



**KİRLENMİŞ TOPRAKLARDAN BAZI AĞIR
METALLERİN (Ni ve Zn)
UZAKLAŞTIRILMASINDA YENİ
SÜRDÜRÜLEBİLİR BİR TEKNOLOJİ OLAN
FİTOREMEDİASYONUN KULLANIMI**

Seda PAMAY

Yüksek Lisans Tezi

**Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Sevinç ADILOĞLU
2021**

T.C.
TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KİRLENMİŞ TOPRAKLARDAN BAZI AĞIR METALLERİN (Ni ve Zn)
UZAKLAŞTIRILMASINDA YENİ SÜRDÜRÜLEBİLİR BİR
TEKNOLOJİ OLAN FİTOREMEDİASYONUN KULLANIMI**

Seda PAMAY

TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: Doç. Dr. Sevinç ADİLOĞLU

TEKİRDAĞ-2021

Her hakkı saklıdır.



Bu tez NKÜBAP tarafından NKUBAP.03.YL.21.314 numaralı proje ile desteklenmiştir

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KİRLENMİŞ TOPRAKLARDAN BAZI AĞIR METALLERİN (Ni ve Zn) UZAKLAŞTIRILMASINDA YENİ SÜRDÜRÜLEBİLİR BİR TEKNOLOJİ OLAN FİTOREMEDİASYONUN KULLANIMI

Seda PAMAY

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Sevinç ADILOĞLU

Günümüzde kullanımı yaygınlaşan ve ekonomik bir yöntem olan fitoremediasyon teknolojileri, kirlenmiş alanların temizlenmesinde uygulanabilir bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Çevre kirliliğine neden olan ağır metaller, toprak ve su kaynaklarına çeşitli yollarla (trafik, sanayileşme, kentleşme, insan faaliyetleri, yanlış tarımsal uygulamalar vb.) bulaşmakta, fiziksel ve biyolojik işlemler ile parçalanmamaları sebebiyle de bu kaynaklarda uzun süreli kirlilik etkisi yaratabilmektedirler. Toksik etkileri nedeniyle, ağır metallerin yarattığı bu kirlilik ekosistemdeki canlılar için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Yapılan bu çalışmada, nane (*Mentha piperita* L.) ve karalahana (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) bitkilerinin nikel (Ni) ve çinko (Zn) ağır metallerinin giderimindeki ve diğer bitki besin maddelerini absorbe etmedeki etkinliği topraktaki mikoriza varlığına (mikorizalı (+AM) / mikorizasız (-AM)) bağlı olarak değerlendirilmiştir. Deneme, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölüm Laboratuvarında "Tesadüf Blokları Deneme Deseni"ne göre yürütülmüştür. Araştırmada 2 bitki + 2 kirlenici (Zn ve Ni) x 3 tekerrür x 2 farklı doz (mikorizalı (+AM) / mikorizasız (-AM)) uygulanmış ve her bitkiye ait kontrol saksıları olmak üzere toplamda 18 saksı yer almıştır. Kirlenici olan saksılara dikimden sonra bitkilerin adaptasyonu beklenmiş ve 1 hafta sonra 10 mmolkg⁻¹ EDTA şelatörü uygulanmıştır. Kirlenici olarak uygulanan Zn ve Ni sırasıyla 10 mgkg⁻¹ ve 20 mgkg⁻¹ şeklinde uygulanmıştır. Ni ağır metali suda çözünebilir NiSO₄.6H₂O formundan ve Zn ağır metali suda çözünebilir ZnSO₄.7H₂O formundan alınarak kullanılmıştır. Mikoriza uygulaması ise dikimden 10 gün sonra gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda her iki bitkide de bitki boyu, bitki kök boyu ve SPAD değerlerindeki değişimler istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Karalahana (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) ve nane (*Mentha piperita* L.) bitkilerinin nikel ve çinko ağır metallerini akümüle ettiği ve fitostabilizasyon yolu ile topraktan bu ağır metalleri giderdiği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Fitoremediasyon, Mikoriza, Ağır metal toksisitesi, Hiperakümülyasyon

ABSTRACT

MSc. Thesis

THE USE OF PHYTOREMEDIATION, A NEW SUSTAINABLE TECHNOLOGY IN THE REMOVAL OF SOME HEAVY METALS (Ni and Zn) FROM POLLUTED SOILS

Seda PAMAY

Tekirdağ Namık Kemal University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Soil Science and Plant Nutrition

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Sevinç ADILOĞLU

Nowadays, phytoremediation technologies, which are widely used and an economical method, appear as a viable method for cleaning contaminated areas. Heavy metals that cause environmental pollution are transmitted to soil and water resources in various ways (traffic, industrialization, urbanization, human activities, improper agricultural practices, etc.) Due to its toxic effects, this pollution created by heavy metals poses a serious threat to the living things in the ecosystem. In this study, the effectiveness of peppermint (*Mentha piperita* L.) and collard (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) in removing heavy metals of nickel (Ni) and zinc (Zn) and absorbing other plant nutrients, respectively, was determined by the presence of mycorrhiza in soil. The experiment conducted in Tekirdağ Namık Kemal University, Faculty of Agriculture, Soil Science and Plant Nutrition Department Laboratory was carried out according to the "Randomized Block Design". In the study, 2 plants + 2 pollutants (Zn and Ni) x 3 replications x 2 different doses (with mycorrhiza (+AM) / without mycorrhiza (-AM)) were applied and there was a total of 18 pots, including control pots for each plant. After planting in polluting pots, adaptation of the plants was waited and 10 mmolkg⁻¹ EDTA chelator was applied 1 week later. Zn and Ni applied as pollutants were applied as 10 mgkg⁻¹ and 20 mgkg⁻¹, respectively. Ni heavy metal was taken from the water-soluble form of NiSO₄.6H₂O and Zn heavy metal was taken from the water-soluble form of ZnSO₄.7H₂O. Mycorrhiza application was carried out 10 days after planting. As a result of the study, the changes in plant height, plant root length and SPAD values were not found statistically significant in both plants. It has been determined that collard (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) and peppermint (*Mentha piperita* L.) plants accumulate nickel and zinc heavy metals and remove these heavy metals from the soil by phytostabilisation.

Key words: Phytoremediation, Mycorrhiza, Heavy metal toxicity, Hyperaccumulation

2021, 123 pages

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÇİZELGE DİZİNİ	v
ŞEKİL DİZİNİ	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR	ix
TEŞEKKÜR	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Sürdürülebilir Bir Teknoloji: Fitoremediasyon	2
1.1.1. Fitoremediasyon Yöntemleri	4
1.2. Toprak Kirliliğinde Ağır Metallerin Rolü	6
1.2.1. Nikel	10
1.2.2. Çinko	12
1.3. Ağır Metal Kirliliğinin Gideriminde Hiperakümülatör Bitkilerin Rolü	17
1.3.1. Karalahana (<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>acephala</i>)	17
1.3.2. Nane (<i>Mentha piperita</i> L).....	21
2. KAYNAK ÖZETLERİ	25
2.1. Son Yıllarda Ulusal Alanda Gerçekleştirilen Bazı Fitoremediasyon Çalışmaları	25
2.2. Son Yıllarda Uluslararası Alanda Gerçekleştirilen Bazı Fitoremediasyon Çalışmaları.....	31
3. MATERYAL VE YÖNTEM	42
3.1. Materyal	42
3.1.1. Deneme Bitkisi Karalahana (<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>acephala</i>) Özellikleri	42
3.1.2. Deneme Bitkisi Nane (<i>Mentha piperita</i> L.) Özellikleri.....	43
3.1.3. Denemede Kullanılan Mikroorganizma: Mikoriza.....	44
3.1.4. Denemede Kullanılan Kirletici	45
3.1.5. Denemede Kullanılan Şelatör Bilgileri.....	45
3.1.6. Denemede Kullanılan Toprak Bilgileri	46
3.2. Yöntem	47
3.2.1. Araştırmanın Yürütülmesi	47
3.2.2. Toprağa Ağır Metal, EDTA ve Mikroorganizma Uygulanması.....	49
3.2.3. Karalahana Ve Nane Bitkilerinde Bazı Biyolojik Verilerin Elde Edilmesi	50
3.2.4. Bitki ve Toprak Örneklerinin Analiz İçin Hazırlanması Ve Analizleri.....	51

3.2.5. Deney sonuçlarının istatistiksel analizleri	53
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	54
4.1. Karalahana ve Nane Bitkilerinde Ağır Metal ve Mikoriza Uygulamaları Sonucunda Elde Edilen Bazı Agro-Morfolojik Özellikler	54
4.2. Nikel ve Çinko Gideriminde Karalahana ve Nane Bitkilerinin Akümülyasyonunun Değerlendirilmesi.....	57
4.2.1. Nikel Ağır Metalinin Gideriminde Karalahana Bitkisinin Rolü.....	57
4.2.2. Çinko Ağır Metalinin Gideriminde Nane Bitkisinin Rolü	59
4.3. Karalahana Denemesinde Elde Edilen Sonuçlara Göre Makro-Mikro Element İçerikleri.....	61
4.3.1. Ağır Metal ve Mikoriza Uygulamaları Sonrasında Bitkinin Topraküstü Aksamındaki Makro-Mikro Besin Elementi İçerikleri	61
4.3.2. Ağır Metal ve Mikoriza Uygulamaları Sonrasında Bitkinin Kök Bölgesindeki Makro-Mikro Besin Elementi İçerikleri.....	65
4.3.3. Ağır Metal ve Mikoriza Uygulamaları Sonucunda Bitkinin Yetiştirildiği Toprak Örneklerindeki Makro-Mikro Besin Elementi İçerikleri	69
4.4. Nane Denemesinde Elde Edilen Sonuçlara Göre Makro-Mikro Element İçerikleri	72
4.4.1. Ağır Metal ve Mikoriza Uygulamaları Sonrasında Bitkinin Topraküstü Aksamındaki Makro-Mikro Besin Elementi İçerikleri	73
4.4.2. Ağır Metal ve Mikoriza Uygulamaları Sonrasında Bitkinin Kök Bölgesindeki Makro-Mikro Besin Elementi İçerikleri.....	76
4.4.3. Ağır Metal ve Mikoriza Uygulamaları Sonucunda Bitkinin Yetiştirildiği Toprak Örneklerindeki Makro-Mikro Besin Elementi İçerikleri	80
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	85
KAYNAKLAR.....	89
ÖZGEÇMİŞ.....	Error! Bookmark not defined.

ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 1.1. Kirletici çeşitleri	4
Çizelge 1.2. Bazı ağır metallerin sektörel kaynakları.....	8
Çizelge 1.3. Karalahana bitkisi 2019-2021 yıllarına ait üretim verileri	19
Çizelge 1.4. Nane bitkisi 2019-2021 yıllarına ait üretim verileri.....	23
Çizelge 3.1. Denemede kullanılan toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri	47
Çizelge 4.1. Karalahana bitkisinde nikel (+/- mikoriza) ağır metali uygulaması sonucunda elde edilen agro-morfolojik veriler	54
Çizelge 4.2. Nane bitkisinde çinko (+/- mikoriza) ağır metali uygulaması sonucunda elde edilen agro-morfolojik veriler	55
Çizelge 4.3. Karalahana bitkisinin akümülyasyonu ve nikel ağır metalinin giderimi.....	58
Çizelge 4.4. Nikel ağır metalinin toprak için tolere edilebilir değer aralıkları.....	59
Çizelge 4.5. Nane bitkisinin akümülyasyonu ve çinko ağır metalinin giderimi	59
Çizelge 4.6. Çinko ağır metalinin bitkide ve topraktaki sınır değerleri ve yeterlilik sınıfları..	60
Çizelge 4.7. Nikel (mikoriza +/-) ağır metali uygulanan karalahana bitkisinin topraküstü aksamındaki makro besin elementi içerikleri	61
Çizelge 4.8. Nikel (mikoriza +/-) ağır metali uygulanan karalahana bitkisinin topraküstü aksamındaki mikro besin elementi içerikleri.....	63
Çizelge 4.9. Nikel (mikoriza +/-) ağır metali uygulanan karalahana bitkisinin kök bölgesindeki makro besin elementi içerikleri	65
Çizelge 4.10. Nikel (mikoriza +/-) ağır metali uygulanan karalahana bitkisinin kök bölgesindeki mikro besin elementi içerikleri.....	67
Çizelge 4.11. Nikel (mikoriza +/-) ağır metali uygulanan toprak örneklerinde makro besin elementi içerikleri.....	69
Çizelge 4.12. Nikel (mikoriza +/-) ağır metali uygulanan toprak örneklerinde mikro besin elementi içerikleri.....	71
Çizelge 4.13. Çinko (mikoriza +/-) ağır metali uygulanan nane bitkisinin topraküstü aksamındaki makro besin elementi içerikleri	73
Çizelge 4.14. Çinko (mikoriza +/-) ağır metali uygulanan nane bitkisinin topraküstü aksamındaki mikro besin elementi içerikleri.....	75
Çizelge 4.15. Çinko (mikoriza +/-) ağır metali uygulanan nane bitkisinin kök bölgesindeki makro besin elementi içerikleri	77
Çizelge 4.16. Çinko (mikoriza +/-) ağır metali uygulanan nane bitkisinin kök bölgesindeki mikro besin elementi içerikleri.....	79
Çizelge 4.17. Çinko (mikoriza +/-) ağır metali uygulanan toprak örneklerinde makro besin elementi içerikleri.....	81

Çizelge 4.18. Çinko (mikoriza +/-) ağır metali uygulanan toprak örneklerinde mikro besin elementi içerikleri83



ŞEKİL DİZİNİ

Şekil.1.1. Karalahana (<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>acephala</i>) bitkisi.....	18
Şekil 1.2. Nane (<i>Mentha piperita</i> L.) bitkisi.....	22
Şekil 3.1. <i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>acephala</i> (karalahana) için deneme planı.	42
Şekil 3.2. <i>Mentha piperita</i> L. (nane) için deneme planı	42
Şekil 3.3. Toprakların 4 mm'lik elekten elenmesi	46
Şekil 3.4. Karalahana (<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>acephala</i>) bitkisi.....	48
Şekil 3.5. Nane (<i>Mentha piperita</i> L.) bitkisi.....	49
Şekil 3.6. Ağır metal çözeltileri ve sabit dozda ağır metal uygulanmış, inkübasyonda olan saksılar.....	50
Şekil 3.7. Bitkinin morfolojik ölçümlerine ve yaş ağırlıklarının alınmasına ait görüntüler.....	50
Şekil 3.8. Hasat sonrası hava kuru ortamda kurutulmaya bırakılan nane ve lahana bitkilerinin toprak, topraküstü ve kök örnekleri.....	51
Şekil 4.1. Kirletici olarak Ni ve doz olarak mikoriza (+/-) uygulaması yapılan saksılarda yetiştirilen karalahana topraküstü aksamındaki makro besin elementi içerikleri, (mgkg ⁻¹).....	62
Şekil 4.2. Kirletici olarak Ni ve doz olarak mikoriza (+/-) uygulaması yapılan saksılarda yetiştirilen karalahana topraküstü aksamındaki mikro besin elementi içerikleri, (mgkg ⁻¹)	64
Şekil 4.3. Kirletici olarak Ni ve doz olarak mikoriza (+/-) uygulaması yapılan saksılarda yetiştirilen karalahana bitkisinin kök bölgesine ait makro besin elementi içerikleri, (mgkg ⁻¹).....	66
Şekil 4.4. Kirletici olarak Ni ve doz olarak mikoriza (+/-) uygulaması yapılan saksılarda yetiştirilen karalahana bitkisinin kök bölgesine ait mikro besin elementi içerikleri, (mgkg ⁻¹)	68
Şekil 4.5. Kirletici olarak Ni ve doz olarak mikoriza (+/-) uygulaması yapılan toprak örneklerine ait makro besin elementi içerikleri, (mgkg ⁻¹)	70
Şekil 4.6. Kirletici olarak Ni ve doz olarak mikoriza (+/-) uygulaması yapılan toprak örneklerine ait mikro besin elementi içerikleri, (mgkg ⁻¹).....	72
Şekil 4.7. Kirletici olarak Zn ve doz olarak mikoriza (+/-) uygulaması yapılan saksılarda yetiştirilen nane bitkisinin topraküstü aksamına ait makro besin elementi içerikleri, (mgkg ⁻¹)	74
Şekil 4.8. Kirletici olarak Zn ve doz olarak mikoriza (+/-) uygulaması yapılan saksılarda yetiştirilen nane bitkisinin topraküstü aksamına ait mikro besin elementi içerikleri, (mgkg ⁻¹).....	76
Şekil 4.9. Kirletici olarak Zn ve doz olarak mikoriza (+/-) uygulaması yapılan saksılarda yetiştirilen nane bitkisinin kök bölgesine ait makro besin elementi içerikleri, (mgkg ⁻¹)	78
Şekil 4.10. Kirletici olarak Zn ve doz olarak mikoriza (+/-) uygulaması yapılan saksılarda yetiştirilen nane bitkisinin kök bölgesine ait mikro besin elementi içerikleri, (mgkg ⁻¹).....	79
Şekil 4.11. Kirletici olarak Zn ve doz olarak mikoriza (+/-) uygulaması yapılan toprak örneklerine ait makro besin elementi içerikleri, (mgkg ⁻¹)	82

Şekil 4.12. Kirlenici olarak Zn ve doz olarak mikoriza (+/-) uygulaması yapılan toprak örneklerine ait mikro besin elementi içerikleri, (mgkg^{-1})..... 84



SİMGELER VE KISALTMALAR

μM	:Mikromolar
%	:Yüzde Oranı
$^{\circ}\text{C}$:Santigrat Derece
μg	:Mikrogram
μm	:Mikrometre
ABD	:Amerika Birleşik Devletleri
Ag	:Gümüş
Al	:Alüminyum
AM	: Arbusküler mikorizal mantar
ANOVA	:Tek Yönlü Varyans Analizi
APX	:Askorbat Peroksitler
Ar	:Argon
As	:Arsenik
ATP	:Adenozin Trifosfat
BAF	:Biyobirikim Faktörü
BCF	:Biyokonsantrasyon Faktörü
$\text{C}_2\text{H}_4\text{NO}_2$:Amonyum Asetat
CA	:Sitrik Asit
Ca	:Kalsiyum
CAT	:Katalaz
Cd	:Kadmiyum
cm	:Santimetre
Co	:Kobalt
CO_2	:Karbondioksit
Cr	:Krom
Cu	:Bakır
EDTA	: Etilendiamin Tetraasetik Asit
FAO	Gıda ve Tarım Örgütü

Fe	:Demir
Ha	:Hektar
Hg	:Cıva
ICP-OES	:Endüktif Plazma Spektroskopisi
K	:Potasyum
Mg	:Magnezyum
mM	:Milimolar
Mn	:Mangan
Mo	:Molibden
N	:Azot
NADPH	: Nikotinamid Adenin Dinükleotit Fosfat
Ni	:Nikel
NiSO ₄ .6H ₂ O	:Nikel (II) Sülfat
O ₂	:Oksijen
P	:Fosfor
Pb	:Kurşun
pH	: Asitlik Alkalilik Derecesi
ROS	:Reaktif Oksijen Türleri
Se	:Selenyum
SOD	:Süperoksit Dismutaz
SPAD	:Klorofil Değeri
SPSS	:Sosyal Bilimler İstatistik Programı (Statistical Package for the Social Sciences)
Tİ	:Tolerans İndeksi
TF	:Tronslokasyon Faktörü
WHO	:Dünya Sağlık Örgütü
ZnSO ₄ .7H ₂ O	:Çinko Sülfat Heptahidrat

TEŞEKKÜR

Tez çalışma dönemimde bilgi birikimi ve tecrübeleri ile destek olan ve yol gösteren değerli danışman hocam sayın Doç. Dr. Sevinç ADİLOĞLU'na sonsuz teşekkür ederim ve saygılarımı sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca tecrübeleriyle beni yönlendiren ve önerilerde bulunan Prof. Dr. Aydın ADİLOĞLU'na (Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölüm Başkanı) teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca yardımını ve manevi desteğini esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Muazzez Gürkan Eser'e (Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Biyoloji Bölümü) teşekkür ederim.

Hayatımın her evresinde maddi ve manevi olarak her zaman yanımda olan ve beni destekleyen anneme, babama ve ağabeyime sonsuz teşekkür ederim.

Aralık, 2021

Seda PAMAY

Biyomühendis

1. GİRİŞ

Günümüzde, şehirlerde yaşayan dünya nüfusunda sürekli ve yoğun bir şekilde artış söz konusudur. Nüfustaki bu artış trafik yoğunluğuna, yeni binalar yapılarak hızlı kentleşmeye, atık üretiminde artışa ve özellikle arazilerdeki topraklarda yoğun kirliliğe neden olmaktadır (Silva vd., 2021). Son on yılda, yaygın olarak meydana gelen ağır metal kontaminasyonları ve bu durumun insan sağlığı üzerindeki etkileri nedeniyle bilimsel araştırmaların odak noktası olmuştur. Bu durum, dünya genelindeki araştırmacıların, ağır metallerin zararlı etkilerinden kaçınmak ve insan tüketimi için sınır değerlerin belirlenmesine yönelik hava, su ve gıdalardaki ağır metal içeriği hakkında incelemeler yapmaya yöneltmiştir. Ortamda biriken ağır metaller orta veya uzun vadeli sağlık risklerine sebep olmakta ve bu nedenle bu kirleticilerin periyodik olarak gözetlenmesi gerekmektedir (Bempah vd., 2020).

Yapılan çalışmalar, düzenli depolama alanlarının yakınındaki yüzey toprağında ağır metal kirliliğine dair kanıtlar göstermiştir. Depolama sahası sızıntı suyundaki yüksek ağır metal değerleri, yeraltı suyu kalitesi üzerinde olumsuz bir etki göstermiştir. Pirinç, meyve ve sebze gibi mahsuller ağır metallerle kirlenmiş ve uzun süre maruz kaldığında insan sağlığı açısından risk oluşturmuştur (Thongyuan vd., 2021).

Gıda bitkileri dışında, özellikle ikincil metabolitleri için çeşitli bitki türleri yetiştirilmektedir. Uçucu yağlar, kozmetikler, kişisel bakım ürünleri vb. üretiminde özel kullanımlarından dolayı bu bitkiler "aromatik bitkiler" olarak adlandırılmaktadır. Bu mahsuller doğrudan gıda zincirine bağlı olmadıklarından, fitoremediasyon amaçlı gıda mahsullerine kıyasla ek bir konuma sahiptirler. Yakın geçmişte, çok sayıda aromatik bitki fitoremediasyon potansiyelleri için test edilmiştir. Nane türleri, metallerin çoğunu, topraküstü kısımlara minimum translokasyon gerçekleştirerek bitki köklerinde biriktirdiğinden, ağır metalle kirlenmiş bölgelerde fitostabilzer görevi görebilmektedir (Pandey vd., 2019). Toprakta ağır metallerin uzaklaştırılması, toprak fitoremediasyonu ve toprak yapısının iyileştirilmesi bu ağır metallerin topraktaki "biyoyararlanımını" en aza indirmektedir. Ağır metallerin biyoyararlanımı, ağır metallerin kimyasal ve biyolojik aktivitelerinde bir kısıtlama ve biyokatılar gibi inorganik ve organik bileşikler tarafından hareketlerinin kısıtlanması yoluyla da en aza indirilebilmektedir. Lahana gibi bitkiler ağır metallerin topraktaki biyoyararlanımını azaltarak topraktaki ağır metal kirliliğini azaltmaktadır (Haghighi vd., 2016).

Günümüzde, ağır metal kontaminasyonu dünya çapında geniş çapta araştırılmaktadır ve araştırma hedefleri arasında kaynakların ortaya çıkarılması, mekansal dağılımın belirlenmesi, kirlilik değerlendirilmesi üretimi, potansiyel ekoloji risklerinin oluşturulması ve sağlık risklerinin değerlendirilmesi ve topraklarda kimyasal form bileşiminin belirlenmesi yer almaktadır (Mamat vd., 2020).

Bu çalışmada, bazı ağır metallerle kirlenmiş toprakların gideriminde başta gıda ve sağlık endüstrisi olmak üzere birçok alanda kullanılabilen ve ülkemizde önemli tıbbi aromatik bitkilerden olan nane (*Mentha piperita* L.), karalahana (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) bitkilerinin ve mikoriza (kök mantarı)'nın farklı ağır metal kirleticileri karşısında davranışları incelenmiştir. Topraklarda meydana gelen ağır metal kirliliğinin gideriminde uygulanabilir yeni bir teknoloji olan Fitoremediasyon yönteminin bu bitkilerde ve seçilen kirleticiler ile ilk kez kullanılmış olması bu çalışmadan elde edilecek verilerin ve bilgilerin bir sonraki çalışmalar için bir kaynak niteliğinde olmasının önünü açmıştır.

1.1. Sürdürülebilir Bir Teknoloji: Fitoremediasyon

Yeşil ıslah olarak bilinen fitoremediasyon, topraktan bitkiler aracılığı ile ağır metallerin ve diğer kirleticilerin uzaklaştırılmasını kapsamaktadır. Ağır metaller, herhangi bir biyolojik ve fiziksel işlemler parçalanmamakta ve toprakta uzun süre kalmaktadır. Bu durum ekosistem için uzun vadeli bir tehdit oluşturmaktadır. Bitkiler için fizyolojik ve biyokimyasal reaksiyonlarda görev alan bakır (Cu), demir (Fe), mangan (Mn), nikel (Ni) ve çinko (Zn) gibi ağır metaller gereklidir. Bu ağır metallerin fazla miktarda bulunması toksik etki yaratmaktadır. Kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), arsenik (As) ve cıva (Hg) gibi ağır metaller ise işlevi olmaksızın bitkide toksik etki yaratmaktadır. Ağır metallerin istek ve ihtiyaç dışı varlığı, bitkide biyolojik ve fizyolojik süreçleri olumsuz etkilemekte ve tarımsal üretkenliği azaltmaktadır (Yan vd., 2020).

Fitoremediasyon, ağır metallerle kirlenmiş topraklar için umut verici bir temizleme teknolojisidir. Bununla birlikte, bu tekniğin metal biriktiren bitki türlerinin yavaş büyüme hızı, ağır metallerin düşük biyoyararlanımı ve uzun süreli iyileştirme gibi bazı dezavantajları vardır. Mikrobiyal destekli fitoremediasyon, toprak kirleticilerinin aşırı birikmesi, detoksifiye edilmesi veya iyileştirilmesi için umut verici bir stratejidir. Arbusküler mikorizal mantarlar hemen hemen tüm bitkilerle birlikte bulunmaktadır. Bu mantarlar, bitkinin sağlıklı büyümelerine katkı sağlamakta ve bitkiyi çevresel streslere karşı dirençli hale getirmektedir (Khalid vd., 2021). *Mikoriza*; kuraklık, sıcaklık artışı, ağır metaller, tuzluluk, patojen ve metal kirliliği gibi hem

biyotik hem de abiyotik stres durumlarında toprak su rejimi ve besin alımının iyileştirilmesinde rol oynamaktadır. Bitki kökleri ve mantar hifleri arasındaki bu tür simbiyotik ilişkinin dünya çapındaki karasal bitki türlerinin %80'inde olduğu gözlemlenmektedir. Bitki-mikoriza birlikteliğinde mantar hifleri, konukçu bitki kökünden şeker elde ederek yararlanır ve konukçu bitki kökü, toprak yüzeyinden daha iyi su ve besin alımı ile iyileştirilir (Bhantana vd., 2021). Endofit mantarlar her sağlıklı bitki dokusunda bulunur ve besin alımı yoluyla büyümenin artırılması, ağır metallerin detoksifikasyonu, ikincil metabolit düzenlenmesi ve abiyotik/biyotik stres toleransının artırılması dahil olmak üzere konukçu bitkilere muazzam hizmetler sunmaktadır (Khalid vd., 2021).

Toprakta ağır metal birikimi, çeşitli doğal süreçler ve antropojenik (endüstriyel) faaliyetler nedeniyle hızla artmıştır. Ağır metaller biyolojik olarak parçalanmadığından, çevrede kalırlar, mahsul bitkileri yoluyla besin zincirinde yer alma potansiyeline sahiptirler ve sonunda biyomagnifikasyon yoluyla insan vücudunda birikebilirler. Toksik yapıları nedeniyle, ağır metal kirliliği insan sağlığı ve ekosistem için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Bu nedenle, arazi kirliliğinin iyileştirilmesi büyük önem taşımaktadır (Yan vd., 2020). Ağır metaller, zorunlu ve zorunlu olmayan sınıflara ayrılabilir, önemli ağır metaller Co, Cr, Al, Cu, Fe, Mn, Ni ve Zn'yi içerir ve temel mikro besin maddeleri olarak da kabul edilir, ancak aşırı miktarda alındığında zehirli hale gelir. Temel olmayan ağır metaller Pb, Cd ve Hg'yi içerir ve canlı organizmalar için oldukça toksiktir (Yıldıztekin vd., 2019).

Toprağın toksik metal kontaminasyonu büyük bir çevresel tehlikedir. Isıl işlem, elektroremediasyon, toprak değiştirme, çökeltme ve kimyasal yıkama gibi ağır metallerin dekontaminasyonu için kimyasal yöntemler genellikle çok maliyetlidir ve tarım arazilerine uygulanamaz. Bununla birlikte, kirli ortamları eski haline getirmek için birçok strateji kullanılmaktadır. Bunlar arasında fitoremediasyon, çevrede/toprakta bulunan yüksek miktarlarda toksik ağır metalleri tolere edebilen hiperakümülatör bitki türlerinin kullanımına dayanan umut verici bir yöntemdir. Bu yöntem, toksik metalleri uzaklaştırmak, parçalamak veya detoksifiye etmek için yeşil bitkileri kullanır (Nedjimi, 2021). Fitoremediasyon çalışmalarından tam verim alabilmek için; (1) bitkinin kirlenmiş toprakta büyüme olasılığı, (2) biyokütle üretimi, (3) kirleticilerin bitkiler tarafından alınabiliyor olması ve (4) kirleticinin bitkiler aracılığıyla tamamen uzaklaştırılması gibi kriterlere dikkat edilmelidir (Pedron vd., 2021).

Kirleticiler organik ve inorganik kirleticiler olmak üzere iki şekilde sınıflandırılmıştır (Çizelge 1.1). Bu kirleticileri ortadan kaldırmak için oldukça pahalı ve zahmetli olan fizikokimyasal yöntemler kullanılmaktadır. Fitoremediasyon günümüzde mevcut olan en ekonomik yöntemlerden biridir (Ganesan vd., 2020).

Çizelge 1.1. Kirletici çeşitleri (Ganesan vd., 2020)

Organik kirleticiler	Organik bileşikler (Poli aromatik hidrakerbonlar, klorlu solventler)
İnorganik kirleticiler	Kimyasal gübre, pestisitler, arsenik, kadmiyum, krom, çinko, kurşun gibi ağır metaller

Toprak dekontaminasyonu için genellikle aşağıda başlıklar halinde verilen fitoremediasyon teknolojileri kullanılmaktadır.

1.1.1. Fitoremediasyon Yöntemleri

Bitki büyümesi için vazgeçilmez olan Cu, Fe, Mg, Mo, Mn, Se ve Zn gibi esansiyel elementler dışında, bazı bitkiler bilinen biyolojik fonksiyonları olmayan ağır metalleri (Ag, Cd, Hg ve Pb) biriktirme kapasitesine sahiptir. Bununla birlikte, bu ağır metallerin yüksek bir birikimi çoğu bitki formu için toksik olabilir. Kirlenmiş toprakların temizlenmesinde uygulanan bazı fitoremediasyon teknolojileri kategorileri vardır (Nedjimi, 2021; Pandey vd., 2019). Bu kategoriler şunlardır:

1.1.1.1. Bitkisel özümleme (Fitoekstraksiyon)

Organik ve inorganik kirletici maddelerin kökler yoluyla topraktan ekstrakte edilmesi ve ardından bitki dokularında (kökler ve sürgünler) ilerleyerek birikmesiyle meydana gelen fitoremediasyon yöntemidir (Pedron vd., 2021).

1.1.1.2. Köklerle sabitleme (Fitostabilizasyon)

Kirlenmiş toprak parçalarındaki çözünmüş kirleticilerin sızmasını ve havadan yayılmasını önlemek için bitkinin adsorpsiyon veya çöktürme yoluyla rizosferik bölgesinde bu kirleticileri tutması veya hareketsizleştirilmesi ile ortaya çıkan yöntemdir (Pedron vd., 2021).

1.1.1.3. Köklerle süzme (Rizofiltrasyon)

Suda yüzen ya da su içerisinde bulunan bitkiler tarafından gerçekleştirilmektedir. Bitkiler kökleri yardımıyla kirleticileri ortamdan uzaklaştırarak kirli suyun dekontaminasyonunu sağlamaktadır. Bu yöntemin en büyük avantajı fitoremediasyonda hem karasal hem de sucul bitkilerin kullanılabilir olmasıdır. Ayrıca köklerle aldığı kirleticileri sürgünlere taşıması da bir diğer avantajdır (Haq vd., 2020; Pedron vd., 2021).

1.1.1.4. Bitkisel buharlaştırma (Fitovolatilizasyon)

Topraktaki kirleticilerin bitki kökleri tarafından absorbe edildikten sonra sürgünler boyunca taşınarak yaprakların terleme sürecinde atmosfere bırakılması yoluyla kirleticilerin uzaklaştırılmasıdır (Pedron vd., 2021). Fitovolatilizasyon büyük ölçüde kirleticilerin fiziksel özelliklerine bağlıdır. Polarite, çözünürlük ve hidrofobik olma gibi özellikler kirleticilerde bulunmalıdır. Hiperakümülatör veya genetiği değiştirilmiş bitkiler, fitovolatilizasyon için en büyük potansiyele sahiptir (Farraji vd., 2020).

1.1.1.5. Bitkilerde bozunum (Fitodegradasyon)

Topraktaki kirleticinin bozulmasını destekleyen mikrobiyal aktivitenin artması ile birlikte bitki biyokimyasal süreçleri yoluyla organik kirleticilerin bozulmasını içeren fitoremediasyon yöntemidir (Pedron vd., 2021).

1.1.1.6. Köklerle bozunum (Rizodegradasyon)

Rizodegradasyonda, köklerde büyüyen mikroorganizmalar tarafından rizosferdeki kirleticiler parçalanmaktadır. Rizodegradasyon normalde karasal ortamlar için geçerlidir ve mikrobiyal toplulukların yardımıyla rizosfer alanındaki organik kirleticilerin (hidrokarbonlar) biyolojik olarak iyileştirilmesi/degradasyonu olarak tanımlanır. Bitki-mikrobiyal etkileşimi, bu arıtma yönteminin etkinliğinde kritik bir rol oynamaktadır. Bitki rizosferindeki mikroorganizmalar, herbisitler, perklorat, ham petrol, poli-hidroksi aromatik bileşikler gibi tehlikeli organik kirleticileri parçalayabilir. Bitki kökleri tarafından salınan şeker, amino asit ve alkoller ve mikrobiyal topluluklar bu enerji ve besin kaynaklarını organik kirleticileri tüketmek ve sindirmek için kullanır. Bu yöntem, mikrobiyal topluluk ilişkisi nedeniyle fitodegradasyona kıyasla oldukça hızlı bir arıtma sistemidir (Farraji vd., 2020; Ganesan vd., 2020).

1.2. Toprak Kirliliğinde Ağır Metallerin Rolü

Çevre kirliliği günümüzün en ciddi sorunlarından biridir. Bu kirleticilerin, sanayi kuruluşlarının veya kentsel altyapının sunulduğu her yerde yaygın olduğu araştırmacılar tarafından kanıtlanmıştır. Kimya ve enerji endüstrilerinden kaynaklanan emisyonlar, çevreye kirlenici salınımının en önemli kaynaklarıdır. Kimyasal elementler arasında ağır metaller en zehirli olanlardır; birçoğu eser miktarda bile yüksek toksisite sergilemektedir. Doğal ortamdaki ağır metal konsantrasyonu, kalıcılıkları ve biyolojik olarak parçalanmamaları nedeniyle zamanla artma eğilimindedir. Metallerle ilişkili risk, toprakta uzun süre kalmalarını sağlayan birikme ve toksisite özelliğinden kaynaklanmaktadır. Teknojenik kirlilik esas olarak herhangi bir karasal ekosistemin temeli olarak toprağı hedefler ve etkiler (Chaplygin vd., 2020).

Metallerin hareketliliği toprak faktörleri, özellikle pH, kil içeriği, kalsiyum karbonat içeriği ve Fe ve Mn oksitler tarafından kontrol edilmektedir. Bu nedenle, toprağın kimyasal özellikleri ve toprak süreçleri (adsorpsiyon, desorpsiyon, çökeltme ve iyon değişimi gibi), çözünür ve çözünmeyen kimyasal formlardan ağır metal fraksiyonlarının nispi oranlarını kontrol etmektedir (Piri vd., 2021).

Ağır metaller, yüksek düzeyde dayanıklılıkları ve biyota toksisiteleri nedeniyle toprak ortamındaki en tehlikeli maddeler arasındadır. Ağır metaller, 5 g/cm³'ten daha büyük yoğunluğa sahip metalleri ve metaloidleri ifade etmektedir. Bu elementlerden bazılarında (temel metaller) düşük konsantrasyonlarda organizmalar tarafından ihtiyaç duyulmasına rağmen, genellikle kirlilik ve toksisite ile ilişkilidirler (Madanan vd., 2021).

Topraklardaki toplam metal konsantrasyonu, onların toksisitesi ve hareketliliği hakkında çok az bilgi vermektedir. Metallerin artan mevcudiyeti, bu elementlerde sürekli toprak zenginleşmesini gösterir. Topraktaki eser elementlerin hareketliliği çok sayıda biyokimyasal ve kimyasal süreç tarafından kontrol edilmektedir (Navarro-Pedreño vd., 2018). Mevcut eser metallerin toprak içeriği, toprak reaksiyonu, karbonat içeriği, organik karbon ve toplam azot içeriği, demir ve manganez bileşikleri, toprak mikroorganizmalarının oluşumu ve aktivitesi veya topraktaki sülfat ve fosfat veya alüminyum bileşiklerinin içeriği, organik madde içeriği, toprak tuzluluğu, toprak emme kompleksi kapasitesi, değişim kapasitesi ve katyon gibi farklı faktörlere bağlıdır. Ek olarak, topraktaki eser metallerin içeriği gübrelemeden veya minerallerin ve organik maddelerin toprağı uygulanmasından etkilenebilir. Ayrıca, üst topraktaki metal çözünür formların içeriği, toprak koşulları değiştiğinde biyolojik olarak kullanılabilir hale

gelebilecek olan bu elementlerin toplam formlarının toprak içeriği ile yakından ilişkilidir. Organik maddece daha zengin, daha yüksek reaksiyon (pH) ve daha yüksek katyon değişim kapasiteli karakterize edilen topraklar ağır metalleri daha etkili bir şekilde hareketsiz hale getirebilmektedir (Verla vd., 2019; Wyszowski ve Modrzewska, 2017).

Ağır metaller, insan sağlığını ve çevre güvenliğini ciddi şekilde tehdit edebilen , gıda zincirinde kalıcı toksisiteleri ve biyo-birikimleri nedeniyle çevrede en yaygın şekilde dağılan ve zahmetli kirleticiler arasındadır (Lv vd., 2019). Toprakta ağır metaller, toprak matrisine çok sıkı bir şekilde tutunma eğilimindedir ve organikler gibi mikrobiyal aktivite veya kimyasal oksidasyon yoluyla bozulmamaktadırlar (Madanan vd., 2021). Metaller, fiziko-kimyasal birlikler oluşturan topraklarda mevcut olabilir: i) suda çözünür; ii) değiştirilebilir; iii) oksitler, karbonatlar ve fosfatlar veya diğer ikincil minerallerle tutunmuş veya birlikte çöktürülmüş; iv) organik maddelerle bağlantılı ve v) birincil minerallerin kristal kafeslerindeki iyonlara bağlı. Bu nedenle metalle kirlenmiş toprakların değerlendirilmesi, topraklardaki toplam ağır metal miktarının yanı sıra her bir fraksiyondaki ağır metal miktarlarının da ölçülmesini gerektirir (Golui vd., 2020).

Tarımsal üretimden, atık su sulama ve atmosferik birikimden, yoğun gübre ve pestisit uygulamaları gibi antropojenik faaliyetlerden kaynaklanan yabancı girdiler nedeniyle topraklarda artan ağır metal birikimlerini önlemek zordur. Spesifik olarak, mahsulün besin maddesi mevcudiyetini, toprak organik maddesini, katyon değişim kapasitesini ve su tutma kapasitesini artırmak için organik gübre olarak kullanılabilen gübre, tarım arazilerinde geri dönüştürülme potansiyeline sahiptir. Ancak gübre uygulamaları , topraklarda belirli ağır metal girdilerinin önemli bir kaynağı haline gelmiştir (Golui vd., 2020; Lv vd., 2019).

Antropojenik ve doğal nedenlerle çevrenin ağır metal kontaminasyonu, bu metallerin bitkiler, hayvanlar ve insanlar üzerindeki toksisitesi nedeniyle endişe nedenidir (Silva vd., 2020). Şu anda, bu sorunun büyüklüğü hızla arttığından, toprak kirliliği önemli ölçüde kamuoyunun dikkatini çekmektedir. Ağır metallerin toprakta birikmesi büyük bir küresel çevre sorunudur. Topraktaki ağır metallerin ana kaynakları endüstriyel faaliyetler, madencilik ve tarım uygulamalarıdır. Ağır metallerin toprakta birikmesi mahsul verimini düşürebilir, hastalıklara neden olabilir, gıda güvenliğini etkileyebilir ve sürdürülebilir kalkınmayı engelleyebilir. Ayrıca besin zincirinde ağır metaller oluşturarak toprak habitatını yok etmekte ve ekolojiyi bozmaktadırlar (Madanan vd., 2021; Silva vd., 2020).

Oluşumu uzun yıllar süren ve çoğu zaman yenilenmesi pek mümkün olmayan doğal kaynaklardan biri olan topraklar, kentleşme ve sanayileşmenin yol açtığı kirlenmeler sonucunda canlılar için tehlikeli boyutlara ulaşan en önemli çevre sorunlarından biri haline gelmiştir. Hızlı kentleşmenin bir sonucu olarak birçok antropojenik kaynaktan yayılan ağır metaller, topraktaki en yaygın kirleticilerdir. Bu grupta başta kurşun, kadmiyum, krom, demir, kobalt, bakır, nikel, çinko, molibden, vanadyum, alüminyum, arsenik, kalay ve manganez olmak üzere 60 metal bulunmaktadır. Toprakta birikerek kirlenmeye neden olan ağır metaller krom (Cr), Nikel (Ni), kurşun (Pb), arsenik (As), çinko (Zn), bakır (Cu) ve kadmiyumdur (Cd). Bu dağılımda özellikle endüstriyel faaliyetler olmak üzere (Çizelge 1.2) aşırı gübre ve tarımsal kimyasal kullanımı etkili olmaktadır (Kurt, 2019).

Çizelge 1.2. Bazı ağır metallerin sektörel kaynakları (Seven vd., 2018)

Sektör Ağır Metal	Kağıt Endüstrisi	Petrokimya	Klor-alkali Üretimi	Gübre Sanayi	Demir-çelik Sanayi	Enerji Üretimi (Termik)
Cd	-	+	+	+	+	+
Cr	+	+	+	+	+	+
Cu	+	-	-	+	+	+
Pb	+	+	+	+	+	+
Ni	+	-	-	+	+	+
Zn	-	+	+	+	+	+

Tarımsal ekosistemlerde sürdürülebilir ağır metal yönetiminin amacı, tarımsal üretimde, elementlerin döngüsü gibi çevresel süreçlerde ve çok sayıda organizmanın yaşam alanı olan toprağın işlevlerini yerine getirmeye devam etmesini sağlamaktır. Sürdürülebilirlik açısından, mekansal ve zamansal toprak ağır metal içeriklerini tahmin etmeye dayalı önleyici ve izleme yaklaşımları bu nedenle umut vericidir. Ağır metallerin ekinler yoluyla hayvanlara (yem bitkileri) ve insanlara (gıda bitkileri ve sebzeler) potansiyel transferi nedeniyle ekilebilir topraklarda ağır metal birikimi önemlidir. Bu bağlamda, Cd, Cu, Co, Ni ve Pb, sadece insanlarda uzun süreli birikim nedeniyle değil, aynı zamanda topraküstü bitki kısımlarında kök alımı ve birikim için yüksek potansiyel nedeniyle önemli elementlerdir (Ozyazici vd., 2017).

Toprak, kentsel ve imalat faaliyetleri yoluyla aerosol birikiminden kaynaklanan ağır metaller de dahil olmak üzere çeşitli kirleticiler için jeokimyasal bir rezervuar görevi görme kabiliyeti nedeniyle önemli bir doğal kaynak olarak kabul edilir. Toprak aynı zamanda doğal bir tampon görevi görebilmekte ve bu nedenle hava, su ve biyolojik bileşenlerdeki kimyasal kirleticilerin dağılımını kontrol edebilmektedir (El-Sherbiny vd., 2019). Atmosferik birikim ve ticari gübreler, hayvan gübresi, kanalizasyon çamuru ve pestisitlerin uygulanması nedeniyle tarım topraklarına ağır metal girdileri oldukça yavaş ama geniş alanlarda gerçekleşmektedir. Bu nedenle, tekrarlanan örnekleme yoluyla topraktaki birikim eğilimlerini tespit etmek uzun yıllar sürmektedir (Ozyazici vd., 2017).

Dünya çapındaki toprak ekosistemleri, hızlı sanayileşme ve kentleşmeden önemli ölçüde etkilenmektedir. İnşaat, enerji üretimi, endüstriyel madencilik, fosil yakıt yakma ve atık bertarafı gibi antropojenik faaliyetler, ağır metallerin kentsel toprakta karakteristik olmayan bir şekilde birikmesiyle sonuçlanarak ciddi çevre kirliliğine neden olmaktadır (El-Sherbiny vd., 2019). Önceki çalışmalar, kırsal alanlardaki ağır metal kirliliğinin kapsamının zamana ve yere göre değiştiğini ve ekili topraktaki ağır metal seviyelerinin artmasının, tarımsal faaliyetlerin yoğunluğu ve tarla trafiği ile ilgili olduğunu göstermiştir (Ozyazici vd., 2017).

Rüzgar ve yağmur, ağır metalleri taşıyan tozların dağılımı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Ağır metallerin dağılmasını etkileyen diğer faktörler, toprak pH'ı ve sonuçta ağır metallerin çözünürlüğünü, adsorpsiyonunu, tutulmasını ve hareketini belirleyebilen kalsiyum iyonlarının mevcudiyetidir. Birçok bitki türünün, büyümelerini ve fizyolojik aktivitelerini olumsuz yönde etkileyen daha yüksek ağır metal konsantrasyonlarına duyarlı olduğu bilinmektedir. Ağır metallerin daha yüksek seviyeleri, biyobirikim yoluyla insanları etkileyen fitotoksisiteyi artırabilir (El-Sherbiny vd., 2019). Sonuç olarak, metallerin diyetle alınması nedeniyle insan sağlığı olumsuz yönde etkilenmektedir. Örneğin, merkezi sinir sistemi hasarı, hemoliz, Wilson hastalığı, itai-itai, böbrek hasarı, hepatik nekroz, metabolik asidoz, sinüzit, anosmi, aminoasidüri, proteinüri, glukozüri, renal tübüler disfonksiyon, ensefalopati, insanlarda üremede başarısızlık gibi rahatsızlıklar ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, bitkiler yoluyla metalin insan besin zincirine taşınmasının potansiyel riskini değerlendirmek için kirlenmiş topraktaki ağır metal içeriğinin doğru bir şekilde ölçülmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, bu ölçüm kolay değildir çünkü metaller genellikle çeşitli toprak bileşenleri ile farklı şekillerde ilişkilendirilir ve bu ilişkiler onların hareketliliğini ve kullanılabilirliğini belirler (Golui vd., 2020).

1.2.1. Nikel

Ağır metaller en şiddetli kirletici türlerinden biridir ve ortamdaki uzaklaştırılması oldukça zor olan kirleticilerdir. Ağır metallerin küçük miktarları bile eko-çevre ve insan sağlığı için büyük bir tehdit oluşturmaktadır (Demarco vd., 2018). Ağır metalleri metabolik olarak gerekli olanlar ve olmayanlar olarak iki gruba ayırabiliriz. Örneğin; Pb ve Cd ağır metalleri ortamda yaygın olarak var olan ve genellikle bitkiler için zararlı olarak kabul edilen ağır metallerdir. Nikel ise, bitkiler için hem besleyici hem de toksik bir ağır metaldir. Kuru ağırlığı 0,05-10 mgkg⁻¹ aralığında olduğunda bitki türlerinin çoğunluğu normal büyümesini devam ettirebilmektedir (Zhang vd., 2020).

Nikel elementi ilk olarak 1975 yılında, birçok bitki türünde mevcut olan üreaz enzim bileşeni olarak keşfedilmiştir. Yerkabuğundaki ağır metallere bakıldığında Ni elementinin oldukça önemli bir yeri bulunmaktadır. Bitki büyümesi için gerekli olan mikro besin elementidir ve yüksek bitkilerde azot metabolizması için gerekli olan üreaz enziminin bir bileşenidir (Takishima vd., 1988).

Nikel ve nikel bileşiklerinin ticari ve endüstriyel alanlarda kullanılması nedeniyle çevrede Ni konsantrasyonu artış göstermektedir. Daha yüksek konsantrasyonlarda Ni fitotoksik etki göstermektedir. Endüstriyel atıkların tarım alanlarına uygulanması eser elementlerin çevreye karışmasına katkıda bulunmaktadır. Bu antropojenik salınım nedeniyle toprakta nikel seviyesi artmakta ve bitkilerde olduğu kadar besin zincirinde de nikel konsantrasyonunun artışına sebep olmaktadır. Nikel, tohum ve vejetatif dokularda birikmektedir ve insan sağlığı için de bir tehdit oluşturmaktadır (Hayyat vd., 2020).

1.2.1.1. Toprakta nikel kirliliği

Ağır metaller, toprakta, suda ve tozda birikerek bitkiler ve hayvanlar için ciddi bir tehdit oluşturduğundan çevre için potansiyel olarak tehlikelidir. Tarım arazilerinin ekili toprağı ağır metaller tarafından kirlenmeye maruz kaldığında, bu kirleticiler kolayca çevredeki su ortamına aktarılabilir. Bunlara hem yüzey hem de yeraltı suyu dahildir ve sonunda tarım ürünlerine zarar verebilir ve gıda zincirleri yoluyla insan sağlığını tehdit edebilir. Araştırma çalışmaları, toprakta bulunan ağır metallerin trafik taşımacılığı (Cu, Zn, Cr vb.), kömür yakıtları (Hg, As), gübre ve herbisit (Cu ve Cd) ve kentsel yapılaşma (Mn, Co, Ni, vb.) gibi çeşitli kaynaklara sahip olduğunu göstermiştir (Mamat vd., 2020).

Nikel, diğ er ağır metaller arasında özel bir yere sahip olan, yer kabuğ unda en bol bulunan 22. elementtir. Nikel ve nikel bileş ikleri, endüstriyel ve ticari olarak birçok kullanıma sahiptir ve endüstrilerin ilerlemesi, kirleticilerin artan emisyonları ile çevreyi etkilemektedir. Esas olarak nikelin etkisi, endüstriyel alanlara yakın arazilerde veya kanalizasyon ve ç amur gibi atıkların olduğu alanlarda gözlemlenmektedir. Nikelin toprakta varlığı, çökelti formunda, kompleksleş miş veya katyon değı ş im noktalarında veya organik katyon yüzeylerinde emilmiş şekilde ve ayrıca serbest iyon veya toprak çözeltilisinde, kompleks ş elatlı metal şeklinde farklı formlarda karş ımıza çıkmaktadır (Hayyat vd., 2020).

1.2.1.2. Bitkide nikel toksisitesi

Bitkilerde nikelin yeniden dağıtılması ve emilmesi, katyon yoluyla ve/veya metal-ligandın karmaş ık taşıma sistemi ile gerçekleşmektedir. Ni daha yüksek konsantrasyonda güçlü bir şekilde fitotoksik hale gelmektedir. Ni, bazı bitkilerde SOD (süperoksit dismutaz), APX (Askorbat peroksitler) ve CAT (Katalaz) gibi antioksidan enzimlerin aktivitesinde değı ş ikliğ e neden olmakta ve genellikle bitkide büyümenin engellenmesiyle sonuçlanmaktadır. Bunlar sonucunda bitkide kloroza, nekroza ve solmaya neden olmaktadır. Nikel ile bitkilerde metabolik reaksiyon güçlü bir şekilde etkilenir ve onunla üretilen Reaktif Oksijen Türleri (ROS'ler) oksidatif strese neden olabilir. Ni'nin yüksek düzeyde kullanılması, toleranssız bitkilerde kök meristem hücre bölünmesinin baskılanmasına ve bitkinin büyümesinin azalmasına neden olur. Yapılan araştırmalar, fotosentez ve solunumun nikelden olumsuz etkilendiğini göstermiştir (Hayyat vd., 2020).

Nikel ayrıca üreaz, glioksalaz I, süperoksit dismutaz, [NiFe]-hidrojenaz, karbon monoksit dehidrojenaz ve asetil-koenzim A gibi enzimlerin bir bileş enidir. Nikel, bitkinin üre nitrojeni biyoyararlı bir forma, yani amonyak, metabolize etmesine yardımcı olur ve bu da geliş miş bitki büyümesine yol açar (Awasthi vd., 2022).

Bitki türlerinde monokot ve dikot Ni'nin yüksek düzeyde alınması su içeriğ inin azalmasına neden olmaktadır. Bitkilerde toksisite mekanizmasını açığ a çıkarmayı engelleyen karmaş ık elektronik kimyası nedeniyle nikel çok fazla ilgi gösterilmemektedir. Nikelin kirliliğ i, fitoremediasyona yönelik araştırmaları gerektiren ciddi bir çevresel kaygıdır. Ağ ır metaller birincil etkileri olan stoma kapanmasından sorumludur ve terlemede azalmaya neden olmaktadır. Nem içeriğindeki kayıp ve stomaların kapanması sonucunda fotosentez için toksisiteye neden olmaktadır (Seregin ve Ivanov, 2001).

Nikel hiperakümülatörlerde nikelin toleransını bilmek için hem biyokimyasal hem de moleküler seviyelerin ayrıntılarını bilmek için çalışmalara ihtiyaç vardır. Ni'nin bitkilerde birçok faydalı etkisi vardır; üreaz aktivitesinde bulunur ve hidroponik çalışmalarda N kullanım verimliliğinin iyileştirilmesine katkıda bulunur. Toprakta Ni noksanlığı nadiren bildirilir, ancak nikel noksanlığının bitki büyümesi, azot metabolizması ve demir alımı üzerinde olumsuz etkileri olduğu gibi hastalıklara karşı direnç üzerinde de etkisi vardır. Bitkinin düzgün büyümesi ve gelişmesi için nikel esastır, bitkinin tohumun çimlenmesinden verimliliğe kadar farklı fizyolojik ve morfolojik fonksiyonları yerine getirebilmesi için yeterli düzeyde Ni gereklidir. Optimum Ni temini olmadan bitkinin yaşam döngüsü tamamlanamaz (Hayyat vd., 2020).

Nikel tipik olarak toprak yüzeyinde bir araya toplanır ve toprak profili boyunca topluca eşit olarak yayılır. Fazla uygulanması tohumda depolanan gıda maddesinin bozulmasına neden olur ve tohumun çimlenmesini engeller (Pandey ve Sharma, 2002).

Ni elementinin yüksek düzeyde toksik olması nedeniyle birçok fizyolojik ve biyokimyasal işlemi etkilemektedir. Solunum, kloroz ve fotosentezin engellenmesi çok yaygın semptomlardır. Ghasemi vd. (2012), Ni'nin membran hasarına ve hücre ölümüne neden olduğu, nikel konsantrasyonu 100 µmol'e yükseltildiğinde, 200 µmol Ni'de artan klorofil a içeriğinin azaldığı sonucuna varmıştır. Ancak klorofil b ve karotenoid içeriklerinde önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Ni, fotosentez üzerinde olumsuz etkiye sahiptir ve herhangi bir faktöre atfedilmemiştir ve kloroplastın yapısını, fotosentetik proteinleri ve klorofil içeriğini etkileyen farklı düzeylerde işlenerek yapısal hasara neden olmaktadır ve membran özelliklerinde olumsuz etkiye sahiptir.

1.2.2. Çinko

Çinko (Zn) IIB grubu geçiş elementidir ve adı simyacı Paracelsus (İsviçreli Hekim) tarafından Almanca 'Zinke' kelimesinden esinlenerek verilmiştir. Çinko (Zn) doğada beş kararlı izotopik formda bulunur: ⁶⁴Zn (%48,63), ⁶⁶Zn (%27,90), ⁶⁸Zn (%18,75), ⁶⁷Zn (%4,90) ve ⁷⁰Zn (%0,62). Bitkilerde, Zn'nin hem hafif hem de ağır izotopik zenginleşmesi sırasıyla sürgünlerde ve köklerde tanımlanmıştır. Zn, kimyasal olarak magnezyuma (Mg) benzerdir, her ikisi de benzer boyuta ve +2 oksidasyon durumuna sahiptir. Zn²⁺ iyonları, proteinlerde/enzimlerde amino asit kalıntılarının nitrojen (N), oksijen (O) veya sülfür (S) için yüksek bağlanma afinitelerine sahiptir (Leuci vd., 2020).

Çinko gibi elementler esasen bitkiler tarafından küçük miktarlarda gereklidir. Temel elementler, büyüme hormonu üretimi, boğumlar arası uzama ve çeşitli enzimatik aktiviteler gibi çeşitli süreçlerde önemli roller oynamaktadır. Yararlı elementler üzerine yapılan araştırmalar, bitki büyüme ve gelişmesinde rollerini kanıtlamıştır. Ek olarak, bu tür faydalı ve ultra eser elementlerin optimum bir şekilde sağlanması, bitkinin abiyotik ve biyotik streslerle mücadele etmelerine yardımcı olmaktadır (Awasthi vd., 2022).

Toprakların ağır metal kontaminasyonu, ilerleyen zamanda tarım sektörlerine büyük tehditler getirebileceği düşünülmektedir. Ağır metallerin topraktan ürüne transfer mekanizması, insanlara doğrudan dönüşüm yolu olarak kabul edilmektedir. Metalle kirlenmiş toprakta yetişen gıda ürünleri, gıda kalitesini ve güvenliğini etkileyen yüksek miktarlarda metalleri kolayca alabilmekte ve biriktirebilmektedir (Chaplygin vd., 2020). Zn kirliliğinin ana kaynakları arasında çinko madenciliği, eritme, makine imalatı, çinko kaplama, enstrümantasyon, organik sentez, kağıt yapımı ve diğer endüstriyel emisyonlar, otomobil lastiği aşınması ve yanmış kömür tozu, çinko ve bileşikleri içeren kurum ve endüstriyel çalışma alanlarının atık suları bulunur. Ayrıca, Zn havayı, suyu ve toprağı kirlettiği için Zn kirliliğinin kapsamı geniştir. Ancak toprak kirliliği hava kirliliğinden farklıdır. Toprakta biriken zararlı maddeler bir kez oluştuktan sonra suya, havaya ve bitkilere geçer ve sonunda insan vücuduna girerek uzun süreli etkilere neden olmaktadır (Xiong vd., 2022).

Çinko (Zn), karasal ortamlarda toprağın doğal bir bileşenidir ve çok sayıda metabolik yolda zorunlu işlevleri yerine getirdiği için bitki büyümesi için hayati bir elementtir. Bununla birlikte, topraklardaki potansiyel olarak zararlı Zn seviyeleri, bitkilerde büyümenin azalması, fotosentetik ve solunum hızı, dengesiz mineral beslenmesi ve artan reaktif oksijen türlerinin oluşumu gibi çeşitli değişikliklere neden olabilir. Zn, kayaların aşınması, orman yangınları, volkanlar, madencilik ve eritme faaliyetleri, gübre, kanalizasyon çamuru ve fosfatlı gübreler gibi çeşitli kaynaklardan toprağı girer. Çevresel açıdan yükselen alarmin yanı sıra, bitkilerde Zn esaslılığı ile toksisite arasındaki dar boşluk, bilim camiasının dikkatini bunun bitkiler üzerindeki etkilerine ve tarımsal sürdürülebilirlikteki önemli rolüne çekmiştir. Bu nedenle, yüksek Zn seviyeleri tarafından bozulan çeşitli fizyolojik ve biyokimyasal fonksiyonlar, onun alım ve taşıma mekanizmaları ve ayrıca bitkilerdeki fazla Zn homeostazının moleküler yönleri hakkındaki en son güncellemeler hakkında çalışmalar devam etmektedir (Kaur ve Garg, 2021; Shephard vd., 2020).

Çinko toksisitesi, toleransı ve ekolojik önemi ile ilgili sorunlar son yıllarda araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Çinko toksisitesine maruz kalan bitki genotiplerinin farklı toleransı, bitkilerde çinko toleransı anlayışımızı zenginleştirmek için umut verici bir yaklaşımdır. Fitotoksosite, çinko alımı, taşınması, toleransı ve bunun karakterizasyonu ile ilgili fizyolojik ve biyokimyasal bilgiler de tartışılmaktadır. Çinko toksisitesi nedeniyle kök uç hücrelerinin çekirdeğinde büyük değişiklik görülmüştür. Kromatin materyali yüksek oranda yoğunlaşmış ve kortikal hücrelerin bir kısmı 7.5 mM çinko varlığında nükleer membranda bozulma ve genişleme göstermiştir. Sitoplazma yapısız hale gelirken, hücre organellerinin parçalanması ve vakuollerin gelişimi de gözlemlenmiştir. Çinko varlığında, nükleoli sayısı da artmıştır ve ağır metal toleransında yer alan yeni proteinin senteziyle sonuçlanmıştır (Rout ve Das, 2009).

Çinko, bitki büyümesi ve gelişiminin birçok yönüne dahil olan temel bir mikro elementtir. Çoğunlukla insan faaliyetlerinden kaynaklanan anormal çinko miktarları flora, fauna ve insanlar için toksik olabilir. Bitkilerde fazla çinko morfolojik, biyokimyasal ve fizyolojik bozukluklara neden olur. Bazı bitkiler, dokularında çinkoya direnme ve hatta çinko biriktirme yeteneğine sahiptir. Bugüne kadar 28 bitki türü çinko hiperakümülatörleri olarak tanımlanmıştır. Bu bitkiler, moleküler Zn hiperakümülyasyon mekanizmalarının aktivasyonundan kaynaklanan çeşitli morfolojik, fizyolojik ve biyokimyasal adaptasyonlar sergiler. Bu adaptasyonlar türler arasında ve popülasyonlar içinde değişebilmektedir (Balafrej vd., 2020).

1.2.2.1. Toprakta çinko kirliliği

Ağır metallerin kirlilik değerlendirilmesi, kaynak dağılımı, sağlık riski ve ekolojik riski üzerine yapılan çalışmalar, kirlilik seviyelerinin analizi ve ilgili çevre koruma politikalarının formüle edilmesi için önemli referanslar sağlamaktadır. Esas olarak ağır metaller için doğal kaynaklar ve antropojenik kaynaklar da dahil olmak üzere, aralarında doğal kaynakların çoğunlukla kabuk bileşenleri (kuvars, kil mineralleri, oksitler, karbonatlar, vb.) rüzgar erozyonu ve toz fırtınaları gibi doğal olaylar tarafından üretilen mineral tozlarda ve antropojenik kaynaklar esas olarak endüstriyel emisyonlardan, ulaşımdan, konut ısıtmasından, gübre ve pestisit kullanımından vb. gelmektedir (Luo vd., 2022; Silva dos Santos vd., 2022).

Çinko (Zn) birinci tehlike sınıfıyla ilgili endüstriyel emisyonlarda en yaygın ağır metallerden biridir. Cd ve Zn bitkiler üzerinde çoklu toksik etkiye sahip en toksik elementlerdir.

Bu elementler benzer jeokimyasal davranış sergilerler ve bitkilerdeki fizyolojik süreçlerde birbirinin yerine geçen aditif özelliklere sahiptirler. Örneğin, Cd'nin birçok hayati enzimatik reaksiyonda Zn'nin yerini alabildiğine ve bunların parçalanmasına veya inhibisyonuna yol açtığına dair kanıtlar vardır. Cd-Zn etkileşim mekanizmalarının, bitki habitatındaki konsantrasyonlarının oranı, toprağın fiziko-kimyasal özellikleri ve emici bitkilerin biyolojik özellikleri ile kontrol edildiği varsayılmaktadır. Birbirine bağlı fiziko-kimyasal ve biyolojik faktörler, metal iyonlarının toprak çözeltisine salınmasını etkiler ve bu nedenle bitkilerin onları topraktan alma kapasiteleri artar (Chaplygin vd., 2020).

Yoğun antropojenik aktiviteye maruz kalan birçok alanda kadmiyum (Cd), kurşun (Pb) ve çinko (Zn) gibi ağır metallerin içeriğinde artış vardır. Toprağın Cd, Pb ve Zn ile kirlenmesi, toprak kalitesi için yüksek tehditler oluşturmaktadır. Bakterilerin ve diğer toprak mikroorganizmalarının metabolik aktivitesini önemli ölçüde azaltabilir, bitki gelişimini bozabilir ve bu nedenle ciddi bir çevre sorununa yol açmakla birlikte insanlar ve ekosistemler için risk oluşturabilir.

Fitoremediasyon, topraktaki ağır metallerin nötralizasyonunda çok önemli bir rol oynamaktadır. Toprakta yüksek konsantrasyonlarda bulunan tüm eser elementler arasında Zn en hareketli olanıdır ve ayrıca bitkiler ve toprak organizmaları için toksik bir elementtir (Rolka ve Wyszowski, 2021).

Çinko ile toprak kirliliği ve nötralize edici maddelerin uygulanması, eser elementlerin toprak içeriğini önemli ölçüde etkilemektedir. Wyszowski vd. (2017), gerçekleştirdiği bir çalışmada, nötralize edici maddeler içermeyen uygulamalarda, çinko ile artan toprak kirliliği, kontrol uygulamasına (Zn'siz) kıyasla topraktaki çinko ve kurşun içeriğinde artışa, ancak nikel, bakır ve kadmiyum içeriğinde azalmaya neden olduğu görülmüştür. Ayrıca, toprağa uygulanan maddelerden bentonit ve kompost, özellikle çinko ile en ciddi şekilde kirlenmiş uygulamalarda çinko ve kurşun içeriğini azaltmıştır.

1.2.2.2. Bitkide çinko toksisitesi

Çinko, birçok fizyolojik fonksiyonda yer alan bir bitki mikro besin maddesidir ve yetersiz temini mahsul verimini düşürmektedir. Çinko noksanlığı en yaygın mikro besin noksanlığı sorunudur, hemen hemen tüm mahsullerde ve kalkerli, kumlu topraklarda, fosfor ve silisyum oranı yüksek topraklarda noksan olması beklenir. Çinko eksiklikleri bitkiyi, bitki

büyümelerini engelleyerek, kardeş sayısını azaltarak, kloroz ve daha küçük yapraklarla, mahsul olgunluk süresini uzatarak, başakçık sterilitesi ve hasat edilen ürünlerin kalitesini düşürerek etkileyebilmektedir (Sadeghzadeh, 2013).

Sağlıklı bitkilerde normal Zn^{2+} içeriği 25 ila 150 $mgkg^{-1}$ arasındadır. Bir bitkinin çinko içeriği 400 mg/kg 'ı aştığında, bitkilerde yaprak lekeleri gibi gözle görünebilir semptomlar ortaya çıkmaktadır. Öte yandan, 150 ile 400 $mgkg^{-1}$ arasındaki bir Zn^{2+} içeriği, bitkide morfolojik olarak sadece küçük değişiklikler göstermektedir. Çinko ile kirlenmiş bitkilerde klorofil, su, şeker ve karotenoid içeriği önemli ölçüde azalmaktadır, ancak selüloz içeriğinin artış gösterdiği bildirilmiştir (Zhao vd., 2021).

Çevresel açıdan artan alarmın yanı sıra, bitkilerde Zn esaslılığı ile toksisite arasındaki dar boşluk, bilim camiasının dikkatini bunun bitkiler üzerindeki etkilerine ve tarımsal sürdürülebilirlikteki önemli rolüne çekmiştir. Kirli tarım alanlarında, 3000 $mgkg^{-1}$ Zn kuru topraktan (dry soil/ DS) fazla toprakta toplam Zn konsantrasyonları rapor edilmiştir ve bu da küresel tarımsal üretkenliğe önemli bir engel teşkil etmektedir. İnsan eylemleri, eritme ve madencilik yoluyla topraklar yaygın olarak Zn ağır metali ile kirlenmiştir. Toprağa ek insan yapımı Zn girişi kaynakları, fosil yakıtların yakılmasından, fosfatlı gübrelere (genellikle 50-1450 $\mu g Zn g^{-1}$), gübreden (15-250 $\mu g Zn g^{-1}$), kireçtaşından (10-450 $\mu g Zn g^{-1}$), mantar öldürücülerden (fungisit), Zn kaplı yüzey parçaları ve kalkerli maddelerden (10-450 $\mu g Zn g^{-1}$) oluşmaktadır (Kaur ve Garg, 2021)

Bitkilerde meydana gelen çimlenme gücündeki ve biyokütledeki azalma, bitkilerin Zn toksisitesine karşı en belirgin fizyolojik tepkileridir ve sonuçta verim ve ürün kalitesinin düşmesi ile sonuçlanmaktadır (Garg ve Singh, 2018). Bir çalışmada aşırı Zn konsantrasyonunun, amilazların aktivitesini ve şekerlerin embriyo eksenine transferini etkilediğini, bunun da *Cicer arietinum*'da bitkisinde çimlenen tohumların oranının azalmasına neden olduğunu bildirilmiştir (Sharma vd., 2010).

Bu nedenle, bu derleme, yüksek Zn seviyeleri tarafından bozulan çeşitli fizyolojik ve biyokimyasal fonksiyonlar, onun alım ve taşıma mekanizmaları ve ayrıca bitkilerdeki fazla Zn homeostazının moleküler yönleri hakkındaki en son güncellemelere odaklanmaktadır. Ayrıca, bu derleme, bitkilerde Zn toksisitesinin mekanizmalarını anlamaya ve konuyla ilgili gelecekteki araştırmaları yönlendirmeye yönelik yeni bakış açıları sunmaya çalışmaktadır. Bulgular ayrıca,

yetiştiriciler için Zn kirliliğine toleransı arttırmak için büyük önem taşıyacak olan Zn stresıyla başa çıkmak için bitkiler tarafından benimsenen çeşitli mekanizmalara ışık tutacaktır.

1.3. Ağır Metal Kirliliğinin Gideriminde Hiperakümülatör Bitkilerin Rolü

1.3.1. Karalahana (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*)

Genellikle *Cruciferae* veya hardal ailesi olarak adlandırılan *Brassicaceae* familyası, yaklaşık 341 cins ve 3977 türden oluşan, Antarktika hariç, dünya çapında dağılmış bir monofiletik grubu temsil etmektedir. Ailenin genetik çeşitliliğini daha detaylı inceleyen yeni yöntemlerin geliştirilmesine paralel olarak cins ve tür sayısı sıklıkla değişmektedir. *B. oleracea* morfolojisine ve diğer özelliklerine göre çeşitli çeşit grupları (*Acephala*, *Botrytis*, *Capitata* grubu, vb.) içermektedir. Bu gruplar arasında *Acephala* grubuna ait bitkiler arasında lahana ve karalahana ortak adlarına sahip yapraklı, başsız lahana eşitleri yer almaktadır. Karalahana (*B.oleracea* L. var. *acephala*) tuz, kuraklık ve dona dayanıklılık gibi çevresel streslere karşı iyi toleransı ve dayanıklılığı ile bilinmektedir (Ljubej vd., 2021).

Brassicaceae familyasının çođu üyesi kuzey ılıman bölgede bulunmaktadır. *Brassica oleracea* L. var. *acephala* (şekil 1.1), *Brassicaceae* familyasının bir üyesidir. Nörolojik korumaya katkıda bulunmaktadır. Ayrıca birçok kanser formunun ve kalp hastalılığının azalmasına da faydalı olduğu bilinmektedir. Bu türün evcilleştirilmesi, karnabahar, brokoli, beyaz lahana, Brüksel lahanası, alabaşlar ve yaprak lahana gibi çok çeşitli morfolojik türlerle sonuçlanmıştır (Żyła vd., 2021).



Şekil.1.1. Karalahana (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) bitkisi (Orijinal, 2021)

100 g'lık tek bir taze organik karalahana porsiyonu; 43-438 mg Ca; 11–60 mg Mg; 28-102 mg P; 0,5-3,3 mg Fe; 0,3-1,3 mg Mn; 1-136 µg Cu; ve 0-35µg Se mikro besin elementlerini içerebilmektedir ve ayrıca basit şekerler 6-1507 µmg rafinoz ve 0.8-169 µmg fruktooligosakkaritler, 5.7-8.7 µg hemiselüloz dahil olmak üzere toplam 77-763 mg prebiyotik karbonhidratlar ve 0-90 mg lignin bulundurmaktadır. Taze organik karalahana, düşük ila orta düzeyde protein konsantrasyonuna sahiptir (1.3–6.0 g/100 g) (Thavarajah vd., 2021).

Karalahana (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) ürünleri et ürünlerindeki proteine eş değer çok miktarda protein (%4,3), 9 esansiyel amino asidin tümünü (Val, His, Leu, Lys, Trp vb.) ve 11 esansiyel olmayan amino asiti içermektedir. Taze karalahana yapraklarında toplam amino asit içeriğinde glutamik asit (%12), prolin (%12) ve aspartik asit (%10) baskındır. Ayrıca yağ asidi omega 3, vitaminler (A, C, K, B ve benzeri vitaminler), kolay sindirilebilir Ca (120-150 mg) elementi ve Mg (34-47 mg) elementi bakımından da zengindir. İçeriğinde Zn, K, P, Na, Fe, Se, Mn ve Cu gibi diğer mineral maddeleri de bulundurmaktadır (Daryadar vd., 2019).

1.3.1.1. Karalahana (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) yetiştiriciliği

Karalahana büyümesi ve glukozinolatların oluşumu, mahsul genetik faktörlerine, doku tipine, mahsul sağlığına, tarımsal faktörlere (su temini ve gübreleme), yetiştirme tesislerine (fabrika, sera ve açık alan) ve sıcaklık, bağıl nem, karbondioksit (CO₂), ışık türü, yoğunluk, fotoperiyot ve yetiştirme yöntemleri gibi çevresel faktörlere bağlıdır. Fiziksel gelişim aşaması, aynı zamanda, lahanadaki glukozinolatların bileşiminin önemli bir belirleyicisidir (Chowdhury vd., 2021; Reda vd., 2021).

Karalahana geleneksel yöntemlerle açık alanlarda kolaylıkla yetiştirilebilse de iklim ve tarla koşullarına son derece duyarlı oldukları için büyüme ve glukozinolat içeriğinin kalitesi ve miktarı sağlanamamaktadır. Son yıllarda çiftçiler, büyüme ortamını ayarlama ve hızlı ve sürdürülebilir büyüme oranları, fonksiyonel bileşen açısından zengin ve yüksek kaliteli verim elde etme olasılığı nedeniyle bitki üretim tesisleri ve seralar gibi korunaklı ve kontrollü yetiştirme tesislerinde karalahana üretmeye başlamışlardır (Chowdhury vd., 2021).

Brassica taksonları doğal olarak bulunmakta ve Türkiye'de de yetiştirilmektedir. Ekonomik önemi nedeniyle, ülkenin belirli bölgelerinde çeşitli çeşitler yaygın olarak yetiştirilmektedir. Cins, karakteristik turpgillerden çiçeklere ve glukozinolatlara sahip otsu bitkiler olarak sınırlandırılmıştır. *Brassica*, Türkiye'de 5 yerli ve 4 kültüre alınmış tür ve çeşitli çeşitler ile temsil edilmektedir (Dönmez vd., 2021). Çizelge 1.3'te karalahana bitkisinin Türkiye'deki üretim miktarı ve payı verilmiştir.

Çizelge 1.3. Karalahana bitkisi 2019-2021 yıllarına ait üretim verileri (Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), 2021)

Bitki	Üretim (ton)					
	2019	Pay (%)	2020	Pay(%)	2021	Pay(%)
Karalahana (<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>acephala</i>)	56 726	0,2	56 100	0,2	59 400	0,2

1.3.1.2. İklim ve toprak istekleri

Karalahana için mahsul yönetimi, tüm *Brassica* mahsullerine benzemektedir. *Brassicaceae* dışındaki ürünlerle rotasyon yapılması ve 3-4 yılda bir tekrar aynı toprağa ekilmesi önerilir. Karalahana çok çeşitli topraklarda yetiştirilebilse de, en iyi ürünler düşük asitli veya nötr (pH 6-6.5), derin, tın tekstürlü ve uygun su ve hava kapasitesine sahip

topraklarda elde edilebilmektedir. *Brassica* bitkilerinin besin alımı için yüksek bir talebi vardır. Bu nedenle, temel toprak hazırlığı, yüksek miktarda organik gübrenin dahil edilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Karalahana bitkileri, bitki dokularında nitrat birikimi ve çevre kirliliği ile ilgili endişelerin vurgulanması gerekmesine rağmen, vejetatif büyümeyi iyileştirerek ve erken budamayı geciktirerek azotlu gübre uygulamasına olumlu yanıt vermektedir. Bu tür bitkiler daha çok tohumdan üretilmektedir. Fideler güçlü kazık kökler ve birkaç güçlü yan kök geliştirmektedir (Šamec vd, 2019).

1.3.1.3. Ekim zamanı ve ekim işlemleri

Karalahana (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*), 0 ila 13°C arasında değişen ve optimum sıcaklığı 6°C olan bir vernalizasyon periyodu gerektirmektedir. Vernalizasyon için gereken maruziyet süresi genellikle 3-5 haftadır. Ekimden kısa bir süre sonra bitkiler uzun ve ince tohum kabukları üretmektedir (Reda vd., 2021). Daha sıcak iklimlerde, fideler normalde yaz sonunda veya sonbahar başında ekilir. Daha yüksek dona dayanıklılığa ve düşük sıcaklıkların neden olduğu vernalizasyondan sonra erken budama direncine sahip çeşitler, tüm kış boyunca yenilebilir yapraklar üretmektedir (Šamec vd., 2019).

Karalahana, genellikle böcek tozlaşmasına dayanan çapraz tozlanan bir türdür. Kendi içinde yetiştirilen lahana, verim ve yaprak boyutunda önemli düşümlere maruz kalmaktadır. En iyi sonuçlar için, *Brassica* bitkilerinin tozlaşması, çiçeğin açık olduğu ve stigmaların alıcı olduğu 3 gün boyunca gerçekleşmelidir; silikada maksimum sayıda tohum üretmek için çoklu tozlaşma gerekebilir. Elle tozlaşma yaparken, çapraz tozlaşma yoluyla bulaşmayı önlemek için erkek organ hadım edilmektedir. Stigmaların koyulaşması, bazı lahana çeşitlerinde başarılı tozlaşma olarak not edilebilir.

Tohumları sonbaharda çok geç veya ilkbaharda çok erken ekmek, erken çiçeklenmeye veya düşük sıcaklıkların tetiklediği sürgünlere yol açabilmektedir (Brandenberger vd., 2017). Sonbahar mevsimi için, karalahana ilk dondan yaklaşık 12-14 hafta önce iç mekanda başlatılmalı ve 4 hafta sonra tarlaya ekilmelidir. Tohumlar 2,5 cm aralıklarla yerleştirilmeli ve 0,5-1 cm derinliğe ekilmelidir; fideler aktarıldırken 30-40 cm aralıklarla yerleştirilmelidir. Tohum 4-7 gün içinde çimlenmektedir. Tohumdan hasata kadar olan olgunluk, yaprak boyutuna göre değerlendirilebilse de değişiklik göstermektedir (Reda vd., 2021).

1.3.1.4. Hasat ve depolama

Yapraklı mahsullerin yetiştirilmesinde yabancı ot kontrolü esastır. İşlenmek üzere yetiştirilen bu mahsuller, hızlı büyüyen yabancı otlar tarafından kolayca gölgelenmekte ve rekabet ortamı oluşmaktadır. Bu durum mahsul kalitesini ve verimini azaltabilmektedir. Kültürel yabancı ot kontrolü, daha az yabancı ot baskısı olan tarlaların seçilmesini, sığ ekimi ve mahsulün yüksek kaliteli tohum, uygun tohumlama ve doğurganlıkla iyi bir başlangıç yapmasını içermektedir (Brandenberger vd., 2017). Karalahananın tohum kabukları açık kahverengiye döndüklerinde, kurumaya ve parçalanmaya zamanları olmadan hasat edilmelidir. Saplar yere yakın kesilmeli, ters çevrilmeli ve kağıt torbalarda kuru bir ortamda saklanmalıdır (Reda vd., 2021). Ayrıca bazı çeşitler ilkbaharda ekilebilmekte ve hasat yaz ve sonbaharda gerçekleşmektedir. Bu nedenle, tüm yıl boyunca piyasada taze bulunabilir. Karalahanadan dekara 2 ila 8 ton arasında verim elde edilmektedir (Šamec vd., 2019).

1.3.2. Nane (*Mentha piperita* L.)

Mentha piperita L. (nane) (Şekil 1.2) dünya çapında en popüler ve yaygın olarak tüketilen tıbbi aromatik bitki türlerinden biridir ve tıpta olduğu kadar endüstriyel ve mutfak alanlarında da kullanılmaktadır. *M. piperita*'nın önemi, esas olarak uçucu yağlarından ve polifenollerinden kaynaklanmaktadır. *M. piperita* antibakteriyel, antifungal ve antioksidan özelliklere sahiptir ve uçucu yağı mentol (%36.02), menton (%24.56), mentil asetat (%8,95) ve mentofuran (%6,88) içermektedir. *Mentha* türleri, eski çağlardan beri geleneksel tıpta çay olarak ve farklı bitki formülasyonlarında krem, parfüm, sabun vb. yapımında da içerik olarak kullanılmaktadır (Desam vd., 2019). *Mentha*, bitkisinden elde edilen yağ daha çok diş macunlarında aroma verici olarak, turşu ve baharatlarda, sakız ve şekerlemelerde, sabunlarda ve soslarda gıda aroması olarak kullanılmaktadır. Yağ doğrudan parfümlerde de kullanılmaktadır. Kokular, sabunlar, tıraş sonrası losyonlar ve kolonyalar gibi kozmetikler de bu yağı içerir (Gholamipourfard vd., 2021).



Şekil 1.2. Nane (*Mentha piperita* L.) bitkisi (Orijinal,2021)

Nane (*Mentha piperita* L.), Avrupa'ya özgü, kuzey ABD ve Kanada'da doğallaştırılmış ve dünyanın birçok yerinde yetiştirilen çok yıllık bir bitkidir. Nane (*Mentha piperita* L.); *Mentha spicata* L. ve su nanesinin (*Mentha aquatica* L.) bir melezidir. Nane bitkisi özellikle su tutma kapasitesi yüksek topraklarda iyi yetişmektedir. *Mentha* cinsi, yaklaşık 25-30 türden oluşan *Lamiaceae* familyasına aittir. *Mentha piperita* L., en popüler tek bileşenli bitki çayları arasındadır. Nanenin halk ilacı olarak veya alternatif tıbbi tedavide destekleyici faydaları ve kullanımları şunları içermektedir:

- safra yolları bozuklukları,
- hazımsızlık,
- enterit,
- gaz, gastrit,
- öksürük ve bronşit
- ağız mukozası ve boğaz iltihabı
- bağırsak kolik
- safra kanalı ve safra kesesi
- gastrointestinal (GI) yol spazmları

Dünya nüfusunun yaklaşık %80'i şu anda birincil sağlık ihtiyaçları için yerli veya geleneksel ilaçlara bağımlıdır ve bu tedavinin çoğu, genellikle sulu çözeltilerde bitki özlerinin kullanımını içermektedir. İlaç olarak kullanılan bitki bazlı gıdalardan hiçbiri grup olarak bitkisel ilaçlardan daha fazla ilgi görmemiştir. Bitkinin tıbbi değeri, insan vücudu üzerinde kesin bir fizyolojik etki yaratan bazı kimyasal maddelerde yatmaktadır (Gadaka vd., 2021).

1.3.2.1. Nane (*Mentha piperita* L.) yetiştiriciliği

Nane, Avrupa ve Orta Doğu'ya özgü bir bitki olarak bilinmekle birlikte günümüzde yaygın olarak ABD, Çin, Hindistan, Macaristan, Fransa, İran ve İtalya'da da yetiştirilmektedir. Mevcut *M. piperita* üretimi dünyada yılda 4000 metrik tondan fazladır (Gholamipourfard vd., 2021). Türkiye' deki üretim payı ise Çizelge 1.4'te verilmiştir.

Çizelge 1.4. Nane bitkisi 2019-2021 yıllarına ait üretim verileri (TÜİK,2021)

Bitki	Üretim (ton)					
	2019	Pay(%)	2020	Pay(%)	2021	Pay(%)
Nane (<i>Mentha piperita</i>)	16 011	0,1	23 471	0,1	25 300	0,1

1.3.2.2. İklim ve toprak istekleri

Nane bitkisi hem tropikal hem de subtropikal bölgelerde yetiştirilebilir. Kök çürümesine neden olan nemli kışların olduğu bölgelerde iyi gelişmez. Yaklaşık 20–25 °C'lik bir sıcaklık vejetatif büyümeyi destekler, ancak uçucu yağ ve mentol konsantrasyonlarının daha yüksek bir sıcaklıkta (30 °C) arttığı bildirilmiştir. Uzun gün uzunlukları ve serin geceler gerektirir. Nane için en iyi topraklar derin ve humus bakımından zengin, su tutma kapasitesi yüksek topraklardır. Toprağın pH'ı 6.0 ile 7.5 arasında tutulmalıdır ve bitkinin yayılması genel olarak yer altı sürgünleri (anaç veya stolon) tarafından gerçekleştirilmektedir (Salehi vd., 2018). Bitkinin beslenmesinde özellikle N, P ve mikro elementler (Fe, Mn, Zn), nane esansiyel yağının kalitesini iyileştirmektedir. Uçucu yağlar terpenoid bileşenlerden oluşur, bu nedenle gerekli Asetil-CoA, NADPH ve ATP ile N ve P gibi mineral besinlerin mevcudiyeti bu bileşiklerin biyosentezi için gereklidir (Gholamipourfard vd., 2021).

1.3.2.3. Ekim zamanı ve ekim işlemleri

Dikim sırasında hafif sağanak yağışlar ve hasat aşamasında güneşli günler, yüksek verim ve kaliteli yaprak için en iyisidir. Gübreyi toprakla birleştirmek için son sürme sırasında yaklaşık 25-30 ton/ha çiftlik gübresi (kompost) temel gübreleme olarak uygulanmaktadır. Güneş keneviri (*Crotalaria juncea* L.) gibi yeşil gübre ekimden önce kullanılmalıdır. Yükseltilmiş yataklar, nane (*Mentha piperita* L.) yetiştirilmenin en iyi ve en ekonomik yoludur. 1 hektarlık iyi yetiştirilmiş bitki materyalinin 7 ila 10 hektarlık bir ekim alanı sağlayabileceği tahmin edilmektedir. Dikim malzemeleri küçük parçalar halinde kesilerek, elle veya mekanik olarak sıralar arası mesafe 45-60 cm olacak şekilde yaklaşık 7 ila 10 cm derinliğinde sığ oluklara ekilir. Arsa ekimden hemen sonra sulamaya ihtiyaç duyar ve ekim prosedürüne, toprak ve iklim faktörlerine bağlı olarak aynı araziye ekim yaklaşık 3 ila 5 yıl sürmektedir (Gholamipourfard vd., 2021; Ostadi vd., 2020).

1.3.2.4. Hasat ve depolama

Nane hasadı, uygun zamanda yapılmalıdır, çünkü çok erken veya çok geç hasat zamanlamaları olgunlaşmamış veya aşırı olgun mahsullere neden olmaktadır. Bu da sonuçta zayıf uçucu yağ kalitesi ve miktarı vermektedir. Bir diğer önemli faktör, yem verimini ve uçucu yağ bileşimini de etkileyen yıllık hasat sayısıdır. Mahsul, bitkiler tam çiçek açtığı anda, sabahın geç saatlerinde, tüm çiy izlerinin kaybolduğu kuru güneşli bir günde hasat edilmelidir. İklim koşullarına göre bir veya iki kez ürün hasat edilebilmektedir. Ayrıca, bitki hasadının birinci ve ikinci yılı arasındaki yağ içeriği gibi, nane uçucu yağ kalitesi de birinci ve ikinci hasat arasında farklılık göstermektedir. Kısaca bitki en iyi mahsulü ekimden sonraki ikinci ve üçüncü yılda vermektedir (Gholamipourfard vd., 2021; Salehi vd., 2018).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Son Yıllarda Ulusal Alanda Gerçekleştirilen Bazı Fitoremediasyon Çalışmaları

Boyalan ve Erduğan (2021), tarımsal alanlardaki Pb kirliliğinin *Nasturtium officinale* ve *Mentha aquatica* bitkileri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Başlangıç konsantrasyonu olarak $1,5 \text{ mgkg}^{-1}$ ve 10 mgkg^{-1} kurşun konsantrasyonları incelenmiştir. Daha sonra 5 mgkg^{-1} konsantrasyonda iki bitkinin de rekabet davranışları incelenmiştir. 10 mgkg^{-1} kurşun dozunda *Mentha aquatica* fosfor (P), demir (Fe), magnezyum (Mg) ve potasyum (K) ağır metallerini en yüksek değerde biriktirmiştir. *Nasturtium officinale* bitkisi *Mentha aquatica* bitkisine göre iki kat daha fazla kurşun biriktirerek, bu element için hiperakümülatör olduğunu göstermiştir.

Candan (2021), Sugözü Plajı'nda, çevresinde bulunan endüstriyel tesisler ve deniz araçlarının yarattığı kirlilik başta olmak üzere birçok insan faaliyetleri sebebiyle ortaya çıkan ağır metal kirliliğini araştırmıştır. Bu doğrultuda kumsalda bulunan mantarları izole ederek, ağır metal biriktirme potansiyelini incelemiştir. İzole edilen *Aspergillus alliaceus* Fe, Zn, Co ve Cu (200 mgkg^{-1} , 400 mgkg^{-1} , 600 mgkg^{-1} , 800 mgkg^{-1} ve 1000 mgkg^{-1}) ağır metallerini içeren ortamlarda yetiştirilmiştir. Mantardaki gelişmeler 10 gün boyunca 30°C 'de izlenmiştir. Bitkinin demir ve çinko elementlerinin tüm konsantrasyonlarına karşı tolerans gösterdiği, kobalt ve bakır elementlerini ise 400 mgkg^{-1} ve 600 mgkg^{-1} 'a kadar tolere edebildiği gözlemlenmiştir. Biyoremediasyon çalışmalarında, demir, çinko ve kobalt elementleri için kullanılabilir olduğu bildirilmiştir.

Yer vd. (2021), titrek kavak (*P. tremula L.*), akkavak (*Populus alba L.*), karakavak klonu (*P. nigra*) Geyve klonu ve melez kavak klonları *P. deltoides* Samsun (I-77/51) ile *P. euramericana* I-214 bitkilerinin kadmiyum biriktirme kapasiteleri incelenmiştir. Kadmiyum ağır metali sırasıyla kök> gövde> yapraklar> meyve> tohum olacak şekilde birikim göstermiştir. Yapraklarda en çok birikim titrek kavak (*P. tremula L.*) bitkisi ($12,45 \text{ ppm}$) bitkisinde tespit edilmiştir. En az birikim ise *P. alba*'da ($0,84 \text{ ppm}$) görülmüştür. Köklerde en fazla birikim *P. euramericana* I-214 bitkisinde (34 mgkg^{-1}), en az birikim ise yine *P. alba* ($4,6 \text{ mgkg}^{-1}$) bitki örneğinde tespit edilmiştir. *P. deltoides* Samsun (I-77/51) bitkisinin dallarında diğer bitkilere kıyasla daha fazla Cd birikimi ($5,54 \text{ mgkg}^{-1}$) meydana gelmiştir ve en az birikim *P. nigra* Geyve bitkisinde ($0,44 \text{ mgkg}^{-1}$) gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda, bitkilerde Cd birikiminin kök> dal> yaprak şeklinde gerçekleştiği ve Cd elementi için fitoremediasyonda kullanılabilir oldukları bildirilmiştir.

Ökten ve Gören (2021), bor ağır metali içeren jeotermal sularda ve sentetik çözeltilerde *Lemna minor* L.'nin akümülyasyon kapasitesini araştıran bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Ağır metal konsantrasyonunu artan aralıklarda (5 mgkg⁻¹ ile 30 mgkg⁻¹ arasında) uygulamışlardır ve artan konsantrasyonlarla birlikte en yüksek konsantrasyonda (30 mgkg⁻¹) bitkide toksik etkilerin meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bitkinin jeotermal sularda gösterdiği %59,5'lik bor giderim verimliliği, bitkinin suların son arıtımında kullanılabilceğini ortaya koymuştur.

Torun vd. (2021), kanola bitkisinin kurşun içeren ortamdaki büyüme davranışlarını ve fitoremediasyon kapasitesini incelemişlerdir. Çalışma sera koşullarında, farklı konsantrasyonlarda kurşun içeren saksılarda çeşme suyu ile sulama yapılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler bitkinin doğal ortamlarda toprak ve atık sulardaki Pb'nin uzaklaştırılmasında kullanılabilceğini göstermiştir. Kanola bitkisinin kökleri kurşuna karşı topraküstü aksama göre daha fazla dayanıklılık göstermiştir.

Bayrak (2021), süs bitkileri ile gerçekleştirdiği çalışmada, bu bitkilerin ağır metal biriktirme yeteneklerini ve diğer besin elementlerinin içeriklerini araştırmıştır. Sera koşullarında gerçekleştirilen denemede, bitkiler 3 paralele sahip olacak şekilde perlitte yetiştirilmiştir. Denemede materyal olarak *Antirrhinum majus* (aslanağzı), *Salvia splendens* (ateş çiçeği) ve *Tagates patula* (kadife çiçeği) bitkileri ve ayrıca kirletici olarak kadmiyum, krom ve kurşun 25, 50, 100, 150 µM konsantrasyonlarında kullanılmıştır. Bir aylık inkübasyon sonrasında yapılan ölçümlerde, sırasıyla kadmiyum, krom ve kurşun için, *Antirrhinum majus*'u 326,48 mgkg⁻¹ 845,72 mgkg⁻¹ ve 34,20 mgkg⁻¹ içeriğe sahip olduğu; *Salvia splendens*'in 402,43 mgkg⁻¹, 934,78 mgkg⁻¹, 26,39 mgkg⁻¹ içeriğe sahip olduğu ve son olarak *Tagates patula*'nın 506,58 mgkg⁻¹, 936,95 mgkg⁻¹ ve 04,22 mgkg⁻¹ içeriğe sahip olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen veriler her üç bitkininde bu ağır metaller için hiperakümülatör özellik gösterdiği ve topraktaki kirliliğin gideriminde kullanılabilir olduklarını göstermiştir.

Arıkan (2021)'ın gerçekleştirdiği fitoremediasyon çalışmasında *Lolium Perenne* L. bitkisi ve kadmiyum ve nikel ağır metalleri kullanılmıştır. Ağır metal konsantrasyonları olarak 1000 mgkg⁻¹, 4000 mgkg⁻¹ ve 8000 mgkg⁻¹ kullanılmıştır. Bitki boyunun 10 cm'e ulaştığı 10 günlük zaman aralıklarında bitki örnekleme gerçekleştirilmiştir. Doz olarak 1000 mgkg⁻¹ nikel uygulanan topraklarda yetişen çim bitkisinde akümüle edilen miktar 3,180 mgkg⁻¹ olarak tespit edilmiştir. 4000 mgkg⁻¹'de 4,396 mgkg⁻¹ ve son olarak 8000 mgkg⁻¹'de 2,744 mgkg⁻¹ nikel elementi akümüle edilmiştir. Kadmiyum elementi için ise; 1000 mgkg⁻¹'de 1,205 mgkg⁻¹, 4000 mgkg⁻¹'de 4,152 mgkg⁻¹ akümülyasyon gerçekleşmiştir. 8000 mgkg⁻¹ kadmiyum

konsantrasyonunda ise $2,782 \text{ mgkg}^{-1}$ kadmiyum akümüle edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda bitkinin artan konsantrasyonlarla birlikte absorbe edilen miktarında arttığı belirlenmiştir. Bu iki ağır metalin biriktirilmesinde çim bitkisinin kullanılabilceği belirtilmiştir.

Lavanta (*Lavandula angustifolia*) bitkisinin toprakta toksik etki yaratan kadmiyum ağır metalinin temizlenmesi ve bünyesinde biriktirme davranışları incelenmiştir. "Şansa Bağlı Tam Bloklar" deneme desenine göre 3 tekrarlı olarak Cd kirleticisi (suda çözünebilir $\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ formunda $10, 20, 40, 80$ ve 100 mgkg^{-1}) ve kontrol saksıları olacak şekilde deneme gerçekleştirilmiştir ve kirletici bulunan saksılara EDTA (10 mmolkg^{-1}) uygulanmıştır. Bitkideki en yüksek Cd içerikleri (100 mgkg^{-1} doz uygulamada) bitkinin topraküstü aksamı için $10,33 \text{ mgkg}^{-1}$ ve kök aksamı için $90,96 \text{ mgkg}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Bitkinin makro bitki besin elementlerinden azot ve potasyum değerlerinde azalma, kalsiyum değerinde ise artış olmuştur. Fosfor ve magnezyum değerlerinde değişim meydana gelmemiştir. Bitki mikro bitki besin elementlerinden demir ve çinko değerleri artmış, bakır ve mangan değerlerinde düşüş olduğu görülmüştür. Lavanta bitkisinin Cd ağır metali ile kirlenmiş topraklarda hiperakümülatör bitki olarak kullanılabilceği belirtilmiştir (Çarşambalı, 2020).

Rumex Patientia L. bitkisinde kadmiyum, krom ve kurşun ile bakır içeriklerinin etkileşimini incelemek için gerçekleştirilen çalışmada, her saksıya sabit dozda (100 mgkg^{-1}) Pb, Cd ve Cr ağır metalleri ve artan dozlarda EDTA ($0, 5, 10$ ve 15 mmol.kg^{-1}) uygulaması yapılmıştır. Artan dozlarda EDTA uygulaması ile birlikte, Pb ve Cd uygulanan bitkilerde gövdede Cu içeriği artarken, kök bölgesinde azalış meydana gelmiştir. İstatistiksel olarak %1 düzeyinde anlamlı bulunan bu değerler, bitkinin hiperakümülatör olduğunu göstermiştir (Adiloğlu, 2020).

Cirsium vulgare 'in fitoremediasyon kapasitesi Cr ağır metali ile kirlenmiş topraklarda (Krom (IV)-oksit olarak 30 mgkg^{-1} içeren topraklarda) araştırılmıştır. Krom ağır metalinin *Cirsium vulgare* tarafından emilimini arttırmak için sırasıyla $0, 3, 6, 8$ ve 10 mgkg^{-1} doz EDTA uygulaması yapılmıştır. Artan EDTA dozları ile bitki gövdesinde Cr içeriği, 6 mgkg^{-1} EDTA dozunda en yüksek değere (8.23 mgkg^{-1}) ulaşmıştır. Ancak Cr ağır metalinin toksik etkisi sebebiyle bitkide Cr birikimi azalmıştır. Elde edilen sonuçlar, *Cirsium vulgare* bitkisinin Cr ağır metalinin fitoremediasyonunda etkili olduğunu göstermiştir (Dökmeci vd, 2020).

Biberiye (*Rosmarinus officinalis*) bitkisinin kurşun ağır metalinin gideriminde kullanılabilirliğinin ve hiperakümülatör kapasitesinin araştırıldığı bu çalışmada, 10, 20, 40, 80 ve 100 mgkg⁻¹ dozlarında kurşun (PbNO₃) kullanılmıştır. Saksılara EDTA (10 mmolkg⁻¹) şelatörü de uygulanmıştır. Bitkinin en yüksek doz uygulamasında bitki boyu, kök boyu ve dal sayısında azalma meydana gelmiştir. SPAD değerindeki değişimler istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Bitki 100 mgkg⁻¹ doz uygulamasında gövdede 2,25 mgkg⁻¹ ve kökte 28,85 mgkg⁻¹ kurşun biriktirmiştir. Bu sonuçlar, Pb ağır metali kirlenmiş topraklarda biberiye bitkisinin kirlilik giderimi için kullanılabilirliğini göstermiştir (Karabulut, 2020)

Alacabey ve Çelebi Zorer (2020) yaptıkları çalışmada, *Panicum virgatum* (dallı darı) bitkisinin bazı ağır metal (Pb, Cd ve Cr) konsantrasyonları altında gelişimlerini ve akümülyasyon değerlerini incelemişlerdir. Yapılan çalışma üç tekerrürlü olarak kontrollü koşullarda gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kontrol (0 mgkg⁻¹), 30 mgkg⁻¹, 60 mgkg⁻¹, 90 mgkg⁻¹, 120 mgkg⁻¹ kurşun (Pb), kontrol (0 mgkg⁻¹), 2,5 mgkg⁻¹, 5 mgkg⁻¹, 10 mgkg⁻¹ ve 20 mgkg⁻¹ kadmiyum (Cd) ve kontrol (0 mgkg⁻¹), 40 mgkg⁻¹, 80 mgkg⁻¹, 120 mgkg⁻¹ ve 160 mgkg⁻¹ krom (Cr) dozları uygulanmıştır ve bitkinin gelişimi gözlemlenmiştir. Ağır metallerin düşük konsantrasyonlarında bitkide kontrole kıyasla çok fazla değişiklik gözlemlenmemiştir. Artan konsantrasyonlar bitki büyümesinde ve gelişmesinde gerileme olmakla beraber bitkilerde ölüm gerçekleşmemiştir. Artan ağır metal konsantrasyonları ile birlikte bitkideki ağır metal birikimi de artış göstermiştir. Bu sonuçlar, *Panicum virgatum* (dallı darı) bitkisinin kurşun, kadmiyum ve krom ile kirlenmiş alanlarda fitoremediasyon için etkili bir bitki olabileceğini göstermiştir.

Kılıç ve İpek (2019), gerçekleştirdikleri çalışmada, soğan (*Allium cepa* L.), kinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) ve kanola (*Brassica napus* L.) bitkilerinin arıtma çamurunda bulunan kurşun (Pb) elementi için akümülyasyon kapasitelerini araştırmışlardır. Çalışmada şelat (hüyük asit, EDTA, 1-10 fenantrolin, pridin ve nitro,) kullanarak bitkilerin akümülyasyon kapasitelerindeki değişimleri de gözlemlenmiştir. Tolerans İndeksi (Tİ) değerlerine bakıldığında kullanılan şelatın bitki gelişimi ve kuru ağırlık değerlerinde farklılıklara neden olduğu gözlemlenmiştir. Bitkilerin ağır metal akümülyasyon davranışları incelendiğinde ise birikimin kök bölgesinde daha fazla olduğu görülmüştür. Kullanılan EDTA, hüyük asit ve nitro şelatının eklendiği saksılarda bitkilerin biriktirdiği ağır metal miktarı diğer saksılara oranla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kullanıldığı deneme saksılarında ağır metal biriktirme miktarı daha yüksek bulunmuştur. Hiperakümülatör olduğu bilinen *B. napus* bitkisinin EDTA harici şelatlar eklendiğinde hiperakümülatör bitki davranışı sergilemediği görülmüştür. Tüm türlerin

eklenen şelatlarla birlikte kurşun elementini kök bölgesinde biriktirme ve üst kısımlara taşıma kapasitesinin arttığı belirlenmiştir.

Demirayak vd. (2019), kentsel ve kırsal alanlarda bulunan egzotik ve doğal bitki türlerinin arsenik (As) kirleticisi için akümülyasyon değerlerini araştırmışlardır. Samsun'da gerçekleştirilen çalışmada, kirliliğin yoğun olduğu alanlarda çalışılmıştır ve bu bölgede bulunan bitkilerdeki As konsantrasyonlarının yüksek olduğu belirlenmiştir. Çalışma alanında bulunan *M. grandiflora* bitkisinin diğer bitkilere oranla dallarında daha yüksek oranda arsenik biriktirdiği gözlemlenmiştir. Bazı bitkilerde (*L. vulgare*, *A. cyanophylla*, *P. abies*, *C. vitalba* ve *E. Camaldulensis*) daha çok yapraklarda birikim gerçekleşirken; *O. europaea* bitkisinde ve *M. grandiflora* bitkisinde dallarda yüksek konsantrasyonlarda arsenik birikimi gerçekleşmiştir. Yapılan bu çalışma, *L. vulgare* bitkisinin yapraklarında ve *M. grandiflora* bitkisinin dallarında gerçekleşen As birikiminin, bu kirletici için biyo-izleme amacıyla kullanılabilceğini göstermiştir.

Kaya (2019), Ankara Çayı etrafından aldığı çamurda farklı bitkileri yetiştirerek, bitkilerin akümülyasyon davranışlarını ve ağır metal (kurşun, çinko, kadmiyum, bakır, mangan ve nikel) konsantrasyonlarını araştırmıştır. Çalışmada *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud (Kamış otu), *Typha latifolia* L. ve *Polygonum lapathifolium* bitkilerinin ağır metal içeriklerine bakıldığında Ankara Çayı'nın kontamine bir alan olduğu ve bu kirleticilerin uzaklaştırılması için denemede kullanılan bitkilerin tercih edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Termik santrallerin etkinliği sonucu etrafa yayılan uçucu kül içeriğinde potasyum (K), sodyum (Na), silisyum (Si), alüminyum (Al) ve demir (Fe) bulundurmaktadır. Bu uçucu külün bitkiler üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla Surat ve Aydar (2019) *Zea mays* L. (mısır) bitkisiyle bir deneme gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kontrol, 500 mgkg⁻¹, 1000 mgkg⁻¹, 2500 mgkg⁻¹, 5000 mgkg⁻¹ ve 7500 mgkg⁻¹ uçucu kül içeren ortamlarda bitki 14 gün boyunca gözlemlenmiştir. Deneme bittiğinde morfolojik ölçümler ve çimlenme yüzdeleri not edilmiştir. 500 mgkg⁻¹ ile 5000 mgkg⁻¹ arasındaki konsantrasyonlarda bitki gelişimi olumlu etkilenmiştir. Fakat 7500 mgkg⁻¹ uygulama yapılan bitkinin gelişimi engellenmiş, fizyolojik olarak bitkiye zarar vermiştir. Çalışma sonucunda 5000 mgkg⁻¹ ve altındaki konsantrasyonlarda bitki gelişiminin olumlu etkilendiği ve bu ortamlarda *Zea mays* L. (mısır) bitkisinin yetiştirilebileceği görülmüştür (Surat ve Aydar, 2019).

Dindaroğlu vd. (2019), Kahramanmaraş ilinde yürüttükleri çalışmada, *Alyssum pateri* subsp. *pateri*'nin nikel (Ni) ve kalsiyum (Ca) ağır metallerinin bulunduğu ortamdaki davranışlarını incelemişlerdir. Yapılan alışma sonucunda, toprakta 7,08 ppm nikel, bitkide en fazla 4061,27 mgkg⁻¹ nikel, toprakta 1735,70 mgkg⁻¹ kalsiyum tespit edilmiştir. Bitkinin hiperakümülatör özellik gösterdiği belirlenirken, bitkide meydana gelen gallerde de ağır metal birikimi gözlemlenmiştir.

Sürmen vd. (2019), doğada kendiliğinden yetişen *Lepidium draba* L. bitkisinin akümülasyon kapasitesini ve fitoremediasyon için uygunluğunu araştırmışlardır. Amasya'da gerçekleştirilen çalışmada, araştırma için farklı alanlardan (kenar semt, otoyol, şehir içi) ağustos ayının sonunda toplanan bitkiler ile kontrol bitkisinden oluşan bir deneme oluşturulmuştur. Topraktaki ağır metal içeriklerinin ortalama değerlerinin demir (Fe)> mangan (Mn)> kobalt (Co)> nikel (Ni) olduğu belirlenmiştir. Trafik yoğunluğunun olduğu alanlarda yetişen *Lepidium draba* L. bitkilerinde ağır metal içeriğinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Örnekleme yapılan alanların jeobirikim indeksine göre nikel, kobalt ve mangan ile kirlenmediği, demir bakımından ise şehir içi hariç diğer alanların orta seviyede kirlendiği, şehir iinin ise daha fazla kirlendiği tespit edilmiştir. Bitkideki birikimin demir> mangan> nikel> kobalt şeklinde olduğu grlmştir. *Lepidium draba* L. bitkisinin köklerinde nikel ve demir ağır metallerin birikimi, kobalt ve mangan ağır metallerin ise yapraklarda birikim gösterdiği belirlenmiştir. Yol kenarından toplanan bitkilerde kobalt dışındaki diğer ağır metallerin biyoakümülasyon faktörü ve translokasyon faktörü 2'nin üzerinde bulunmuştur. Demir elementinin yol kenarlarında ve şehir merkezinden alınan örneklere en çok biriktirilen element olduğu grlmştir. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, *L. draba* bitkisinin hiperakümülatör bitki olarak kullanılabileceği bildirilmiştir.

Meşeli (2019), *Lythrum salicaria* L. bitkisi ile gerçekleştirdiği bir çalışmada çinko ağır metalinin bitkideki akümülasyonunu incelemiştir. Çalışmadan elde edilen verilere göre, bitki en fazla çinko birikimini (12 098,33 mgkg⁻¹) konsantrasyonun 30 mgkg⁻¹ olduğu ortamda gerçekleştirmiştir. Bitki gelişimi incelendiğinde de aynı konsantrasyonda pH değişimiyle birlikte bitkinin gelişiminde değişiklikler olduğu ve pH değerini 7 olduğunda birikim değerinin artarak 13 893,5 mgkg⁻¹ 'e ulaştığı belirlenmiştir. Bitkinin Zn ağır metali için akümülatör olduğu sonucuna varılmıştır.

Eren (2018), sera koşullarında bakır ağır metali ile 45 gün süresince inkübasyona bırakılmış toprakta, *Xanthium strumarium* L. (pıtrak) bitkisini fitoekstraksiyon davranışlarını

incelemiştir. Bu çalışma için kullandığı dozlar sırasıyla; 0 ppm, 100 ppm, 200 ppm, 400 ppm ve 800 ppm bakırdır. Bitkilerdeki bakır elementi konsantrasyonu, bazı makro ve mikro element içerikleri (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn ve Mn), klorofil içeriği ve biyokütle üretimi ölçülmüştür. Ağır metal uygulaması yapılan bitkilerdeki ölçümler kontrol bitkisi ile kıyaslanmıştır. Artan bakır konsantrasyonlarıyla birlikte bitkide bakır konsantrasyonu da artış göstermiştir. Yapılan araştırma bitkinin bakır ile kontamine olmuş topraklarda fitoekstraksiyon için uygun bir bitki olduğunu kanıtlamıştır.

Ayturan vd. (2018), bazı bitkilerin ağır metal konsantrasyonları karşısındaki davranışlarını incelemiştir. *Zea mays* L. bitkisinin Cd, Cu ve Pb için; *Brassica sp.* Cd, Zn, Pb ve Cu için; *Lactuca sativa* bitkisinin Cd için; *Pisum sativum* bitkisinin Cu için, *Salvina cucullata* bitkisinin Zn için ve *Trifolium repens* bitkisinin Cd, Zn ve Pb için yüksek tolerans yeteneğine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Güneş vd. (2017), sulak alanlardaki atık suların temizlenmesinde bitkilerin kullanılabilirliğini test etmek amacıyla *Salvinia natans* ve *Lemna minor* bitkilerini kullanarak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda *S. natans* ve *L. minor* bitkilerinin suda bulunan fosfor ve azotu biriktirerek kirliliği azalttığı ve ayrıca *L. minor*'un sudaki çözünmüş O₂ miktarını da arttırdığı belirlenmiştir.

2.2. Son Yıllarda Uluslararası Alanda Gerçekleştirilen Bazı Fitoremediasyon Çalışmaları

Bitkilerdeki ağır metallerin ana kaynakları, ağır metallerin köklerden veya yapraklardan emildiği toprak, hava ve gıda çözeltileridir. Kentsel alanlarda, daha yüksek bitkiler atmosferden daha iyi kirletici birikimi sağlayabilir. Bu nedenle, ağır metal kirliliğini belirlemek için öncelikle kümülatif bir biyolojik monitör olarak bitki yapraklarının kullanılması büyük çevresel öneme sahiptir. Ve hiperakümülatör bitkiler ağır metalleri çevre dostu bir şekilde yakalama ve toplama yeteneğine sahiptir. Çevreyi korumak için bitki örtüsü uygulama alanında çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bir bölgede elektrik santrali işletmek, ciddi sağlık ve çevre tehlikelerine yol açabilecek zararlı elementler saldıdığı için önemli bir kirlilik kaynağıdır. Birkaç araştırmacı, enerji santrallerinin etrafındaki bitki örtüsünde ağır metal konsantrasyonları bildirmiştir. Bitkiler tarafından Fe, Cd, Zn, Ni, Co, Cr ve Pb birikimi incelenmiştir. Santral çevresinde yetişen *Abutilon indicum*, *Calotropis procana*, *Cassia tora*, *Ipomea carnea*, *Jatropha gossypifolia*, *Nerium indicum*, *Parthenium hysterphorus*, *Prosopis juliflora* ve *Tephrosia purpunea* olmak üzere dokuz tür tespit edilmiştir. Çalışma, bu bitkilerde yüksek oranda ağır

metal birikimi olduğunu gösterdi ve eko-restorasyon ve fitoremediasyon için kullanılabilir olduğunu göstermiştir (Al-Heety vd., 2021).

Malabar ıspanağının (*Basella alba* L.) bakterisi (*Rhodobacter capsulatus* DSM1710) ve krom (Cr(VI)) ağır metalinin uygulandığı topraklarda akümülyasyon kapasitesi test edilmiştir. Saksılara 30 mgkg⁻¹ krom ağır metalini (CrO₃ formunda) ve 10 mL bakteri uygulaması yapılmıştır. Bakteri uygulaması ile yaprak genişliği, bitki kuru ağırlığı ve dallanma miktarı en yüksek seviyelere ulaşmıştır. Ayrıca bakteri uygulaması bitkide biriken Cr miktarını da artırmıştır. Çalışma sonucunda krom ağır metalinin kirliliğe sebep olduğu topraklarda *Basella alba* L. bitkisinin fitoremediasyonda etkili olduğu ve bakteri uygulamasının bitkide akümülyasyonu olumlu etkilediği belirlenmiştir (Adiloğlu vd., 2021).

Mısır (*Zea mays* L.) bitkisinin Cr⁺⁶ ağır metalini için akümülyasyon yeteneği ve kapasitesi araştırılmıştır. Çalışma 3 tekrarlı ve 0, 10, 20, 40, 80 mmolkg⁻¹ dozlarında EDTA içeren saksılarla kontrol saksıları olacak şekilde toplamda 18 saksı kullanılmıştır. Saksılara ayrıca kirlenici olarak 30 mgkg⁻¹ Cr⁺⁶ uygulanmıştır. Tohum ekimi sırasında gerekli gübreleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Deneme sonunda bitkinin kök ve gövdesindeki krom içerikleri incelendiğinde, en yüksek dozda EDTA uygulanan bitkide krom içerikleri istatistiksel olarak %5 oranında anlamlı bulunmuştur. Kökün krom içeriği kontrol bitkisinde 18.57 mmolkg⁻¹, en yüksek konsantrasyonda şelat uygulamasında ise kökte 34.95 mmolkg⁻¹ olarak tespit edilmiştir. Bu çalışma, mısırın Cr⁺⁶ ağır metalini için hiperakümülyatör olduğunu ve bu ağır metal ile kirlenmiş toprakların fitoremediasyonunda kullanılabilabileceğini göstermiştir (Adiloğlu ve Göker, 2021).

Fesleğen (*Ocimum basilicum* L.) bitkisinin kirlenmiş toprakların iyileştirilmesinde akümülyasyon yeteneği araştırılmıştır. Çalışma kontrollü koşullarda saksı denemeleri şeklinde yürütülmüştür. Artan konsantrasyonlarda EDDHA-Fe (0, 25, 50, 150 ve 250 mgkg⁻¹) uygulanmıştır. Fesleğen bitkisinin toksik seviyelerde demir metalini içeren topraklarda Fe birikimi gerçekleştirdiği ve Fe'nin mikro besin elementleri ile antagonistik davranışlar sergilediği belirlenmiştir. Bitki yaş ve kuru ağırlıkları ile bitki boyu 50 mgkg⁻¹ EDDHA-Fe içeren saksılarda yetişen bitkilerde istatistiksel olarak önemli bulunmuştur ve daha yüksek konsantrasyonlarda bu değerler azalış göstermiştir. Magnezyum konsantrasyonu ve buna paralel olarak SPAD değerleri de artı göstermiştir. Fesleğen bitkisinin Fe ağır metalini içeren topraklarda hiperakümülyatör bitki olarak kullanılabilabileceği belirlenmiştir. Ayrıca bu bitkinin gübrenmesinde 50 mgkg⁻¹ Fe içeriğinin yeterli olduğu da gösterilmiştir (Adiloğlu, 2021).

Ağaç yaprakları, çevresel kalite izleme ve ağır metal toprak kirliliği değerlendirmesi için yararlı bir araçtır. Al-Heety vd. (2021) gerçekleştirdiği bu çalışma, toprak kirliliğinin biyolojik bir göstergesi olarak kentsel bitkilerin yapraklarında ağır metallerin birikme olasılığını değerlendirmeyi amaçlamıştır. Ramadi-Irak'ta elektrik jeneratörlerinin bitişiğindeki 51 bölgeden bitki yaprağı ve toprak örnekleri toplanmıştır. *Albizia lebbeck*, *Conocarpus lancifolius*, *Dodonaea viscosa*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Ficus microcarpa* ve *Ziziphus spina christi* olmak üzere altı yaygın bitki türü seçilmiştir. En yüksek ağır metal içeriği *Conocarpus viscosa* yapraklarında bulunmuştur, bunu *Dodonaea viscosa* izlemiştir. Bu iki bitkinin ağır metal içeriğinde diğer bitkilere göre önemli bir fark ($p < 0.05$) görülmüştür. Bitki ağır metal konsantrasyonunun toplam ortalaması şu şekilde gözlemlenmiştir: Mn ($45,23 \text{ mgkg}^{-1}$), Cu ($12,49 \text{ mgkg}^{-1}$), Ni ($7,55 \text{ mgkg}^{-1}$), Pb ($6,49 \text{ mgkg}^{-1}$), Cr ($6,37 \text{ mgkg}^{-1}$), Co ($2,04 \text{ mgkg}^{-1}$), Cd ($0,57 \text{ mgkg}^{-1}$). Yapraklardaki ağır metal konsantrasyonları Mn > Cu > Ni > Pb > Cr > Co > Cd şeklinde bir eğilim gösterirken, bitkilerdeki ağır metal biyoakümülyasyon faktörü (ACF) şu şekilde sıralanmıştır: Zn > Cu > Cd > Mn > Co > Pb > Ni > Kr. Gıda ve Tarım Örgütü / Dünya Sağlık Örgütü (FAO/WHO) tarafından izin verilen değerlere kıyasla bitki yapraklarında yüksek konsantrasyonda kobalt, kadmiyum, krom, nikel ve kurşun bulunmuştur. Bu da bitki yapraklarının ağır metal birikimi için kullanılabileceği iddiasını desteklemektedir.

Afonso vd. (2021), Güney Brezilya'da bulunan bakır madenciliği atık alanlarında kendiliğinden yetişen *Baccharis dracunculifolia* DC ve *Baccaris trimera* DC bitkilerinin translokasyon faktörünü (TF), biyokonsantrasyon faktörünü (BCF), metal ekstraksiyon oranını (MER) ve bitki etkin sayısını (PEN) ölçerek fitoremediasyondaki etkin rollerini araştırmışlardır. Her iki tür de köklerde sürgünlere göre daha yüksek ağır metal konsantrasyonu tespit edilmiştir. *B. trimera*, Zn, Cd, Cr, Pb'nin fitoekstraksiyonu ve Ba ve Ni'nin fitostabilizasyonu için potansiyel gösterirken, *B. dracunculifolia*, Pb ve Cu fitoekstraksiyonu, Zn ve Ba'nın fitostabilizasyonu için potansiyel göstermiştir. *B. trimera*, Cu > Zn > Cr > Ni olarak birikim göstermiştir ve Cd dahil olmak üzere metallerinin fitoremediasyonunda *B. dracunculifolia*'dan daha yüksek potansiyel göstermiştir. *B. Trimera*'nın 1 g Cu, Zn, Cr, Pb, Ni ve Cd'yi uzaklaştırmak için *B. dracunculifolia*'dan daha az sayıda bitki gerektirdiği tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda, atık madenciliği alanında kendiliğinden büyüyen bu her iki türün de metallerin fitoremediasyonu için potansiyelle sahip olduğu vurgulanmıştır.

Birçok farklı iklim koşulunda yetiştirilebilen ve hızlı büyüyen mera bitkileri, kirlenmiş topraklardan ağır metallerin uzaklaştırılması için en iyi bitkilerdir. Elementlerin

konsantrasyonu, ICPOES (endüktif plazma spektroskopisi) spektroskopik analitik yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Kirleticilerin miktar değerleri SPSS 22 yazılımı ile istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Ayrıca, bitki türlerinde ağır metal alımını değerlendirmek için baskın bitki türü olan *Hordeum bulbosum* seçilmiştir. Araştırma sonucunda, *H. bulbosum*'un sürgün kısımlarında en yüksek Mn düzeyini (155,34 mg/kg) maden alanı etrafındaki 100 m'lik mesafede tespit etmişlerdir. Biyojeokimyasal indekslere göre en yüksek ağır metal miktarı madenden 100 metre uzaklıkta yetişen bitkilerde gözlenmiştir. En yüksek birikim faktörü kadmilyumda (1,15 mg/kg olarak), maksimum zenginleştirme faktörü ise 0,82 mg/kg olarak Mn elementinde madenden 100 m uzaklıkta tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, *H. Bulbosum* bitkisinin hücrelerinde ağır metal birikimine toleranslı olduğunu ve ağır metal bulaşmış bölgelerin iyileştirilmesinde yüksek uygulama değerine sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca *H. bulbosum*'un TF değerlerinin Cd metali için 1'den fazla olması, bu türün potansiyel olarak Cd ile kirlenmiş alanlarda fitoremediasyon ve fitostabilizasyon uygulanabilir olduğunu kanıtlamıştır (Afshari vd., 2021).

Farahat vd. (2021), bu çalışma ile, *Vossia cuspidata* (Roxb.) Griff'in farklı organlarındaki ağır metallerin mevsimsel konsantrasyonlarını, ağır metallerin *V. cuspidata* organlarında biyolojik olarak birikmesini ve yer değiştirmesini ve fito-stabilizatör olarak potansiyellerini ve kuru maddedeki mevsimsel değişiklikleri araştırmayı amaçlamıştır. Şubat 2018'den Ocak 2019'a kadar olan süre boyunca, rastgele dağıtılmış on sekiz karede (her biri 0,5 × 0,5 m) su, tortu ve bitki organlarının mevsimsel örnekleme için iki nehir adası seçilmiştir. Toplam yıllık ortalama kuru madde biyokütlesi yaklaşık olarak 18.7 ton/ha olarak hesaplanmıştır. Topraküstü aksamalarda kuru kütle ağırlığının mevsimsel olarak farklılıklar gösterdiği ($p < 0.05$) görülmüştür. Su ve tortudaki ağır metal konsantrasyonlarından bağımsız olarak *V. cuspidata* bitkisinin, Fe, Mn, Ni ve Pb'yi yüksek seviyelerde biriktirebildiği görülmüştür. Mevsimlerin ve organların Mn, Ni ve Pb konsantrasyonları üzerindeki etkileri arasında $p < 0,001$ 'de istatistiksel olarak anlamlı bir etkileşim tespit edilmiştir. Kök, bu çalışmada analiz edilen elementler için ana birikim organı olarak ön plana çıkmıştır. *Vossia cuspidata*, analiz edilen metallerin düşük konsantrasyonlarını yer altından yer üstü organlarına aktarabilmiştir. *V. cuspidata*'yı Fe, Zn, Mn, Cu, Ni ve Pb için potansiyel bir fitostabilizatör olarak önermişlerdir.

Azeez (2021), Irak Basra Üniversitesi Kampüsü'ndeki kanalizasyon arıtma ünitesinde gerçekleştirdiği çalışmada, *Utricularia vulgaris* L. (Mesa otu) ve *Lemna minör* L.'de (Su

mercimeği) bazı ağır metallerin (Mn, Cu, Zn ve Pb) akümülyasyon davranışlarını incelemiştir. İncelenen tüm ağır metaller için, *U. vulgaris* bitkisinin *L. minor*'dan daha iyi akümülatör olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma, her iki bitkinin de atık sudaki ağır metal konsantrasyonlarını önemli ölçüde azalttığını kanıtlamıştır. Ağır metalleri uzaklaştırma verimliliğinin % 68'den fazla olduğu görülmüştür. Her iki tür için de test edilen metallerin biyokonsantrasyon faktörü (BCF) değerleri <1 olmuştur ve BCF değerleri her iki türde de aşağıdaki sırayla gerçekleşmiştir: Pb>Mn>Cu>Zn. Deney sonuçları, test edilen makrofitlerin biyoakümülatörler olarak iyi bir özellik sergilediğini ve fitoremediasyon tekniklerinde etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir.

Panneerselvam ve Shunmuga (2021), su sümbülü (*Eichhornia crassipes*) bitkisinin fitoremediasyon kabiliyetini değerlendirmiştir. Bu nedenle, boya endüstrisi yakınındaki Amaravati Nehri'nde bulunan suyu arıtmak için 7 günlük işletme süresi altında, krom ve kurşun'da maksimum giderme verimi araştırılmıştır. Araştırma bulguları, boya atık sularının arıtımında *Eichhornia crassipes* bitkisinin fitoremediasyonda kullanılmasının ekonomik bir yol olduğunu ortaya koymuştur.

Ramana vd. (2021) bu çalışmada, kadmiyum (Cd) ile kirlenmiş toprakların fitoremediasyonu için *Furcraea foetida* bitkisini değerlendirmişlerdir. *F. foetida*'yı kuraklığa dayanıklı bir bitki olduğu, yüksek biyokütle ürettiği ve minimum bakım gerektirdiği için seçmişlerdir. Yenilebilir olmayan bir ürün olduğu için besin zinciri kontaminasyonu tehlikesi yoktur. Fitoremediasyon için ideal özelliklere sahip olmasına rağmen, fitoremediasyon amacıyla yeterince kullanılmayan bu bitkinin fitoremediasyon potansiyelini değerlendirmek için, bitki beş düzeyde kadmiyuma (0, 25, 50, 100 ve 200 mg Cd kg⁻¹ toprak) maruz bırakılmıştır ve büyüme, kuru madde üretimi, alımı ve translokasyon verimliliği incelenmiştir. Bitki, herhangi bir görünür toksisite belirtisi göstermeden 200 mg kg⁻¹ Cd içeren toprağa iyi tolerans göstermiştir. Metal esas olarak köklerde (233 µg g⁻¹ kuru ağırlık), ardından yaprakta (51 µg g⁻¹ kuru ağırlık) birikmiştir. Biyokonsantrasyon faktörü > 1, ancak translokasyon faktörü <1 olarak hesaplanmıştır. Bitki, Cd hiperakümülatörü olarak sınıflandırılmamakla birlikte, yüksek alımı (897 µg g⁻¹ bitki) ve yer değiştirme verimliliği (% 78) nedeniyle, bitkinin düşük ila orta derecede kontamine topraklardan Cd'nin fito ekstraksiyonu için kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır.

Riza ve Hoque (2021), bu çalışmada, Bangladeş, Kaliakair'deki tekstil endüstrileri çevresinde bulunan alandan toplanan kontamine toprak örneğinde fitoremediasyon için *Bryophyllum pinnatum* bitkisini test etmişlerdir. Deney, toprak kaplarda *ex-situ* ile

gerçekleştirilmiştir. Fitoremediasyon çalışmasından önce topraktaki Zn, Cu, Ni, Cr, Pb ve Cd dahil altı ağır metalin konsantrasyonu analiz edilmiş ve toprakta Cu ($28.57 \mu\text{g g}^{-1}$) ve Zn ($143.88 \mu\text{g g}^{-1}$) olmak üzere iki ağır metal tespit edilmiştir. *Bryophyllum pinnatum*'un ekiminden sonra, kirlenmiş topraktaki Cu ve Zn konsantrasyonları, üç tekrarlı olarak 45 gün (S3), 90 gün (S4) ve 135 gün (S5) olmak üzere üç aralıkta analiz edilmiştir. Deney, topraktaki Cu konsantrasyonunda (45 gün için $27.08 \mu\text{g g}^{-1}$ ve 90 gün için $13.19 \mu\text{g g}^{-1}$) 135 günlük 3. tekrarlama (S5) dışında bir düşüş olduğunu ortaya koymuştur. Bitkiler tarafından hem Cu hem de Zn için biriktirilen ağır metal miktarları yaprak>gövde>kök şeklinde bulunmuştur, bu da ağır metallerin zaman içinde kökten sürgüne aktarıldığını göstermiştir. Bu nedenle *Bryophyllum pinnatum*, BCF>1 ve TF>1 değerlerine sahip iyi bir hiperakümülatör bitki olarak kabul edilmiş ve ayrıca metallerin fitoekstraksiyonu için iyi bir kapasiteye sahip olduğu belirtilmiştir

Gana'nın çoğunda yaygın olan zanaatkar madencilik faaliyetleri, hem su hem de topraktaki ağır metallerin ve metaloidlerin kirlenmesine büyük ölçüde katkıda bulunmuştur. Bu, bu kirleticilerin yutulmasıyla ilişkili hastalıkların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Su bitkileri, bu kirleticileri çevreden gidermek için uygun maliyetli ve verimli araçlar olarak kabul edilmiştir. Samuel ve arkadaşlarının (2021) gerçekleştirdiği bu çalışmada, ağır metaller cıva (Hg), arsenik (As), kadmiyum (Cd) ve kurşun (Pb) ile kirlenmiş toprakların iyileştirilmesinde *Heliconia psittacorum* kullanımı araştırılmıştır. Bu kirleticilerin *H. psittacorum* tarafından kirlenmiş topraktan iyileştirilmesi, bitkilerin yetiştirildiği bir sera ortamında incelenmiştir. Bitkinin sulanması ağır metaller ve metaloidlerin her biri için 10 ppm ile yapılmıştır. Bitkinin kökleri ve sürgünleri, belirli periyotlardan sonra bitki tarafından emilen ağır metal ve metaloidlerin sayısı açısından analiz edilmiştir. Ağır metallerin/metaloidlerin her birinin sudaki tek kirletici olduğu zaman ve dört kirleticinin tümü suda birlikteyken *H. psittacorum* tarafından As, Hg ve Cd'nin yüksek biyo-absorpsiyon oranına sahip olduğu görülmüştür. Bu, makrofitin toprakta ve suda As, Hg ve Cd'yi akümüle edebileceği anlamına gelmektedir. Bununla birlikte, kontaminantların çözelti içinde eşleştiği durumda, makrofitler tarafından metal alımı üzerinde sinerjik etkiler ortaya çıkmıştır ve bu da düşük bir biyo-absorpsiyon oranı ile sonuçlanmıştır. Bu sonuç, *H. psittacorum*'un ağır metalle kirlenmiş toprak ve suyu temizlemede maliyeti az, etkili ve yeşil teknolojilerden biri olarak kullanılabilenliğini göstermiştir (Samuel vd., 2021).

Fitoremediasyon, ağır metallerin ve metaloidlerin kontamine alanlardan uzaklaştırılması için köklü ve sürdürülebilir tekniklerden biri olarak kabul edilir. Bitkilerin metal çıkarma kabiliyeti, metal toleranslı bitkilerle birlikte uygun organik malzemeler

kullanılarak arttırılabilir. Yapılan hidrofonic bir deneyde, sitrik asit (CA) değişikliği ile ve olmadan nikel (Ni) için *Mentha piperita* L.'nin fito-ekstraksiyon potansiyelini araştırmak için yapılmıştır. Deney, tam rasgele tasarımda sürekli havalandırılmalı kontrollü cam kaplarda gerçekleştirilmiştir. *M. piperita* bitkileri, farklı konsantrasyonlarda Ni (100, 250 ve 500 uM) tek başına ve/veya CA (5 mM) ile birleştirilmiştir. Bitkiler hasat edildikten sonra, *M. piperita* bitkilerinin farklı dokularındaki Ni konsantrasyonlarının yanı sıra morfo-fizyolojik ve biyokimyasal özellikleri de ölçülmüştür. Sonuçlar, Ni stresinin kontrole kıyasla bitki agronomik özelliklerini ve fotosentezi önemli ölçüde azalttığını ortaya koymuştur. Nikel stresi, antioksidan enzim aktivitelerini arttırmıştır ve *M. piperita*'da reaktif oksijen türlerinin (ROS) üretimine neden olmuştur. Ni stresi altındaki sitrik asit uygulaması, tek başına Ni uygulamalarıyla karşılaştırıldığında bitkinin morfolojik-fizyolojik ve biyokimyasal özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Sonuçlar, sitrik asitin sadece Ni ile muamele edilmiş bitkilere kıyasla köklerde, gövdelerde ve yapraklarda Ni konsantrasyonlarını sırasıyla %138,2, %54,2 ve %38'e kadar arttırdığını göstermiştir. Ni stresi altında sitrik asit ile bitki büyümesindeki gelişme, sitrik asite toleranslı bitki türleri kullanarak Ni fitoekstraksiyonu için uygulanabilir olduğunu göstermiştir (Khair vd., 2020).

Phaseolus vulgaris ve *Arachis hypogaea* kullanılarak ağır metallerin (kadmium, krom, bakır ve kurşun) fitoremediasyonu standart teknikler kullanılarak araştırılmıştır. Deneme planı, *P. vulgaris* ve *A. hypogaea*'nın her biri kontamine olmuş toprakların bulunduğu saksılara aktarılmasıyla oluşturulmuştur. Ağır metallerle kontamine olmayan 4 saksı toprağı da kontrol görevi görmüştür. 62 günlük sürenin ardından bitkiler hasat edilerek, yaprakları ve kökleri öğütülmüştür ve daha ileri deneysel testler [Metal konsantrasyonu, translokasyon faktörü (TF) ve biyobirikim faktörünün (BAF) belirlenmesi içi] hazırlanmıştır. *A. hypogaea* için en yüksek Cd translokasyon faktörü $1,63 \pm 0,08$ olarak tespit edilmiştir, Cr için incelenen tüm bitkilerde $TF < 1$ olarak gözlemlenmiştir. *A. hypogaea*, Cd için en yüksek biyobirikim faktörü değerini (1.16 ± 0.08) göstermiştir. İncelenen iki bitkide Cr ve Cu için $BAF < 1$ olarak gözlemlenmiştir. *A. hypogaea*'nın BAF'si, *P. vulgaris* bitkisine göre daha yüksek çıkmıştır. Çalışma bitkileri gıda ürünleri olmasına rağmen, bazı ağır metallerin fitoremediasyonunda da rol oynayabileceği bildirilmiştir (Ameh vd., 2020).

Ağır metalle kirlenmiş sulak alanlar, metal biriktiren bitkiler hasat edilerek, yani fito-ekstraksiyon kullanılarak düzeltilenmektedir. Al-Homaidan vd. (2020), bir makrofit olan *Phragmites australis*'in ağır metalle kirlenmiş sulak alanların fitoremediasyonunda kullanılma

potansiyelini değerlendirmişlerdir. Kirli altı vadi alanından numune alınarak, *P. australis*'in kökleri, rizomları, gövdeleri ve yapraklarının yanı sıra tortu ve sudaki Pb, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd konsantrasyonları araştırılmıştır. Farklı bitki organları, su ve tortu arasındaki korelasyonlar analiz edilmiştir ve metallerin bitki organlarına birikimini ve yer değiştirme hesaplanmıştır. Cd, Zn ve Pb'nin *P. australis*'te birikmesine ilişkin göstergeler tespit edilmiştir. *P. australis*'in Arap Yarımadası'ndaki ağır metalle kirlenmiş vadilerin fitoremediasyonunda kullanılmak için iyi bir aday olduğu bildirilmiştir.

Azab ve Hegazy (2020) gerçekleştirdikleri sera çalışmasında, *Rhazya stricta*'nın kirli toprakta bir ağır metal fitoremediatör olarak potansiyelini test etmişlerdir. Bitkiler, Cd, Pb, Cu ve Zn ağır metalleri ile 10, 50 ve 100 mg/kg oranlarında işlenmiş topraklarla dolu saksılara dikilerek üç ay boyunca gözlemlenmiştir. Biyoakümülyasyon faktörü (BCF) ve translokasyon faktörü (TF), *R. stricta*'nın ağır metalleri topraktan alarak bitki organlarında biriktirme ve transfer etme yeteneğini tespit etmek için hesaplanmıştır. Sonuçlar, artan toprak kirliliği seviyeleriyle birlikte, bitkinin kök bölgesinde Cd ve Zn ağır metallerinin biyokonsantrasyonunun en yüksek değerlere ulaştığını, ardından yapraklarda yüksek birikim gösterdiğini; Pb ve Cu ağır metalleri için ise köklerde en yüksek birikim değerlerine ulaştığını ve ardından saplarda yüksek birikim gerçekleştiğini göstermiştir. Köklerde ağır metal birikimi gövde ve yapraklara göre daha fazla olmuştur. Zn'nin BCF'si, 10 mg/kg toprak muamelesi için köklerde ve gövdelerde en yüksek değerlere ulaşmıştır ve sırasıyla Cd > Cu > Pb şeklinde değerler elde edilmiştir. Yüksekten düşüğe doğru sıralanan TF değerlerinin ise Zn > Cu > Cd > Pb şeklinde olduğu görülmüştür. *R. stricta*'nın hızlı büyümesi ve ağır metallere toleransının olması kurak ve hafif kirli toprakların fitoremediasyonunda kullanılabilirliğini göstermiştir.

Capozzi vd. (2020), üç yabancı enginar çeşidinin (*Sardo*, *Siciliano* ve *Spagnolo*) fitoremediasyon davranışlarını, metal alım kapasitesini ve büyüme davranışlarını incelemiştir. Bir ve iki büyüme döngüsünden sonra toprakta ve bitkilerdeki metal konsantrasyonları ölçülmüştür. İlk büyüme döngüsünden sonra, köklerde tüm elementlerin önemli bir birikimi gözlenirken, sadece Cd, Cu, Fe, Pb ve Sb ağır metalleri sürgünlere önemli ölçüde taşınmıştır. İkinci büyüme döngüsünden sonra, tüm çeşitlerde ve dikkate alınan tüm elementler için özellikle köklerde önemli bir artış gözlenmiştir. Kirli topraklarda yetiştirilen *Sardo* ve *Siciliano*'nın ağırlık ve yaşam süresinde ciddi bir azalma gözlemlenirken, N içeriğinde ise artış gözlemlenmiştir. Yüksek bir metal alımı ve tolerans kabiliyetini uyumlu hale getiren *Spagnolo* çeşidinin, ağır metal fitoremediasyonunda en verimli çeşit olduğu sonucu elde edilmiştir.

Elbehiry vd. (2020)'in gerçekleştirdiği çalışmada, biyokömür (BC), hümkik maddeler (HS) ile yapılan bir saksı deneyinde buğday (*Triticum aestivum*), fasulye (*Vicia faba*) ve roka (*Eruca sativa*) tarafından ağır metallerin biyobirikim faktörü (BAF) ve uzaklaştırma verimliliği (RE) ölçülmüştür. Her değişiklik, kontrol olarak değiştirilmemiş toprakla birlikte 20 g kg⁻¹ toprak oranında toprağa uygulanmıştır. Sonuçlar, işlenmemiş toprakla karşılaştırıldığında, değiştirilmiş topraklarda (p <0,05) mevcut ağır metallerin önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. Çalışılan tüm metallerin bitki konsantrasyonları, işlem görmemiş topraklara kıyasla toprak ıslahı ile azalmıştır. BAF değerinin, tüm bitkilerde 1'den yüksek olduğu görülmüştür.

Gravand vd. (2020), ağır metallerle kirlenmiş topraklarda *Vetiver* bitkisinin fitoremediasyon potansiyelini araştırmışlardır. Bu araştırma, dört farklı ağır metal (kurşun, kadmiyum, manganez ve nikel) ile üç farklı seviyede ve ayrıca her işlem için üç tekrarlamalı olarak yürütülmüştür. Verilerin istatistiksel analizi, SPSS19 yazılımı ve varyans analizi, Duncan ve Pearson korelasyon testleri kullanılarak yapıldı. Sonuçlar, en yüksek alım oranının 282,45 mg/kg kuru toprak ve %83,4 alım yüzdesi ile kurşun metal ile ilgili olduğunu göstermiştir. Daha sonra, kadmiyum, nikel ve manganez için ortalama adsorpsiyon yüzdesi sırasıyla 248,3 mg/kg (53,2), 69,4 mg/kg (%65,5) ve 63,29 mg/kg (%61) olarak tespit edilmiştir. Kurşun, *Vetiver* bitkisinin alımının ana bileşeni olarak bulunmuştur. Bitkinin köklerinin sürgünlerden daha fazla ağır metalleri emdiği tespit edilmiştir. Kullanılan metallerin üç seviyesinde, köklerde toplam 1089,05 ve ortalama 363,01 mg/kg ve sürgünlerde 901,19 ve ortalama 300,39 mg/kg metal adsorbe edilmiştir. Varyans analizi, Duncan testi ve Pearson korelasyonu sonuçları, uygulamaların kök ve sürgünlerde kurşun alımı üzerindeki etkisinin, artan doz seviyeleri ile önemli ölçüde arttığını (P ≤ 0.05) göstermiştir. Biyolojik konsantrasyon faktörü birden fazla ve transfer faktörü bire yakın bulunmuştur. Bu nedenle bitkinin fitostabilizasyon için kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Sonuçlar, *Vetiver*'in vejetatif özellikleri, maliyet etkinliği ve çevresel koşullara yüksek uyumu nedeniyle hiperakümülatör olarak değerlendirilebileceğini göstermiştir.

Cd ve Zn kirliliğinin topraklarda sıklıkla aynı anda meydana geldiği gözlemlenmiştir. Hint yağı bitkisi (*Ricinus communis*), kirlenmiş toprak ıslahı için büyük potansiyele sahip bir bitki olarak bilinmektedir. Bitkinin ağır metallere karşı direnci ve arkasındaki mekanizma bilinmemektedir. He ve arkadaşlarının (2020) bu çalışmada, bitkinin Cd ve Zn'ye tolerans ve birikim yeteneği araştırılmış ve farklı dokularda hücre içi dağılımını içeren birikim

mekanizmasını araştırmışlardır. Biyokütle ve klorofil ile ilgili sonuçlar, *Ricinus communis* bitkisinin 0-5 mg/kg Cd ve 380 mg/kg Zn ile kirliliğe iyi tolerans gösterdiğini, 25 mg/kg Cd ve 380 mg/kg Zn ile ağır kirliliğe karşı tolerans göstermediğini ortaya koymuştur. Cd ve Zn'nin maksimum birikim konsantrasyonları, 175,3 mg Cd/kg ve 386,8 mg/kg Zn, gövde ve yaprak yerine bitki fidesinin kökünde ortaya çıkmıştır, bu da kökün Zn ve Cd'nin birikmesinde önemli bir rol oynadığını göstermiştir. Göreceli düşük dozda Cd (0-5 mg/kg), hücre altı bileşende Zn birikimini teşvik ederken, yüksek dozda (25 mg/kg) Zn birikimini engellemiştir. *Ricinus communis* hücre içi birikim ve dağılımında hücre duvarındaki Cd (%27,1 - 69,4) ve Zn (%39,6 - 66,6) değerinin en yüksek olduğu gözlemlenmiştir (He vd., 2020).

Li vd. (2020), bu bildiride çavdar otu ile ıslah edilmiş çamur toprağını ve etilen diamin tetraasetik asidin (EDTA) etkisini saksı deneyleriyle incelemiştir. İtalyan çimi, 0, 1, 2, 3, 4, 5 mmol kg⁻¹ EDTA'nın altı farklı konsantrasyonu ile muamele edilmiş çamur toprağına ekilmiştir. 45 günlük inkübasyondan sonra, kontrol grubuyla (EDTA uygulanmamış) karşılaştırıldığında, 1-5 mmol kg⁻¹ EDTA uygulamasının çavdar biyokütlesini %2-43 oranında azalttığı, toprak pH değerini 0.21-0.34 birim azalttığı ancak %1,4-8,6 oranında toprak organik maddesini arttırdığı gözlemlenmiştir. Çavdar yetiştirildikten sonra, ağır metal içeriği Cu için %10, Zn için %15, Ni için %6, Cd için %14 ve Pb için %44; ve EDTA uygulamasından sonra Cu için %33, Zn için %31, Ni için %56, Cd için %24 ve Pb için 68 oranında azalmıştır. Çavdarda, EDTA ile muamele edilmiş grupların ağır metal birikimi artmıştır ve Cu, Zn, Ni, Cd ve Pb'nin biyo-konsantrasyon faktörü kontrol grubunun sırasıyla 1,9, 1,6, 4,1, 2,7 ve 4,8 katı olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte, EDTA, Cu ve Zn'nin transfer faktörü değerlerini sadece önemli ölçüde arttırmıştır ve Cu'nun biyo ekstraksiyon faktörü değerini 1'den büyük olmasını sağlamıştır. Bu makale, belediye çamur ortamı ve tahmin modelleri için çavdar otunun ağır metal ıslah çalışmalarında kullanılabileceğini göstermiştir.

Lukatkin vd. (2020), sulu çözeltiler halinde hazırlanan dört ağır metalin (kurşun (Pb), bakır (Cu), nikel (Ni) ve çinko (Zn)) birikimini laboratuvar koşullarında değerlendirmişlerdir. 1 µM ile 1 mM arasında, *Amaranthus retroflexus* fidelerinin biyokimyasal ve fizyolojik parametreleri etkilenmiştir. Fideler, incelenen tüm ağır metallere karşı oldukça yüksek direnç göstermiş ve yapraklarda önemli bir oksidatif stres olmamıştır. Ağır metallere herhangi birinin yüksek dozlarına kronik olarak maruz kaldıktan sonra, fideler yaşamlarını sürdürmüşlerdir, ancak büyüme yavaşlamıştır. Amaranth bitkilerinin ağır metal adaptasyon potansiyelini değerlendirmek için biyokimyasal indeksler (lipid peroksidasyon (LPO)

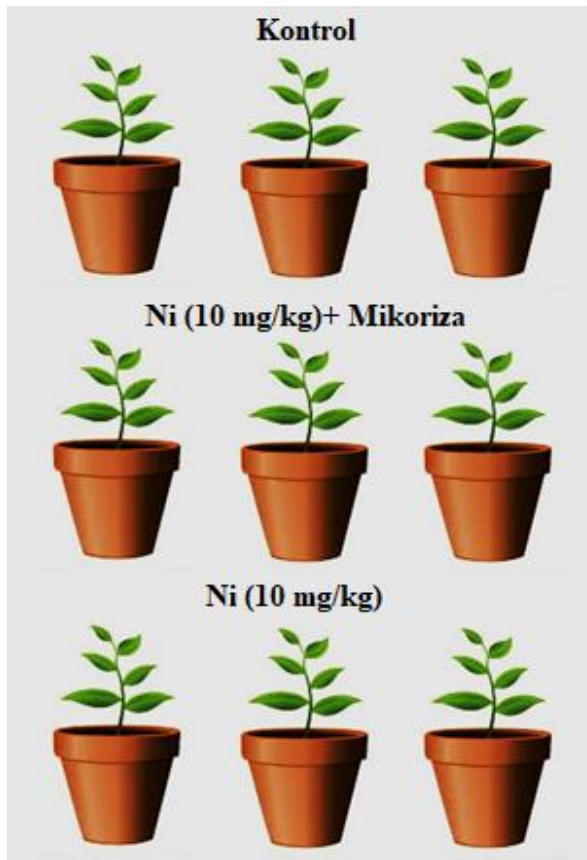
yoğunluğu; toplam peroksit seviyesi) incelenmiştir. Bu endeksler ile, *A. retroflexus* köklerinde, gövdelerinde ve yapraklarında ağır metal birikimi ile çok yüksek korelasyon katsayılarına (r) sahip olduğu gözlemlenmiştir. Herhangi bir ağır metalin 1 mM'sinde, fideler, hiperbirikimli türlerin seviyelerinde Pb ve Ni biriktirmiştir. Pb ($8,2 \pm 2,2$ MPC) (maksimum izin verilen konsantrasyon, MPC) veya Ni ($3,5 \pm 1,0$ MPC) (çözeltideki 1 mM ağır metale eşdeğer) ile kirlenmiş topraklarda, *Amaranthus retroflexus* bitkisinin Pb ve Ni ile kirlenmiş toprakların fitoremediasyonu için güçlü bir aday olduğu bildirilmiştir.

Labada (*Rumex Patientia* L.) bitkisinin bazı ağır metalleri (Cr, Cd ve Pb) içeren topraklarda akümülyasyon kapasitesi araştırılmıştır. Denemede saksılara krom, kadmiyum ve kurşun ağır metalleri ve artan dozlarda EDTA uygulaması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, artan şelat uygulamaları ile özellikle kurşun ve kadmiyum içerikleri labada bitkisinin yapraklarındaki bakır içeriğini artırmıştır. Ancak bitki köklerinde bunun tam tersi bir durum gözlenmiştir. Bu artışlar istatistiksel olarak %1 düzeyinde anlamlı bulunmuştur. Sonuçlar bu bitkinin ağır metaller için bir hiperakümülatör bitki olduğunu göstermiştir (Adiloğlu vd., 2016).

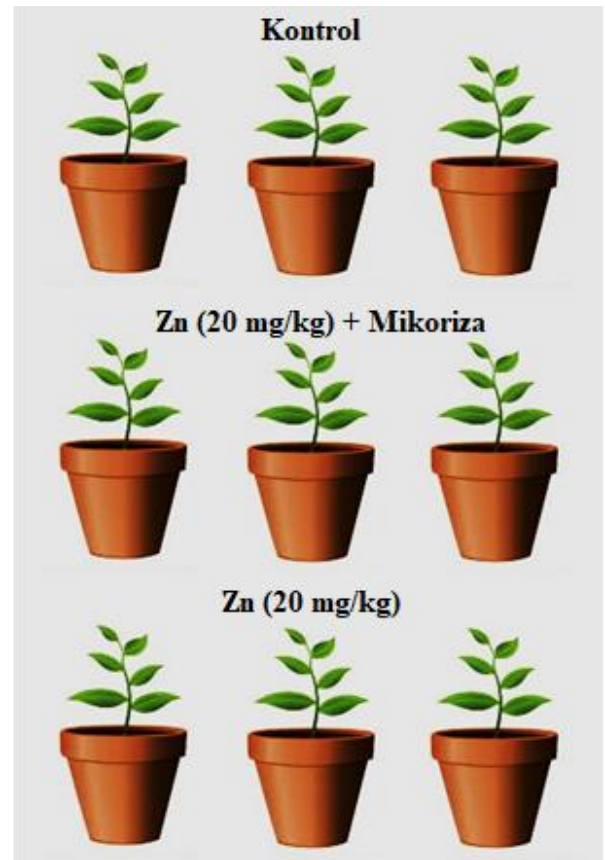
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışmada materyal bitki olarak, nane (*Mentha piperita* L.) ve karalahana (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) bitkileri kullanılmıştır. Yetiştirme ortamı olarak toprak seçilmiştir. Ağır metallere, bu bitkiler için sırasıyla, kirletici olarak sabit dozlarda çinko (Zn) ve nikel (Ni) ağır metalleri uygulanmıştır. Ayrıca bitkilerin ağır metal akümülyasyonunu artırmak amacıyla doz olarak Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de de gösterildiği gibi mikoriza kullanılmıştır. Bitkiler deneme süresince düzenli olarak ve tarla kapasitesine göre sulama yapılmıştır.



Şekil 3.1. *Brassica oleracea* L. var. *acephala* (karalahana) için deneme planı



Şekil 3.2. *Mentha piperita* L. (nane) için deneme planı

3.1.1. Deneme Bitkisi Karalahana (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) Özellikleri

Karalahana (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*; $2n = 18$), MÖ 600'den beri insan tüketimi için yetiştirilen "kolza bitkileri" olarak da bilinen *Brassicaceae* familyasına aittir. Karalahana, sapın tepesinde yapraklardan oluşan bir rozet oluşturur ve $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ kadar düşük ve $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ kadar yüksek sıcaklıkları tolere edebilmektedir. 1935'te *Brassica* cinsinin sitolojisinin

keşfi, tarımsal açıdan önemli türler için genomların ilişkisini kolaylaştırmıştır: *B. oleracea*, kolza bitkilerini (lahana ve karalahana); ve aralarındaki amfidiploid, yani *B. napus*, kolza ve şalgamın yanı sıra çeşitli hardal türlerini içermektedir (Thavarajah vd., 2021).

Son zamanlarda, insan diyetinde daha fazla yeşil yapraklı sebze porsiyonu almak için artan bir eğilim meydana gelmiştir. İnsan tüketimine sunulan bu sebzeler arasında bazıları belirli bir bölgeyle sınırlıdır ve çok azı dünyanın birçok yerinde mevcuttur. Karalahana (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*), *Brassicaceae* familyasına ait ikinci grup arasındadır. Yapılan çalışmalar, lahananın koroner arter hastalığında koruyucu rolü olduğunu, anti-inflamatuar aktivite, antigenotoksik ve gastro koruyucu aktivite, kanserojen bileşik oluşumunun inhibisyonu, bağırsak mikroplarına pozitif, spesifik mikroorganizmalara karşı anti-mikrobiyal gibi farklı sağlık için faydalı etkilerinin olduğunu göstermiştir (Satheesh ve Workneh Fanta, 2020).

Bu çalışma, sabit dozda Ni ağır metali ile kirlenmiş toprakların gideriminde kullanılacak en uygun ve en ekonomik yöntem olan fitoremediasyon yöntemi ile karalahana (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) bitkisinin topraktan akümüle edebildiği Ni miktarını tespit etmek ve mikorizanın bu akümüstasyon davranışı üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla yürütülmüştür.

3.1.2. Deneme Bitkisi Nane (*Mentha piperita* L.) Özellikleri

Mentha cinsinin tüm bitkileri arasında *Mentha* × *piperita* L., uzun süredir dünyada ilaçlarda yaygın olarak ve güvenle kullanılan bitkilerden biridir. Nanelerin çoğu eski zamanlardan beri insanlık tarafından bilinmesine rağmen, nanenin ilk tanımı 1696'da İngiliz botanikçi John Ray (1627-1705) tarafından yapılmış ve Synopsis Methodica Stirpium Britannicarum'un ikinci baskısında yayınlanmıştır. Bitkiler, İngiltere'deki Burfordshire'daki bahçe nane ekinlerinde bulunmuştur. Uçucu yağın morfolojik parametreleri ve özellikleri bakımından farklılık gösteren beyaz ve siyah olmak üzere iki nane türü vardır. Beyaz nanenin esansiyel yağı daha ince ve rafine bir aromaya sahiptir ancak verimi biraz daha düşüktür, abiyotik ve biyotik çevresel faktörlere karşı daha az dirençlidir. Yapraklar ve çiçek salkımları soğuk algınlığı, çeşitli enflamatuar süreçler ve gastrointestinal sistem bozuklukları için bir çare olarak kullanılmaktadır. Ek olarak, nane değerli bir ürün kaynağıdır ve nandeden elde edilen yağ ilaç, parfüm ve gıda endüstrileri için büyük ilgi gören esansiyel bir yağdır (Shelepova vd., 2021).

Lamiaceae familyasına ait nane (*Mentha piperita* L.), çeşitli endüstriyel üretim türlerinde değerli etkileri nedeniyle birçok ekonomik değere sahiptir. Bu tıbbi ve aromatik bitki çok yıllık ve 100 cm yüksekliğe ulaşabilen bir bitkidir. Yapraklar saplı, karşılıklı ve dişlidir. Çiçekler düzensiz şekilli, pembemsi veya morumsu renkte olabilmektedir. Bitkinin hava kısımlarında %0,5 ila %4 (v/w) arasında uçucu yağ bulunmaktadır. Bitkinin hava kısımlarından elde edilen uçucu yağın ana bileşenleri mentol ve mentondur. Birçok çalışmada, bu bitkinin sekonder metabolitlerinin hepatik ve renal etkilerinin yanı sıra fungisidal, antitümör, antibakteriyel, antiviral ve antialerjenik aktiviteleri de rapor edilmiştir (Goudarzian vd., 2021).

Bu çalışma, sabit dozda Zn ağır metali ile kirlenmiş toprakların gideriminde kullanılabilecek en uygun ve en ekonomik yöntem olan fitoremediasyon yöntemi ile nane (*Mentha piperita* L.) bitkisinin topraktan akümüle edebildiği Zn miktarını tespit etmek ve *mikorizanın* bu akümüstasyon davranışı üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla yürütülmüştür.

3.1.3. Denemede Kullanılan Mikroorganizma: Mikoriza

Manganez (Mn), bakır (Cu), çinko (Zn) ve demir (Fe) gibi eser metaller, bitki yaşam döngülerinde birçok biyolojik süreç için gereklidir. Bununla birlikte, aşırı miktarda toksik olabilirler ve ekonomik olarak mahsul üretimi için istenmeyen bitki büyüme süreçlerini bozabilirler. Fitoremediasyon, ağır metallerle kirlenmiş topraklar için umut verici bir temizleme teknolojisidir. Bununla birlikte, bu tekniğin, metal biriktiren bitki türlerinin yavaş büyüme hızı, ağır metallerin düşük biyoyararlanımı ve uzun süreli iyileştirme gibi bazı dezavantajları vardır. Mikrobiyal destekli fitoremediasyon, toprak kirleticilerinin aşırı birikmesi, detoksifiye edilmesi veya iyileştirilmesi için umut verici bir stratejidir (Khalid vd., 2021).

Tıbbi ve aromatik bitkilerin mikorizal mantarlarla kolonizasyonu, aromatik bitkilerde uçucu yağ üretimini de etkileyebilir. Ayrıca mikorizal mantarlar fotosentetik üretim karşılığında konukçu bitkiye su ve mineral besin sağlar. Konakçı bitkilerde fizyolojik özelliklerin değiştirilmesiyle bu birlikte var olma, ikincil metabolitler gibi ürünlerin depolanmasını iyileştirebilir. Stres altında, mikorizal bitkiler daha fazla miktarda besin ve suyu adsorbe edebilir ve buna bağlı olarak farklı çevresel streslere karşı toleranslarını artırır (Goudarzian vd., 2021).

Bu denemede, içeriğinde *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* isimli mikroorganizmayı bulandıran mikrobiyal gübre kullanılmıştır. Mycoup isimli mikrobiyal gübre ticari olarak temin edilmiştir. Mikoriza uygulaması, dikimden 10 gün sonra gerçekleştirilmiştir.

3.1.4. Denemede Kullanılan Kirletici

3.1.4.1. Çinko ağır metali

Bitkisel üretim açısından önemli bir bitki besin elementi olmakla beraber çinko elementinin fazla olduğu durumda toksisiteye neden olmaktadır. Daha çok tarımsal üretimde yanlış ve bilinçsiz gübreleme sonucunda toksisitesi görülen çinko ağır metalinin giderimi kirlilik parametreleri arasında önem arz etmektedir. Araştırmada kirlilik kaynağı olarak uygulanan çinko $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ formunda suda çözünebilmektedir. Bu denemede, saksılara sabit dozda 10 mgkg^{-1} çinko ağır metali, $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ formundan alınarak uygulanmıştır.

3.1.4.2. Nikel ağır metali

Sürdürülebilir tarımın temeli, sürdürülebilir toprak verimliliğinden geçmektedir. Bunun içinde, 16 tane bitki besin elementinin yanı sıra fonksiyonel elementlerde yetiştirilen bitkiye göre önem arz etmektedir. Nikel elementi hem bir fonksiyonel element olmakla birlikte bitkiler için çok önemli olan azot makro elementi için sinerjistik olarak görev yapmaktadır. Ancak, sınır değerlerinin üzerine geçtiğinde ağır metal olarak toksisiteye yol açmaktadır. Tarım, trafik, sanayi ve birçok yolla tarım arazilerine bulaşarak toksisiteye sebep olmaktadır. Bu yönüyle önem arz eden nikel ağır metali, bu denemede sabit dozda 20 mgkg^{-1} dozunda nikel ağır metali, suda çözünebilir $NiSO_4 \cdot 6H_2O$ formunda kullanılmıştır.

3.1.5. Denemede Kullanılan Şelatör Bilgileri

Fitoremediasyon, kirleticileri çevreden uzaklaştırmak veya zararsız hale getirmek için yeşil bitkilerin kullanılması olarak tanımlanmaktadır. Bitkilerin olağanüstü yüksek metal seviyeleri biriktirebileceği düşüncesi çok eski kaynaklara dayanmaktadır (Evangelou vd., 2007). Kullanılan bitkilerden bağımsız olarak, bitki köklerinde ağır metallerin mevcudiyeti, fitoekstraksiyonun etkinliğini sınırlayan anahtar faktör olarak kabul edilmektedir (Felix, 1997). Metallerin alım için mevcudiyet derecesi, katyon değişim kapasitesi, pH ve organik madde içeriği ve metalin türü bir rol oynamaktadır. (Moore vd., 1995; Reddy vd., 1995; Schmidt, 2003; Li ve Shuman, 1996; Evangelou vd., 2007). Aşırı birikim yapmayan bitkilerin metal biriktirme kapasitelerini ve alım hızlarını iyileştirmek için şelatlama maddelerinin eklenmesi önerilmektedir. 50 yılı aşkın bir süredir, EDTA da dahil olmak üzere sentetik şelatlar, bitkilere hem toprakta hem de hidroponikte mikro besinler sağlamak için kullanılmaktadır. 1980'lerin

sonlarında ve 1990'ların başlarında EDTA, fito-ekstraksiyon proseslerinin yardımı için bir şelatlama maddesi olarak önerilmiştir (Evangelou vd., 2007).

Bu çalışmada, toprağa uygulanan ağır metalin çözünmesini sağlayarak bitkinin fitoekstraksiyon kapasitesini artırmak için denemedeki her saksıya 10 mmol/kg Etilen diamin tetra asetik asit (EDTA) şelatı uygulanmıştır. Böylece Zn ve Ni ağır metallerinin biyoyararlanımı artırılmıştır.

3.1.6. Denemede Kullanılan Toprak Bilgileri

Araştırma kapsamında kullanılan deneme toprağı Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi araştırma uygulama alanından 0-30 cm derinlikten alınarak Şekil 3.3'te gösterildiğı gibi 4 mm'lik elek ile elendikten sonra hava kuru ortamda kurutulmuştur. Kuruyan topraklar saksılara doldurulmuş ve kullanıma hazırlanmıştır.



Şekil 3.3. Toprakların 4 mm'lik elekten elenmesi (Orijinal, 2021)

Araştırmada kullanılan nane (*Mentha piperita* L.) bitkisinin 10 mgkg⁻¹ Zn (+/- mikoriza) ile kirletilmiş toprakta ve karalahana bitkisinin 20 mgkg⁻¹ Ni (+/- mikoriza) ile kirletilmiş toprakta fitoremediasyon kapasitesinin değerlendirilmesi, mikoriza kullanımının fitoremediasyon üzerindeki etkisinin araştırılması ve ekosistemde toksik etki yaratan ağır metal iyonlarının giderilmesi hedeflenmiştir. Araştırmada kullanılmak üzere Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi araştırma uygulama alanından alınan toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Denemede Kullanılan Toprağın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri (Tüzüner 1990, Lindsay ve Norwell, 1969; FAO,1990; Tovep 1991; Güneş vd., 2010)

Parametreler	Ölçüm sonuçları	Değerlendirme sonuçları
pH	7,05	Nötr
Kireç (%)	15,65	Yüksek
Tuz ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	1625	Az tuzlu
Tekstür	%45 kil, %35 kum, %20 silt	Killi tın (CL)
Organik madde (%)	1,97	Düşük
Yarayışlı Fosfor (P) (mgkg^{-1})	17,2	Yeterli
Değişebilir Bor (B) (mgkg^{-1})	0,14	Yetersiz
Değişebilir Potasyum (K) (mgkg^{-1})	208,90	Yeterli
Değişebilir Magnezyum (Mg) (mgkg^{-1})	211,87	Yeterli
Değişebilir Kalsiyum (Ca) (mgkg^{-1})	4819,74	Yüksek
Yarayışlı Demir (Fe) (mgkg^{-1})	1,08	Yeterli
Yarayışlı Bakır (Cu) (mgkg^{-1})	0,81	Yüksek
Yarayışlı Çinko (Zn) (mgkg^{-1})	0,77	Yeterli
Yarayışlı Mangan (Mn) (mgkg^{-1})	4,95	Yeterli
Ekstrakte Edilebilir Nikel (Ni) (mgkg^{-1})	5,13	Toksik değil

3.2. Yöntem

Araştırmanın yürütülmesi, ağır metal ve mikoorganizma uygulamaları, bitki ve toprak örneklerinin alınması, ağır metal analizleri ile ilgili aşamalar başlıklar halinde aşağıda açıklanmıştır.

3.2.1. Araştırmanın Yürütülmesi

Bu araştırma Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölüm Laboratuvarlarında 2021 Temmuz- 2021 Eylül tarihleri arasında yürütülmüştür. Denemede kullanılan bitkilerin tohumları ticari olarak temin edilmiştir.

Yetiştirme ortamı olarak laboratuvarında kontrollü koşullarda yürütülmüştür. Bitkilerin etkili kök derinliği dikkate alınarak 4 mm elekten geçirilen topraklar 4 kg kapasiteli saksılara doldurulmuştur. Kirleticiler (10 mg/kg Zn ve 20 mg/kg Ni) uygulanmış ve bir ay süreyle inkübasyona bırakılmıştır. Daha sonra, viyollerde çimlendirilerek ve gerçek yaprakları oluşan nane ve karalahana bitkileri saksılara aktarılmıştır. Nane ve karalahana bitkileri 2 aylık yetiştirme periyodundan sonra hasat edilmiştir. Deneme, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölüm Laboratuvarında "Tesadüf Blokları Deneme Deseni"ne göre yürütülmüştür (Şekil 3.4 ve Şekil 3.5).



Şekil 3.4. Karalahana (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) bitkisi (Orijinal,2021)



Şekil 3.5. Nane (*Mentha piperita* L.) bitkisi (Orijinal)

3.2.2. Toprağa Ağır Metal, EDTA ve Mikroorganizma Uygulanması

Araştırmada 2 bitki + 2 kirletici (Zn ve Ni) x 3 tekerrür x 2 farklı doz (mikorizalı (+AM) / mikorizasız (-AM)) uygulanmış ve her bitkiye ait kontrol saksıları olmak üzere toplamda 18 saksı yer almıştır. Kirletici olan saksılara dikimden sonra bitkilerin adaptasyonu beklenmiş ve 1 hafta sonra 10 mmolkg^{-1} EDTA şelatörü uygulanmıştır. Kirletici olarak uygulanan Zn ve Ni sırasıyla 10 mgkg^{-1} ve 20 mgkg^{-1} şeklinde uygulanmıştır (Şekil 3.6). Daha sonra kirletici parametresi toprakta doğal koşullarda kirlilik unsuru oluşturması ve kirleticinin toprak tarafından absorpsiyonu için 30 günlük inkübasyon süresi beklenmiştir. Mikoriza uygulaması bitkilerin kirli saksılara aktarımından 10 gün sonra gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.6. Ağır metal çözeltileri ve sabit dozda ağır metal uygulanmış, inkübasyonda olan saksılar (Orijinal,2021)

3.2.3. Karalahana Ve Nane Bitkilerinde Bazı Biyolojik Verilerin Elde Edilmesi

Bitkiler 2 aylık gelişme periyodundan sonra hasat edilerek her saksıdaki bitkinin; klorofil değeri, topraküstü aksam uzunluğu ve yaş ağırlığı, kök uzunluğu ve yaş ağırlığı Şekil 3.7’de gösterildiği gibi ölçülmüştür. Klorofil içeriği, yapraktaki klorofil miktarını dolaylı olarak ölçen, taşınabilir klorofil metre cihazı (Minolta SPAD-502, Osaka, Japan) ile yapılmıştır.



Şekil 3.7. Bitkinin morfolojik ölçümlerine ve yaş ağırlıklarının alınmasına ait görüntüler (Orijinal, 2021)

Toprak üstü aksam ve kök örnekleri bir hafta Şekil 3.8’de gösterildiği gibi hava kuruda, daha sonra 48 saat 65 °C etüvde kurutulmuştur (Kacar ve İnal, 2010). Kurutulan bitkilerin hem topraküstü hem de toprak altı aksamı hassas terazide tartılarak kuru ağırlıkları belirlenerek not edilmiştir.



Şekil 3.8. Hasat sonrası hava kuru ortamda kurutulmaya bırakılan nane ve karalahana bitkilerinin toprak, topraküstü ve kök örnekleri (Orijinal, 2021)

3.2.4. Bitki ve Toprak Örneklerinin Analiz İçin Hazırlanması Ve Analizleri

3.2.4.1. Bitki analizleri

Bitki kök ve topraküstü aksam parçaları öğütülerek ağır metal (Ni ve Zn) analizi ve makro-mikro besin elementleri analizi için NABİLTEM'e (Namık Kemal Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi) gönderilmiştir.

Azot analizi, Gerhardt Kjeldathern yakma ve Gerhardt Vapodest 20 S disitilasyon cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kjeldahl Metodu kullanılmıştır. Makro ve mikro besin elementleri ve ağır metal içerikleri ICP-OES cihazında belirlenmiştir (Kacar ve İnal, 2010).

3.2.4.2. Toprak analizleri

Bitkiler hasat edildikten sonra saksılardan alınan toprak örnekleri hava kuru ortamda bekletilmiştir. Kuruyan toprak örnekleri 2 mm'lik elekten geçirilerek analizler için hazır hale getirilmiştir. Topraktaki Ni ve Zn ağır metallerinin analizi ve makro-mikro besin elementlerinin analizi NABİLTEM'de gerçekleştirilmiştir.

3.2.4.2.1. pH analizi

Sağlam (2012)'de belirtilen şekilde, 1:2,5 oranında oluşturulmuş toprak-su karışımında H^+ iyonu için özel olan cam elektrodu kullanılarak pH değerinin elektrometrik analizi gerçekleştirilmiştir (Sağlam, 2012).

3.2.4.2.2. EC analizi

Toprağın tuzluluk derecesini ölçmek için, 1:2.5'lük toprak-su karışımına elektriki iletkenlik cihazı (Wheatstone Bridge) elektrodunun daldırılmasıyla gerçekleştirilmiştir (Sağlam, 2012).

3.2.4.2.3. Kireç analizi

Scheibler kalsimetresi kullanılarak toprağın kireç miktarı volumetrik olarak belirlenmiştir (Sağlam, 2012).

3.2.4.2.4. Organik madde analizi

Toprak örneği içeriğindeki organik madde Smith-Weldon yöntemiyle belirlenmiştir (Sağlam, 2012).

3.2.4.2.5. Tekstür analizi

Denemenin toprak örneğinin ait olduğu tekstür sınıfı Bouyoucos'un yöntemi kullanılarak belirlenmiştir (Bouyoucos,1955)

3.2.4.2.6. Fosfor tayini

Analiz için hazırlanan toprak örnekleri NaHCO_3 kimyasalı ile çalkalandıktan sonra filtre kağıdından geçirilerek elde edilen çözelti ICP-OES cihazında okutulmuştur (Olsen ve Sommers,1982).

3.2.4.2.7. Makro element analizi (K, Mg, Ca)

Hava kuru ortamda bekletildikten sonra elenerek analize uygun hale getirilen toprak örnekleri amonyum asetatla ($\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}_2$) çalkalandıktan sonra filtre kağıdı kullanılarak süzölmüştür. Elde edilen çözelti ICP-OES cihazı kullanılarak analiz edilmiştir (Sağlam, 2012).

3.2.4.2.8. Mikro element analizi (Fe, Mn, Cu, Zn, B)

Hava kuru ortamda bekletildikten sonra elenerek analize uygun hale getirilen toprak örnekleri yarayışlı Fe, Mn, Cu, Zn ve B içerikleri DTPA yöntemine göre ICP-OES cihazı kullanılarak analiz edilmiştir (Lindsay ve Norvel, 1978).

3.2.4.2.9. Ni ve Zn ağır metallerinin analizi

Toprak örneklerindeki ağır metal içerikleri, 0,005 M DTPA + 0,01 M CaCl₂ + 0,1 M TEA (pH 7,3) ile ekstrakte edilmiştir (Lindsay ve Norvell, 1978). Ekstraktaki yarayışlı Ni ve Zn miktarları ICP-OES cihazında belirlenmiştir.

3.2.5. Deney sonuçlarının istatistiksel analizleri

Araştırmadan elde edilen veriler PASW® Statistics 18 for Windows istatistik paket programı ile analiz edilmiştir. Saksılara uygulanan farklılıkları belirlemek amacıyla verilerde varyans analizi (ANOVA) gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ortalamalarda önemlilik kontrolü Duncan Multiple Range testine göre değerlendirilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Karalahana ve Nane Bitkilerinde Ağır Metal ve Mikoriza Uygulamaları Sonucunda Elde Edilen Bazı Agro-Morfolojik Özellikler

Yürütülen denemede, nikel ve çinko ağır metalleri sabit dozda uygulanmış ve ağır metallerin giderimi ve bitki gelişiminde mikorizanın etkisi incelenmiştir. Karalahana (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) bitkisinin, bitki gövde yaş ve kuru ağırlığı, bitki kök yaş ve kuru ağırlığı, bitki gövde ve kök boyu ve SPAD değerlerine ilişkin varyans analiz sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Karalahana bitkisinde Ni (+/- mikoriza) ağır metali uygulaması sonucunda elde edilen agro-morfolojik veriler

Parametre/ Dozlar	Kontrol	Ni (20 mgkg ⁻¹) + mikoriza	Ni (20 mgkg ⁻¹)
Bitki Yaş Ağırlığı (gr)	31,41±4,76a	26,98±4,13ab	15,33±1,64a
Bitki Kuru Ağırlığı (gr)	4,21±1,75öd	2,38±1,37öd	2,29±0,29öd
Kök Yaş Ağırlığı (gr)	1,82±0,37öd	2,09±0,54öd	1,45±0,04öd
Kök Kuru Ağırlığı (gr)	0,78±0,01b	0,96±0,01a	0,53±0,03c
Bitki Boyu (cm)	25,97±2,94öd	22,44±4,82öd	20,27±2,06öd
Kök Boyu (cm)	10,97±2,24öd	8,95±1,37öd	8,90±1,62öd
Klorofil içeriği (SPAD birimi)	8,73±4,38öd	7,13±1,23öd	12,33±2,45öd

Değerler üç tekerrür ortalaması ± standart hata olarak verilmiştir. Farklı harfler (a,b,c) p<0,05’te önemi gösterir, öd: önemli değil.

Çizelge 4.1. değerlendirildiğinde, karalahana (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) bitkisinde agro-morfolojik özelliklerinden klorofil içerikleri istatistiksel olarak, nikel ağır metali ile kirletilmiş tüm saksılarda önemsiz bulunmuştur. Bu durum nikel ağır metalinin, bitkinin vejetatif aksamının gelişimini olumsuz etkilemediğini göstermektedir. Diğer bir deyişle de Ni ağır metalinin akümülyasyonunda bitkinin olumsuz etkilenmediğini ortaya koymuştur. Bitki yaş ve kuru ağırlıkları değerlendirildiğinde, bitkinin tüm aksamlarında kontrol saksılarına göre bitki yaş ve kuru ağırlık değerlerinin azaldığı görülmektedir. Ancak mikoriza uygulanan ve uygulanmayan saksılardaki veriler karşılaştırıldığında mikoriza uygulamasının bitkiyi pozitif olarak etkilediği tespit edilmiştir.

Nikel içeriğinin mahsullerde noksanlığı çok nadir olmakla birlikte, son birkaç yılda birçok çalışma bitkilerde Ni noksanlığı semptomlarını göstermiştir. Öte yandan, yüksek düzeyde uygulanan Ni, bitki dokularında çok sayıda toksik etkiyi (biyokimyasal, fizyolojik ve morfolojik gibi) tetikleyebilmektedir. En önemlisi, ekolojik ve risk değerlendirme bakış açısından, bu metalin bitkiler için temel, faydalı ve toksik konsantrasyonları bitki türlerine göre önemli ölçüde değişen dar aralıklara sahiptir. Pandey ve Sharma (2002), gerçekleştirdikleri çalışmada, bitki köklerinin, aşırı Ni konsantrasyonunda yer üstü kısımlarından daha fazla zarar gördüğünü tespit etmişlerdir.

Nane (*Mentha piperita* L.) bitkisinin, bitki gövde yaş ve kuru ağırlığı, bitki kök yaş ve kuru ağırlığı, bitki gövde ve kök boyu ve SPAD değerlerine ilişkin varyans analiz sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Nane bitkisinde Zn (+/- mikoriza) ağır metali uygulaması sonucunda elde edilen agro-morfolojik veriler

Parametre/ Dozlar	Kontrol	Zn (10 mgkg ⁻¹)+ mikoriza	Zn (10 mgkg ⁻¹)
Bitki Yaş Ağırlığı (gr)	5,19±0,62a	2,80±0,03b	4,70±0,63a
Bitki Kuru Ağırlığı (gr)	4,68±0,01a	3,77±0,02c	4,29±0,01b
Kök Yaş Ağırlığı (gr)	2,38±0,01a	2,27±0,02b	2,03±0,01c

Çizelge 4.2. (devam)

Kök Kuru Ağırlığı (gr)	1,58±0,08a	1,14±0,10b	1,09±0,03a
Bitki Boyu (cm)	19,50±0,50öd	17,80±0,90öd	18,73±1,79öd
Kök Boyu (cm)	11,87±0,87öd	13,63±1,05öd	14,30±3,21öd
Klorofil içeriği (SPAD birimi)	9,10±3,10 öd	4,97±1,60öd	5,77±1,90öd

Değerler üç tekerrür ortalaması ± standart hata olarak verilmiştir. Farklı harfler (a,b,c) $p < 0,05$ 'te önemi gösterir, öd: önemli değil.

Çizelge 4.2. incelendiğinde, mikoriza uygulaması sonucunda nanenin (*Mentha piperita* L.) topraküstü aksamında yaş ağırlığının ve kuru ağırlığının azaldığı görülmektedir. Mikoriza uygulanan saksılardaki biyolojik veriler değerlendirildiğinde, diğer paralellere göre daha düşük veriler elde edilmiştir. Bunun nedeninin de, mikorizanın Zn ağır metalini kendi bünyesinde kullanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bitki yaş ağırlığında ve bitki kuru ağırlığında görülen bu azalışlar istatistiksel olarak %5 düzeyinde anlamlı bulunmuştur. Duncan testine göre bitkinin kök boyu, bitki boyu ve SPAD değerleri %5 düzeyinde önemsiz bulunmuştur. Kök yaş ağırlığına bakıldığında, Duncan testine göre paraleller arası %5 düzeyinde önemlilik gözlemlenmiştir. Mikoriza varlığı, Zn ağır metalinin kökte birikimini olumlu yönde etkilemiştir. Mikoriza uygulanmayan saksılar değerlendirildiğinde, Zn akümüülasyonunun bitkinin gövde aksamında olduğu görülmektedir. Klorofil değerlerinin de istatistiksel olarak etkilenmemesi, bu ağır metali nane bitkisinin biriktirebileceğini göstermektedir.

Dinu vd. (2021), *Mentha piperita*'nın Cd, Pb, Ni ve As toprak kontaminasyonu altındaki davranışını, bunların bitkilerde topraktan transferini ve ayrıca kök/gövde/yaprak sistemindeki translokasyonunu metal ilavesiz bir kontrol grubu ile karşılaştırmışlardır. Nane fideleri, AsCd ve AsCdNiPb (23,7 mg/kg As, 5 mg/kg Cd, 136 mg/kg Ni ve 95 mg/kg Pb) gibi aynı konsantrasyonlarda iki metal karışımı kullanılarak üç aylık bir süre boyunca inkübasyona bırakılmıştır. Bitkilerdeki metal konsantrasyonu sonuçları, As hariç Cd, Ni ve Pb'nin bitkinin farklı yerlerinde biriktiğini göstermiştir. Bitki organlarında metal birikim sırası kökler> gövdeler> yapraklar şeklini göstermiştir. Maruziyetin ilk ayında kontrole kıyasla büyüme, gelişme ve klorofil içeriği üzerinde önemli bir etki gözlemlenmemiştir. Üç aylık maruziyetten sonra ise fitotoksik etkiler meydana gelmiştir. Genel olarak, transfer katsayıları ve

translokasyon faktörü değerleri 1'den küçük olup, *Mentha piperita*'nın metalleri kökte hareketsiz hale getirdiğini göstermiştir.

Zheljazkov ve Nielsen (1996), yaptıkları çalışmada *Mentha piperita* L. bitkisinde Zn konsantrasyonunu 100 mgkg⁻¹'den yüksek bulmuşlardır ancak Zn ağır metalini toksik bulmamışlardır. Bitkide Zn konsantrasyonunun yaprak > kök > gövde=rizom şeklinde olduğu gözlemlenmiştir. Yapraklardaki konsantrasyonun yüksek olmasının hava kirliliğinden olabileceğini düşünmüşlerdir.

Yapılan araştırmalar, çoğu bitki türünün topraklarda bulunan aşırı Zn konsantrasyonuna toleranslı olduğunu göstermiştir. Japon nanesinin (*Mentha arvensis* L.) Zn stresine duyarlı olduğu bildirilmiştir (Misra, 1992).

4.2. Nikel ve inko Gideriminde Karalahana ve Nane Bitkilerinin Akümülayonunun Değerlendirilmesi

Denemenin amacını oluşturan çinko ve nikel ağır metallerinin topraktan giderimi ve farklı bitkilerdeki akümülayonu izelge 4.3 ve izelge 4.4'te verilmiştir.

4.2.1. Nikel Ağır Metalinin Gideriminde Karalahana Bitkisinin Rolü

Brassicaea familyasına ait karalahana (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) bitkisi, yaygın olarak tüketilen sebzeler arasında yer almaktadır. Bitkinin anti-inflamatuar, anti-mikrobiyal, antijenotoksik ve kanserojen bileşik oluşumunda inhibe etkisi sebebiyle (Satheesh ve Workneh Fanta, 2020) günümüzde dikkat çeken bir sebzedir. Bilinçsiz şekilde yapılacak olan üretimi besin yoluyla faydadan çok zarara dönüşebilme potansiyeline sahiptir. Bu nedenle yapılan araştırma ile fitoremediasyon yönteminde kullanılabilirliği ile ilgili olarak izelge 4.3'teki veriler değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.3. Karalahana bitkisinin akümülayonu ve nikel ağır metalinin giderimi

Uygulamalar	Gövde (g)	Kök (g)	Toprak (g)
Kontrol	1,73±0,25c	8,41±0,07c	5,13±0,01c
Ni (20 mgkg ⁻¹)+ mikoriza	8,83±0,90a	23,89±0,06a	8,80±0,01a
Ni (20 mgkg ⁻¹)	5,79±0,54b	14,03±0,34b	7,96±0,01b

Değerler üç tekerrür ortalaması ± standart hata olarak verilmiştir. Farklı harfler (a,b,c) p<0,05 'te önemi gösterir, öd: önemli değil.

Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'e göre, karalahananın yeni bir teknoloji olan fitoremediasyonda akümülatör olarak kullanımı değerlendirildiğinde, bitkinin kök aksamında nikel ağır metalinin biriktiği tespit edilmiştir. Uygulamalar arasında karşılaştırma yapıldığında, mikorizanın topraktaki ekstrakte edilebilir nikel içeriğini artırdığı görülmektedir. Bitkide ise nikel içeriği mikoriza uygulanmayan saksılara göre daha düşük olması ve bunun da istatistiksel olarak %5 düzeyinde önemli bulunması göstermektedirki mikorizanın nikel ağır metalini bitki tarafından alınmasını engellemiştir.

Nikel ağır metali, bitkiler, hayvanlar ve insanlar için temel bir mikro element olmakla birlikte yüksek oranlarda toksik bir elementtir. Diğer metallerde de olduğu gibi aşırı konsantrasyonlarda bitkide olumsuz etkilere sebep olmaktadır (De kock P.C.,1956; Crooke W.M.,1958). Bitkide yüksek oranda Ni varlığı, Fe elementinin alımını ve metabolizmasını bozarak kloroza ve nekroza neden olmaktadır. Yüksek Ni elementi konsantrasyonları, toleransa sahip olamayan bitkilerde kök meristemlerinde hücre bölünmesini engelleyerek bitki büyümesini azaltabilmektedir (Robertson ve Meakin, 1980). Çizelge 4.4'te Ni ağır metali için bitki tarafından tolere edilebilir değer aralıkları verilmiştir.

Ni elementi genellikle toprak profili boyunca eşit olarak dağılmakla birlikte endüstriyel ve tarımsal faaliyetler sonucunda tipik olarak yüzeyde birikim göstermektedir. Sanayi bölgelerine yakın arazilerde Ni içeriği büyük bir sorun teşkil edebilmekle beraber, bu içerik 3 ile 1000 mgkg⁻¹ gibi bir geniş aralıkta değişmektedir (Benko, 1983). Toprakta Ni bileşikleri pH<6.5 iken nispeten çözünürken, pH>6.7'de çözünmeyen hidroksitler şeklinde bulunmaktadır (Bhalerao vd., 2015). Çizelge 4.4'te Ni ağır metalinin toprakta toksik değer aralıkları verilmiştir.

Çizelge 4.4. Nikel ağır metalinin toprak için tolere edilebilir değer aralıkları (Adiloğlu, 2013)

Ni (mgkg ⁻¹)	>10	Toksik
Ni (mgkg ⁻¹)	<10	Toksik değil

Yapılan bir çalışmada, mikorizal yoğunluğu, toprak ve bitkideki Ni konsantrasyonunun düzeyine göre değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. AMF ile kök kolonizasyonu, yaprak Ni içeriği ve topraktaki ekstrakte edilebilir Ni konsantrasyonu ile negatif korelasyon göstermiştir. Ni-hiperakümülatörlerin kökleri ve bu bitkinin kök bölgesini çevreleyen topraklar, AMF sporlarının çimlenmesini açıkça engellemiştir. Bu nedenle, mikorizal kolonizasyonun toprakta ve bitkide belirli bir Ni konsantrasyonu eşiğinin üzerinde inhibe edildiği veya yok olduğu ya da çok düşük olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, güçlü Ni-hiperakümülatörlerinin köklerinden izole edilen AMF, çok yüksek düzeyde Ni-toleransı geliştirmiştir (Amir vd.,2007).

4.2.2. Çinko Ağır Metalinin Gideriminde Nane Bitkisinin Rolü

Tarımsal üretim açısından kolaylıkla yetiştirilebilen ve birçok sektörde gıda, ilaç, kozmetik sektörlerinde yaygın olarak kullanılan nane bitkisinin yeni bir teknoloji olan fitoremediasyon yöntemi ile kirlilik gideriminde kullanılabilirliği Çizelge 4.5'te ki sonuçlara göre değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.5. Nane bitkisinin akümülasyonu ve çinko ağır metalinin giderimi

Uygulamalar	Gövde (g)	Kök (g)	Toprak (g)
Kontrol	59,13±2,33a	75,99±0,53a	0,79±0,01c
Zn (10 mgkg ⁻¹)+ mikoriza	33,66±0,73b	77,99±0,35b	3,82±0,01a
Zn (10 mgkg ⁻¹)	26,56±1,48c	80,70±0,50b	2,77±0,01b

Değerler üç tekerrür ortalaması ± standart hata olarak verilmiştir. Farklı harfler (a,b,c) p<0,05'te önemi gösterir, öd: önemli değil.

Çizelge 4.5. incelendiğinde, çinko ağır metalinin bitkinin kök aksamında biriktiği görülmektedir. Özellikle kirliliğin sabitlenmesi amacıyla kullanılacak bir bitki olarak değerlendirilebilir. Bununla birlikte bitkinin topraküstü aksamından elde edilen nane yağının kullanılabilirliğinin de ayrı bir katma değer sağlayacağı düşünülmektedir. Bu veriler

göstermektedir ki fitoremediasyon yöntemlerinden daha çok ağır metalin fitostabilizasyonunda daha etkin bir şekilde kullanılma kapasitesi vardır.

Mikoriza (AMF)'nin rolü, Zn eksikliği olan toprak koşullarında bitki Zn alımını arttırmaktan, Zn toprakta toksik seviyelere ulaştığında 'koruyucu' bir yapıya dönüşmektedir. Bu, AMF tarafından kolonize edilen bitkilerde, Zn-toksik toprakta büyüyen mikorizal olmayan bir kontrole göre daha düşük sürgün Zn konsantrasyonları ve daha fazla biyokütle olduğunu gösteren bir dizi deneyle desteklenmiştir (Chen vd., 2003; Sarkar vd., 2017; Watts-Williams vd., 2013).

Zn ağır metali diğer canlılarda olduğu gibi bitkiler için de birçok önemli metabolik görevde rol oynamaktadır. Bitkide protein sentezinde görev alması, fotosentezde etkin olması, enzimlerin çalışmasında rol oynaması onu bitki için önemli bir element haline getirmektedir. Yokluğunda üretilen ürünün kalitesi ve miktarı olumsuz etkilenmektedir (Rout ve Das, 2009). Bitki-gıda sisteminde Zn'yi yönetmek için, hem yetersiz hem de toksik toprak Zn koşullarında Zn'nin bitkilerin yenilebilir kısımlarında nasıl biriktiği de dahil olmak üzere, Zn mevcudiyetine verilen bitki tepkilerini tam olarak anlamamız gerekmektedir (Tran vd., 2019). Çizelge 4.6' da Zn ağır metalinin bitki için tolere edilebilir değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.6. Çinko ağır metalinin bitkide ve topraktaki sınır değerleri ve yeterlilik sınıfları (FAO,1990)

Bitkide (mgkg ⁻¹)			Toprakta (mgkg ⁻¹)		
Zn	>63	Toksik	Zn	>2,41	Toksik
Zn	<63	Toksik değil	Zn	<0,20	Toksik değil

Mikoriza, çinko toksisitesi olduğunda bitkiyi koruma altına alarak, ağır metali kendi bünyesinde biriktirmektedir. Böylece bitkinin hem kirlilik gideriminde hem de topraküstü aksamının gıda, ilaç ve kozmetik sanayide kullanılmasına imkan sağlamaktadır (Chen vd., 2003; Sarkar vd., 2017; Watts-Williams vd., 2013).

4.3. Karalahana Denemesinde Elde Edilen Sonuçlara Göre Makro-Mikro Element İçerikleri

Bu bölümde, birçok yolla (tarımsal faaliyet, trafik, kentsel, sanayi vb.) tarım alanlarında karşılaşılan nikel kirliliğinin gideriminde karalahana bitkisinin akümülatör kapasitesini etkileyen mutlak gerekli olan makro ve mikro besin elementleri ile ilişkileri değerlendirilmiştir. Akümülatör bitkilerin gelişiminde, gerekli olan bitki besin elementlerinin nikel ile sinerjistik ve antogonistik etkileri bitkinin hiperakümülatör bitki olmasında önemli bir etkidir. Aşağıdaki konu başlıklarında, karalahana (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) bitkisinin gövde ve kök aksamlarındaki ilişkileri değerlendirilmiştir. Konu ile ilgili yürütülen denemede hasat sonrası topraktaki makro ve mikro bitki besin elementleri irdelenmiştir.

4.3.1. Ağır Metal ve Mikoriza Uygulamaları Sonrasında Bitkinin Topraküstü Aksamındaki Makro-Mikro Besin Elementi İçerikleri

Nikel (+/- mikoriza) uygulanan topraklarda yetiştirilen karalahana (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) bitkisi için hasat sonrasında gerekli analizler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.7’de ve Şekil 4.1’de bitkiye ait bazı makro bitki besin elementi içerikleri verilmiştir.

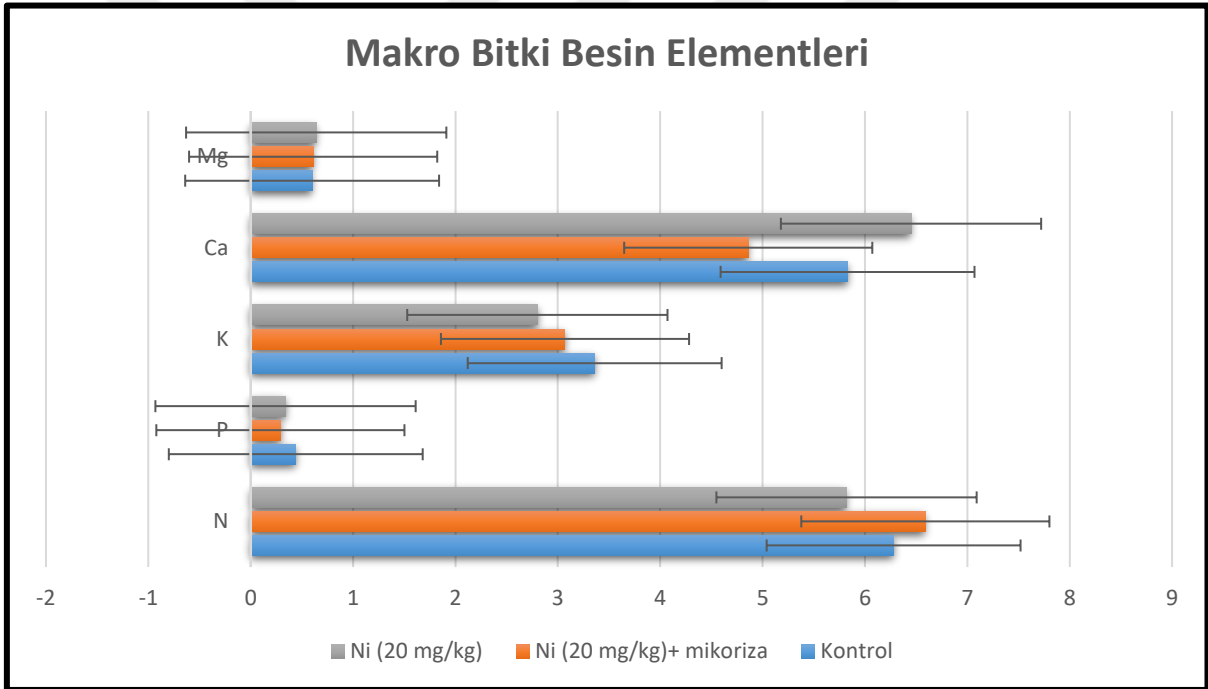
Çizelge 4.7. Nikel (mikoriza +/-) ağır metali uygulanan karalahana bitkisinin topraküstü aksamındaki makro besin elementi içerikleri

Makro elementler (%)	Kontrol	Ni (20 mgkg ⁻¹)+ mikoriza	Ni (20 mgkg ⁻¹)
N	6,28±0,02b	6,59±0,12a	5,82±0,02c
P	0,44±0,06öd	0,29±0,04öd	0,34±0,07öd
K	3,36±0,37öd	3,07±0,47öd	2,80±0,36öd
Ca	5,83±0,26a	4,86±0,32b	6,45±0,22a
Mg	0,60±0,19öd	0,61±0,04öd	0,64±0,03öd

Değerler üç tekrür ortalaması ± standart hata olarak verilmiştir. Farklı harfler (a,b,c) p<0,05’te önemi gösterir, öd: önemli değil.

Çizelge 4.7 ve Şekil 4.1 incelendiğinde, azot makro elementinin bitki içerisinde en yüksek değere mikoriza uygulanan saksılarda ulaştığı ve nikel uygulanan her iki saksıdadaki azot değerlerinin bitkide olması gereken sınır değerlerinin üzerine çıktığı tespit edilmiştir. Bunun

nedeni nikelin bitkilerdeki üreaz enziminin ve hidrogenaz enziminin yapı maddesi olması sebebiyle, azot ile sinerjistik bir ilişkiye girmesidir. Azot bitki besin elementinin bitkide biyokütle oluşumunda önemli bir element olması, bitkinin akümülatör kapasitesinde pozitif bir etki oluşturmuştur. Diğer makro elementlerden P, K ve Mg, nikel ağır metalinden etkilenmemiştir. Yukarıdaki değerlendirmelerde bahsettiğimiz gibi SPAD (Çizelge 4.1) değerlerinde istatistiksel olarak farklılık görülmemesi, bunu destekleyici olarak klorofilin merkez atomu olan magnezyum elementinin de istatistiksel olarak önemsiz bulunması, nikel ağır metalinin bitkiyi olumsuz etkilemediğini kanıtlar niteliktedir. Bu durum, bitkinin akümülatör kapasitesini olumlu etkilemiştir. Bitkideki kalsiyum değerleri göstermektedir ki, nikel ağır metali ile pozitif bir ilişkiye sahiptir ve toprak içeriklerindeki kireç miktarının yüksek olmasından kaynaklı olarak analiz sonuçlarında yüksek değer aralıklarında sonuç vermiştir.



Şekil 4.1. Kirlenici olarak Ni ve doz olarak mikoriza (+/-) uygulaması yapılan saksılarda yetiştirilen karalahana topraküstü aksamındaki makro besin elementi içerikleri, (%)

Brassica oleracea var. *Italica* (brokoli) bitkisinin arıtılmış belediye atık sularında yetiştirildiği bir çalışmada kontrol bitkileri tatlı sulama suyu ile sulanmıştır. *Brassica oleracea*'nın iki veya daha fazla bitki organında aynı anda işlev gören temel bitki besin maddeleri arasındaki istatistiksel olarak anlamlı "iki yönlü" etkileşimler incelendiğinde, köklerde ve yapraklarda Ca ve Ni besin maddelerinin antogonist etki gösterdikleri belirlenmiştir (Kalavrouziotis vd., 2008).

Nikel elementi bitkide Ca, Mg, Mn, Fe, Cu ve Zn ile benzer özelliklere sahiptir. Bu nedenle Ni, absorpsiyon ve terleme süreçlerinde bu metallere rekabet edebilmektedir. Rekabetin bir sonucu olarak, yüksek konsantrasyonlarda Ni, bu metallerin emilimini engelleyebilmekte, konsantrasyonlarını azaltabilmekte ve hatta bitkilerde noksanlığa neden olabilmektedir. Nikel, Mg (veya Fe) alımını ve topraküstüne aktarılmasını azaltabilmektedir (Chen vd., 2009).

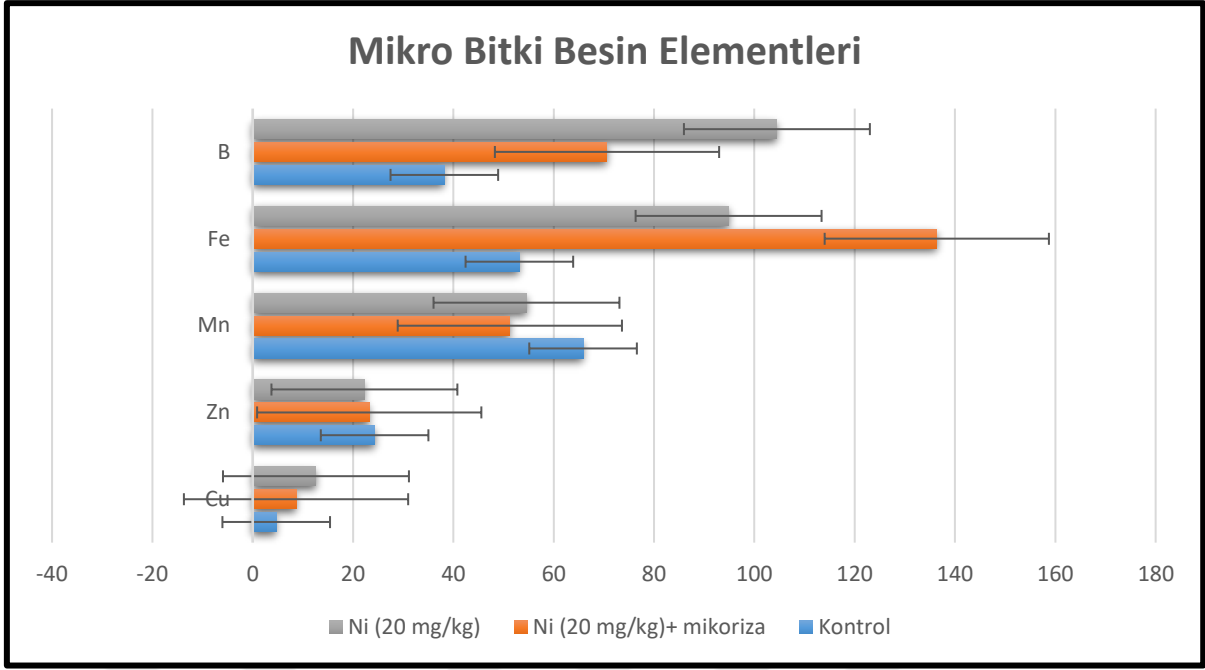
Nikel (+/- mikoriza) uygulanan topraklarda yetiştirilen bitkiye ait bazı mikro bitki besin elementi içerikleri Çizelge 4.8'de ve Şekil 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Nikel (mikoriza +/-) ağır metali uygulanan karalahana bitkisinin topraküstü aksamındaki mikro besin elementi içerikleri

Mikro elementler (mgkg ⁻¹)	Kontrol	Ni (20 mgkg ⁻¹)+ mikoriza	Ni (20 mgkg ⁻¹)
Cu	4,69±1,06c	8,64±0,59b	12,61±1,29a
Zn	24,30±0,58öd	23,23±4,19öd	22,27±1,32öd
Mn	65,86±5,51öd	51,26±6,52öd	54,58±2,68öd
Fe	53,16±9,39a	136,37± 81,0b	94,87±24,1b
B	38,20±2,38c	70,63±3,58b	104,50±5,68a

Değerler üç tekerrür ortalaması ± standart hata olarak verilmiştir. Farklı harfler (a,b,c) p<0,05'te önemi gösterir, öd: önemli değil.

Çizelge 4.8 ve Şekil 4.2. incelendiğinde, demir, bakır ve bor mikro besin elementleri %5 düzeyinde istatistiksel olarak önemli bulunmuştur. Yapılan Duncan testine göre de en çok mikoriza uygulanan saksılardaki bitkilerde bakır ve bor içeriklerinin, mikoriza uygulanmayan saksılara göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu farklılığın nedeninin mikoriza olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.2. Kirlenici olarak Ni ve doz olarak mikoriza (+/-) uygulaması yapılan saksılarda yetiştirilen karalahana bitkisinin topraküstü aksamına ait mikro besin elementi içerikleri, (mgkg^{-1})

Küçük miktarlarda Ni^{2+} , bitkilerin büyümesini ve verimini artırmaktadır. Bitkiler için gerekli olan antosiyaninlerin de biyosentezini artırmakta görev almaktadır (Sachan & Lal, 2017). Ni^{2+} ayrıca Mn^{2+} 'nin absorpsiyonunu engelleyerek fotosentezi azaltabilir, çünkü Mn^{2+} hücre içi suyun fotosentetik oksidasyonu ve oksijen oluşumu için ışık enerjisinin kullanıldığı fotosistem II'nin oksijen evrim kompleksinin katalitik aglomerasını bütünleştirmektedir (Gao vd.,2018).

Çığ vd. (2017), nikel ile kirlenmiş ortamlarda nikelin nergis (*Narcissus poeticus* L. c.v. "Ice Folies") besin içeriği üzerindeki etkilerini belirlemek için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu araştırma, tamamen tesadüfi deneme deseninde, sera koşullarında üç tekerrürlü olarak, artan dozlarda (kontrol, 25, 50, 75 mgkg^{-1}) uygulanmıştır ve gübreleme için $\frac{1}{2}$ hoagland solüsyonu kullanılmıştır. Deneme sonunda nergis soğanlarının en yüksek K, Mg ve Ca içerikleri kontrolde sırasıyla %0,90, %0,91 ve %2,72 olarak elde edilmiştir. En yüksek Fe (27,42 mgkg^{-1}), Cu (7.62 mgkg^{-1}) ve Zn (20,99 mgkg^{-1}) sırasıyla 50 mgkg^{-1} , 75 mgkg^{-1} ve 25 mgkg^{-1} nikel uygulamalarında olmuştur. Benzer şekilde nergis yapraklarının en yüksek K, Mg ve Ca içerikleri kontrolde %2,2, %1,72 ve %5,87 olarak elde edilmiştir. En yüksek Fe içerikleri (66,62 mgkg^{-1}) 25 mgkg^{-1} nikel uygulamasında, Cu (41.29 mgkg^{-1}) ve Zn içerikleri (41.04 mgkg^{-1}) 75 mgkg^{-1} nikel uygulamasında olmuştur. Nikel uygulamaları, manganez dışında nergislerin mikro besin içeriğini artırmıştır.

4.3.2. Ağır Metal ve Mikoriza Uygulamaları Sonrasında Bitkinin Kök Bölgesindeki Makro-Mikro Besin Elementi İçerikleri

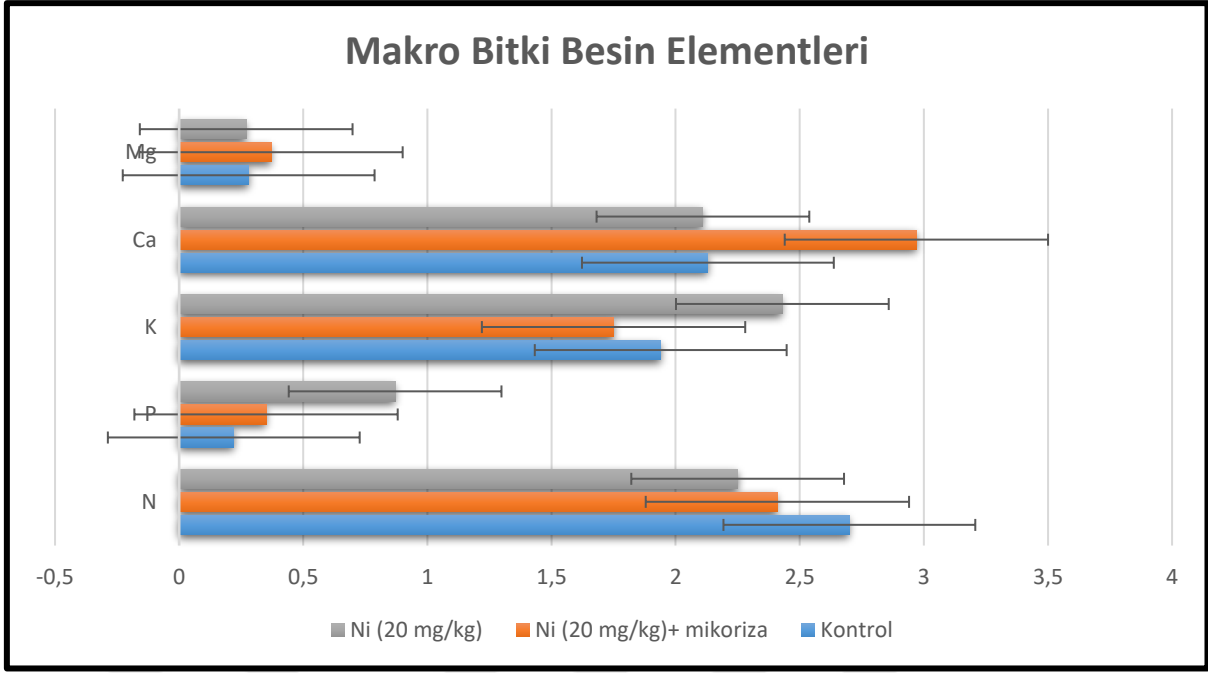
Nikel ve diğer ağır metallerin toksik etkileri, çevre kirliliğini değerlendirme amacıyla yaygın olarak kullanılan bir indeks olan bitki büyümesinin inhibisyonu olarak kendini göstermektedir. Büyüme inhibisyonu, yüksek metal konsantrasyonlarıyla birlikte artmaktadır. Ni ağır metalini çoğunlukla köklerde biriktiren türlerde, kök büyümesi sürgünlerin büyümesine göre daha çok inhibe edilmektedir ve bu nedenle kökte meydana gelen değişimler diğer ağır metaller de olmak üzere çeşitli faktörlerin toksisitesini değerlendirmede yaygın olarak kullanılmaktadır (Seregin ve Ivanov,2001; Samantaray vd.,1997). Çizelge 4.9'da Şekil 4.2'de Ni ağır metali ile kirlenmiş topraklarda yetişen bitkinin mikorizalı ve mikorizasız koşullarda kök bölgesi içeriğinde bulunan makro bitki besin element değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.9. Nikel (mikoriza +/-) ağır metali uygulanan karalahana bitkisinin kök bölgesindeki makro besin elementi içerikleri

Makro elementler (%)	Kontrol	Ni (20 mgkg ⁻¹)+ mikoriza	Ni (20 mgkg ⁻¹)
N	2,70±0,01a	2,41±0,16ab	2,25±0,01b
P	0,22±0,01c	0,35±0,00b	0,87±0,01a
K	1,94±0,06b	1,75±0,02c	2,43±0,01a
Ca	2,13±0,17b	2,97±0,04a	2,11±0,01b
Mg	0,28±0,01b	0,37±0,00b	0,27±0,00a

Değerler üç tekrür ortalama \pm standart hata olarak verilmiştir. Farklı harfler (a,b,c) $p < 0,05$ 'te önemi gösterir, öd: önemli değil.

Çizelge 4.9 ve Şekil 4.3'te yapılan analizler sonucunda görülmektedir ki, uygulanan 20 (mgkg⁻¹) nikel ağır metalinin bitkinin kök bölgesindeki makro elementler ile konsantrasyon fazlalığından dolayı bir rekabet içerisine girdiği görülmektedir. Veriler değerlendirildiğinde nikel ağır metalinin bitkinin kök aksamında birikmesi nedeniyle mutlak gerekli olan makro bitki besin elementleri olumsuz olarak etkilenmişlerdir. İstatistiksel olarak bu durum %5 düzeyinde önemli bulunmuştur. Duncan testine göre de gruplar arasında makro besin elementleri açısından farklılıklar oluşmuştur.



Şekil 4.3. Kirlenici olarak Ni ve doz olarak mikoriza (+/-) uygulaması yapılan saksılarda yetiştirilen karalahana bitkisinin kök bölgesine ait makro besin elementi içerikleri, (mgkg⁻¹)

Nikel tayini için, yapılan bir çalışmada, iki günlük mısır fideleri (*Zea mays* L.), 3 mM Ca(NO₃)₂ varlığında 15, 20, 25 ve 35 µM Ni(NO₃)₂ içeren solüsyonlara aktarılmıştır ve sürgün ve kök dokuları inkübasyonun 2. ve 7. günlerinde incelenmiştir. İki günlük inkübasyonun ardından, tüm kök dokularında Ni içeriği bulunmuştur. Kök bölgesi ve dokudan bağımsız olarak, protoplastlardaki Ni içeriği hücre duvarlarındakini aşmıştır. Ni ağır metali varlığında bitkideki kök büyümesinin inhibisyonu, bastırılmış hücre bölünmesinden kaynaklanmıştır. Sürgünlerde Ni içeriğinin belirlenen seviyenin altında çıkması, kök sistemlerinin topraküstü organlar tarafından ağır metal alımını sınırlayan bir bariyer işlevi gördüğünü sonucuna varılmıştır. Nikel ağır metalinin bitkide taşıma modeli Cd ve Pb'ninkinden farklıdır ve bu fark, kök dallanmasının durdurulması da dahil olmak üzere Ni'nin spesifik toksik etkileri anlamına gelmektedir (Seregin vd.,2003).

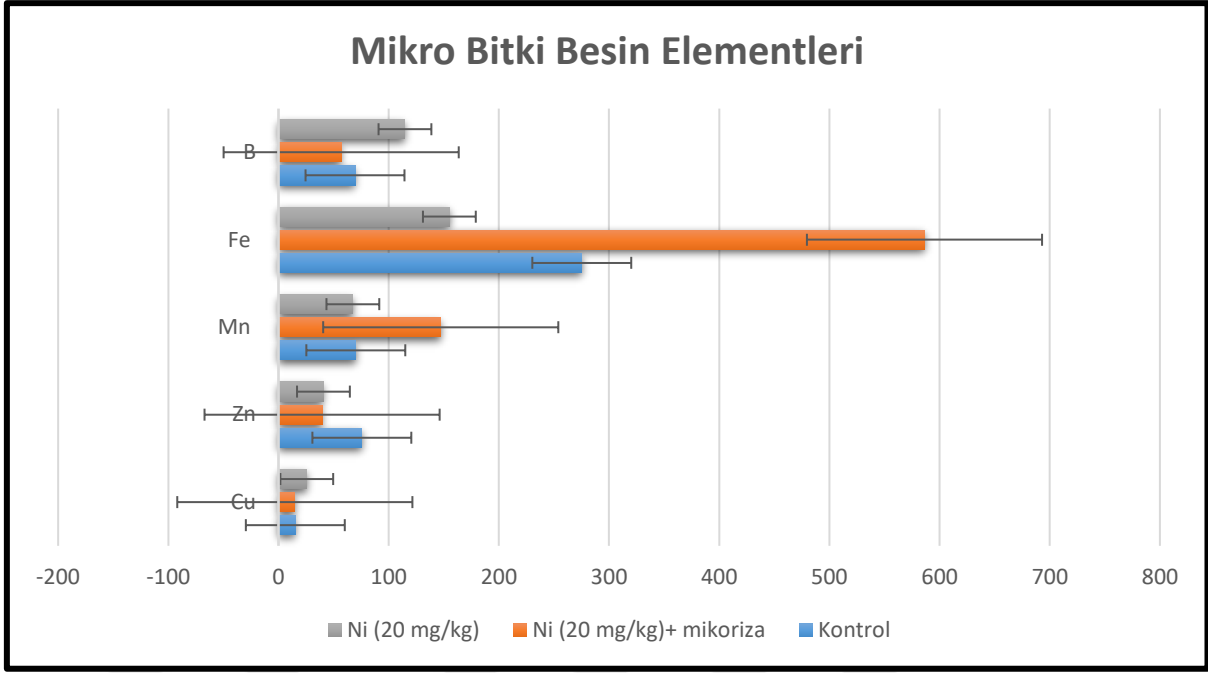
Çizelge 4.10'da ve Şekil 4.4'te Ni ağır metali ile kirlenmiş topraklarda yetişen bitkinin mikorizalı ve mikorizasız koşullarda kök bölgesi içeriğinde bulunan mikro bitki besin element değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.10. Nikel (mikoriza +/-) ağır metali uygulanan karalahana bitkisinin kök bölgesindeki mikro besin elementi içerikleri

Mikro elementler (mgkg ⁻¹)	Kontrol	Ni (20 mgkg ⁻¹)+ mikoriza	Ni (20 mgkg ⁻¹)
Cu	15,28±0,13b	14,84±0,12b	25,67±0,40a
Zn	75,67±3,04a	39,57±0,23b	40,81±0,25c
Mn	70,19±0,41b	147,27±0,62a	67,50±0,51c
Fe	275,28±90,09b	586,33±40,44a	155,09±0,05c
B	69,46±1,70b	56,90±0,20c	114,80±0,82a

Değerler üç tekrür ortalaması ± standart hata olarak verilmiştir. Farklı harfler (a,b,c) p<0,05 'te önemi gösterir, öd: önemli değil.

Nikel ağır metalinin uygulandığı saksılarda yetiştirilen karalahana bitkisinin toprak altı aksamında, mikro besin elementleri değerlendirildiğinde (Çizelge 4.10 ve Şekil 4.4) Cu mikro besin elementi sadece kirletici uygulanan saksıda en yüksek değere ulaşmıştır. Bunun nedeni de uygulanan şelatörün hem topraktaki bakı içeriğinin çözünürlüğünü artırdığı hem de nikel ağır metali ile pozitif etkileşimde bulunduğu görülmektedir. Bitkini kök aksamındaki çinko içerikleri değerlendirildiğinde görülmektedir ki kontrol saksılarına göre bir azalış olduğu, bu durumda istatistiksel olarak %5 düzeyinde önemli bulunmuştur. Duncan testine göre de farklı sınıflarda yer almıştır. Çinko bitki besin elementi, mikoriza uygulanan saksılarda uygulanmayan saksılara göre daha az etkilenmiştir. Mikoriza uygulanmayan saksılarda Zn elementi ve Ni ağır metalinin antagonist etkileşime girdiği tespit edilmiştir. Mangan mikro besin elementinin kök bölgesindeki içeriklerini Ni uygulaması ile bitkideki mangan sınır değerlerinde olumsuz etkisinin olmadığı ancak mikoriza uygulamasının yapıldığı saksılarda daha pozitif etkilerinin olduğu belirlenmiştir. Demir içeriklerinde de EDTA şelatörü ve mikoriza uygulamasının etkinliği görülmektedir. Bor bitki besin elementi ile Ni ağır metali arasında mikoriza uygulanmayan saksılarda sinerjistik etki olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.4. Kirlenici olarak Ni ve doz olarak mikoriza (+/-) uygulaması yapılan saksılarda yetiştirilen karalahana bitkisinin kök bölgesine ait mikro besin elementi içerikleri, (mgkg⁻¹)

Nikel varlığında, bitki organlarındaki mineral besin içerikleri artabilir, azalabilir veya eşit kalabilir. Makro ve mikro besinlerin alımını azaltmak için olası mekanizmalardan biri, Ni²⁺ ve diğer katyonların karşılaştırılabilir iyonik yarıçapları nedeniyle ortak bağlanma bölgeleri için rekabete dayanır. Böyle bir mekanizma, Ni²⁺ varlığında, Mg²⁺, Fe²⁺ ve Zn²⁺ alımını azaldığında çalışabilir. Mg ve Fe alımının azalması, ortamdaki Ni fazlalığının ürettiği klorozun nedenlerinden biridir. Besin alımındaki düşüş, hücre zarlarının yapısını ve enzim aktivitelerini etkileyen Ni'nin neden olduğu metabolik bozukluklardan da kaynaklanabilmektedir (Barsukova ve Gamzikova, 1999; Khalid ve Tinsley, 1980).

Bitki türleri, mineral alımı ve birikimi açısından büyük ölçüde farklılık gösterir ve bu farklılıklar genellikle bitkinin mineral toksisitelerine/eksiklerine karşı toleranslarını açıklamaya yardımcı olur. Ni'nin çinko (Zn), demir (Fe), bakır (Cu), manganez (Mn)'nin köklere girişi ve köklerden sürgünlere taşınması üzerindeki etkilerini belirlemek için kontrollü koşullar altında çözeltili kültürü deneyleri yapılmıştır. Denemede, beyaz yonca (*Trifolium repens* L.), lahana (*Brassica oleracea* var *capitata* L.), çavdar otu (*Lolium perenne* L.), mısır (*Zea mays* L.) bitkileri ve kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), fosfor (P) ve kükürt (S) bitki besin elementleri incelenmiştir. Nikel ağır metali, Zn, Cu, Ca ve Mg'nin hem köklere girişinde hem de köklerden sürgüne taşınmasını azaltmıştır, ancak beyaz yoncada sadece Fe ve Mn'nin köklerden sürgünlere taşınması azalmıştır. Cu, Fe, Mn, Mg ve S'nin hem köklere girişi hem de köklerden

sürgünlere taşınması, lahanada Ni >30 µM ile belirgin şekilde azalırken, P'nin köklere girişi ve köklerden sürgünlere taşınması Ni uygulamasıyla artmıştır. Çavdar için, bakır, demir, mangan, kalsiyum ve magnezyumun köklerden sürgünlere taşınması azalırken, Mg dışındaki bu elementlerin köklere girişi Ni'den etkilenmemiştir. Ni toksisitesine karşı bitki toleransı, Ni'nin beyaz yonca ve lahanada bakır, demir ve manganın öklere girişi ve köklerden sürgünlere taşınması üzerindeki etkisiyle ilişkili bulunmuştur, ancak mısır ve çavdar otunda ilişkilendirme yapılamamıştır (Yang vd.,1996).

4.3.3. Ağır Metal ve Mikoriza Uygulamaları Sonucunda Bitkinin Yetiştirildiği Toprak Örneklerindeki Makro-Mikro Besin Elementi İçerikleri

Serpantin mineralinin yoğun olduğu topraklarda ve kontaminasyon sonucunda nikel toksisitesi genellikle karşımıza çıkmaktadır. Bunun dışında tarım topraklarındaki nikel içeriği genel olarak çok azdır. Ancak, dünyada ve ülkemizde yapılan yanlış tarımsal uygulamalar ve diğer kirletici parametreler olmak üzere nikel toksisitesi ile karşılaşmamıza neden olmaktadır. Bu nedenle nikel toksisitesi giderimi için kolay ve en ekonomik uygulanabilir fitoremediasyon yöntemiyle yapılan deneme sonuçlarında elde edilen makro bitki besin element ilişkileri Çizelge 4.11'de Şekil 4.5'te verilmiştir.

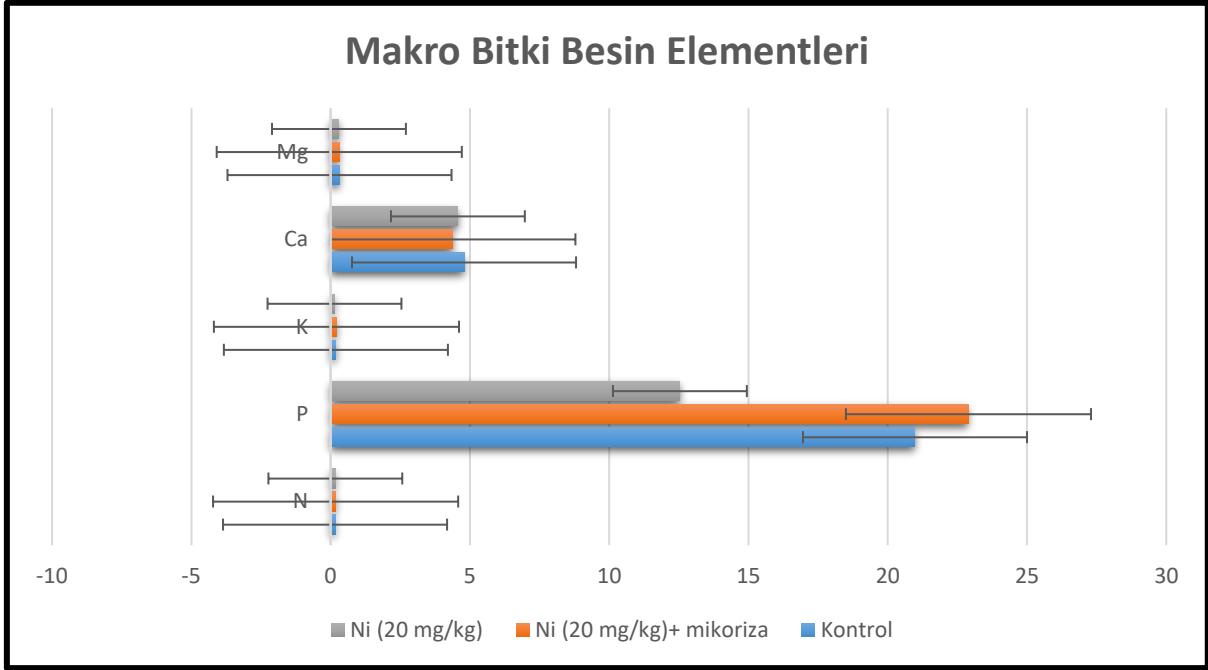
Çizelge 4.11. Nikel (mikoriza +/-) ağır metali uygulanan toprak örneklerinde makro besin elementi içerikleri

Makro elementler (%)	Kontrol	Ni (20 mgkg ⁻¹)+ mikoriza	Ni (20 mgkg ⁻¹)
N	0,16±0,00b	0,18±0,00a	0,17±0,00ab
P	20,98±0,25b	22,90±0,16a	12,54±0,27c
K	188,76±0,98b	208,90±2,08a	138,83±0,99c
Ca	4787,59±4,21a	4396,59±4,97c	4574,09±2,25b
Mg	320,03±4,37a	310,71±1,56ab	309,04±1,01b

Değerler üç tekerrür ortalaması ± standart hata olarak verilmiştir. Farklı harfler (a,b,c) p<0,05'te önemi gösterir, öd: önemli değil.

Hasat sonrası deneme topraklarında (Çizelge 4.11 ve Şekil 4.5) makro bitki besin elementi içeriklerinde azot makro bitki besin elementi dışındaki tüm besin elementleri yeterli durumdadır. Kalsiyum elementinin topraklarda yüksek değere sahip olması, denemede

kullanılan toprakların kireç içeriğinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Denemede kullanılan toprakların organik madde içeriğinin düşük olması (Çizelge 4.1) azot miktarının yetersiz seviyelerde olmasını destekler niteliktedir.



Şekil 4.5. Kirletici olarak Ni ve doz olarak mikoriza (+/-) uygulaması yapılan toprak örneklerine ait makro besin elementi içerikleri, (%)

Toprak kirliliğinin boyutu, önemli bir gösterge olan mikrobiyal biyokütle kullanılarak değerlendirilebilmektedir. Toksik metal kontaminasyonu sorunu olan herhangi bir toprakta önemli bir mikrobiyal aktivite inhibisyonu karşımıza çıkmaktadır. Cu, Zn, Pb ve diğer toksik metallere kirlenmiş toprak üzerinde yapılan bir çalışmada, madene yakın topraklarda, madenden uzakta olanlara kıyasla daha düşük bir mikrobiyal biyokütle gözlemlenmiştir. Toksik metallere seviyesi ile toprak mikrobiyal biyokütlesini nasıl etkiledikleri arasındaki ilişki incelendiğinde, düşük seviyelerde toksik metallere mikrobiyal biyokütleyi artıran mikrobiyal büyümeyi desteklediğini, yüksek konsantrasyonların ise toprak mikrobiyal biyokütlesini anlamlı bir şekilde azaltabileceğini ortaya koymuştur (Chander vd., 1995; Fliepbach vd., 1994).

Topraklardaki zenginleşme, hareketli elementlerin (örneğin Ca, Na, Mg ve Sr) uzaklaştırılması ve birlikte çökme (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb ve Zn) ve/veya toprak tarafından yüksek pH değerlerinin etkisi altında Fe-oksi-hidroksitler (Cr ve Ni) tarafından adsorpsiyonu ile gerçekleşmektedir (Zhang vd., 2020).

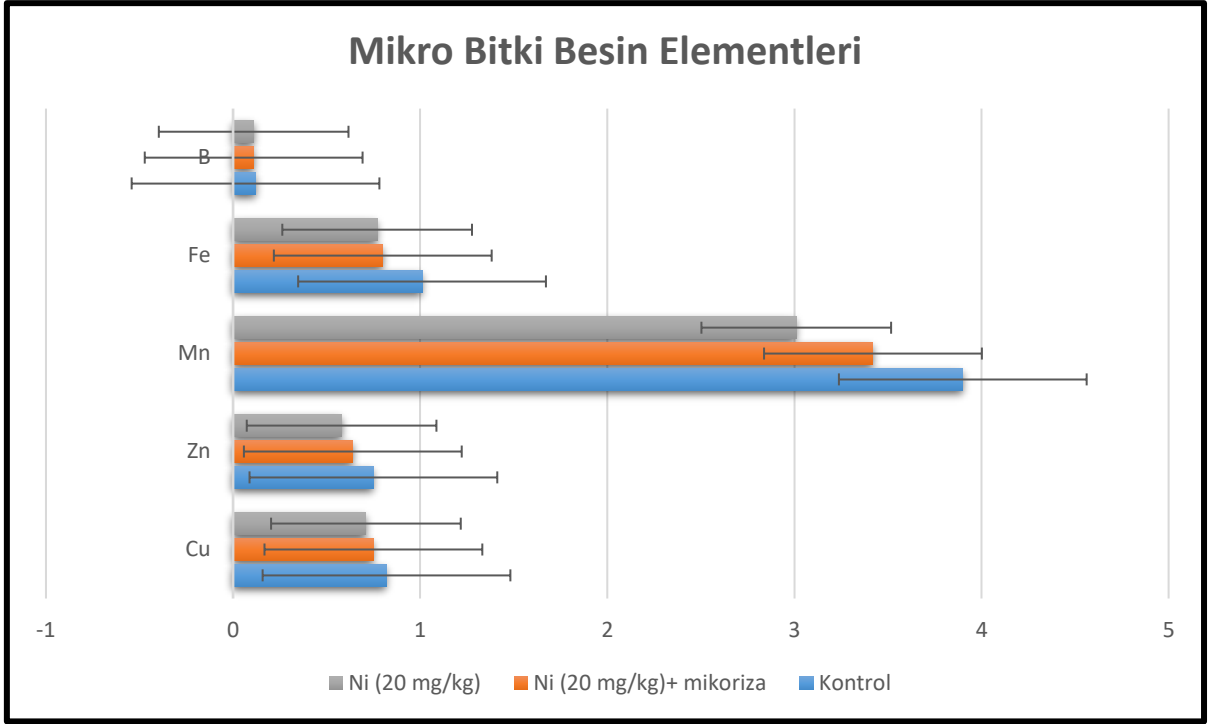
Çizelge 4.12’de ve Şekil 4.6’da Ni ağır metali ile kirlenmiş topraklarda hasat sonrası toprak içeriğinde bulunan mikro bitki besin element değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.12. Nikel (mikoriza +/-) ağır metali uygulanan toprak örneklerinde mikro besin elementi içerikleri

Mikro elementler (mgkg ⁻¹)	Kontrol	Ni (20 mgkg ⁻¹)+ mikoriza	Ni (20 mgkg ⁻¹)
Cu	0,82±0,01a	0,75±0,01b	0,71±0,01c
Zn	0,75±0,01a	0,64±0,01b	0,58±0,01c
Mn	3,90±0,01a	3,42±0,02b	3,01±0,01c
Fe	1,01±0,01a	0,80±0,01b	0,77±0,01b
B	0,12±0,01öd	0,11±0,01öd	0,11±0,01öd

Değerler üç tekerrür ortalaması ± standart hata olarak verilmiştir. Farklı harfler (a,b,c) p<0,05’te önemi gösterir, öd: önemli değil.

Çizelge 4.12 ve Şekil 4.6 mikro bitki besin elementleri açısından değerlendirildiğinde, topraklardaki bakır içeriğinin kontrol saksılarında sınır değerlerinin üzerinde olduğu görülmektedir. Nikel ağır metali uygulaması sonucunda, bakır içeriğinde %5 düzeyinde istatistiksel olarak azalma olduğu görülmektedir. Ancak mikoriza uygulanan saksılarda bakır ile nikel arasındaki antogonist ilişkinin kirlenmiş topraklara göre daha az olduğu görülmektedir. Çinko elementi içeriğinin, kontrol saksılarında yeterli düzeyde olduğu (0,75 mgkg⁻¹) ancak nikel uygulaması sonucunda olumsuz etkilenerek (0,58 mgkg⁻¹) istatistiksel olarak %5 düzeyinde anlamlı olduğu belirlenmiştir. Mikoriza uygulanan saksılarda (0,64 mgkg⁻¹) bu düşüşün daha az olduğu görülmektedir. Fe elementi içeriğinin kontrol saksılarına göre etkilendiği, kirlenmiş topraklara göre farklı gruplarda yer aldığı ve olumsuz olarak etkilendiği tespit edilmiştir. Bor içerikleri ise istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur.



Şekil 4.6. Kirlenici olarak Ni ve doz olarak mikoriza (+/-) uygulaması yapılan toprak örneklerine ait mikro besin elementi içerikleri, (mgkg⁻¹)

Bitkiler topraktaki besin elementlerine doğrudan erişememekle birlikte, yalnızca toprak çözeltisinden elde edebilmektedirler. Toprak çözeltisinden bitki besin maddelerinin alımı şu yollarla gerçekleşmektedir: kök tarafından tutulma, kütle akışı ve difüzyon. Ni²⁺ iyonunun absorpsiyonu ve translokasyonu sıcaklık ve besin çözeltilerinin havalandırılması ile ilişkilidir (Aschmann ve Zasoski,1987). Toprakta aşırı nikel toksisitesi, bitkide yanal kök gelişimi, fotosentez, mineral beslenme gibi aktiviteleri inhibe etmekle birlikte bu davranışı Ni ağır metalini gümüş (Ag), kurşun (Pb), çinko (Zn), bakır (Cu), kobalt (Co) ve cıva (Hg) gibi diğer ağır metallere farklı kılmaktadır (Bhalerao vd., 2015).

4.4. Nane Denemesinde Elde Edilen Sonuçlara Göre Makro-Mikro Element İçerikleri

Fitoremediasyon kirlilik gideriminde yeni bir teknoloji olmakla beraber, yöntemin esasını hiperakümülatör bitkiler oluşturmaktadır. Bu nedenle bitkilerin akümülyasyon kapasitelerinin ve hangi kirlenicilerin bitkilerin hangi aksamında biriktiği yöntemin daha çok uygulanması konusunda yön vereceği düşünülmektedir. Yöntemde kullanılmak üzere, tıbbi ve aromatik bir bitki olması nedeniyle ve birçok alanda yaygın olarak kullanılabilmesi, ve kolay yetiştirilebilir olması sebebiyle nane bitkisi tercih edilmiştir. Nane bitkisinin Zn ağır metalini açısından akümülatör bir bitki olduğu (Çizelge 4.5) belirlenmiştir. Aşağıdaki başlıklarda,

akümülatör kapasitesini etkileyen en önemli faktörlerden makro ve mikro bitki besin elementleri ile ilişkisi değerlendirilmiştir.

4.4.1. Ağır Metal ve Mikoriza Uygulamaları Sonrasında Bitkinin Topraküstü Aksamındaki Makro-Mikro Besin Elementi İçerikleri

Çinko (+/- mikoriza) uygulanan topraklarda yetiştirilen nane (*Mentha piperita* L.) bitkisi hasat sonrasında gerekli analizlere tabi tutulmuştur. Çizelge 4.13'te ve Şekil 4.7'de bitkiye ait bazı makro bitki besin elementi içerikleri verilmiştir.

Çizelge 4.13. Çinko (mikoriza +/-) ağır metali uygulanan nane bitkisinin topraküstü aksamındaki makro besin elementi içerikleri

Makro elementler (%)	Kontrol	Zn (10 mgkg ⁻¹)+ mikoriza	Zn (10 mgkg ⁻¹)
N	4,86±0,02a	4,50±0,03b	4,95±0,07a
P	0,32±0,01b	0,38±0,01a	0,35±0,02ab
K	1,56±0,01a	1,61±0,02a	1,38±0,03b
Ca	6,51±0,22a	5,48±2,95b	6,42±1,72a
Mg	0,92±0,01öd	0,85±0,03öd	0,86±0,02öd

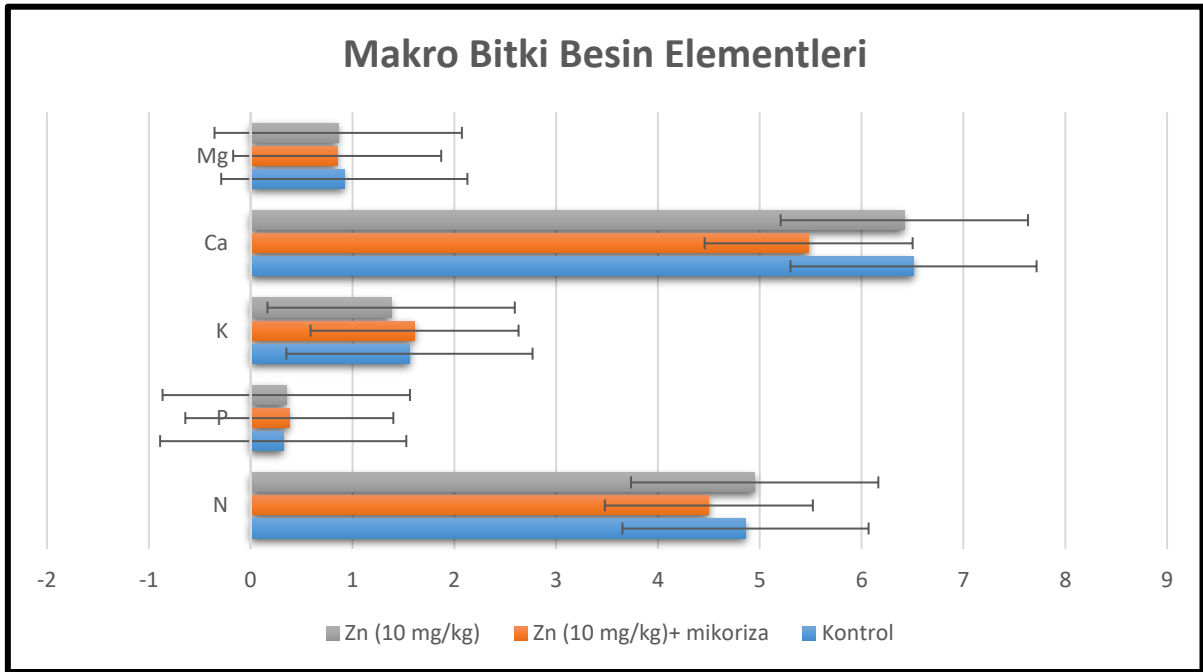
Değerler üç tekerrür ortalaması ± standart hata olarak verilmiştir. Farklı harfler (a,b,c) p<0,05'te önemi gösterir, öd: önemli değil.

Çizelge 4.13 ve Şekil 4.7 değerlendirildiğinde, makro bitki besin elementlerinden potasyum elementi çinko toksisitesinden olumsuz etklenirken magnezyum makro bitki besin elementi çinko toksisitesinden etkilenmemiştir. Çinko ve potasyum elementleri arasındaki rekabet sonucunda bitkide olması gereken sınır değerlerinin (Çizelge 4.13) altında olduğu belirlenmiştir.

Potasyum elementi bitkilerde birçok enzim aktivitesinde rol oynamakla beraber, bitkide şeker, protein ve nişasta içeriklerinin oluşmasında ve fotosentezin gerçekleşmesinde önemli role sahiptir. Bitkide fosfor elementi, K elementinin bitki tarafından alınmasında görev alır. Bitkinin dış etkenlere karşı savunma mekanizmasını güçlendirir ve direncini artırır (Kacar ve Katkat, 2010; Bolat ve Kara, 2017) Bu çalışmada elde edilen verilere göre, P ve K element

içeriklerine bakıldığında, mikoriza uygulaması topraküstü aksamda birikimi olumlu yönde etkilemiştir. Duncan testine göre %5 düzeyinde önemli bulunmuştur.

Bazı aromatik ve tıbbi ürünler, kirlenmiş topraktan ağır metaller biriktirme yeteneğine sahiptir. Esansiyel yağ bitkilerinin metal stresine tepkisi değişkendir. *Lamiaceae* üyeleri, metalle kirlenmiş topraklarda kolayca büyümektedir. Deneyler, nane (*Mentha piperita*) ve fesleğenin (*Ocimum basilicum*) verimlerinin Cd, Pb ve Cu uygulamalarından etkilenmediğini ortaya koymuştur (Zheljazkov vd., 2006).



Şekil 4.7. Kirlenmiş toprak olarak Zn ve doz olarak mikoriza (+/-) uygulaması yapılan saksılarda yetiştirilen nane bitkisinin topraküstü aksamına ait makro besin elementi içerikleri, (%)

Azot bitki besin elementi, bitkilerde birçok yapısal, genetik ve metabolizma ile ilgili işlevlerin olmazsa olmaz yapı taşıdır ve bitkilerin büyüme ve gelişmesi için gereklidir (Hasan, Hayat, Ali ve Ahmad, 2008). Analiz sonuçları incelendiğinde Nane (*Mentha piperita* L.) bitkisinin topraküstü aksamında kontrol saksılarında ve mikoriza içermeyen Zn uygulaması yapılan saksılarda farklılık göstermezken, mikoriza uygulanan saksıda azalma gözlemlenmiştir. Bu durum Duncan testine göre %5 düzeyinde önemli bulunmuştur.

Bitkiler ototrof canlı olmasının en önemli getirilerinden birisi, gıdalarını kendileri üretebiliyor olmalarıdır. Bu süreçte, klorofil bitki besin elementleri açısından önemli görev yapmaktadır. Klorofilin merkez atomunu oluşturan Mg ve N dallanması ile görülmektedir ki bu elementlerin eksikliğinde biyokütle oluşumu azalmaktadır. Deneme sonuçları

göstermektedir ki, azot sonuçlarının sınır değerinin üstünde olması ve magnezyum elementinin de istatistiksel olarak önemsiz bulunması nane bitkisinin çinko ağır metali açısından akümülatör bir bitkidir. Zira ağır metallerin, toksisite sonucunda ilk yaptıkları işlev klorofilin merkez atomu olan Mg yerine geçerek klorofilin yapısını bozmak ve bitki gelişimini engellemektir (Karaman vd.,2012). Mg elementi başta P olmak üzere diğer besin elementlerinin alımını olumlu yönde etkilemektedir. Çok sayıda enzim aktivasyonunda rol oynamaktadır (Bolat ve Kara, 2017). Topraküstü aksamda gözlemlenen Mg miktarları Duncan testine göre %5 düzeyinde önemsiz bulunmuş, bitki büyümesi ve fotosentezi etkileyecek düzeylerde toksisiteye neden olmamıştır.

Kalsiyum bitki besin elementi hücre duvarı yapısına katılmakta ve yapısını düzenlemektedir. Diğer bitki besin elementlerinin bitki tarafından alımında ve toprakta bulunan toksik içeriklerin çökmesinde görev almaktadır (Bolat ve Kara, 2017). Topraküstü aksama bakıldığında, Ca değerleri mikoriza uygulanan saksılarda bir miktar azalma göstermiştir. Kontrol ve sadece Zn ağır metalinin uygulandığı saksılar arasında fark gözlemlenmemiştir.

Çinko (+/- mikoriza) uygulanan topraklarda yetiştirilen Nane (*Mentha piperita* L.) bitkisine ait bazı mikro bitki besin elementi içerikleri ise Çizelge 4.14'te ve Şekil 4.7'de verilmiştir.

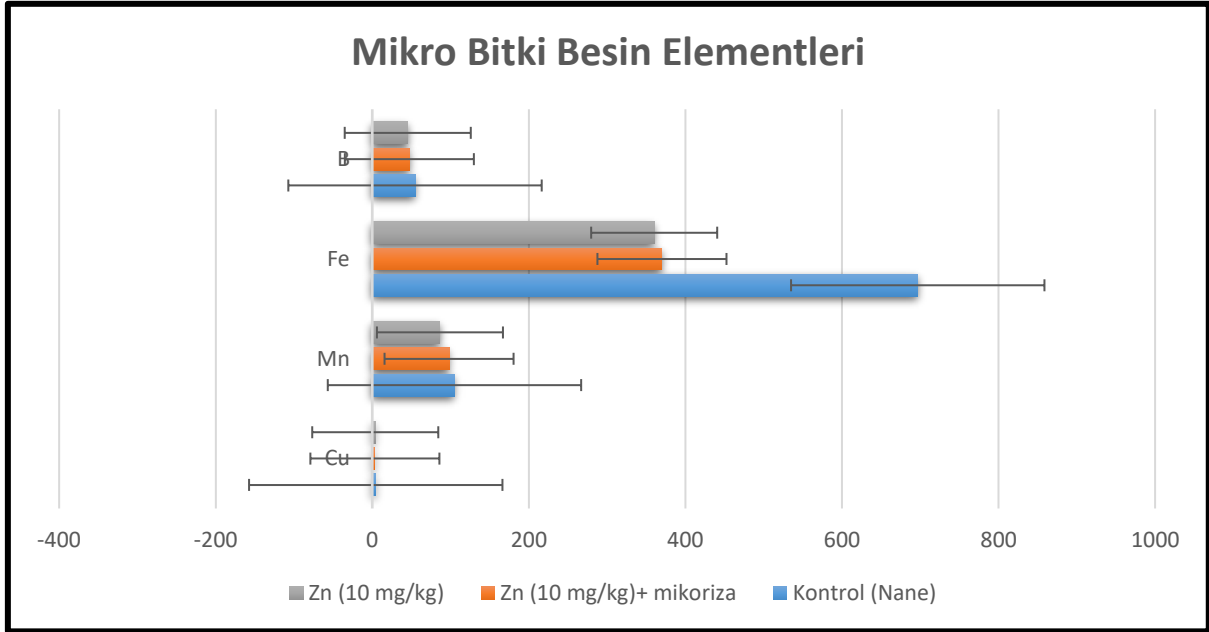
Çizelge 4.14. Çinko (mikoriza +/-) ağır metali uygulanan nane bitkisinin topraküstü aksamındaki mikro besin elementi içerikleri

Mikro elementler (mgkg ⁻¹)	Kontrol	Zn (10 mgkg ⁻¹)+ mikoriza	Zn (10 mgkg ⁻¹)
Cu	4,47±0,10b	3,36±0,07a	3,84±0,17c
Mn	105,02±0,30a	98,10±0,44b	86,44±0,61c
Fe	696,83±8,42a	370,06±20,48b	360,13±29,78b
B	54,63±1,74a	47,40±0,32b	45,33±2,32b

Değerler üç tekrür ortalaması ± standart hata olarak verilmiştir. Farklı harfler (a,b,c) p<0,05'te önemi gösterir, öd: önemli değil.

Nane bitkisinin topraküstü aksamındaki mikro besin elementleri incelendiğinde (Çizelge 4.14 ve Şekil 4.8), çinko toksisitesi sonucunda mikro besin elementlerinde n bakır ve mangan ile antagonist bir ilişki istatistiksel olarak %5 düzeyinde önemli olduğu tespit edilmiştir. Ancak bu olumsuzluğu nispeten mikoriza uygulamaları ile beraber giderilmiştir.

Demir ve bor mikro bitki besin elementlerinde ise uygulanan çinko ağır metali sinerjistik etki göstermiştir. Kontrol saksılarına göre istatistiksel olarak farklı gruplarda yer almakla birlikte, mikorizanın demir içeriklerinde fark yaratmadığı belirlenmiştir.



Şekil 4.8. Kirlenici olarak Zn ve doz olarak mikoriza (+/-) uygulaması yapılan saksılarda yetiştirilen nane bitkisinin topraküstü aksamına ait mikro besin elementi içerikleri, (mgkg⁻¹)

Lajayer vd. (2016), gerçekleştirdikleri bir çalışmada, farklı bakır (Cu; 0, 5, 25 mgkg⁻¹ toprak) ve çinko (Zn; 0, 10, 50 mgkg⁻¹ toprak). konsantrasyonlarına maruz kalan pennyroyal (*Mentha pulegium* L.) bitkisinin büyüme, besin durumu ve uçucu yağ içeriği ve bileşimindeki değişiklikleri araştırmışlardır. Analizler sonucunda, en yüksek bitki boyu, uçucu yağ içeriği ve veriminin 5 ve 10 mgkg⁻¹ Cu ve Zn ile muamele edilen bitkilerde elde edildiğini ortaya koymuştur. Düşük Zn konsantrasyonu Cu, Fe, Mn ve K alımı üzerinde sinerjik bir etki gösterirken, fosfor (P) durumu üzerinde karşıt etki ortaya çıkarmıştır. Ancak 5 mgkg⁻¹'deki Cu, kök ve sürgün dokularındaki Fe, Mn ve P içeriğine olumlu etki yapmıştır.

4.4.2. Ağır Metal ve Mikoriza Uygulamaları Sonrasında Bitkinin Kök Bölgesindeki Makro-Mikro Besin Elementi İçerikleri

Çinko alımları yönünden bitkiler arasında önemli farklılıklar görülmektedir. Bitki kökleri tarafından alınan çinko çoğunlukla kitle akışı yöntemiyle olduğu bilinmektedir. Çinko alımını etkileyen etmenlerin başında, bitkisel etmenler (kök büyümesi, yüzey genişliği, H⁺ ve organik asitlerin salgılanması, rizosfer koşulları, bitki besin elementler noksanlıklarının neden

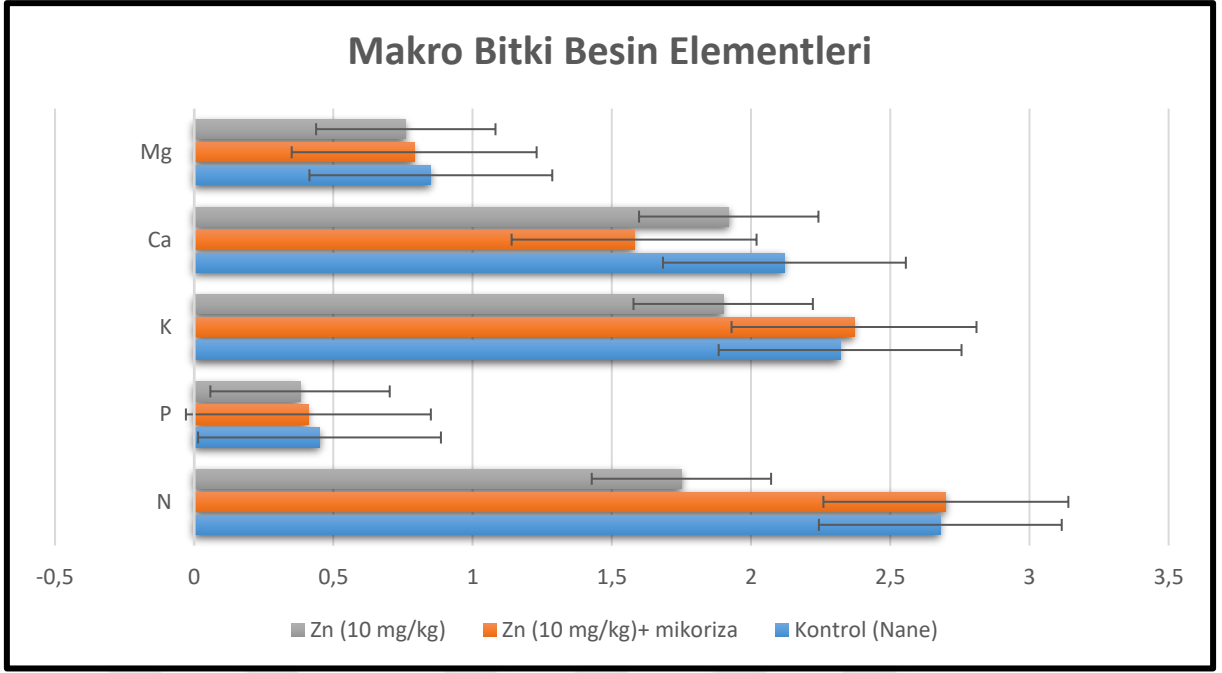
olduğu değişimler, Fe noksanlığı ve mikoriza) yer almaktadır (Kacar ve Katkat, 2010). Çinko (+/- mikoriza) uygulanan topraklarda yetiştirilen nane (*Mentha piperita* L.) bitkisinin kök bölgesine ait bazı makro bitki besin elementi içerikleri ise Çizelge 4.15'te ve Şekil 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.15. Çinko (mikoriza +/-) ağır metali uygulanan nane bitkisinin kök bölgesindeki makro besin elementi içerikleri

Makro elementler (%)	Kontrol	Zn (10 mgkg ⁻¹)+ mikoriza	Zn (10 mgkg ⁻¹)
N	2,68±0,44b	2,70±0,02b	3,75±0,02a
P	0,45±0,01a	0,41±0,01b	0,38±0,01b
K	2,32±0,14a	2,37±0,03a	1,90±0,02b
Ca	2,12±0,04a	1,58±0,04c	1,92±0,06b
Mg	0,85±0,06öd	0,79±0,02öd	0,76±0,01öd

Değerler üç tekerrür ortalaması ± standart hata olarak verilmiştir. Farklı harfler (a,b,c) p<0,05'te önemi gösterir, öd: önemli değil.

Nane bitkisinin kök aksamındaki makro bitki besin elementlerinin çinko toksisitesi ile ilişkisi incelendiğinde (Çizelge 4.15 ve Şekil 4.9) bu bölgede, Mg hariç diğer makro bitki besin elementleri istatistiksel olarak %5 düzeyinde önemli bulunmuş ve Duncan tesitine göre de farklı sınıflarda yer almışlardır.



Şekil 4.9. Kirlotici olarak Zn ve doz olarak mikoriza (+/-) uygulaması yapılan saksılarda yetiştirilen nane bitkisinin kök bölgesine ait makro besin elementi içerikleri, (%)

Arbusküler mikorizal mantarlar (AMF), çoğu mahsul türünün kökleriyle ilişki kurmaktadır. Daha iyi bitki büyümesi ve üretkenliği için bitkiye katkı sağlayan yapılardır (Bowles vd., 2017).

Tran ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada, *Rhizophagus irregularis*'in düzenli olarak aşılama yapıldığında, tüm bitkilerin köklerinde, tüm toprak Zn konsantrasyon seviyelerinde kolonize olduğu tespit edilmiştir. Buna karşılık, aşılınmamış bitkilerde mikorizal kolonizasyon tespit edilmemiştir. Toprak Zn konsantrasyonu, diğer tüm Zn uygulamalarına kıyasla denemede en yüksek doz olan 150 mgkg^{-1} Zn uygulamasında, her iki ölçümde de makarnalık buğdayda mikoriza kolonizasyon yüzdesi ve kolonize kök uzunluğunu önemli ölçüde etkilemiştir (Tran vd., 2019).

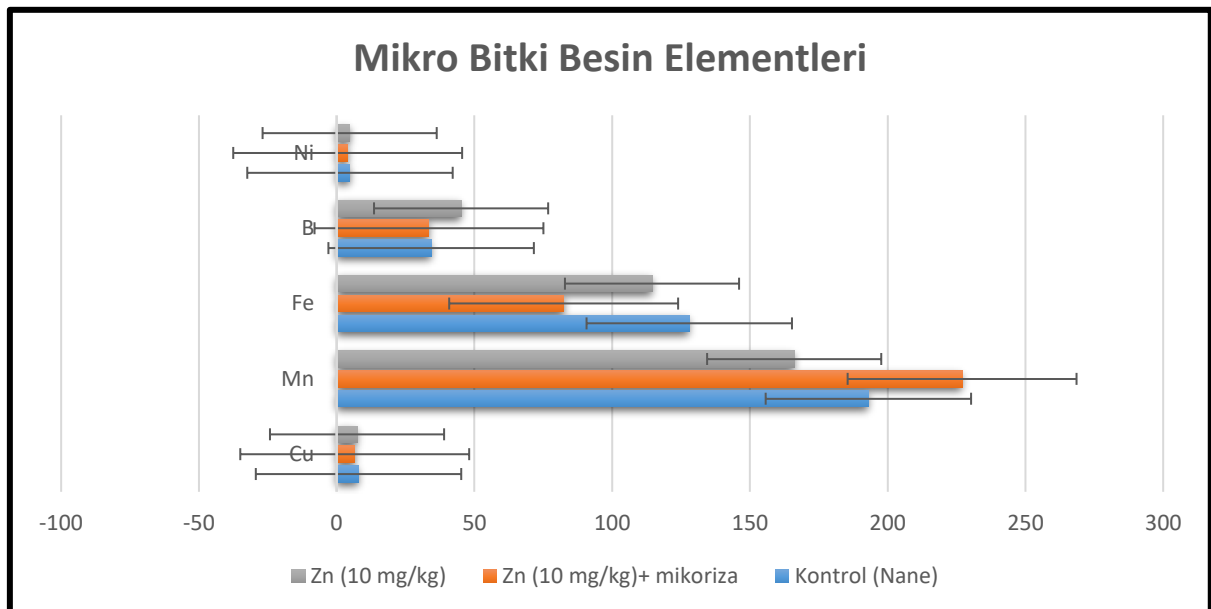
Çinko (+/- mikoriza) uygulanan topraklarda yetiştirilen nane (*Mentha piperita* L.) bitkisinin kök bölgesine ait bazı mikro bitki besin elementi içerikleri ise Çizelge 4.16'da ve Şekil 4.9' da verilmiştir.

Çizelge 4.16. Çinko (mikoriza +/-) ağır metali uygulanan nane bitkisinin kök bölgesindeki mikro besin elementi içerikleri

Mikro elementler (mgkg ⁻¹)	Kontrol	Zn (10 mgkg ⁻¹)+ mikoriza	Zn (10 mgkg ⁻¹)
Cu	7,94±0,07a	6,57±0,08c	7,40±0,04b
Mn	193±1,21b	227,01±1,48a	166,07±2,79c
Fe	127,99±72,66a	82,4±49,80b	114,47±10,27a
B	34,30±1,81b	33,51±1,45b	45,17±0,12a

Değerler üç tekrür ortalaması ± standart hata olarak verilmiştir. Farklı harfler (a,b,c) p<0,05 'te önemi gösterir, öd: önemli değil.

Hasat sonrasında bitki kök aksamında mikro bitki besin elementleri (Çizelge 4.16 ve Şekil 4.10) daha çok mikoriza uygulanan saksılarda farklılık göstermiştir. Bu durum %5 düzeyinde önemli bulunmuştur. Mn bitki besin elementi hariç diğer mikro bitki besin elementlerindeki azalışın mikoriza ve bitki tarafından kullanılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Tüm uygulama saksılarına uygulanan EDTA şelatöründe mikro bitki besin elementlerinin çözünürlüğünü artırmıştır. Çinko toksisitesi oluşan saksıları kontrol saksıları ile karşılaştırıldığında, Fe, Mn, Cu ve B mikro bitki besin elementlerinde azalışa neden olmuştur. Bu durumda %5 düzeyinde önemli bulunmuştur.



Şekil 4.10. Kirletici olarak Zn ve doz olarak mikoriza (+/-) uygulaması yapılan saksılarda yetiştirilen nane bitkisinin kök bölgesine ait mikro besin elementi içerikleri, (mgkg⁻¹)

Farklı seviyelerde bakır (0, 5 ve 25 mgkg⁻¹) ve çinko (Zn; 0, 10 ve 50 mgkg⁻¹) ve bunların mikro besinlerin (Cu, Zn, Fe ve Mn) ve makro besinlerin alımı üzerine kombinasyonları (K ve P), sera koşullarında kireçli toprakla yapılan bir saksı deneyinde tatlı fesleğen (*Ocimum basilicum* L.) bitkisi ile test edilmiştir. Yüksek konsantrasyondaki Cu ve Zn'nin tek başına veya kombinasyon halinde sürgündeki Cu, Zn, Fe, Mn ve P konsantrasyonlarını olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. Kullanılan metallerin düşük seviyeleri, kontrole kıyasla mikro ve makro elementlerin konsantrasyonunu artırmıştır. Tüm uygulamalarda kökte Cu, Zn, Fe, Mn ve P birikiminin sürgünden daha fazla olduğu belirlenmiştir (Lajayer vd.,2013).

4.4.3. Ağır Metal ve Mikoriza Uygulamaları Sonucunda Bitkinin Yetiştirildiği Toprak Örneklerindeki Makro-Mikro Besin Elementi İçerikleri

En hareketli besin elementleri Cd, Zn ve Mo'yu içerirken, en az hareketli elementler Cr, Ni ve Pb besin elementleri olarak bilinmektedir. Yüksek asidik topraklarda, metalik elementlerin hareketliliği, nötr ve alkali reaksiyonlu topraklara göre çok daha yüksektir. Oksidasyon potansiyeli - toprağın azaltılması, toplam element içeriğine göre biyolojik döngüye girebilen hareketli bir element biçiminde katılımı önemli ölçüde belirlemektedir. Bitkiler, kök sistemi yoluyla ağır metalleri makro besinler ve mikro besinler gibi topraktan çekmektedir. Toprakta yetersiz miktarda mikro besin bulunması, genellikle bitkilerde birçok ağır metalin aşırı birikmesine neden olmaktadır. Toprakta uygun şekilde dengelenmiş ve iyi seçilmiş besin seviyesi, düşük ağır metal içeriği ile yüksek verim sağlayabilmektedir. Aşırı ağır metallerin neden olduğu stres, bitkilerin metabolizmasındaki bozuklukların başlangıcıdır ve makro ve mikro besinlerin toplanması, taşınması ve asimilasyonunda bozulmalara yol açabilmektedir .

Biyobozunur kirlilik çamuru, sulama suyu, pestisitler, kireçleme topraklardaki birincil ağır metal kaynaklarıdır. İnorganik gübreler, fosfatlı gübreler, fungusitler farklı Ni, Cd, Cr, Pb seviyelerine sahiptir. Kireçleme, nitratlı gübreler ve kompost atıkları ile karşılaştırıldığında ağır metallerin seviyesini daha çok yükseltmektedir (Kumari vd.,2020).

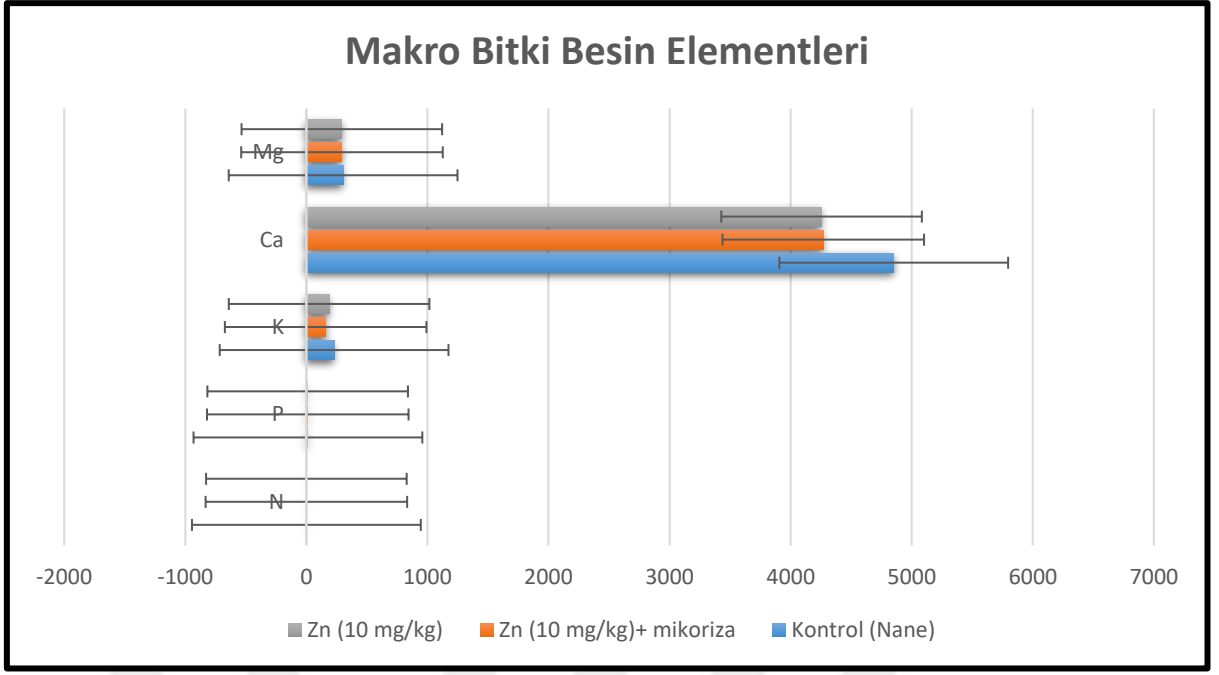
Bu denemede, Zn (+/- mikoriza) uygulanan topraklarda yetiştirilen nane (*Mentha piperita* L.) bitkisinin toprak örneklerinden elde edilen bazı makro bitki besin element verileri Çizelge 4.17'de ve Şekil 4.11'de verilmiştir.

Çizelge 4.17. Çinko (mikoriza +/-) ağır metali uygulanan toprak örneklerinde makro besin elementi içerikleri

Makro elementler (%)	Kontrol	Zn (10 mgkg ⁻¹)+ mikoriza	Zn (10 mgkg ⁻¹)
N	0,18±0,01a	0,17±0,01ab	0,16±0,01b
P	13,04±0,32a	11,96±0,13a	10,74±0,49b
K	229,20±0,81a	159,55±0,43c	187,85±1,03b
Ca	4851,74±26,64a	4269,80±36,55b	4255,63±16,84b
Mg	303,72±1,64a	294,41±2,20b	293,11±1,44b

Değerler üç tekrür ortalaması ± standart hata olarak verilmiştir. Farklı harfler (a,b,c) $p < 0,05$ 'te önemi gösterir, öd: önemli değil.

Çizelge 4.17 ve Şekil 4.11 değerlendirildiğinde, hasat sonrası topraktaki makro bitki besin elementi içerikleri toprağın ana kimliği ile paralel olarak sonuçlar vermiştir. Toprak organik maddes içeriğinin düşük olması, toprak azot içeriklerinin de düşük olmasına etken olmakla beraber; kireç içeriğinin yüksek olması kalsiyum içeriğinin yüksek olmasında rol oynamıştır. Ancak, oluşturulan çinko toksisitesi ve uygulanan mikoriza sonucunda kontrol saksılarına göre istatistiksel olarak %5 düzeyinde önemli değişimler belirlenmiştir. Bu değişimler, potasyum elementi hariç diğer elementlerde mikoriza uygulanan saksılarda daha yüksek olarak tespit edilmiştir. Bu durumda toprağın verimlilik açısından mikoriza uygulamasının bitki besin elementlerinin alımını pozitif olarak etkilediğini göstermektedir.



Şekil 4.11. Kirletici olarak Zn ve doz olarak mikoriza (+/-) uygulaması yapılan toprak örneklerine ait makro besin elementi içerikleri, (%)

Arbusküler mikorizal mantarların (AMF) gıda güvenliğindeki rolü, özellikle de AMF'nin gıda mahsullerinin verimini ve fosfor, çinko (Zn) ve demir (Fe) dahil olmak üzere mineral beslenmesini artırma potansiyeli konusunda giderek artan bir farkındalık gözlemlenmektedir. Tran ve arkadaşları, AM mantarı ve toprak Zn konsantrasyonunun gıda parçalarının üretkenliği ve beslenme kalitesi üzerindeki etkisini anlamak için, beş farklı toprak Zn konsantrasyonunda *Rhizophagus* aşılı ve aşısız durum buğdayının büyüme ve beslenme tepkilerini incelemiştir. Bitkilerin topraktaki Zn konsantrasyonunun değişikliğine verdikleri büyüme ve besin tepkilerinin, AMF'ye verilen tepkilerden daha güçlü olduğu gözlemlenmiştir. AMF aşılmasının makarnalık buğday tanesindeki fitik asit (PA) konsantrasyonunu arttırdığı, ancak Zn ve Fe konsantrasyonu üzerinde hiçbir etkisi olmadığı tespit edilmiştir. Bu araştırma, düşük (mevcut) fosfor (P) ve çinko (Zn) konsantrasyonlarına sahip topraklarda AMF'nin, fitik asit konsantrasyonundaki artış nedeniyle buğdayın gıda kalitesini ve dolayısıyla Zn ve Fe'nin biyoyararlanımını azaltabileceğini düşündürmektedir (Tran vd., 2019).

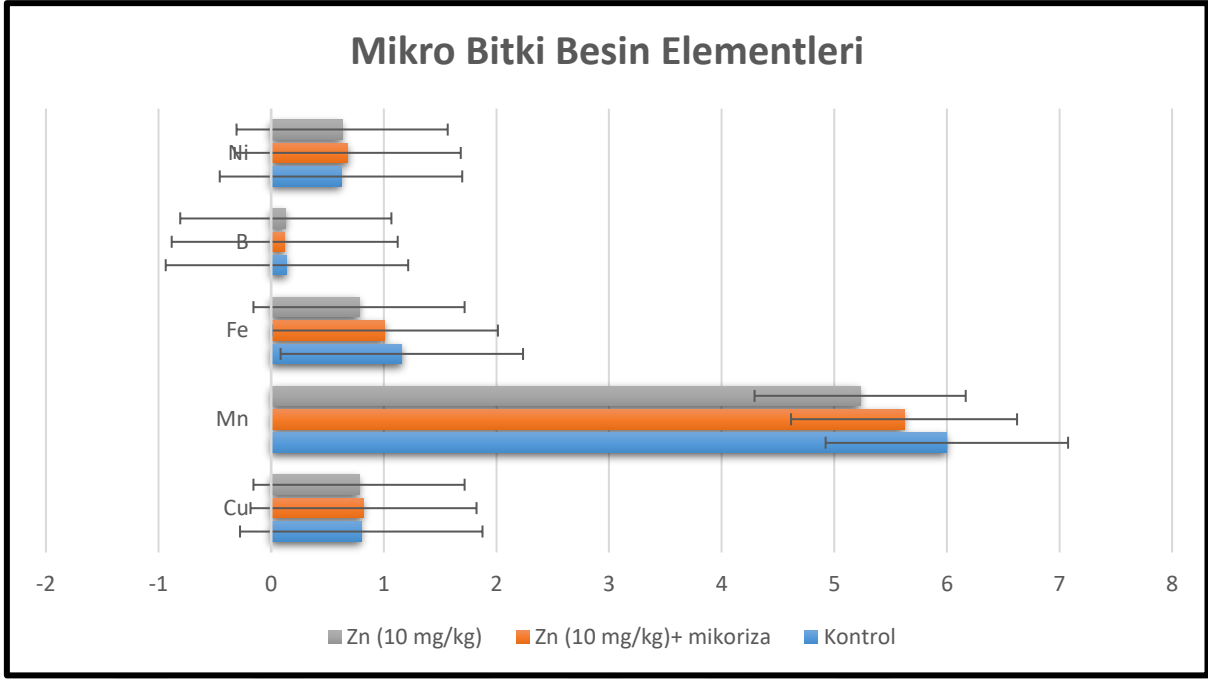
Yapılan denemede, Zn (+/- mikoriza) uygulanan topraklarda yetiştirilen nane (*Mentha piperita* L.) bitkisinin toprak örneklerinden elde edilen bazı mikro bitki besin element içerikleri Çizelge 4.18'de ve Şekil 4.12'de verilmiştir.

Çizelge 4.18. Çinko (mikoriza +/-) ağır metali uygulanan toprak örneklerinde mikro besin elementi içerikleri

Mikro elementler (mgkg ⁻¹)	Kontrol	Zn (10 mgkg ⁻¹)+ mikoriza	Zn (10 mgkg ⁻¹)
Cu	0,80±0,01ab	0,82±0,01a	0,78±0,01b
Mn	6,00±0,43a	5,62±0,23ab	5,23±0,03b
Fe	1,16±0,02a	1,01±0,05b	0,78±0,01c
B	0,14±0,00a	0,12±0,01b	0,13±0,00ab

Değerler üç tekrür ortalaması ± standart hata olarak verilmiştir. Farklı harfler (a,b,c) p<0,05 'te önemi gösterir, öd: önemli değil.

Çizelge 4.18 ve Şekil 4.12'ye göre yapılan fitoremediasyon yönteminin uygulanan topraklardaki çinko toksisitesinin giderimi sonucunda mikro bitki besin elementlerinin ilişkileri değerlendirildiğinde, bakır içeriklerinin yapılan çinko toksisitesi ve mikoriza uygulaması sonucunda sinerjistik bir etki gösterdiği görülmektedir. Bu durum istatistiksel olarak %5 düzeyinde önemli bulunmuştur. Mangan içeriklerinde ise toksisitenin olumsuz etkisi mikoriza uygulaması ile azaltılmıştır. Demir bitki besin elementi, toprak içeriklerinde yeterli olmakla beraber (1,16 mgkg⁻¹) yapılan Zn uygulaması sonucunda olumsuz (0,78 mgkg⁻¹) etkilenmiştir. Bu durum mikorizalı saksılarda (1,01 mgkg⁻¹) nispeten daha az etki göstermiştir. Bor bitki besin elementinin toprak ana kimliğinde de yetersiz olması sebebiyle, hasat sonrası saksılardaki topraklarda da sınır değerinin altında belirlenmiştir.



Şekil 4.12. Kirletici olarak Zn ve doz olarak mikoriza (+/-) uygulaması yapılan toprak örneklerine ait mikro besin elementi içerikleri, (mgkg^{-1})

Toprakta biriken metalik elementler, toprakta yaşayan mikroorganizmaların büyümesini engelleyerek temel yaşam fonksiyonlarının ve özellikle organik maddenin ayrışma ve dönüşüm süreçlerinin bozulmasına yol açmaktadır. Toprak kirlenme süreçleri sabittir, ancak çevrenin diğer unsurlarıyla karşılaştırıldığında, kirleticiler için bir tampon görevi görerek kendilerini savunma konusunda en yetenekli olanlardır. Bozucu faktörlerin baskısı ile ilgili olarak kirlenmeye karşı direnç, arazinin fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerine borçludur. Toprağın direnci biyokimyasaldır, çünkü bitkilerin kimyasal olarak aktif kirleticileri emme ve nötralize etme yeteneğinden kaynaklanır (Fijalkowski vd., 2012).

Ogbonna vd. (2013), gerçekleştirdikleri çalışmada, ağır metallerin topraktaki dağılımını ve daha sonra belirli bir bölgede zirai kimyasallarla kirlenmiş alanda bitkilerde bu ağır metallerin birikimlerini değerlendirmişlerdir. Toprak ve bitki örneklerinde çinko (Zn), krom (Cr) ve kadmiyum (Cd) analizleri yapılmıştır. En yüksek Zn ($251,50 \text{ mgkg}^{-1}$) ve Cd ($61,33 \text{ mgkg}^{-1}$) konsantrasyonları 0-10 cm toprak derinliğinde elde edilmiştir. Topraktaki Cd, Cr ve Zn seviyeleri 27,97–61,33, 24,97–45,43 ve $148,57\text{--}251,50 \text{ mgkg}^{-1}$ ve *B. nitida*'daki konsantrasyonları sırasıyla 16,18–27,13, 97,99–164,07 ve $0,10\text{--}16,52 \text{ mgkg}^{-1}$ olarak tespit edilmiştir. Toprakta Cd - Cr ile Cd - Zn arasında ve ayrıca bitkilerde Cd - Cr arasında önemli korelasyonlar olduğu belirlenmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüz tarımsal faaliyetlerinin temelini oluşturan topraklar önündeki en önemli sorunların başında toprak kirliliği gelmektedir. Ağır metallerin neden olduğu kirlilik, biyolojik bir sistem içinde biriktiğinde insan ve diğer organizmalar için sağlık tehlikeleri nedeniyle son yıllarda büyük endişe kaynağı olmuştur. Bu nedenle, arazi kirliliğinin giderilmesi büyük önem taşımaktadır. Fitoremediasyon, ağır metallerle kirlenmiş toprağı uygun maliyetli bir şekilde yeniden bitkilendirmek için başarılı bir etki azaltma önlemi olabilecek çevre dostu bir yaklaşımdır. Bu çalışmada, nikel (Ni) ve çinko (Zn) ağır metallerinin karalahana (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) ve nane (*Mentha piperita* L.) bitkilerinde nasıl alındığını, mikoriza destekli ve şelat destekli yaklaşımların uygulanması dahil olmak üzere fitostabilizasyon verimliliğine odaklanılmıştır.

Bu çalışmada elde edilen verilere göre, nane bitkisinin bazı agro-morfolojik özelliklerine bakıldığında topraküstü bitki kuru-yaş ağırlığı ve bitki kök kuru-yaş ağırlığı istatistiksel açıdan önemli bulunmuştur. Bitki kök boyu, bitki boyu ve klorofil içeriği değeri (SPAD) her iki bitkide de ağır metal kirliliğinden etkilenmemiş ve sonuçlar istatistiksel olarak anlamsız bulunmuştur.

Nikel ile kontamine olmuş topraklarda yetiştirilen karalahana bitkisinin deneme sonunda elde edilen agro morfolojik ölçümleri değerlendirildiğinde, bitki kök boyu, bitki boyu ve SPAD değerlerinin uygulanan kirleticiden ve mikoriza uygulanmasından etkilenmediği tespit edilmiştir. Bu durum %5 düzeyinde istatistiksel olarak anlamsız bulunmuştur ve bitkinin vejetatif aksamındaki gelişimi olumsuz etkilenmediğini göstermektedir. Ancak mikoriza uygulanan saksılarda bitki kontrol ve sadece ağır metal uygulanan saksıya göre daha iyi gelişim göstermiştir.

Nikel ağır metali uygulanan saksılarda, Ni içeriklerinin karalahana (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) bitkisinin en fazla mikoriza uygulanan saksılarda ve kök aksamında biriktiği tespit edilmiştir. Uygulamalar arasında karşılaştırma yapıldığında, mikorizanın topraktaki ekstrakte edilebilir nikel içeriğini artırdığı görülmektedir. Yenilebilir bir bitki olan karalahana bitkisinin kök bölgesinde birikim gerçekleştirilmesi, nikel ağır metalinin bu bitki aracılığıyla besin zincirine dahil olmasını engellemektedir.

Sabit dozda uygulanan çinko uygulaması sonucunda, nane (*Mentha piperita* L.) bitkisinin kök aksamında biriktiği ($80,70 \text{ mgkg}^{-1}$) ve mikoriza uygulamasının ağır metalin bitki tarafından alımı konusunda istatistiksel olarak %5 düzeyinde anlamlı bir farklılık oluşturmadığı belirlenmiştir. Bitkinin kök bölgesinde birikim gerçekleştirmesi ve topraküstü aksama aktarmaması, tıbbi ve aromatik bir bitki olan nanenin esansiyel yağ içeriğine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Uygulanan nikel ağır metali ve mikorizanın, karalahana (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) bitkisinin topraküstü aksamındaki bazı makro ve mikro bitki besin elementi içerikleri üzerindeki etkisi incelendiğinde, nikel ağır metalinin azot (N) bitki besin elementi ile sinerjistik etkileşime girdiği, bitkinin akümülatör kapasitesinde pozitif bir etki oluşturduğu, P, K ve Mg bitki besin elementlerinin ise nikel ağır metali ve mikoriza uygulamasından etkilenmediği belirlenmiştir. Mg elementi içeriğindeki değişimin önemsiz olması ve bitkinin SPAD değerlerinde de istatistiksel olarak bir farklılık görülmemesi birbirini destekler niteliktedir. Mikro bitki besin elementi içerikleri değerlendirildiğinde de, demir, bakır ve bor mikro besin elementleri %5 düzeyinde istatistiksel olarak önemli bulunmuştur. Mikoriza uygulaması, bitki besin elementlerinin topraküstü aksama aktarılmasını negatif yönde etkilemiştir. Demir (Fe) mikro besin elementi, en çok mikoriza uygulanan saksılardaki bitkilerde tespit edilmiştir, bakır ve bor mikro besin elementlerinin ise mikoriza uygulanmayan saksılara göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu farklılığın nedeninin mikoriza olduğu düşünülmektedir.

Karalahana (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) bitkisinin kök bölgesindeki makro ve mikro bitki besin elementleri değerlendirildiğinde, uygulanan 20 mgkg^{-1} nikel ağır metalinin bitkinin kök bölgesindeki makro elementler ile konsantrasyon fazlalığından dolayı bir rekabet içerisine girdiği belirlenmiştir. Mutlak gerekli olan makro bitki besin elementleri olumsuz olarak etkilenmişlerdir. Cu mikro besin elementi sadece kirletici uygulanan saksıda en yüksek değere ulaşmıştır. Uygulanan EDTA şelatörünün hem topraktaki bakır içeriğinin çözünürlüğünü artırması hem de nikel ağır metali ile pozitif etkileşimde bulunması bakır içeriğini olumlu etkilemiştir. Çinko içeriği kök bölgesinde kontrol saksılarına kıyasla azalma göstermiştir. Çinko ve nikel ağır metalinin antogonist etkileşimde bulunduğu, mikoriza uygulanan saksılarda mangan içeriğinin olumlu etkilendiği belirlenmiştir.

Karalahana (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) denemesinin toprak analizi değerlendirildiğinde, makro bitki besin elementi içeriklerinde azot makro bitki besin elementi dışındaki tüm besin elementleri yeterli bulunmuştur. Kalsiyum elementinin topraklarda yüksek

değere sahip olması, denemede kullanılan toprakların kireç içeriğinin yüksek olmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Toprak içeriği, mikro bitki besin elementleri açısından değerlendirildiğinde, topraklardaki bakır içeriği kontrol saksılarında sınır değerlerinin üzerinde olduğu, ve nikel ağır metali uygulanması süresince, bakır içeriğinde %5 düzeyinde istatistiksel olarak azalma olduğu görülmektedir. Çinko elementinde ise kontrol saksılarında yeterli düzeyde olduğu ancak nikel uygulaması sonucunda olumsuz etkilenerek istatistiksel olarak %5 düzeyinde olduğu belirlenmiştir. Mikoriza uygulanan saksılarda bu düşüşün daha az olduğu görülmüştür. Fe elementi içeriğinin kontrol saksılarına göre etkilendiği ancak, kirletici uygulanan saksılarla farklı gruplarda yer aldığı belirlenmiştir. Bor içerikleri ise istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur.

Nane (*Mentha piperita* L.) bitkisinin topraküstü aksamındaki makro bitki besin elementlerinden potasyum elementi çinko toksisitesinden olumsuz etkilenirken, magnezyum makro bitki besin elementi çinko toksisitesinden etkilenmemiştir. Çinko ve potasyum elementleri arasındaki rekabet sonucunda bitkide olması gereken sınır değerlerinin (Çizelge 4.13) altında olduğu belirlenmiştir. Potasyum ve fosfor element içeriklerine bakıldığında, mikoriza uygulaması topraküstü aksamda birikimi olumlu yönde etkilemiştir. Duncan testine göre %5 düzeyinde önemli bulunmuştur. Mikro bitki besin elementleri incelendiğinde çinko toksisitesi sonucunda mikro besin elementlerinden bakır ve mangan ile antagonist bir ilişkiye sahip olduğu, ancak bu olumsuzluk nispeten mikoriza uygulamaları ile beraber giderilmiştir. Demir ve bor mikro bitki besin elementlerinde ise uygulanan çinko ağır metali sinerjistik etki göstermiştir ve mikorizanın demir içeriklerinde fark yaratmadığı belirlenmiştir.

Nane (*Mentha piperita* L.) bitkisinin toprak altı aksamındaki makro bitki besin elementlerinin çinko toksisitesi ile ilişkisi incelendiğinde, Mg hariç diğer makro bitki besin elementleri istatistiksel olarak %5 düzeyinde önemli bulunmuş ve Duncan testine göre de farklı sınıflarda yer almışlardır. Mikro bitki besin elementi içerikleri, daha çok mikoriza uygulanan saksılarda farklılık göstermiştir. Bu durum %5 düzeyinde önemli bulunmuştur. Mn bitki besin elementi hariç diğer mikro bitki besin elementlerindeki azalışın mikoriza ve bitki tarafından kullanılmasından kaynaklandığı ve EDTA şelatörünün uygulandığı saksılarda, mikro bitki besin elementlerinin çözünürlüğünün arttığı belirlenmiştir. Fe, Mn, Cu ve B mikro bitki besin elementlerinde ise azalışa neden olmuştur. Bu durumda %5 düzeyinde önemli bulunmuştur.

Nane (*Mentha piperita* L.) bitkisinin yetiştirildiği topraktaki makro bitki besin elementi içerikleri toprağın ana kimliği ile paralel olarak sonuç vermiştir. Toprak organik maddesinin

düşük olması toprak azot içeriklerinin de düşük olmasına etken olduğu, kireç içeriğinin yüksek olması kalsiyum içeriğinin yüksek olmasında rol oynamıştır. Çinko toksisitesi ve uygulanan mikoriza sonucunda kontrol saksılarına göre istatistiksel olarak %5 düzeyinde önemli değişimler belirlenmiştir. Bu değişimler, potasyum elementi hariç diğer elementlerde mikoriza uygulanan saksılarda daha yüksek olarak tespit edilmiştir. Mikro bitki besin elementi içerikleri incelendiğinde, bakır bitki besin elementi mikoriza uygulaması sonucunda çinko ağır metali ile sinerjistik bir etki göstermiştir ve bu durum istatistiksel olarak %5 düzeyinde önemli bulunmuştur. Mangan içeriklerinde ise toksisitenin olumsuz etkisi mikoriza uygulaması ile azaltılmıştır. Demir bitki besin elementi, toprak içeriklerinde yeterli olmakla beraber yapılan Zn uygulaması sonucunda olumsuz etkilenmiş, ancak mikorizalı saksılarda nispeten daha az etki göstermiştir. Bor bitki besin elementinin toprak ana kimliğinde de yetersiz olması sebebiyle, hasat sonrası saksılardaki topraklarda da sınır değerinin altında belirlenmiştir.

Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, toprak kirliliğinin gideriminde yeni ve ekonomik bir yöntem olan fitoremediasyon yöntemlerinden biri olan fitoekstraksiyonda karalahana (*Brassica oleraea* L. *acephala*) ve nane (*Mentha piperita* L.) bitkilerinin kullanılabilir olduğu görülmüştür. Bitkilerin sırasıyla nikel ve çinko ağır metalleri için akümülyasyon gösterdiği, mikoriza uygulamasının bitkilerde genel olarak olumlu etki gösterdiği belirlenmiştir. Tarım alanlarına çeşitli yollar ile bulaşan Ni ve Zn ağır metallerinin kirliliğinin gideriminde bu bitkilerin kullanılması tavsiye edilmektedir. Ayrıca mikoriza ve şelat uygulamalarıyla, akümülyasyon kapasitesinin ve bitki dayanıklılığının artırılabilceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Adiloğlu, S. (2013). Tekirdağ İlinde Otoban Kenarlarında Bulunan Tarım Arazilerinde Bazı Ağır Metallerin Kirliliğinin Araştırılması. (Doktora Tezi), Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı, Tekirdağ.
- Adiloğlu, S., Açıkgöz, F. E., ve Gürkan, M. (2021). Altı Değerlikli Krom ile Kontamine Asit Tarım Topraklarının Kirliliğinin Giderilmesi İçin Fitoremediasyon Kullanımı. [Use of phytoremediation for pollution removal of hexavalent chromium-contaminated acid agricultural soils]. *Global NEST Journal*, 23(3), 400–406. <https://doi.org/10.30955/gnj.003433>
- Adiloğlu, S. (2020). Labada Bitkisinde Bakır İçeriği ile Bazı Ağır Metallerin İnteraksiyonu. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 23(4), 1078–1084. <https://doi.org/10.18016/ksutarimdog.vi.689443>
- Adiloğlu, S. (2021). Fesleğen (*Ocimum Basilicum* L.)’de Őelatlı Demir (EDDHA-Fe) Uygulamalarının Demir Birikimi ve Bazı Bitki Besin Öğeleri ile İlişkisi. [Relation of Chelated Iron (EDDHA-Fe) Applications with Iron Accumulation and Some Plant Nutrient Elements in Basil (*Ocimum Basilicum* L.)]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30(4), 3471–3479. <https://doi.org/10.15244/pjoes/128736>
- Adiloğlu, S. ve Göker, M. (2021). Fitoremediasyon: Mısır (*Zea mays* L.) Kullanılarak Altı Değerlikli Krom Ağır Metalinin Eliminasyonu. [Phytoremediation: elimination of hexavalent chromium heavy metal using corn (*Zea mays* L.)]. *Cereal Research Communications*, 49(1), 65–72. <https://doi.org/10.1007/s42976-020-00070-9>
- Adiloğlu, S., Adiloğlu, A., Açıkgöz, F. E., Yeniaras, T., Solmaz, Y. (2016). Phytoremediation of cadmium from soil using patience dock (*Rumex patientia* L.). *Analytical Letters*, 49(4), 601-606.
- Afonso, T., Demarco, C. F., Pieniz, S., Quadro, M. S., de Oliveira Camargo, F. A., ve Andrezza, R. (2021). Güney Brezilya'daki Bakır Madencilik Atıkları Alanında Ağır Metallerin Fitoremediasyonu için *Baccharis dracunculifolia* ve *Baccharis trimera*'nın Potansiyel Analizi [Potential Analysis of *Baccharis dracunculifolia* and *Baccharis trimera* for Phytoremediation of Heavy Metals in Copper Mining Tailings Area in Southern Brazil.] *Applied Biochemistry and Biotechnology*. <https://doi.org/10.1007/s12010-021->

- Afshari, F., Akhzari, D., ve Kargar, M. (2021). Toprak Ağır Metaller Kirliliği ve *Hordeum bulbosum* L'nin Fitoremediasyon Potansiyeli . [Soil Heavy Metals Pollution and Phytoremediation Potential of *Hordeum bulbosum* L .] Around Bituminous Mine , Ilam Province , Iran. *ECOPERSIA*, 9(3), 153–157.
- Al-Heety, L. F. D., Hasan, O. M., ve Mohammed Salah Al-Heety, E. A. (2021). Ramadi şehrinde jeneratörlerin yanında yetişen santrallerin ağır metal kirliliğinin değerlendirilmesi. [Assessment of heavy metal pollution of plants grown adjacent to power generators in Ramadi city.] *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 779(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/779/1/012023>
- Al-Homaidan, A. A., Al-Otaibi, T. G., El-Sheikh, M. A., Al-Ghanayem, A. A., ve Ameen, F. (2020). Bir makrofit *Phragmites australis*'te ağır metallerin birikmesi: Arap Yarımadası vadilerinde fitoremediasyona etkileri. [Accumulation of heavy metals in a macrophyte *Phragmites australis*: implications to phytoremediation in the Arabian Peninsula wadis.] *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(3). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8177-6>
- Alacabey, İ., ve Çelebi Zorer, Ş. (2020). Şalt Otu (*Panicum Virgatum*)'un Kurşun, Kadmiyum, Krom Toleransı ve Biriktirme Potansiyelinin Belirlenmesi. [Determination of Switchgrass (*Panicum Virgatum*)'s Lead, Cadmium, Crom Tolerance And Accumulation Potential.] *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(3), 2199–2206. <https://doi.org/10.21597/jist.731527>
- Ameh, G. I., Nwamba, H. O., Njom, V. S., ve Ofordile, E. C. (2020). Bazı Seçilmiş Baklagil Bitkileri Kullanılarak Ağır Metallerin Fitoremediasyonu. [Phytoremediation of Heavy Metals Using Some Selected Leguminous Crops.] *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 23(6), 1–7. <https://doi.org/10.9734/jabb/2020/v23i630159>
- Arıkan, E. N. (2021). *Bazı Ağır Metallerce Kirlenmiş Tarım Topraklarının Çim Bitkisi (Lolium Perenne L.) Kullanılarak Fitoremediasyon Yöntemleriyle Doğal Arıtımı*. T.C. Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi.
- Awasthi, S., Chauhan, R., ve Srivastava, S. (2022). Bitki besleme, büyüme ve stres toleransında faydalı ve temel eser ve ultra eser elementlerin önemi. [The importance of beneficial and

essential trace and ultratrace elements in plant nutrition, growth, and stress tolerance.] In *Plant Nutrition and Food Security in the Era of Climate Change* (pp. 27–46). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822916-3.00001-9>

Ayturan, Z. C., Kunt, F., ve Dursun, S. (2018). Metal Endüstrisi Atıksuları için Metal Biyobirikim/Toksisite Testi. [Metal Bioaccumulation/Toxicity Test for Metal Industry Wastewaters.] *International Journal of Environmental Pollution and Environmental Modelling*, 1(1), 1–5.

Azab, E., ve Hegazy, A. K. (2020). Ağır metallerle kirlenmiş toprağın fitoremediasyonunda *rhzyastricta* L. Bitkilerinin etkinliğinin izlenmesi. [Monitoring the efficiency of *rhzyastricta* L. Plants in phytoremediation of heavy metal-contaminated soil.] *Plants*, 9(9), 1–15. <https://doi.org/10.3390/plants9091057>

Azeez, N. M. (2021). Bazı ağır metallerin (Mn, cu, zn ve pb) mesane otu ve su mercimeği tarafından biyobirikimi ve fitoremediasyonu. [Bioaccumulation and phytoremediation of some heavy metals (Mn, cu, zn and pb) by bladderwort and duckweed.] *Biodiversitas*, 22(5), 2993–2998. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d220564>

Balafrej, H., Bogusz, D., Abidine Triqui, Z. El, Guedira, A., Bendaou, N., Smouni, A., ve Fahr, M. (2020). Bitkilerde çinko hiperbirikimi: Bir inceleme. [Zinc hyperaccumulation in plants: A review.] *Plants*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/plants9050562>

Bayrak, M. (2021). *Kimi Dış Mekan Süs Bitkilerinin Ağır Metal Alım Yeteneklerinin ve Fitoremediasyonda Kullanım Potansiyellerinin Belirlenmesi*. T.C. Bursa Uludağ Üniversitesi.

Barsukova, V.S. ve Gamzikova, O.I., (1999). Buğday Çeşitlerinde Nikel Fazlasının Element İçeriğine Etkisi. [Effects of Nickel Surplus on the Element Content in Wheat Varieties Contrasting in Ni Resistance]. *Agrokimiya*. 1: 80–85

Bempah, C. K., Boateng, J., Asomaning, J., ve Asabere, S. B. (2020). Bazı Gana Pazarlarından Bitkisel Bitkilerde Ağır Metal Kirlenmesi. [Heavy Metals Contamination in Herbal Plants From Some Ghanaian Markets.] *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 2020(vol. 10), 886–896.

Bhalerao, S. A., Sharma, A. S., ve Poojari, A. C. (2015). Bitkilerde Nikelin Toksisitesi.

[Toxicity of Nickel in Plants.] *International Journal of Pure and Applied Bioscience*, 3(2), 345–355. www.ijpab.com

Bhantana, P., Rana, M. S., Sun, X., Moussa, M. G., Saleem, M. H., Syaifudin, M., Shah, A., Poudel, A., Pun, A. B., Bhat, M. A., Mandal, D. L., Shah, S., Zhihao, D., Tan, Q., ve Hu, C.-X. (2021). Arbusküler mikorizal mantarlar ve bitki büyümesi, çinko beslemesi, fosfor düzenlenmesi ve fitoremediasyondaki ana rolü. [Arbuscular mycorrhizal fungi and its major role in plant growth, zinc nutrition, phosphorous regulation and phytoremediation.] *Symbiosis*, 84(1), 19–37. <https://doi.org/10.1007/s13199-021-00756-6>

Bolat, İ., ve Kara, Ö. (2017). Bitki Besin Elementleri: Kaynakları, İşlevleri, Eksik Ve Fazlalıkları. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 19(1), 218–228. <https://doi.org/10.24011/barofd.251313>

Bouyoucos, G.J.(1955). "Toprakların Mekanik Analizini Yapmak İçin Hidrometre Yönteminin Yeniden Kalibrasyonu" ["A Recalibration of the Hydrometer Method for Making Mechanical Analysis of the Soils"], *Agronomy Journal*, 4(9):434.

Boyalan, G. İ., ve Erduğan, H. (2021). *Nasturtium officinale* R.Br. ve farklı kurşun element konsantrasyonlarında *Mentha aquatica* L. takson reaksiyonu. [Investigation of *Nasturtium officinale* R.Br. and *Mentha aquatica* L. taxa reaction in different lead element concentrations.] *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 38(3), 283–292. <https://doi.org/10.12714/egejfas.38.3.04>

Bowles TM, Jackson LE, Loehner M, Cavagnaro TR (2017) Ekolojik yoğunlaştırma ve arbusküler mikorizalar: toprak işleme ve örtü bitkisi etkilerinin bir meta-analizi. [Ecological intensification and arbuscular mycorrhizas: a meta-analysis of tillage and cover crop effects.] *J Appl Ecol* 54:1785–1793

Brandenberger, L., Shrefler, J., ve Damicone, J. (2017). Serin mevsim yeşillikleri üretimi (ıspanak, karalahana, karalahana, hardal, şalgam, marul). [*Cool season greens production (spinach, collard, kale, mustard, turnip, leaf lettuce).*]

Candan, E. D. (2021). *Heavy Metal Tolerance Potential of Aspergillus alliaceus Isolated from a Green Turtle Nesting Site Yeşil Kaplumbağa Yuvalama Alanından İzole Edilen Aspergillus alliaceus ' un Ağır Metal Tolerans Potansiyeli*. 10(1), 49–56.

Capozzi, F., Sorrentino, M. C., Caporale, A. G., Fiorentino, N., Giordano, S., ve Spagnuolo, V.

- (2020). *Cynara cardunculus*'un fitoremediasyon potansiyelini araştırmak: ağır metallerle yüksek oranda kirlenmiş endüstriyel bir toprak üzerinde bir deneme. [Exploring the phytoremediation potential of *Cynara cardunculus*: a trial on an industrial soil highly contaminated by heavy metals.] *Environmental Science and Pollution Research*, 27(9), 9075–9084. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07575-9>
- Chander, K.; Brookes, P.C.; Harding, S.A. (1995). Kumlu bir tınıya metalle zenginleştirilmiş kanalizasyon amurunun eklenmesini takiben mikrobiyal biyokütle dinamikleri. [Microbial biomass dynamics following addition of metal-enriched sewage sludge to a sandy loam]. *Soil Biol. Biochem.* 27, 1409–1421
- Chaplygin, V., Mandzhieva, S., Minkina, T., Sushkova, S., Barahov, A., Nevidomskaya, D., Kızılkaya, R., Glser, C., Chernikova, N., Mazarji, M., Iljina, L., ve Rajput, V. (2020). *Asteraceae* ve *poaceae* familyalarının otsu bitkilerinin inko ve kadmiyum ile teknolojik toprak kirliliği altında biriktirme kapasitesi. [Accumulating capacity of herbaceous plants of the *asteraceae* and *poaceae* families under technogenic soil pollution with zinc and cadmium.] *Eurasian Journal of Soil Science*, 9(2), 165–172. <https://doi.org/10.18393/ejss.707659>
- Chen, C., Huang, D., ve Liu, J. (2009). Bitkilerde nikelin işlevleri ve toksisitesi: Son gelişmeler ve gelecekteki beklentiler. [Functions and toxicity of nickel in plants: Recent advances and future prospects]. *Clean - Soil, Air, Water*, 37(4–5), 304–313.
- Chen B.D., Li X.L., Tao HQ, Christie P, Wong M.H. (2003). eşitli miktarlarda inko eklenmiş kalkerli bir toprakta yetişen kırmızı yonca tarafından inko alımında arbusküler mikorizanın rolü. [The role of arbuscular mycorrhiza in zinc uptake by red clover growing in a calcareous soil spiked with various quantities of zinc.] *Chemosphere* 50:839–846. [https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(02\)00228-x](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(02)00228-x)
- Chowdhury, M., Kiraga, S., Islam, M. N., Ali, M., Reza, M. N., Lee, W.-H., & Chung, S.-O. (2021). Bir Fabrika Fabrikasında Yetiştirilen Lahana'nın Büyümesi ve Glukozinolat İeriği zerine Sıcaklık, Bağıl Nem ve Karbondioksit Konsantrasyonunun Etkileri. [Effects of Temperature, Relative Humidity, and Carbon Dioxide Concentration on Growth and Glucosinolate Content of Kale Grown in a Plant Factory.] *Foods*, 10(7), 1524. <https://doi.org/10.3390/foods10071524>

- Crooke W.M. (1958). Ağır metal toksisitesinin bitki köklerinin katyon değişim kapasitesi üzerine etkisi. [Effect of heavy metal toxicity on the cation exchange capacity of plant roots.] *Soil Sci.* 86: 231–241
- Çarşambalı, E. (2020). Fitoremediasyon Yöntemi ile Kadmiyum Akümüülasyonunun giderimi: Lavanta (*Lavandula angustifolia*). (Yüksek Lisans Tezi), Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı, Tekirdağ.
- Çığ, A. , Gülser, F. , Gökkaya, T. H. & Başdoğan, G. (2017). Nikel kirliliğinin nergisin besin içeriği üzerindeki etkileri (*Narcissus poeticus* L. C.v. “Buz Folyoları”. [Effects of Nickel Contamination on Nutrient Contents of Daffodil (*Narcissus poeticus* L. c.v. “Ice Folies”)]. *International Journal of Secondary Metabolite* , 4 (2) , 99-102 . DOI: 10.21448/ijsm.299885
- Daryadar, M., Mairapetyan, K. H., Tovmasyan, A. H., Aleksanyan, J. S., Tadevosyan, A. H., Kalachyan, L. H., Stepanyan, B. T., Galstyan, H. M., ve Asatryan, A. Z. (2019). Yapraklı Yeşil Sebze Lahana'nın Topraksız Yetiştirme Koşullarında Verimliliği. [Productivity of Leafy Green Vegetable Kale in Soilless Cultivation Conditions.] *Journal of Agricultural Science and Food Research*, 10(2), 49–52. <https://doi.org/10.35248/2593-9173.19.10.260>
- De kock P.C. (1956). Ağır metal toksisitesi ve demir klorozu. [Heavy metal toxicity and iron chlorosis.] *Ann Bot.*20: 133–141
- Demarco, C. F., Afonso, T. F., Pieniz, S., Quadro, M. S., Camargo, F. A. O., ve Andreazza, R. (2018). Brezilya'nın güneyindeki antropojenik kirli bir bölge olan Santa Bárbara akışında *Hydrocotyle ranunculoides* tarafından desteklenen ağır metallerin yerinde fitoremediasyon karakterizasyonu. [In situ phytoremediation characterization of heavy metals promoted by *Hydrocotyle ranunculoides* at Santa Bárbara stream, an anthropogenic polluted site in southern of Brazil.] *Environmental Science and Pollution Research*, 25(28), 28312–28321. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2836-y>
- Desam, N. R., Al-Rajab, A. J., Sharma, M., Mylabathula, M. M., Gowkanapalli, R. R., ve Albratty, M. (2019). *Mentha × Piperita* L. (nane) uçucu yağlarının kimyasal bileşenleri, in vitro antibakteriyel ve antifungal aktivitesi. [Chemical constituents, in vitro antibacterial and antifungal activity of *Mentha × Piperita* L. (peppermint) essential oils.] *Journal of King Saud University - Science*, 31(4), 528–533.

<https://doi.org/10.1016/j.jksus.2017.07.013>

- Demirayak, A., Kutbay, H. G., Sürmen, B., ve Kılıç, D. D. (2019). Samsun ilinde (Türkiye) bazı doğal ve egzotik ağaç ve çalı türlerinde arsenik birikimi. [Arsenic accumulation in some natural and exotic tree and shrub species in Samsun Provience (Turkey).] *Anatolian Journal of Botany*, 3(1), 13–17. <https://doi.org/10.30616/ajb.499141>
- Dindaroğlu, T., Babur, E., ve Laz, B. (2019). Ultramafik topraklardaki Alyssum Pateri subsp. Pateri bitkisinin ekolojisi ve ağır metal tolerans sınırının belirlenmesi. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*, 7(2), 110–120. <https://doi.org/10.33409/tbbbd.668650>
- Dinu, C., Gheorghe, S., Tenea, A. G., Stoica, C., Vasile, G. G., Popescu, R. L., Serban, E. A., ve Pascu, L. F. (2021). Toksik metaller (As, cd, ni, pb) en yaygın şifalı bitkiyi (*mentha piperita*) etkiler. [Toxic metals (As, cd, ni, pb) impact in the most common medicinal plant (*mentha piperita*).] *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(8). <https://doi.org/10.3390/ijerph18083904>
- Dökmeçi A.H., Adiloğlu, S. (2020). *Cirsium vulgare* kullanılarak topraktan kromun fitoremediasyonu ve sağlık üzerindeki etkileri. [The phytoremediation of chromium from soil using *Cirsium vulgare* and the health effects]. *Biosci Biotech Res Asia*. 17(3).
- Dönmez, A. A., Aydın, Z. U., ve Wang, X. (2021). Yabani *Brassica* ve Türkiye'deki Yakın Akrabaları, Genetik Hazinele. [Wild *Brassica* and Its Close Relatives in Turkey, the Genetic Treasures.] *Horticultural Plant Journal*, 7(2), 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2020.11.003>
- El-Sherbiny, M. M., Ismail, A. I., ve El-Hefnawy, M. E. (2019). Batı Suudi Arabistan'daki bir çimento fabrikasının etrafındaki ağır metaller tarafından potansiyel ekolojik risk ve toprak kontaminasyonu hakkında bir ön değerlendirme. [A preliminary assessment of potential ecological risk and soil contamination by heavy metals around a cement factory, western Saudi Arabia.] *Open Chemistry*, 17(1), 671–684. <https://doi.org/10.1515/chem-2019-0059>
- Elbehiry, F., Elbasiouny, H., Ali, R., ve Brevik, E. C. (2020). Katı Atıklarla Kirlenmiş Topraklarda Ağır Metallerin Geliştirilmiş Hareketsizleştirilmesi ve Fitoremediasyonu. [Enhanced Immobilization and Phytoremediation of Heavy Metals in Landfill Contaminated Soils.] *Water, Air, and Soil Pollution*, 231(5). <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04493-2>

- Eren, A. (2018). *Xanthium Strumarium* L. Bitkisinin Fitoremediasyon Potansiyelinin Toprak Koşullarında Araştırılması. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 5(2), 152–157. <https://doi.org/10.19159/tutad.407988>
- Evangelou, M. W. H., Ebel, M., ve Schaeffer, A. (2007). Ağır metallerin topraktan şelat destekli fito ekstraksiyonu. Şelatlama ajanlarının etkisi, mekanizması, toksisitesi ve kaderi. [Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soil. Effect, mechanism, toxicity, and fate of chelating agents.] *Chemosphere*, 68(6), 989–1003. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.01.062>
- FAO. (1990). Micronutrient, assesment and the country level: An International study. FAO Soils Bulletin 63, Rome, Italy
- Farahat, E. A., Mahmoud, W. F., ve Fahmy, G. M. (2021). *Vossia cuspidata* (Roxb.) Griff'in su, tortu ve organlarındaki ağır metallerin mevsimsel değişimleri. Nil Nehri ekosisteminde: fitoremediasyon için çıkarım. [Seasonal variations of heavy metals in water, sediment, and organs of *Vossia cuspidata* (Roxb.) Griff. in River Nile ecosystem: implication for phytoremediation.] *Environmental Science and Pollution Research*, 28(25), 32626–32633. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13033-2>
- Farraji, H., Robinson, B., Mohajeri, P., ve Abedi, T. (2020). Fitoremediasyon: sucul ve karasal ortamları iyileştirmek için yeşil teknoloji. [Phytoremediation: green technology for improving aquatic and terrestrial environments.] *Nippon Journal of Environmental Science*, 1(1), 1002. <https://doi.org/10.46266/njes.1002>
- Felix, H.R.Z. (1997). Metal biriktiren bitkilerin ekinleri kullanılarak ağır metalle kirlenmiş toprakların yerinde dekontaminasyonu için saha denemeleri. [Field trials for in situ decontamination of heavy metal polluted soils using crops of metal-accumulating plants.] *Z. Pflanzenerna"hr. Bodenk.* 160, 525–529.
- Fliepbach, A.; Martens, R.; Reber, H. (1994). Ağır metalle kirlenmiş kanalizasyon çamuru ile işlenmiş topraklarda toprak mikrobiyal biyokütlesi ve aktivitesi. [Soil microbial biomass and activity in soils treated with heavy metal contaminated sewage sludge]. *Soil Biol. Biochem.* 26, 1201–1205.
- Gadaka, M. A., Muazu, A. B., ve Muhammad, I. U. (2021). Nane Çayının (*Mentha Piperita* L.) Metanol Yaprak Ekstresinin Fitokimyasalları ve Element Analizi. [Phytochemicals and

Elemental Analysis of Methanol Leave Extract of Peppermint Tea (*Mentha Piperita* L.].
Food Science and Quality Management, 108(2008), 50–53.
<https://doi.org/10.7176/fsqm/108-07>

Ganesan, S., Panda, S., Sinha, A., ve Chettri, A. (2020). Fitoremediasyon: Ağır metallerin bitkiler kullanılarak ortamdan uzaklaştırılması için sürdürülebilir yaklaşım. [Phytoremediation: Sustainable approach for the removal of Heavy metals from the environment using plants.] *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 955(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/955/1/012096>

Gao J, Wang H, Yuan Q, Feng Y. (2018). Fotosistem süper komplekslerinin yapısı ve işlevi. [Structure and function of the photosystem supercomplexes]. *Front Plant Sci* 9:1–7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00357>

Garg, N., ve Singh, S. (2018). Arbuscular *Mycorrhiza Rhizophagus* düzensiz ve *Cajanus cajan* L. Millsp. (güvercin) Kadmiyum ve Çinko Stresi Altındaki Genotipler. [Arbuscular *Mycorrhiza Rhizophagus irregularis* and Silicon Modulate Growth, Proline Biosynthesis and Yield in *Cajanus cajan* L. Millsp. (pigeonpea) Genotypes Under Cadmium and Zinc Stress.] *Journal of Plant Growth Regulation*, 37(1), 46–63. <https://doi.org/10.1007/s00344-017-9708-4>

Ghasemi-Fasaei, R. (2012). Ni-Kirli Kalkerli Bir Toprakta Nikel Fitoremediasyon Verimliliği ve Metal Besin Maddeleri İlişkileri Üzerine Malik Asit ve Fosforun Etkileri. [Malic acid and Phosphorus Influences on Nickel Phytoremediation Efficiency and Metal Nutrients Relationships in a Ni-Polluted Calcareous Soil.] *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 3(S), 2805–2808. www.irjabs.com

Gholamipourfard, K., Salehi, M., ve Banchio, E. (2021). Tarımda, gıda endüstrisinde ve tıpta *Mentha piperita* fitokimyasalları: Özellikler ve uygulamalar. [*Mentha piperita* phytochemicals in agriculture, food industry and medicine: Features and applications.] *South African Journal of Botany*, 141(October), 183–195. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.05.014>

Golui, D., Datta, S. P., Dwivedi, B. S., Meena, M. C., Trivedi, V. K., Jaggi, S., ve Bandyopadhyay, K. K. (2020). Kirli Topraklarda Çinko, Bakır, Nikel, Kurşun ve Kadmiyumun Kısa Ardışik Ekstraksiyon Şeması Kullanılarak Jeoyararlanımının

- Değerlendirilmesi. [Assessing Geoavailability of Zinc, Copper, Nickel, Lead and Cadmium in Polluted Soils Using Short Sequential Extraction Scheme.] *Soil and Sediment Contamination*, 00(00), 1–18. <https://doi.org/10.1080/15320383.2020.1796924>
- Goudarzian, A., Pirbalouti, A. G., ve Hossaynzadeh, M. (2021). *Menta* × *piperita* l'den uçucu yağın miktarı ve kalitesi. Yapraftan uygulanan kitosan ve arbusküler mikorizal mantarların aşılması altında. [Quantity and quality yield of essential oil from *mentha* × *piperita* l. Under foliar-applied chitosan and inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi.] *Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus*, 20(2), 43–52. <https://doi.org/10.24326/asphc.2021.2.5>
- Gravand, F., Rahnavard, A., ve Pour, G. M. (2020). Ağır Metaller (Pb, Cd, Mn ve Ni) ile Kirlenmiş Toprakların Fitoremediasyonunda Vetiver Otu Yeteneğinin Araştırılması. [Investigation of Vetiver Grass Capability in Phytoremediation of Contaminated Soils with Heavy Metals (Pb, Cd, Mn, and Ni).] *Soil and Sediment Contamination*, 30(2), 163–186. <https://doi.org/10.1080/15320383.2020.1819959>
- Güneş, A., Kumar, R., Pek, T., Yüksel, M., ve Kabay, N. (2017). Yapay sulak alanlarda atık su rehabilitasyonunda kullanılan *Salvinia natans* ve *Lemna minor* bitki türlerinin su kalitesine olan etkileri [The Water Quality Effects of *Salvinia natans* and *Lemna minor* Plant Which Used for Rehabilitation of Wastewater on The . *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, 74(50), 79–86. <https://doi.org/10.5505/TurkHijyen.2017.65376>
- Haghighi, M., Kafi, M., Pessarakli, M., Sheibanirad, A., ve Sharifinia, M. R. (2016). Tuzlu topraklarda kurşun (Pb) ve kadmiyum (Cd) giderimi için fitoremediasyon bitki türü olarak lahanalar (*Brassica oleracea* var. *acephala*) kullanılması. [Using kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) as a phytoremediation plant species for lead (Pb) and cadmium (Cd) removal in saline soils.] *Journal of Plant Nutrition*, 39(10), 1460–1471. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1161768>
- Haq, S., Bhatti, A. A., Dar, Z. A., ve Bhat, S. A. (2020). Ağır Metallerin Fitoremediasyonu: Çevre Dostu ve Sürdürülebilir Bir Yaklaşım. [Phytoremediation of Heavy Metals : An Eco-Friendly and Sustainable Approach.] *Bioremediation and Biotechnology: Sustainable Approaches to Pollution Degradation, January*, 215–230. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-35691-0>

- Hasan, S. A., Hayat, S., Ali, B. ve Ahmad, A. (2008). 28-Homobrassinolide, antioksidanları uyararak nohutu (*Cicer arietinum*) kadmiyum toksisitesinden korur, [28-Homobrassinolide protects chickpea (*Cicer arietinum*) from cadmium toxicity by stimulating antioxidants.] *Environmental Pollution*, 151 (1), 60–66. doi: 10.1016/j.envpol.2007.03.006.
- Hayyat, M. S., Adnan, M., Khan, M. A. B., Abd-Ur-Rahman, H., Ahmed, R., Fazal-ur-Rehman, Toor, M. D., ve Bilal, H. M. (2020). Ağır metalin (Ni) bitkiler ve toprak üzerindeki etkisi: Bir inceleme. [Effect of heavy metal (Ni) on plants and soil: A review.] *International Journal of Applied Research*, 6(7), 313–318. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(82\)90059-5](https://doi.org/10.1016/0045-6535(82)90059-5)
- He, C., Zhao, Y., Wang, F., Oh, K., Zhao, Z., Wu, C., Zhang, X., Chen, X., ve Liu, X. (2020). Toprak ağır metallerinin (Cd ve Zn) hint fideleri ile fitoremediasyonu: Tolerans, birikim ve hücre içi dağılım. [Phytoremediation of soil heavy metals (Cd and Zn) by castor seedlings: Tolerance, accumulation and subcellular distribution.] *Chemosphere*, 252, 126471. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126471>
- Kacar B ve Katkat V (2010). Bitki Besleme. 5. Baskı, Nobel Yayın Dağıtım Tic. Ltd. Şti, Kızılay-Ankara.
- Kacar, B. ve İnal, A. (2010). Bitki Analizleri (2. Baskı), Nobel Yayınları No: 1241.
- Kalavrouzotis, I. K., Koukoulakis, P. H., Robolas, P., Papadopoulos, A. H., Pantazis, V. (2008). Ağır metal makro ve mikro besin maddeleri arasındaki ilişkiler ve arıtılmış belediye atık sularının etkisi altında *Brassica oleracea* var. *italica* (Brokoli) ile yetiştirilen bir toprağın özellikleri . [Interrelationships of heavy metals macro and micronutrients, and properties of a soil cultivated with *Brassica oleracea* var. *italica* (Broccoli), under the effect of treated municipal wastewater]. *Water, air, and soil pollution*, 190(1), 309-321.
- Karabulut, B. (2020). Fitoremediasyon Yöntemi ile Kurşun Akümülyasyonunun giderimi: Biberiye (*Rosmarinus officinalis*) örneği. (Yüksek Lisans Tezi), Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı, Tekirdağ.
- Kaur, H., ve Garg, N. (2021). Bitkilerde çinko toksisitesi: bir inceleme. [Zinc toxicity in plants: a review.] *Planta*, 253(6), 1–28. <https://doi.org/10.1007/s00425-021-03642-z>

Kaya, Y. (2019). *Sincan Organize Sanayi Bölgesinde Çevresinde Ağır Metaller İle Kontamine Olmuş Ekosistemlerin Fitoremediasyonunda Doğal Bitkilerin Kullanılma Potansiyelinin Araştırılması Fitoremediasyonunda Doğal Bitkilerin Kullanılma Potansiyelinin Araştırılması*. Ankara Üniversitesi.

Khair, K. U., Farid, M., Ashraf, U., Zubair, M., Rizwan, M., Farid, S., Ishaq, H. K., Iftikhar, U., ve Ali, S. (2020). Sitrik asit, nikelin (Ni) fito ekstraksiyonunu artırdı ve *Mentha piperita*'yı (L.) Ni kaynaklı fizyolojik ve biyokimyasal hasarlardan hafifletti. [Citric acid enhanced phytoextraction of nickel (Ni) and alleviate *Mentha piperita* (L.) from Ni-induced physiological and biochemical damages.] *Environmental Science and Pollution Research*, 27(21), 27010–27022.

Khalid, M., Ur-Rahman, S., Hassani, D., Hayat, K., Zhou, P., ve Hui, N. (2021). Ağır metallerin mantar destekli fitoremediasyonundaki gelişmeler: Bir inceleme. [Advances in fungal-assisted phytoremediation of heavy metals: A review.] *Pedosphere*, 31(3), 475–495. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(20\)60091-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(20)60091-1).

Khalid, B.Y. ve Tinsley, J. (1980). Nikel Toksisitesinin Çavdar Otu Üzerindeki Bazı Etkileri. [Some Effects of Nickel Toxicity on Rye Grass]. *Plant Soil*. 55: 139–144 58.

Kılıç, D. D., ve İpek, A. (2019). Bazı Tarım Bitkileri Kullanılarak Arıtma Çamurlarından Kurşun Kirliliğinin Şelat Destekli Fitoremediasyon Yöntemiyle Giderilmesi. [Removal of Lead Pollution from Treatment Sludge by Chelate Supported Phytoremediation Method Using Some Agricultural Plants.] *Journal of the Institute of Science and Technology*, 9(1), 458–467. <https://doi.org/10.21597/jist.448258>

Kurt, S. (2019). Büyükçekmece Göl Havzası Toprak Kirliliğinin Coğrafi Bilgi Sistemleri Kullanılarak İncelenmesi (Türkiye'nin Kuzeybatısı). [Examining Soil Pollution of Büyükçekmece Lake Basin Using Geographic Information Systems (Northwestern of Turkey).] *International Journal of Geography and Geography Education (IGGE)*. *Büyükçekmece Gölü Havzasında Toprak Kirliliğinin Coğrafi Bilgi Sisteml.* 300–310.

Lajayer, H.A., Savaghebi, G., Hadian, J., Hatami M., Pezhmanmehr M. (2017). Pennyroyal'da (*Mentha pulegium* L.) büyüme, mikro ve makro besin durumu ve uçucu yağ bileşenleri üzerindeki bakır ve çinko etkilerinin karşılaştırılması. [Comparison of copper and zinc effects on growth, micro- and macronutrients status and essential oil constituents in

pennyroyal (*Mentha pulegium* L.]). *Braz. J. Bot*40,379–388. doi: 10.1007/s40415-016-0353-0.

Lajayer, B. A., Hadian, J., Motesarezadeh, B., ve Ghorbanpour, M. (2014). Fesleğen (*Ocimum basilicum*) kök, sürgün, infüzyon ve kaynatmada mikro ve makro elementlerin birikimi ve yer değiştirmesi üzerindeki farklı çinko ve bakır düzeylerinin değerlendirilmesi. [Assessing different levels of zinc and copper impacts on micro- and macro elements accumulation and translocation in root , shoot , infusion and decoction of basil (*Ocimum basilicum*)]. *Impacts on Micro- and Macro Elements. South Western Journal of Horticulture, Biology and Environment*, 5(2), 105–123.

Leuci, R., Brunetti, L., Laghezza, A., Loiodice, F., Tortorella, P., ve Piemontese, L. (2020). Tıbbi kimyada hedef olarak biyometallerin önemi: Çinko (II) şelatlama maddelerinin rolüne genel bir bakış. [Importance of biometals as targets in medicinal chemistry: An overview about the role of zinc (II) chelating agents.] *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/APP10124118>

Li, Z., Shuman, L.M. (1996). Metalle kirlenmiş toprak profillerinde ağır metal hareketi. [Heavy metal movement in metal contaminated soil profiles.] *Soil Sci.* 161, 656–666.

Li, F. li, Qiu, Y., Xu, X., Yang, F., Wang, Z., Feng, J., ve Wang, J. (2020). İtalyan çimi (*Lolium perenne* L.) tarafından çamur toprağından ağır metallerin EDTA ile geliştirilmiş fitoremediasyonu. [EDTA-enhanced phytoremediation of heavy metals from sludge soil by Italian ryegrass (*Lolium perenne* L.).] *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 191(November 2019), 110185. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110185>

Lindsay, W. L. ve Norvell, W. A. (1978). Çinko, Demir, Manganez ve Bakır için DTPA Toprak Testinin Geliştirilmesi. [Development of a DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper1.] *Soil Science Society of America Journal*, 42(3), 421. doi:10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x.

Ljubej, V., Karalija, E., Salopek-Sondi, B., ve Šamec, D. (2021). Düşük Sıcaklıklara Kısa Süreli Maruz Kalmanın Lahana'da (*Brassica oleracea* var. *acephala*) Prolin, Pigmentler ve Fitokimyasallar Düzeyine Etkileri. [Effects of Short-Term Exposure to Low Temperatures on Proline, Pigments, and Phytochemicals Level in Kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*).] *Horticulturae*, 7(10), 341. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7100341>

- Lukatkin, A. S., Bashmakov, D. I., Al Harbawee, W. E. Q., ve Teixeira da Silva, J. A. (2020). *Amaranthus retroflexus* fidelerinin ağır metal birikimine karşı fizyolojik ve biyokimyasal tepkilerinin fitoremediasyon potansiyeli açısından değerlendirilmesi. [Assessment of physiological and biochemical responses of *Amaranthus retroflexus* seedlings to the accumulation of heavy metals with regards to phytoremediation potential.] *International Journal of Phytoremediation*, 23(3), 219–230. <https://doi.org/10.1080/15226514.2020.1807904>
- Luo, H., Wang, Q., Guan, Q., Ma, Y., Ni, F., Yang, E., ve Zhang, J. (2022). Kuzeybatı Çin'deki önemli şehirlerdeki toz fırtınalarında ağır metal kirliliği seviyeleri, kaynak dağılımı ve risk değerlendirmesi. [Heavy metal pollution levels, source apportionment and risk assessment in dust storms in key cities in Northwest China.] *Journal of Hazardous Materials*, 422(August 2021), 126878. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126878>
- Lv, P., Wei, Z. M., Yu, Z. M., Zhang, J. Z., ve Wang, L. M. (2019). Çin'in soğuk bir bölgesindeki sera sebze üretim sistemlerinin topraklarındaki ağır metal kirliliği. [Heavy metal contamination in soils of greenhouse vegetable production systems in a cold region of China.] *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(2), 98–102. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191202.4306>
- Madanan, M. T., Shah, I. K., Varghese, G. K., ve Kaushal, R. K. (2021). Ağır metalle kirlenmiş lateritik toprağın fitoremediasyonu için Aztek Marigold (*Tagetes erecta* L.) uygulaması. [Application of Aztec Marigold (*Tagetes erecta* L.) for phytoremediation of heavy metal polluted lateritic soil.] *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 3, 17–22. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2020.10.007>
- Mamat, A., Zhang, Z., Mamat, Z., Zhang, F., ve Yinguang, C. (2020). Çin'deki 146 şehrin tarım arazilerindeki sekiz (metaloid) ağır metalin kirlilik değerlendirme ve sağlık riski değerlendirme. [Pollution assessment and health risk evaluation of eight (metalloid) heavy metals in farmland soil of 146 cities in China.] *Environmental Geochemistry and Health*, 42(11), 3949–3963. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00634-y>
- Meşeli, O. (2019). *Çinko Kontaminasyonunun Lythrum salicaria L. Gelişimi Üzerine Etkisi*. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi.
- Misra A. (1992). Japon nanesinde çinko stresinin büyüme, fotosentez, klorofil içeriği ve ikincil

bitki ürünleri - monoterpenler ile ilgili etkisi. [Effect of zinc stress in Japanese mint as related to growth, Photosynthesis, chlorophyll contents and secondary plant products - the monoterpenes.]

Moore, R., Clark, W.D., Stern, K.R. (1995). Botanik [Botany.] WCB Publishers, Dubuque, Iowa.

Navarro-Pedreño, J., Almendro-Candel, M. B., Lucas, I. G., Vidal, M. M. J., Borrás, J. B., ve Zorpas, A. A. (2018). Alicante'nin (İspanya) tarım topraklarında eser metal içeriği ve temel metallerin mevcudiyeti. [Trace metal content and availability of essential metals in agricultural soils of Alicante (Spain).] *Sustainability (Switzerland)*, 10(12), 1–11. <https://doi.org/10.3390/su10124534>

Nedjimi, B. (2021). Fitoremediasyon: ağır metallerin dekontaminasyonu için sürdürülebilir bir çevre teknolojisi. [Phytoremediation: a sustainable environmental technology for heavy metals decontamination.] *SN Applied Sciences*, 3(3), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04301-4>

Ökten, H. E., ve Gören, A. Y. (2021). Sentetik Sulu Çözeltilerden Lemna minör ve Gerçek Jeotermal Su kullanılarak Borun Fitoremediasyonu. [Phytoremediation of Boron using Lemna minor from Synthetic Aqueous Solutions and Real Geothermal Water.] *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 217–228. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.798630>

Ostadi, A., Javanmard, A., Amani Machiani, M., Morshedloo, M. R., Nouraein, M., Rasouli, F., ve Maggi, F. (2020). Farklı gübre kaynaklarının ve hasat süresinin *Mentha x piperita* L'nin büyüme özellikleri, besin alımları, uçucu yağ verimliliği ve bileşimi üzerine etkisi. [Effect of different fertilizer sources and harvesting time on the growth characteristics, nutrient uptakes, essential oil productivity and composition of *Mentha x piperita* L.] *Industrial Crops and Products*, 148(December 2019), 112290. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112290>

Olsen S.R. ve Sommers L.E. (1982). Toprak analiz yöntemleri. [Methods of soil analysis.] Part II. Chemical and microbiological properties. Editors: Page, A.L., R.H. Miller, D.R. Keeney. Agronomy. No: 9 Madison, Wisconsin, USA.

Özyazıcı, M. A., Dengiz, O., ve Özyazıcı, G. (2017). Türkiye'de Karadeniz Bölgesi'nin Orta ve

- Doğu Bölgelerinin ekili topraklarında ağır metal yoğunluğunun mekansal dağılımı. [Spatial distribution of heavy metals density in cultivated soils of Central and East Parts of Black Sea Region in Turkey]. *Eurasian Journal of Soil Science (Ejss)*, 6(3), 197–197. <https://doi.org/10.18393/ejss.287976>
- Pandey, J., Verma, R. K., ve Singh, S. (2019). Ağır metalle kirlenmiş alanların fitoremediasyonu için aromatik bitkilerin uygunluğu: bir inceleme. [Suitability of aromatic plants for phytoremediation of heavy metal contaminated areas: a review.] *International Journal of Phytoremediation*, 21(5), 405–418. <https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1540546>
- Pandey, N., ve Sharma, C. P. (2002). Co^{2+} , Ni^{2+} ve Cd^{2+} ağır metallerinin lahananın büyümesi ve metabolizması üzerine etkisi. [Effect of heavy metals Co^{2+} , Ni^{2+} and Cd^{2+} on growth and metabolism of cabbage.] *Plant Science*, 163(4), 753–758. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(02\)00210-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00210-8)
- Panneerselvam, B., ve Shunmuga, P. K. (2021). Krom ve kurşunla kirlenmiş sularda ağır metal gideriminde su sümbülünün fitoremediasyon potansiyeli. [Phytoremediation potential of water hyacinth in heavy metal removal in chromium and lead contaminated water.] *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 00(00), 1–16. <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1901896>
- Pedron, F., Grifoni, M., Barbafieri, M., Petruzzelli, G., Franchi, E., Samà, C., Gila, L., Zanardi, S., Palmery, S., Proto, A., ve Vocciante, M. (2021). Fitoremediasyonda yeni ışık: Lüminesan güneş yoğunlaştırıcılarının kullanımı. [New light on phytoremediation: The use of luminescent solar concentrators.] *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(4), 1–21. <https://doi.org/10.3390/app11041923>
- Piri, M., Sepehr, E., Samadi, A., Farhadi, K. H., ve Alizadeh, M. (2021). Diyatomit ile kirlenmiş toprak ıslahı: çinko, kurşun, bakır ve kadmiyumun kimyasal fraksiyonları. [Contaminated soil amendment by diatomite: chemical fractions of zinc, lead, copper and cadmium.] *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(5), 1191–1200. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02872-0>
- Razi, M., Darvishzadeh, R., Amiri, M. E., Doulati-Banehd, H., ve Martínez-Gómez, P. (2019). REMAP belirteçleri kullanılarak çeşitli İran sofralık asma germplazmının moleküler

karakterizasyonu: popülasyon yapısı, bağlantı dengesizliği ve meyve verimi ve kalite özelliklerinin birliktelik haritalaması. [Molecular characterization of a diverse Iranian table grapevine germplasm using REMAP markers: population structure, linkage disequilibrium and association mapping of berry yield and quality traits.] *Biologia*, 74(2), 173–185. <https://doi.org/10.2478/s11756-018-0158-7>

Reda, T., Thavarajah, P., Polomski, R., Bridges, W., Shipe, E., ve Thavarajah, D. (2021). En yüksek rafa ulaşmak: Lahananın (*Brassica oleracea* var. *acephala*) organik üretimi, beslenme kalitesi ve raf ömrü üzerine bir inceleme. [Reaching the highest shelf: A review of organic production, nutritional quality, and shelf life of kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*).] *Plants People Planet*, 3(4), 308–318. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10183>

Reddy, K.J., Wang, L., Gloss, S.P. (1995). Asidik ortamlarda bakır, çinko ve kurşunun çözünürlüğü ve hareketliliği. [Solubility and mobility of copper, zinc and lead in acidic environments.] *Plant Soil* 171, 53–58.

Riza, M., ve Hoque, S. (2021). *Bryophyllum pinnatum* Tesisli kullanılarak Tekstil Endüstrileri Çevresindeki Bakır ve Çinko Kirlenmiş Toprakların Fitoremediasyonu. [Phytoremediation of Copper and Zinc Contaminated Soil around Textile Industries using *Bryophyllum pinnatum* Plant.] *Journal of Ecological Engineering*, 22(4), 88–97. <https://doi.org/10.12911/22998993/134035>

Robertson A.I., Meakin M.E.R. Nikelin *Brachystegiaspiciformis* fidelerinin hücre bölünmesi ve büyümesine etkisi. [The effect of nickel on cell division and growth of *Brachystegiaspiciformis* seedlings.] *J Bot Zimb* 12: 115–125 (1980)

Rolka, E., ve Wyszowski, M. (2021). Benzetilmiş Kadmiyum, Kurşun ve Çinko Kirliliği ile Toprakta İz Elementlerin Bulunması. [Availability of Trace Elements in Soil with Simulated Cadmium, Lead and Zinc Pollution.] *Minerals*, 11(879).

Rout, G. R., ve Das, P. (2009). Metal Toksisitesinin Bitki Büyümesi ve Metabolizması Üzerine Etkisi: I. Çinko. [Effect of Metal Toxicity on Plant Growth and Metabolism: I. Zinc.] In *Sustainable Agriculture* (pp. 873–884). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_53

Sadeghzadeh, B. (2013). Çinko besleme ve bitki ıslahının gözden geçirilmesi [A review of zinc nutrition and plant breeding.] *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13(4), 907–927.

<https://doi.org/10.4067/S0718-95162013005000072>

Sağlam, M. T. (2012). *Toprak ve Suyun Kimyasal Analiz Yöntemleri*. Namık Kemal Üniversitesi, Yayın No: 2, Tekirdağ.

Salehi, B., Stojanović-Radić, Z., Matejić, J., Sharopov, F., Antolak, H., Kręgiel, D., Sen, S., Sharifi-Rad, M., Acharya, K., Sharifi-Rad, R., Martorell, M., Sureda, A., Martins, N., ve Sharifi-Rad, J. (2018). Mentha cinsi bitkiler: Çiftlikten gıda fabrikasına. [Plants of genus Mentha: From farm to food factory.] In *Plants* (Vol. 7, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/plants7030070>

Šamec, D., Urlić, B., ve Salopek-Sondi, B. (2019). Bir süper gıda olarak lahanada (*Brassica oleracea var. acephala*): Açıklamanın arkasındaki bilimsel kanıtların gözden geçirilmesi. [Kale (*Brassica oleracea var. acephala*) as a superfood: Review of the scientific evidence behind the statement.] *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(15), 2411–2422. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1454400>

Samuel, W., Richard, B., ve Nyantakyi, J. A. (2021). *Heliconia psittacorum* kullanılarak zanaatkar madencilik yerleşim bölgesinden ağır metallerle kirlenmiş su ve toprakların fitoremediasyonu. [Phytoremediation of heavy metals contaminated water and soils from artisanal mining enclave using *Heliconia psittacorum*.] *Modeling Earth Systems and Environment*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-01076-2>

Sarkar A., Asaeda T., Wang Q., Kaneko Y, Rashid M.H. (2017). *Miscanthus sacchariflorus*'un arbusküler mikorizal mantarların aracılık ettiği çinko stresine tepkisi. [Response of *Miscanthus sacchariflorus* to zinc stress mediated by arbuscular mycorrhizal fungi.] *Flora* doi:<https://doi.org/10.1016/j.flora.2017.05.011>

Satheesh, N., ve Workneh Fanta, S. (2020). Karalahana: Besin bileşimi, biyoaktif bileşikler, beslenme karşıtı faktörler, sağlığa yararlı özellikler ve katma değerli ürünler hakkında inceleme. [Kale: Review on nutritional composition, bio-active compounds, anti-nutritional factors, health beneficial properties and value-added products.] *Cogent Food and Agriculture*, 6(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2020.1811048>

Schmidt, U.,(2003). Fito ekstraksiyonun artırılması: kimyasal toprak manipülasyonunun hareketlilik, bitki birikimi ve ağır metallerin sızması üzerindeki etkisi. [Enhancing phytoextraction: the effect of chemical soil manipulation on mobility, plant accumulation,

- and leaching of heavy metals.] *J. Environ. Qual.* 32, 1939–1954
- Seregin, I.V., Kozhevnikova, A.D., Kazyumina, E.M., Ivanov, V. B. (2003). Mısır Köklerinde Nikel Toksisitesi ve Dağılımı. [Nickel Toxicity and Distribution in Maize Roots]. *Russian Journal of Plant Physiology* 50, 711–717. <https://doi.org/10.1023/A:1025660712475>
- Seregin, I. V, ve Ivanov, V. B. (2001). *Seregin and Ivanov 2001 Physiological Aspects of Cadmium and Lead Toxic Effects.* 48(4), 523–544.
- Seven, T., Can, B., Darende, B. N., & Ocak, S. (2018). Hava ve Toprakta Ağır Metal Kirliliği. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 1(2), 91–103. <https://dergipark.org.tr/en/pub/ucbad/issue/38487/447131>
- Sharma, S., Sharma, P., Datta, S. P., ve Gupta, V. (2010). *Cicer arietinum* L. var'ın morfolojik ve biyokimyasal yanıtı. [Morphological and biochemical response of *Cicer arietinum* L. var.] pusa-256 towards an excess of zinc concentration. *Life Science Journal*, 7(1), 95–98.
- Shelepova, O. V, Tkacheva, E. V, ve Golosova, E. V. (2021). Nane tanıtımının tarihi (*Mentha × piperita* L.) [The history of the introduction of peppermint (*Mentha × piperita* L.)] in *Imperial Russia.* 00115.
- Shephard, A. M., Mitchell, T. S., Henry, S. B., Oberhauser, K. S., Kobiela, M. E., & Snell-Rood, E. C. (2020). İki kelebek türünde çinko toleransının değerlendirilmesi: kirli ortamlarda korumanın sonuçları. [Assessing zinc tolerance in two butterfly species: consequences for conservation in polluted environments.] *Insect Conservation and Diversity*, 13(2), 201–210. <https://doi.org/10.1111/icad.12404>
- Silva dos Santos, F., Neves, R. A. F., Crapez, M. A. C., Teixeira, V. L., ve Krepsky, N. (2022). Kahverengi midye *Perna perna* çevre kirliliğine nasıl tepki verir? Kirlilik biyobelirteçleri üzerine bir inceleme. [How does the brown mussel *Perna perna* respond to environmental pollution? A review on pollution biomarkers.] *Journal of Environmental Sciences (China)*, 111, 412–428. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.04.006>
- Silva, E. B., Alves, I. S., Alleoni, L. R. F., Graziotti, P. H., Farnezi, M. M. M., Santos, L. L., Prochnow, J. T., ve Fontan, I. C. I. (2020). Kirlenmiş Topraklarda Kadmiyum, Kurşun ve Nikelin Bulunabilirliği ve Toksik Seviyesi. [Availability and Toxic Level of Cadmium, Lead and Nickel in Contaminated Soils.] *Communications in Soil Science and Plant*

Analysis, 51(10), 1341–1356. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1763396>

Silva, H. F., Silva, N. F., Oliveira, C. M., ve Matos, M. J. (2021). Kent topraklarının ağır metal kirliliği - Portekiz'in Lizbon şehrinde on yıllık bir çalışma. [Heavy metals contamination of urban soils—a decade study in the city of lisbon, portugal.] *Soil Systems*, 5(2). <https://doi.org/10.3390/soilsystems5020027>

Surat, H., ve Aydar, M. (2019). Ağır Metaller ile Kirilenmiş Alanların Onarılmasında Kullanılabilecek Bitki Türleri. In M. Dalkılıç (Ed.), *Academic Research in Science and Engineering* (Issue December). Gece Akademi.

Sürmen, B., Kılıç, D. D., Kutbay, H. G., ve Tuna, E. E. (2019). Doğal Olarak Yayılış Gösteren *Lepidium draba* L. Türünün Fitoremediasyon Yönteminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *European Journal of Science and Technology*, 17, 491–499. <https://doi.org/10.31590/ejosat.624424>

Takishima, K., Suga, T., ve Mamiya, G. (1988). Jack bean üreazın yapısı: Tam amino asit dizisi, sınırlı proteoliz ve reaktif sistein kalıntıları. [The structure of jack bean urease: The complete amino acid sequence, limited proteolysis and reactive cysteine residues.] *European Journal of Biochemistry*, 175(1), 151–157. <https://doi.org/10.1111/j.1432-1033.1988.tb14177.x>

Thavarajah, D., Lawrence, T., Powers, S., Jones, B., Johnson, N., Kay, J., Bandaranayake, A., Shipe, E., ve Thavarajah, P. (2021). Organik bir kırpma sistemine uyarlanmış lahananın (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) prebiyotik karbonhidrat ve mineral bileşimindeki genetik varyasyon. [Genetic variation in the prebiotic carbohydrate and mineral composition of kale (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) adapted to an organic cropping system.] *Journal of Food Composition and Analysis*, 96, 103718. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103718>

Thongyuan, S., Khantamoon, T., Aendo, P., Binot, A., ve Tulayakul, P. (2021). Ekolojik ve sağlık risk değerlendirmesi, Central, Tayland'daki belediye katı atık depolama sahasından topraktaki ağır metal kontaminasyonunun kanserojen ve kanserojen olmayan etkileri. [Ecological and health risk assessment, carcinogenic and non-carcinogenic effects of heavy metals contamination in the soil from municipal solid waste landfill in Central, Thailand.] *Human and Ecological Risk Assessment*, 27(4), 876–897.

<https://doi.org/10.1080/10807039.2020.1786666>

- Torun, F. E., İrdemez, Ş., Kul, S., ve Nuhuğlu, Y. (2021). Fitoremediasyon yöntemi ile topraktan kurşun giderme. [Lead removal from soil by phytoremediation method.] *Environmental Research and Technology*, 4(2), 152–156.
- Tran, B. T. T., Cavagnaro, T. R., ve Watts-Williams, S. J. (2019). Arbusküler mikorizal mantar aşılması ve toprak çinko gübrelemesi, makarnalık buğdayda çinko ve demirin üretkenliğini ve biyoyararlanımını etkiler. [Arbuscular mycorrhizal fungal inoculation and soil zinc fertilisation affect the productivity and the bioavailability of zinc and iron in durum wheat.] *Mycorrhiza*, 29(5), 445–457. <https://doi.org/10.1007/s00572-019-00911-4>
- TÜİK. (2021). Bitkisel üretim istatistikleri. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Bitkisel-Uretim-Istatistikleri-2020-33737>
- Verla, E. N., Verla, A. W., Osi, A. F., Okeke, P. N., ve Enyoh, C. E. (2019). Çocuk oyun alanlarındaki topraklarda seçilen ağır metallerin hareketlilik faktörleri ile toprak partikül büyüklüğü arasında bir ilişki bulunması. [Finding a relationship between mobility factors of selected heavy metals and soil particle size in soils from children's playgrounds.] *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(12). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7937-7>
- Wyszkowski, M., ve Modrzewska, B. (2017). Nötraliz edici maddelerin çinko ile kirlenmiş topraktaki eser elementlerin toplam içeriği üzerindeki etkisi. [Effect of neutralising substances on the total content of trace elements in soil contaminated with zinc.] *Journal of Elementology*, 22(4), 1439–1451. <https://doi.org/10.5601/jelem.2017.22.1.1409>
- Xiong, R., Gao, X., Tu, X., Mao, Y., Jiang, L., Zheng, L., ve Du, Y. (2022). Çamur kompostunda ağır metal iyileştirme: Son gelişmeler. [[Heavy metal remediation in sludge compost: Recent progress.] *Journal of Renewable Materials*, 10(2), 469–486. <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.017226>
- Yan, A., Wang, Y., Tan, S. N., Yusof, M. L. M., Ghosh, S., ve Chen, Z. (2020). Fitoremediasyon: Ağır Metallerle Kirlenmiş Arazilerin Yeniden Bitkilendirilmesi için Umut Veren Bir Yaklaşım. [Phytoremediation : A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land.] *Frontiers in Plant Science*, 11(359), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00359>

- Yang, X., Baligar, V. C., Martens, D. C., ve Clark, R. B. (1996). Nikel toksisitesine karşı bitki toleransı: II / Dört bitki türünde mineral besin maddelerinin akışı ve taşınması üzerinde nikel etkileri. [Plant tolerance to nickel toxicity: II nickel effects on influx and transport of mineral nutrients in four plant species]. *Journal of Plant Nutrition*, 19(2), 265–279. doi:10.1080/01904169609365121
- Yer, E. N., Ayan, S., Baloglu, M. C., I-, G., & Spektrometresi, A. A. (2021). Fitoekstraksiyon Rollerini Phytoextraction Roles Of Some Poplar (Populus L .) *Taxa Against To Cadmium*.
- Yıldıztekin, M., Ulusoy, H., ve Tuna, A. L. (2019). Ağır Metallerle Kirlenmiş Toprakların İyileştirilmesinde Fitoremediasyon Yöntemi: Tıbbi ve Aromatik Bitkilerin Uygunluğu. *4th International Symposium on Innovative Approaches in Engineering and Natural Sciences Proceedings*, 4(6), 477–480. <https://doi.org/10.36287/sets.4.6.133>
- Zhang, L., McKinley, J., Cooper, M., Han, W., Liu, F., Song, Y., Cheng, H. (2020). Güneybatı Çin, Yunnan Eyaleti, Baoshan bölgesinde kaya-toprak sistemleri ve toprak risk değerlendirmesi arasındaki potansiyel toksik elementlerin (PTE) transfer süreçleri. [Transfer processes of potential toxic elements (PTE) between rock-soil systems and soil risk evaluation in the Baoshan area, Yunnan Province, Southwest China]. *Applied Geochemistry*, 104712. doi:10.1016/j.apgeochem.2020.1047
- Zhang, H., Zhang, L. L., Li, J., Chen, M., ve An, R. D. (2020). Bir ağır metal akümülatörü olan *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle'un büyüme ve enzim savunma stratejileri üzerindeki kurşun, kadmiyum ve nikelin biyobirikimi ve toksik etkileri üzerine karşılaştırmalı bir çalışma. [Comparative study on the bioaccumulation of lead, cadmium and nickel and their toxic effects on the growth and enzyme defence strategies of a heavy metal accumulator, *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle.] *Environmental Science and Pollution Research*, 27(9), 9853–9865. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06968-0>
- Zhao, X., Xu, M., Zhang, W., Liu, G., ve Tong, L. (2021). İki karakteristik değişkene dayalı olarak pirinç bitkilerinde çinko kirliliğinin belirlenmesi. [Identification of zinc pollution in rice plants based on two characteristic variables.] *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 261, 120043. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.120043>
- Zheljzakov VD, Craker LE, Xing B. (2006). Dereotu, nane ve fesleğende Cd, Pb ve Cu'nun

büyüme ve uçucu yağ içeriği üzerindeki etkileri. [Effects of Cd, Pb, and Cu on growth and essential oil contents in dill, peppermint, and basil]. *Environmental and Experimental Botany*, 58, 9-16.

Zheljazkov, V. D., ve Nielsen, N. E. (1996). Ağır metallerin nane ve mısır nanesine etkisi. [Effect of heavy metals on peppermint and cornmint.] *Plant and Soil*, 178(1), 59–66. <https://doi.org/10.1007/BF00011163>

Żyła, N., Fidler, J., ve Babula-Skowrońska, D. (2021). *Brassica oleracea*'nın Ekonomik ve Akademik Önemi. [Economic and Academic Importance of *Brassica oleracea*.] In *Compendium of Plant Genomes (CPG) book series* (pp. 1–6). https://doi.org/10.1007/978-3-030-31005-9_1

