düzenegın Kurulumu	48
9. BULGULAR VE TARTIşMA.....	50
9.1. Sızıntı Suyunda Sıcaklık ve Zamana Bağlı NH ₄ -N Değişimi	51
9.2. Amonyum Sülfat (AS) Oluşumunun İncelenmesi	52
9.2.1. Amonyum Sülfat (AS) Oluşumunda H ₂ SO ₄ 'ün Etkisiyle pH ve İletkenlik Değişiminin İncelenmesi.....	52
9.2.2. Amonyum Sülfat (AS) Oluşumunda Temas Süresine Bağlı Olarak NH ₄ -N Değişimi.....	56
9.2.3. Amonyum Sülfat (AS) Oluşumunda Farklı NH ₄ -N Konsantrasyonlarına Bağlı Değişiminin İncelenmesi.....	58
9.3. Struvit Oluşumunun İncelenmesi	59
9.3.1. Struvit Oluşumunda Sızıntı Suyunun Bekletilmesine Bağlı Olarak Farklı NH ₄ -N Konsantrasyonlarına Bağlı Değişiminin İncelenmesi.....	59
9.3.2. Struvitin XRD ve SEM Görüntüsünün İncelenmesi	61
9.3.3. Struvitin Farklı pH'larda Çözünürlüklerinin İncelenmesi.....	62
9.3.4. Struvit ile Ticari MAP Gübresinin Tarımsal Potansiyellerinin İncelenmesi	64
9.4. Ispanakta Uygulama Sonrası Fiziksel ve Kimyasal Parametrelerin İncelenmesi	68
9.4.1. Ispanakta Hasat Sonrası Fiziksel Gelişim Parametrelerinin Değerlendirilmesi ...	69
9.4.2. Ispanakta Hasat Sonrası Kimyasal Gelişim Parametrelerinin Değerlendirilmesi.	77
9.4.2.1. Struvit ve MAP Uygulamalarının Ispanakta Bitki Besin Elementleri Üzerindeki Etkileri.....	78
9.4.2.2. Struvit ve MAP Uygulamalarının Ispanak Bitkisinde Ağır Metal Birikimi Üzerine Etkileri	83
9.5. Ispanak Bitkisinde Su Kullanım Randımanının Belirlenmesi	91
9.6. Toprakta Hasat Sonrası Fiziksel, Kimyasal ve Ağır Metal Parametrelerinin İncelenmesi.....	92
9.6.1. Toprakta Hasat Sonrası Fiziksel ve Kimyasal Parametrelerin Değerlendirilmesi	92
9.6.2. Toprakta Hasat Sonrası Ağır Metal Parametrelerin Değerlendirilmesi	101
9.7. Struvit Çöktürme Yöntemi ile NH ₄ ⁺ -N Geri Kazanım Uygulamalarının Literatürde Yer Alan Çalışmalarla Karşılaştırılması.....	108
10.SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	110
KAYNAKLAR	113
EKLER.....	122
ÖZGEÇMİş	124

SİMGELER VE KISALTMALAR

AnMBR	: Anaerobik Membran Biyoreaktörler
AS	: Amonyum Sülfat
BOİ ₅	: Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı
Ca ²⁺	: Kalsiyum
CHO	: Asetaldehit
CO ₂	: Karbondioksit
Cu	: Bakır
EC	: Elektriksel İletkenlik
Fe	: Demir
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
H ₂ O	: Su
H ₂ SO ₄	: Sülfürik Asit
HCl	: Hidroklorik Asit
HNO ₃	: Nitrik asit
K ⁺	: Potasyum
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
LCA	: Yaşam Döngüsü Analizi
MAP	: Magnezyum Amonyum Fosfor
Mg ²⁺	: Magnezyum
MgCl ₂	: Magnezyum Klorür
MgO	: Magnezyum Oksit
MKP	: Magnezyum Potasyum Fosfat
N	: Azot
N ₂ O	: Azot Oksit
NH ₃ -N	: Amonyak Azotu
NH ₄ ⁺ -N	: Amonyum Azotu
OPE	: Organofosfat Esterleri
P	: Fosfor
Pb	: Kurşun
PFAS	: Polifloroalkil
PO ₄ ³⁻ -P	: Toplam Fosfor

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu
TEM : Geçirimli Elektron Mikroskobu
XPS : X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi
Zn : Çinko



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 4.1. Besin elementlerinin çıkarımından kullanımına ve emisyonuna kadar olan döngüsünü gösteren şematik gösterim.....	19
Şekil 4.2. Struvitin kristal yapısı.....	20
Şekil 4.3. Ağır metal iyonlarının struvit kristalizasyonu üzerindeki etkisi. (a) Ağır metal iyonları ile struvit arasındaki potansiyel etkileşim mekanizmaları. Burada M1, M2 ve M3 çeşitli ağır metal iyonlarını temsil etmektedir. (b) Ağır metal iyonlarının struvit kristallerinin yüzeyine adsorpsiyonuna ilişkin olası mekanizma.....	27
Şekil 5.1. Amonyum sülfatın kristal yapısı	33
Şekil 8.1. Samsun Büyükşehir Belediyesi 2023 yılı atık karakterizasyonu.....	39
Şekil 8.2. Samsun Büyükşehir Belediyesi Katı Atık Düzenli Depolama Sahası sızıntı suyu toplama	41
Şekil 8.3. Deneysel uygulamalarda çöktürme işlemlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla kullanılan karıştırma ünitesi.....	42
Şekil 8.4. Struvit oluşumunda uygulanan akış diyagramı.	43
Şekil 8.5. Laboratuvar ortamında elde edilen amonyum sülfat çökeltisi.....	44
Şekil 8.6. Deneysel çalışmalarında kullanılan toprak ve ıspanak (<i>Spinacia oleracea</i> L.) tohumu	46
Şekil 8.7. Bitki deney düzeneklerinin hazırlanması.....	48
Şekil 9.1. Ham sızıntı suyunun 4°C ve 20 °C’de sıcaklık ve zamana bağlı değişimi	51
Şekil 9.2. Eklenen H ₂ SO ₄ miktarına bağlı olarak NH ₄ -N geri kazanım verimi	53
Şekil 9.3. Çözeltilerin pH değerine bağlı olarak NH ₄ -N geri kazanım verimi.....	54
Şekil 9.4. Eklenen H ₂ SO ₄ miktarına bağlı olarak ilk ve çıkış iletkenlik değerleri	55
Şekil 9.5. Eklenen H ₂ SO ₄ miktarına bağlı olarak giriş ve çıkış pH değerleri.....	55
Şekil 9.6. Temas süresine bağlı NH ₄ -N değişimi.....	57
Şekil 9.7. AS Oluşumunda Ham sızıntı suyunun farklı konsantrasyonlardaki NH ₄ -N ile değişimi	58
Şekil 9.8. Ham sızıntı suyunun bekletilmeye bağlı olarak farklı konsantrasyonlardaki NH ₄ -N değişimine bağlı geri kazanım verimleri.....	60
Şekil 9.9. Laboratuvar ortamında elde edilen struvit çökeltisi	61
Şekil 9.10. Sızıntı suyunda MAP çöktürme yöntemi kullanılarak optimum şartlarda çekilen XRD grafiği.	61
Şekil 9.11. Sızıntı suyunda MAP çöktürme yöntemi kullanılarak optimum şartlarda çekilen SEM görüntüsü ve EDX grafiği.	62
Şekil 9.12. Ham sızıntı suyundan elde edilen struvitin farklı pH’larda çözünürlük değişim .	63
Şekil 9.13. Uygulamanın 0. günü.....	64
Şekil 9.14. Uygulamanın 5. günü.....	65
Şekil 9.15. Uygulamanın 11. günü.....	65
Şekil 9.16. Uygulamanın 15. günü.....	66
Şekil 9.17. Struvit uygulaması yapılan bitkideki gelişim süreci (15.gün)	66
Şekil 9.18. Uygulamanın 21. günü.....	67
Şekil 9.19. Gübre uygulamaları ve bitki süreci 21. Gün	67
Şekil 9.20. Uygulamanın 29. günü.....	68
Şekil 9.21. Uygulamanın 40. günü.....	68
Şekil 9.22. Struvit ve MAP uygulamalarındaki bitki ağırlığının karşılaştırmaları	70
Şekil 9.23. Struvit ve MAP uygulamalarındaki bitki ayası karşılaştırmaları.....	71
Şekil 9.24. Struvit ve MAP uygulamalarındaki bitki boyu uzunluğu karşılaştırmaları.....	72
Şekil 9.25. Struvit ve MAP uygulamalarındaki yaprak sayısı karşılaştırmaları	73
Şekil 9.26. Struvit ve MAP uygulamalarındaki kök uzunluğu karşılaştırmaları	74
Şekil 9.27. Struvit ve MAP uygulamalarındaki gövde kalınlığı karşılaştırmaları	75
Şekil 9.28. Struvit ve MAP uygulamalarındaki bitki büyüme hızı karşılaştırmaları	76

Şekil 9.29. Struvit ve MAP uygulamalarındaki yaprak ayası karşılaştırmaları	77
Şekil 9.30. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası %N değişim sonuçları	79
Şekil 9.31. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası P (mg/kg) değişim sonuçları	79
Şekil 9.32. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Mg (mg/kg) değişim sonuçları	80
Şekil 9.33. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Fe (mg/kg) değişim sonuçları	81
Şekil 9.34. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Ca (mg/kg) değişim sonuçları	82
Şekil 9.35. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası K (mg/kg) değişim sonuçları	83
Şekil 9.36. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Cd (mg/kg) değişim sonuçları	84
Şekil 9.37. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Co (mg/kg) değişim sonuçları	85
Şekil 9.38. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Cr (mg/kg) değişim sonuçları	86
Şekil 9.39. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Ni (mg/kg) değişim sonuçları	87
Şekil 9.40. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Pb (mg/kg) değişim sonuçları	88
Şekil 9.41. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Zn (mg/kg) değişim sonuçları	89
Şekil 9.42. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Cu (mg/kg) değişim sonuçları	90
Şekil 9.43. Bitki su kullanım randımanı (g/L)	91
Şekil 9.44. Toprakta uygulama sonrası tuzluluk (%) değişim sonuçları	93
Şekil 9.45. Toprakta uygulama sonrası organik madde (%) değişim sonuçları	94
Şekil 9.46. Toprakta uygulama sonrası EC (mS/cm) değişim sonuçları	95
Şekil 9.47. Toprakta uygulama sonrası pH değişim sonuçları	95
Şekil 9.48. Toprakta uygulama sonrası P (kg/da) değişim sonuçları	96
Şekil 9.49. Toprakta uygulama sonrası Fe (mg/kg) değişim sonuçları	97
Şekil 9.50. Toprakta uygulama sonrası Ca (mg/kg) değişim sonuçları	98
Şekil 9.51. Toprakta uygulama sonrası Mg (mg/kg) değişim sonuçları	99
Şekil 9.52. Toprakta uygulama sonrası K (kg/da) değişim sonuçları	99
Şekil 9.53. Toprakta uygulama sonrası Mn (mg/kg) değişim sonuçları	100
Şekil 9.54. Toprakta uygulama sonrası Cd (mg/kg) değişim sonuçları	101
Şekil 9.55. Toprakta uygulama sonrası Co (mg/kg) değişim sonuçları	102
Şekil 9.56. Toprakta uygulama sonrası Cr (mg/kg) değişim sonuçları	103
Şekil 9.57. Toprakta uygulama sonrası Ni (mg/kg) değişim sonuçları	104
Şekil 9.58. Toprakta uygulama sonrası Pb (mg/kg) değişim sonuçları	105
Şekil 9.59. Toprakta uygulama sonrası Zn (mg/kg) değişim sonuçları	106
Şekil 9.60. Toprakta uygulama sonrası Cu (mg/kg) değişim sonuçları	107

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Düzenli depolama sızıntı suyunun özellikleri ve arıtım için etkileri	6
Tablo 2.2. Düzenli depolama sızıntı suyu bileşimi üzerindeki farklı faktörlerin etkisi	10
Tablo 4.1. Struvit kristalizasyonu için çeşitli alternatif magnezyum kaynakları	24
Tablo 4.2. Organik maddenin struvit kristalizasyonu üzerindeki etkisi	29
Tablo 5.1. Struvit çökmesi ve gübre olarak kullanımı	32
Tablo 8.1. Samsun Büyükşehir Belediyesi Katı Atık Düzenli Depolama Sahasına ait genel veriler (2023)	40
Tablo 8.2. Kullanılan sera toprağı özellikleri.	45
Tablo 9.1. Sızıntı suyu genel karakterizasyonu	50
Tablo 9.2. Çalışmada kullanılan sızıntı suyu numunelerinde incelenen parametrelerin maksimum, minimum ve ortalama değerleri	51
Tablo 9.3. Ham sızıntı suyunun 4°C ve 20°C’de sıcaklık ve zamana bağlı değişimi	51
Tablo 9.4. Ham sızıntı suyunun H ₂ SO ₄ ’e bağlı NH ₄ -N, pH ve iletkenlik değişimi	53
Tablo 9.5. Ham sızıntı suyunun NH ₄ -N’nun, AS oluşum sürecine temas süresine bağlı değişimi (%3’lük H ₂ SO ₄ C ₀ : 2436 mg/L)	56
Tablo 9.6. AS oluşumunda ham sızıntı suyunun farklı konsantrasyonlardaki NH ₄ -N ile değişimi	58
Tablo 9.7. Ham sızıntı suyunun beklemeye bağlı olarak NH ₄ -N değişimine bağlı geri kazanım verimleri (20°C)	60
Tablo 9.8. Ham sızıntı suyundan elde edilen struvit çökeltisinin farklı pH’larda çözünürlük değişimi	62
Tablo 9.9. Struvit ve MAP ın bitki büyümesinde ve gelişmesindeki etkileri-1	69
Tablo 9.10. Struvit ve MAP ın bitkide büyümesinde ve gelişmesindeki etkileri-2	74
Tablo 9.11. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası %N, P (mg/kg) ve Mg (mg/kg) değişim sonuçları	78
Tablo 9.12. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Fe (mg/kg), Ca (mg/kg) ve K (mg/kg) değişim sonuçları	81
Tablo 9.13. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Cd (mg/kg), Co (mg/kg) ve Cr (mg/kg) değişim sonuçları	84
Tablo 9.14. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Ni (mg/kg) ve Pb (mg/kg) değişim sonuçları	87
Tablo 9.15. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Zn (mg/kg) ve Cu (mg/kg) değişim sonuçları	89
Tablo 9.16. Bitki su kullanım randımanı (g/L)	91
Tablo 9.17. Toprakta uygulama sonrası tuz (%) ve organik madde (%) değişim sonuçları	93
Tablo 9.18. Toprakta uygulama sonrası EC (mS/cm) ve pH değişim sonuçları	94
Tablo 9.19. Toprakta uygulama sonrası P (kg/da), Fe (mg/kg) ve Ca (mg/kg) değişim sonuçları	96
Tablo 9.20. Toprakta uygulama sonrası Mg (mg/kg), K (kg/da) ve Mn (mg/kg) değişim sonuçları	98
Tablo 9.21. Toprakta uygulama sonrası Cd (mg/kg), Co (mg/kg) ve Cr (mg/kg) değişim sonuçları	101
Tablo 9.22. Toprakta uygulama sonrası Ni (mg/kg) ve Pb (mg/kg) değişim sonuçları	103
Tablo 9.23. Toprakta uygulama sonrası Zn (mg/kg) ve Cu (mg/kg) değişim sonuçları	106

1. GİRİŞ

Günümüzde hızla artan nüfus ve insan topluluklarının yaşam biçimlerinde meydana gelen köklü değişiklikler, yoğun kentleşmeye neden olarak kırsal alanlardan kentsel yerleşimlere doğru büyük bir nüfus hareketine yol açmıştır. Bu durum, özellikle şehirlerde altyapı ve doğal kaynaklar üzerindeki baskıyı ciddi biçimde artırmakta; su temini, atık yönetimi, enerji tüketimi ve çevresel sürdürülebilirlik gibi pek çok konuda karmaşık sorunlar doğurmaktadır. Kentlerde yaşayan nüfusun artmasıyla birlikte, katı atık üretimi de önemli ölçüde artış göstermiş; yetersiz atık bertarafı ve uygunsuz yönetim uygulamaları, çevresel bozulma, habitat kaybı ve halk sağlığı sorunları gibi olumsuz sonuçlara yol açmıştır. Bu çok boyutlu sorunların etkin şekilde yönetilebilmesi, sürdürülebilir kentsel gelişimi destekleyen, nüfus dinamiklerini dikkate alan ve çevresel dengeyi gözetken kapsamlı stratejilerin hayata geçirilmesini gerekli kılmaktadır (Zisman vd., 2024).

Katı atık depolama sahaları, toplumların ürettiği büyük hacimli atıkların güvenli bir şekilde bertaraf edilmesinde kilit rol oynamaktadır. Bu alanlar, atıkların çevreden izole edilmesini sağlayarak kontaminasyonun ve sağlık risklerinin önlenmesine katkıda bulunur (Wijekoon vd., 2022). Ancak, bu sahalarda organik atıkların ayrışması sonucu oluşan sızıntı suları, içerdiği yüksek konsantrasyondaki kirleticiler nedeniyle çevresel açıdan ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Sızıntı suları; organik maddeler, amonyum azotu, ağır metaller, inorganik tuzlar ve ksenobiyotikler gibi çok sayıda kirletici maddeyi içermekte olup, bu kompleks bileşim arıtım sürecini zorlaştırmaktadır (Emenike vd., 2012). Özellikle biyolojik olarak parçalanamayan bileşiklerin, yüksek amonyum konsantrasyonlarının ve toksik maddelerin varlığı, geleneksel biyolojik arıtma yöntemlerinin etkinliğini azaltmaktadır. Buna karşın, sızıntı sularının yalnızca bertaraf edilmesi gereken bir atık değil, aynı zamanda geri kazanılabilir değerli besin maddeleri içeren potansiyel bir kaynak olarak değerlendirilmesi mümkündür. Bu bağlamda, özellikle azot geri kazanımı ön plana çıkmaktadır. Azot, tarımsal üretimde temel besin maddelerinden biri olup, sürdürülebilir gübre üretimi açısından stratejik öneme sahiptir. Ancak, arıtma teknikleri genellikle pahalıdır, kimyasal kullanımına dayalıdır ve çevresel riskler taşıyabilmektedir (Roy vd., 2018).

Azotun çevre üzerindeki etkisini önlemek için, tarımsal kullanımda gübre olarak amonyum sülfat gibi değerli yan ürünlerin değerlendirilmesi ve üretilmesi, yapısal amonyum azotu fazlası olan alanlarda atık yönetiminin iyileştirilmesine yönelik çözümlerden biri olabilir. Ayrıca 2000 mg/L'ye kadar yüksek miktarda amonyum azotu içeren tarımsal-endüstriyel, sızıntı suyu gibi atıklar için arıtma ve değerlendirme yöntemlerinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır (Jermakka vd., 2015). Bu nedenle, çevre dostu ve ekonomik alternatiflerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Son yıllarda, sızıntı suyundan azot geri kazanımına yönelik yenilikçi yöntemlerden biri olan struvit çökmesi dikkat çekmektedir. Struvit, düşük çözünürlüklü yapısı sayesinde yavaş salımlı gübre olarak kullanılabilen ve hem azot hem de fosfor geri kazanımı sağlayarak çevresel ve ekonomik faydalar sunmaktadır (Zaffar vd., 2023). Ancak, laboratuvar ölçekli üretimden tarımsal uygulamaya geçişte bazı araştırma boşlukları ve pratik zorluklar söz konusudur (Chandrasekaran vd., 2024). Struvitin tarımda yaygın kullanımına yönelik daha fazla saha verisine ve deneysel çalışmaya ihtiyaç vardır.

Çalışma kapsamında, Samsun Büyükşehir Belediyesi Katı Atık Düzenli Depolama Sahası Sızıntı Suyu Havuzunda biriken sızıntı suları kaynak olarak kullanılarak struvit ve amonyum sülfat gibi çöktürme yöntemleri ile azotun geri kazanılması planlanmıştır. Sızıntı suyu içerisindeki amonyum azotu kullanarak en iyi azot geri kazanım verimi elde edilen parametreler belirlenmiş ve bu veriler ışığında struvit ve AS çöktürmeleri elde edilmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, ıspanak (*Spinacia oleracea* L.) bitkisinin yetiştirilmesinde, depolama sahası sızıntı suyunun besin kaynağı olarak kullanılabilirliğinin değerlendirilmesidir. Bu kapsamda, zengin amonyum içeriğine sahip olan sızıntı suyundan magnezyum ve fosfat eklenmesi ile struvit ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) bileşiğinin çöktürülmesi hedeflenmiştir. Struvit, doğal bir yavaş salımlı gübre niteliği taşıması nedeniyle alternatif bir gübre kaynağı olarak değerlendirilecektir. Çalışmada, sera koşullarında yetiştirilen ıspanak bitkileri üzerinde farklı miktarda gübre uygulamalarının etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Bu doğrultuda, sızıntı suyundan elde edilen amonyum azotu ile meydana getirilen struvit ile ticari bir gübre tipi olan MAP karşılaştırmalı uygulamalar yapılarak ve gübrelenmemiş (kontrol) grubu ile birlikte değerlendirilmiştir.

Bitki gelişimi ve verimi açısından belirlenen agronomik ve fizyolojik parametreler üzerinden analizler yürütülmüş, struvitin gübre olarak etkinliği ve çevresel sürdürülebilirliği ortaya konulmuştur. Elde edilen bulgular, atıksu bazlı kaynakların tarımsal üretimde alternatif gübre olarak kullanılmasına yönelik bilimsel dayanak oluşturmayı hedeflemiştir.



2. DÜZENLİ DEPOLAMA SIZINTI SUYU BİLEŞİMİ ve KİRLİLİK POTANSİYELİ

Düzenli depolama sızıntı suyu, atıkların çürüme süreci sonucunda oluşan sıvı bir yan ürün olup, modern atık yönetiminin karmaşıklığını ve çevresel sağlığın korunması gerekliliğini yansıtan önemli bir çevresel sorunu temsil etmektedir. Yağışlar ya da diğer nem kaynakları, düzenli depolama sahalarında biriken atıkların içinden süzülerek, atıklarda bulunan katı maddeleri çözüp askıya alır ve böylece sızıntı suyu olarak bilinen güçlü bir atıksu ortaya çıkarır (Mor vd, 2023).

Sızıntı suyunun bileşimi geniş ölçüde değişkenlik gösterebilir; ancak genellikle çözülmüş organik maddeler, tuzlar ve metaller gibi inorganik makrobileşenler ile çeşitli ksenobiyotik organik bileşenler içerir ve bu durum atıkların çeşitliliğini yansıtır (Kumar vd., 2023). Organik bileşenler, biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ) ve kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) cinsinden ölçülerek, sızıntı suyunun su kaynakları üzerindeki potansiyel etkisini ortaya koyar. İnorganik makro bileşenler arasında amonyum, klorürler, sülfatlar ve arsenik, kadmiyum, krom, kurşun ve cıva gibi ağır metaller yer almakta olup, bu maddeler sızıntı suyuna dair toksikolojik endişeleri artırmaktadır (Al-Yaqout vd., 2020).

Ayrıca pestisitler, farmasötik ürünler ve endüstriyel kimyasallar gibi ksenobiyotik bileşiklerin varlığı, bu maddelerin biyolojik olarak parçalanmaya dirençli olması ve biyobirikim potansiyeli taşımaları nedeniyle sızıntı suyunun karmaşıklığını daha da artırmaktadır. Kontrolsüz sızıntı suyunun çevresel etkileri derin ve uzun sürelidir. Sızıntı suyu yeraltı ve yüzey sularına sızarak, sucul ekosistemleri, yaban hayatını ve insan sağlığını tehdit edebilir. Kirleticilerin su kaynaklarına sızması, habitatların bozulmasına, tür çeşitliliğinin zarar görmesine ve gıda zincirinde biyobirikim yoluyla halk sağlığının tehlikeye girmesine neden olabilir. Özellikle ağır metaller ve kalıcı organik kirleticiler, toksisiteleri ve çevresel kalıcılıkları nedeniyle uzun vadeli ekolojik zararlara yol açma potansiyelleri açısından oldukça endişe vericidir. Sızıntı suyunun çevresel tehlikeleri göz önüne alındığında, arıtımı ve yönetimi sürdürülebilir atık yönetimi uygulamalarının kritik bileşenleri haline gelmiştir (El-Saadony vd., 2023).

Etkili sızıntı suyu arıtımı, zararlı bileşenlerin etkisiz hale getirilmesini hedefleyerek bu suyun güvenli şekilde deşarj edilmesini veya yeniden kullanımını

mümkün kılar (Kumar vd., 2023). Bu ise, sızıntı suyunun özel bileşimine ve yerel yasal düzenlemelere göre uyarlanmış fiziksel, kimyasal ve biyolojik işlemleri bir arada barındıran çok yönlü bir yaklaşım gerektirir. Çökeltme ve filtrasyon gibi fiziksel işlemler, askıda katı maddeleri uzaklaştırırken çöktürme, koagülasyon ve ileri oksidasyon gibi kimyasal yöntemler, çözünmüş kirleticileri azaltır. Aerobik ve anaerobik biyolojik işlemler ise organik maddeleri daha zararsız bileşiklere dönüştürür (Kurniawan vd., 2010).

Düzenli depolama sızıntı suyunun arıtımı, yalnızca kirliliğin kontrol altına alınmasını değil; aynı zamanda çevrenin korunması ve sürdürülebilir atık yönetimi ilkelerinin hayata geçirilmesini de temsil etmektedir. Sızıntı suyunun ekosistemler ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinin azaltılmasıyla birlikte, etkili arıtım uygulamaları su kalitesinin korunmasına, biyolojik çeşitliliğin sürdürülebilirliğine ve toplumların refahına katkı sağlar (Senathirajah ve Palanisami, 2023). Ayrıca, sızıntı suyu arıtım teknolojilerindeki gelişmeler, değerli maddelerin geri kazanımı veya arıtılmış suyun yeniden kullanımı gibi olanaklar sunarak döngüsel ekonomi ve kaynak verimliliği ilkeleriyle örtüşmektedir (Puyol vd., 2017).

Sızıntı suyu arıtımı yalnızca teknik bir sorun değil; aynı zamanda çevresel sorumluluğun ve halk sağlığının korunmasının temel bir unsurudur. Bu anlayış, atığın yalnızca bertaraf edilmesi gereken bir yan ürün değil; yönetilmesi gereken potansiyel bir kirletici kaynağı olduğu yönündeki evrilen bakış açısını yansıtmaktadır. Bu nedenle, sızıntı suyu arıtım teknolojilerinin sürekli iyileştirilmesi ve daha sürdürülebilir atık yönetimi uygulamalarının benimsenmesi, düzenli depolama sahalarının çevresel etkisinin azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu, daha verimli ve maliyet-etkin çözümlerin geliştirilmesini; ayrıca atık azaltımı, yeniden kullanım ve geri dönüşüm girişimlerinin uygulanarak sızıntı suyu oluşumunun en baştan azaltılmasını da içermektedir (Kamaruddin vd., 2017).

2.1. Düzenli Depolama Sızıntı Suyunun Özellikleri

Sızıntı suyu, içinde birçok farklı kirletici madde barındıran ve bu nedenle tehlikeli özellikler taşıyan karmaşık bir atık su türüdür. Düzenli depolama sahalarında oluşan bu su, fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri bakımından değişkenlik gösterir ve bu durum yönetim ile arıtım süreçlerini zorlaştırır.

Sızıntı suyunun bileşimi; depolanan atığın türü, depolama sahasının yaşı, iklim koşulları ve işletme yöntemleri gibi faktörlerden etkilenir. İçeriğinde yüksek miktarda organik madde, çözünmüş tuzlar, ağır metaller, toksik organik bileşikler, amonyak azotu, azot ve fosfor bileşikleri ile patojen mikroorganizmalar bulunabilir. Bu nedenle, sızıntı suyunun özelliklerinin doğru şekilde belirlenmesi; çevreye vereceği zararların önlenmesi, arıtım yöntemlerinin doğru seçilmesi ve sürdürülebilir atık yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi açısından büyük önem taşır. (Tablo 2.1) (Andreottola ve Cannas, 2024).

Tablo 2.1. Düzenli depolama sızıntı suyunun özellikleri ve arıtım için etkileri (Andreottola ve Cannas, 2024)

Boyut	Özellikler	Arıtım Üzerindeki Etkiler
Fiziksel	Sıvı matris, değişken görünüm ve viskozite; pH, sıcaklık, iletkenlik	Arıtım süreci seçimini, çözünürlüğü ve etkinliğini etkiler
Kimyasal	Çözünmüş organik/inorganik maddeler, ağır metaller, ksenobiyotikler (ör. ilaçlar, pestisitler), KOİ, BOİ, amonyum	Spesifik bileşiklerin geri kazanımı veya nötralizasyonu gerekir; kalıcılık ve toksisite sorun yaratır
Biyolojik	Mikrobiyal topluluklar, organik maddenin biyolojik ayrışması, patojen varlığı	Mikrobiyal aktivitenin kullanımı; zararlı mikroorganizmaların yönetimi gereklidir

Fiziksel olarak, sızıntı suyu esasen sıvı bir matristir. Ancak, görünümü, viskozitesi ve diğer fiziksel özellikleri; düzenli depolama sahasının yaşı, atık bileşimi ve aldığı yağış miktarına bağlı olarak büyük ölçüde değişkenlik gösterebilir. Genellikle genç sızıntı suyu, koyu rengi ve güçlü kokusuyla belirgin yüksek organik yük taşır. Buna karşılık, daha yaşlı sızıntı suları daha berrak görünebilir, ancak daha yüksek çözünmüş inorganik bileşik konsantrasyonları içerebilir. pH, sıcaklık ve iletkenlik gibi fiziksel özellikler, sızıntı suyunun genel bileşiminin ve arıtım açısından ortaya çıkarabileceği potansiyel zorlukların önemli göstergeleridir (Abdel-Shafy vd., 2024). Örneğin, sızıntı suyundaki yüksek iletkenlik, klorür, sülfat ve amonyum gibi

Çözünmüş iyonların yüksek konsantrasyonlarını gösterir ve bu durum bazı arıtma süreçlerinin etkinliğini olumsuz etkileyebilir. Benzer şekilde, pH seviyeleri metallerin çözünürlüğünü ve kimyasal arıtma süreçlerinin etkinliğini etkileyebilir; bu nedenle asidik veya bazik koşullar, arıtım stratejisinde özel ayarlamalar gerektirebilir (Deng vd., 2020).

Kimyasal açıdan, sızıntı suyu; çözünmüş organik ve inorganik maddeler, ağır metaller ve ksenobiyotik bileşiklerin yer aldığı karmaşık bir karışımdır (Sil ve Kumar, 2017).

Organik fraksiyon, genellikle karbonhidratlar, yağlar, proteinler ile doğal bozunmaya dirençli kalıcı organik kirleticiler gibi biyolojik olarak parçalanabilir bileşenlerden oluşmaktadır. Sızıntı suyunun organik yükünü nicel olarak belirlemek amacıyla KOİ ve BOİ gibi parametreler yaygın olarak kullanılmakta olup, bu değerler hem alıcı ortamlar hem de arıtma sistemleri üzerindeki potansiyel etkileri yansıtmaktadır. Dünyanın farklı bölgelerinden elde edilen düzenli depolama sahalarına ait sızıntı sularının fiziksel ve kimyasal özelliklerine yönelik yapılan kapsamlı analizler, bölgesel farklılıkların önemli boyutlara ulaşabildiğini ortaya koymaktadır. Bu değişkenlikler, sızıntı suyunun kirlilik potansiyelinin doğru şekilde anlaşılması ve etkili yönetim stratejilerinin geliştirilmesi açısından yerel koşulların dikkate alınmasının gerekliliğini vurgulamaktadır.

Biyolojik olarak sızıntı suyu, kendine özgü kimyasal ortamına adapte olmuş bakteri, mantar ve protozoa gibi mikroorganizmalarla dolu, yaşayan ve sürekli gelişen bir varlık gibidir. Sızıntı suyundaki mikrobiyal topluluklar, organik maddelerin biyolojik parçalanmasında önemli rol oynayarak bazı kirleticilerin doğal olarak giderilmesini sağlar (Qi vd., 2023). Ancak, bu mikrobiyal popülasyonların çeşitliliği ve aktivitesi, sızıntı suyu arıtımı için hem fayda hem de risk teşkil edebilir.

Pseudomonas ve *Clostridium spp.* gibi bakteriler ile *Aspergillus* ve *Penicillium spp.* gibi mantarlar, organik kirleticilerin parçalanmasında ve tehlikeli maddelerin dönüştürülmesinde kilit rol oynar. Bu türler biyolojik arıtım süreçlerinde faydalı şekilde kullanılabilirken, patojenik organizmaların veya zararlı yan ürünler üretebilecek mikroorganizmaların varlığı, çevresel ve sağlık risklerinin önlenmesi açısından dikkatli yönetilmelidir (Mani vd., 2020). Ayrıca, *Methanobacterium* ve

Methanosarcina spp. gibi metanojenik arkeler, atıkları metana dönüştürerek hem atık hacmini azaltmakta hem de enerji geri kazanımı için potansiyel sağlamaktadır.

Sızıntı suyunun fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri arasındaki etkileşim, arıtım süreçlerinin seçim ve tasarımını doğrudan etkiler. Askıda katı maddeler ve sıcaklık gibi fiziksel özellikler, sistemin tıkanmasını önlemek ve sonraki arıtım aşamalarının verimini artırmak amacıyla çöktürme ve filtrasyon gibi ön işlemleri gerekli kılabilir.

pH, organik yük ve toksik bileşiklerin varlığı gibi kimyasal parametreler; nötralizasyon, biyolojik arıtım ya da ileri oksidasyon işlemleri gibi uygun tekniklerin uygulanmasını gerektirir. Mikrobiyal yapı ve biyolojik olarak parçalanma özelliği, uygun biyolojik arıtma yönteminin seçimini etkiler. Bu yöntemler, mikrobiyal aktivitenin optimize edilmesi için zaman zaman besin desteği gerektirebilir. Bu nedenle, sızıntı suyunun karmaşık yapısına özgü, özel olarak tasarlanmış ve entegre edilmiş arıtım stratejileri geliştirilerek, çevresel etkilerin etkin ve sürdürülebilir biçimde azaltılması sağlanmalıdır.

2.2. Düzenli Depolama Sızıntı Suyunun Bileşimini Etkileyen Faktörler

Düzenli depolama sızıntı suyunun bileşimi; depolama sahasının yaşı, içerdiği atık türleri, iklim koşulları ve uygulanan özel işletme teknolojileri gibi çok sayıda etkene bağlı olarak şekillenir. Bu faktörlerin her biri, sızıntı suyunun fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin belirlenmesinde kritik rol oynamakta ve dolayısıyla çevresel etkisini ve etkili yönetim ve arıtım stratejilerinin belirlenmesini doğrudan etkilemektedir (Abdel-Shafy vd., 2024).

Depolama sahasının yaşı, üretilen sızıntı suyunun bileşimini önemli ölçüde etkilemektedir. Düzenli depolamanın ilk aşamalarında, kolay parçalanabilir organik maddelerin bolluğu nedeniyle sızıntı suyu yüksek BOİ ve KOİ değerleriyle karakterize edilen yüksek organik içeriğe sahiptir (Lindamulla vd., 2022).

Depolama sahası olgunlaştıkça, organik madde ayrışma hızı azalır ve bu da BOİ seviyelerinin düşmesine yol açar. Ancak, ayrışma ve sızma süreçlerinin devam etmesiyle birlikte amonyum, klorür ve ağır metaller gibi inorganik bileşiklerin konsantrasyonu zamanla artabilir. Bu zamansal değişim, organik ve inorganik bileşenler arasındaki dengenin sürekli olarak değiştiği koşullarda etkili olabilecek esnek arıtım yaklaşımlarını gerekli kılar (Tablo 2.2.) (Saxena vd., 2022).

Liu vd., 2022, genç düzenli depolama sızıntı suyu ile olgun düzenli depolama sızıntı suyu arasındaki moleküler farkları incelemiştir. Sonuçlar, genç sızıntı suyunun KOİ değerinin 74.853 mg/L, olgun sızıntı suyunun ise 3.098 mg/L olduğunu ortaya koymuştur; bu durum, genç sızıntı suyunun daha yüksek organik madde içeriğine sahip olduğunu göstermektedir. Moleküler bileşim açısından genç düzenli depolama sızıntı suyu, daha düşük moleküler ağırlıklı, CHO bileşikler ve alifatik bileşikler içermektedir. Buna karşılık olgun düzenli depolama sızıntı suyu, ağırlıklı olarak CHON bileşikler ile yüksek oksijen içeren, doymamış ve fenolik bileşenlerden oluşmaktadır.

Genç düzenli depolama sızıntı suyunun moleküler yapısı daha basit, biyoyararlanımı daha yüksek ve doğrusal zincirli yapıların oranı daha fazlayken, olgun düzenli depolama sızıntı suyunda oksijen içeren fonksiyonel gruplar ve benzen halkaları içeren daha karmaşık bir yapı gözlemlenmiştir. Kimyasal özellikler açısından, genç düzenli depolama sızıntı suyu daha düşük karbon oksidasyon durumu ve değiştirilmiş aromatiklik indeksine sahiptir. Bu da organik maddenin daha indirgenmiş bir durumda olduğunu gösterir. Bununla birlikte, depolama sahasına bırakılan atığın türü de sızıntı suyunun bileşimini belirleyen diğer önemli bir etkidir.

Yüksek oranda organik atık (örneğin gıda atıkları, bahçe atıkları) içeren sahalarda, daha fazla biyolojik aktivite potansiyeline sahip, yüksek seviyelerde organik kirletici içeren sızıntı suları üretme eğilimindedir (Kjeldsen vd., 2002). Buna karşın, endüstriyel veya tehlikeli atıkların yoğun olduğu depolama sahalarda, daha yüksek konsantrasyonda toksik metaller ve xenobiyotik organik bileşikler içeren sızıntı suları oluşturabilir. Elektronik atıklar, farmasötikler ve plastikler gibi çeşitli atık türleri, sızıntı suyunun karmaşıklığını artırarak geniş yelpazede kirleticilere yönelik özel arıtım çözümleri gerektirmektedir (Srivastava vd., 2021).

İklim koşulları, özellikle yağış miktarı, sıcaklık ve nem, sızıntı suyu oluşumunda ve bileşiminde belirleyici rol oynar. Yüksek yağış alan bölgelerde daha fazla sızıntı suyu üretilebilir; bu durum kirletici konsantrasyonlarını seyreletebilir, ancak toplamda yönetilmesi gereken kirlilik yükünü artırabilir. Sıcaklık, depolama sahası içindeki biyokimyasal reaksiyonların hızını etkileyerek organik madde ayrışma oranını ve dolayısıyla sızıntı suyu oluşum hızını ve içeriğini doğrudan etkiler. Nem oranı da depolama sahası içindeki nem içeriğini etkileyerek hem sızıntı suyu üretim oranını hem de bileşimini değiştirebilir (Abunama vd., 2021b).

Tablo 2.2. Düzenli depolama sızıntı suyu bileşimi üzerindeki farklı faktörlerin etkisi (Saxena vd., 2022)

Faktörler	Seçenekler	Sızıntı Suyu Bileşimi
Depolama Sahası Yaşı	Genç Sahalar (<10 yıl)	Yüksek uçucu organik bileşikler, BOİ ve KOİ; organik maddenin aktif ayrışması
	Eski Sahalar (>20 yıl)	Düşük BOİ, yüksek inorganik bileşik konsantrasyonu, stabilize bileşenler
Atık Türü	Organik Atık	Yüksek BOİ, KOİ ve uçucu organikler; organik atık ayrışması
	Endüstriyel ve Tehlikeli Atık	Yüksek toksik metaller, ksenobiyotikler ve endüstriyel kimyasallar
	İnşaat ve Yıkım Atıkları	Tuzlar ve ağır metaller gibi düşük düzeyde inorganik bileşenler
	Elektronik Atıklar (E-Atık)	Ağır metaller (ör. kurşun, cıva) ve tehlikeli organikler
	Yağış ve Nem	Seyreltilmiş kirleticiler, daha yüksek sızıntı suyu hacmi
İklim Koşulları	Kurak/Kuru	Daha az yağış nedeniyle yüksek konsantrasyonlu sızıntı suyu
	Soğuk Sıcaklıklar	Ayrışma yavaşlar; düşük BOİ ve KOİ, mevsimsel değişiklikler

3. DÜZENLİ DEPOLAMA SIZINTI SUYUNUN ARITIMI: DÖNGÜSEL EKONOMİ YAKLAŞIMIYLA AZOT GERİ KAZANIMI

Düzenli depolama sahalarının etkin şekilde yönetilmesi ve sızıntı suyu kaynaklı çevresel risklerin azaltılması, etkin sızıntı suyu arıtım stratejilerinin benimsenmesini zorunlu kılmaktadır. Günümüzde döngüsel ekonomi paradigması, sızıntı suyu arıtımında sürdürülebilirliği artırmak, kaynak verimliliğini sağlamak ve çevresel etkileri en aza indirmek amacıyla arıtım stratejilerine entegre edilmektedir (Erşahin vd., 2023). Bu yaklaşım, kaynak döngüsünü kapatarak kaynak kullanımını maksimize etmeyi ve atık üretimini azaltmayı amaçlamaktadır. Sızıntı suyu arıtımı bağlamında döngüsel ekonominin temel unsurları arasında besin maddesi geri kazanımı ve su yeniden kullanımı öne çıkmaktadır. Bu kapsamda, sızıntı suyu atık olmaktan çıkarılarak; amonyum, fosfor gibi değerli besin elementleri geri kazanılmakta ve gübre ya da diğer uygulamalarda kullanılmaktadır (Kurniawan vd., 2023).

Bitkisel üretim için hayati öneme sahip azot, fosfor ve potasyum gibi besin elementlerinin sızıntı suyundan geri kazanımı, sürdürülebilir tarım uygulamaları açısından önemli bir katkı sağlamaktadır. Sızıntı suyu içerisindeki mineral elementlerin ve bileşiklerin gübre veya toprak düzenleyici olarak kullanımı hem çevresel hem de ekonomik açıdan fayda sunmakta; kimyasal gübrelere olan bağımlılığı azaltmaktadır (Chisti vd., 2013).

Struvit çöktürmesi, adsorpsiyon ve biyolojik besin geri kazanım yöntemleri, sızıntı suyundan besin geri kazanımı amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler, besin döngüsünü kapatmakta ve sentetik gübrelere olan ihtiyacı azaltmaktadır. Buna ek olarak, membran filtrasyonu ve ters osmoz gibi ileri arıtım teknolojileri kullanılarak sızıntı suyu, yeniden kullanıma uygun kaliteye getirilebilmektedir (Almeida vd., 2023). Elde edilen arıtılmış su, sulama ve endüstriyel uygulamalar gibi içme suyu dışı amaçlarla kullanılabilir; bu da tatlı su kaynaklarına olan talebi azaltmaktadır. Bu dönüşümsel yaklaşım, daha sürdürülebilir ve kaynak verimli bir süreç oluşturmaktadır. Bu tür sistemlerin uygulanması, yalnızca çevresel yükü azaltmakla kalmayıp aynı zamanda daha dirençli ve sürdürülebilir bir atık yönetim sisteminin inşasına katkı sunmaktadır (Kurniawan vd., 2021).

Sızıntı suyu arıtımında; biyolojik ve fizikokimyasal yöntemler, membran filtrasyon sistemleri, ileri oksidasyon süreçleri ve yapay sulak alanlar gibi doğal sistemleri kapsayan çok sayıda yöntem araştırılmıştır (Bandala vd., 2021).

Özellikle adsorpsiyon yöntemleri, yüksek verimlilikleri, maliyet etkinlikleri ve düşük ikincil çevresel etkileri sayesinde önemli derecede ilgi görmektedir. Bu yöntemler arasında, doğal bir aluminosilikat minerali olan zeolit, yüksek adsorpsiyon kapasitesi ve iyon değişim özellikleri ile öne çıkmaktadır (Servatan vd., 2020).

Koagülasyon ve flokülasyon yöntemleri, süspanse katı maddelerin ve kirleticilerin kimyasal ajanlar ile birleştirilip uzaklaştırılmasını sağlayan yaygın bir yaklaşımdır. Bu bağlamda, poliferrik sülfat (PFS) etkili ve çevre dostu bir koagülant olarak öne çıkmaktadır. Aynı zamanda struvit çöktürmesi, magnezyum-amonyum-fosfat bileşiklerinin çöktürülmesi yoluyla amonyum azotunun geri kazanımında etkili bir yöntemdir (Gunay vd., 2008).

Besin geri kazanımında uygun yöntemin seçilmesi için; sızıntı suyunun özgül özelliklerinin, özellikle besin elementlerinin konsantrasyonu, pH, mineral ve organik bileşenlerin varlığı dikkate alınmalıdır. Ayrıca, yöntemin ekonomik uygulanabilirliği, çevresel etkileri ve mevzuata uygunluğu da seçim sürecinde belirleyici faktörlerdir (Wang vd., 2024). Birden fazla yöntemin entegre edilmesi, hem besin geri kazanım verimini artırmakta hem de genel arıtım performansını iyileştirmektedir. Döngüsel ekonomi ilkeleri çerçevesinde, sızıntı suyu arıtım tesisleri entegre sistemler olarak tasarlanarak, farklı arıtım yöntemlerinin birbirini tamamlaması ve kaynak geri kazanımının maksimize edilmesi sağlanabilir. Sızıntı suyunun karmaşık bileşimi ve tekil yöntemlerin sınırlamaları dikkate alındığında, çoklu arıtım teknolojilerinin entegrasyonu çevresel kirliliğin etkin şekilde kontrol altına alınması için gerekli hale gelmiştir (Reshadi vd., 2020).

Son 20 yılda, ortaya çıkan yeni kirleticiler, insan sağlığı ve çevre üzerindeki potansiyel riskleri nedeniyle dikkat çekmiştir. Bu maddeler arasında per ve polifloroalkil bileşikler (PFAS), organofosfat esterleri (OPE), bisfenoller, çeşitli farmasötikler ve mikroplastikler yer almakta ve genellikle eser miktarlarda bulunmalarına rağmen kalıcılıkları nedeniyle çevresel risk oluşturmaktadırlar (Kabir vd., 2023). Özellikle mikroplastikler, sızıntı suyu ve çamurda giderek daha sık tespit

edilmekte ve karasal ile sucul sistemlerde biyoakümülyasyon potansiyeli nedeniyle ciddi ekolojik tehditler oluşturmaktadır.

Mevcut sızıntı suyu yönetimi stratejileri, bu tür yeni kirleticileri çoğunlukla göz ardı etmektedir. Bunun başlıca nedeni de yasal düzenlemelerin eksikliğidir. Bu durum, çevresel koruma çabalarında önemli bir boşluğa işaret etmektedir. Bu bağlamda, sızıntı suyu arıtım stratejileri özellikle mikroplastiklerin tespiti ve geri kazanımını entegre etmenin önemi giderek artmaktadır (Singh vd., 2023).

3.1. Azot Geri Kazanımında Mevcut Yöntemler ve Teknolojik Gelişmeler

Evsel atıksular çeşitli kimyasal bileşenler içermektedir. Tarihsel olarak, karbon geri kazanımı amacıyla anaerobik arıtım yoluyla metan üretimi yaygın bir uygulama olmuş ve bu yöntem evsel atıksuyun her bir metreküpü için yaklaşık 0,038 \$ düzeyinde ekonomik fayda sağlamıştır (Jin vd., 2020). Karbonun ardından en bol bulunan kaynak olan azot ise, tarım, patlayıcı, gıda ve kimya sanayilerinde kullanım potansiyeline sahip olup, geri kazanımı durumunda 0,018 ile 0,086 \$/m³ aralığında ekonomik değer sunmaktadır. Yüksek konsantrasyonlu atıksulardan azot, struvit çökeltimi ve amonyak sıyırma gibi çeşitli yöntemlerle başarıyla geri kazanılmıştır. Ancak bu teknikler yalnızca amonyak azotu konsantrasyonunun yüksek olduğu (2–3 g/L) durumlarda uygulanabilir olmakta; bu da çıkış suyundaki amonyum konsantrasyonunun deşarj standartlarının üzerinde kalmasına neden olmaktadır (Cruz vd., 2019). Bu nedenle, hem azot geri kazanımını hem de güvenli deşarj gerekliliklerini eşzamanlı olarak sağlamak, atıksu arıtma tesisleri için önemli bir zorluk oluşturmaktadır. Farklı senaryolara uyum sağlayabilecek atıksu azot geri kazanım sistemlerinin oluşturulması, atıksudan etkin azot geri kazanımı ve ekonomik geri kazanımı mümkün kılacak şekilde azotun yoğunlaştırılmasını gerektirir. Ana akımda yoğunlaştırma yoluyla yüksek azot geri kazanımı sağlamak ve deşarj standartlarını karşılamak, konsantredeki azotun yan akımda geri kazanımı ile birlikte kullanılabilir umut verici bir stratejidir (Qin vd., 2023).

Yoğunlaştırma prensibi, seyreltilmiş çözeltilerden istenen maddenin zenginleştirilmesini ve istenmeyen kirleticilerin birikiminin özgül yöntemlerle önlenmesini esas alır (Qin vd., 2023). Başarılı yoğunlaştırma işlemleri için ön arıtım ve son arıtım teknolojileri kullanılarak yöntemlerin uyarlanabilirliği artırılabilir. Kimyasal olarak güçlendirilmiş birincil arıtım, yüksek hızlı aktif çamur ve membran

bazlı ön işleme yöntemleri, atıksudan kolloidler ve askıda katı maddelerin giderilmesi için temel ön işleme teknolojileridir (Zhou vd., 2021).

Yüksek hızlı aktif çamur sistemleri, düşük havalandırma ihtiyacı ve kısa hidrolik bekletme süreleri ile karakterize edilmekte olup, organik maddelerin mineralizasyon yerine adsorpsiyon yoluyla önemli ölçüde giderilmesini sağlar. Bu sayede, amonyumun korunduğu ve anaerobik sindirim için organik açıdan zengin bir çıkış suyu elde edilmektedir. Qiang vd., 2020, yüksek hızlı aktif çamur arıtımının ardından amonyum iyon değişimi uygulayarak evsel atıksudan etkin ve kararlı bir şekilde azot geri kazanımı sağlamıştır. Birincil arıtım, çözünmeyen fraksiyonların ve fosforun çamurda yoğunlaştırılmasını sağlayarak karbon salınımını azaltan sürdürülebilir ve verimli bir yaklaşım sunmaktadır.

Wang vd., 2021b, birincil arıtım yöntemini ön arıtım olarak kullanan yeni bir atıksu arıtım sistemi geliştirmiştir. Bu sistem, yoğunlaştırma ünitesinin aşağı akımda kararlılığını garanti altına almaktadır. Anaerobik membran biyoreaktörler (AnMBR) ve doğrudan membran filtrasyonu (mikrofiltrasyon veya ultrafiltrasyon), evsel atıksudan organik madde geri kazanımı için önerilen membran bazlı ön işleme yöntemlerindendir. Bu teknikler, organik maddeleri etkin bir şekilde gidererek sonraki azot yoğunlaştırma işlemleri için yüksek kaliteli süzüntü sağlamaktadır.

Lim vd., 2019, koagülasyon-çöktürme ünitesi ve anaerobik membran biyoreaktörü ile amonyum iyon değişimi için ön arıtım gerçekleştirmiş, kaynak geri kazanımı ve atıksu arıtımını bütüncül biçimde tamamlamıştır. Doğrudan membran filtrasyonu ya da birincil arıtım ile ayrıştırılan çamur, metan içeren biyogaz üretimi amacıyla anaerobik sindirime tabi tutulmuştur. Evsel atıksuyun anaerobik ön işlemi, organik maddenin %90'ından fazlasının yakalanmasını sağlayarak atıksu arıtma tesislerine karbon nötrlüğü hedefi doğrultusunda önemli bir fırsat sunmaktadır.

3.2. İleri Teknolojilerle Atıksulardan Verimli Azot Geri Kazanımı

Son yıllarda, atıksu deşarjlarından azot gibi besin maddelerinin geri kazanımına yönelik çeşitli yenilikçi ve teknolojik arıtma süreçleri tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Bu gelişmeler, geleneksel süreçlerin başlıca zorluklarını aşmayı ve döngüsel ekonomi yaklaşımını sürdürülebilir bir çözüm olarak benimsemeyi mümkün kılmaktadır (Jafarinejad, 2021).

Azot geri kazanım teknolojilerinin ana çıktısı olan gübreler, geleneksel olarak sentetik yollarla, özellikle Haber-Bosch süreci aracılığıyla üretilmektedir. Bu süreçte üretilen azotun yaklaşık %80'i gübre endüstrisi tarafından tüketilmektedir. Ancak bu sürecin yüksek enerji tüketimi ve çevresel etkileri, alternatif ve sürdürülebilir çözümlerin geliştirilmesini gerekli kılmıştır.

Bu doğrultuda, atıksulardan azot geri kazanımını hedefleyen fizikokimyasal temelli teknolojiler geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar yalnızca amonyum değil, aynı zamanda evsel atıksulardan diğer temel besin maddelerinin geri kazanımında da kullanılabilmektedir. Genel olarak, azot geri kazanımı giderek artan bir ilgi görmektedir. Bu kapsamda çeşitli fizikokimyasal teknolojiler test edilmekte ve değerlendirilmektedir. Bu teknolojiler arasında; sıyırma ve absorpsiyon, struvit çöktürmesi, iyon değişimi adsorpsiyon, biyoelektrokimyasal sistemler ve membran ayırma teknolojileri bulunmaktadır (Darestani vd., 2017).

3.2.1. Sıyırma ve Absorpsiyon

Amonyum azotu geri kazanımı için kullanılan sıyırma ve absorpsiyon yöntemleri, birçok atıksuya uygulanabilir ve yüksek verimlilik göstermektedir. Bu yöntemlerin çoğu, gaz ve sıvı akışlarının karşı akış prensibine göre çalıştığı sistemlerdir. Burada gaz akışı kolonun altından, sıvı çözücü ise üstten sisteme girer. $\text{NH}_4\text{-N}$ in gaz fazına geçişi, sıcaklık ve pH'nın artırılmasıyla teşvik edilerek çözeltiden uzaklaştırılması sağlanır. Denge ilişkisi genellikle Henry Kanunu ile açıklanır ve sistemin çalışma verimi bu ilişkiye bağlı olarak değişir. Amonyum geri kazanımı amacıyla yaygın olarak kullanılan üç yöntem: asit sıyırma, hava/buhar sıyırma ve termal sıyırma-asit absorpsiyonudur (Dos Santos vd., 2020).

3.2.2. Struvit Çökmesi ile Atıksulardan Azot Geri Kazanımı

Struvit çökmesi, atıksulardan azot (N) geri kazanımı için en kolay ve en basit yaklaşımlardan biri olarak kabul edilmekte olup, çözünmüş bileşenleri inorganik partiküllere dönüştüren bir faz değişimine dayanmaktadır. Atıksudan azot geri kazanımı bağlamında struvit çökmesi, genellikle struvit prosesi olarak da adlandırılmaktadır. Magnezyum potasyum fosfat (MKP) ise potasyum içeren struvit (K-struvit) oluşumundan sorumlu bir diğer çökme sürecidir (Stefov vd., 2005).

Struvit çökmesi, belediye atıksu deşarjlarından $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 'nin geri kazanımını sağlayabilen etkili ve umut vadeden bir yöntem olup, geri kazanılan bu azot bileşenleri

katma değerli ürünlere dönüştürülebilmektedir. Bu proses, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, Mg^{2+} ve PO_4^{3-} iyonları arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyon sonucu kristalleşme esasına dayalı olarak çalışmaktadır ve bu reaksiyon, molar oranlar, pH, karıştırma şiddeti ve ortamda bulunan yabancı iyonlar gibi çeşitli parametrelere bağlıdır. Çöken mineral faz olan $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s})$, suda oldukça düşük çözünürlüğe sahiptir (0.0023 g/L) (Li vd., 1999). Struvit oluşum reaksiyonu Denklem (3.1) de gösterilmiştir:



Struvit kristalizasyonu, besin maddelerince zengin atıksu akımlarından aynı anda hem N hem de P geri kazanımını mümkün kılmaktadır. Oluşan struvitlerin büyük bir kısmı %5 oranında azot içermekte olup, geçiş metalleri veya biyolojik kirleticiler gibi istenmeyen safsızlıkları minimum düzeydedir. Struvit oluşumunu başlatan katyon olan Mg^{2+} , atıksu akımlarında genellikle sınırlı konsantrasyonda bulunur. Bu nedenle, ortamda aşırı doygunluk (süpersaturasyon) koşullarının sağlanabilmesi için MgCl_2 , $\text{MgO}(\text{s})$ veya $\text{Mg}(\text{OH})_2(\text{s})$ formunda dışarıdan magnezyum ilavesi gerekmektedir.

Struvit kristalizasyonunda rol oynayan başlıca reaktanlar, amonyum ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), PO_4^{3-} ve K^+ ile birlikte pH değeri (8-11) oluşum üzerinde belirleyici parametrelerdendir. Güncel bir araştırma raporuna göre, küresel gübre pazarı 2023–2030 döneminde yaklaşık %9,1 Bileşik Yıllık Büyüme Oranı ile büyüyecek olup, en büyük payı NPK gübreleri oluşturacaktır (ZionMarket, 2023). NPK gübre pazarının 2021 yılı itibarıyla 42,3 milyar USD değerinde olduğu ve 2027 yılına kadar %3,7’lik CAGR ile 52,7 milyar USD’ye ulaşacağı öngörülmektedir (MarketWatch, 2023).

Altınbaş vd 2002, iki aşamalı bir arıtım sistemini kullanarak amonyağın geri kazanımını incelemiştir. Bu sistemde, yukarı akışlı anaerobik çamur yatağı reaktörüyle gerçekleştirilen ön arıtımın ardından kimyasal çöktürme yöntemi uygulanmıştır. Anaerobik olarak ön arıtımı yapılan evsel atıksulara doğrudan MAP çökmesi uygulandığında, girişteki $\text{NH}_4^+\text{-N}$ konsantrasyonu $0,035 \text{ g L}^{-1}$ iken çıkıştaki konsantrasyon $0,01 \text{ g/L}$ seviyesine düşmüştür. Böylece, pH 9,2’de ve stokiometrik oranlarda ($\text{Mg}:\text{NH}_4:\text{PO}_4 = 1:1:1$) %71 oranında $\text{NH}_4^+\text{-N}$ geri kazanımı sağlanmıştır. Ancak, atıksu deşarjlarından $\text{NH}_4^+\text{-N}$ nin struvit çökmesiyle ortalama geri kazanım oranı genellikle %10’un altındadır. Bu nedenle, makro besin maddelerinin geri kazanımı struvit çökmesi ile sınırlı kalmakta ve elde edilen gübrenin kalitesi ile geri kazanım maliyeti doğrudan etkilenmektedir.

Struvit çökmesinin başlıca avantajları arasında, kolay işletim, düşük sızıntı riski ve gübre yanığına neden olmaması yer almaktadır. Ayrıca bu yöntem, kesikli ve sürekli işlem konfigürasyonlarında uygulanabilmekte, hızlı işlem süresiyle zaman ve enerji tasarrufu sağlamaktadır. Kristalizasyonla elde edilen ürünler daha az safsızlık içermekte, küçük ölçekli süreçlere uygulanabilmekte ve çok çeşitli sistemlerde kullanılabilir. Oluşan çamurun bertaraf edilme gerekliliği, işletme maliyetlerini artırarak yöntemin başlıca dezavantajları olarak öne çıkmaktadır (Xiang vd., 2020).

3.2.3. İyon Değişimi ve Adsorpsiyon

Adsorpsiyon ve iyon değişim süreçleri, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında sahip oldukları çok yönlülük, kolay kontrol edilebilirlik, basit tasarım ve işletme koşulları sayesinde öne çıkmaktadır. Bu süreçlerde, sudaki $\text{NH}_4^+\text{-N}$ iyonu adsorpsiyonla tutulur, ardından desorpsiyon veya rejenerasyonla $\text{NH}_4^+\text{-N}$ bakımından zengin bir akış elde edilir. (Figueira vd., 2022).

İyon değişim sistemleri genellikle sürekli akışlı kolon konfigürasyonlarında uygulanmaktadır. Zeolitik malzemeler, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ geri kazanımı için en yaygın kullanılan sorbentler arasında yer almaktadır. Sorpsiyon işlemi, zeolitin maksimum tutma kapasitesine ulaşana kadar devam eder. Bu noktada kolon doygunluğa ulaşır ve bu durum, kırılma eğrisi ile ifade edilir. Ancak doğal zeolitlerin performansı ve kapasitesi; gözenek yapısı, yüzey alanı, yapı bileşimi, katyon değişim kapasitesi, yüzey kimyası gibi birçok etkene bağlıdır. Örneğin, Çin'e ait doğal bir zeolitin 20–49 mg/L aralığındaki başlangıç $\text{NH}_4^+\text{-N}$ konsantrasyonları için 12,6 mg $\text{NH}_4^+\text{-N}$ g⁻¹ kapasiteye ulaştığı rapor edilmiştir (Wang vd., 2016).

Benzer şekilde, doğal Türk Gördes zeolitlerinin 263,2 mg/L $\text{NH}_4^+\text{-N}$ başlangıç konsantrasyonunda 9,07 mg/g $\text{NH}_4^+\text{-N}$ maksimum kapasiteye sahip olduğu belirtilmiştir (Temel ve Kuleyin, 2016).

Adsorpsiyonun ardından, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ile doymuş hale gelen kolon, genellikle sodyum (Na^+) içeren NaOH, NaCl veya bu iki maddenin karışımı ile rejenerasyona tabi tutulur. NaOH kullanımı durumunda, Na^+ iyonları $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ile yer değiştirirken, ortamda bulunan OH^- iyonları NH_4^+ 'yi NH_3 'e dönüştürerek desorpsiyon aşamasına ek bir itici kuvvet sağlar.

Bu yöntemin başlıca avantajları; düşük konsantrasyonlardaki $\text{NH}_4^+\text{-N}$ için yüksek seçicilik ve tutma kapasitesi, başlangıç süresi gerektirmeyen basit ve hızlı

işlem, çamur üretmemesi, bazı sorbentlerin yüksek seçiciliği, yüksek yoğunlaştırma faktörleri işlem sıcaklığının genellikle 8–35 °C aralığında olması ve hızlı kinetik süreçlerdir.

Bununla birlikte, zeolitlerin düşük maliyetli ve yaygın kullanılabilir olmasına rağmen bazı önemli sınırlamaları da bulunmaktadır. Granüler yapılarından dolayı paket yataklı kolonlarda kullanılmaları gerekir, bu da zaman zaman geri yıkama ihtiyacını doğurur. Ayrıca, mevcut AAT altyapılarına tam olarak entegre edilememeleri sürekli işletme açısından sınırlayıcıdır. Ayrıca, iyon değişim verimliliği, ortamda bulunan rekabetçi iyonların etkisiyle önemli ölçüde değişkenlik gösterebilir (Smith ve Smith, 2015).

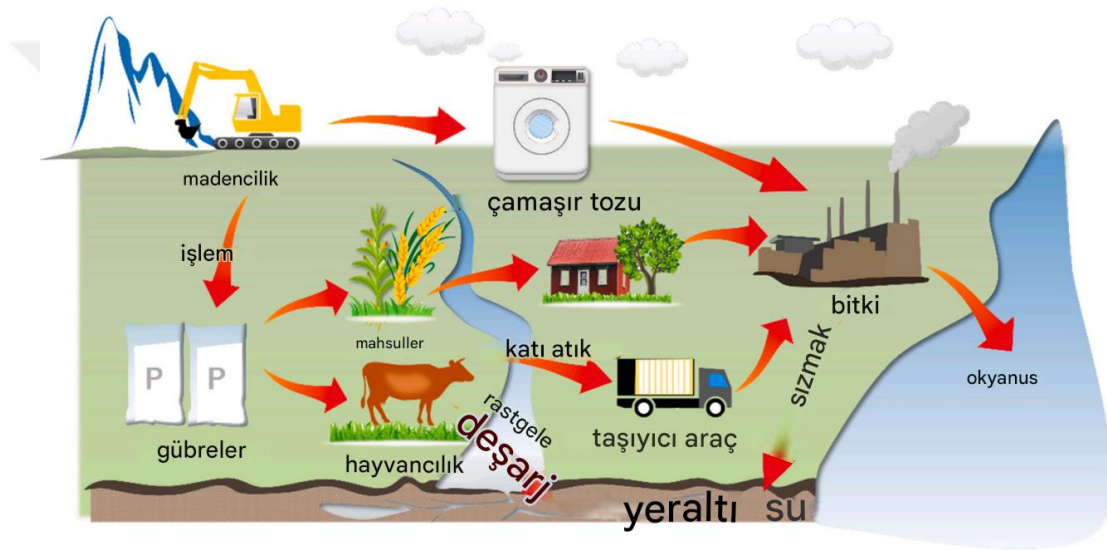
3.2.4. Membran Tabanlı Sistemler

Membran ayırma süreçlerinde, yarı geçirgen bir membran bir karışımdan bir çözeltinin ayrıştırılmasını veya saflaştırılmasını sağlar. Membranlar, çözücülerin boyutu, şekli, yükü veya diğer fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak bazı bileşenlerin geçişine izin verirken diğerlerini engeller. Membran teknolojisi düşük enerji tüketimi, hızlı bileşen ayrıştırması, düşük atık üretimi, kolay proses kontrolü, az kimyasal gereksinimi, düşük hacimli sistem kurulumu ve modüler-kompakt yapısıyla dikkat çeker. Son yıllarda, bu gelişmekte olan teknolojiye ilgi artmıştır ve besin maddelerinin geri kazanımı için en yaygın kullanılan yöntem haline gelmiştir (Guo vd., 2023).

Amonyum geri kazanımı özelinde, sıvının bileşimine ve filtrelenmesi gereken çözeltinin türüne bağlı olarak osmotik, basınçla çalışan, elektrikle çalışan ve ısıyla çalışan membran sistemleri geliştirilmiştir. Kentsel atıksulardan $\text{NH}_4^+\text{-N}$ geri kazanımı, RO membranları ve seyreltik çözeltiler için nanofiltrasyon (NF) membranları ile sağlanabilir.

4. MAGNEZYUM AMONYUM FOSFAT (STRUVİT) ÇÖKTÜRME YÖNTEMİ ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$)

Azot ve fosfor gibi besin elementleri, insan sağlığı ve bitki gelişimi için vazgeçilmez elementlerdir. Şekil 4.1’de de görüldüğü üzere bu elementlerin etkin kullanımı kritik önem taşımaktadır. Günümüzde azot ve fosforun kullanım verimlilikleri oldukça düşüktür ve bu durum, atıksulardan çok sınırlı miktarda N ve P geri kazanıldığını göstermektedir (Chowdhury vd., 2017). Geri kazanılmayan bu besin elementleri, göller ve nehirler gibi su kaynaklarında birikerek ekosisteme zarar vermekte ve ötrofikasyon gibi çevresel sorunlara neden olmaktadır.

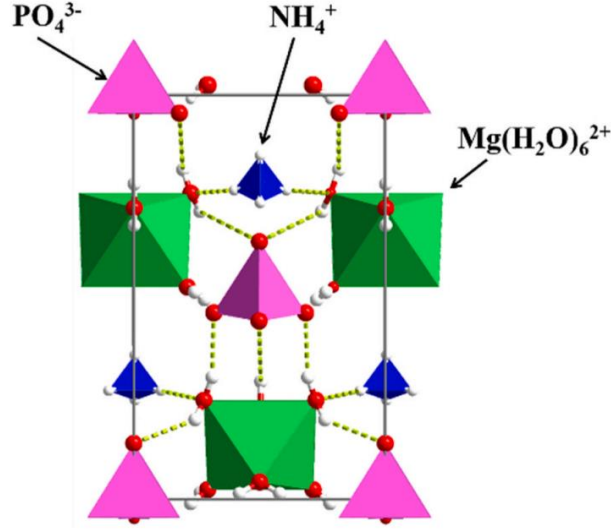


Şekil 4.1. Besin elementlerinin çıkarımından kullanımına ve emisyonuna kadar olan döngüsünü gösteren şematik gösterim (Chowdhury vd., 2017)

Her ne kadar çeşitli teknolojilerle atıksulardan besin maddeleri geri kazanılmaya çalışılsa da, teknik, ekonomik ve çevresel açıdan uygulanabilir yöntemlere yönelik sistematik çalışmalar son yıllarda daha fazla ilgi görmektedir. Bu yöntemler arasında kimyasal çöktürme, azot ve fosforun struvit olarak geri kazanılması açısından öne çıkmaktadır. Özellikle struvit, yavaş salınımlı gübre olarak tarımda doğrudan kullanılabilmesi sayesinde avantajlı bir çökelti türüdür.

Struvit, magnezyum, amonyum ve fosfat iyonlarından oluşan, beyazdan sarıya değişen renkte mikamsı kristaller şeklinde görülen bir bileşiktir ve barut, gübre ile adsorban gibi çeşitli alanlarda kullanılma potansiyeline sahiptir. Eğer Mg^{2+} , NH_4^+-N

ve PO_4^{3-} iyonlarının çarpımı, bileşiğin çözünürlük çarpımı (K_{sp}) değerinden yüksekse, struvit kristalleşmesi gerçekleşmektedir (Denklem 4.1) (Ye vd., 2014):



Şekil 4.2. Struvitin kristal yapısı (Ye vd., 2014)

Struvit, yaygın olarak magnezyum amonyum fosfat olarak bilinir ve kimyasal formülü MgNH_4PO_4 şeklindedir (Şekil 4.2). Moleküler ağırlığı 245,41 olan struvit, suda çok az çözünürken, alkolde çözünmez yapıdadır. Kristal yapısı ortorombik olup, dikdörtgen tabanlı düz prizmalardan oluşur; yapısında ortooktahedron biçiminde PO_4^{3-} ve eğik oktahedron biçiminde $\text{Mg}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$ bileşenleri yer alır. Saf struvit genellikle toz formunda bulunmakla birlikte, tek kristal, pıhtı veya jel formunda da mevcut olabilir. Ancak, yüksek sıcaklıklarda termal kararsızlık nedeniyle struvit, amonyum azotu veya magnezyum sodyum fosfata (MgNaPO_4) dönüşebilir (Stratful vd., 2001).

4.1. Magnezyum Amonyum Fosfat Çöktürmesinin Teorik Temelleri

Struvit oluşum süreçlerinde kristal oluşumu genellikle üç temel kavrama dayanmaktadır: aşırı doyumluk, çekirdeklenme ve kristal büyümesi. Aşırı doyumluk, çoğunlukla çözeltinin pH değeri ve iyon konsantrasyonu ile ilişkilidir ve bu iki parametre çekirdeklenme sürecini belirleyen temel itici güçler olarak kabul edilmektedir.

Kristalleşme sürecinin ikinci aşaması olan çekirdeklenme, iyonların çarpışması sonucu oluşan kristal (çekirdeklerin) meydana geldiği süreçtir. Üçüncü aşama ise, bu çekirdeklerin büyüyerek daha büyük kristallere dönüşmesini ifade eden kristal büyüme

sürecidir. Çekirdeklenme ve büyüme süreçleri, kristalleşme kinetiğinin incelenmesinde kritik öneme sahip olup, aynı zamanda kristallerin boyutunu ve morfolojik yapısını kontrol eden temel faktörlerdir (Ariyanto vd., 2014).

Bunlara ek olarak, çekirdeklenme ve büyüme süreçleri, elde edilen ürünün kalitesini belirlemenin yanı sıra, kristalleşme reaktörlerinin tasarımında da temel teorik dayanakları oluşturmaktadır Genel anlamda, bu iki süreç birbirinden bağımsız olmayıp çoğunlukla eş zamanlı olarak gerçekleşmektedir (Guan vd., 2021b).

4.2. Struvit Çöktürmesine Etki Eden Faktörler

Gerçek struvit oluşum süreçlerinde kristallerin çekirdeklenme ve büyüme davranışlarını tahmin etmek ve kontrol etmek oldukça karmaşıktır. Bunun temel nedeni, bu süreçlerin genellikle birden fazla değiştirilebilir değişkenin birleşiminden etkilenmesidir. Bu değişkenler arasında çözeltinin pH değeri, aşırı doymunluk durumu, sıcaklık, yabancı iyonların varlığı, kullanılan magnezyum kaynağı ve maddeler arasındaki molar oran gibi faktörler yer almaktadır. Bu etkileyici faktörler, maddelerin katı fazdan sıvı faza geçiş yeteneğini sınırlayabilir. Ayrıca, kristalleşme sürecinin yalnızca kinetiği ve termodinamiği değil, aynı zamanda genel tepkime mekanizması da bu parametrelerden doğrudan etkilenmektedir (Li vd., 2019a).

4.2.1. pH'nin Struvit Oluşumuna Etkisi

Kristalleşme süreci, genellikle çözeltinin aşırı doymunluk seviyesine ulaşmasıyla meydana gelir ve bu aşırı doymunluk derecesi, kristalleşmenin temel itici gücünü oluşturur. Struvit kristalleşmesini teşvik eden başlıca yöntemlerden biri iyon derişimini artırmak ya da çözeltinin pH değerini yükseltmektir. İyon derişiminin artırılmasına kıyasla, pH değerinin artırılması daha pratik bir yaklaşımdır. Struvit kristalleşmesinde pH kritik bir parametre olup, çekirdeklenme sürecinin bir göstergesi olarak kullanılmaktadır. Struvit kristalleşmesi, 7,0 ile 11,5 arasında geniş bir pH aralığında gerçekleşebilmekle birlikte, optimum pH genellikle 8,5 ile 9,5 aralığındadır. Ayrıca, pH'deki azalma hızı, kristal büyüme hızını doğrudan yansıtmakta ve elde edilen kristallerin saflığını da etkilemektedir. pH arttıkça besin maddelerinin geri kazanım verimliliği de artmaktadır (Wang vd., 2020b). Bunun nedeni, pH arttıkça ortamda H^+ iyonlarının azalması ve reaksiyonun denge doğrultusunda sağa kayarak kristalleşmeyi desteklemesidir. pH artışı ile birlikte çözeltideki aşırı doymunluk da artmakta, bu da kristal büyüme hızını artırarak partikül boyutu dağılımını

değiştirmektedir. Partikül boyutu dağılımı ise ürün kalitesini belirlemede temel bir kriterdir. Genel olarak, farklı atıksu türlerinde pH kontrolü ile hem azot ve fosfor gibi besin maddelerinin giderimi ve geri kazanımı hem de yüksek saflıkta struvit üretimi halen bir zorluk teşkil etmektedir (Rahman vd., 2014).

Ohlinger vd 2000, anaerobik sindirim atık suyu ile gerçekleştirdikleri çalışmada pH artışının struvit birikimi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bulgulara göre, pH arttıkça aşırı doymunluk oranı yükselmekte ve bu da kristal büyüme hızını artırmaktadır. Aynı reaksiyon süresi içinde yüksek pH, daha küçük ortalama kristal boyutlarına neden olmaktadır. Le Corre vd., 2009 ise, pH değişiminin struvit kristallerinin zeta potansiyelini etkileyerek aglomerasyon eğilimini zayıflattığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca, pH çözeltideki NH_4^{+} 'in NH_3 'e dönüşümünü de önemli ölçüde etkilemektedir. pH 10,5'in altında olduğunda, çökelti içindeki NH_4^{+} -N miktarı pH arttıkça kademeli olarak azalırken, pH 10,5'e ulaştığında bu azalma keskinleşmektedir. Yüksek pH değerlerinde ise, NH_4^{+} -N derişimi düşmekte ve azot, NH_3 gazı olarak uçucu hale geçerek çevreye zarar verebilecek şekilde atmosfere salınmaktadır.

4.2.2. Magnezyum Kaynağının Struvit Oluşumuna Etkisi

Struvit oluşum sürecinde, atıksu sistemlerinde genellikle Mg^{2+} konsantrasyonu düşük olduğundan, uygun bir magnezyum kaynağının seçimi kristalleşme verimliliği açısından büyük önem arz etmektedir. Magnezyum kaynağı olarak çözünürlüğü düşük kimyasallar (örneğin; magnezyum sülfat (MgSO_4), magnezyum hidroksit ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), magnezyum karbonat (MgCO_3) ve magnezyum oksit (MgO)) kullanıldığında, bu bileşiklerin çözünmesini sağlamak amacıyla ön çözündürme adımında nitrik asit (HNO_3) veya hidroklorik asit (HCl) gibi asitlerin ilavesi gerekebilir. Bu durum ise arıtma maliyetlerini artırmakta ve elde edilen çökelti ürünlerinin saflığını olumsuz etkileyebilmektedir (Wang vd., 2018).

Struvit kristalleşmesi, çevresel fayda sağlarken kaynakların korunmasına katkı sunmaktadır. Ancak, yüksek işletme maliyetleri bu teknolojinin yaygın kullanımının önündeki en büyük engellerden biridir. Genel olarak, struvit üretiminde maliyetler kimyasal reaktifler, enerji tüketimi ve taşıma giderleriyle doğrudan ilişkilidir. Bu maliyet kalemleri arasında en büyük payı kimyasal reaktifler oluşturmaktadır. Bu nedenle, düşük maliyetli veya alternatif magnezyum kaynaklarının araştırılması

yönünde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Düşük maliyetli magnezyum kaynaklarının kullanımı, toplam işletme maliyetlerinde %18 ile %81 arasında tasarruf sağlayabilmektedir. Bu doğrultuda, uygun bir magnezyum kaynağının seçimi, struvit kristalleşme sürecinin maliyet etkinliğini artırmanın en doğrudan yoludur (Huang vd., 2017a).

Kristalleşme sürecinde kullanılacak magnezyum tuzları, çözünürlüklerine göre sınıflandırılabilir: yüksek çözünürlüklü olanlar (örneğin $MgCl_2$ ve $MgSO_4$) ve düşük çözünürlüklü olanlar (örneğin MgO , $Mg(OH)_2$ ve $MgCO_3$). Düşük çözünürlüklü tuzlar, düşük maliyetli ve alkali özellikleri sayesinde pH yükseltici kimyasal kullanımını azaltmaları açısından avantaj sağlamaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda besin maddesi geri kazanımı açısından magnezyum tuzlarının etkinlik sıralaması şu şekilde belirlenmiştir (Wang vd., 2018) (Denklem 4.2):



Ancak, düşük çözünürlüklü tuzların kullanılması durumunda, çözünürlüklerini artırmak için asit ilavesi (örneğin HCl veya HNO_3) gerekebileceğinden, bu durum çözeltinin pH'ı üzerinde olumsuz etki yaratabilir. Bu kapsamda, deniz suyu ve doğal mineralli su iki ideal alternatif olarak öne çıkmaktadır (Tablo 4.1)

Deniz suyu ve atıksu karışımının 3.3 molar oranıyla kullanıldığı bir çalışmada, idrardan azot ve fosfor geri kazanımını %98 verimle gerçekleştirmişlerdir. Her ne kadar deniz suyu kullanımında ilave pompalama gücü, iş gücü ve bakım maliyetleri dikkate alınması gerekse de, sahil bölgelerinde bol rezerv ve coğrafi yakınlık sayesinde büyük bir avantaj sunmaktadır (Maaß vd., 2014).

Tablo 4.1. Struvit kristalizasyonu için çeşitli alternatif magnezyum kaynakları (Gunay vd., 2008)

Mg Kaynağı	Açıklama	Atıksu Türü	Kaynak
Deniz suyu	Magnezyum kalsit ve kalsit oluşumu sağlar. Kristal büyüme kinetiğini iyileştirir. Çökelme verimi %90'ı, geri kazanım verimi ise %87'yi aşmıştır; 110 µm boyutunda struvit kristali oluşmuştur. %70 P ve %46 N geri kazanımı sağlanmıştır.	İdrar, evsel atıksu, sentetik atıksu	Shaddel vd., (2020a)
Doğal mineralli su	Saf struvit başarıyla üretilmiştir. MgCl ₂ ye kıyasla daha düşük azot geri kazanım verimi.	Ham sindirilmiş atıksu, domuz çiftliği atıksuyu, sentetik atıksu, idrar	Pepè Sciarria vd., (2023)
Manyezit	Yüksek saflıkta ve katma değeri yüksek struvit ürünü elde edilmiştir.	Anaerobik çamur sindirimi atıksuyu, domuz çiftliği atıksuyu	Romero-Güiza vd., (2015)

Doğal mineralli su dışında, magnezyum içeriği yüksek bir diğer alternatif kaynak da magnezittir. Magnezit, aynı anda amonyum, askıda katı madde ve fosfor geri kazanımını etkin şekilde sağlayabilmektedir. MgCl₂ ile karşılaştırıldığında, pirolitik magnezit kullanımı işletme maliyetlerinde %34'e varan bir tasarruf sağlamaktadır. Ancak, büyük hacimli atıksu arıtımlarında acı su ve magnezit tedariki zaman zaman kesintiye uğrayabilmektedir. Bu gibi durumlarda, uygulamada tek bir magnezyum kaynağı yerine birden fazla kaynağın birlikte kullanılması önerilmektedir (Huang vd., 2017a).

4.2.3. Mol Oranının Struvit Oluşumuna Etkisi

Struvit kristalleşme sürecinde tepkimeye giren iyonların derişimi, aşırı doygunluk durumunun belirlenmesinde kritik bir faktördür. Çözeltideki iyonların mol oranları, özellikle Mg/P, N/P ve Mg/N oranları, struvit kristalleşmesi üzerinde önemli rol oynar ve bu oranlar üzerine pek çok araştırma yapılmıştır. Mg^{2+} , NH_4^+-N ve PO_4^{3-} iyonlarının mol oranlarının azot ve fosfor geri kazanımı üzerindeki etkisini araştırılmıştır. Sonuçlar, yüksek Mg:N:P mol oranlarında N ve P geri kazanımının daha yüksek olduğunu göstermiştir. Ayrıca, Mg/P oranı 1'in altında olduğunda bu geri kazanım verimliliği azalmıştır. Mg:N:P oranının 1:1:1 olması, istenen geri kazanım verimliliğini sağlamak için yeterlidir.

Koralewska vd 2009 ise Mg/P oranının, struvit kristallerinin ortalama boyutu üzerinde etkili olduğunu tespit etmişlerdir. pH 9,0 ve Mg:P oranı 1:1.2 koşullarında 30 dakikada oluşan kristallerin ortalama boyutu 42 μm olarak ölçülmüştür.

Shih vd 2017, fosfor geri kazanımı için en uygun struvit kristalleşme koşullarını araştırmış ve Mg:N:P mol oranının 1.3:4:1 olduğu durumda fosfor geri kazanım veriminin %95,8 e ulaştığını rapor etmişlerdir.

Guan vd 2021, çalışmasında ise, farklı magnezyum kaynaklarının fosfor geri kazanımı üzerindeki etkisi araştırılmış ve $MgCl_2$ kullanımıyla %94,55 lik en yüksek fosfor geri kazanım verimi elde edilmiştir; bunu MgO ve $Mg(OH)_2$ takip etmiştir. Ancak, magnezyum kaynağının aşırı kullanımı, struvit yerine $Mg_3(PO_4)_2$ oluşumuna neden olabilir ve bu da elde edilen çökeltinin saflığını azaltır.

Bu durum yalnızca kristal saflığını olumsuz etkilemekle kalmaz, aynı zamanda çevresel sorunlara ve işletme maliyetlerinin artmasına da yol açar. Bu nedenle, azot ve fosforun sürdürülebilir ve verimli geri kazanımı için uygun Mg/N/P mol oranının sağlanması büyük önem arz etmektedir.

4.2.4. İyonların Struvit Oluşumuna Etkisi

Atıksular, genellikle çeşitli anyon ve katyonlar içerir ve bu iyonlar kristal yapıya katıldığında, struvit kristalleşmesinde indüksiyon süresi, besin maddelerinin geri kazanımı ve geri kazanımı ile ürün saflığı üzerinde önemli etkiler yaratabilir. Ayrıca, struvitin yavaş salınımlı gübre olarak yaygın kullanımı nedeniyle, bu iyonlar özellikle ağır metaller olmak üzere, atıksudan çevreye struvit aracılığıyla taşınabilir ve bu durum hem ekosistem hem de insan sağlığı açısından potansiyel riskler doğurur.

Struvit kristalleşmesi sürecinde en yaygın görülen iyonlardan biri Ca^{2+} iyonudur. Bu iyon, Mg^{2+} iyonu ile rekabete girerek kalsiyum fosfat oluşumuna neden olur ve bu da struvit ürünlerinin saflığını düşürür. Literatürde, çözeltideki Ca:Mg oranı 0.5 olduğunda, Ca^{2+} derişiminin artmasıyla Mg:P bileşikleri arasında dönüşüm gerçekleştiği ve düzensiz kristallerin oluştuğu bildirilmiştir. Ayrıca, Ca^{2+} içeren çözeltilerde Mg^{2+} derişiminin artırılması, struvitin Ca:Mg ye dönüşmesine yol açarken, kararsız Ca-P bileşikleri ise stabil hidroksiapatite (HAP) dönüşmektedir (Guan vd., 2021c). Bu nedenle, yüksek saflıkta struvit elde etmek için ön arıtma sürecinde Ca içeriğinin etkisinin ortadan kaldırılması büyük önem taşır.

Ağır metal iyonları da tarımsal, belediye ve metal eritme atıksuları dahil olmak üzere birçok farklı kaynakta sıkça karşılaşılan kirleticilerdir. Bu iyonlar, struvit kristalleşmesi sırasında çökeltinin içine karışarak daha az kararlı yapılar oluşturur. Atıksudaki ağır metal iyonlarının hem derişimi hem de oksidasyon durumu, struvit kristalleşme süreci üzerinde belirleyici etkiye sahiptir. Son yıllarda, araştırmacılar bu iyonların struvit oluşumu üzerindeki etkileri ve etki mekanizmaları üzerine daha fazla odaklanmıştır (Lu vd., 2020).

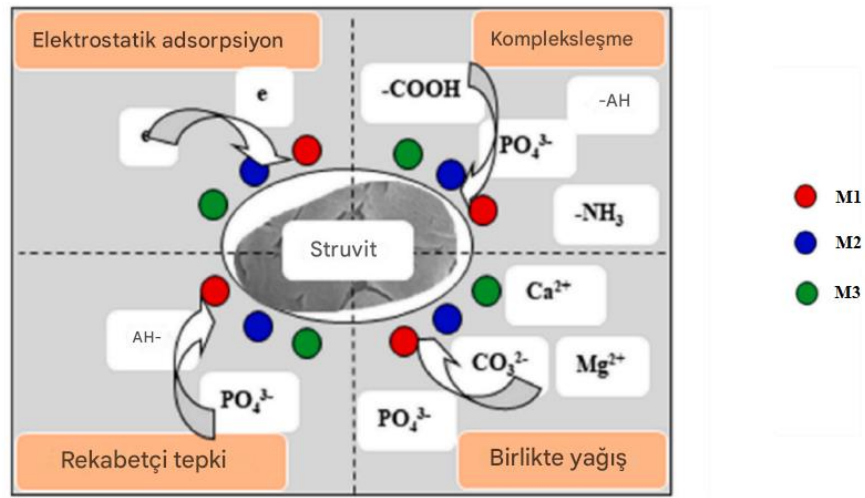
Ağır metal iyonlarının struvit yüzeyine adsorpsiyon mekanizması gösterilmiştir (Şekil 4.3a). Özellikle Cu iyonlarının bulunduğu ortamlarda Cu- PO_4 , Cu- NH_3 ve Cu-OH oluşumu gözlenirken; Zn iyonları için yalnızca Zn- PO_4 ve Zn-OH kompleksleri gözlenmiştir. Bu durum, düşük ağır metal iyonu konsantrasyonlarında kristalleşmenin belirli bölgelerde engellendiğini göstermektedir

Cu-OH, Cu- PO_4 ve Zn-OH oranlarının artmasıyla birlikte, ağır metallerin struvit kristalleriyle olan etkileşim mekanizmaları değişiklik göstermektedir. Özellikle Cu^{2+} iyon derişimi arttıkça, Cu(OH) $_2$ oluşur ve bu bileşik hem kristal yüzeyine çökelir hem de struvit kristal kafesi içine entegre olabilir (Peng vd., 2017b).

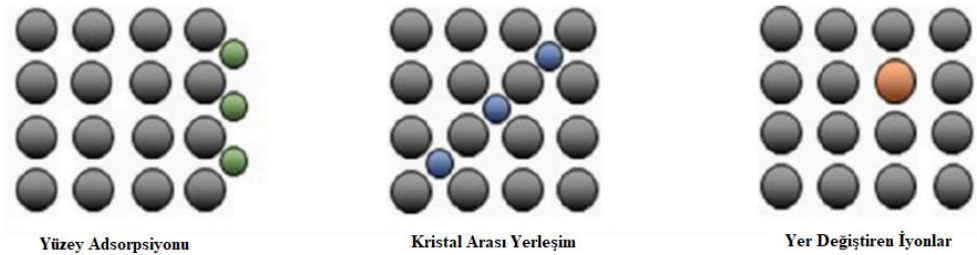
Pb^{2+} iyonları ise düşük konsantrasyonlarda Pb-OH ve Pb- PO_4 formlarında kristal yüzeyinde bulunurken, konsantrasyon 10 mg/L'yi aştığında Pb^{2+} iyonları $\text{Pb}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ bileşiğine dönüşerek struvit kristal saflığını önemli ölçüde bozar. Bu nedenle, ağır metal iyonlarının yüksek konsantrasyonda bulunduğu atıksular için, bu iyonların M- PO_4 (ağır metal fosfatı) veya M-OH (ağır metal hidroksiti) formlarında giderilmesi halen en etkili yöntemdir.

Teorik olarak, ağır metal iyonlarının struvit ile etkileşim mekanizması yüzey adsorpsiyonu, kristal arası boşluklara yerleşme ve iyon değiştirme olmak üzere üç başlıkta toplanabilir (Şekil 4.3). Düşük konsantrasyonlarda, bu iyonlar struvit tarafından hidrojen bağları, elektrostatik çekim ve koordinasyon bağları yoluyla tutulabilir. Bu etkileşimler FTIR, SEM, TEM ve XPS gibi karakterizasyon teknikleriyle analiz edilebilir (Tansel vd., 2018). Yüzey adsorpsiyonunda en baskın mekanizma hidrojen bağlarıdır; bunu elektrostatik çekim ve koordinasyon izler (Peng vd., 2018). Bu süreçte, önceden oluşmuş kristal partikülleri struvit yüzeyine yapışarak büyümeye devam eder.

(A)



(B)



Şekil 4.3. Ağır metal iyonlarının struvit kristalizasyonu üzerindeki etkisi. **(a)** Ağır metal iyonları ile struvit arasındaki potansiyel etkileşim mekanizmaları. Burada M1, M2 ve M3 çeşitli ağır metal iyonlarını temsil etmektedir. **(b)** Ağır metal iyonlarının struvit kristallerinin yüzeyine adsorpsiyonuna ilişkin olası mekanizma (Liu vd., 2021).

Ağır metal iyonlarının kristal yapıdaki Mg^{2+} , NH_4^+ ve PO_4^{3-} iyonlarının yerini alması da muhtemel bir mekanizmadır. Özellikle ağır metal iyonlarının konsantrasyonu arttığında, bu yer değişimi sonucu ürünün morfolojisinde değişiklikler meydana gelir (Lu vd., 2021).

Mg iyonunun iyon yarıçapı ve kovalent yük açısından Cu, Zn ve Pb ile benzerliği nedeniyle, Zn^{2+} ve Cu^{2+} gibi ağır metal iyonları Mg^{2+} yerine geçebilir. Bu durumda $ZnNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ ve $CuNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ gibi yapılar oluşur.

Atıksulardaki anyonlar açısından değerlendirildiğinde, CO_3^{2-} , Cl^- ve SO_4^{2-} gibi iyonlar daha çok indüksiyon süresini ve geri kazanım verimliliğini etkiler, ancak struvit oluşum sürecini engellemezler. Bununla birlikte, çoğu çalışma sentetik atıksular üzerinde yapıldığından, çoklu anyonların birlikte bulunduğu ortamlarda struvit kristalleşme mekanizmaları net değildir. Bu nedenle, gelecekte bu konuda daha fazla araştırma yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

4.2.5. Organik Maddenin Struvit Oluşumuna Etkisi

Struvit kristalizasyonu sürecinde organik maddenin etkisi, temel olarak organik maddenin negatif yüklü fonksiyonel gruplarının çözeltideki serbest Mg^{2+} iyonlarıyla kompleksleşmesiyle ilişkilidir. Bu kompleksleşme, organik moleküllerin struvit kristallerine bağlanmasına neden olmakta ve kristal saflığını olumsuz yönde etkilemektedir (Zhou vd., 2015).

Organik maddenin atıksularda N ve P geri kazanımı ile struvit kristallerinin çökeltimi üzerindeki etkisi, sistematik olarak incelenmiştir Domuz çiftliği atıksuyunun struvit kristalizasyonu ile arıtıldığı bir çalışmada, Mg:N:P oranı 1:1:1 ve pH değeri 9,5 olarak ayarlandığında fosfor geri kazanımının %92'ye kadar ulaştığı, aynı zamanda organik maddenin de yaklaşık %22 oranında uzaklaştırıldığı rapor edilmiştir (Foletto vd., 2013).

Kemacheevakul vd 2014, idrarda bulunan organik kirleticiler (örn. tetrasiklin, eritromisin ve norfloksasin) ile depolama süresi arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Depolama süresi 5 gün olduğunda, elde edilen struvit ürünlerinde organik madde kalıntısı %1'in altına düşmüştür. Bu sonuç, struvitin depolanma süresinin ürün içerisindeki organik madde miktarını azaltıcı bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Kristal çökeltimi açısından değerlendirildiğinde, organik maddenin varlığı genellikle struvit oluşumu açısından olumsuz bir etkiye sahiptir. Zira çökeltme süreci ilerledikçe, organik bileşiklerin büyük bir kısmı struvit kristallerinin yüzeyine adsorbe olur. Organik madde içeren struvit ürünlerinin yavaş salınlı gübre olarak bitki yetiştiriciliğinde kullanılması ve bu ürünlerin gıda zincirine dahil olması durumunda, insan sağlığı ve çevre açısından olumsuz etkiler söz konusu olabilir (Wang vd., 2016).

Bu nedenle, struvit kristalizasyonu sürecinde organik maddelerin sisteme girişinin önlenmesi büyük önem taşımaktadır. Tablo 4.2’de, bazı tipik organik maddelerin struvit kristalizasyonu sürecine etkilerini açıklayan mekanizmalar özetlenmiştir.

Tablo 4.2. Organik maddenin struvit kristalizasyonu üzerindeki etkisi (Rabinovich ve Rouff (2021))

Tür	Açıklama	Atıksu Türü	Kaynak
Organik asit	Organik asit ile Mg^{2+}/NH_4^+ arasındaki kompleksleşme	Domuz çiftliği atıksuyu	Song vd., (2014)
Humik maddeler	Mg^{2+} iyonları ile humik maddelerin rekabetçi etkileşimi; çekirdeklenme sürecini engelleme	Sentetik atıksu	Zhou vd., (2015)
Trisodyum sitrat	Struvit kristallerinin tutunması için yüzey sağlaması	İdrar	Prywer vd., (2015)
Veteriner antibiyotikleri	Antibiyotik adsorpsiyonları; struvit kristalizasyonu sırasında organik madde ile üçlü kompleks oluşumu	Domuz çiftliği atıksuyu	Lou vd., (2018)
Fenolik organikler	Kalsiyumun struvit kristalizasyonunu engelleme etkisini ortadan kaldırabilir	Süt endüstrisi atıksuyu	Rabinovich ve Rouff (2021)
EDTA	Struvit kristal boyutunu küçültür ve saflığını etkiler	Sentetik atıksu	Prywer ve Olszynski (2013)

5. DEPOLAMA SAHASI SIZINTI SULARINDAN BESİN MADDELERİNİN GERİ KAZANIMI

Besin geri kazanım teorisi, her şeyi mümkün olduğu kadar uzun süre koruma ve kullanma uygulamalarını kapsar. Bu, düzenli depolama işletmecilerini, atık akışlarından alınan makro besin maddelerini faydalı kaynaklara dönüştürmeye zorlar. Depolama sahası sızıntı suyu gibi atık akışı, su-gıda-enerji bağlantısındaki besinlerin (N, P) kaynak geri kazanımını desteklemek için kritik öneme sahiptir. Bitkisel üretimde yüksek verimi korurken, sıvı atıklardan kaynaklanan besin kaybını en aza indirmek için besin yönetimi stratejilerinin benimsenmesi önemlidir (Lo vd., 2009). Bu amaçla, sürdürülebilir bir depolama sahası yönetimi, sızıntı suyu arıtılabilirliğinin değerlendirilmesinde bütüncül bir yaklaşım gerektirir. Atığın kaynak değerini anlamak için, düzenli depolama sızıntı suyu arıtımının odak noktası atık bertarafından, kaynakların geri kazanılması ve yeniden kullanılmasına kaymaktadır. Bir kaynak geri kazanım yaklaşımının fizibilitesi, tekno-ekonomik fizibiliteye ve geri kazanımın kendisi tarafından elde edilebilecek çevresel faydalara dayanır. Kaynakları geri kazanırken atık suyu verimli bir şekilde arıtan teknoloji, arıtma maliyetlerini tamamen karşılayabilir ve hatta karlı olabilir. Azot gibi besleyici kirleticiler, çamur şeklindeki kaynakları temsil eder (Chen vd., 2008).

Makro besin maddesi olarak çamurdaki azot toprak verimliliğini korumak için geri kazanılması ve geri dönüştürülmesi gerekir. Besinler gübre yoluyla toprağa geri dönüştürülmezse, toprak verimliliğini kaybeder. Bir kez uygulandığında, besinler bitkiler tarafından tüketilerek küresel gıda güvenliğini sürdürür. Tarımsal üretim üzerindeki gereklilik nedeniyle, besin maddelerinin gübreler aracılığıyla toprağa verilmesi gerekmektedir (Kurniawan vd., 2018). Atık suların içeriğinde bulunan besin maddelerinin geri kazanılarak mineral gübre formuna dönüştürülmesi, hem çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlamakta hem de tarımsal üretimin kimyasal gübre tedarikine olan bağımlılığını azaltmaktadır. Bu yaklaşım, gübre arzındaki dalgalanmaların ve kıtlıkların olumsuz etkilerinin önüne geçilmesine olanak tanırken, aynı zamanda gıda üretiminde sürdürülebilirliğin artırılmasına hizmet etmektedir. Elde edilen gübre ürünlerinin pazara sunulması ile gübre üretim kapasitesinin artması, uzun vadede piyasa fiyatlarının dengelenmesini de mümkün kılabilir.

5.1. Struvit (Magnezyum Amonyum Fosfat)

Depolama sahasından üretilen sızıntı suyu toplam amonyum azotu açısından zengindir. Bu nedenle, depolama sahası sızıntı suyunun uygun şekilde toplanması ve arıtılması zorunludur; aksi takdirde ciddi çevre sorunlarına yol açar. Genel olarak biyolojik teknikler, depolama sahası sızıntı suyunun arıtılmasında uygun maliyetlidir (Chemlal vd., 2014).

Bununla birlikte, sızıntı suyundaki yüksek toplam amonyum konsantrasyonu, biyolojik yöntemlerin performansını belirgin şekilde etkiler. Bu nedenle, biyolojik süreçlerin performansını iyileştirmek için toplam amonyum konsantrasyonunun giderilmesi zorunludur. MAP çökeltme tekniği, toplam amonyum azotunu gidermenin en etkili ve verimli yoludur. Ayrıca struvit yavaş salınan bir gübredir ve doğası gereği çevre dostudur. Ayrıca, struvitin gübre olarak uygulanması, geleneksel gübrelerin kullanımıyla karşılaştırıldığında topraktan N₂O emisyonunu en aza indirir.

Struvitin çökmesini etkileyen çeşitli faktörler arasında pH, magnezyum, fosfat ve amonyum iyonlarının molar oranı ve süper doygunluk yer alır. Genel olarak, maksimum struvit üretimi için optimum koşullar bir parametre değiştirilerek tahmin edilirken geri kalan parametreler sabit tutulmaktadır. Bu da yorucu ve zaman alıcı bir süreçtir. Bu nedenle yukarıda bahsedilen problemin üstesinden gelmek için araştırmacılar çok değişkenli istatistiksel modelleri kullanmaya başlamışlardır.

Struvit, domuz, süt ürünleri, depolama sahası sızıntı suyu, idrar, anaerobik atık su ve kanalizasyon çamuru gibi çeşitli atık su türlerinden geri kazanılabilir. Teorik gübre değeri, kaynağa ve geri kazanım sürecine bağlı olarak değişen %12,5 P, %5,7 N ve %9,9 magnezyumdur (Mg)(Tablo 5.1). Küçük miktarlarda makro ve mikro besinler de mevcut olabilir. Ancak ağır metal içerikleri, yaygın olarak bulunan mineral gübrelerle karşılaştırıldığında daha düşüktür ve Cd konsantrasyonları tespit limitlerinin altındadır. Genellikle patojen içermez ve basit omurgasız ve omurgalı biyoanalizleri için toksik değildir (Naveed vd., 2018). Struvit çökeltileri magnezyum amonyum fosfat gübresi olarak kullanılabilir ve aynı zamanda su yollarına boşaltılmadan önce atık sudaki atık P ve N konsantrasyonlarının azaltılmasına da katkıda bulunur. Yenilenebilir bir kaynak olmasının yanı sıra struvit, sudaki düşük çözünürlüğü sayesinde ek çevresel faydalar sağlar. Suda %1-5 aralığında çok az çözünür olduğundan ve hafif asitlerde neredeyse %100 çözünür olduğundan, bitkiler

köklerden organik asitler ürettiğinde rizosferde çözünürlüğü artar. Süzme düzeni toprağın nitrifikasyonundan, topraktaki yerleşiminden ve struvit parçacıklarının boyutundan güçlü bir şekilde etkilenmesine rağmen, 1-3 gün içinde tamamen süzülebilen mineral gübrelere kıyasla besinler daha uzun süre salınır. Yavaş salınan bir gübre, büyüme mevsimi boyunca bitkilerin besin talebini karşılayarak ve kullanım verimliliğini artırarak mahsul büyümesi için kademeli olarak N ve P sağlayabilir (Withers vd., 2014). Bu nedenle struvit, çevreye minimum düzeyde etki yaparken azotlu ve fosfatlı gübrelere etkin bir alternatif olarak düşünülebilir.

Tablo 5.1. Struvit çökmesi ve gübre olarak kullanımı (Withers vd., 2014)

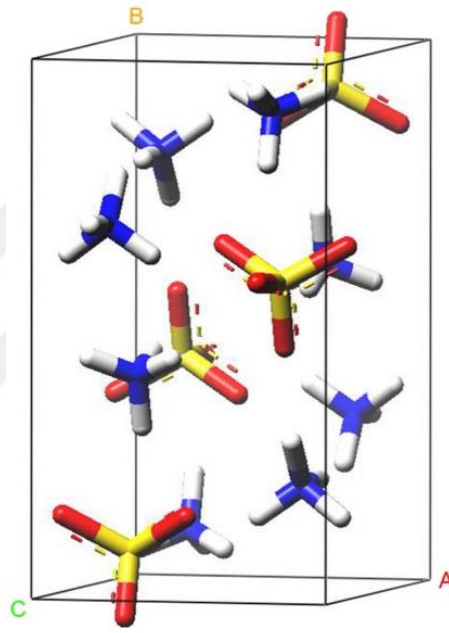
Giriş Parametreleri	Struvit	Özellikler	Uygulamalar
Besin açısından zengin atık su kaynağı			Bitkilere fosfat ve amonyum açısından zengin besin maddeleri sağlar.
Magnezyum tuzu	Magnezyum Amonyum Fosfat ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$)	Magnezyum Amonyum	Toprak, bitki, hayvan, insan, toprak döngüsünde P döngüsünün kapanmasını sağlar.
pH 8-9		Fosfat	Çevre kirliliğini ve ötrofikasyonu azaltır.
Sıcaklık: 15-25°C			Fazla besin maddelerinin etkin bir şekilde taşınmasını sağlar

5.2. Amonyum Sülfat (AS)

Amonyum azotu, üre (%45-46 N), amonyum nitrat (%34 N) ve amonyum sülfat (%21) gibi farklı N gübre formlarını türetmek için ana hammaddedir. Bu azot gübrelere kimyasal formülü $(NH_4)_2SO_4$ olan amonyum sülfat (AS) hem azot (N) hem de kükürt (S) için iyi bir kaynaktır (Şekil 5.1) (Denklem 5.1).



Amonyum sülfat, azot ve kükürt gibi önemli besinleri sağladığı için bitkilerin büyümesi için temel bir bileşendir. Amonyum sülfat, hızlı bir sülfat salınımının anahtarıdır ve aynı zamanda, parçalanabilir olma ek avantajıyla birlikte sülfürün uzun bir sezon boyunca kullanılabilir olmasını sağlar (Kandil vd., 2017). Amonyum sülfat, farklı yöntemlerle elde edilir; çelik endüstrisinde amonyak gazının H_2SO_4 içinde emilmesiyle bir yan ürün olarak, sentetik NH_4 'ün H_2SO_4 ile reaksiyonu, çeşitli kimya endüstrilerinden gelen atık suları olarak örneklendirilebilir. Amonyum sülfatın bir diğer kaynağı da ortamda büyük miktarda kükürt dioksit gazı üreten kömürlü termik santrallerdir.



Şekil 5.1. Amonyum sülfatın kristal yapısı (Kandil vd., 2017).

Amonyum sülfat üretiminde yaygın olarak uygulanan süreçler, öncelikle kükürt dioksit (SO_2) gazının sülfürik aside (H_2SO_4) dönüştürülmesini, ardından bu asit ortamına amonyak (NH_3) gazı verilerek kristal formda amonyum sülfat (AS) elde edilmesini içermektedir. Ancak, bu yöntemlerin çoğu yüksek enerji ve kimyasal tüketimi gibi çeşitli dezavantajlara sahip olup, daha düşük maliyetli ve sürdürülebilir alternatiflerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, yapılan bir çalışmada, %80 oranında AS geri kazanım verimine ulaşılmış olması, yöntemin azot içeren bileşiklerin geri kazanımı açısından yüksek potansiyel taşıdığını ortaya koymuştur. Elde edilen bu bulgular, AS çöktürme yönteminin yalnızca çevresel yükü azaltmakla kalmayıp aynı zamanda atıksulardan ekonomik değeri yüksek bir gübre hammadde üretilebileceğini de göstermektedir (Kumar vd., 2023).

6. STRUVİT KULLANIMININ ÇEVRE VE EKONOMİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Atıksu arıtma sistemleri, bazı çevresel olumsuzluklara yol açsa da, genel olarak çevresel faydalar bu olumsuzlukların çok ötesindedir (Zang vd., 2015). Bu durum, atıksu arıtma uygulamalarını son derece arzu edilir hale getirmektedir. Struvit geri kazanımı teknolojisi, maliyet tasarrufu ve yavaş salınımlı gübrelerin ikincil kullanımı gibi avantajlar sayesinde giderek daha cazip bir hale gelmiştir. Bununla birlikte, struvit kristalizasyonu teknolojisinin neden olduğu ek çevresel etkilerin, sağladığı çevresel faydalardan fazla olabileceğine dair endişeler de mevcuttur. Bu nedenle, struvit kristalizasyon sürecine ilişkin ekonomik maliyet ve çevresel etki analizlerinin bütüncül bir şekilde değerlendirilmesi, bu teknolojinin gerçek dünya uygulamaları açısından teşvik edilmesinde kritik öneme sahiptir. Struvit çökeltmesinde kullanılan yüksek maliyetli magnezyum tuzları veya diğer çöktürücü maddelerin üretim süreçleri genellikle karmaşık olup yüksek CO₂ emisyonlarına yol açmaktadır. Kristalizasyon sürecinde kimyasal reaktifler, enerji tüketimi ve iş gücü gibi faktörler, ekonomik ve çevresel analiz açısından belirleyici unsurlardır (Guan vd., 2021a).

Örneğin, 3,5 m³ atıksu arıtımı için ön ekonomik analiz yapmış ve belediye atıksuyu için bir işlemde arıtma maliyetinin 0,8 USD/m³ olduğunu, oluşan struvitin satışından ise 2,8 USD/m³ gelir elde edilebileceğini ortaya koyulmuştur. Bu durum, struvit teknolojisinin kısa sürede yatırım geri dönüşü sağlayabileceğini göstermektedir (Mavhungu vd., 2020).

Başka bir çalışmada, yaşam döngüsü analizi ile yapılan karşılaştırmalarda struvit kristalizasyonunun geleneksel N ve P geri kazanım teknolojilerine kıyasla daha düşük çevresel yük ve daha yüksek ekonomik fayda sağladığını ortaya koyulmuştur. Bu süreçte iklim değişikliğine neden olan CO₂ emisyonu 5,01 kg CO₂-eşdeğeri/m³'ye, fosil yakıt tüketimi ise 1,89 kg petrol-eşdeğeri/m³'ye kadar düşmüştür.

Struvit kristalizasyonunda kimyasal tüketimi en büyük çevresel yüklerden biri olarak öne çıkmakta olup, bu sürecin sürdürülebilirliğini sağlamak için kimyasal kullanımının azaltılması veya çevre dostu alternatiflerin tercih edilmesi büyük önem arz etmektedir. Ayrıca, yavaş salınımlı gübre olarak kullanılan struvitin ekonomik ve çevresel faydaları, gübreleme sıklığını azaltarak fosil yakıt tüketimini ve CO₂ emisyonlarını düşürmesi sayesinde daha da artmaktadır (Rahman vd., 2011). Elde

edilen struvit ürünlerinin tarım arazilerine taşınması da çevresel etki açısından önemli bir faktördür. Çoğu çalışmada atıksu arıtma tesislerine yakın çiftlikler taşıma noktası olarak seçildiğinden, taşıma kaynaklı çevresel etki genellikle ihmal edilebilir düzeydedir. Ancak taşıma mesafesi arttıkça bu etkiler önemli ölçüde artmaktadır (Sena vd., 2020).

Struvit, toprakta yavaş salımlı gübre olarak kullanıldığında da çeşitli çevresel faydalar sağlar. Yavaş salımlı gübreler, uygulama sonrası ihtiyaç duyulan besin maddelerini biyolojik bozunma alanlarına sızacak şekilde kontrollü olarak serbest bırakarak, geleneksel ticari gübrelere kıyasla kirleticilerin giderilmesini daha uzun süreli ve etkili hale getirir (Mbanaso vd., 2023). Bununla birlikte, struvitin toprakta yavaş salımlı gübre olarak kullanılması çevresel açıdan vazgeçilmez faydalar sunsa da, bu kullanım alanına ilişkin herhangi bir yasa veya düzenleme henüz bulunmamaktadır. Ayrıca, her struvit ürünü yavaş salımlı gübre özelliğine sahip değildir. Bazı struvitler, antibiyotikler, ağır metal iyonları ve toksik kirleticiler içerebilir; bu maddeler toprağa uygulandığında çevresel kirliliğe ve toprakta yük artışına neden olabilir. Aşırı struvit gübrelemesi, toprak pH'nın yükselmesine ve bu durum da mikrobiyal toplum yapısında ve azot döngüsüne katılan bakteriler üzerinde olumsuz etkilere yol açarak çevresel yükü artırabilir. Buna karşın, uygun dozda struvit gübrelemesi, geleneksel ticari gübrelere kıyasla %1,2 oranında daha az N₂O emisyonuna neden olmakta ve ton başına 85 \$'lık ek bir ekonomik değer yaratmaktadır (Wang vd., 2023a). Bu nedenle, struvitin yavaş salımlı gübre olarak toprakta kullanımı için yasal standartların ve düzenlemelerin oluşturulması gereklidir.

7. SIZINTI SULARINDAN ELDE EDİLEN STRUVİTİN KONTROLLÜ SALINIM ÖZELLİKLERİ VE TARIMSAL UYGULAMALARDAKİ ETKİNLİĞİ

Struvitin gübre olarak potansiyeli ilk kez 1858 yılında önerilmiştir. Bu, yavaş salınım özelliği sayesinde bitki köklerinde yanmaya neden olmadan toprağa uzun süreli besin maddesi sağlayabilmesiyle ilişkilidir. Struvit, P içeriği, koku yapmaması, granüler formu, çamurumsu olmaması ve kimyasal gübrelere sürdürülebilir bir alternatif oluşturabilmesi gibi özellikleriyle öncelikle gübre olarak kullanılmaktadır. Fosfora ek olarak, struvit ve bitki gelişimi için gerekli olan bitkiler tarafından kolaylıkla alınabilen N ve Mg^{+2} gibi diğer önemli besin maddelerini de içermektedir. Struvitin kimyasal bileşimine göre NPK (azot-fosfor-potasyum) değeri yaklaşık olarak 6:29:0:10 (Mg) şeklindedir (Krishnamoorthy vd., 2021). Ancak, proses koşullarına bağlı olarak potasyum (K-struvit) ve sodyum (Na-struvit) içeren struvit analogları da oluşabilmektedir (Yesigat vd., 2022).

Struvit alkali koşullarda oluşmakta, ancak çözünmesi asidik ortamlarda gerçekleşmektedir. Struvitin çözünürlük çarpanı $4,37 \times 10^{-14}$ ile $3,89 \times 10^{-10}$ arasında değişmektedir. Düşük çözünürlüğü, struvitin kaybını azaltmakta ve bitki kök salgıları (malat, sitrat vb.) ile birlikte biyotik ve abiyotik bileşenlerle etkileşimi sayesinde besin maddelerinin bitkilere salınımı kolaylaştırmaktadır. Organik asitlerdeki çözünürlük, kullanılan asit türüne, atıksuyun kaynağına ve struvitin saflığına bağlıdır. Benzer şekilde, bu asitlerin kökler tarafından salınımı da bitki türlerine göre farklılık gösterebilmekte, bu durum bitkilerin struvite verdiği yanıtı etkileyebilmektedir. Toprak pH'ı, yapısı, gözenekliliği ve dokusu, struvit çözünürlüğünü ve dolayısıyla ürün verimini etkileyen başlıca parametreler arasındadır (Ahmed vd., 2018).

Toprak mikrobiyotası tarafından gerçekleştirilen nitrifikasyon süreci, struvitten nitrat salınımı sağlayarak bitkilere uzun süreli besin maddesi temin eder ve bu durum bitki sağlığını olumsuz etkilemeden daha yüksek miktarda struvit uygulanmasına olanak tanır. Bununla birlikte, bitkilerin azot ihtiyacı struvitin sağladığı azot miktarından daha yüksek olduğundan, azot takviyesi amacıyla yüksek dozda struvit uygulaması toprak pH'ını artırarak çözünürlüğü olumsuz etkileyebilir. Ayrıca, magnezyum birikimi topraktaki kalsiyum:magnezyum oranını (0,5:1 – 20:1) bozarak hidrolik iletkenlik ve agrega stabilitesini etkileyebilir. Bu nedenle, struvit ile birlikte

başka gübrelerin kombinasyonu optimal sonuçlar sağlayabilir. Struvitin gübre olarak diğer avantajları arasında, sürdürülebilir besin salınımı ile tekrarlanan gübreleme ihtiyacını azaltması yer almaktadır. Ancak bu yavaş salınım, özellikle büyümenin erken evrelerinde dezavantaj oluşturabilir. Bu durum, struvit kristal boyutunun küçültülmesiyle çözünürlük hızının artırılması sayesinde giderilebilir.

Valle vd., 2022, kontrollü P salımı için ters vulkanizasyon yöntemiyle elde edilen polisülfid matris kullanmıştır. Bu matris toprakta oksitlendiğinde yalnızca bitkilere sülfür sağlamakla kalmaz, aynı zamanda P'nin çözünürlüğünü artırmak için asidik ortam oluşturur. Buna karşın, daha iyi tarımsal yanıt ve güvenlik açısından granüler struvit kullanımı önerilmektedir. Ayrıca, struvitin ağır metal konsantrasyonu ticari gübrelere kıyasla daha düşük olup gübre olarak kullanılabilirliğini desteklemektedir.

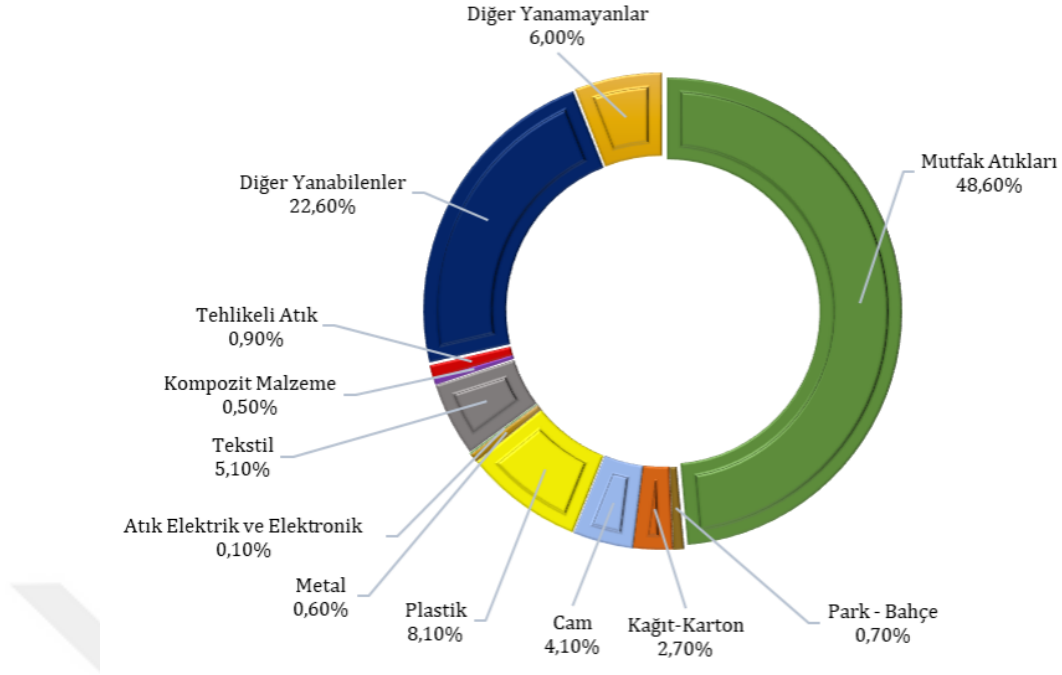
8. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, Samsun Büyükşehir Belediyesi Katı Atık Düzenli Depolama Sahasından temin edilen ham sızıntı suyu kullanılarak, struvit ve amonyum sülfat çöktürme yöntemleri aracılığıyla azotun geri kazanımı amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalarda, sızıntı suyundaki amonyum azotunun geri kazanımında etkili olan optimum çöktürme koşulları belirlenmiş ve bu koşullar altında struvit ve AS çöktürmeleri elde edilmiştir. Elde edilen çöktürmelerden struvitin gübre potansiyeli, sera koşullarında yetiştirilen ıspanak (*Spinacia oleracea L.*) bitkisi üzerinde değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, ham sızıntı suyundan sentezlenen struvit ürünleri, ticari bir gübre MAP ile karşılaştırmalı olarak uygulanmış ve gübrelenmemiş kontrol grubu ile birlikte bitki gelişimi üzerindeki etkileri izlenmiştir. Bitkisel gelişim ve verim üzerine etkilerin belirlenmesi amacıyla, agronomik ve fizyolojik parametreler üzerinden analizler yapılmış; struvitin gübre olarak etkinliği ve çevresel sürdürülebilirliği araştırılmıştır.

8.1. Atık Karakterizasyonu ve Sızıntı Suyu Oluşumu

Çalışmada kullanılan sızıntı suyu numuneleri, Samsun Büyükşehir Belediyesi Katı Atık Düzenli Depolama Sahası'ndan temin edilmiştir. Samsun ilinde üretilen belediye kaynaklı katı atıkların toplanması ve bertaraf edilmesi, Samsun Büyükşehir Belediyesi'nin sorumluluğundadır. İl genelinde üretilen evsel atıkların tamamına yakını belediye tarafından toplanmakta olup, bu atıkların büyük bir kısmı Samsun Büyükşehir Belediyesi Katı Atık Düzenli Depolama Sahası'nda bertaraf edilmektedir.

Samsun Büyükşehir Belediyesi Katı Atık Düzenli Depolama Sahasına ait güncel ve özet veriler Tablo 8.1'de sunulmaktadır. Evsel atık karakterizasyonu incelendiğinde, atıkların yaklaşık %70'inin organik ve yanabilir nitelikte olduğu, bu durumun kompostlama, biyogaz üretimi ve enerji geri kazanımı gibi biyolojik ve termal değerlendirme yöntemleri için önemli bir potansiyel oluşturduğu görülmektedir. Özellikle mutfak atıkları %48,60 oranıyla en yüksek paya sahip olup, organik yapısı nedeniyle atık yönetiminde öncelikli olarak ele alınması gerekmektedir. Diğer yanabilen atıklar %22,60 ile önemli bir enerji kaynağı olurken, plastik (%8,10), tekstil (%5,10), cam (%4,10) ve kağıt-karton (%2,70) gibi geri dönüştürülebilir malzemelerin ayrı toplanması ekonomik ve çevresel açıdan değer taşımaktadır.



Şekil 8.1. Samsun Büyükşehir Belediyesi 2023 yılı atık karakterizasyonu (URL-1)

Bununla birlikte, tehlikeli (%0,90) ve atık elektrik-elektronik (%0,10) atıklar az miktarda olmalarına rağmen çevresel riskleri nedeniyle kaynağında ayrılarak lisanslı tesislerde özel bertaraf süreçlerine tabi tutulmalıdır (URL-1). Bu bulgular, atık yönetiminde ayrı toplama sistemlerinin geliştirilmesinin gerekliliğini ve organik, plastik, tekstil, cam ve kâğıt gibi fraksiyonların verimli geri kazanımının sürdürülebilir atık politikaları açısından kritik olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 8.1).

Sahaya kabul edilen bu atıkların ayrışması ve sıkışması sonucu oluşan çöp sızıntı suyu, Şekil 8.2’de gösterilen toplama havuzunda biriktirilmektedir. Bu havuzda toplanan sızıntı suyu miktarı, nüfus yoğunluğu, mevsimsel sıcaklık değişimleri ve yağış miktarı gibi çevresel faktörlere bağlı olarak farklılık göstermektedir. Özellikle yağışlı dönemlerde sızıntı suyu miktarında artış gözlenirken, sıcak yaz aylarında buharlaşma etkisiyle su seviyelerinde azalma meydana gelmektedir.

Tablo 8.1. Samsun Büyükşehir Belediyesi Katı Atık Düzenli Depolama Sahasına ait genel veriler (2023)

Atık üretimi	2008- 102.112,64 ton/7ay (Hizmete giriş tarihi olan 15 Mayıs 2008 itibariyle)
	2009- 182.458,73 ton/yıl
	2010- 159.481,26 ton/yıl
	2011- 184.216,68 ton/yıl
	2012- 194.952,22 ton/yıl
	2013- 199.655,62 ton/yıl
	2014- 198.702,58 ton/yıl
	2015- 234.474,22 ton/yıl
	2016- 269.327,54 ton/yıl
	2017- 274.643,47 ton/yıl
	2018- 300.204,41 ton/yıl
	2019- 300.698,79 ton/yıl
	2020- 326.531,64 ton/yıl
	2021- 331.311,84 ton/yıl
	2022- 280.854,62 ton/yıl
	2023- 291.041,85 ton/yıl
Günlük yaklaşık çöp miktarı (belediye atık, evsel nitelikli atık, Sterilize edilmiş tıbbi atık...)	797,37 ton/gün
Ortalama belediye atık miktarı	789,68 ton/gün
Bugüne kadar depolanan genel atık miktarı (15.05.2008 itibariyle)	3.822.267,36 ton
	Tıbbi : 26.610,03 ton
	Ücretli: 25.019,02 ton
	Evsel: 3.770.638,31 ton
Atığın ilçelerde dağılımı	İlkadım İlçesi (% 33,31)
	Canik İlçesi (% 9,25)
	Atakum İlçesi (% 24,91)
	Bafra Transfer (%17,37)
	Kavak Transfer (% 2,61)
	Havza Transfer (% 4,96)
	Vezirköprü Transfer (% 5,93)
	Tekkeköy İlçesi (% 0,48)
	Terme İlçesi (%0,04)
	Diğer (%1,14)



Şekil 8.2. Samsun Büyükşehir Belediyesi Katı Atık Düzenli Depolama Sahası sızıntı suyu toplama

Azot geri kazanımı çalışmalarında kullanılan sızıntı suyu, doğrudan bu havuzdan alınarak, aynı gün içerisinde laboratuvara ulaştırılmış ve gerekli testler gerçekleştirilmiştir. Numunelerin tazeliği ve özgünlüğü, deneysel sonuçların doğruluğu açısından önem arz etmektedir.

8.2. Deneysel Tasarım

Amonyum azotunun struvit çöktürme yöntemiyle geri kazanılmasına yönelik deneysel çalışmalar, laboratuvar ölçekli koşullarda gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yürütülen deneylerde, VELP marka JLT& Flocculation Tester model jar test cihazı kullanılmıştır (Şekil 8.3). Çalışmada sızıntı suyu numunelerinin pH değerlerini belirlemek amacıyla Ohaus Starter 3100 model pH metre kullanılmıştır. Kimyasal madde ölçümleri ve tartımlar, yüksek hassasiyete sahip Radwag AS220.R2 marka analitik terazi yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Struvit çöktürme işlemleri için magnezyum kaynağı olarak magnezyum sülfat ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$), fosfat kaynağı olarak ise di-potasyum hidrojen fosfat (K_2HPO_4) tercih edilmiştir.



Şekil 8.3. Deneysel uygulamalarda çöktürme işlemlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla kullanılan karıştırma ünitesi

Amonyum sülfat (AS) çökeltilerinin oluşumunu sağlamak ve çöktürme deneylerinde kullanmak amacıyla %98–99,5 saflıkta sülfürik asit (H_2SO_4) kullanılmıştır. Gerçekleştirilen çöktürme işlemleri sonucunda, oluşan katı faz ile ayrılan üst sıvı (süpernatant) fazdan alınan örnekler üzerinde NH_4^+-N analizleri yapılmıştır. Bu analizler ile sistemin azot geri kazanım verimliliği değerlendirilmiştir. Amonyum azotu tayinleri için TECATOR marka KJELTEC SYSTEM 1002 Distilling Unit cihazı kullanılarak damıtma yöntemi uygulanmıştır.

8.3. Deneysel Yöntem

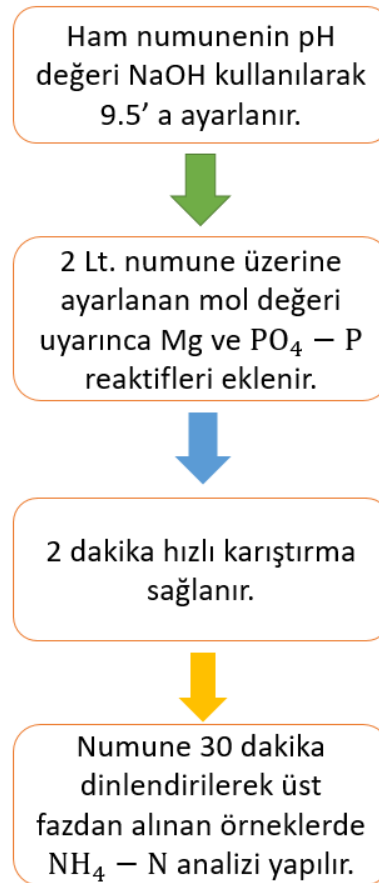
8.3.1. Struvit Eldesi

Deneysel çalışmalarda, sızıntı suyundan azotun Magnezyum Amonyum Fosfat çöktürme yöntemi ile struvit geri kazanımına yönelik işlemleri aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilmiştir (Şekil 8.4):

- pH Ayarı: Deney öncesinde ham sızıntı suyu numunesinin pH değeri, sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi kullanılarak 9,5 seviyesine getirilmiştir. Bu pH değeri, struvit kristalizasyonu için uygun koşulları sağlamak amacıyla tercih edilmiştir.

- **Reaktif İlavesi:** Her deney için 2000 mL hacmindeki numuneler kullanılmış; bu numunelere önceden belirlenen molar oranlara göre magnezyum (Mg^{2+}) ve fosfat (PO_4^{3-}) reaktifleri eklenmiştir. Reaktifler $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ve K_2HPO_4 kimyasalları şeklinde ilave edilmiştir.
- **Hızlı Karıştırma:** Reaktiflerin çözeltide homojen dağılması ve reaksiyonun başlaması amacıyla, sistem 2 dakika süreyle hızlı karıştırmaya tabi tutulmuştur.
- **Çökelme ve Dinlendirme:** Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra numune 30 dakika boyunca dinlenmeye bırakılmış, bu sürede çökelme işlemi gerçekleşmiştir.
- **Analiz Amaçlı Numune Alma:** Dinlendirme sonrası oluşan çökeltiden ayrılan üst sıvı (süpernatant) fazdan alınan örnekler üzerinde amonyum azotu ($NH_4^+ - N$) analizleri gerçekleştirilmiştir (APHA 1998).

Struvit Oluşumu Akış Diyagramı

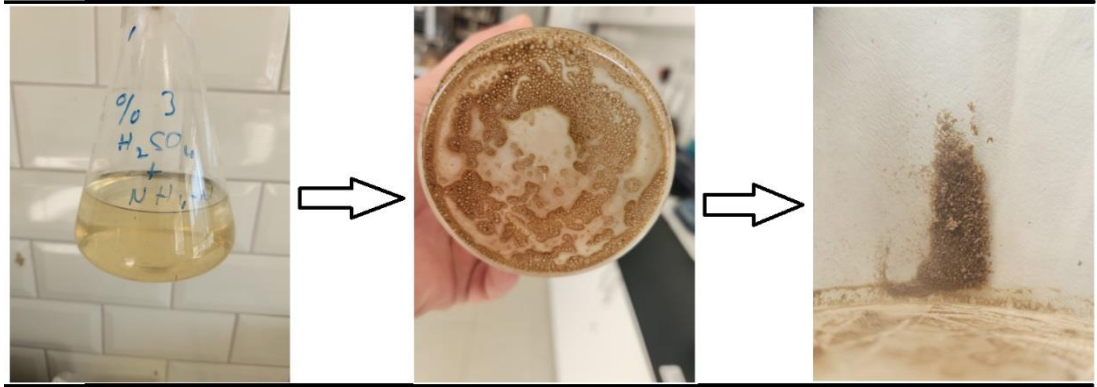


Şekil 8.4. Struvit oluşumunda uygulanan akış diyagramı

Çalışmada uygulanan temel çöktürme koşulları, daha önce gerçekleştirilen araştırmalardan elde edilen bulgular doğrultusunda belirlenmiştir. Struvit oluşumuna yönelik en uygun molar oran olarak $Mg:NH_4^+-N:PO_4^{3-}-P = 4:1:2,5$ oranı esas alınmış ve tüm deneysel uygulamalar bu oran doğrultusunda yürütülmüştür (Yeni, 2019).

8.3.2. Amonyum Sülfat Eldesi

Amonyum sülfatın (AS) elde edilmesine yönelik deneysel yöntemlerde, ortam pH'sının düşürülmesi amacıyla %98–99,5 saflıktaki H_2SO_4 kullanılmıştır. Reaktifin kontrollü bir şekilde ilavesiyle çözelti hazırlanmış ve uygun asidik koşullar sağlanmıştır. Hazırlanan çözülden alınan örneklerde, amonyum konsantrasyonunun belirlenmesi amacıyla standart analiz yöntemi uygulanmış olup ölçümler gerçekleştirilmiştir (APHA, 1998). Ardından, elde edilen amonyum sülfat çözeltisinin katı forma dönüştürülmesi amacıyla ısıtıcı kullanılarak buharlaştırma işlemi yapılmış ve kristal ürün elde edilmiştir (Şekil 8.5).



Şekil 8.5. Laboratuvar ortamında elde edilen amonyum sülfat çökteltisi

8.4. Struvitin Gübre Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Çalışmanın ikinci aşaması kapsamında, laboratuvar ölçekli deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen struvit ve karşılaştırma amaçlı ticari MAP (mono amonyum fosfat) içerikli gübrelerin tarımsal etkinliği, model bitki olarak seçilen ıspanak (*Spinacia oleracea L.*) üzerinde test edilmiştir. Farklı dozlarda hazırlanan gübre formları, Samsun ili Vezirköprü Belediyesi Park ve Bahçeler Müdürlüğü'ne bağlı serada, kontrollü çevre koşulları altında, saksılarda ve sera toprağı kullanılarak uygulanmıştır (Tablo 8.2) (Şekil 8.6). Bu uygulamalarla, sızıntı suyundan azot kazanımı amacı ile gerçekleştirilen struvit ve karşılaştırma amacı için kullanılan MAP gübrelerin bitki gelişimi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Tablo 8.2. Kullanılan sera toprağı özellikleri

Analiz Adı	Sonuç	Derecesi	Analiz Metodu / Referansı
Saturasyon %	74,8	Killi	TS 8333 (+%10) (Hava Kuru)
pH	7,46	Nötr	Yurdakul 2018
Toplam Tuz %	0,12	Tuzsuz	TS 8334 (Çamurda)
Kireç %	18,72	Fazla Kireçli	TS EN ISO 10693 (Modifiye)
Organik Madde %	3,18	İyi	TS 8336
Alınabilir Fosfor P2O5 Kg/da	40,33	Olsen'e Göre Çok Yüksek (Kg/da) - BRAY ve KURTZ'a Göre Orta	Olsen (Konsantrasyon)
Alınabilir Potasyum K2O Kg/da	156	Yüksek (Kg/da)	TS8341(Konsantrasyon)

Deneme süreci öncesinde, uygulamaların etkilerini sağlıklı bir şekilde değerlendirebilmek amacıyla denemelerde kullanılacak ham toprağı aıt başlangıç karakteristikleri belirlenmiş, bu kapsamda kapsamlı bir toprak analizi gerçekleştirilmiştir (EK-1).

Deneme süresince ise hem bitki gelişim dinamikleri hem de toprak özelliklerinde meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişimler düzenli aralıklarla takip edilmiştir. Uygulanan gübrelerin bitki büyüme performansı üzerindeki etkileri, toprak verimliliğine sağladıkları katkılar ve çevresel açıdan oluşturabilecekleri potansiyel kirlilik riskleri, belirlenen analiz parametreleri doğrultusunda detaylı biçimde incelenmiş ve değerlendirilmiştir.



Şekil 8.6. Deneysel çalışmalarında kullanılan toprak ve ıspanak (*Spinacia oleracea* L.) tohumu

Toprak ve ıspanak bitkisine ait örneklerin tartım işlemleri, yüksek hassasiyetli TEM INDE2TP-Y30 marka model teraziden yararlanılarak gerçekleştirilmiştir.

8.5. Sürdürülebilir Ispanak Yetiştiriciliğinde Geri Kazanılmış Gübrelerin Kullanımı ve Toprak Fiziksel Özelliklerinin Tarımsal Verimlilik Üzerindeki Etkisi

8.5.1. Ispanak (*Spinacia oleracea* L.) Bitkisinin Tarımsal Önemi ve Geri Kazanılmış Gübrelerle Beslenme Potansiyeli

Ispanak (*Spinacia oleracea* L.); *Amaranthaceae* (ıspanakgiller) familyasına ait, yaprakları tüketilen önemli bir sebze türüdür. Besin içeriği açısından oldukça zengin olması nedeniyle dikkat çeken bu bitki, askorbik asit gibi antioksidan özelliklere sahip bileşenler içermektedir (Carvalho vd., 2019). Bu özelliklerinden ötürü, özellikle gelişmiş ülkelerde tüketimi giderek artmaktadır. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'nde 1970 ile 2012 yılları arasında ıspanak üretimi %418, tüketimi ise %31 oranında artış göstermiştir. Benzer şekilde, Kolombiya'da da yapraklı sebzelerin (ıspanak dahil) üretimi son yıllarda önemli bir tarımsal faaliyet haline gelmiş, 2017 yılı itibarıyla yaklaşık 10.000 hektarlık alanda ıspanak yetiştirilmiş ve ortalama verim 18,1 ton/ha olarak gerçekleşmiştir (Casierra-Posada vd., 2021). Bu artış, büyük ölçüde bitkisel bazlı diyetlere yönelim ve sağlıklı beslenme alışkanlıklarına duyulan ilginin artmasına bağlanmaktadır. Bitkisel proteinlere olan ilginin artması, hayvansal protein üretiminin çevresel etkilerine (asidifikasyon, erozyon, ötrofikasyon, biyoçeşitlilik

kaybı, iklim değışikliğı vb.) ve insan sağığı üzerindeki olumsuz sonuçlarına (obezite, hiperkolesterolemi, kanser riski) dair farkındalıının yükselmesiyle ilişkili görölmektedir (Lander vd., 2016).

İspanağın besin değeri ve gelişim süreci, büyük ölçüde çevresel koşullar ve uygulanan tarımsal yöntemlerle şekillenmektedir. Bu bağlamda, toprak özelliklerini iyileştiren ve besin elementlerinin bitkiler tarafından alınımını artıran tarımsal uygulamaların araştırılması önem taşımaktadır. Özellikle asidik karakterdeki topraklarda, fosfor gibi bazı besin elementlerinin demir ve alüminyum oksitler tarafından bağlanarak bitkiler tarafından kullanılamaz hale gelmesi, geleneksel gübre uygulamalarının etkinliğini düşürmektedir (Zhu vd., 2018).

Son yıllarda, geleneksel kimyasal gübrelerin çevresel ve ekonomik olumsuzluklarına karşılık, geri kazanıma dayalı gübre uygulamaları alternatif bir yaklaşım olarak ön plana çıkmaktadır. Ancak bu tür gübrelerin, özellikle yapraklı sebzelerden ıspanak (*Spinacia oleracea L.*) üzerinde, bitkinin tam azot ve fosfor gereksinimini karşılayacak düzeydeki etkileri konusunda yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu kapsamda yürütölen çalışma, söz konusu geri kazanılmış gübrelerin sürdürülebilir tarımsal üretim süreçlerindeki potansiyelini değerlendirmeyi hedeflemektedir.

8.5.2. Toprak Fiziksel Özellikleri ve Tarımsal Verimlilik Üzerindeki Etkileri

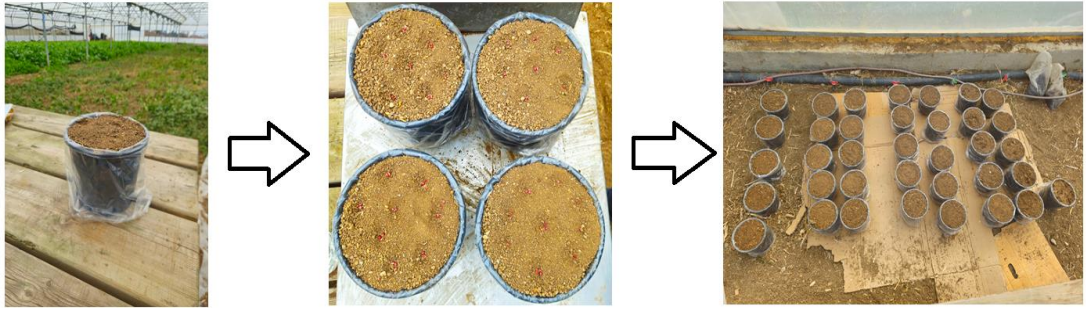
Toprak; fiziksel özellikleri, toprak kalitesinin önemli bir göstergesi olup hem toprak sağığında hem de tarımsal üretimin sürdürülebilirliğinde temel bir rol oynamaktadır (Rabot vd., 2018). Bu özellikler arasında toprak tekstürü, yapısı, porozite, hacim ağırlığı, su içeriğı ve sıcaklık yer almaktadır. Bu özellikler, toprak oluşum sürecine bağılı olmakla birlikte, doğal faktörler ve insan faaliyetleri tarafından da önemli ölçüde etkilenebilmektedir.

Fiziksel yapısı zayıf olan (örneğin, sıkışmış veya agregat stabilitesi düşük) tarım toprakları, bozunmaya daha açık hale gelmekte ve bu durum ürün verimini ve kalitesini olumsuz etkilemektedir (Jia vd., 2020).

8.5.3. Serada Gerçekleştirilen Tarımsal Uygulamalar ve Deneysel Düzeneğin Kurulumu

Bu çalışmada yürütülen deneysel tarımsal uygulamalar, Vezirköprü Belediyesi Park ve Bahçeler Müdürlüğü'ne ait serada gerçekleştirilmiştir. Uygulamalarda kullanılacak toprak materyali, doğrudan sera alanından temin edilmiş olup, böylece tarla koşullarına benzer çevresel şartların sağlanması hedeflenmiştir. Uygulamalara geçilmeden önce, toprak numuneleri analiz edilerek temel fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiş, ilgili yöntem EK-1'de sunulmuştur.

Deneysel düzeneğin kurulumu kapsamında, toplamda 32 adet saksı kullanılmış olup, her biri 3 L hacminde olacak şekilde seçilmiştir. Her bir saksıya 3 kg elenmiş ve homojenize edilmiş toprak yerleştirilmiştir. Bitki materyali olarak ıspanak (*Spinacia oleracea L.*) türünün 'Matador' çeşidi tercih edilmiştir (Şekil 8.7). Her bir saksıya 35 adet tohum ekilmiş, çimlenmenin 24. gününde her saksıda yalnızca en sağlıklı birey kalacak şekilde seyreltme yapılmıştır. Tohum çimlenmesini ve çıkışı desteklemek amacıyla, başlangıçta her saksıya 500 g su verilmiş; takip eden günlerde ise günlük olarak saksılar tartılmış ve eksilen su miktarı kadar sulama yapılmıştır. Bu yöntemle saksı ortamında nem dengesi sağlanarak bitki gelişimi için uygun koşullar oluşturulmuştur.



Şekil 8.7. Bitki deney düzeneklerinin hazırlanması

Denemenin 25. gününde gübre uygulamaları başlatılmıştır. Saksılar dört gruba ayrılmış olup; bir grup kontrol (gübresiz), diğer üç grup ise sırasıyla bir kez olacak şekilde 5 kg N/da, 10 kg N/da ve 15 kg N/da azot dozlarıyla gübrenelmiştir. Uygulamalarda iki farklı gübre kaynağı kullanılmıştır: birinci grupta struvit, ikinci grupta ise ticari MAP gübresi uygulanmıştır. Kontrol grubuna yalnızca düzenli sulama yapılarak su dengesi korunmuştur.

Uygulama süreci boyunca bitki gelişimine ilişkin fiziksel ve kimyasal parametreler izlenmiş, elde edilen bulgular doğrultusunda struvit ve MAP gübrelerinin ıspanak bitkisi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Değerlendirme kapsamında kullanılan gübrelerin gıda güvenliği, çevre kirliliği potansiyeli ve tarımsal uygulanabilirlik düzeyleri dikkate alınmıştır.



9. BULGULAR VE TARTIŞMA

Samsun Büyükşehir Belediyesi Katı Atık Düzenli Depolama Sahası'ndan temin edilen sızıntı suyundaki yüksek $\text{NH}_4^+\text{-N}$ konsantrasyonunun geri kazanımına yönelik olarak, struvit ve amonyum sülfat çöktürme yöntemleri uygulanmıştır.

Çalışmalarda kullanılan sızıntı suyunun genel karakterizasyonunu belirlemek üzere, daha önceki çalışmada DSİ Samsun Bölge Laboratuvarı'nda yer alan Dionex IC 100 model iyon kromatografisi cihazı ile analiz edilmiştir (Tablo 9.1). Gerçekleştirilen analizler sonucunda, sızıntı suyunun anyon ve katyon içerikleri belirlenmiş ve elde edilen bulgular sunulmuştur (Kuleyin vd.,2020).

Tablo 9.1. Sızıntı suyu genel karakterizasyonu (Kuleyin vd., 2020)

Sızıntı Suyu Karakterizasyonu	
Birim	Değer (mg/L)
Cl	3314,95
NO_3	3216,78
SO_4	4264,00
NO_2	126,94
$\text{NH}_4\text{-N}$	1377,00
Ca	406,00
Mg	27,38
Na	1118,00
EC ($\mu\text{S/cm}$)	28600,00

Gerçekleştirilen her deneysel uygulama öncesinde, kullanılan sızıntı suyu numunelerinin temel fizikokimyasal özelliklerinin belirlenmesine yönelik analizler yapılmıştır. Bu kapsamda; amonyum azotu ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) konsantrasyonu, elektriksel iletkenlik (EC), sıcaklık ve pH gibi temel parametreler ölçülerek, deney koşullarının başlangıç durumu net bir şekilde ortaya konmuştur. Elde edilen ölçüm sonuçları maksimum, minimum ve ortalama değerler olarak Tablo 9.2 de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 9.2. Çalışmada kullanılan sızıntı suyu numunelerinde incelenen parametrelerin maksimum, minimum ve ortalama değerleri

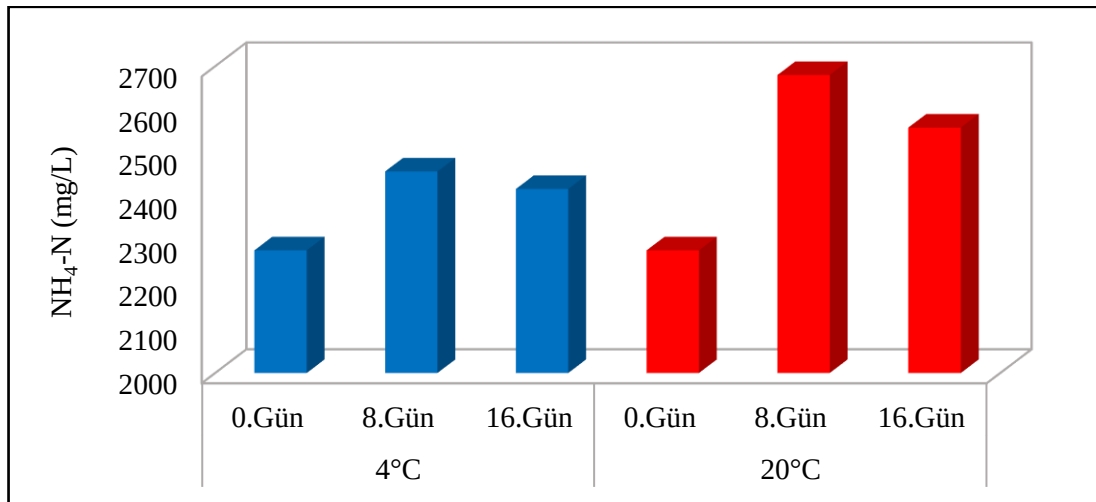
Sızıntı Suyu Karakterizasyonu			
Birim	Min. (mg/L)	Max. (mg/L)	Ort. (mg/L)
NH ₄ -N	2120	2680	2400
EC (µS/cm)	24030	33210	24800
Sıcaklık	20 °C	22 °C	21 °C
pH	8,56	8,38	8,47

9.1. Sızıntı Suyunda Sıcaklık ve Zamana Bağlı NH₄-N Değişimi

Deneyssel çalışmalar kapsamında, ham sızıntı suyunun farklı sıcaklık ve süre koşullarında amonyum azotu (NH₄-N) konsantrasyonundaki değişimler değerlendirilmiştir. Bu amaçla, alınan sızıntı suyu numuneleri herhangi bir koruyucu madde ilave edilmeksizin, 4 °C’de (buzdolabı koşulları) ve 20 °C’de (oda sıcaklığı) olmak üzere iki ayrı ortamda muhafaza edilmiştir. NH₄-N analizleri, sırasıyla 0. gün, 8. gün ve 16. gün olmak üzere üç zaman noktasında ölçülmüştür.

Tablo 9.3. Ham sızıntı suyunun 4°C ve 20 °C’de sıcaklık ve zamana bağlı değişimi

Ham sızıntı suyu 4°C ve 20°C oda sıcaklığındaki değişimi				
Sıcaklık/Birim	Zaman (Gün)	NH ₄ -N (mg/L)	EC (µS/cm)	pH
4°C	0.Gün	2280	28600	8,55
	8.Gün	2460	31400	8,42
	16.Gün	2420	31280	8,43
20°C	0.Gün	2280	28600	8,55
	8.Gün	2680	33210	8,38
	16.Gün	2560	32280	8,36



Şekil 9.1. Ham sızıntı suyunun 4°C ve 20 °C’de sıcaklık ve zamana bağlı değişimi

Elde edilen veriler, bekletme süresinin ve sıcaklığın $\text{NH}_4^+\text{-N}$ derişimi üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla analiz edilmiş olup, ilgili sonuçlar detaylandırılmıştır (Tablo 9.3). Ayrıca, gözlemlenen değışimlerin grafiksel olarak Şekil 9.1’de sunulmuştur. Her iki sıcaklık koşulunda da $\text{NH}_4^+\text{-N}$ konsantrasyonunda başlangıçtan 8. güne kadar artış gözlemlenmiş; 4 °C’de 2460 mg/L’ye, 20 °C’de ise 2680 mg/L’ye ulaşarak maksimum seviyelere erişmiştir. Ancak 16. güne gelindiğinde, konsantrasyonların sırasıyla 2420 mg/L ve 2560 mg/L seviyelerine gerilediği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, düşük sıcaklıklarda sınırlı mikrobiyolojik aktiviteye rağmen kimyasal denge süreçlerinin $\text{NH}_4^+\text{-N}$ derişimini etkileyebileceğini; oda sıcaklığında ise biyokimyasal reaksiyonların daha baskın olduğunu ortaya koymaktadır.

9.2. Amonyum Sülfat (AS) Oluşumunun İncelenmesi

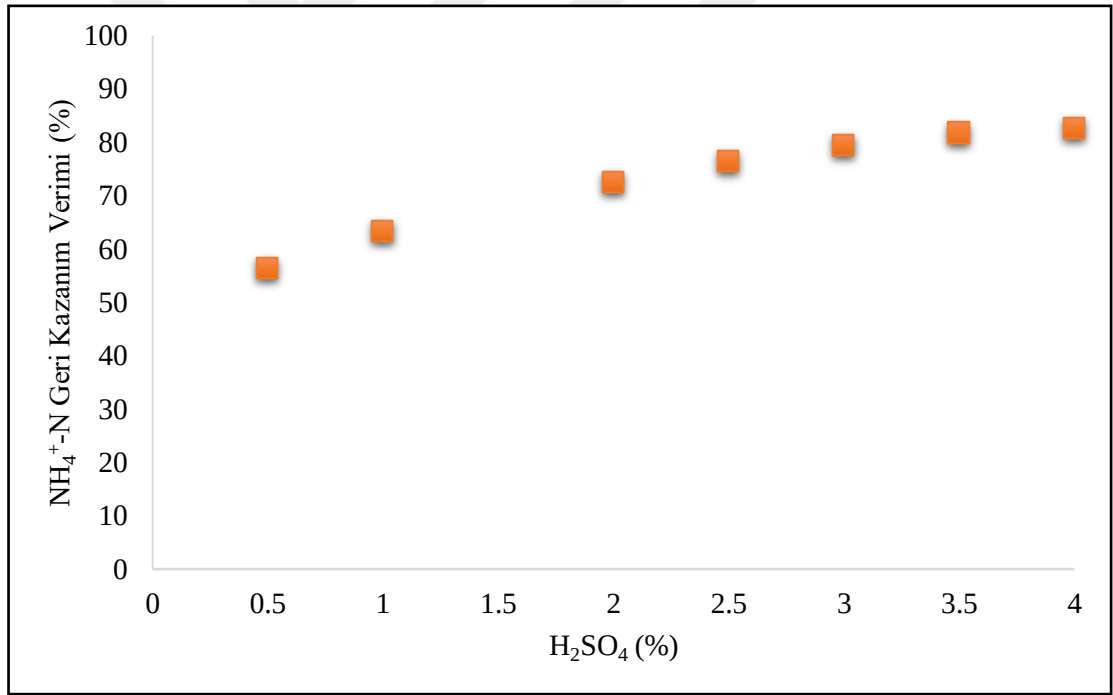
Bu bölümde, sızıntı suyunda bulunan $\text{NH}_4^+\text{-N}$ geri kazanımı amacıyla uygulanan Amonyum Sülfat çöktürme yönteminde, çeşitli parametrelerin zaman üzerindeki etkileri detaylı biçimde değerlendirilmiştir. Özellikle reaksiyon ortamındaki pH değışimleri, çözelti iletkenliği, temas süresi (reaksiyon zamanı) ve farklı başlangıç $\text{NH}_4^+\text{-N}$ konsantrasyonları, AS oluşum verimliliğini belirleyen başlıca faktörler arasında yer almaktadır. Deneysel uygulamalar, bu parametrelerin sistem davranışını nasıl etkilediğini anlamaya yönelik olarak planlanmış ve AS kristalizasyonu ile birlikte azot geri kazanım performansı kapsamlı biçimde analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, optimum koşulların belirlenmesine katkı sağlamış olup, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

9.2.1. Amonyum Sülfat (AS) Oluşumunda H_2SO_4 ’ün Etkisiyle pH ve İletkenlik Değişiminin İncelenmesi

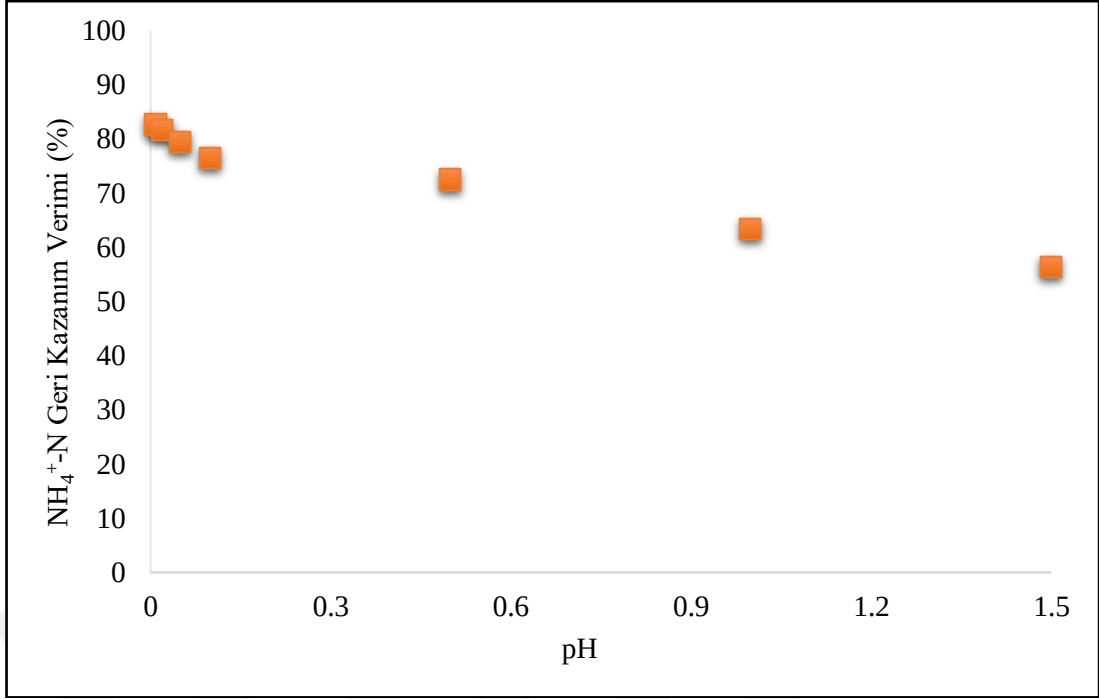
Deneysel çalışmalar kapsamında, ham sızıntı suyuna H_2SO_4 uygulanarak AS çökeltisi geri kazanımı hedeflenmiştir. Bu kimyasal uygulama sonrasında sistemde meydana gelen değışimlerin izlenebilmesi amacıyla, özellikle serbest $\text{NH}_4^+\text{-N}$, pH değeri ve çözelti iletkenliği gibi temel proses parametreleri değerlendirmeye alınmıştır. Reaksiyon sürecinin izlenmesine olanak sağlayan bu ölçümler, hem AS oluşumunun etkinliğini hem de sistemin dengesini belirlemede kritik rol oynamaktadır. Deneysel uygulamalardan elde edilen bulgular sırasıyla Tablo 9.4 ile birlikte, Şekil 9.2, Şekil 9.3, Şekil 9.4 ve Şekil 9.5’te ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Tablo 9.4. Ham sızıntı suyunun eklenen H_2SO_4 'e bağlı NH_4-N , pH ve iletkenlik değişimi

H_2SO_4 (%)	pH	Çıkış pH	İlk NH_4^+-N (mg/L)	Geri Kazanılan NH_4^+-N (mg/L)	Verim (%)	İlk İletkenlik (mS/cm)	Çıkış (mS/cm)
4	0,01	1,32	2436	2010	82,51	275,26	36,78
3,5	0,02	1,40	2436	1988	81,61	260,03	34,33
3	0,05	1,56	2436	1932	79,31	227,65	31,65
2,5	0,1	1,87	2436	1860	76,35	205,46	27,43
2	0,5	2,27	2436	1764	72,41	142,02	22,18
1	1	5,65	2436	1540	63,22	64,31	12,43
0,5	1,5	8,71	2436	1372	56,32	10,17	3,02



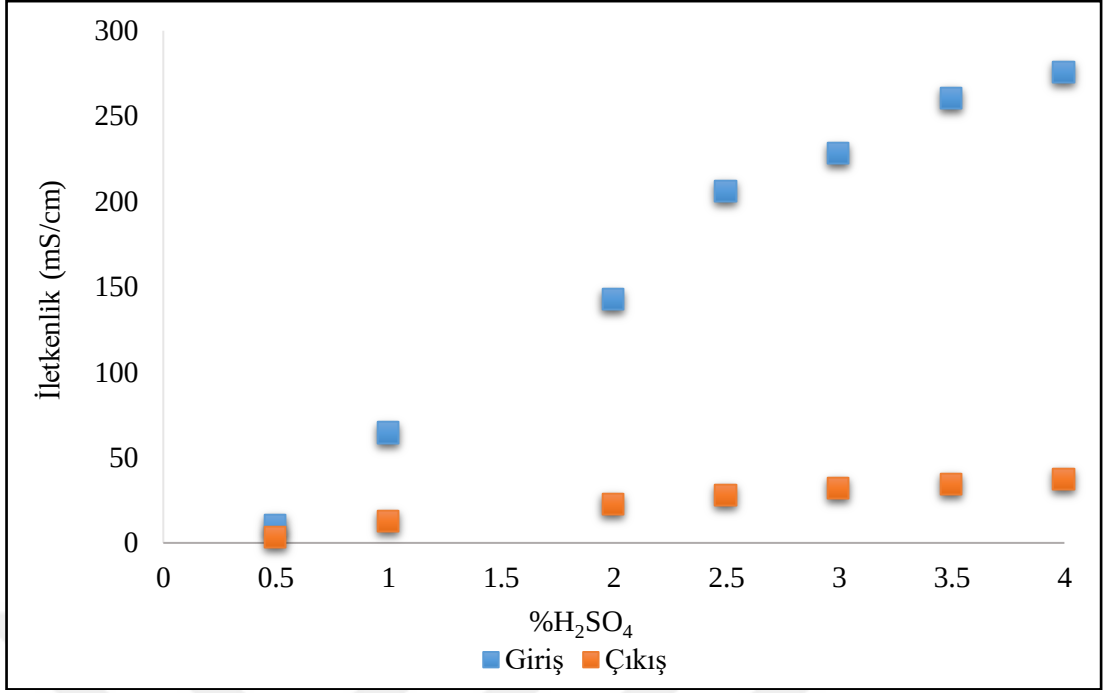
Şekil 9.2. Eklenen H_2SO_4 miktarına bağlı olarak NH_4-N geri kazanım verimi



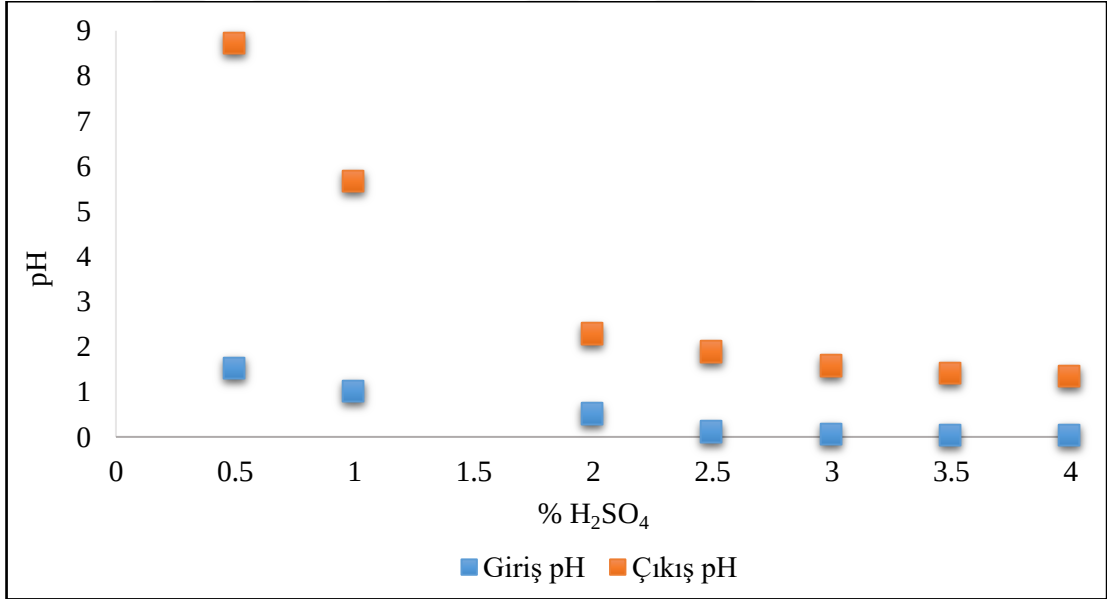
Şekil 9.3. Çözeltinin pH değerine bağlı olarak NH₄-N geri kazanım verimi

Amonyum sülfat (AS) üretimi amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, ham sızıntı suyuna farklı oranlarda sülfürik asit (H₂SO₄) ilave edilerek proses üzerindeki etkiler değerlendirilmiştir. H₂SO₄ dozajının artırılmasıyla birlikte sistemin pH seviyesinde doğal olarak düşüş gözlenmiş, bu durum AS oluşum miktarında ve NH₄⁺-N geri kazanım oranlarında artışa neden olmuştur. Bu bulgular, literatürde yer alan çalışmalarla paralellik göstermektedir. Nitekim Kumar vd. (2023), %3 oranında H₂SO₄ ilavesi ile %80 e varan NH₄⁺-N geri kazanım veriminin elde edilebildiğini rapor etmiştir. Bu çalışmada da benzer şekilde, %3 H₂SO₄ uygulaması optimum performansa yakın sonuçlar vermiştir. Daha yüksek asit dozlarında geri kazanım oranında sınırlı düzeyde artışlar elde edilse de, bu artışların aşırı fayda düzeyinde kalması ve maliyet-etkinlik dengesi göz önünde bulundurularak, deneysel çalışmaların kalan kısmının %3 H₂SO₄ dozajı ile sürdürülmesine karar verilmiştir.

Elde edilen deneysel veriler, amonyum sülfat oluşum süreci öncesinde sızıntı suyunun iletkenlik değerlerinin yüksek seviyelerde olduğunu ortaya koymuştur. H₂SO₄ ilavesiyle birlikte gerçekleşen AS oluşumu sonrasında, sistemdeki iletkenlik değerlerinin NH₄⁺-N geri kazanım verimiyle doğru orantılı bir şekilde değişim gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 9.4. Eklenen H₂SO₄ miktarına bağlı olarak ilk ve çıkış iletkenlik değerleri



Şekil 9.5. Eklenen H₂SO₄ miktarına bağlı olarak giriş ve çıkış pH değerleri

Bu durum, AS çözelti verimliliğinin yalnızca pH düşüşüyle değil, aynı zamanda çözeltinin iyonik yoğunluğundaki artışla da yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. H₂SO₄ dozajının kademeli olarak artırılmasıyla birlikte, ortam pH'ının belirli bir eşığe kadar düşmeye devam ettiği ve bu süreçte geri kazanım verimliliğinin maksimum seviyelere ulaştığı gözlemlenmiştir. Ancak pH değerinin bu eşik noktasının ötesine geçmesiyle birlikte, verim artışında anlamlı bir iyileşme sağlanamadığı ve sistem performansının stabil seyrettiği belirlenmiştir.

Bu kapsamda yapılan değerlendirmeler neticesinde, %3 H₂SO₄ ilavesiyle pH'nın yaklaşık 1,56 seviyelerine ulaştığı ve bu aralıkta azot geri kazanım veriminin en yüksek düzeye eriştiği tespit edilmiştir. Ayrıca, pH'nın 1,56 ile 4,00 arasında değiştiği koşullarda sistem verimliliğinde önemli bir farklılık gözlemlenmemiştir (Kandil vd., 2017).

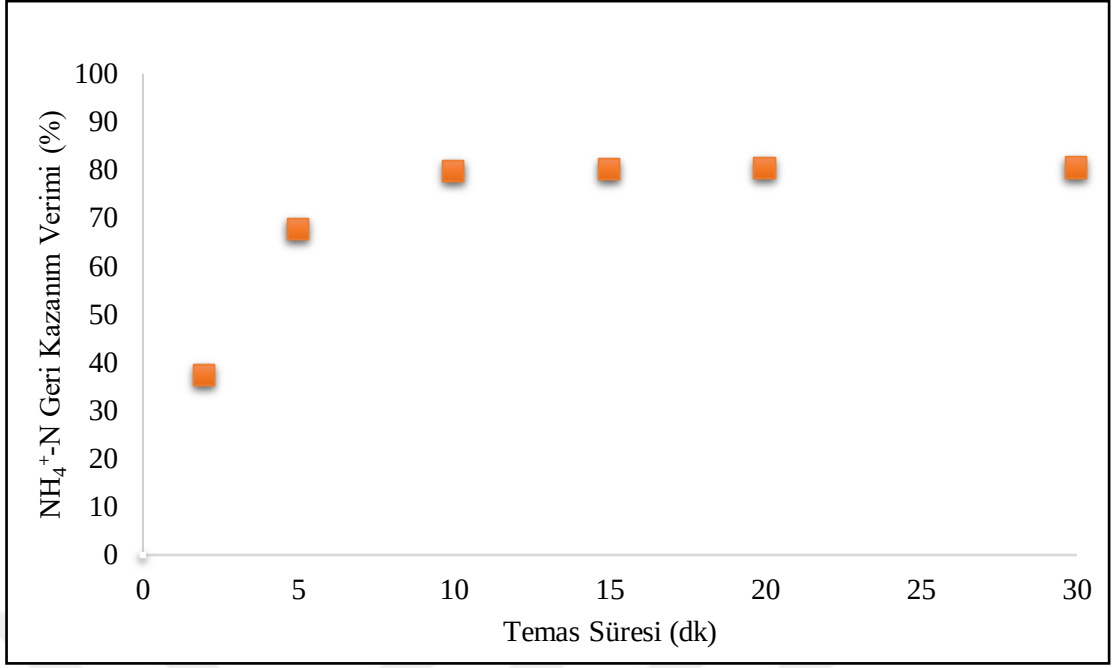
9.2.2. Amonyum Sülfat (AS) Oluşumunda Temas Süresine Bağlı Olarak NH₄-N Değişimi

Amonyum sülfat gübresi üretimi amacıyla yürütülen deneysel çalışmalar kapsamında, ham sızıntı suyuna %3 oranında H₂SO₄ ilave edilerek reaksiyon gerçekleştirilmiştir. Bu uygulama ile NH₄⁺-N geri kazanım verimi üzerine temas süresinin etkisi değerlendirilmiştir. Reaksiyon süresince sızıntı suyundaki amonyum azotu konsantrasyonundaki değişimler izlenmiş ve bu değişimlerin temas süresine bağlı olarak nasıl geliştiği analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, Tablo 9.5 ve Şekil 9.6'de ayrıntılı şekilde sunulmuştur.

Tablo 9.5. Ham sızıntı suyunun NH₄-N'nun, AS oluşum sürecine temas süresine bağlı değişimi (%3'lük H₂SO₄ C₀: 2436 mg/L)

Temas Süresi (dk)	Geri Kazanılan NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	Verim (%)
2	907,20	37,24
5	1646,40	67,59
10	1942,00	79,72
15	1947,00	79,93
20	1952,00	80,13
30	1957,00	80,34

Elde edilen deneysel bulgular, ilk 10 dakikalık temas süresi boyunca NH₄⁺-N geri kazanım veriminde %79,72 ile önemli bir artış olduğunu göstermektedir. Ancak 10. dakikadan sonra, özellikle 10 ile 30 dakika arasındaki süre zarfında geri kazanım veriminde kayda değer bir değişim gözlemlenmemiştir. Bu doğrultuda yapılan değerlendirmeler sonucunda, sistemin maksimum verime en kısa sürede ulaşmasını sağlayan optimum temas süresi 10 dakika olarak belirlenmiştir. Bu bulgu, literatürde bildirilen sonuçlarla da uyumludur (Kandil vd., 2017).



Şekil 9.6. Temas süresine bağlı NH₄-N değişimi

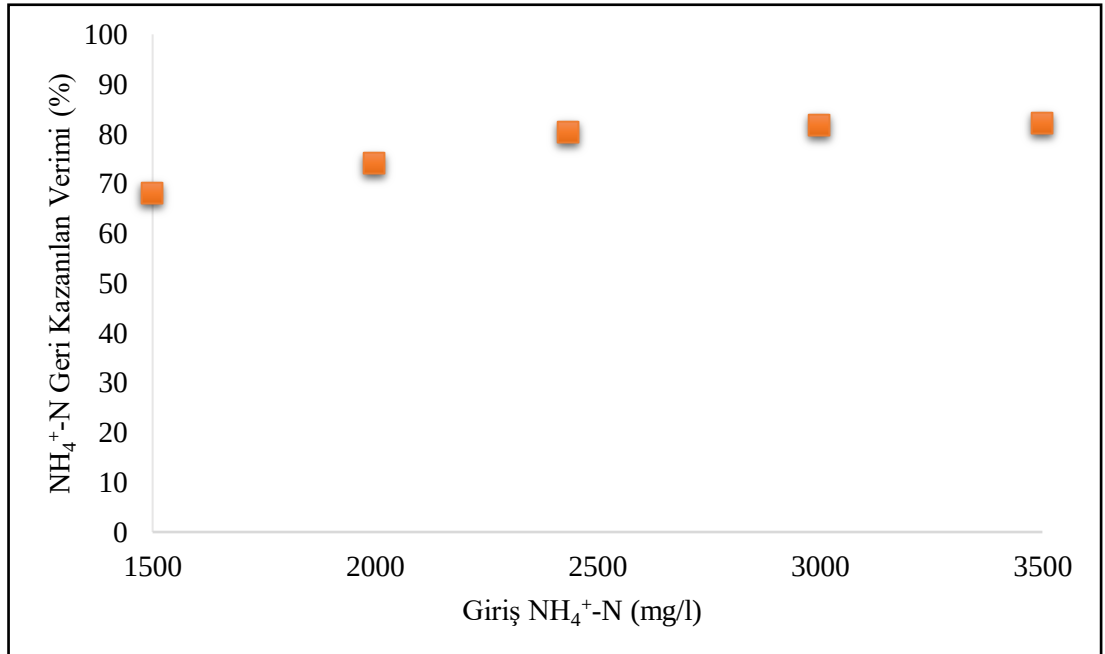
Literatürde yer alan çeşitli çalışmalar, amonyum sülfat çöktürme sürecinde reaksiyon süresinin verim üzerindeki etkisini ortaya koymuştur. Kula (1991) tarafından yürütülen araştırmada, 5 ila 30 dakika arasında değişen farklı reaksiyon süreleri değerlendirilmiş ve optimum çöktürme süresi 25 dakika olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, Shin vd 1997, yaptıkları çalışmada, amonyum ve fosfat geri kazanımı açısından en az 10 dakikalık bir reaksiyon süresinin gerekli olduğunu bildirmiştir. Ancak 60 dakikanın üzerindeki sürelerde, çıkış fosfor konsantrasyonunun yeniden yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, uzun süren reaksiyonların yeniden çözünme veya dengesiz kristal oluşumu gibi olumsuz etkiler yaratabileceğini düşündürmektedir. Öztürk 2006, ise 1 ila 180 dakika arasında geniş bir zaman aralığında gerçekleştirdiği deneysel çalışmada, optimum reaksiyon süresinin verim üzerinde belirgin bir etkisi olmadığını ifade etmiş ve bu nedenle 1 dakikalık kısa bir sürenin yeterli olabileceğini ileri sürmüştür.

9.2.3. Amonyum Sülfat (AS) Oluşumunda Farklı $\text{NH}_4\text{-N}$ Konsantrasyonlarına Bağlı Değişiminin İncelenmesi

Bu süreçte, farklı başlangıç $\text{NH}_4^+\text{-N}$ konsantrasyonlarının AS oluşumu üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Uygulama sonucunda, sızıntı suyunda amonyum azotu derişimindeki değişimler izlenmiş ve geri kazanım verimi bu değişkenlere göre analiz edilmiştir. Elde edilen deneysel bulgular Tablo 9.6 ile Şekil 9.7’de ayrıntılı biçimde sunulmuştur.

Tablo 9.6. AS oluşumunda ham sızıntı suyunun farklı konsantrasyonlardaki $\text{NH}_4\text{-N}$ ile değişimi

Giriş $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (mg/L)	Geri Kazanılan $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (mg/L)	$\text{NH}_4\text{-N}$ (%)
1500	1019,20	67,95
2000	1478,40	73,92
2436	1954,40	80,23
3000	2447,20	81,57
3500	2872,80	82,08



Şekil 9.7. AS Oluşumunda ham sızıntı suyunun farklı konsantrasyonlardaki $\text{NH}_4\text{-N}$ ile değişimi

Amonyum sülfat üretimi amacıyla gerçekleştirilen çalışmalarda, ham sızıntı suyuna %3 oranında H_2SO_4 ilave edilerek ve daha önce belirlenen optimum temas süresi dikkate alınarak farklı NH_4^+-N konsantrasyonlarına sahip örnekler üzerinde değerlendirme yapılmıştır. Elde edilen veriler, NH_4^+-N derişimi arttıkça geri kazanım veriminin de paralel şekilde yükseldiğini ortaya koymaktadır. Ancak, NH_4^+-N konsantrasyonunun 2436 mg/L (%80,23) seviyesini aşması durumunda verimde anlamlı bir artış gözlenmemiştir. Bu durum, sistemde bulunan H_2SO_4 miktarının sabit kalmasına karşın, NH_4^+-N miktarının fazla olması nedeniyle reaksiyonun sınırlı hale geldiğini göstermektedir.

Ayrıca, ham suda NH_4^+-N konsantrasyonu arttıkça ortamın alkali karakterinin de artması, asit-baz dengesini olumsuz yönde etkileyerek AS oluşum sürecinde kimyasal dengenin bozulmasına ve reaksiyon veriminin sınırlandırılmasına yol açmaktadır (Kandil vd., 2017).

9.3. Struvit Oluşumunun İncelenmesi

Bu bölümde, sızıntı suyundan struvit üretimine yönelik yürütülen deneysel çalışmalarda kullanılan temel parametreler değerlendirilmiştir. İlk aşamada, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ve K_2HPO_4 kimyasalları kullanılarak, farklı NH_4^+-N konsantrasyonlarının struvit oluşumu üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Reaksiyon koşullarında değişen amonyum azotu seviyeleri ile çökelme verimi arasındaki ilişki analiz edilmiştir. Elde edilen struvit ürününün tarımsal potansiyelini ve kullanım etkinliğini değerlendirmek amacıyla, çeşitli pH seviyelerinde (5,5, 6,0, 6,5 ve 7,0) çözünürlük testleri gerçekleştirilmiştir. Böylece hem struvit oluşumuna etki eden azot konsantrasyonlarının hem de son ürünün çözünme davranışının değerlendirilmesiyle, çevresel koşullara uyumu ve gübre olarak kullanılabilirliği kapsamlı şekilde incelenmiştir.

9.3.1. Struvit Oluşumunda Sızıntı Suyunun Bekletilmesine Bağlı Olarak Farklı NH_4^+-N Konsantrasyonlarına Bağlı Değişiminin İncelenmesi

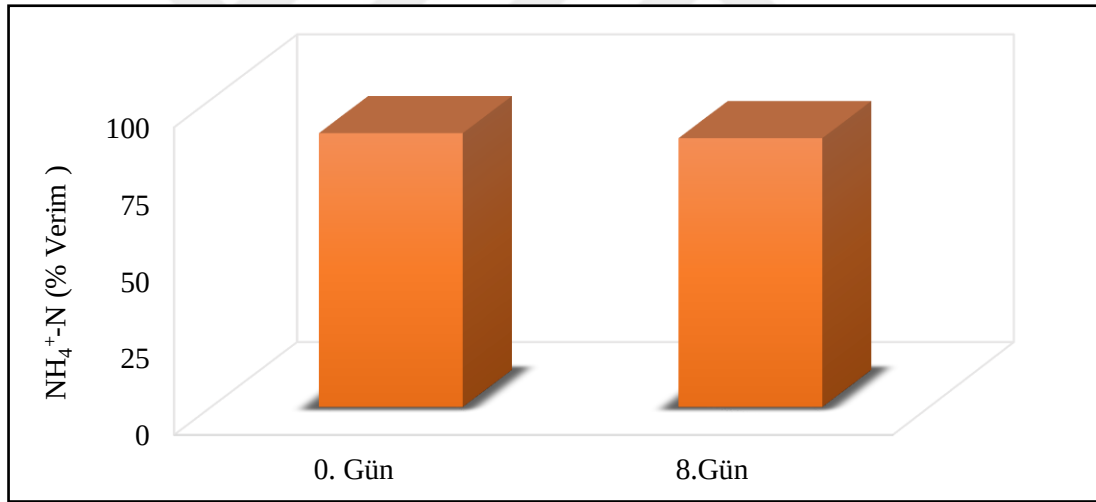
Deneyler sırasında, sızıntı suyunun laboratuvara ulaştığı ilk gün (0. gün) ile 8. gün arasında yapılan NH_4^+-N (amonyum azotu) ölçümleri dikkate alınarak, struvit oluşumu için daha önceki çalışmalarda belirlenmiş olan en uygun $Mg^{2+}:NH_4^+:PO_4^{3-}$ molar oranı 4:1:2,5 kullanılarak çökelti oluşturulmuştur (Kuleyin vd., 2020). Bu optimum oran doğrultusunda gerçekleştirilen uygulamalarda, sızıntı suyundaki farklı

başlangıç $\text{NH}_4^+\text{-N}$ konsantrasyonları üzerinden değişim eğilimleri değerlendirilmiştir. Uygulama sonuçlarına ait veriler Tablo 9.7 ve Şekil 9.8'de gösterilmektedir.

Tablo 9.7. Ham sızıntı suyunun beklemeye bağlı olarak $\text{NH}_4\text{-N}$ değişimine bağlı geri kazanım verimleri (20°C)

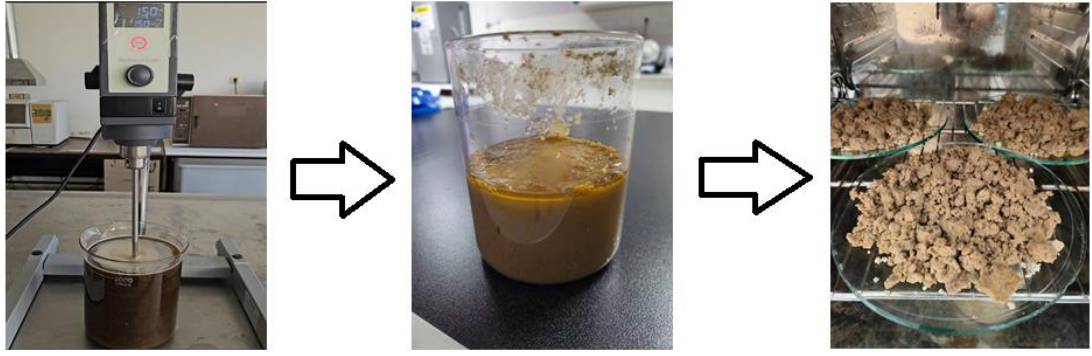
Zaman (Gün)	Giriş $\text{NH}_4\text{-N}$ (mg/L)	Çıkış $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (mg/L)	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (%)
0. Gün	2296	252	89,02
8. Gün	2420	305	87,40

Ham sızıntı suyunda bulunan amonyum azotunun ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), struvit formunda geri kazanılmasına yönelik olarak yapılan deneysel çalışmalarda, beklemenin $\text{NH}_4^+\text{-N}$ konsantrasyonu üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla, en iyi $\text{NH}_4^+\text{-N}$ geri kazanım verimi sırasıyla 0. gün 252 mg/L ile %89,02 ve 8. gün 305 mg/L ile %87,40 olmuştur ve bu konsantrasyonlarda gerçekleştirilen struvit çöktürme işlemleri sonucunda elde edilen amonyum geri kazanım verimliliği analiz edilmiştir.



Şekil 9.8. Ham sızıntı suyunun bekletilmeye bağlı olarak farklı konsantrasyonlardaki $\text{NH}_4\text{-N}$ değişimine bağlı geri kazanım verimleri

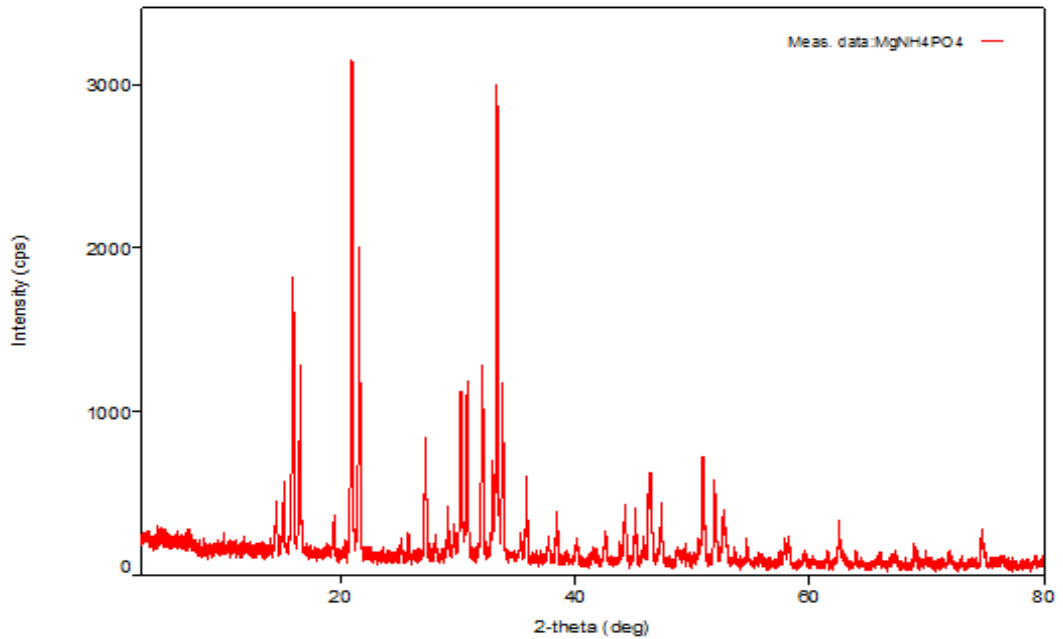
Deneysel bulgular, sekiz günlük süre zarfında sızıntı suyundaki $\text{NH}_4\text{-N}$ konsantrasyonlarında anlamlı bir farklılık meydana gelmediğini ortaya koymuştur. Bu duruma paralel olarak, struvit çöktürme yoluyla gerçekleştirilen $\text{NH}_4\text{-N}$ geri kazanım verimlerinde de istatistiksel olarak belirgin bir değişiklik saptanmamıştır. Deneyler sonucunda elde edilen struvit kristalleri görsel olarak Şekil 9.9'da sunulmuştur.



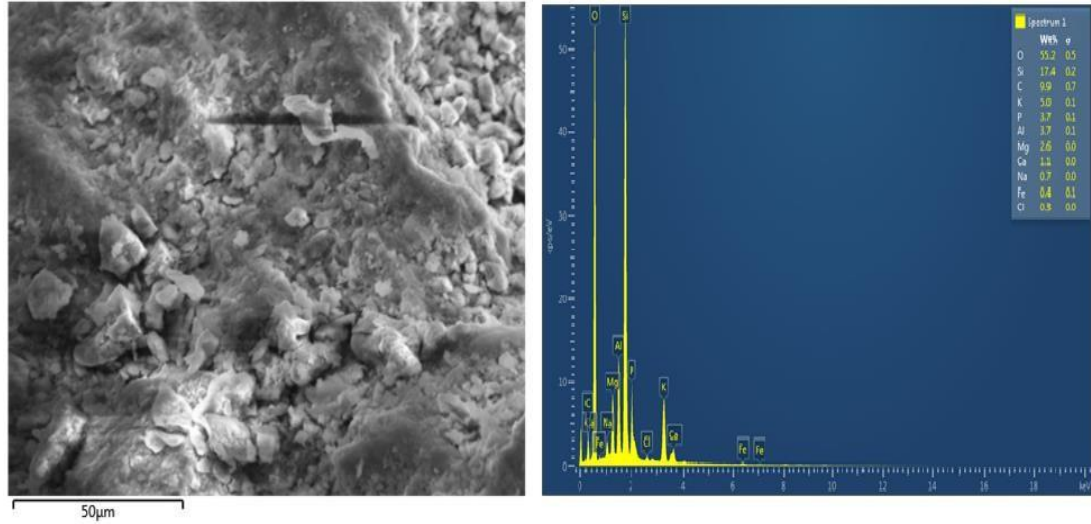
Şekil 9.9. Laboratuvar ortamında elde edilen struvit çökeltisi

9.3.2. Struvitin XRD ve SEM Görüntüsünün İncelenmesi

Optimum verimin elde edildiği $\text{Mg}:\text{NH}_4\text{-N}:\text{PO}_4\text{-P} = 4:1:2,5$ molar oranında gerçekleştirilen çöktürme işlemi sonucunda oluşan çökeltinin, süzülüp 50 °C’de etüvde kurutulmasının ardından SEM ve XRD analizleri yapılmıştır (Şekil 9.10, Şekil 9.11). XRD sonuçları, çökeltinin kristal yapısının struvit standardına yakın olduğunu ortaya koymuştur. SEM görüntülerinde kristallerin şekilsiz, yüzeylerinin kaba ve boyutlarının düzensiz olduğu gözlenmiştir. EDX analizi, yüksek oranda O, Mg, Si, P ve Al elementlerini; düşük oranda ise Fe, Ca, Cl, Na gibi iz elementleri göstermiştir. Elde edilen bulgular, literatürde raporlanan struvit kristal morfolojisi ve element bileşimi ile uyum göstermekte olup, çöktürmelerin struvit yapısında olduğunu doğrulamaktadır (Yeni, 2019).



Şekil 9.10. Sızıntı suyunda MAP çöktürme yöntemi kullanılarak optimum şartlarda çekilen XRD grafiği (Yeni,2019)



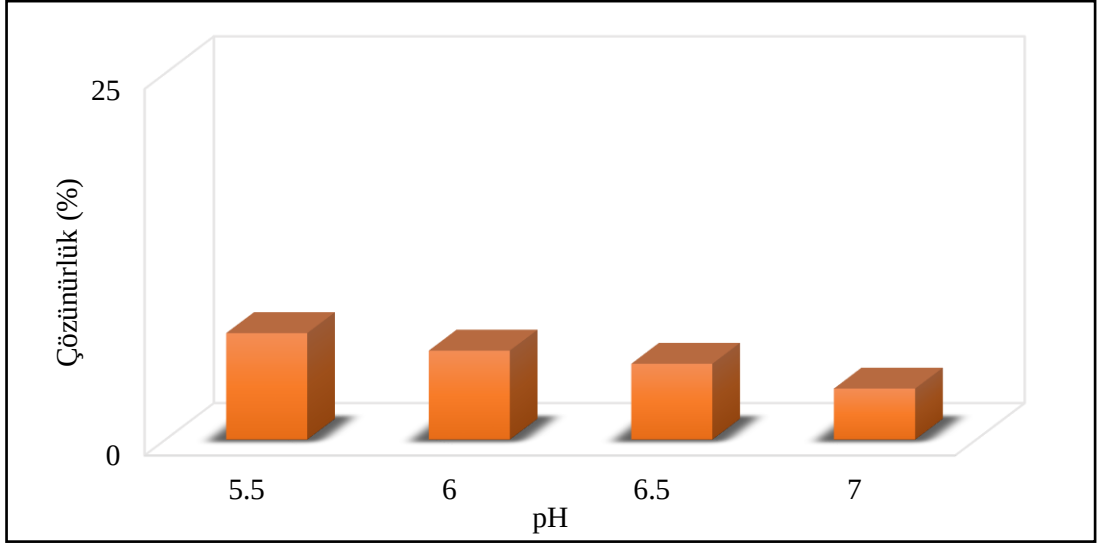
Şekil 9.11. Sızıntı Suyunda MAP çöktürme yöntemi kullanılarak optimum şartlarda çekilen SEM görüntüsü ve EDX grafiği (Yeni, 2019)

9.3.3. Struvitin Farklı pH'larda Çözünürlüklerinin İncelenmesi

Deneyssel çalışma kapsamında, sızıntı suyuna uygulanan $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ve K_2HPO_4 ile yürütülen çöktürme işlemi sonucunda elde edilen struvit kristalleri, çözünürlük analizlerine tabi tutulmuştur. Bu amaçla sentezlenen struvit, 100 mL saf su içerisine 10 gr. olacak şekilde ilave edilerek çözündürme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ardından, ortam pH'ı 5,5, 6,0, 6,5 ve 7,0 değerlerine ayarlanarak farklı pH seviyelerinde struvitin çözünürlük davranışı incelenmiştir. Bu analizler ile elde edilen struvit çöktürmesinin farklı toprak pH koşullarında çözünme kapasitesi ve dolayısıyla bitkisel erişilebilirliği değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular Tablo 9.8 ve Şekil 9.12'de ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Tablo 9.8. Ham sızıntı suyundan elde edilen struvit çöktürmesinin farklı pH'larda çözünürlük değişimi

pH	Çözünen Struvit (gr/100 ml)	Çözünürlük (%)
5,5	0,73	7,30
6,0	0,61	6,10
6,5	0,52	5,20
7,0	0,35	3,50



Şekil 9.12. Ham sızıntı suyundan elde edilen struvitin farklı pH’larda çözünürlük değişimi

Bu çalışmada elde edilen struvit kristallerinin farklı pH seviyelerindeki çözünürlük davranışları sistematik olarak değerlendirilmiştir. Çözünürlük analizleri sonucunda, en yüksek çözünme verimi %7,3 ile pH 5,5 seviyesinde asidik koşullarda elde edilmiştir. Diğer pH değerlerinde gözlenen çözünürlük oranları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık tespit edilmemekle birlikte, genel eğilim asidik ortam koşullarında çözünme hızının ve veriminin arttığını göstermektedir.

Benzer şekilde, MAP ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) kristallerinin çözünürlüğü de pH ile ilişkili olarak değerlendirilmiştir. MAP, suda yüksek çözünürlük gösteren bir tuz olup, pH değişimine bağlı çözünürlüğünde doğrudan büyük değişimler gözlenmez. Bununla birlikte, pH değişimi çözeltideki fosfor türlerinin dağılımını ve çözünme dengesini etkiler. Özellikle asidik ortamda ($\text{pH} < 5$) MAP ın çözünürlüğü maksimum seviyeye yaklaşmakta, fosfor ise çoğunlukla bitkiler tarafından doğrudan alınabilen H_2PO_4^- formunda bulunmaktadır. Asit ilavesi çözünürlüğü sınırlı oranda artırabilse de MAP ın halihazırda yüksek çözünürlüğü nedeniyle bu artış pratik olarak sınırlı kalmaktadır. Nötr pH koşullarında çözünürlük yüksek seviyede korunurken, alkali pH koşullarında ise Ca ve Mg gibi iyonlarla reaksiyona girerek çözünürlüğü düşüren düşük çözünürlüklü fosfat bileşiklerinin oluşma riski bulunmaktadır.

Dolayısıyla, hem struvit hem de MAP gübreleri açısından optimum çözünürlük, hafif asidik koşullarda sağlanmakta olup, bu durum özellikle asidik veya nötr pH’a yakın topraklarda tarımsal verimlilik açısından avantaj sağlamaktadır (Tansel, 2017).

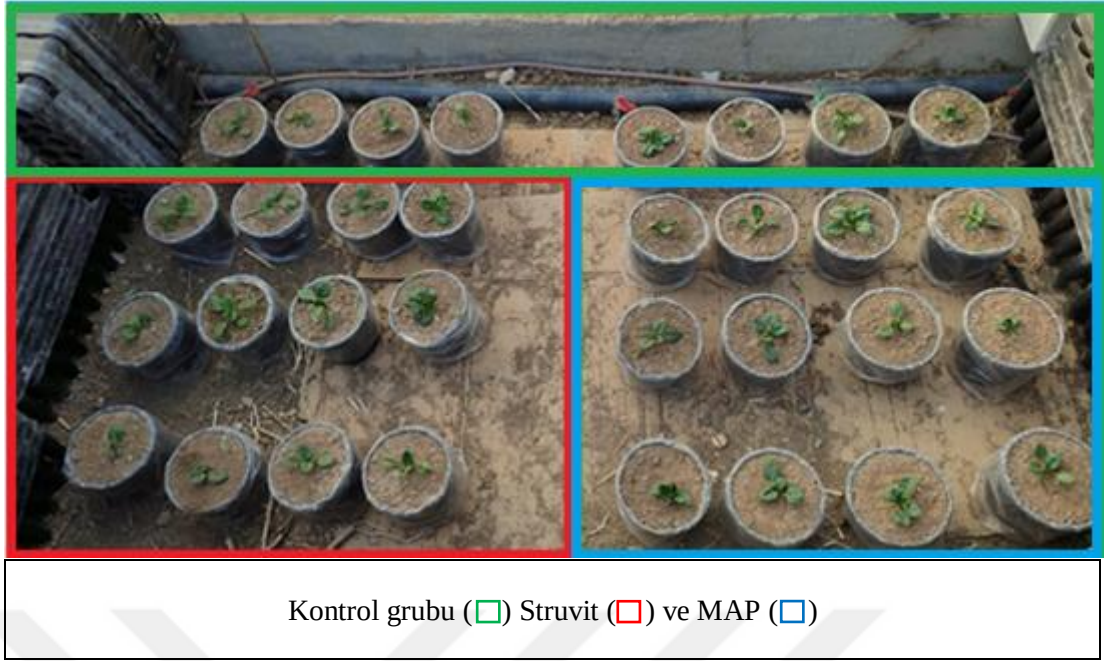
9.3.4. Struvit ile Ticari MAP Gübresinin Tarımsal Potansiyellerinin İncelenmesi

Gübreleme işleminin başladığı tarih “0. gün” olarak kabul edilmiş ve tarımsal uygulamalar toplam 40 gün boyunca sürdürülmüştür (Şekil 9.13, Şekil 9.14, Şekil 9.15, Şekil 9.16, Şekil 9.17, Şekil 9.18, Şekil 9.19, Şekil 9.20, Şekil 9.21). Deneysel uygulamanın başlangıcından gübreleme tarihine kadar geçen 24 günlük süre boyunca bitkilerin gelişimi doğal koşullarda izlenmiştir. Bu süre zarfında her bir bitki tarafından yaklaşık 1200 mL su tüketildiği belirlenmiş olup, su eksikliği gözlemlendiğinde ilave sulamalar yapılmıştır (Şekil 1.12). Deneme kapsamında dört farklı uygulama grubu oluşturulmuştur. Birinci grup herhangi bir gübre uygulaması yapılmayan kontrol grubu olarak belirlenmiştir. Diğer üç gruba ise sırasıyla dekara 5 kg N, 10 kg N ve 15 kg N düzeylerinde azot içeren gübre uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Uygulama planlamasında, saksıların sol kısmında bu çalışma kapsamında oluşturulan struvit, sağ kısmında ise ticari MAP gübresi kullanılmıştır. Deney süresi boyunca bitki gelişimi ile birlikte her grubun su tüketimi günlük olarak izlenmiş ve oluşan su ihtiyacına bağlı olarak sulama işlemleri düzenli şekilde gerçekleştirilmiştir.

Böylece her bir uygulama grubunda bitkilerin optimum su ihtiyacı karşılanarak gelişim koşullarının eşit düzeyde tutulması sağlanmıştır.

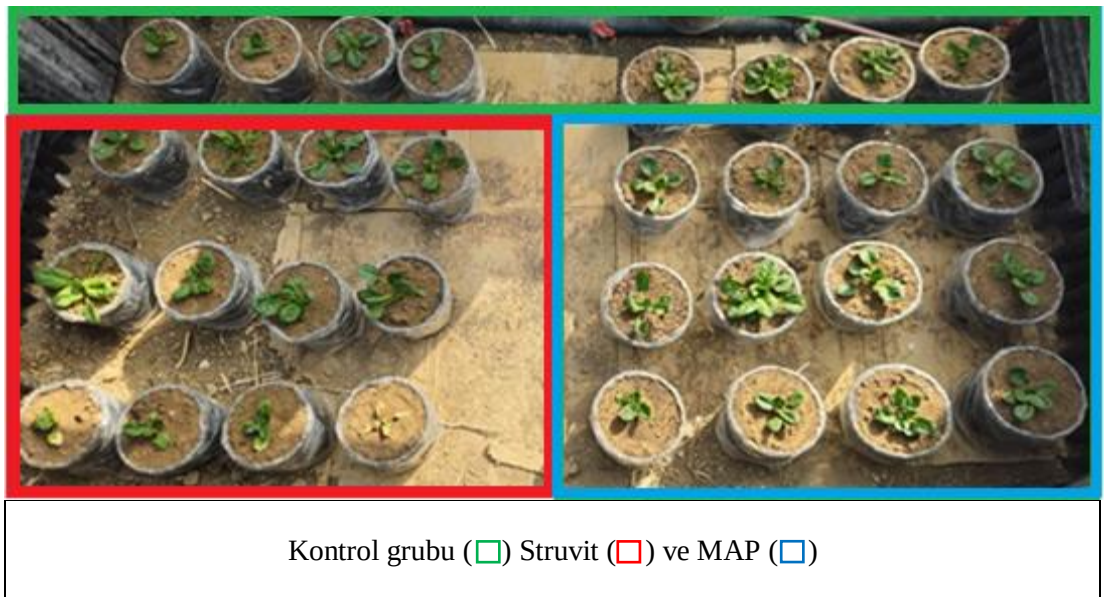


Şekil 9.13. Uygulamanın 0. günü

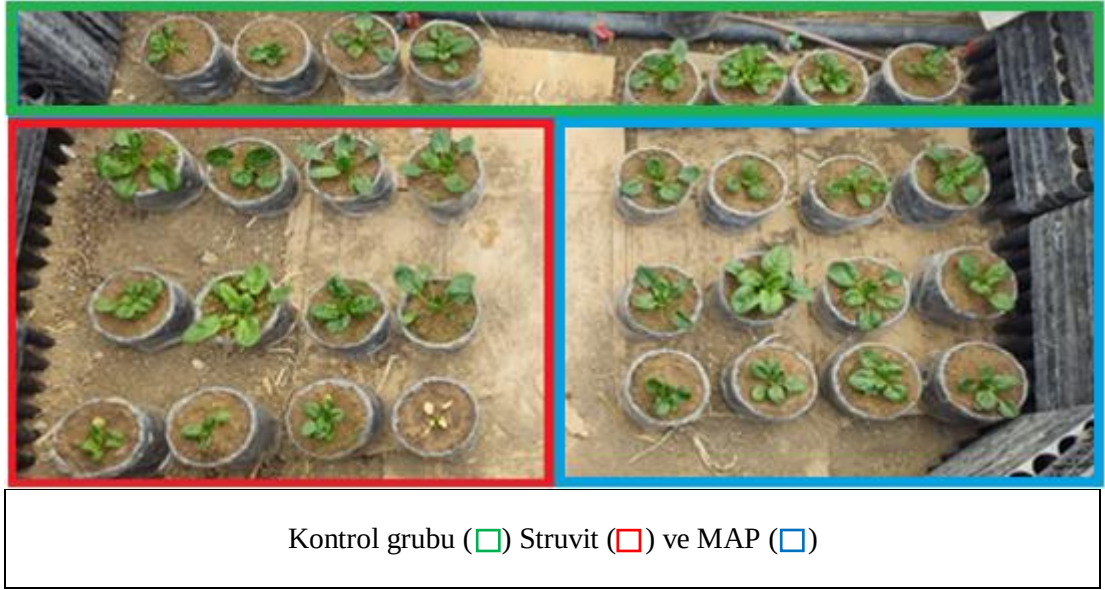


Şekil 9.14. Uygulamanın 5. Günü

Deneyisel uygulamalar sonucunda elde edilen struvit (magnezyum amonyum fosfat) gübresinin 15 kg N/dek dozunda uygulandığı grupta, bitkilerde kurumaya yönelik belirtiler gözlemlenmiştir (Şekil 9.16). Bu durumun, ortamda biriken magnezyum tuzlarının fazlalığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Tuzluluk, sulanan tarım topraklarında arazi bozulmasının temel nedenlerinden biri olmasının yanı sıra, bitki gelişimini ve ürün verimini olumsuz yönde etkileyen önemli bir çevresel streştir (El-Kady ve Borham, 2020).



Şekil 9.15. Uygulamanın 11. Günü



Şekil 9.16. Uygulamanın 15. Günü



Şekil 9.17. Struvit uygulaması yapılan bitkideki gelişim süreci (15.gün)

Tuzluluğun özellikle bitki köklerinin su alımını sınırlayarak fizyolojik faaliyetleri sekteye uğrattığı bildirilmektedir (Wang vd., 2012). Ayrıca, iyon toksisitesi, ozmotik dengesizlikler, oksidatif stres ve besin elementi dengesizlikleri gibi etkiler de tuzluluğa bağlı olarak ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, tarımsal üretimin sürdürülebilirliği ve gıda güvenliğinin sağlanması adına, tuzlu koşullarda yürütülecek üretim faaliyetlerinde uygun yönetim stratejilerinin geliştirilmesi hayati önem taşımaktadır (Ors ve Suarez, 2017).

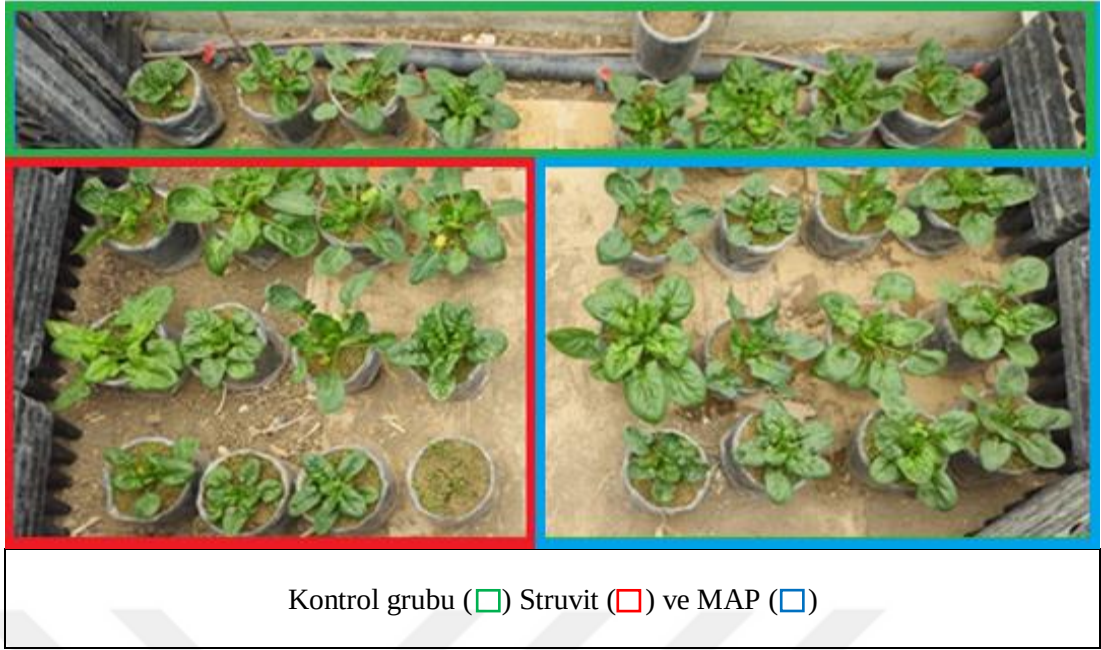


Kontrol grubu (□) Struvit (□) ve MAP (□)

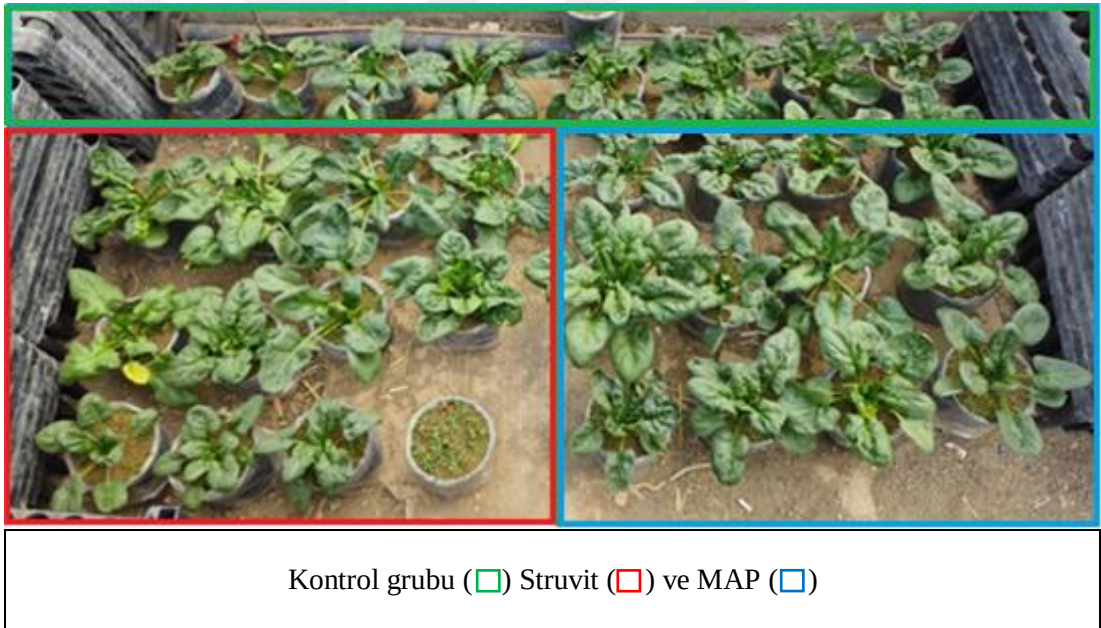
Şekil 9.18. Uygulamanın 21. Günü



Şekil 9.19. Gübre uygulamaları ve bitki süreci 21. Gün



Şekil 9.20. Uygulamanın 29. Günü



Şekil 9.21. Uygulamanın 40. Günü

9.4. Ispanakta Uygulama Sonrası Fiziksel ve Kimyasal Parametrelerin İncelenmesi

Struvit, kontrol grubu ve ticari MAP uygulamaları sonucunda yetiştirilen ıspanak bitkilerinde; uygulamaların bitki gelişimine etkilerini değerlendirmek amacıyla fiziksel ve kimyasal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, her bir uygulama grubuna ait bitkilerden örnekler alınarak, azot başta olmak üzere temel besin elementlerinin dağılımı ve bazı morfolojik özellikler analiz edilmiştir.

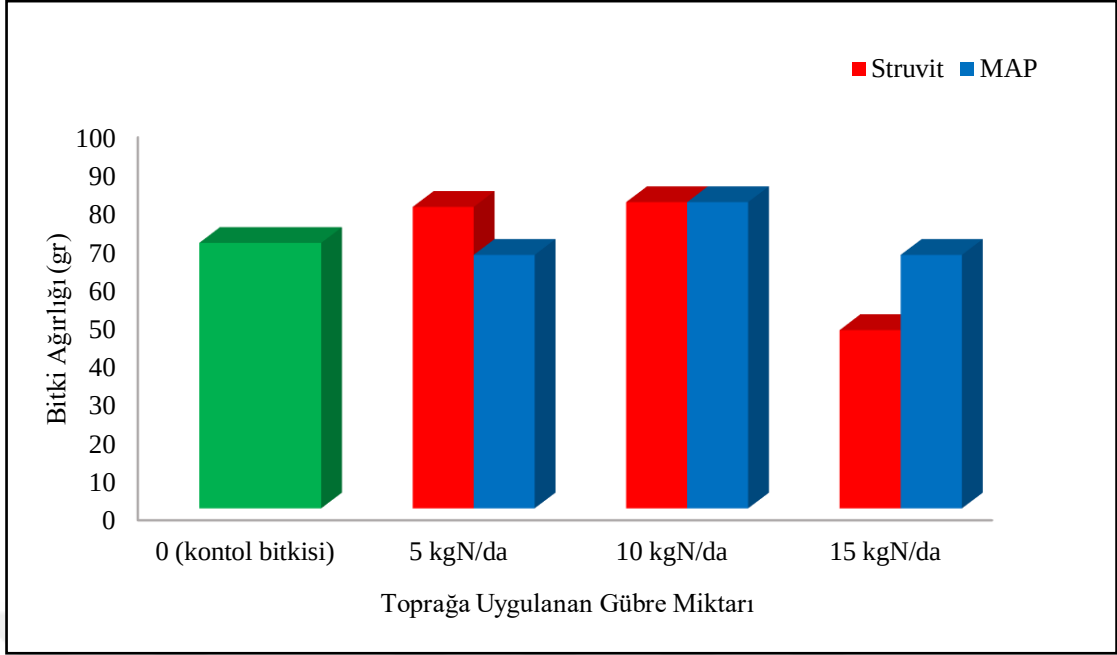
Yapılan analizlerle, alternatif gübre olarak kullanılan struvitin, ticari gübre olan MAP ile karşılaştırıldığında tarımsal etkinliği belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca kontrol grubuyla yapılan karşılaştırmalar sonucunda, gübre uygulamalarının ıspanak bitkisinin büyüme ve besin maddesi alımı üzerindeki etkileri ortaya konmuştur.

9.4.1. Ispanakta Hasat Sonrası Fiziksel Gelişim Parametrelerinin Değerlendirilmesi

Hasat sonrası ıspanak bitkilerinde uygulama gruplarının fiziksel gelişime etkilerini değerlendirmek amacıyla çeşitli fiziksel analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler kapsamında; bitki taze ağırlığı, yaprak ayası, bitki boyu uzaması, toplam yaprak sayısı, kök uzunluğu, gövde kalınlığı, bitki büyüme hızı (cm/gün) gibi temel parametreler ölçülmüştür (Tablo 9.9, Tablo 9.10). Bu veriler, struvit ve MAP gübrelere, gübresiz kontrol grubuna kıyasla bitki gelişimine olan katkılarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmek üzere kullanılmıştır. Yapılan ölçümler, geri kazanılan struvitin ıspanak bitkisinin fiziksel gelişim performansı üzerindeki etkilerinin ortaya konmasına olanak sağlamıştır.

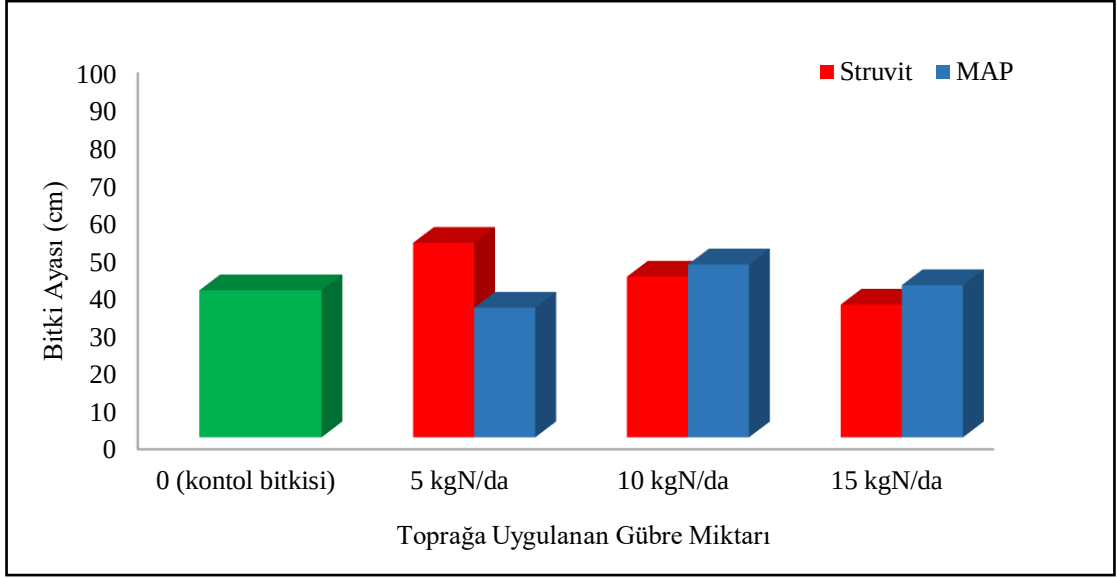
Tablo 9.9. Struvit ve MAP ın bitki büyümesinde ve gelişmesindeki etkileri-1

Gübre Miktarı Parametre	Struvit				MAP			
	Bitki Ağırlığı (gr)	Bitki Ayası (cm)	Bitki Boyu Uzunluğu (cm)	Yaprak Sayısı (adet)	Bitki Ağırlığı (gr)	Bitki Ayası (cm)	Bitki Boy Uzaması (cm)	Yaprak Sayısı (adet)
0 (kontrol bitkisi)	69,38	39,13	20,38	18	69,38	39,13	20,38	18
5 kgN/da	78,75	51,75	22,50	18	66,25	34,50	20,13	17
10 kgN/da	80,00	42,75	21,63	19	80,00	46,00	24,63	19
15 kgN/da	46,67	35,33	18,67	17	66,25	40,50	17,00	19



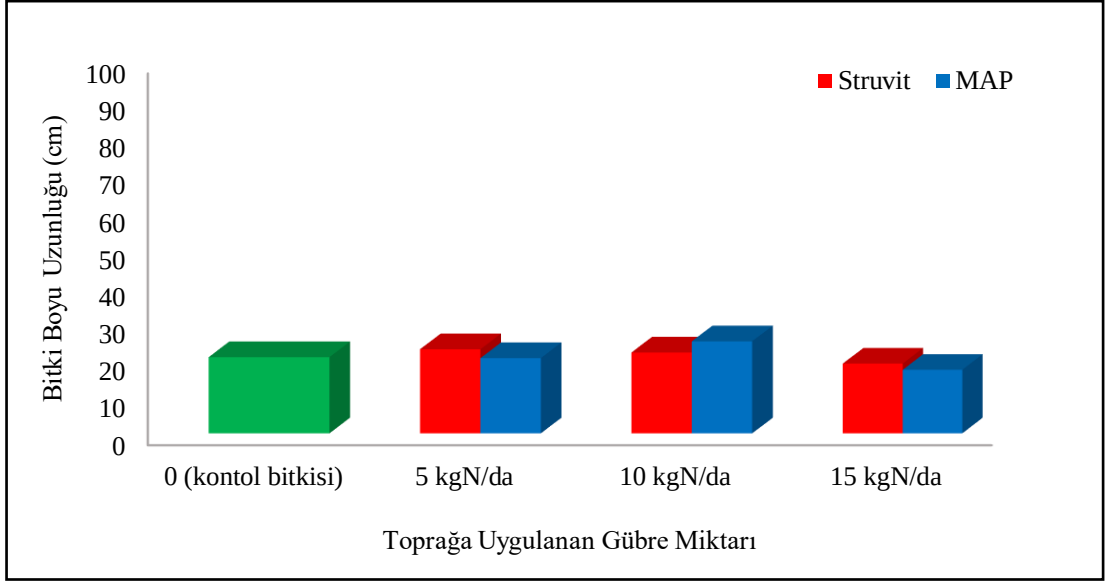
Şekil 9.22. Struvit ve MAP uygulamalarındaki bitki ağırlığının karşılaştırmaları

Yapılan fiziksel analizler sonucunda, uygulanan farklı gübre türleri ve azot dozlarının ıspanak bitkisinin ağırlığı üzerindeki etkileri belirgin şekilde ortaya konmuştur. Gübresiz kontrol grubunda bitki ağırlığı ortalama 69,38 gr. olarak ölçülürken, 5 kg N/da struvit uygulamasında bu değer 78,75 gr'a yükselmiştir. En yüksek bitki ağırlığı ise 10 kg N/da dozunda uygulanan MAP gübre grubunda 80,00 gr. olarak tespit edilmiştir. Bu bulgular, her iki gübre uygulamasının da kontrol grubuna göre biyokütle artışını desteklediğini, ancak ticari gübrenin daha yüksek azot içeriği sayesinde sınırlı da olsa daha fazla verim sağladığını göstermektedir. Bununla birlikte, düşük dozda uygulanan struvit gübresinin, geri kazanılmış bir kaynak olmasına rağmen ticari gübreye oldukça yakın sonuçlar vermesi, bu tür alternatif gübrelerin tarımsal üretimde kullanılabilirliğini ve verimliliğini desteklemektedir. Struvitin yapısında yer alan fosfor ve magnezyum gibi elementlerin bitki büyümesini olumlu etkileyen unsurlar arasında olduğu değerlendirilmektedir (Şekil 9.22).



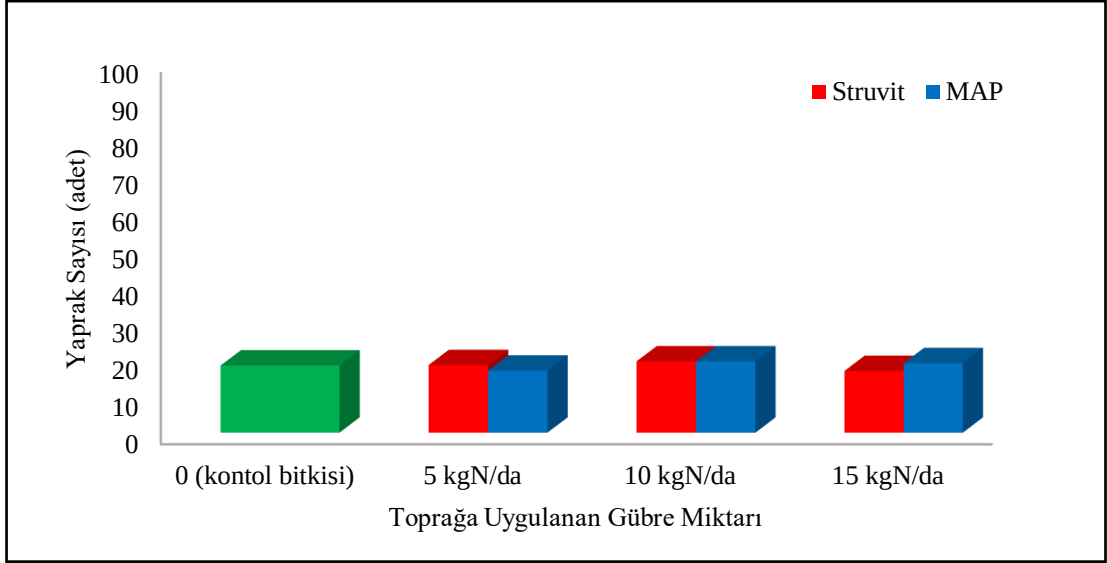
Şekil 9.23. Struvit ve MAP uygulamalarındaki bitki ayası karşılaştırmaları

Uygulama gruplarının ıspanak bitkilerinin bitki ayası üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla yapılan ölçümler, farklı gübre türlerinin bitkisel morfoloji üzerindeki katkılarını ortaya koymuştur. Kontrol grubunda bitki ayası ortalama 39,13 cm olarak belirlenirken, 5 kg N/da dozunda uygulanan struvit gübresiyle bu değer 51,75 cm'ye yükselmiştir. Buna karşılık, 10 kg N/da ticari gübre uygulamasında ise bitki ayası ortalaması 46,00 cm olarak ölçülmüştür. Elde edilen bu veriler, düşük dozda uygulanan struvit gübresinin, ticari gübreyle kıyasla yaprak gelişimi üzerinde daha yüksek olumlu etki yarattığını göstermektedir. Özellikle struvitin yapısındaki magnezyumun, klorofil sentezi ve yaprak gelişiminde rol oynayan bir element olması, bu artışta etkili olduğu düşünülmektedir. Bu bulgu, alternatif bir gübre kaynağı olan struvitin, yalnızca verim değil, aynı zamanda bitki morfolojisinin iyileştirilmesi açısından da önemli katkılar sağlayabileceğini ortaya koymaktadır (Şekil 9.23).



Şekil 9.24. Struvit ve MAP uygulamalarındaki bitki boyu uzunluğu karşılaştırmaları

Farklı gübre uygulamalarının ıspanak bitkisinin boy uzunluğu üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilen değerlendirmelerde, uygulama grupları arasında belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. Kontrol grubundaki bitkilerin ortalama boy uzaması 20,38 cm olarak belirlenirken, 5 kg N/da dozunda struvit gübresi uygulanan grupta bu değer 22,50 cm'ye yükselmiştir. Ticari MAP gübrenin 10 kg N/da dozundaki uygulamasında ise ortalama bitki boyu 24,63 cm ile en yüksek değere ulaşmıştır. Bu veriler, hem struvit hem de ticari gübre uygulamalarının, kontrol grubuna kıyasla bitki boyu gelişimini pozitif yönde etkilediğini ortaya koymaktadır. Özellikle ticari gübre ile elde edilen maksimum boy artışı, daha yüksek azot dozunun bitki uzamasına olan katkısını yansıtırken; düşük dozda uygulanan struvit gübresinin de kontrol grubuna kıyasla anlamlı bir gelişim sağladığı dikkat çekmektedir. Struvitin, yavaş salınımlı yapısı sayesinde bitkiye dengeli bir besin temini sunması, bu gelişimde etkili olmaktadır (Şekil 9.24).



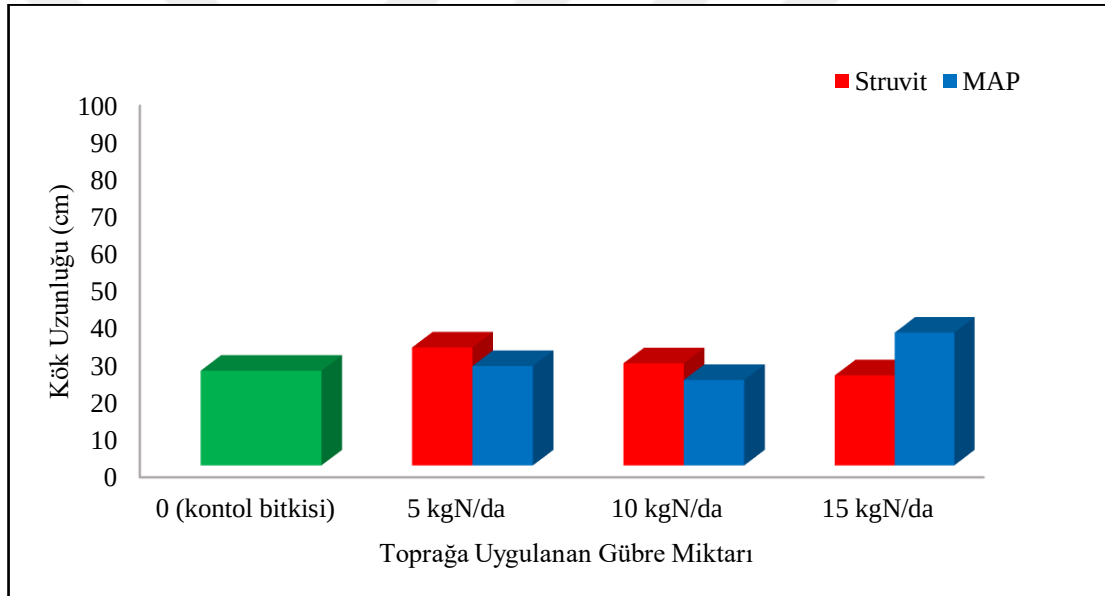
Şekil 9.25. Struvit ve MAP uygulamalarındaki yaprak sayısı karşılaştırmaları

Yaprak sayısına ilişkin elde edilen veriler, uygulama gruplarının bitki morfolojisi üzerindeki etkilerini değerlendirmek açısından önemli ipuçları sunmaktadır. Denemede yer alan kontrol grubunda ve 5 kg N/da dozunda struvit uygulanan grupta ortalama yaprak sayısı 18 adet olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, 10 kg N/da düzeyinde struvit ve ticari MAP gübresi uygulanan gruplarda ise bu sayı 19 adede yükselmiştir (Şekil 9.25). Gözlemlenen bu artış, uygulanan gübre miktarının ve formunun yaprak oluşumu üzerinde hafif düzeyde olumlu etki yarattığını göstermektedir. Ancak düşük dozda struvit uygulaması ile kontrol grubu arasında fark görülmemesi, bu doz seviyesinde struvitin yaprak sayısını artırıcı etkisinin sınırlı olabileceğini düşündürmektedir. Öte yandan, daha yüksek dozlarda uygulanan struvit ile ticari gübre arasında benzer sonuçların elde edilmesi, geri kazanılmış gübrelerin geleneksel gübrelerle kıyaslanabilir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Uygulama gruplarının ıspanak bitkilerinde kök gelişimine etkilerini değerlendirmek amacıyla yapılan ölçümler, kök uzunluğu bakımından anlamlı farklılıklar ortaya koymuştur. Kontrol grubundaki bitkilerde ortalama kök uzunluğu 25,50 cm olarak ölçülürken, 5 kg N/da dozunda struvit uygulanan grupta bu değer 31,75 cm'ye kadar yükselmiştir. En yüksek ortalama kök uzunluğu ise 15 kg N/da dozunda uygulanan ticari gübre grubunda 35,75 cm olarak tespit edilmiştir (Şekil 9.26). Bu bulgular, hem struvit hem de ticari gübre uygulamalarının, kontrol grubuna kıyasla kök gelişimini belirgin şekilde teşvik ettiğini göstermektedir.

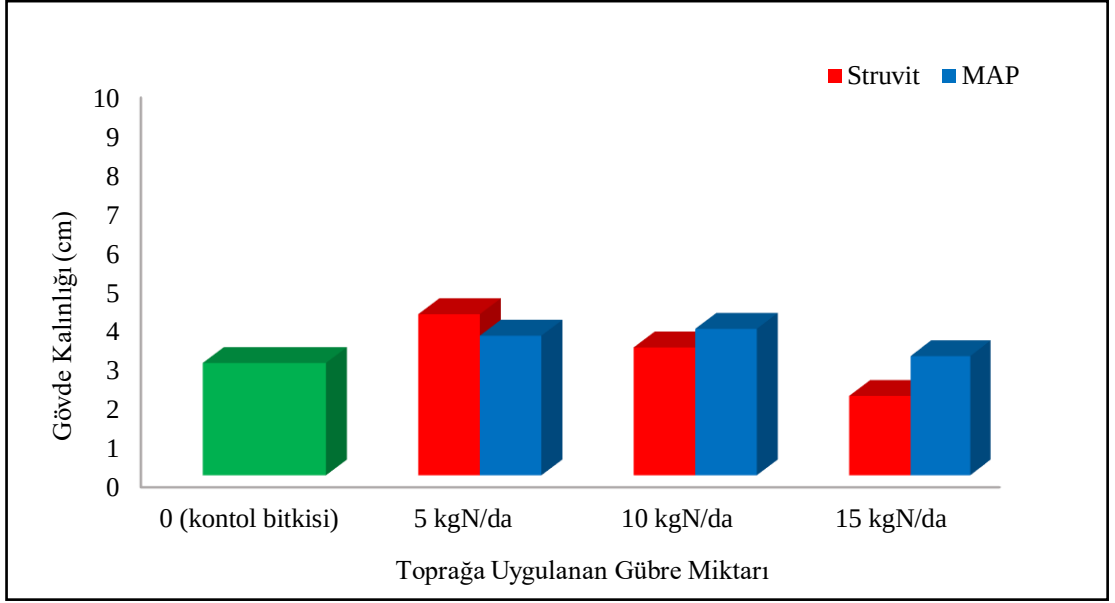
Tablo 9.10. Struvit ve Ticari MAP ın bitkide büyümesinde ve gelişmesindeki etkileri-2

Gübre Miktarı Parametre	Struvit				MAP			
	Kök Uzunluğ u ort. (cm)	Gövde Kalınlığı (cm/gün)	Bitki Büyüme Hızı (cm/gün)	Yapra k Ayası (cm)	Kök Uzunlu ğu (cm)	Gövde Kalınlı ğı (cm)	Bitki Büyüme Hızı (cm/gün)	Yapra k Ayası (cm)
0 (kontrol bitkisi)	25,50	2,90	0,33	12,28	25,50	2,90	0,33	12,28
5 kgN/da	31,75	4,15	0,36	13,43	26,75	3,60	0,32	12,03
10 kgN/da	27,50	3,30	0,35	13,20	23,00	3,78	0,40	14,10
15 kgN/da	24,25	2,05	0,23	12,00	35,75	3,08	0,27	12,75



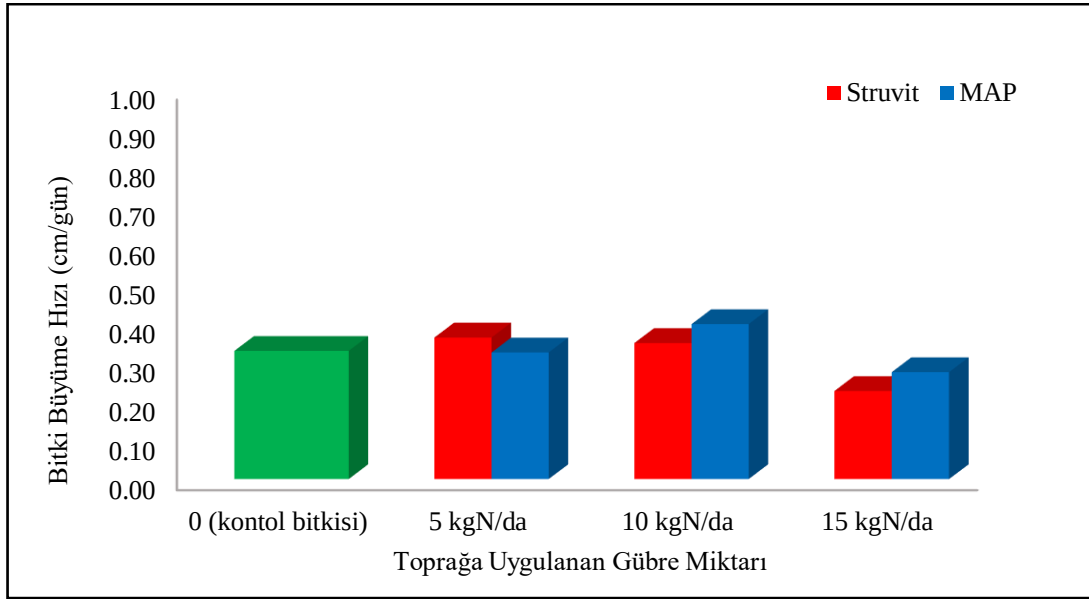
Şekil 9.26. Struvit ve MAP uygulamalarındaki kök uzunluğu karşılaştırmaları

Özellikle yüksek dozda ticari gübre uygulamasının, kök uzamasına en fazla katkı sağladığı görülmektedir. Ancak düşük dozda uygulanan struvit gübresinin de kontrol bitkilerine kıyasla kayda değer bir gelişim sağladığı dikkat çekicidir. Bu durum, struvitin içerdiği magnezyum ve fosfor gibi kök gelişimi açısından önemli makro elementlerin etkisini ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, struvitin alternatif bir gübre kaynağı olarak kullanılmasının, kök yapısı açısından da olumlu etkiler sağlayabileceğini ve bu özelliğiyle geleneksel gübrelere çevresel ve ekonomik bakımdan sürdürülebilir bir alternatif oluşturabileceğini göstermektedir.



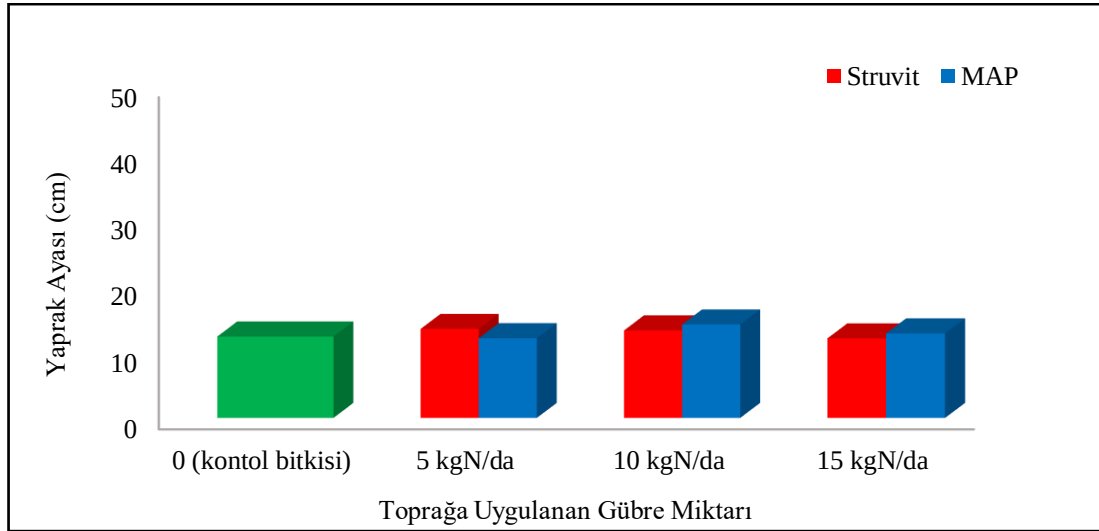
Şekil 9.27. Struvit ve MAP uygulamalarındaki gövde kalınlığı karşılaştırmaları

Yapılan değerlendirmeler sonucunda, uygulama gruplarına göre ıspanak bitkisinin gövde kalınlığı değerlerinde anlamlı farklılıklar gözlenmiştir. Kontrol grubunda ortalama gövde kalınlığı 2,90 cm olarak ölçülmüştür. 5 kg N/da dozunda struvit gübresi uygulanan grupta bu değer 4,15 cm'ye yükselmiş, bu durum struvit gübresinin gövde gelişimi üzerinde olumlu etkiler yarattığını göstermektedir. Öte yandan, 10 kg N/da oranında ticari gübre MAP uygulanan grupta gövde kalınlığı ortalama 3,78 cm olarak kaydedilmiştir (Şekil 9.27). Bu bulgular, struvit uygulamasının özellikle düşük dozlarda bile bitkinin gövde yapısını olumlu yönde etkilediğini ve daha sağlam, kalın gövdeli bitki bireylerinin gelişmesine katkı sağladığını göstermektedir. Struvit gübresinin içeriğinde bulunan fosfor ve magnezyum elementlerinin bitki metabolizmasındaki rolü dikkate alındığında, bu besinlerin özellikle gövde dokusunun gelişiminde destekleyici etkiler oluşturduğu bilinmektedir. Ticari gübrenin daha yüksek dozda uygulanmasına rağmen struvit kadar etkili olmaması, yapısal farklılıklardan veya elementlerin bitki tarafından alım verimliliğinden kaynaklanabileceği gibi, struvitin yavaş salınım özelliğinin bu gelişim üzerinde daha dengeli bir etki yarattığı da düşünülebilir.



Şekil 9.28. Struvit ve MAP uygulamalarındaki bitki büyüme hızı karşılaştırmaları

Deneme kapsamında yapılan ölçümler doğrultusunda, farklı gübre uygulamalarının ıspanak bitkisinin büyüme hızına (cm/gün) etkileri belirgin bir şekilde ortaya konmuştur. Kontrol grubunda bitki büyüme hızı ortalama 0,33 cm/gün olarak kaydedilmiş; 5 kg N/da dozunda struvit gübresi uygulanan grupta bu değer 0,36 cm/gün seviyesine yükselmiştir. Ticari gübre MAP ile 10 kg N/da dozunda yapılan uygulamada ise büyüme hızı 0,40 cm/gün olarak ölçülmüştür (Şekil 9.28). Bu bulgular, her iki gübre uygulamasının da gübresiz kontrol grubuna göre bitki büyümesini hızlandırdığını göstermektedir. Özellikle ticari gübre uygulamasının daha yüksek bir büyüme hızı sağladığı görülse de, struvit uygulaması da dikkat çekici düzeyde olumlu etkiler oluşturmıştır. Struvitin düşük dozda uygulanmasına rağmen büyüme hızında anlamlı bir artış sağlaması, bu gübrenin bitki gelişimini destekleyici potansiyeline işaret etmektedir. Struvitin içerdiği yavaş salımlı azot ve fosforun yanı sıra magnezyumun da bitki metabolizmasına katkı sunarak, büyüme hızını istikrarlı bir şekilde desteklemiş olabileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 9.29. Struvit ve MAP uygulamalarındaki yaprak ayası karşılaştırmaları

Yapılan ölçümler sonucunda, farklı azotlu gübre uygulamalarının ıspanak bitkisinde yaprak ayası gelişimi üzerinde anlamlı etkiler oluşturduğu belirlenmiştir. Kontrol grubunda yaprak ayası uzunluğu ortalama 12,28 cm olarak ölçülmüş, 5 kg N/da dozunda uygulanan struvit gübresiyle bu değer 13,43 cm'ye yükselmiştir. Ticari gübre (MAP) uygulamasında ise 10 kg N/da dozunda en yüksek yaprak ayası uzunluğu olan 14,10 cm değerine ulaşılmıştır (Şekil 9.29). Elde edilen veriler, hem struvit hem de ticari gübre uygulamalarının yaprak ayası gelişimini olumlu yönde etkilediğini ortaya koymaktadır. Özellikle ticari gübrenin daha yüksek dozda uygulanması, yaprak ayasında daha fazla gelişim sağlarken, struvitin düşük dozda bile kayda değer bir artış sağlaması dikkat çekicidir. Bu durum, struvitin içerdiği yavaş salımlı besin elementlerinin bitkinin yaprak gelişimi üzerindeki düzenleyici etkisini desteklemektedir. Ayrıca, yaprak ayası genişliği, bitkinin fotosentetik kapasitesiyle doğrudan ilişkili olduğundan, bu artışın verimlilik üzerinde de olumlu yansımaları olabileceği düşünülmektedir. Sonuç olarak, struvit gübresinin düşük dozda uygulanmasıyla dahi yaprak gelişimi açısından anlamlı bir iyileşme sağlandığı ve sürdürülebilir gübre alternatifleri arasında değerlendirilebileceği görülmektedir.

9.4.2. Ispanakta Hasat Sonrası Kimyasal Gelişim Parametrelerinin Değerlendirilmesi

Bu bölümde, farklı azotlu gübre uygulamalarının ıspanak bitkisinde kimyasal gelişim üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu kapsamda, hasat sonrası elde edilen bitki materyalleri üzerinden temel mikro besin elementleri ile birlikte bazı ağır metal içerikleri analiz edilmiştir. Yapılan değerlendirmelerde,

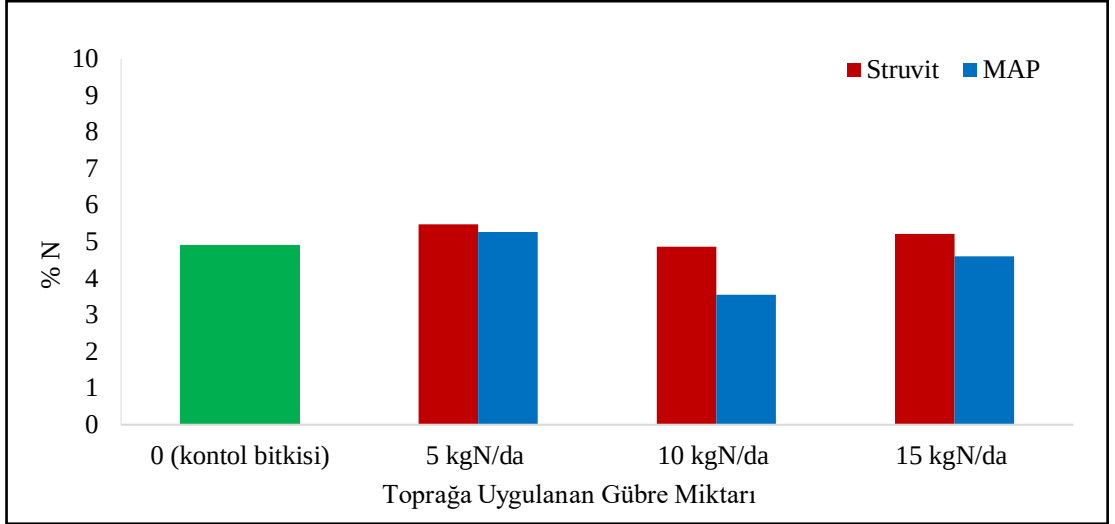
özellikle struvit ve ticari MAP gübresi uygulamaları ile gübresiz kontrol grubu karşılaştırmalı olarak ele alınmış; azot (N), fosfor (P), potasyum (K), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), demir (Fe) gibi bitki beslenmesi açısından hayati öneme sahip elementlerin bitkideki dağılımı belirlenmiştir. Buna ek olarak, çevresel kirlilik ve gıda sağlığı açısından önem arz eden kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), nikel (Ni) ve krom (Cr) gibi ağır metallerin birikim düzeyleri de analiz kapsamına alınmıştır.

9.4.2.1. Struvit ve MAP Uygulamalarının Ispanakta Bitki Besin Elementleri Üzerindeki Etkileri

Bu bölümde, struvit ve ticari MAP uygulamalarının ıspanak bitkisi üzerindeki kimyasal gelişim parametrelerine etkileri incelenmiştir. Özellikle makro ve mikro besin elementlerinin bitki dokularındaki birikim düzeyleri, farklı azot dozları altında değerlendirilmiştir. Bu analizler ile alternatif gübre olarak değerlendirilen struvitin, ticari gübre olan MAP ile karşılaştırmalı olarak bitki besin elementi alımı üzerindeki etkisi ortaya konmuştur (Tablo 9.11, Tablo 9.12). Ayrıca gübre uygulanmayan kontrol grubu ile yapılan karşılaştırmalar sayesinde, her bir uygulamanın ıspanakta besin elementlerinin biyoyararlanımı üzerindeki potansiyel katkısı bilimsel temelde analiz edilmiştir. Bu sayede, sürdürülebilir tarım uygulamalarında geri kazanılmış gübrelerin kullanımı açısından önemli veriler elde edilmiştir.

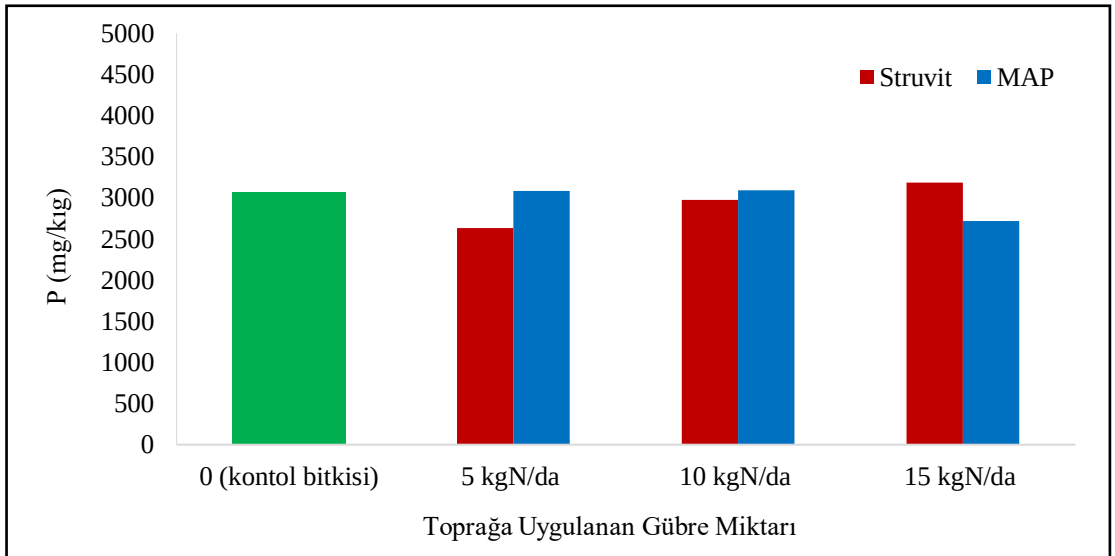
Tablo 9.11. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası %N, P (mg/kg) ve Mg (mg/kg) değişim sonuçları

Miktar (kg)	% N		P (mg/kg)		Mg (mg/kg)	
	Struvit	MAP	Struvit	MAP	Struvit	MAP
0 (kontrol bitkisi)	4,91	4,91	3069,71	3069,71	7065,00	7065,42
5 kgN/da	5,48	5,26	2634,35	3080,05	8733,88	9434,52
10 kgN/da	4,86	3,55	2977,69	3093,65	8404,04	7478,33
15 kgN/da	5,21	4,60	3185,02	2715,23	9933,70	10791,40



Şekil 9.30. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası %N değişim sonuçları

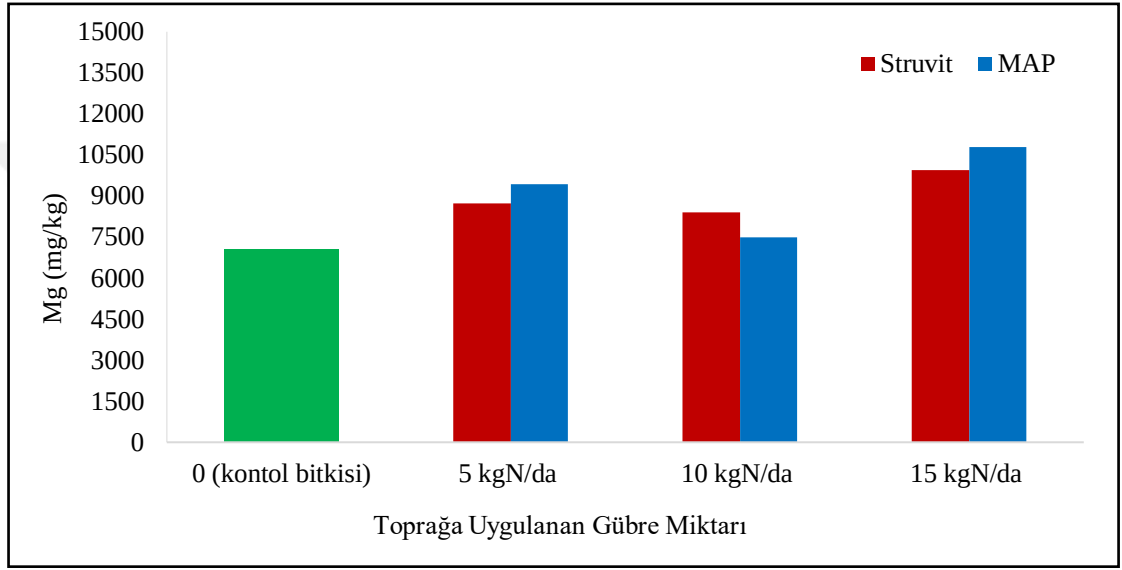
Gerçekleştirilen deneme çalışmaları neticesinde, kontrol grubundaki bitkilerde ölçülen azot (N) oranı %4,91 olarak belirlenmiştir. Bu referans değere kıyasla, 5 kg N/da dozunda uygulanan struvit ile beslenen bitkilerde azot birikiminin %5,48 düzeyine ulaştığı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, MAP bazlı ticari gübre uygulamasında ise %5,26 oranında bitkisel azot tutulumu gerçekleşmiştir (Şekil 9.30). Elde edilen veriler, hem struvitin hem de MAP gübresinin azot alımını artırıcı etkisinin bulunduğunu ortaya koymakta; özellikle struvit uygulamasının, ticari gübreye kıyasla daha yüksek bir azot birikimi sağladığını göstermektedir.



Şekil 9.31. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası P (mg/kg) değişim sonuçları

Deneme sonuçlarına göre, kontrol grubundaki bitkilerde fosfor (P) konsantrasyonu 3069,71 mg/kg olarak ölçülmüştür. Bu referans düzeyle

karşılaştırıldığında, struvit uygulamasının 5 kg N/da dozunda bitki bünyesindeki fosfor miktarı 2634,35 mg/kg olarak kaydedilmiş; MAP bazlı ticari gübrede ise en yüksek fosfor kullanımı 15 kg N/da dozunda 2715,23 mg/kg olarak gerçekleşmiştir (Şekil 9.31). Her ne kadar MAP uygulamasında daha yüksek dozda fosfor birikimi gözlenirse de, struvitin daha düşük azot dozu ile benzer değerlere ulaşabilmesi dikkat çekicidir. Özellikle struvitin tüm deneme alanlarında tutarlı bir şekilde yüksek fosfor kullanım verimliliği sağlaması, bu geri kazanılmış gübre türünün bitkisel fosfor alımı açısından etkin bir alternatif olabileceğini ortaya koymaktadır.

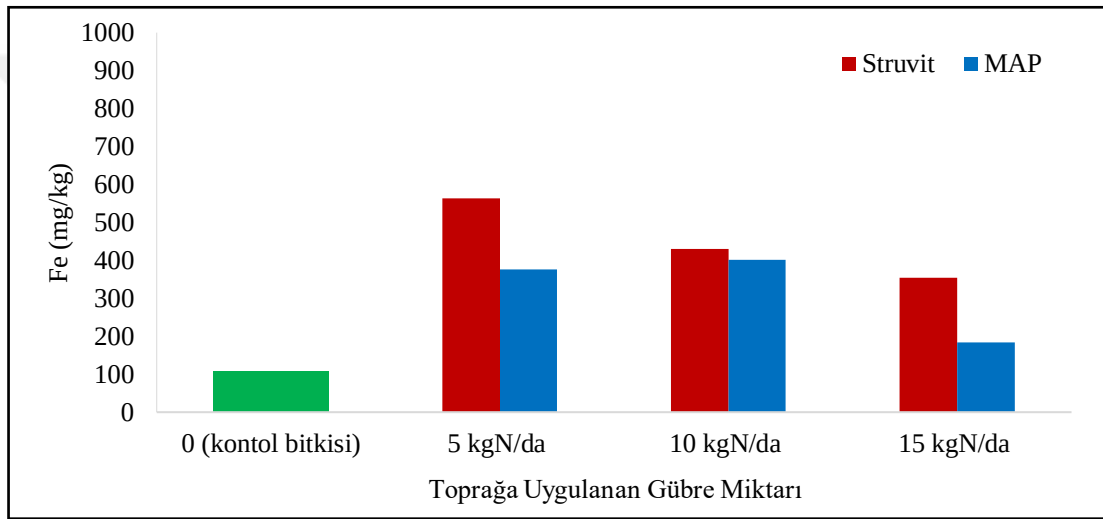


Şekil 9.32. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Mg (mg/kg) değişim sonuçları

Yapılan analizler sonucunda, kontrol grubundaki bitkilerde magnezyum içeriği 7065,42 mg/kg olarak ölçülmüştür. Uygulanan gübre türlerine göre incelendiğinde, struvit uygulamasının 15 kg N/da dozunda en yüksek magnezyum birikimi 9933,70 mg/kg seviyesine ulaşmıştır. Öte yandan, MAP ticari gübresiyle gerçekleştirilen uygulamalarda ise en yüksek magnezyum içeriği, aynı dozda (15 kg N/da) 10791,40 mg/kg olarak kaydedilmiştir (Şekil 9.32). MAP gübresi, mutlak değer açısından daha yüksek bir magnezyum birikimi sağlasa da, struvit uygulamasının tüm uygulama düzeylerinde istikrarlı ve yüksek düzeyde magnezyum kullanımı sağladığı gözlemlenmiştir. Bu bulgu, struvitin yalnızca azot ve fosfor değil, aynı zamanda magnezyum yönünden de bitki beslenmesine katkı sunabileceğini ve geri kazanılmış gübreler arasında çok yönlü bir alternatif oluşturduğunu göstermektedir.

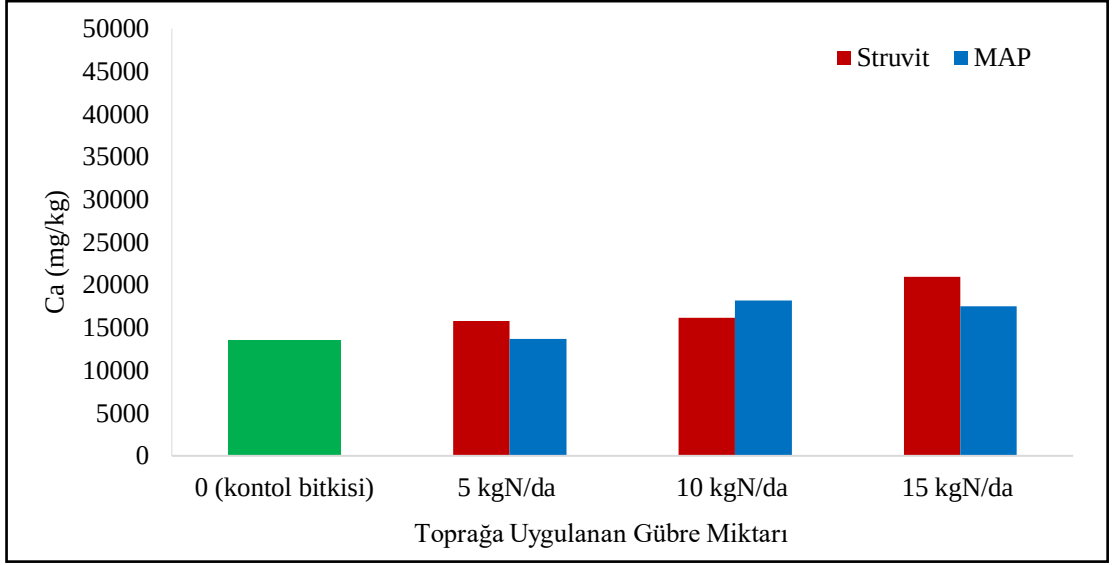
Tablo 9.12. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Fe (mg/kg), Ca (mg/kg) ve K (mg/kg) değişim sonuçları

Miktar (kg)	Fe (mg/kg)		Ca (mg/kg)		K (mg/kg)	
	Struvit	MAP	Struvit	MAP	Struvit	MAP
0 (kontrol bitkisi)	106,81	106,81	13568,90	13568,90	60078,20	60078,20
5 kgN/da	563,07	376,19	15781,40	13685,10	43659,40	39071,60
10 kgN/da	430,27	401,85	16171,40	18203,70	55245,10	33858,00
15 kgN/da	354,59	184,58	20957,70	17519,20	57147,20	39033,80



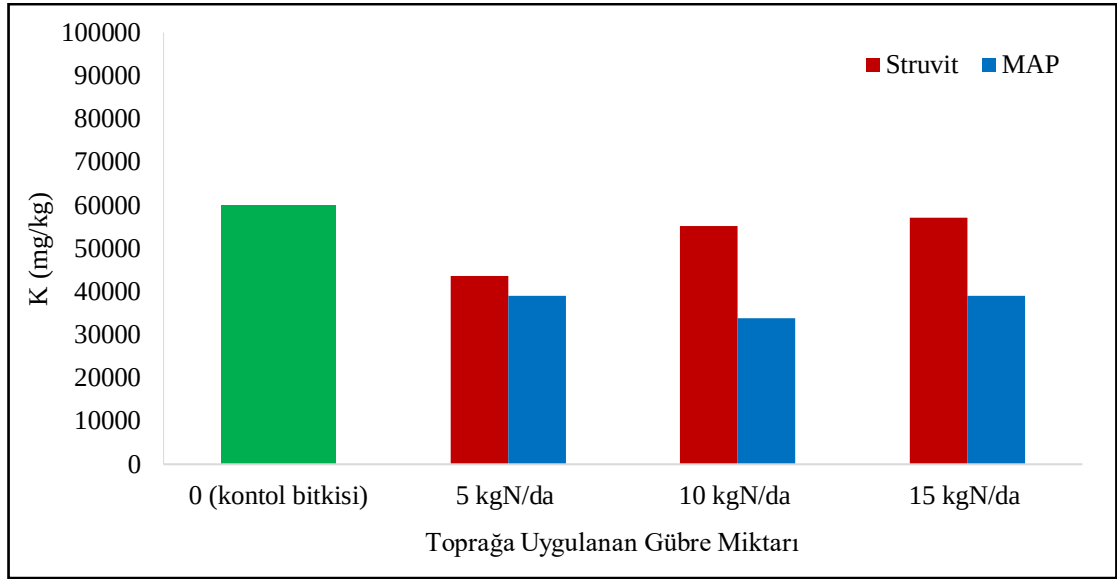
Şekil 9.33. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Fe (mg/kg) değişim sonuçları

Gerçekleştirilen analizler sonucunda, kontrol grubundaki bitkilerde demir (Fe) konsantrasyonu 106,81 mg/kg olarak ölçülmüştür. Uygulanan gübre türlerine göre yapılan değerlendirmede, struvit uygulamasının 5 kg N/da dozunda en yüksek demir birikimi 563,07 mg/kg ile gerçekleşmiştir. MAP bazlı ticari gübre uygulamasında ise en iyi sonuç, 10 kg N/da dozunda 401,85 mg/kg düzeyinde kaydedilmiştir (Şekil 9.33). Bu sonuçlar, struvitin yalnızca makro besin elementleri açısından değil, aynı zamanda mikro elementlerden biri olan demir bakımından da bitkisel alımı artırmada etkili olduğunu göstermektedir. Özellikle struvit uygulamasının tüm deneme koşullarında daha yüksek demir alımı sağladığı dikkate alındığında, bu geri kazanılmış gübrenin bitki beslenmesinde çok yönlü bir katkı sunduğu ve sürdürülebilir tarım uygulamaları açısından önemli bir potansiyel taşıdığı söylenebilir.



Şekil 9.34. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Ca (mg/kg) değişim sonuçları

Deneme çalışmaları sonucunda, kontrol grubundaki bitkilerde kalsiyum (Ca) içeriği 13.568,90 mg/kg olarak belirlenmiştir. Uygulanan gübre tiplerine göre yapılan değerlendirmede, struvit uygulamasının 15 kg N/da dozunda bitki bünyesindeki kalsiyum miktarı 20.957,70 mg/kg düzeyine ulaşarak en yüksek değeri göstermiştir. MAP bazlı ticari gübre uygulamasında ise en iyi sonuç 10 kg N/da dozunda 18.203,70 mg/kg olarak kaydedilmiştir (Şekil 9.34). Bu sonuçlar, struvitin bitkisel kalsiyum alımını artırma potansiyelinin yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle struvitin tüm uygulama düzeylerinde istikrarlı ve yüksek kalsiyum birikimi sağlaması, bu geri kazanılmış gübrenin sadece azot ve fosfor değil, aynı zamanda kalsiyum gibi temel bitki besin elementlerinin alımında da etkili bir kaynak olabileceğini göstermektedir.



Şekil 9.35. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası K (mg/kg) değişim sonuçları

Yapılan analizler sonucunda, kontrol grubundaki bitkilerde potasyum (K) içeriği 60.078,20 mg/kg olarak ölçülmüştür. Gübre uygulamaları dikkate alındığında, struvit uygulamasının 5 kg N/da dozunda potasyum konsantrasyonu 43.659,40 mg/kg ile en düşük düzeyde gerçekleşmiş, MAP bazlı ticari gübrede ise en düşük potasyum değeri 10 kg N/da dozunda 33.858 mg/kg olarak kaydedilmiştir (Şekil 9.35). Her iki gübre türü ile yapılan uygulamalarda kontrol grubuna kıyasla potasyum içeriğinde bir azalma gözlenmiştir. Bununla birlikte, tüm uygulama dozlarında struvitin, MAP gübresine göre daha yüksek potasyum düzeyleri sağladığı belirlenmiştir.

9.4.2.2. Struvit ve MAP Uygulamalarının Ispanak Bitkisinde Ağır Metal Birikimi Üzerine Etkileri

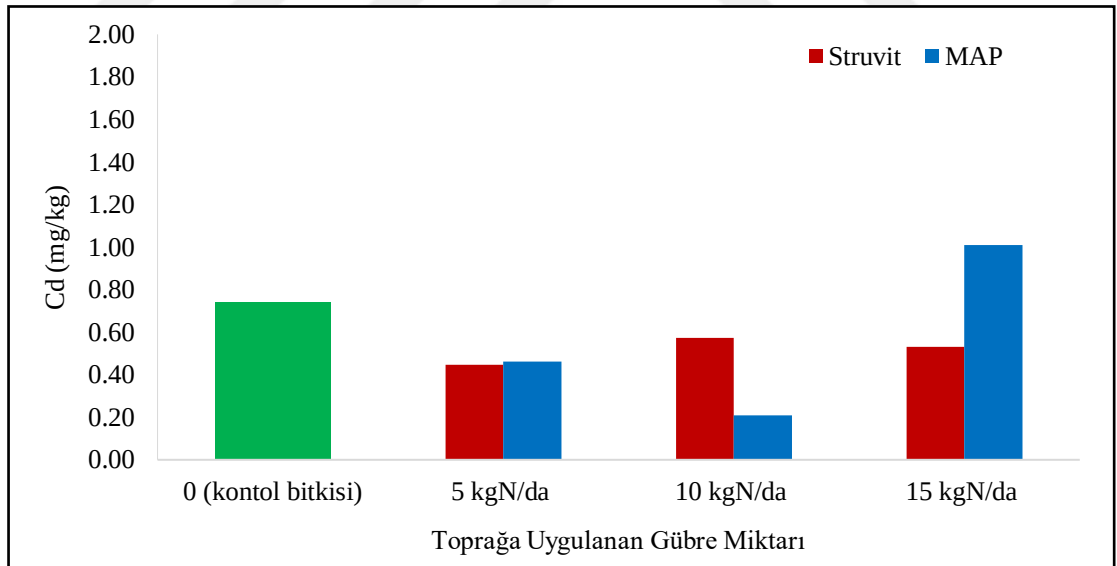
Bu bölümde, sızıntı suyundan laboratuvar ortamında geri kazanımı gerçekleştirilen struvit ile ticari olarak temin edilen MAP gübresinin uygulandığı ıspanak (*Spinacia oleracea L.*) bitkilerinde ağır metal birikimi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir (Tablo 9.13, Tablo 9.14, Tablo 9.15). Uygulamalar sonucunda, her iki gübre türünün bitki bünyesindeki ağır metal düzeylerinde meydana getirdiği değişimler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Tablo 9.13. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Cd (mg/kg), Co (mg/kg) ve Cr (mg/kg) değişim sonuçları

Miktar (kg)	Cd (mg/kg)		Co (mg/kg)		Cr (mg/kg)	
	Struvit	MAP	Struvit	MAP	Struvit	MAP
0 (kontrol bitkisi)	0,74	0,74	0,66	0,66	0,80	0,80
5 kgN/da	0,45	0,46	0,19	0,01	0,31	0,29
10 kgN/da	0,57	0,21	0,41	0,11	0,29	0,27
15 kgN/da	0,53	1,01	0,27	0,12	0,24	0,19

Gerçekleştirilen analizler sonucunda, kontrol grubundaki ıspanak bitkilerinde kadmiyum (Cd) içeriği 0,74 mg/kg olarak belirlenmiştir. Gübre uygulamaları doğrultusunda yapılan değerlendirmelerde, struvit uygulamasının 5 kg N/da dozunda bitkideki kadmiyum miktarının 0,45 mg/kg ye düştüğü gözlemlenmiştir.

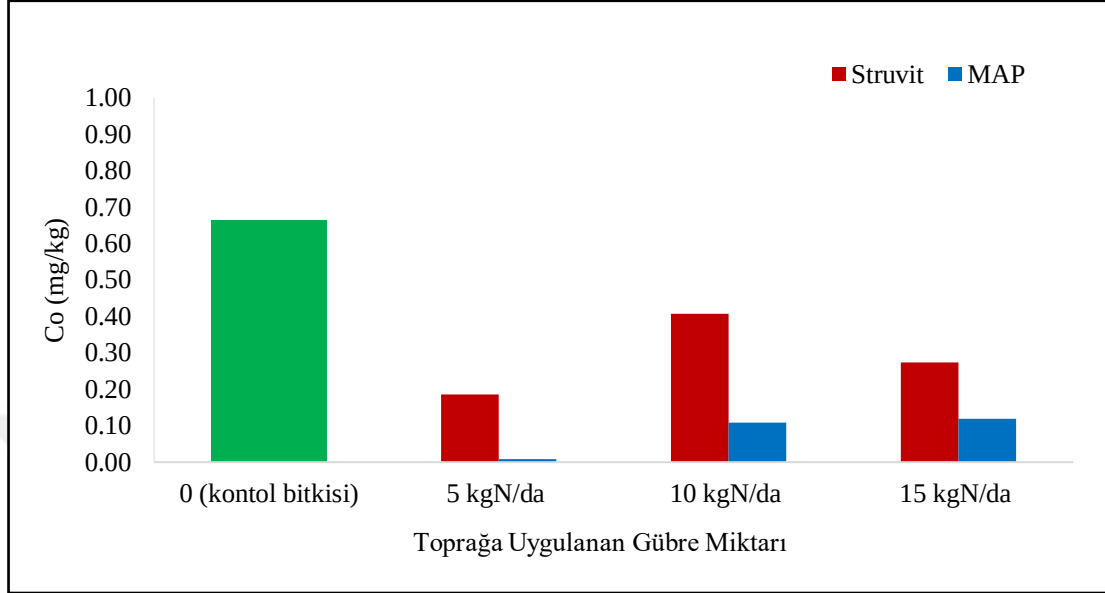
MAP ticari gübresinin 10 kg N/da dozunda ise en düşük kadmiyum düzeyi 0,21 mg/kg olarak kaydedilmiştir (Şekil 9.36).



Şekil 9.36. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Cd (mg/kg) değişim sonuçları

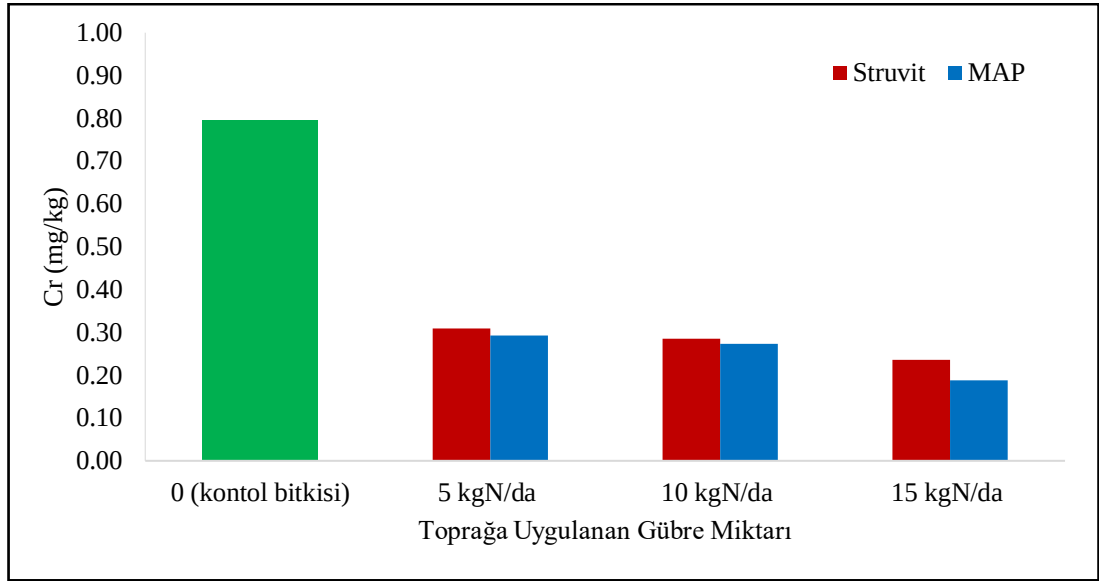
Bu veriler, her iki gübre uygulamasının da kadmiyum birikimini kontrol grubuna kıyasla azalttığını ortaya koymaktadır. Özellikle MAP uygulamasında elde edilen düşük kadmiyum seviyesi, bu gübre tipinin ıspanak bitkilerinde ağır metal birikimini sınırlamada daha etkili olabileceğine işaret etmektedir.

Ancak struvit uygulamalarının da ağır metal alımını belirgin şekilde azalttığı ve geri kazanılmış bir gübre olarak çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir alternatif sunduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 9.37 Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Co (mg/kg) değişim sonuçları

Yapılan analizler sonucunda, kontrol grubundaki ıspanak bitkilerinde kobalt (Co) içeriği 0,66 mg/kg olarak ölçülmüştür. Struvit uygulamaları arasında en düşük kobalt düzeyi, 5 kg N/da dozunda yapılan uygulamada 0,19 mg/kg olarak belirlenmiştir. MAP ticari gübresinin 5 kg N/da dozundaki uygulamasında ise bu değer 0,01 mg/kg ye kadar düşmüştür (Şekil 9.37). Elde edilen bulgular, her iki gübre uygulamasının da kobalt birikimini kontrol grubuna göre önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Özellikle MAP uygulamasında kobalt seviyesinin oldukça düşük düzeylere inmesi, bu gübrenin ağır metal birikimini sınırlandırma açısından yüksek bir etkiye sahip olabileceğini düşündürmektedir. Bununla birlikte, struvit uygulamasının da kobalt birikimini baskılayıcı etkisinin bulunduğu ve geri kazanılmış bir gübre olarak çevresel riskleri minimize etme potansiyeline sahip olduğu anlaşılmaktadır.

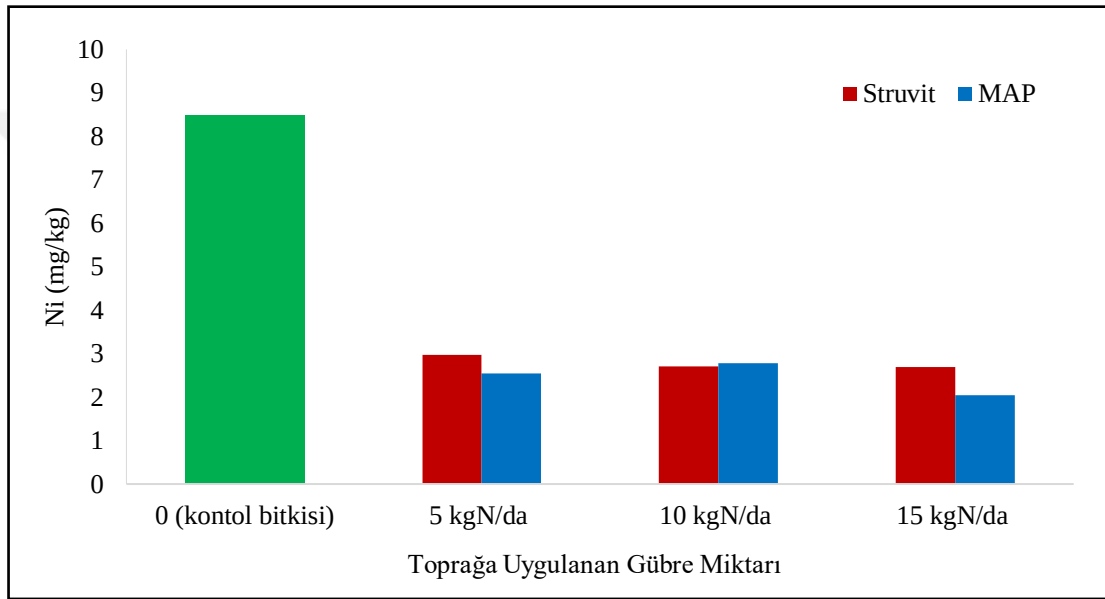


Şekil 9.38. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Cr (mg/kg) değişim sonuçları

Gerçekleştirilen analizler sonucunda, kontrol grubunda yetiştirilen ıspanak bitkilerinde krom (Cr) içeriği 0,80 mg/kg olarak belirlenmiştir. Struvit uygulamaları arasında en düşük krom birikimi, 15 kg N/da dozunda 0,24 mg/kg olarak ölçülürken; en yüksek değer 5 kg N/da dozunda 0,31 mg/kg ye ulaşmıştır. MAP ticari gübresinde ise en düşük krom değeri yine 15 kg N/da uygulamasında 0,19 mg/kg olarak kaydedilmiş, en yüksek değer ise 5 kg N/da uygulamasında 0,29 mg/kg olarak tespit edilmiştir (Şekil 9.38). Elde edilen bu veriler, hem struvit hem de MAP uygulamalarının bitkideki krom birikimini kontrol grubuna kıyasla belirgin şekilde azalttığını göstermektedir. Özellikle yüksek doz uygulamalarda krom düzeylerinde daha düşük sonuçlar elde edilmesi, artan azot dozu ile birlikte krom alımının baskılanabileceğini düşündürmektedir. MAP uygulamaları, krom birikiminin azaltılması bakımından daha düşük düzeylere ulaşmış olsa da, struvit uygulamaları da benzer şekilde olumlu etkiler sergilemiş ve geri kazanılmış gübrelerin ağır metal birikimi üzerindeki sınırlayıcı potansiyelini ortaya koymuştur.

Tablo 9.14. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Ni (mg/kg) ve Pb (mg/kg) değişim sonuçları

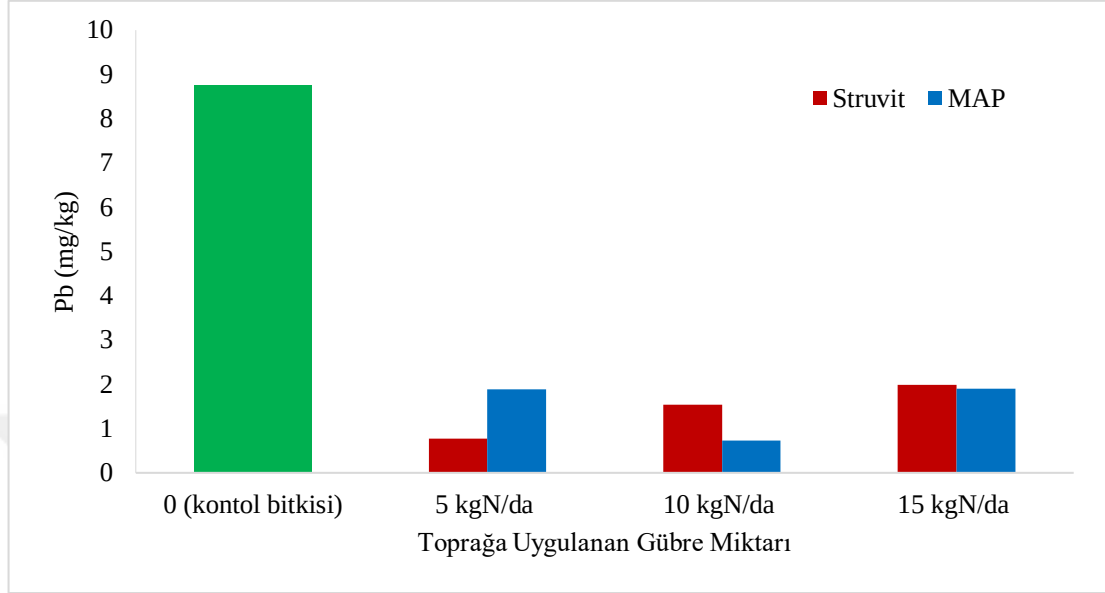
Miktar (kg)	Ni (mg/kg)		Pb (mg/kg)	
	Struvit	MAP	Struvit	MAP
0 (kontrol bitkisi)	8,47	8,47	8,75	8,75
5 kgN/da	2,97	2,54	0,77	1,89
10 kgN/da	2,70	2,78	1,54	0,73
15 kgN/da	2,69	2,05	1,99	1,91



Şekil 9.39. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Ni (mg/kg) değişim sonuçları

Analiz sonuçlarına göre, kontrol grubundaki ıspanak bitkilerinde nikel (Ni) konsantrasyonu 8,47 mg/kg olarak ölçülmüştür. Gübre uygulamaları incelendiğinde, struvit kullanılarak yapılan 15 kg N/da dozundaki uygulamada bitkide en düşük nikel birikimi 2,69 mg/kg olarak tespit edilmiştir. Benzer şekilde, MAP ticari gübresinin 15 kg N/da dozundaki uygulamasında ise nikel seviyesi 2,05 mg/kg ile en düşük değer olarak kaydedilmiştir. Öte yandan, en yüksek nikel içeriği struvit uygulamalarında 5 kg N/da dozunda 2,97 mg/kg, MAP uygulamalarında ise 10 kg N/da dozunda 2,78 mg/kg olarak belirlenmiştir (Şekil 9.39). Bu bulgular, her iki gübre tipinin de kontrol grubuna kıyasla nikel birikimini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Ayrıca, yüksek azot dozlarında nikel seviyelerinin düşmesi, azot uygulamasının ağır metal alımını sınırlandırıcı etkisini desteklemektedir. MAP gübresinin, nikel birikiminin azaltılması konusunda struvite göre daha düşük değerler sunduğu gözlemlenmiştir.

Ancak, struvit uygulamalarının da bitkide nikel alımını kontrol altında tutmada etkili olduğu ve sürdürülebilir tarım uygulamaları için uygun bir alternatif teşkil ettiği değerlendirilmektedir.



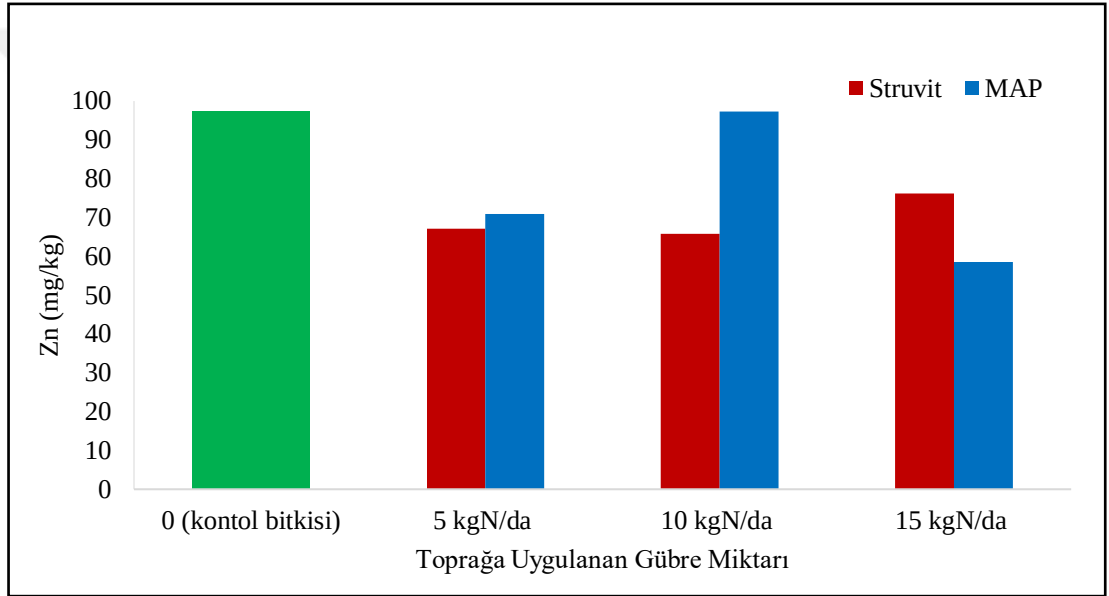
Şekil 9.40. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Pb (mg/kg) değişim sonuçları

Yapılan kimyasal analizler neticesinde, kontrol grubunda yetiştirilen ıspanak bitkilerinde kurşun (Pb) konsantrasyonu 8,75 mg/kg olarak belirlenmiştir. Uygulanan gübre türlerine göre değerlendirildiğinde, struvit uygulamasında en düşük kurşun birikimi 5 kg N/da dozunda 0,77 mg/kg olarak ölçülmüştür. MAP ticari gübresinin 10 kg N/da dozundaki uygulamasında ise kurşun seviyesi 0,73 mg/kg ile en düşük düzeye ulaşmıştır (Şekil 9.40). Bu bulgular, hem struvit hem de MAP gübrelerinin ıspanak bitkisinde kurşun birikimini kontrol grubuna kıyasla önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Özellikle düşük doz uygulamalarda elde edilen düşük Pb düzeyleri, her iki gübre tipinin de ağır metal alımını sınırlandırıcı etkisini ortaya koymaktadır.

Geri kazanılmış bir gübre olan struvitin çevresel toksisiteyi azaltma potansiyeli dikkate alındığında, sürdürülebilir gübreleme stratejilerinde önemli bir alternatif olabileceği değerlendirilmektedir.

Tablo 9.15. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Zn (mg/kg) ve Cu (mg/kg) değişim sonuçları

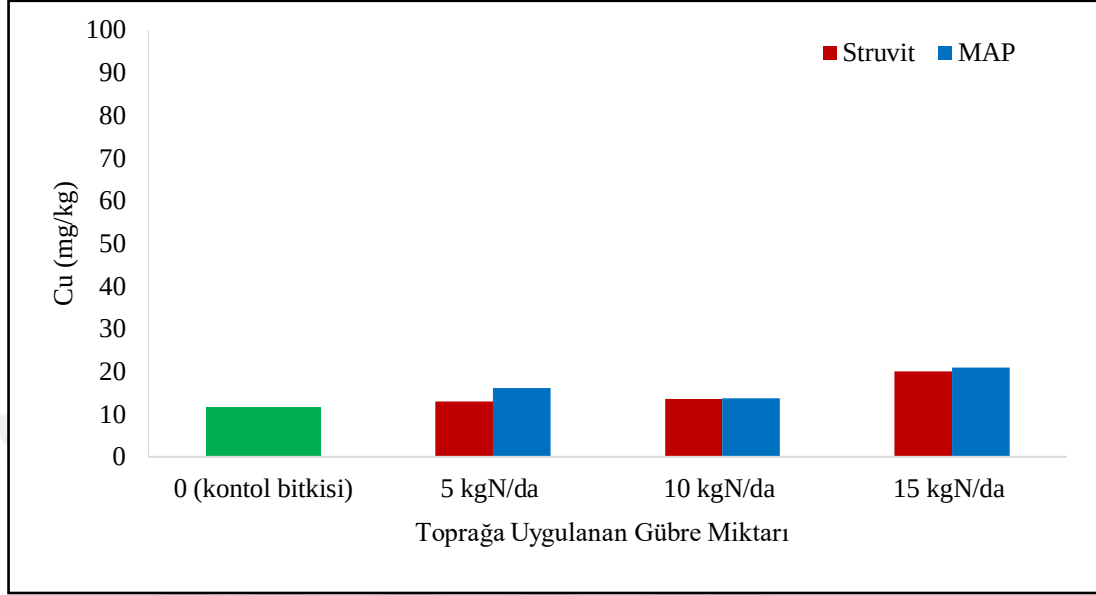
Miktar (kg)	Zn (mg/kg)		Cu (mg/kg)	
	Struvit	MAP	Struvit	MAP
0 (kontrol bitkisi)	97,26	97,26	11,51	11,51
5 kgN/da	67,08	70,84	12,94	16,18
10 kgN/da	65,71	97,34	13,52	13,65
15 kgN/da	76,20	58,54	20,00	20,90



Şekil 9.41. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Zn (mg/kg) değişim sonuçları

Gerçekleştirilen analizler sonucunda, kontrol grubundaki ıspanak bitkilerinde çinko (Zn) konsantrasyonu 97,26 mg/kg olarak belirlenmiştir. Struvit uygulamalarında en düşük çinko birikimi 5 kg N/da ve 10 kg N/da dozlarında sırasıyla 67,08 mg/kg ve 65,71 mg/kg olarak tespit edilmiştir. MAP ticari gübresinin 15 kg N/da dozundaki uygulamasında ise bu değer 58,54 mg/kg ile en düşük düzeye ulaşmıştır (Şekil 9.41). Elde edilen bu bulgular, her iki gübre uygulamasının da bitkideki çinko birikimini kontrol grubuna kıyasla önemli ölçüde azalttığını ortaya koymaktadır. MAP gübresinin özellikle yüksek doz uygulamasında çinko düzeyini daha düşük seviyelere indirdiği gözlemlenirken, struvit uygulamaları da benzer şekilde etkili bir performans sergilemiştir.

Bu durum, hem ticari hem de geri kazanılmış gübrelerin ağır metal alımını sınırlayıcı özellikler taşıdığını ve çevresel açıdan daha sürdürülebilir gübreleme stratejileri için değerlendirilebileceğini göstermektedir.



Şekil 9.42. Ispanak bitkisinde uygulama sonrası Cu (mg/kg) değişim sonuçları

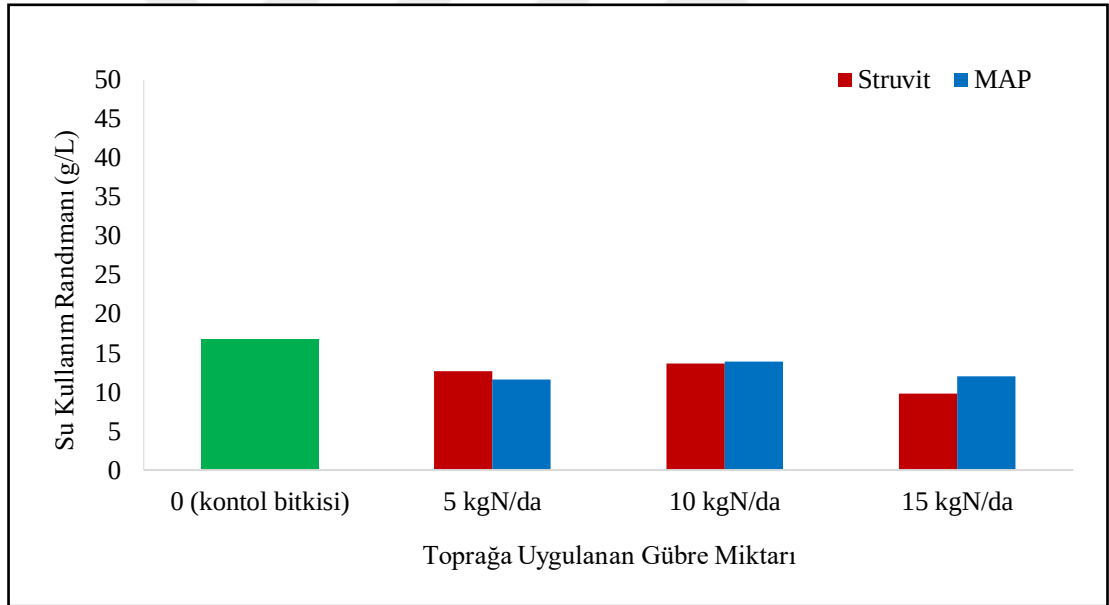
Yapılan analizler sonucunda, kontrol grubundaki ıspanak bitkilerinde bakır (Cu) içeriği 11,51 mg/kg olarak belirlenmiştir. Struvit uygulamalarında en düşük bakır birikimi 5 kg N/da dozunda 12,94 mg/kg olarak tespit edilirken, MAP ticari gübresinde bu değer 10 kg N/da uygulamasında 13,65 mg/kg olarak ölçülmüştür (Şekil 9.42). Her iki gübre türünde de bakır konsantrasyonlarının kontrol grubuna göre daha yüksek çıkması, bitkinin bu mikroelementi gübre uygulamalarıyla birlikte daha fazla absorbe ettiğini göstermektedir. Bu durum, struvit ve MAP uygulamalarının bakır gibi eser elementlerin alımını destekleyebileceğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, elde edilen değerler toksik düzeylerin oldukça altında kalmakta olup, gübrelemenin bitki beslenmesi üzerindeki olası faydalarına dikkat çekmektedir. Geri kazanılmış bir gübre olan struvitin, kontrollü bir şekilde uygulandığında bakır alımını artırıcı potansiyeli ile sürdürülebilir tarım açısından olumlu katkılar sağlayabileceği düşünülmektedir.

9.5. Ispanak Bitkisinde Su Kullanım Randımanının Belirlenmesi

Bu çalışma, ıspanak (*Spinacia oleracea L.*) bitkisinin su kullanım randımanının belirlenmesine yönelik olarak yürütülmüştür. Su kullanım randımanı, bitkinin gelişimi süresince tükettiği su miktarına karşılık elde edilen biyokütle üretimini ifade etmektedir. Bu kapsamda yapılan ölçümler sonucunda elde edilen veriler Tablo 9.16’da detaylı biçimde sunulmuştur.

Tablo 9.16. Bitki su kullanım randımanı (g/L)

Bitki Su Kullanım Randımanı (g/L)		
Miktar (kg)	Struvit	MAP
0 (kontrol bitkisi)	16,77	16,77
5 kgN/da	12,63	11,59
10 kgN/da	13,61	13,92
15 kgN/da	9,82	12,04



Şekil 9.43. Bitki su kullanım randımanı (g/L)

Ispanak bitkisinde yürütülen su kullanım randımanı değerlendirmelerine göre, kontrol grubunda su kullanım randımanı değeri 16,77 g/L olarak belirlenmiştir. Uygulama grupları incelendiğinde, özellikle 10 kg N/da dozunda yapılan gübreleme işlemlerinin su kullanım randımanı üzerinde anlamlı bir etki oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu doz düzeyinde struvit uygulamasında su kullanım randımanı 13,61 g/L, MAP ticari gübresinde ise 13,92 g/L olarak ölçülmüştür (Şekil 9.43).

Elde edilen bulgular, her iki gübre türünde de kontrol grubuna kıyasla su kullanım etkinliğinde bir düşüş olduğunu ortaya koymaktadır. Söz konusu düşüşün temel nedeninin, deneysel süreçte meydana gelen buharlaşma kaynaklı su kayıplarından ileri geldiği değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, genel verimlilik açısından en yüksek bitkisel gelişimin 10 kg N/da dozunda gerçekleşmiş olması, bu uygulama seviyesinin optimum gübre-su etkileşimi bakımından avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, gübreleme ve sulama stratejilerinin birlikte değerlendirilerek bitki su kullanım verimliliğinin artırılabilceğini göstermektedir.

9.6. Toprakta Hasat Sonrası Fiziksel, Kimyasal ve Ağır Metal Parametrelerinin İncelenmesi

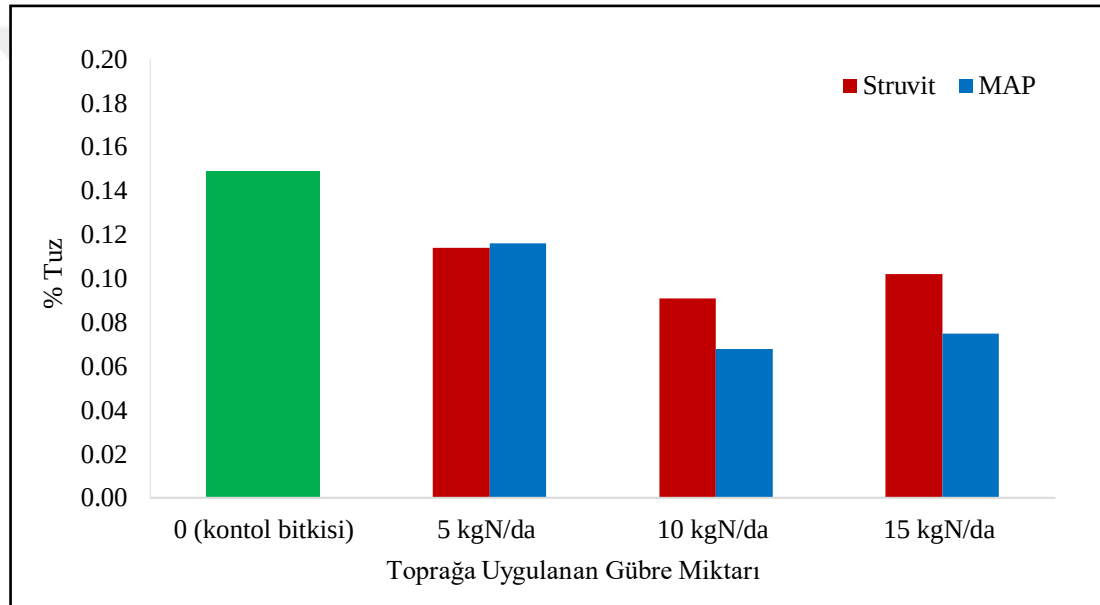
Bu bölümde, sızıntı suyundan laboratuvar ölçeğinde elde edilen struvit ile MAP ticari gübresinin toprak üzerine etkileri değerlendirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar kapsamında, her iki gübre kaynağının farklı azot dozlarında uygulanması sonucunda toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerinde meydana gelen değişimler detaylı olarak analiz edilmiştir. Özellikle toprak iletkenliği (EC), pH düzeyi, toplam fosfor (P) miktarı, organik madde içeriği ile bazı ağır metallerin (örneğin Cd, Pb, Ni, Zn vb.) birikim düzeyleri incelenmiş ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu analizler, gübre uygulamalarının sadece bitki gelişimi üzerindeki etkilerini değil, aynı zamanda toprak sağlığı ve sürdürülebilirliği açısından da önem arz eden yönlerini ortaya koymak açısından kritik öneme sahiptir.

9.6.1. Toprakta Hasat Sonrası Fiziksel ve Kimyasal Parametrelerin Değerlendirilmesi

Bu çalışma kapsamında, sızıntı suyundan elde edilen struvit ile MAP ticari gübresinin farklı azot dozlarında uygulanması sonucunda toprağın bazı temel fiziksel ve kimyasal özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Deneme sonrası toprak örneklerinde gerçekleştirilen analizlerle, özellikle tuzluluk düzeyi, elektriksel iletkenlik (EC), pH ve başlıca besin elementleri olan azot (N) ve fosfor (P) içeriklerindeki değişimler detaylı olarak değerlendirilmiştir (Tablo 9.17, Tablo 9.18, Tablo 9.19, Tablo 1.20).

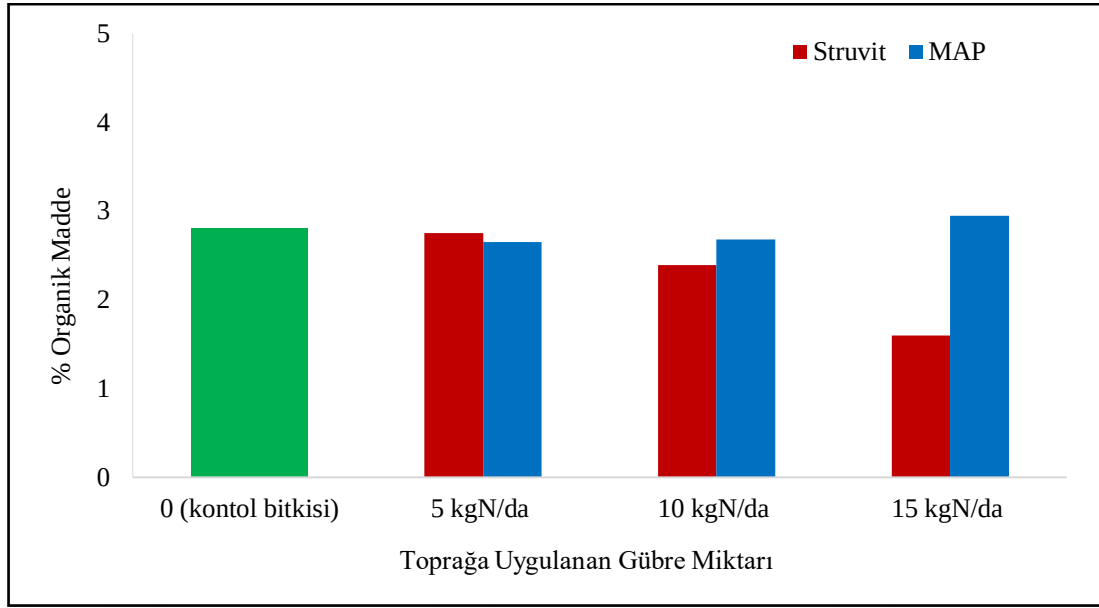
Tablo 9.17. Toprakta uygulama sonrası tuz (%) ve organik madde (%) değişim sonuçları

Miktar (kg)	Tuzluluk (%)		Organik Madde (%)	
	Struvit	MAP	Struvit	MAP
0 (kontrol toprağı)	0,15	0,15	2,81	2,81
5 kgN/da	0,11	0,12	2,75	2,65
10 kgN/da	0,09	0,07	2,39	2,68
15 kgN/da	0,10	0,08	1,60	2,95



Şekil 9.44. Toprakta uygulama sonrası tuzluluk (%) değişim sonuçları

Hasat sonrası toprak örneklerinden elde edilen verilere göre, kontrol grubundaki tuzluluk oranı %0,15 olarak belirlenmiştir. Gübre uygulamaları sonrasında struvit kullanılan denemelerde, 5 kg N/da dozunda tuzluluk oranı %0,11 iken, 10 kg N/da uygulamasında bu değerin %0,09'a kadar düştüğü gözlemlenmiştir (Şekil 9.44). Benzer şekilde, MAP ticari gübresinin uygulandığı denemelerde 5 kg N/da dozunda tuzluluk %0,12, 10 kg N/da uygulamasında ise en düşük değer olan %0,07 olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, her iki gübre kaynağının da özellikle 10 kg N/da dozunda toprak tuzluluğunu azaltıcı etkiye bulunabildiğini, ancak bu etkinin MAP uygulamalarında daha belirgin olduğunu ortaya koymaktadır.

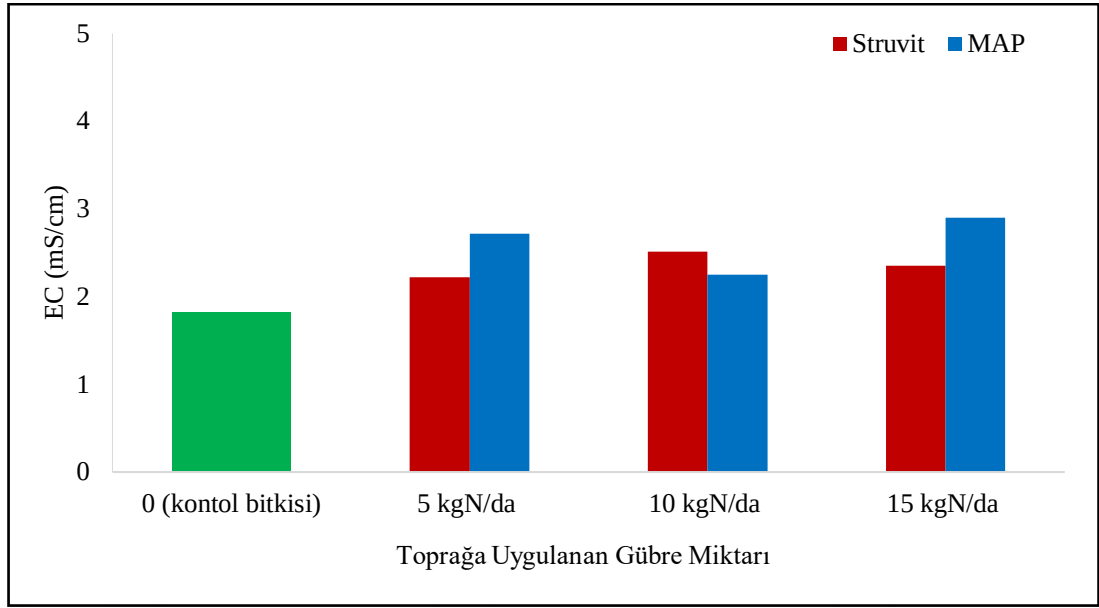


Şekil 9.45. Toprakta uygulama sonrası organik madde (%) değişim sonuçları

Hasat sonrası toprak analizleri sonucunda, kontrol grubuna ait toprakta organik madde oranı %2,81 olarak belirlenmiştir. Uygulanan gübre dozlarının toprak organik madde içeriği üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde, struvit uygulamalarında en yüksek organik madde oranı %2,75 ile 5 kg N/da dozunda elde edilmiştir. Diğer taraftan, MAP ticari gübresinin uygulandığı parsellerde en yüksek organik madde oranı %2,95 olup bu değer 15 kg N/da dozuna aittir (Şekil 9.45). Bu bulgular, MAP gübresinin özellikle yüksek dozlarda toprak organik maddesini artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Buna karşılık struvit uygulamalarında gözlenen nispeten düşük organik madde değerleri, organik katkı içeriği bakımından daha sınırlı bir etki oluşturduğunu işaret etmektedir.

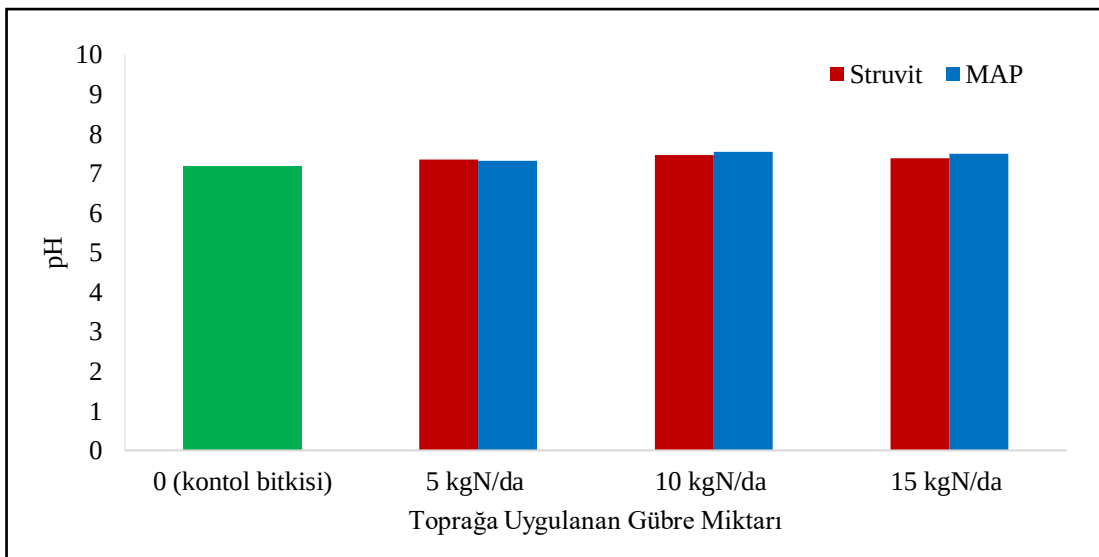
Tablo 9.18. Toprakta uygulama sonrası EC (mS/cm) ve pH değişim sonuçları

Miktar (kg)	EC (mS/cm)		pH	
	Struvit	MAP	Struvit	MAP
0 (kontrol toprağı)	1,82	1,82	7,19	7,19
5 kgN/da	2,22	2,72	7,35	7,32
10 kgN/da	2,51	2,25	7,46	7,54
15 kgN/da	2,35	2,90	7,39	7,49



Şekil 9.46. Toprakta uygulama sonrası EC (mS/cm) değişim sonuçları

Hasat sonrası topraklarda yapılan analizler sonucunda, kontrol grubunda elektriksel iletkenlik (EC) değeri 1,82 mS/cm olarak belirlenmiştir. Gübre uygulamalarının EC üzerindeki etkileri incelendiğinde, struvit uygulamalarında en yüksek EC değeri 10 kg N/da dozunda 2,51 mS/cm olarak ölçülmüştür. MAP ticari gübresi uygulamalarında ise en yüksek değer 15 kg N/da dozunda 2,90 mS/cm olarak kaydedilmiştir (Şekil 9.46). Bu sonuçlar, her iki gübre kaynağının da toprakta EC düzeyini artırdığı, özellikle yüksek doz uygulamalarında iletkenlik seviyelerinde belirgin artışlara neden olduğu görülmektedir. MAP uygulamasının EC üzerindeki etkisinin struvit kıyasla daha fazla olduğu dikkat çekmektedir.

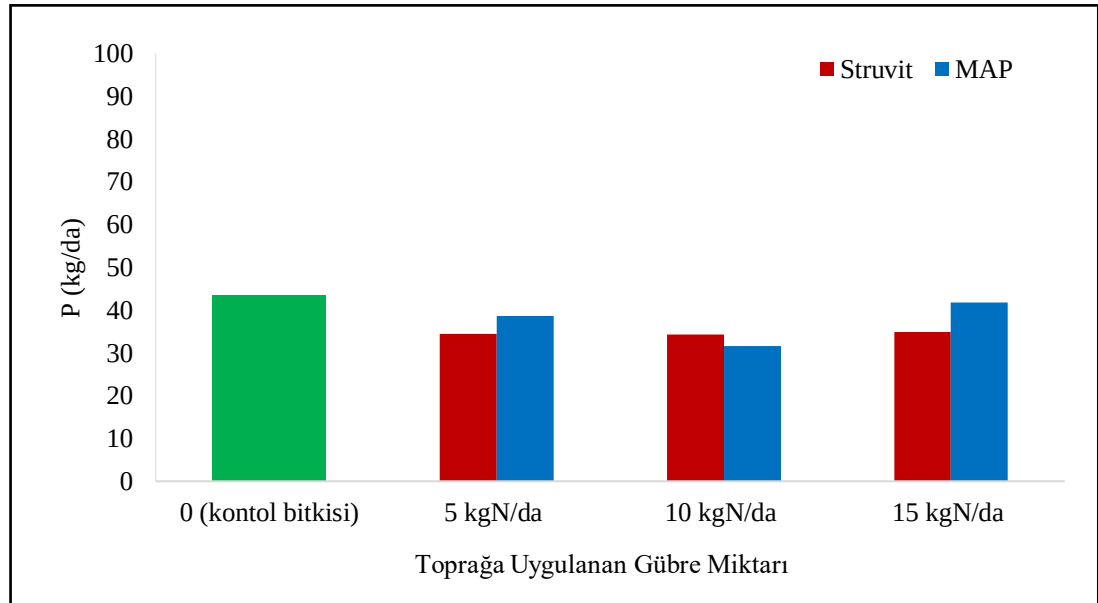


Şekil 9.47. Toprakta uygulama sonrası pH değişim sonuçları

Hasat sonrası yapılan toprak analizleri sonucunda, kontrol grubuna ait toprakta pH değeri 7,19 olarak belirlenmiştir. Uygulanan gübre dozlarının toprak pH'ı üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde, struvit uygulamaları arasında en yüksek pH değeri 10 kg N/da dozunda 7,46 olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde, MAP (monoamonyum fosfat) ticari gübresinin uygulandığı parsellerde de en yüksek pH değeri yine 10 kg N/da dozunda 7,54 olarak tespit edilmiştir (Şekil 9.47). Bu sonuçlar, her iki gübre kaynağının da toprak pH düzeyini sınırlı ölçüde artırdığını, özellikle 10 kg N/da dozunun bu etkiyi en fazla ortaya koyduğunu göstermektedir. Ancak her iki gübre uygulamasının da toprak pH'ını nötr sınırlarda tutarak bitki gelişimi için uygun bir kimyasal ortam sağladığı anlaşılmaktadır.

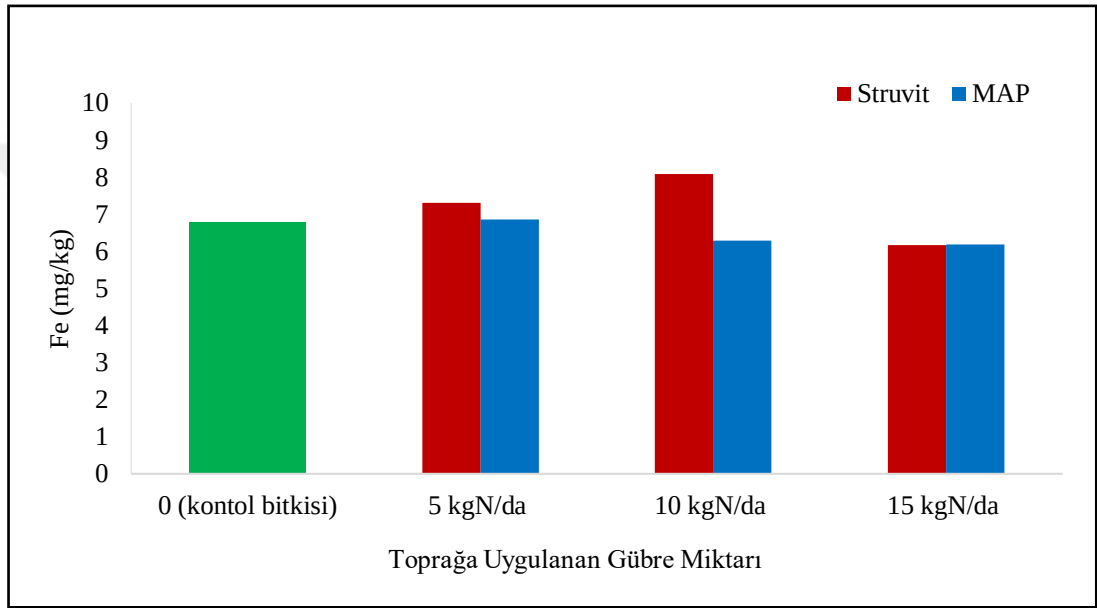
Tablo 9.19. Toprakta uygulama sonrası P (kg/da), Fe (mg/kg) ve Ca (mg/kg) değişim sonuçları

Miktar (kg)	P (kg/da)		Fe (mg/kg)		Ca (mg/kg)	
	Struvit	MAP	Struvit	MAP	Struvit	MAP
0 (kontrol toprağı)	43,39	43,39	6,79	6,79	6879	6879
5 kgN/da	34,44	38,67	7,31	6,86	6348	6698
10 kgN/da	34,28	31,56	8,09	6,29	6130	5866
15 kgN/da	34,84	41,71	6,17	6,19	5947	5844



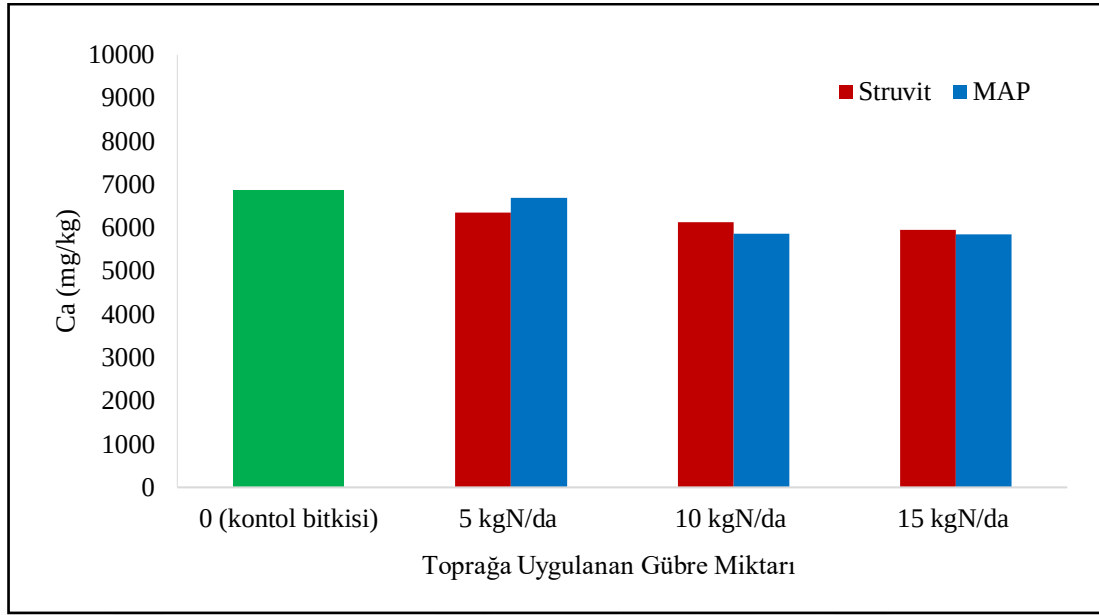
Şekil 9.48. Toprakta uygulama sonrası P (kg/da) değişim sonuçları

Hasat sonrası gerçekleştirilen toprak analizlerinde, kontrol grubuna ait toprakta fosfor (P) düzeyinin 43,39 kg/da olduğu belirlenmiştir. Gübre uygulamalarının ardından struvit kullanılan parsellerde 10 kg N/da dozunda fosfor miktarı 34,28 kg/da olarak ölçülmüş ve diğer dozlarla benzerlik göstermiştir. MAP gübresinin uygulandığı parsellerde ise en düşük fosfor değeri yine 10 kg N/da dozunda 31,56 kg/da olarak tespit edilmiştir (Şekil 9.48). Elde edilen veriler, her iki gübre türünün toprakta fosfor düzeyini kontrol grubuna kıyasla azalttığını, ancak uygulama dozları arasında fosfor miktarlarında kayda değer bir fark oluşmadığını göstermektedir.



Şekil 9.49. Toprakta uygulama sonrası Fe (mg/kg) değişim sonuçları

Hasat sonrası gerçekleştirilen analizler sonucunda, kontrol grubuna ait toprak örneklerinde demir (Fe) konsantrasyonunun 6,79 mg/kg olduğu belirlenmiştir. Uygulamalar sonrasında struvit kullanılan parsellerde, 10 kg N/da dozunda en yüksek demir düzeyi 8,09 mg/kg olarak ölçülmüştür. MAP gübresi uygulanan parsellerde ise en yüksek demir değeri 5 kg N/da dozunda 6,86 mg/kg seviyesinde tespit edilmiştir (Şekil 9.49). Elde edilen sonuçlar, struvit uygulamasının toprakta demir miktarını artırmada MAP gübresine kıyasla daha etkili olduğunu göstermektedir.

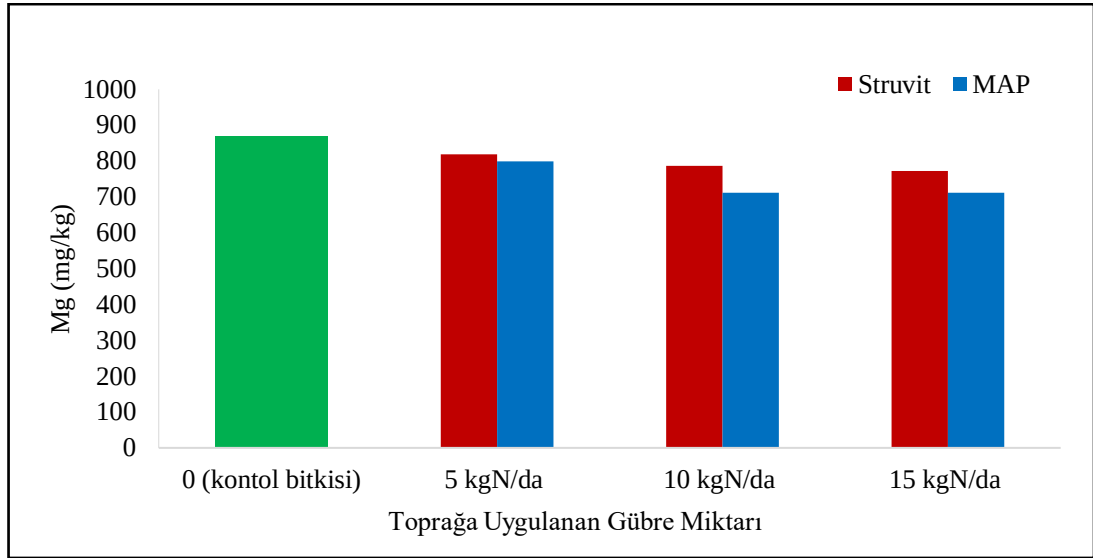


Şekil 9.50. Toprakta uygulama sonrası Ca (mg/kg) değişim sonuçları

Yapılan analizler sonucunda, kontrol grubuna ait toprakta Ca konsantrasyonu 6879 mg/kg olarak belirlenmiştir. Uygulama sonrasında, struvit gübresinin 5 kg N/da dozunda kalsiyum değeri 6348 mg/kg, MAP ticari gübresinin yine 5 kg N/da dozunda ise 6698 mg/kg olarak tespit edilmiştir (Şekil 9.50). Uygulamalar sonucunda gözlenen bu düşüş, kalsiyumun topraktan bitki bünyesine taşındığını göstermektedir. En yüksek kalsiyum seviyelerinin bu iki uygulama grubunda görülmesi, bitkiye kalsiyum geçişinin en az şekilde bu dozlarda gerçekleştiğine işaret etmektedir.

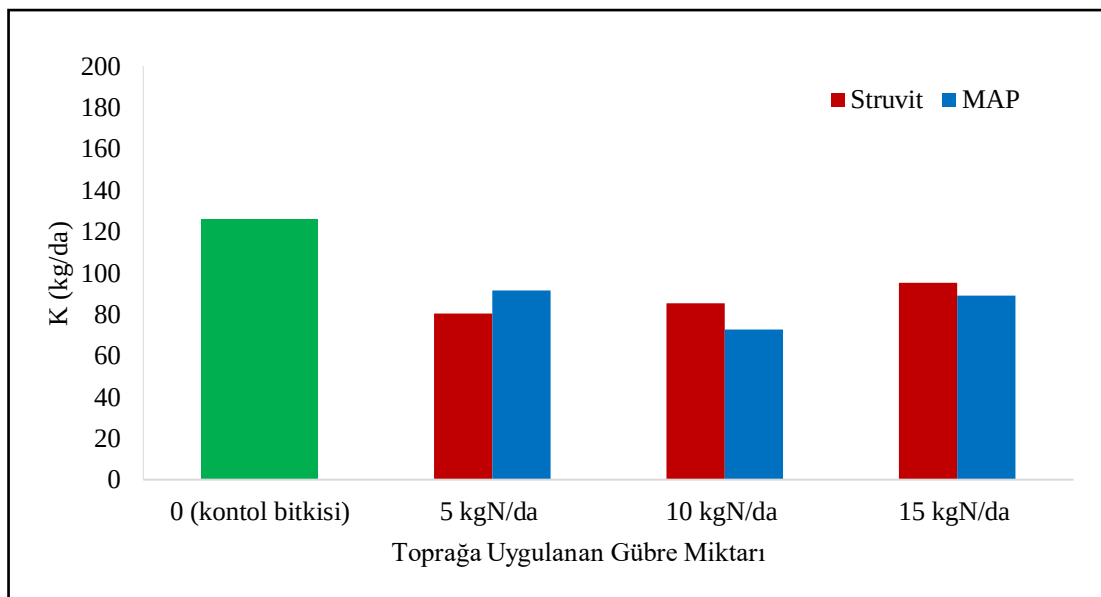
Tablo 9.20. Toprakta uygulama sonrası Mg (mg/kg), K (kg/da) ve Mn (mg/kg) değişim sonuçları

Miktar (kg)	Mg (mg/kg)		K (kg/da)		Mn (mg/kg)	
	Struvit	MAP	Struvit	MAP	Struvit	MAP
0 (kontrol toprağı)	869,90	869,90	125,87	125,87	14,74	14,74
5 kgN/da	819,00	798,90	80,40	91,54	19,15	17,24
10 kgN/da	785,80	712,40	85,22	72,57	13,77	9,62
15 kgN/da	771,90	711,30	95,16	89,13	17,02	17,72



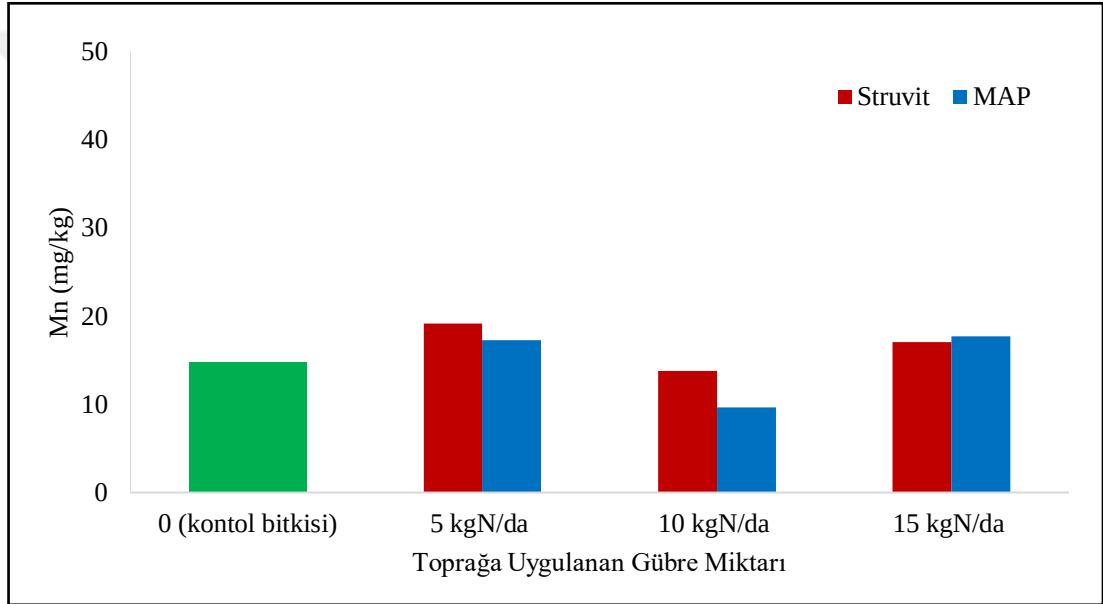
Şekil 9.51. Toprakta uygulama sonrası Mg (mg/kg) değişim sonuçları

Hasat sonrası gerçekleştirilen toprak analizleri sonucunda, kontrol grubunda magnezyum (Mg) konsantrasyonu 869,90 mg/kg olarak ölçülmüştür. Uygulama yapılan denemeler incelendiğinde, struvit uygulamasında 5 kg N/da dozunda magnezyum değeri 819,00 mg/kg, MAP ticari gübresinde ise aynı dozda 798,90 mg/kg olarak belirlenmiştir (Şekil 9.51). Her iki uygulama grubunda da kontrol bitkisine göre Mg miktarındaki azalma, magnezyumun bitki tarafından alındığını ve topraktan bitkiye taşındığını göstermektedir. En yüksek değerlerin bu iki grupta gözlemlenmesi, magnezyumun en fazla bu grupta toprakta kaldığını, dolayısıyla en az geçişin bu gruplarda gerçekleştiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 9.52. Toprakta uygulama sonrası K (kg/da) değişim sonuçları

Hasat sonrası gerçekleştirilen toprak analizleri neticesinde, kontrol grubunda potasyum (K) miktarı 125,87 kg/da olarak tespit edilmiştir. Uygulama yapılan deneme grupları arasında struvit uygulamasında en düşük potasyum düzeyi 5 kg N/da dozunda 80,40 kg/da olarak belirlenirken, MAP ticari gübresinde ise en düşük değer 10 kg N/da uygulamasında 72,57 kg/da olarak ölçülmüştür (Şekil 9.52). Kontrol grubuna kıyasla her iki uygulama grubunda da potasyum düzeyinde önemli bir azalma gözlemlenmiştir. Bu düşüş, potasyumun bitki tarafından etkin şekilde alındığını ve topraktan bitkiye geçişin gerçekleştiğini göstermektedir. En düşük potasyum düzeylerinin bu dozlarda tespit edilmesi, ilgili uygulamaların potasyum alımı açısından etkili olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 9.53. Toprakta uygulama sonrası Mn (mg/kg) değişim sonuçları

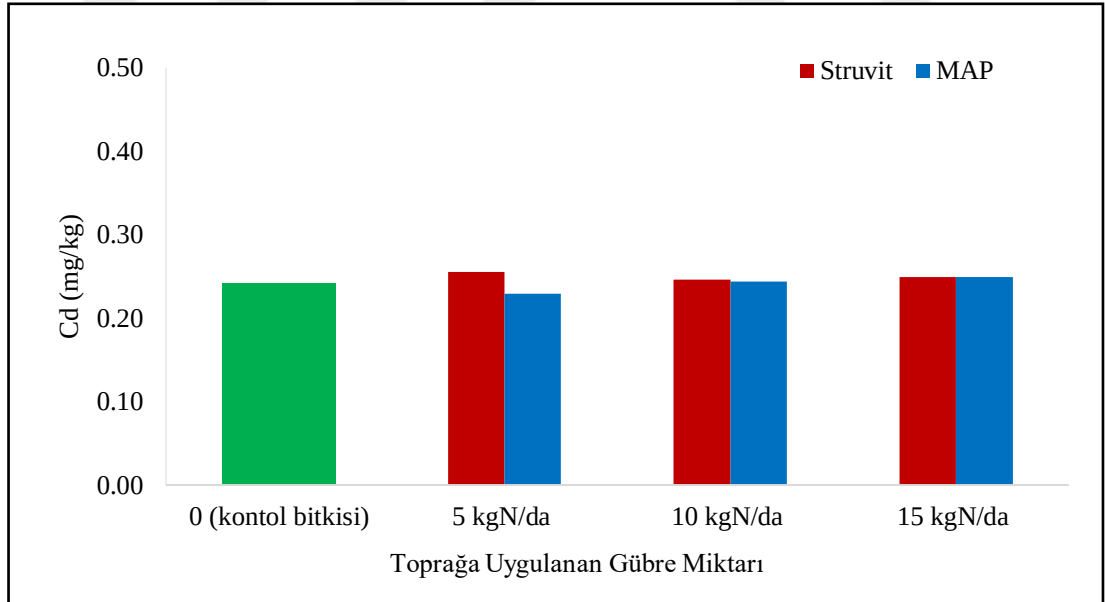
Hasat sonrası yapılan toprak analizleri sonucunda kontrol grubundaki mangan (Mn) miktarı 14,74 mg/kg olarak belirlenmiştir. Gübre uygulamalarına göre struvit grubunda en yüksek Mn düzeyi 5 kg N/da dozunda 19,15 mg/kg, MAP ticari gübresinde ise en yüksek değer 15 kg N/da uygulamasında 17,72 mg/kg olarak tespit edilmiştir (Şekil 9.53). Her iki gübre uygulamasında da mangan içeriğinde kontrol grubuna kıyasla artış gözlenmiştir. Bu durum, uygulanan gübrelerin toprakta Mn birikimini artırabileceğini ve özellikle düşük dozlu struvit uygulamasının mangan açısından daha etkili olduğunu göstermektedir.

9.6.2. Toprakta Hasat Sonrası Ağır Metal Parametrelerin Değerlendirilmesi

Bu bölümde, laboratuvar koşullarında sızıntı suyundan geri kazanılan struvit ile ticari olarak temin edilen MAP gübresinin toprak yapısı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir (Tablo 9.21, Tablo 9.22, Tablo 9.23). Yapılan uygulamalar sonucunda, her iki gübre türünün hasat sonrası toprakta ağır metal birikimi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Tablo 9.21. Toprakta uygulama sonrası Cd (mg/kg), Co (mg/kg) ve Cr (mg/kg) değişim sonuçları

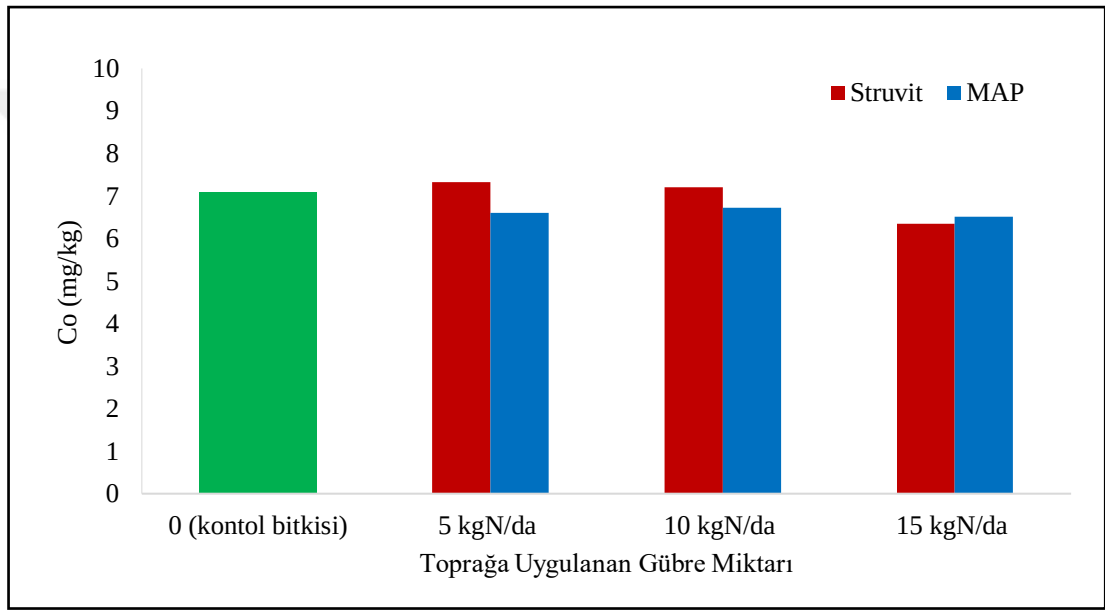
Miktar (kg)	Cd (mg/kg)		Co (mg/kg)		Cr (mg/kg)	
	Struvit	MAP	Struvit	MAP	Struvit	MAP
0 (kontrol toprağı)	0,24	0,24	7,09	7,09	5,25	5,25
5 kgN/da	0,26	0,23	7,32	6,60	5,40	4,91
10 kgN/da	0,25	0,24	7,21	6,72	5,13	5,29
15 kgN/da	0,25	0,25	6,35	6,52	4,97	5,13



Şekil 9.54. Toprakta uygulama sonrası Cd (mg/kg) değişim sonuçları

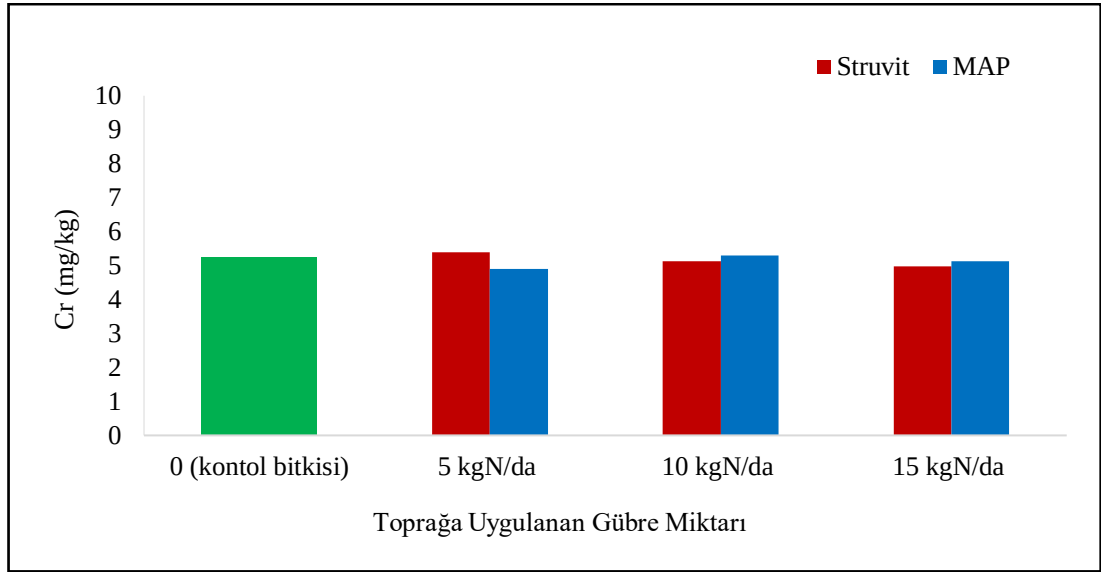
Toprakta hasat sonrası kadmiyum (Cd) birikimine ilişkin elde edilen sonuçlara göre; kontrol grubunda Cd değeri 0,24 mg/kg olarak belirlenmiştir.

Uygulama yapılan gruplar incelendiğinde, struvit uygulamalarında en yüksek Cd değeri 5 kgN/da dozunda 0,26 mg/kg olarak ölçülmüş, diğer dozlarda ise bu değer 0,25 mg/kg seviyesinde kalmıştır. MAP uygulamalarında ise en yüksek Cd birikimi 15 kgN/da dozunda 0,25 mg/kg, en düşük birikim ise 5 kgN/da dozunda 0,23 mg/kg olarak tespit edilmiştir (Şekil 9.54). Bu sonuçlar, her iki gübre türünün topraktaki Cd düzeylerinde kontrol grubuna kıyasla sınırlı bir artışa neden olduğunu, ancak bu artışın doz ve gübre türüne göre değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Kadmiyum birikiminin düşük seviyelerde kalması, uygulamaların çevresel açıdan risk oluşturmadığını göstermektedir.



Şekil 9.55. Toprakta uygulama sonrası Co (mg/kg) değişim sonuçları

Toprakta hasat sonrası kobalt (Co) birikimine ait bulgulara göre, kontrol grubunda Co konsantrasyonu 7,09 mg/kg olarak belirlenmiştir. Struvit uygulamalarında en yüksek Co değeri 5 kgN/da dozunda 7,32 mg/kg olarak tespit edilirken, diğer doz gruplarında bu değer kontrol seviyelerine yakın seyrettiği gözlemlenmiştir. MAP gübresi uygulamalarında ise en yüksek Co birikimi 10 kgN/da dozunda 6,72 mg/kg olarak ölçülmüştür (Şekil 9.55). Elde edilen veriler, struvit uygulamasının toprakta Co birikimini hafifçe artırabildiğini, buna karşın MAP uygulamasının Co düzeyini kontrol değerinin altında tuttuğunu göstermektedir. Her iki gübre türü açısından değerlendirildiğinde, toprakta kobalt birikiminin gübre dozuna ve türüne bağlı olarak farklılık gösterdiği, ancak genel olarak çevresel risk oluşturmayacak düzeylerde kaldığı sonucuna varılmıştır.

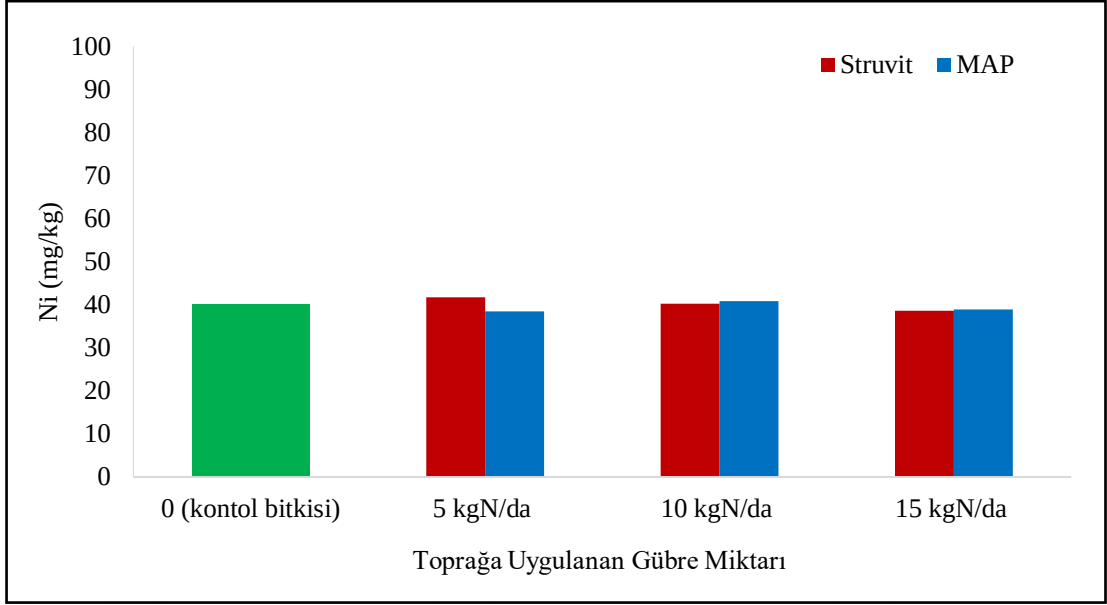


Şekil 9.56. Toprakta uygulama sonrası Cr (mg/kg) değişim sonuçları

Hasat sonrası toprak örneklerinde krom (Cr) içeriğine ilişkin yapılan analizler, kontrol grubunda Cr düzeyinin 5,25 mg/kg olduğunu göstermiştir. Struvit uygulamalarında krom birikiminin, 5 kgN/da dozunda maksimum 5,40 mg/kg ye ulaştığı, buna karşın 15 kgN/da dozunda minimum 4,97 mg/kg seviyesine gerilediği gözlemlenmiştir. MAP gübresi uygulamalarında ise en yüksek Cr değeri 10 kgN/da dozunda 5,29 mg/kg olarak ölçülmüş; en düşük değer ise 5 kgN/da dozunda 4,91 mg/kg olarak belirlenmiştir (Şekil 9.56). Elde edilen bu bulgular, hem struvit hem de MAP uygulamalarında uygulama dozunun artışıyla birlikte toprakta kalan krom miktarında hafif bir azalma eğilimi olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, kromun daha yüksek dozlarda bitki tarafından daha etkin şekilde alındığını veya yıkanma gibi mekanizmalarla toprak sisteminden uzaklaştırılmış olabileceğini düşündürmektedir. Her iki gübre türü de topraktaki krom düzeyinde anlamlı değişimlere yol açmakla birlikte, bu değişimlerin kontrol grubuna göre sınırlı düzeyde olduğu görülmektedir.

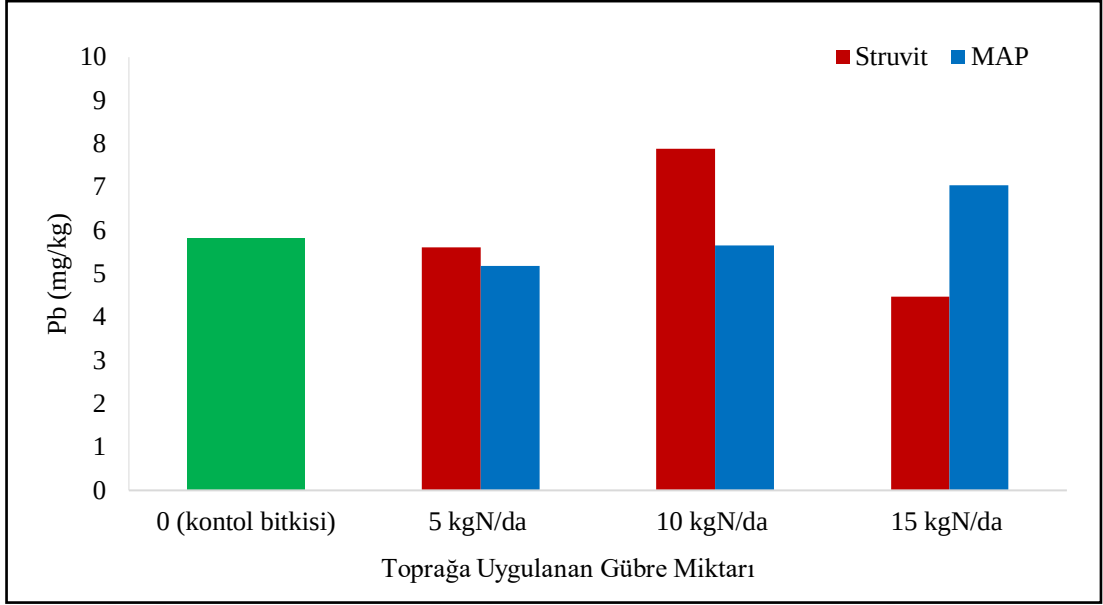
Tablo 9.22. Toprakta uygulama sonrası Ni (mg/kg) ve Pb (mg/kg) değişim sonuçları

Miktar (kg)	Ni (mg/kg)		Pb (mg/kg)	
	Struvit	MAP	Struvit	MAP
0 (kontrol toprağı)	40,05	40,05	5,83	5,83
5 kgN/da	41,69	38,48	5,61	5,18
10 kgN/da	40,22	40,79	7,89	5,65
15 kgN/da	38,61	38,89	4,47	7,05



Şekil 9.57. Toprakta uygulama sonrası Ni (mg/kg) değişim sonuçları

Toprak örneklerinde hasat sonrası yapılan analizler neticesinde, nikel (Ni) içeriği kontrol grubunda 40,05 mg/kg olarak belirlenmiştir. Struvit uygulamalarında Ni konsantrasyonunun 5 kgN/da dozunda en yüksek seviyeye ulaşarak 41,69 mg/kg olduğu, buna karşılık 15 kgN/da dozunda ise en düşük değer olan 38,61 mg/kg'ye gerilediği gözlemlenmiştir. MAP uygulamalarında ise en yüksek nikel değeri 10 kgN/da dozunda 40,79 mg/kg iken, en düşük değer 5 kgN/da dozunda 38,48 mg/kg olarak tespit edilmiştir (Şekil 9.57). Bu bulgular, hem struvit hem de MAP uygulamalarında Ni birikiminin gübre dozuna bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Düşük dozlarda nispeten yüksek nikel değerleri ölçülmesi, ağır metalin toprakta bağlanma kapasitesi ile ilişkili olup, yüksek dozlarda ise bitki tarafından alımın veya diğer kimyasal süreçlerin etkisiyle toprakta kalan miktarın azaldığını göstermektedir. Elde edilen veriler doğrultusunda, her iki gübre türünün nikel üzerinde etkili olduğu, ancak bu etkinin uygulama dozuna göre farklılık arz ettiği sonucuna varılabilir.

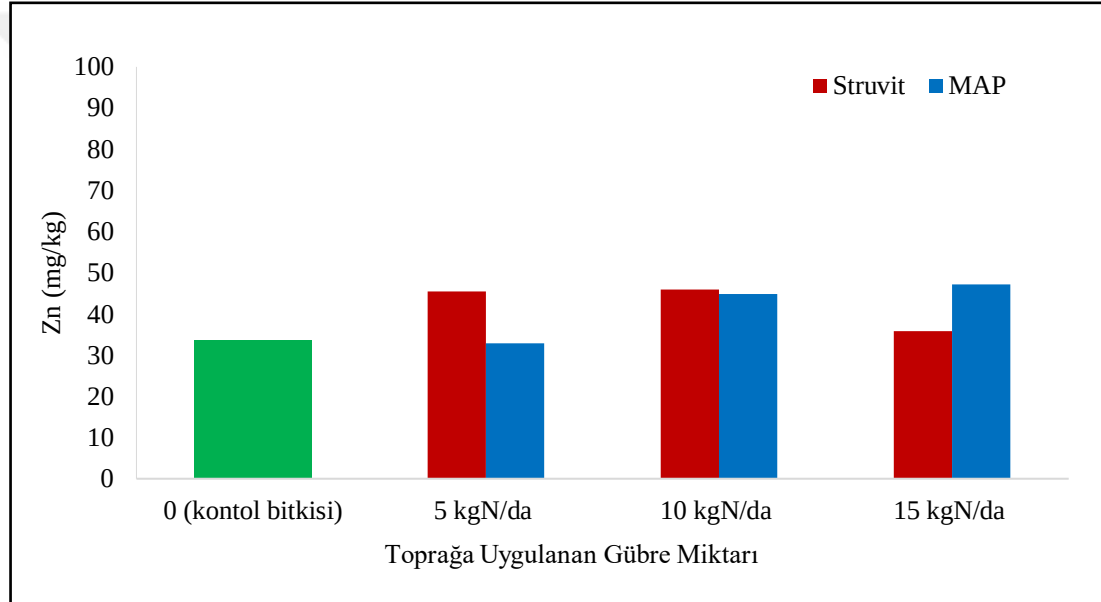


Şekil 9.58. Toprakta uygulama sonrası Pb (mg/kg) değişim sonuçları

Toprakta hasat sonrası yapılan analizler sonucunda kurşun (Pb) içeriği kontrol grubunda 5,83 mg/kg olarak belirlenmiştir. Struvit uygulamalarında, 10 kgN/da dozunda topraktaki kurşun miktarının en yüksek değere ulaşarak 7,89 mg/kg ye çıktığı; buna karşılık 15 kgN/da dozunda en düşük değer olan 4,47 mg/kg ye gerilediği gözlemlenmiştir. MAP gübresi uygulamalarında ise en yüksek Pb değeri 15 kgN/da dozunda 7,05 mg/kg olarak ölçülmüş, en düşük değer ise 5 kgN/da dozunda 5,18 mg/kg olarak tespit edilmiştir (Şekil 9.58). Bu sonuçlar, hem struvit hem de MAP uygulamalarının toprakta Pb birikimi üzerinde farklı dozlara bağlı olarak etkili olduğunu göstermektedir. Özellikle orta ve yüksek dozlarda Pb düzeyinde artışlar gözlenmesi, gübre bileşimi ve ağır metal taşıma potansiyeli ile ilişkili olup, düşük dozlarda ise bitki tarafından alım ya da toprakta farklı formlara dönüşüm nedeniyle toprakta daha az miktarda kaldığı düşünülmektedir. Uygulama dozlarının Pb dinamiğini doğrudan etkilediği ve bu etkinin gübre tipine göre değişkenlik gösterdiği değerlendirilmiştir. Bu bulgular, ağır metal birikiminin sürdürülebilir tarım açısından dikkatle izlenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 9.23. Toprakta uygulama sonrası Zn (mg/kg) ve Cu (mg/kg) değişim sonuçları

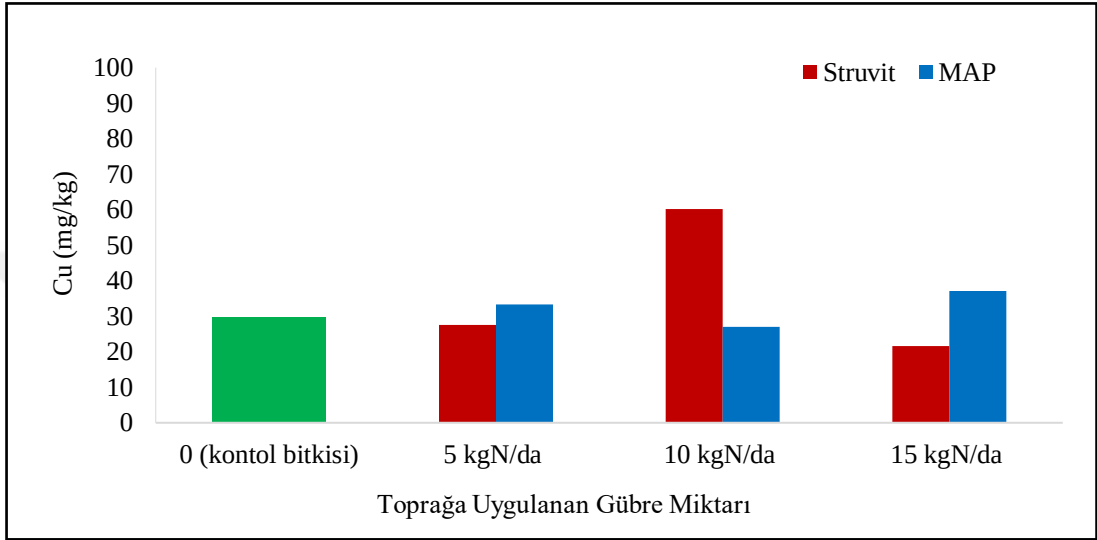
Miktar (kg)	Zn (mg/kg)		Cu (mg/kg)	
	Struvit	MAP	Struvit	MAP
0 (kontrol toprağı)	33,55	33,55	29,58	29,58
5 kgN/da	45,49	32,91	27,61	33,24
10 kgN/da	45,98	44,81	60,16	27,02
15 kgN/da	35,85	47,16	21,54	37,12



Şekil 9.59. Toprakta uygulama sonrası Zn (mg/kg) değişim sonuçları

Toprakta hasat sonrasında yapılan çinko (Zn) analizleri doğrultusunda, kontrol grubunda Zn düzeyi 33,55 mg/kg olarak ölçülmüştür. Struvit uygulamalarında en yüksek Zn birikimi 10 kgN/da dozunda 45,98 mg/kg olarak tespit edilirken, en düşük değer 15 kgN/da dozunda 35,85 mg/kg olarak belirlenmiştir. Diğer yandan, MAP gübresi uygulamalarında en yüksek Zn konsantrasyonu 15 kgN/da dozunda 47,16 mg/kg ye ulaşmış, en düşük değer ise 5 kgN/da dozunda 32,91 mg/kg olarak kaydedilmiştir (Şekil 9.59). Bu bulgular, hem struvit hem de MAP uygulamalarının toprakta Zn birikimini belirgin şekilde etkilediğini göstermektedir. MAP uygulamalarında özellikle yüksek dozda Zn birikiminin arttığı, düşük dozda ise kontrol değerine yakın sonuçların elde edildiği dikkat çekmektedir. Struvit

uygulamasında ise Zn birikiminin doz artışına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği, 10 kgN/da uygulamasında zirveye ulaştığı görülmektedir. Bu farklılıklar, uygulanan gübrelerin içerdiği Zn miktarı ve toprakta Zn'nin bağlanma, yıkanma ya da bitki tarafından alım süreçleri ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Toprak sağlığı ve bitki beslenmesi açısından, Zn birikiminin kontrollü ve doz bazlı izlenmesi önem arz etmektedir.



Şekil 9.60. Toprakta uygulama sonrası Cu (mg/kg) değişim sonuçları

Hasat sonrası toprakta gerçekleştirilen bakır (Cu) analiz sonuçları incelendiğinde, kontrol uygulamasında Cu konsantrasyonu 29,58 mg/kg olarak belirlenmiştir. Struvit uygulamalarında en yüksek Cu birikimi 10 kgN/da dozunda 60,16 mg/kg olarak tespit edilirken, en düşük değer ise 15 kgN/da uygulamasında 21,54 mg/kg olarak ölçülmüştür. Diğer taraftan MAP gübresi uygulamalarında, en yüksek Cu düzeyi 15 kgN/da dozunda 37,12 mg/kg, en düşük değer ise 10 kgN/da dozunda 27,02 mg/kg olarak kaydedilmiştir (Şekil 9.60). Elde edilen bulgular, her iki gübre tipinin de topraktaki bakır seviyelerini farklı oranlarda etkilediğini ortaya koymaktadır. Özellikle struvit uygulamalarında 10 kgN/da dozunun Cu birikimi üzerinde belirgin bir artışa neden olduğu görülmekte olup, bu durum struvitin içerdiği iz elementlerin topraktaki çözünürlüğü ve bitki tarafından alım dengesine bağlı olabilir. MAP uygulamalarında ise bakır konsantrasyonundaki değişim daha sınırlı kalmış, fakat 15 kgN/da dozunda bir artış gözlemlenmiştir. Uygulama dozlarına bağlı olarak Cu seviyelerinde meydana gelen dalgalanmalar, toprakta bu mikroelementin biyoyararlanabilirliği, bağlanma kapasitesi ve taşınımı gibi faktörlerin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

9.7. Struvit Çöktürme Yöntemi ile $\text{NH}_4^+\text{-N}$ Geri Kazanım Uygulamalarının Literatürde Yer Alan Çalışmalarla Karşılaştırılması

Struvit çöktürmesi yöntemi, atıksulardan $\text{NH}_4^+\text{-N}$ geri kazanımı için literatürde yaygın şekilde kullanılan ve etkinliği kanıtlanmış bir tekniktir. Evsel, endüstriyel ve tarımsal atıksulardan amonyumun mineral gübre formunda geri kazanılmasını sağlayan bu yöntemle elde edilen struvitin, atıksu kaynağına bağlı olarak kimyasal yapısı ve saflığı değişmekte, bu da bitki besleme potansiyelini doğrudan etkilemektedir.

Tablo 9.24. Farklı atıksu türlerinde struvitin bitki büyümesine etkisi (Sharma vd., 2024)

Struvitin Elde Edildiği Atıksu Kaynağı	Yetiştirilen Bitki	Deneme Süresi (gün)	Deneme Ölçeği	Uygulanan Doz (g struvit/kg toprak ya da kg P/ha)	Sonuç	Kaynak
Aktif çamur	Nohut, Mısır	90	Saksı denemesi	16–257 kg P/ha	±	Sharma vd., (2024)
Biyogaz sıvı digestatı	Marul	60	Saksı denemesi	0–200 mg/kg	++	Erdal vd., (2024)
Sentetik ve gerçek atıksu	Pirinç	150	Saksı denemesi	29.4 kg P/ha	±	Lunga vd., (2023)
Kentsel atıksu	Marul	42	Saksı denemesi	100 kg P/ha	±	Mancho vd., (2023)
Sentetik insan idrarı	Yerfıstığı	90	Tarla ölçeği	40 kg P/ha	–	Sathiasivan vd., (2021)
Sentetik ve gerçek atıksu	Soya fasulyesi	153	Tarla ölçeği	29.4 kg P/ha	++	Omidire vd., (2023)
Çöp sızıntı suyu	Ispanak	40	Saksı denemesi	5 kgN/da	++	Mevcut çalışma

Notlar • "±": Nötr/karışık etki • "+": Pozitif etki • "++": Güçlü pozitif etki • "–": Olumsuz etki

Literatürde, farklı atıksu türlerinden üretilen struvitin bitki büyümesini desteklediği genel kabul görmekle birlikte, bu etkinin şiddeti ve süresi atıksu kaynağına göre farklılık göstermektedir.

Mevcut çalışmada ise atıksu kaynağı olarak düzenli depolama sahasından elde edilen sızıntı suyu kullanılmış ve bu özellik, çalışmayı literatürdeki diğer çalışmalardan ayıran önemli bir faktör olmuştur. Sızıntı suyunun yüksek $\text{NH}_4^+\text{-N}$ içeriği ve özgün bileşimi sayesinde, struvit çöktürme işlemi daha kısa deneme sürelerinde tamamlanmış ve elde edilen struvitin bitki büyümesi üzerindeki pozitif etkisi daha belirgin ve güçlü olmuştur. Ayrıca, struvit geri kazanım sürecinde oluşan üst sıvının dezenfekte edilerek sulamada kullanılması, su ayak izinin azaltılmasına da katkı sağlamaktadır (Krishnamoorthy vd., 2021). Bu sonuç, mevcut çalışmanın farklı atıksu kaynaklarıyla yapılan önceki araştırmalara kıyasla hem geri kazanım verimliliği hem de bitki gelişimi üzerindeki faydalar açısından önemli bir avantaj sunduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, bu çalışma, sızıntı suyundan struvit üretiminin hem sürdürülebilir atık yönetimi hem de tarımsal uygulamalarda bitki besleme açısından etkili bir yöntem olduğunu ortaya koyarak literatüre yenilikçi ve uygulamaya dönük bir katkı sağlamaktadır. Çeşitli bitki türlerinin yetiştirilmesinde struvit gübresinin kullanıldığı çalışmalara ait özet Tablo 9.24 te sunulmuştur.

10. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Samsun Büyükşehir Belediyesi Katı Atık Düzenli Depolama Sahası'ndan elde edilen sızıntı suyunun geri kazanılabilir azot içeriği değerlendirilmiş ve bu kapsamda laboratuvar koşullarında üretilen struvit ile ticari MAP gübresinin ıspanak (*Spinacia oleracea* L.) bitkisi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır. Ayrıca, uygulanan gübrelerin toprak özelliklerine ve ağır metal birikimine olan etkileri detaylı olarak incelenmiştir.

Yapılan amonyum sülfat (AS) geri kazanım deneylerinde, %3 H₂SO₄ ilavesinin en yüksek verim sağladığı ve bu koşullarda %79,31 NH₄⁺-N geri kazanım oranına ulaşıldığı belirlenmiştir. Geri kazanım veriminde temas süresinin kritik bir değişken olduğu, özellikle ilk 10 dakikalık sürede maksimum verimin elde edildiği görülmüştür. NH₄⁺-N konsantrasyonunun 2436 mg/L olduğu durumda %80,23 oranında geri kazanım sağlanması, sistemin belirli bir doygunluk noktasına ulaştığını göstermektedir. AS oluşumunun pH 1.56 seviyelerinde daha verimli gerçekleştiği gözlemlenmiş ve bu durum düşük pH değerlerinin çözünürlüğü artırdığı yönündeki literatürle uyumludur.

Struvit çökeltme çalışmalarında ise Mg²⁺:NH₄⁺:PO₄³⁻ oranının 4:1:2,5 olarak optimize edilmesiyle, sırasıyla %89,02 (0. gün) ve %87,34 (8. gün) oranlarında NH₄⁺-N geri kazanımı sağlanmıştır. Bu sonuçlar, iyon oranlarının struvit verimi üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymuştur. Ayrıca, pH 5,5 seviyesinde struvit kristallerinin en fazla %7,3 oranında çözüldüğü belirlenmiş ve bu da struvitin yavaş salımlı bir gübre olarak değerlendirilebileceğini göstermiştir.

Sera denemelerinde, her iki gübre de ıspanak bitkisinin büyüme performansını artırmış; özellikle MAP gübresi 10 kg N/da, struvit ise 5 kg N/da dozunda en yüksek bitki boyu, yaprak genişliği, yaş ağırlık ve kök uzunluğu gibi morfolojik değerleri sağlamıştır. Struvit gübresinin daha düşük dozlarda da etkili olması, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik açıdan önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir.

Bitki dokularında yapılan kimyasal analizler sonucunda, her iki gübre tipi de N, P, Mg, Ca ve Fe gibi temel besin maddelerinin alımını artırmıştır. Struvit uygulamaları Mg ve Fe açısından öne çıkarken, MAP uygulamaları P ve Ca birikiminde daha etkili olmuştur. Ancak her iki uygulamada da K düzeylerinde düşüş gözlenmiş, bu durum potasyum desteğinin gübreleme stratejilerinde dikkate alınması gerektiğini ortaya

koymuştur. Geri kazanılan bu besinlerin doğrudan kullanımı, ötrofikasyon ve toprak verimliliği gibi çevresel sorunların azaltılmasına katkı sağlayabilecek potansiyele sahiptir.

Ağır metal birikimi üzerine yapılan değerlendirmeler, struvit ve MAP uygulamalarının bitkideki toksik element seviyeleri üzerinde belirgin etkiler oluşturduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen bulgulara göre, her iki uygulama da kontrol grubuna kıyasla Cd, Pb, Ni ve Cr konsantrasyonlarını anlamlı düzeyde azaltmıştır. Özellikle MAP uygulamalarının Cd ve Ni konsantrasyonlarını düşürmede daha etkili olduğu, struvit uygulamalarının ise Pb ve Cr seviyelerini azaltmada üstün performans gösterdiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, her iki gübre tipinin de gıda güvenliği açısından önemli avantajlar sađladđını göstermektedir. Ayrıca, gübre uygulamaları ile bitkiye sağlanan besin maddelerinin, ağır metal alımını sınırlayarak bitki dokularındaki birikimi azalttığı tespit edilmiştir. Kontrol grubunda ölçülen ağır metal konsantrasyonlarının ise esasen toprak kaynaklı olduğu anlaşılmıştır.

Bitki su kullanım randımanı açısından, MAP (10 kg N/da) uygulaması ile 13,92 g/L, struvit uygulaması ile 13,61 g/L düzeyinde su kullanım randımanı elde edilmiştir. Bu durum, her iki gübrenin de su verimliliğini desteklediğini göstermekte ve optimum gübreleme stratejilerinin su kaynaklarının etkin kullanımına katkı sağlayabileceğini vurgulamaktadır.

Toprak analizlerinden elde edilen bulgular, gübre uygulamalarının toprak özellikleri üzerinde belirgin değişimlere yol açtığını ortaya koymuştur. EC, pH, tuzluluk ve organik madde içerikleri, uygulanan gübre türü ve dozuna bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Topraktaki P, Fe, Ca, Mg ve Mn seviyelerinde artış gözlenmiş; buna karşın K içeriğinde düşüş tespit edilmiştir. Ayrıca, toprakta ağır metal analizlerinde her iki gübre tipi de Cd, Pb, Cr ve Zn gibi elementlerde artış eğilimi göstermiştir. Bu durum, uzun dönemli uygulamalarda toprak kalitesi ve çevresel risklerin izlenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, geri kazanım yoluyla elde edilen struvit ve AS  r nlerinin, hem tarımsal verimliliği artırma potansiyeli hem de çevresel sürdürülebilirliği destekleyici etkileri ortaya konmuştur. Bu bağlamda, atıksu bazlı gübrelerin konvansiyonel gübrelere alternatif olarak kullanımının yaygınlaştırılması, döngüsel ekonomi yaklaşımları açısından önemli bir adım olarak değerlendirilmelidir.

Bradford-Hartke vd., (2015) ayrıca struvit geri kazanımından kaynaklanan çevresel etkilerin azaldığını bildirmiştir. İşlem, kimyasal kullanımının artmasıyla enerji açısından verimli olmasa da struvit geri kazanımının çevre üzerindeki etkileri azot ve fosfor mineralizasyonundan daha azdır. Benzer şekilde, struvitin düşük ağır metal içeriği ve faydalı yavaş salınan besin maddesi salınım özelliği araştırmacıları teknolojiyi geliştirmeye çekmiştir (Sena vd., 2021).



KAYNAKLAR

- Abdel-Shafy, H. I., Ibrahim, A. M., Al-Sulaiman, A. M., Okasha, R. A. (2024). *Landfill leachate: Sources, nature, organic composition, and treatment: An environmental overview. Ain Shams Engineering Journal*, 15, 102293. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102293>.
- Abunama, T., Othman, F., Nilam, T. I. T. (2021 b). Comparison of landfill leachate generation and pollution potentials in humid and semi-arid climates. *International Journal of Environmental Waste Management*, 27, 79–92. <https://doi.org/10.1504/ijewm.2021.111906>.
- Ahmed, N., Shim, S., Won, S., & Ra, C. (2018). Struvite recovered from various types of wastewaters: Characteristics, soil leaching behaviour, and plant growth. *Land Degradation and Development*, 29(9), 2864–2879.
- Almeida, R. de R. F., Porto, B. R. Quintaes, D. M. Bila, Lavagnolo, J. C. Campos. (2023). A review on membrane concentrate management from landfill leachate treatment plants: The relevance of resource recovery to close the leachate treatment loop. *Waste Management Research*, 41, 264–284. <https://doi.org/10.1177/>
- Altınbaş, M., Yangın, C., Öztürk, I. (2002). Struvite precipitation from anaerobically treated municipal and landfill wastewaters. *Water Science and Technology*, 46, 271–278.
- Al-Yaqout, A., and Hamoda, M. F. (2020). Long-term temporal variations in characteristics of leachates from a closed landfill in an arid region. *Water, Air, and Soil Pollut.* 231, 319. doi:10.1007/s11270-020-04688-7.
- Andreottola, G., Cannas, P. (2024). Chemical and biological characteristics of landfill leachate. In R. C. R. S. T. H. Christensen (Ed.), *Chemical and biological characteristics of landfill leachate* (pp. 65–88). Elsevier Applied Science.
- Bandala, E.R., A. Liu, B. Wijesiri, A.B. Zeidman, A. Goonetilleke, Emerging materials and technologies for landfill leachate treatment: a critical review, *Environ. Pollut.* 291 (2021) 118133, <https://doi.org/10.1016/j.>
- Bayraklı, F. (1987). *Toprak ve bitki analizleri* (Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayın No. 17). Ondokuz Mayıs Üniversitesi.
- Carvalho, F. A. L., Pateiro, M., Domínguez, R., Barba-Orellana, S., Mattar, J., Rimac Brnčić, S., Barba, F. J. (2019). Replacement of meat by spinach on physicochemical and nutritional properties of chicken burgers. *Journal of Food Process Preservation*, 43, e13935.
- Casierra-Posada, F., Briceño-Pinzón, I. D., Carreño-Patiño, J. A. (2021). Tolerance of spinach (*Spinacia oleracea*) plants to partial defoliation. *Gesunde Pflanzen*, 2021, 1–8.
- Chemlal, R., Azzouz, L., Kernani, R., Abdi, N., Lounici, H., Grib, H., Mameri, N., Drouiche, N. (2014). Combination of advanced oxidation and biological processes for the landfill leachate treatment. *Ecological Engineering*, 73, 281–289.
- Chen, Y., Cheng, J. J., Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*, 99, 4044–4064.
- Chisti, Y. (2013). Constraints to commercialization of algal fuels. *Journal of Biotechnology*, 167, 201–214. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2013.07.020>
- Chowdhury, R., Moore, G., Weatherley, A., Arora, M. (2017). Key sustainability challenges for the global phosphorus resource, their implications for global food security, and options for mitigation. *Journal of Cleaner Production*, 140, 945–963. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.012>

- Cruz, H., Law, Y. Y., Guest, J. S., Rabaey, K., Batstone, D., Laycock, B., Verstraete, W., Pikaar, I. (2019). Mainstream ammonium recovery to advance sustainable urban wastewater management. *Environmental Science & Technology*, 53(19), 11066–11079. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b00603>
- Darestani, M., Haigh, V., Couperthwaite, S. J., Millar, G. J., Nghiem, L. D. (2017). Hollow fibre membrane contactors for ammonia recovery: Current status and future developments. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(2), 1349–1359. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.02.016>
- Demiralay, İ. (1993). *Toprak fiziksel analizleri* (Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları No. 143). Atatürk Üniversitesi.
- Deng, Y., Zhu, X., Chen, N., Feng, C., Wang, H., Kuang, P., et al. (2020). Review on electrochemical system for landfill leachate treatment: performance, mechanism, application, shortcoming, and improvement scheme. *Sci. Total Environ.* 745, 140768. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.140768.
- Dos Santos, H. A. P., de Castilhos Júnior, A. B., Nadaleti, W. C., Lourenço, V. A. (2020). Ammonia recovery from air stripping process applied to landfill leachate treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 1–13.
- El-Kady, A. F. Y., Borham, T. I. (2020). Sustainable cultivation under saline irrigation water: alleviating salinity stress using different management treatments on *Terminalia arjuna* (Roxb.) Wight & Arn. *Agricultural Water Management*, 229, 105902.
- El-Saadony, M. T., Saad, A. M., El-Wafai, N. A., Abou-Aly, H. E., Salem, H. M., Soliman, S. M. (2023). Hazardous wastes and management strategies of landfill leachates: A comprehensive review. *Environmental Technology & Innovation*, 31, 103150. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103150>.
- Emenike, C. U., Fauziah, S. H., Agamuthu, P. (2012). Characterization and toxicological evaluation of leachate from closed sanitary landfill. *Waste Management & Research*, 30, 888–897.
- Ersahin, M. E., Çiçekalan, B., Cengiz, A. I., Zhang, X., Özgün, H. (2023). Nutrient recovery from municipal solid waste leachate in the scope of circular economy: Recent developments and future perspectives. *Journal of Environmental Management*, 335, 117518. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117518>
- Figueira, M., Reig, M., de Labastida, M. F., Cortina, J. L., Valderrama, C. (2022). Boron recovery from desalination seawater brines by selective ion exchange resins. *Journal of Environmental Management*, 314, 114984.
- Foletto, E., Santos, W., Jahn, S., Bassaco, M., Mazutti, M., Cancelier, A., Gundel, A., 2013. Organic pollutants removal and recovery from animal wastewater by mesoporous struvite precipitation. *Desalination Water Treat.* 51, 2776–2780.
- Guan, Q., Zeng, G., Gong, B., Li, Y., Ji, H., Zhang, J., Song, J., Liu, C., Wang, Z., Deng, C. (2021 a). Phosphorus recovery and iron, copper precipitation from swine wastewater via struvite crystallization using various magnesium compounds. *Journal of Cleaner Production*, 328, 129588.
- Guan, Q., Zeng, G., Song, J., Li, Y., Yang, L., Wang, Z., Liu, C. (2021 b). Highly efficient phosphorus and potassium recovery from urine via crystallization process in a fluidized bed reactor system. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9, 105623.
- Guan, Q., Zeng, G., Song, J., Liu, C., Wang, Z., Wu, S. (2021 c). Ultrasonic power combined with seed materials for recovery of phosphorus from swine wastewater via struvite crystallization process. *Journal of Environmental Management*, 293, 112961.

- Gunay, A., Karadag, D., Tosun, I., Öztürk, M. (2008). Use of magnesite as a magnesium source for ammonium removal from leachate. *Journal of Hazardous Materials*, 156, 619–623. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.12.067>
- Guo, X., Chen, J., Wang, X., Li, Y., Liu, Y., Jiang, B. (2023). Sustainable ammonia recovery from low strength wastewater by the integrated ion exchange and bipolar membrane electrodialysis with membrane contactor system. *Separation and Purification Technology*, 305, 122429.
- Huang, H., Zhang, D., Li, J., Guo, G., Tang, S., 2017a. Phosphate recovery from swine wastewater using plant ash in chemical crystallization. *J. Clean. Prod.* 168, 338–345.
- Jafarinejad, S., Park, H., Mayton, H., Walker, S. L., Jiang, S. C. (2019). Concentrating ammonium in wastewater by forward osmosis using a surface-modified nanofiltration membrane. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 5(2), 246–255. <https://doi.org/10.1039/c8ew00690c>
- Jermakka, J., Wendling, L., Sohlberg, E., Heinonen, H., Merta, E., Laine-Ylijoki, J., Kaartinen, T., Mroueh, U.-M. (2015). Nitrogen compounds at mines and quarries: Sources, behaviour and removal from mine and quarry waters – literature study.
- Jia, X., Zhao, C., Wang, Y., Zhu, Y., Wei, X., Shao, M. (2020). Traditional dry soil layer index method overestimates soil desiccation severity following conversion of cropland into forest and grassland on China's Loess Plateau. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 291, 106794.
- Jin, Z., Meng, F., Gong, H., Hu, X., Wang, K. (2020). Optimized scaling-up towards commercial ultrafiltration–pre-concentration-based integrated sewage resource recovery for cleaner production. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122275. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122275>
- Kabir, M. S., Wang, H., Luster-Teasley, S., Zhang, L., Zhao, R. (2023). Microplastics in landfill leachate: Sources, detection, occurrence, and removal. *Environmental Science: Ecotechnology*, 16, 100256. <https://doi.org/10.1016/j.es.2023.100256>
- Kacar, B., & İnal, A. (2008). *Bitki analizleri* (2 baskı). Nobel Yayın.
- Kacar, Z. (1994). *Bitki ve toprağın kimyasal analizleri: III. toprak analizleri* (Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları No. 3). Ankara Üniversitesi.
- Kamaruddin, M. A., Yusoff, M. S., Rui, L. M., Isa, A. M., Zawawi, M. H., Alrozi, R. (2017). An overview of municipal solid waste management and landfill leachate treatment: Malaysia and Asian perspectives. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 26988–27020. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0303-9>
- Kandil, A.-H. T., Cheira, M. F., Gado, H. S., Soliman, M. H., Akl, H. M. (2017). Ammonium sulfate preparation from phosphogypsum waste. *Chemical Engineering Journal*, 10(1), 24–33.
- Kemacheevakul, P., Chuangchote, S., Otani, S., Matsuda, T., Shimizu, Y. (2014). Phosphorus recovery: Minimization of amount of pharmaceuticals and improvement of purity in struvite recovered from hydrolysed urine. *Environmental Technology*, 35, 3011–3019.
- Kjeldsen, P., Barlaz, M. A., Rooker, A. P., Baun, A., Ledin, A., Christensen, T. H. (2002). Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 32, 297–336. <https://doi.org/10.1080/10643380290813462>
- Krishnamoorthy, N., Dey, B., Unpaprom, Y., Ramaraj, R., Maniam, G. P., Govindan, N., Jayaraman, S., Arunachalam, T., Paramasivan, B. (2021). Engineering principles and process designs for phosphorus recovery as struvite: A comprehensive review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 105579.

- Kula, B. (1991). Removal of ammonia nitrogen by precipitation method, on the example of some selected wastewater. *Water Science and Technology*, 24(7), 229–234.
- Kuleyin, A., Yeni, O., Sisman, Y. (2020). Ammonia and COD removal from landfill leachate using MAP precipitation method. *Global NEST Journal*, 22(3), 315–319.
- Kumar, A., Dubey, S. (2023). Utilization of natural gypsum for the preparation of ammonium sulfate. *Chemical Papers*, 77, 2707–2716.
- Kumar, V., Sharma, N., Umesh, M., Chakraborty, P., Kaur, K., Duhan, L. (2023). Micropollutants characteristics, fate, and sustainable removal technologies for landfill leachate: A technical perspective. *Journal of Water Process Engineering*, 53, 103649. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103649>
- Kurniawan, T. A., Lin, Y. Y., Ouyang, T., Albadarin, A. B., Walker, G. (2018). BaTiO₃/TiO₂ composite-assisted photocatalytic degradation for removal of acetaminophen from synthetic wastewater under UV–VIS irradiation. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 73, 42–50.
- Kurniawan, T. A., Lo, W., Chan, G., Sillanpää, M. E. T. (2010). Biological processes for treatment of landfill leachate. *Journal of Environmental Monitoring*, 12, 2032–2047. <https://doi.org/10.1039/c0em00076k>
- Kurniawan, T.A., D. Fu, , R. Avtar, P. Xu, M.H.D. Othman, Recovering heavy metals from electroplating wastewater and their conversion into Zn₂Cr-layered double hydroxide (LDH) for pyrophosphate removal from industrial wastewater, *Chemosphere* 271 (2021) 129861, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129861>.
- Kurniawan, T.A., M.H.D. Othman, X. Liang, H.H. Goh, K.W. Chew, From liquid waste to mineral fertilizer: recovery, recycle and reuse of high-value macro- nutrients from landfill leachate to contribute to circular economy, food security, and carbon neutrality, *Process Saf. Environ. Prot.* 170 (2023) 791–807, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.12.068>.
- Lander, E. M., Wertheim, B. C., Koch, S. M., Chen, Z., Hsu, C. H., Thomson, C. A. (2016). Vegetable protein intake is associated with lower gallbladder disease risk: Findings from the Women’s Health Initiative prospective cohort. *Preventive Medicine*, 88, 20–26.
- Le Corre, K., Valsami-Jones, E., Hobbs, P., Parsons, S. (2009). Phosphorus recovery from wastewater by struvite crystallization: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 39, 433–477.
- Li, B., Boiarkina, I., Yu, W., Huang, H., Munir, T., Wang, G., Young, B. (2019a). Phosphorous recovery through struvite crystallization: Challenges for future design. *Science of the Total Environment*, 648, 1244–1256.
- Li, X., Zhao, Q., Hao, X. (1999). Ammonium removal from landfill leachate by chemical precipitation. *Waste Management*, 19, 409–415.
- Lim, K., Evans, P. J., Parameswaran, P. (2019). Long-term performance of a pilot-scale gas-sparged anaerobic membrane bioreactor under ambient temperatures for holistic wastewater treatment. *Environmental Science & Technology*, 53(13), 7347–7354. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06198>
- Lindamulla, L., Nanayakkara, N., Othman, M., Jinadasa, S., Herath, G., and Jegatheesan, V. (2022). Municipal solid waste landfill leachate characteristics and their treatment options in tropical countries. *Curr. Pollut. Rep.* 8, 273–287. doi:10. 1007/s40726-022-00222-x.

- Lindsay, W. L., Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3), 421–428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
- Liu, J., Gu, Z., Wang, X., Li, Q. (2022). The molecular differences of young and mature landfill leachates: Molecular composition, chemical property, and structural characteristic. *Chemosphere*, 287, 132215. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132215>
- Liu, X., Wang, Y., Chang, J. (2021). A review on the incorporation and potential mechanism of heavy metals on the recovered struvite from wastewater. *Water Research*, 207, 117823. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117823>
- Lo, H. M., Li, M., Pai, T., Liu, W., Wang, S., Banks, C., Hung, C., Chiang, C., Lin, K., Chiu, H., Su, M., Kurniawan, T. A., Wu, K. (2009). Biostabilization assessment of MSW co-disposed with MSWI fly ash in anaerobic bioreactors. *Journal of Hazardous Materials*, 162(2–3), 1233–1242.
- Lu, X., Huang, Z., Liang, Z., Li, Z., Yang, J., Wang, Y., Wang, F., 2021. Co-precipitation of Cu and Zn in precipitation of struvite. *Sci. Total Environ.* 764, 144269.
- Maaß, O., Grundmann, P., von Bock und Polach, C. (2014). Added-value from innovative value chains by establishing nutrient cycles via struvite. *Resources, Conservation and Recycling*, 87, 126–136.
- Mani, S., Chowdhary, P., Zainith, S. (2020). Microbes mediated approaches for environmental waste management. In P. Chowdhary, A. Raj, D. Verma, Y. Akhter, *Microorganisms for sustainable environment and health* (pp. 17–36). Elsevier.
- MarketWatch. (2023). *NPK fertilizer market size (2023–2030)*.
- Mavhungu, A., Masindi, V., Foteinis, S., Mbaya, R., Tekere, M., Kortidis, I., Chatzisyseon, E. (2020). Advocating circular economy in wastewater treatment: Struvite formation and drinking water reclamation from real municipal effluents. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 103957.
- Mbanaso, F., Theophilus, S., Sam-Ateki, M., Nnadi, E., Umoren, U., Umeokafor, N. (2023). Investigation of impact of slow-release fertilizer and struvite on biodegradation rate of diesel-contaminated soils. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5, 100209.
- Mor, S., Ravindra, K. (2023). Municipal solid waste landfills in lower- and middle-income countries: Environmental impacts, challenges and sustainable management practices. *Process Safety and Environmental Protection*, 174, 510–530. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.04.014>
- Naveed, A., Soomin, S., Won, S., Ra, C. (2018). Struvite recovered from various types of wastewaters: Characteristics, soil leaching behaviour, and plant growth. *Land Degradation & Development*, 29(9), 2864–2879.
- Ohlinger, K., Young, T., Schroeder, E. (2000). Post-digestion struvite precipitation using a fluidized bed reactor. *Journal of Environmental Engineering*, 126(4), 361–368.
- Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, F. S., Dean, L. A. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *U.S. Department of Agriculture Circular*, 939.
- Ors, S., Suarez, D. L. (2017). Spinach biomass yield and physiological response to interactive salinity and water stress. *Agricultural Water Management*, 190, 31–41.
- Öztürk, M. (2006). *Magnezyum Amonyum Fosfat (MAP) çöktürmesi ile atıksulardan azot ve fosfor giderimi* (Yüksek lisans tezi). Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.

- Peng, C., Chai, L., Song, Y., Min, X., Tang, C. (2018). Thermodynamics, kinetics and mechanism analysis of Cu(II) adsorption by in-situ synthesized struvite crystal. *Journal of Central South University*, 25, 1033–1042. <https://doi.org/10.1007/s11771-018-3797-2>
- Priya, A. K., Muruganandam, M., Kumar, A., Senthilkumar, N., Shkir, M., Pandit, B., Saravanan, A. (2024). Recent advances in microbial-assisted degradation and remediation of xenobiotic contaminants; challenges and future prospects. *Journal of Water Process Engineering*, 60, 105106. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105106>
- Puyol, D., Batstone, D. J., Hülsen, T., Astals, S., Peces, M., and Krömer, J. O. (2017). Resource recovery from wastewater by biological technologies: opportunities, challenges, and prospects. *Front. Microbiol.* 7, 2106. doi:10.3389/fmicb.2016.02106.
- Qi, Y., Qiu, J., Tao, J., Zeng, J., Liu, R., Liu, H., Wang, Z. (2023). Temporal evolution of biogeochemical parameters and microbial communities in a landfill leachate pollution plume. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234, 720. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06747-1>
- Qiang, J., Zhou, Z., Wang, K., Qiu, Z., Zhi, H., Yuan, Y., Wang, Z. (2020). Coupling ammonia nitrogen adsorption and regeneration unit with a high-load anoxic/aerobic process to achieve rapid and efficient pollutants removal for wastewater treatment. *Water Research*, 170, 115280. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115280>
- Qin, Y., Wang, K., Xia, Q., Yu, S., Zhang, M., An, Y., Zhou, Z. (2023). Up-concentration of nitrogen from domestic wastewater: A sustainable strategy from removal to recovery. *Chemical Engineering Journal*, 451, 138789. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138789>
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., Vogel, H. J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, 314, 122–137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>
- Rahman, M., Liu, Y., Kwag, J., Ra, C. (2011). Recovery of struvite from animal wastewater and its nutrient leaching loss in soil. *Journal of Hazardous Materials*, 186(2–3), 2026–2030. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.12.081>
- Reshadi, M.A.M., A. Bazargan, G. McKay, A review of the application of adsorbents for landfill leachate treatment: focus on magnetic adsorption, *Sci. Total Environ.* 731 (2020) 138863, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138863>.
- Rinklebe, J., Antoniadis, V., Shaheen, S. M., Rosche, O., Altermann, M. (2019). Health risk assessment of potentially toxic elements in soils along the central Elbe River, Germany. *Environment International*, 126, 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.011>
- Roy, D., Azais, A., Benkaraache, S., Drogui, P., Tyagi, R. D. (2018). Composting leachate: Characterization, treatment, and future perspectives. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 17(2), 323–349. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-9462-3>
- Sağlam, M. T. (1997). *Toprak ve suyun kimyasal analiz yöntemleri* (2. Baskı). Trakya Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayın No: 189.
- Saxena, V., Kumar Padhi, S., Dikshit, P. K., Pattanaik, L. (2022). Recent developments in landfill leachate treatment: Aerobic granular reactor and its future prospects. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 18, 100689. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100689>
- Sena, M., Rodriguez Morris, M., Seib, M., Hicks, A. (2020). An exploration of economic valuation of phosphorus in the environment and its implications in decision making for resource recovery. *Water Research*, 172, 115449. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115449>

- Senathirajah, K., Palanisami, T. (2023). Strategies to reduce risk and mitigate impacts of disaster: Increasing water quality resilience from microplastics in the water supply system. *ACS ES&T Water*, 3(11), 2816–2834. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.3c00206>
- Servatan, M., P. Zarrintaj, G. Mahmodi, S.-J. Kim, M.R. Ganjali, M.R. Saeb, M. Mozafari, Zeolites in drug delivery: progress, challenges and opportunities, *Drug Discov. Today* 25 (2020) 642–656, <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2020.02.005>.
- Sharma, M., Pang, J., Mickan, B. S., Ryan, M. H., Jenkins, S. N., Siddique, K. H. M. (2024). Wastewater-derived struvite has the potential to substitute for soluble phosphorus fertiliser for growth of chickpea and wheat. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01337-0>
- Shih, Y., Abarca, R., de Luna, M., Huang, Y., Lu, M. (2017). Recovery of phosphorus from synthetic wastewaters by struvite crystallization in a fluidized-bed reactor: Effects of pH, phosphate concentration and coexisting ions. *Chemosphere*, 173, 466–473. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.066>
- Shin, H. S., Lee, S. M. (1997). Removal of nutrients in wastewater by using magnesium salts. *Environmental Technology*, 19, 283–290. <https://doi.org/10.1080/09593331908616727>
- Sil, A., & Kumar, S. (2017). Landfill leachate treatment. In J. W. C. Wong, R. D. Tyagi, A. Pandey, *Current developments in biotechnology and bioengineering* (pp. 391–406). Elsevier.
- Singh, R. (2023). Microplastics in landfill leachate: Occurrence, health concerns, and removal strategies. *Journal of Environmental Management*, 342, 118220. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118220>
- Smith, D. P., Smith, N. T. (2015). Anaerobic-ion exchange (AN-IX) process for local-scale nitrogen recovery from wastewater. *Bioresource Technology*, 196, 324–331. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.114>
- Srivastava, A., Dutta, S., Ahuja, S., Sharma, R. K. (2021). Green chemistry: Key to reducing waste and improving water quality. In S. Ahuja (Ed.), *Handbook of water purity and quality* (2nd ed., pp. 359–407). Academic Press.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (1998). (20th ed.). American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- Stefov, V., Soptrajanov, B., Kuzmanovski, I., Lutz, H., Engelen, B., 2005. Infrared and Raman spectra of magnesium ammonium phosphate hexahydrate (struvite) and its isomorphous analogues. III. Spectra of protiated and partially deuterated magnesium ammonium phosphate hexahydrate. *J. Mol. Struct.* 752, 60–67.
- Stratful, I., Scrimshaw, M., Lester, J., 2001. Conditions influencing the precipitation of magnesium ammonium phosphate. *Water Res.* 35, 4191–4199.
- Tansel, B. (2017). Struvite formation and decomposition characteristics for ammonia and phosphorus recovery: A review of magnesium–ammonia–phosphate interactions. *Chemosphere*, 194, 504–514. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.066>
- Temel, F. A., Kuleyin, A. (2016). Ammonium removal from landfill leachate using zeolite: Kinetic, equilibrium, and thermodynamic studies. *Desalination and Water Treatment*, 57(50), 23873–23892. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1132321>
- URL-1. (2023). *Samsun İl Çevre Durum Raporu 2023*. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/samsun-ilcdr-2023-20241016124744.pdf>

- Valle, S. F., Giroto, A. S., Dombinov, V., Robles-Aguilar, A. A., Jablonowski, N. D., Ribeiro, C. (2022). Struvite-based composites for slow-release fertilization: A case study in sand. *Scientific Reports*, 12(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06738-z>
- Wang, J., Qiao, Z. (2024). A comprehensive review of landfill leachate treatment technologies. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1439128. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1439128>
- Wang, J., Ye, X., Zhang, Z., Ye, Z., Chen, S. (2018). Selection of cost-effective magnesium sources for fluidized struvite crystallization. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 70, 144–153. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.12.001>
- Wang, J., Ye, X., Zhang, Z., Ye, Z., Chen, S., 2018. Selection of cost-effective magnesium sources for fluidized struvite crystallization. *J. Environ. Sci. (China)* 70, 144–153.
- Wang, K., Zhou, Z., Qiang, J., Yu, S., Wang, X., Yuan, Y., Xiao, K. (2021). Emerging wastewater treatment strategy for efficient nitrogen removal and compact footprint by coupling mainstream nitrogen separation with chemical coagulation and biological aerated filter. *Bioresource Technology*, 320, 124389. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124389>
- Wang, L., Shi, J., Zuo, Q. (2012). Optimizing parameters of salinity stress reduction function using the relationship between root water uptake and root nitrogen mass of winter wheat. *Agricultural Water Management*, 104, 142–152. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.12.019>
- Wang, W., Xin, X., Li, B., Huang, H., Liu, X., Song, L., Huang, Y. (2020). Effect of organics on Cu and Cr in recovered struvite from synthetic swine wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 360, 132186. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.132186>
- Wang, X., Qiao, B., Li, S., Li, J. (2016). Using natural Chinese zeolite to remove ammonium from rainfall runoff following urea fertilization of a paddy rice field. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 5342–5351. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5768-1>
- Wang, Y., Da, J., Deng, Y., Wang, R., Liu, X., Chang, J. (2023). Competitive adsorption of heavy metals between Ca–P and Mg–P products from wastewater during struvite crystallization. *Journal of Environmental Management*, 335, 117552. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117552>
- Wijekoon, P., Koliyabandara, P. A., Cooray, A. T., Lam, S. S., Athapattu, B. C. L., Vithanage, M. (2022). Progress and prospects in mitigation of landfill leachate pollution: Risk, pollution potential, treatment and challenges. *Journal of Hazardous Materials*, 421, 126627. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126627>
- Withers, P. J. A., Sylvester-Bradley, R., Jones, D. L., Healey, J. R., Talboys, P. J. (2014). Feed the crop not the soil: Rethinking phosphorus management in the food chain. *Environmental Science & Technology*, 48(12), 6523–6530. <https://doi.org/10.1021/es501670d>
- Xiang, S., Liu, Y., Zhang, G., Ruan, R., Wang, Y., Wu, X., Zhang, W. (2020). New progress of ammonia recovery during ammonia nitrogen removal from various wastewaters. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 36, 1–20. <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02927-z>
- Ye, Z., Shen, Y., Ye, X., Zhang, Z., Chen, S., Shi, J. (2014). Phosphorus recovery from wastewater by struvite crystallization: Property of aggregates. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 26, 991–1000. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(13\)60514-7](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(13)60514-7)
- Yesigat, A., Worku, A., Mekonnen, A., Bae, W., Feyisa, G. L., Gatew, S., Han, J. L., Liu, W., Wang, A., & Guadie, A. (2022). Phosphorus recovery as K-struvite from a waste stream:

- A review of influencing factors, advantages, disadvantages and challenges. *Environmental Research*, 214, 114086.
- Yetilmezsoy, K., Sapci-Zengin, Z. (2009). Recovery of ammonium nitrogen from the effluent of UASB treating poultry manure wastewater by MAP precipitation as a slow release fertilizer. *Journal of Hazardous Materials*, 166(1), 260–269. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.026>
- Zaffar, A., Krishnamoorthy, N., Nagaraj, N., Jayaraman, S., Paramasivan, B. (2023). Optimization and kinetic modeling of phosphate recovery as struvite by electrocoagulation from source-separated urine. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(8), 20721–20735. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24093-6>
- Zang, Y., Li, Y., Wang, C., Zhang, W., Xiong, W. (2015). Towards more accurate life cycle assessment of biological wastewater treatment plants: A review. *Journal of Cleaner Production*, 107, 676–692. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.130>
- Zhou Z, Wang K, Qiang J, Pang H, Yuan Y, An Y, Zhou C, Ye J, Wu Z (2021) Mainstream nitrogen separation and side-stream removal to reduce discharge and footprint of wastewater treatment plants. *Water Res* 188:116527. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116527>.
- Zhu, J., Li, M., Whelan, M. (2018). Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. *Science of the Total Environment*, 612, 522–537. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.254>
- ZionMarket. (2023). *Fertilizer Market Size*.
- Zisman, O., Kushmaro, A., Brenner, A. (2024). Bio-chemical treatment of landfill leachates with high load of organic and nitrogen compounds. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 5, 100220. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100220>

EKLER

Ek 1. Bitki Analizleri

İspanak bitkilerinden alınan örnekler laboratuvara getirilmiş, saf su ile yıkandıktan sonra 65 °C’de sabit ağırlığa gelene kadar kurutulmuştur. Kurutulan örnekler öğütülerek kuru yakma yöntemine göre yakılmış ve ardından fosfor (P), demir (Fe), bakır (Cu), çinko (Zn) ve mangan (Mn) içerikleri ICP-OES cihazı kullanılarak belirlenmiştir (Kaçar ve İnal, 2008). Analizlerde Tablo EK-1’de belirtilen laboratuvar ekipmanları kullanılmıştır.

Tablo EK-1. Kullanılan Ekipmanlar

Yöntem	Cihazın Adı	Cihazın Modeli
Bitki Örneklerinde Kurutma	Etüv	Binder
Bitki Örneklerinde Yakma	Kül Fırını	Nabertherm-L1513B180
Bitki Örneklerinde Okuma (P,Fe,Cu,Zn,Mn)	ICP-OES	Perkin Elmer-Optima 8000
Toprak Örneklerinde Fosfor	Spectro Fotometre	Thermo
Toprak Örneklerinde Okuma (P,Fe,Cu,Zn,Mn)	ICP-OES	Perkin Elmer-Optima 8000
Örneklerin Tartımı	Terazi	Ohaus-AX2202

Ek 2. Toprak Analizleri

Sera denemeleri kurulmadan önce, deneme alanında kullanılacak toprağın temel özelliklerini belirlemek amacıyla Tablo EK-2’de belirtilen analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, hasat işlemi sonrasında toprak örneklerinde fosfor (P) analizi yapılmıştır. Toprak örnekleri paslanmaz çelik kürek kullanılarak yüzeyden alınmış, laboratuvara taşınmıştır. Laboratuvarda, örnekler 2 mm göz açıklığına sahip elek ile elenmiş ve analizlerde kullanılmak üzere plastik kaplarda uygun koşullarda muhafaza edilmiştir.

Ek 3. Ağır Metal Analizleri

Toplam ağır metal içeriği, 0,05 mm göz açıklığına sahip elekten geçirilen toprak örneklerinin EPA 3051 standardına uygun olarak yaş yakma yöntemiyle hazırlanması ve elde edilen ekstraktın ICP-OES cihazı ile analiz edilmesi yoluyla belirlenmiştir (Rinklebe vd., 2019).

Tablo EK-2. Toprak analiz yöntemleri

Deney Adı	Yöntem
Tekstür	Hidrometre yöntemi ile (Demiralay,1993)
Organik madde, %	Walkey-Black yöntemi ile (Kacar 1994)
EC, dS m ⁻¹	1:1 (w/v) toprak:saf su süspansiyonunda kondaktivitemetre ile (Bayraklı 1987)
pH	1:1 (w/v)toprak:saf su süspansiyonunda potansiyometrik olarak (Bayraklı 1987)
Kireç kapsamı, %	Karbonat ve bikarbonatların Scheibler’edayalı passon yöntemi ile (Kacar 1994)
Toplam N, %	Kjeldahl yöntemi ile (Kacar 1994)
Değişebilir katyonlar	1 N amonyum asetat ektratu ile (Sağlam, 1997)
Alınabilir potasyum	1 N amonyum asetat ektratu ile (Kacar 1994)
Yarayışı mikroelementler	0.05M DTPA+0.01M CaCl ₂ +0.1M TEA ekstraksiyonu ile (Lindsay ve Norvell,1978)Lindsay ve Norvell (1978)
Alınabilir fosfor	1 N NaHCO ₃ ekstraktı ile (Olsen vd. 1954)

ÖZGEÇMİŞ

Ömer Yeni, Ordu Başöğretmen Anadolu Lisesi'ni bitirdikten sonra Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği bölümünden 29.06.2015 tarihinde mezun oldu. 2016 yılında OMÜ LEE Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans programına girdi. 19.07.2019 tarihinde bitirdi. 2019 yılında Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalında doktora programına başladı. Mezuniyetinden bu yana Mühendis olarak görev yapan Ömer Yeni, orta derecede İngilizce bilmektedir.

İletişim Bilgileri

ORCID ID : 0009-0005-0203-257X

Yayınlar:

1. Yeni, Ö., Kuleyin, A. (2024). Nutrient Recovery In The Form Of Ammonium Sulfate From Samsun Metropolitan Landfill Leachate. 11th International May 19 Innovative Scientific Approaches Congress, 378-379. Samsun.
2. Yeni, Ö., Kuleyin, A. (2024). Obtaining Fertilizer In The Form Of Magnesium Ammonium Phosphate From Leachate And Plant Applications. 11th International May 19 Innovative Scientific Approaches Congress, 380-381. Samsun.
3. Yeni,Ö., Kuleyin, A. (2022). Recovery of ammonium from leachate in the form of fertilizer. Cooperation for Climate and Green Deal Symposium. Page 145. Samsun.
4. SCI - Kuleyin, A., Yeni, O., Şişman, Y. (2020). Ammonia and COD removal from landfill leachate using MAP precipitation method. Global NEST Journal, Vol 22. p. 315-319.
5. SCI - Kuleyin, A., Yeni, O., Şişman, Y. (2020). Removal of ammonia and COD from leachate by MAP precipitation method and contribution of natural materials. Desalination and Water Treatment. Vol p. 145-151.
6. Yeni, O., Arıman, S., Akbal, F., Kuleyin, A. (2019). Zeolit Kullanılarak Sızıntı Suyundan Amonyak Giderimi. IEECC-(Kocaeli)- 1. Uluslararası Çevre Mühendisliği Kongresi. Sayfa 610-620.
7. Yeni, O., Kuleyin, A., Sisman, Y. (2018). Ammonia Removal From Landfill Leachate Using MAP Precipitation Method. ICOEST-(Kiev-Ukraine)-4th International Conference on Environmental Science and Technology. p. 41-47.