

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARITMA ÇAMURLARINDAKİ AĞIR METALLERİN  
BİTKİLERLE GİDERİMİ

DOKTORA TEZİ

Çevre Y. Müh. Gülgün DEDE

Enstitü Anabilim Dalı : ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Saim ÖZDEMİR

Temmuz 2010

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARITMA ÇAMURLARINDAKİ AĞIR METALLERİN  
BİTKİLERLE GİDERİMİ

DOKTORA TEZİ

Çevre Y. Müh. Gülgün DEDE

Enstitü Anabilim Dalı : ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 28 / 07 / 2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr. Bülent ŞENGÖRÜR

Jüri Başkanı



Prof. Dr. Harun BAYTEKİN

Üye



Prof. Dr. Saim ÖZDEMİR

Tez Danışmanı



Prof. Dr. F. Tülay KIZILOĞLU

Üye



Doç. Dr. İbrahim DEMİR

Üye

## ÖNSÖZ

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında bana başından sonuna kadar yardımcı olan, ilgi ve desteğini hiç eksiltmeyen, yardımcı ve yol gösterici olan, engin bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Saim ÖZDEMİR başta olmak üzere, bilgi ve tecrübeleriyle çalışmaya çok önemli katkılarda bulunan hocalarım Sayın Prof. Dr. F. Tülay KIZILOĞLU'na, Sayın Prof. Dr. Bülent ŞENGÖRÜR'e, Yrd. Doç. Dr. Mehmet İŞLEYEN'e, Yrd Doç. Dr. Füsun BOYSAN'a ve Yrd. Doç. Dr. Nurtaç ÖĞLENI'ye, arıtma çamurlarının temininde ve laboratuarda her türlü kolaylığı sağlayan Karaman Atıksu Arıtma Tesisi çalışanlarına içtenlikle teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olup sevgi ve desteklerini esirgemeyen hayattaki en değerli varlıklarım, annem Seldağ KÖSEOĞLU'na, ablam Günseli KÖSEOĞLU'na, sevgili eşim Yrd. Doç. Dr. Ömer Hulusi DEDE'ye ve varlığıyla hayatımıza neşe katan minik kızımız Tuğba Ece DEDE'ye teşekkür ederim. En önemlisi de yaklaşık 1 yıl önce hayata gözlerini yuman ve acısını içimde yaşattığım, beni bugünlere getiren canım babam Dr. Haydar KÖSEOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim. Bu tezi babama ithaf ediyorum.

Bu çalışma SAÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir.

Çevre Y. Müh. Gülgün DEDE

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	ix
TABLolar LİSTESİ .....	xi
ÖZET .....	xiv
SUMMARY .....	xv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2.	
KONUNUN BİLİMSEL VE TEKNOLOJİK UYGULAMADAKİ YERİ.....	4
2.1. Fitoekstraksiyon Prosesi.....	7
2.2. Hiperbiriktirici Bitki Türleri.....	9
2.3. Ekolojik Rol.....	11
2.4. Metal Çözünürlüğü ve Kullanılabilirliği.....	12
2.4.1. Ağır metallerin çözünürlüğüne etki eden parametreler.....	14
2.4.1.1. pH.....	14
2.4.1.2. Katyon değişim kapasitesi.....	18
2.4.1.3. Organik madde.....	20
2.4.1.4. Ağır metallerin kimyasal yapıları.....	22
2.5. Metal Fitoekstraksiyonunda Şellatlayıcı Maddelerin Rolü.....	24
2.6. Metal Hiperbirikiminin Biyolojik Mekanizmaları.....	26
2.6.1. Kök bölgesi etkileşimi.....	27
2.6.2. Kökler tarafından metal absorpsiyonu.....	30
2.6.3. Köklerden gövdeye taşınım.....	32

2.6.4. Metallerin sıkıştırılması ve bileşik oluşturma.....	32
2.7. Avantajlar ve Dezavantajlar.....	35
2.8. Metal Birikiminin Nicel Değerlendirilmesi.....	39
2.9. Gelecekteki Stratejiler.....	40
BÖLÜM 3.	
MATERYAL VE METOT .....	42
3.1. Çalışmada Kullanılan Arıtma Çamuru ve Çamurun Fiziko- Kimyasal ve Kimyasal Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler.....	42
3.1.1. Arıtma çamuru.....	42
3.1.2. pH (H <sub>2</sub> O).....	42
3.1.3. EC ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ).....	43
3.1.4. Organik madde (%).....	43
3.1.5. Toplam azot (%).....	43
3.1.6. P (Fosfor, %).....	44
3.1.7. K (Potasyum, %).....	44
3.1.8. Katyon değişim kapasitesi ( $\text{cmol (+) kg}^{-1}$ ).....	44
3.1.9. Organik karbon (%).....	44
3.1.10. C/N oranı.....	45
3.1.11. Ağır metal muhtevası.....	45
3.1.12. Fekal koliform tayini.....	46
3.2. Bitkisel Materyalin Belirlenmesi ve Saksı Denemesinin Kurulması	46
3.2.1. Bitkisel materyal.....	46
3.2.2. Saksı denemesinin kurulması ve yürütülmesi.....	49
3.2.3. Yetiştirme ortamlarının hazırlanması.....	50
3.2.3.1. Kükürt uygulaması.....	50
3.2.3.2. Tarımsal jips uygulaması.....	51
3.2.3.3. EDTA uygulaması.....	52
3.2.3.4. Kontrol uygulaması.....	52
3.2.4. Bitkilerin ekimi.....	52
3.2.5. Bitkilerin bakımı.....	61
3.2.6. Bitkilerin hasadı ve örneklenmesi.....	61

3.2.7. Bitki numunelerinin ağır metal analizleri için hazırlanması ..	61
3.3. Bitkilerde İncelenen Parametreler ve Kullanılan Yöntemler .....	62
3.3.1. Biyokütle verimleri.....	62
3.3.2. Görsel gözlemler.....	62
3.3.3. Ağır metal analizleri.....	62
3.3.4. Biyolojik biriktirme faktörü.....	63
3.3.5. Yer değiştirme faktörü.....	63
3.3.6. Sonuçların değerlendirilmesinde kullanılan istatistiksel yöntemler.....	63
BÖLÜM 4.	
BULGULAR VE TARTIŞMA .....	64
4.1. Arıtma Çamuru Karakterizasyonu .....	64
4.2. Fekal Koliform Miktarı.....	69
4.3. Bitkisel Materyal.....	70
4.3.1. Biyokütle verimi.....	70
4.3.2. Ağır metal konsantrasyonu.....	79
4.3.3. Ağır metal giderim verimi.....	90
4.3.4. Biyolojik biriktirme faktörü.....	97
4.3.5. Yer değiştirme faktörü.....	104
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	110
KAYNAKLAR .....	119
ÖZGEÇMİŞ .....	132

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

KM	: Kuru Madde
Cu	: Bakır
Cd	: Kadmiyum
Pb	: Kurşun
Zn	: Çinko
Ni	: Nikel
Cr	: Krom
Fe	: Demir
Mn	: Mangan
Hg	: Civa
As	: Arsenik
Co	: Kobalt
Ca(OH) <sub>2</sub>	: Kalsiyum Hidroksit
AlCl <sub>3</sub>	: Alüminyum Klorür
FeCl <sub>3</sub>	: Demir Klorür
S	: Kükürt
Al	: Alüminyum
N	: Azot
FeS <sub>2</sub>	: Demir Sülfat
NH <sub>4</sub>	: Amonyum
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	: Amonyum Sülfat
MgCO <sub>3</sub>	: Magnezyum Karbonat

CaCO <sub>3</sub>	: Kalsiyum Karbonat
NTA	: Nitrilotriasetik Asit
DTPA	: Dietilen Triamin Pentaasetik Asit
EDTA	: Etilendiamintetrasetik Asit
NPK	: Azot Fosfor Potasyum Gübresi
Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> )	: Kireç Taşı
CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	: Jips
HCO <sub>3</sub>	: Bikarbonat
KDK	: Katyon Değişim Kapasitesi
Ca	: Kalsiyum
Mg	: Magnezyum
P	: Fosfor
K	: Potasyum
C	: Karbon
NaOCl	: Sodyum Hipoklorit
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	: Kalsiyum Nitrat
CDTA	: Cyclohexylenediamine-tetraacetic Asit
EGTA	: Ethyleneglycoltetraacetic Asit
EDDHA	: Ethylenediaminedi(o-hydroxyphenylacetic) Asit
HEDTA	: Hydroxyethylethylenediaminetriacetic Asit
Mo	: Molibden
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	: Nitrat
AsO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	: Arsenat
PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	: Fosfat
Ag	: Gümüş



B	: Bor
Li	: Lityum
Se	: Selenyum
DNA	: Deoksiribonükleik Asit
RNA	: Ribonükleik Asit
Tl	: Talyum
EC	: Elektriksel İletkenlik
LOI	: Yanma Kaybı
K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	: Potasyum Dikromat
NH <sub>4</sub> OAc	: Amonyum Asetat
ICP	: Inductively Coupled Plasma
BaCl <sub>2</sub>	: Baryum Klorür
C/N	: Organik Karbon / Toplam Azot
HNO <sub>3</sub>	: Nitrik Asit
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	: Hidrojen Peroksit
EMS	: En Muhtemel Sayı
P1	: Kontrol uygulaması
P2	: Saf elementsel kükürt uygulaması
P3	: Tarımsal jips uygulaması
P4	: EDTA uygulaması
TKKY	: Toprak Kirliliği Kontrol Yönetmeliği
AB	: Avrupa Birliği
USEPA	: United State Environmental Protection Agency

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	Çalışmada kullanılan bitkiler. <b>A;</b> <i>Conyza canadensis</i> , <b>B;</b> <i>Conium maculatum</i> , <b>C;</b> <i>Datura stramonium</i> , <b>D;</b> <i>Pelargonium hortorum</i> <b>E;</b> <i>Brassica juncea</i> <b>F;</b> <i>Brassica oleraceae</i> var. <i>oleraceae</i> .....	48
Şekil 3.2.	Saksı denemesi.....	50
Şekil 3.3.	Laboratuar kükürt inkübasyon deneyi.....	51
Şekil 3.4.	<i>Conyza canadensis</i> deneme planı.....	53
Şekil 3.5.	<i>Conyza canadensis</i> bitkisi.....	54
Şekil 3.6.	Hasattan önce <i>Conyza canadensis</i> deneme planı.....	54
Şekil 3.7.	<i>Conium maculatum</i> deneme planı.....	55
Şekil 3.8.	<i>Conium maculatum</i> bitkisi.....	55
Şekil 3.9.	Hasattan önce <i>Conium maculatum</i> deneme planı.....	56
Şekil 3.10.	<i>Datura stramonium</i> deneme planı.....	56
Şekil 3.11.	<i>Datura stramonium</i> bitkisi.....	57
Şekil 3.12.	Hasattan önce <i>Datura stramonium</i> deneme planı.....	57
Şekil 3.13.	<i>Brassica juncea</i> deneme planı.....	58
Şekil 3.14.	<i>Brassica juncea</i> bitkisi.....	58
Şekil 3.15.	Hasattan önce <i>Brassica juncea</i> deneme planı.....	59
Şekil 3.16.	<i>Pelargonium hortorum</i> deneme planı.....	60
Şekil 3.17.	<i>Pelargonium hortorum</i> bitkisi.....	60
Şekil 3.18.	<i>Brassica oleraceae</i> var. <i>oleraceae</i> deneme planı.....	60
Şekil 4.1.	Kükürt ilavesinin <i>Conyza canadensis</i> bitkisinin gövde ve kök gelişimine etkisi.....	71
Şekil 4.2.	Tarımsal Jips ilavesinin <i>Conyza canadensis</i> bitkisinin gövde ve kök gelişimine etkisi.....	71
Şekil 4.3.	EDTA ilavesinin <i>Conyza canadensis</i> bitkisinin gövde ve kök gelişimine etkisi.....	72

Şekil 4.4.	Kontrol uygulamasının <i>Conyza canadensis</i> bitkisinin gövde ve kök gelişimine etkisi.....	72
Şekil 4.5.	Kükürt ilavesinin <i>Pelargonium hortorum</i> bitkisinin gövde ve kök gelişimine etkisi.....	73
Şekil 4.6.	Tarımsal jips ilavesinin <i>Pelargonium hortorum</i> bitkisinin gövde ve kök gelişimine etkisi.....	73
Şekil 4.7.	EDTA ilavesinin <i>Pelargonium hortorum</i> bitkisinin gövde ve kök gelişimine etkisi.....	74
Şekil 4.8.	Kontrol uygulamasının <i>Pelargonium hortorum</i> bitkisinin gövde ve kök gelişimine etkisi.....	74
Şekil 4.9.	Kükürt ilavesinin <i>Datura stramonium</i> bitkisinin gövde ve kök gelişimine etkisi.....	75
Şekil 4.10.	Tarımsal jips ilavesinin <i>Datura stramonium</i> bitkisinin gövde ve kök gelişimine etkisi.....	75
Şekil 4.11.	EDTA ilavesinin <i>Datura stramonium</i> bitkisinin gövde ve kök gelişimine etkisi.....	76
Şekil 4.12.	Kontrol uygulamasının <i>Datura stramonium</i> bitkisinin gövde ve kök gelişimine etkisi.....	76

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1.	Deneme planı.....	49
Tablo 4.1.	Çalışmada kullanılan arıtma çamurunun fizikokimyasal ve kimyasal karakterizasyonu.....	64
Tablo 4.2.	Arıtma çamurunun ağır metal muhtevası ve sonuçların Türkiye, ABD ve Avrupa Yönetmelikleri'nde belirtilen toprakta kullanılabilir olacak stabilize arıtma çamurunda müsaade edilen maksimum ağır metal seviyeleri ( $\text{mg kg}^{-1}$ fırın kuru materyal) ile karşılaştırılması.....	68
Tablo 4.3.	Arıtma çamurundaki fekal koliform miktarları.....	69
Tablo 4.4.	Kök ve gövde biyokütle verimlerine ait değerlerin varyans analizi sonuçları.....	76
Tablo 4.5.	Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök biyokütle verim ortalamaları (g) ve oluşan gruplar.....	77
Tablo 4.6.	Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin gövde biyokütle verim ortalamaları (g) ve oluşan gruplar.....	78
Tablo 4.7.	Kök ağır metal konsantrasyonlarına ait değerlerin varyans analizi sonuçları.....	79
Tablo 4.8.	Gövde ağır metal konsantrasyonlarına ait değerlerin varyans analizi sonuçları.....	80
Tablo 4.9.	Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Cu konsantrasyon ortalamaları ( $\text{mg kg}^{-1}$ kuru ağır.) ve oluşan gruplar.....	80
Tablo 4.10.	Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Zn konsantrasyon ortalamaları ( $\text{mg kg}^{-1}$ kuru ağır.) ve oluşan gruplar.....	82
Tablo 4.11.	Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde	

	Ni konsantrasyon ortalamaları ( $\text{mg kg}^{-1}$ kuru ağır.) ve oluşan gruplar.....	84
Tablo 4.12.	Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Cd konsantrasyon ortalamaları ( $\text{mg kg}^{-1}$ kuru ağır.) ve oluşan gruplar.....	85
Tablo 4.13.	Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Cr konsantrasyon ortalamaları ( $\text{mg kg}^{-1}$ kuru ağır.) ve oluşan gruplar.....	87
Tablo 4.14.	Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Pb konsantrasyon ortalamaları ( $\text{mg kg}^{-1}$ kuru ağır.) ve oluşan gruplar.....	88
Tablo 4.15.	Kök ağır metal giderim verimlerine ait değerlerin varyans analizi sonuçları.....	90
Tablo 4.16.	Gövde ağır metal giderim verimlerine ait değerlerin varyans analizi sonuçları.....	90
Tablo 4.17.	Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Cu giderim verimleri ortalamaları ( $\text{mg bitki}^{-1}$ ) ve oluşan gruplar.....	91
Tablo 4.18.	Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Zn giderim verimleri ortalamaları ( $\text{mg bitki}^{-1}$ ) ve oluşan gruplar.....	92
Tablo 4.19.	Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Ni giderim verimleri ortalamaları ( $\text{mg bitki}^{-1}$ ) ve oluşan gruplar.....	93
Tablo 4.20.	Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Cd giderim verimleri ortalamaları ( $\text{mg bitki}^{-1}$ ) ve oluşan gruplar.....	95
Tablo 4.21.	Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Cr giderim verimleri ortalamaları ( $\text{mg bitki}^{-1}$ ) ve oluşan gruplar.....	96
Tablo 4.22.	Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Pb giderim verimleri ortalamaları ( $\text{mg bitki}^{-1}$ ) ve oluşan gruplar.....	97

Tablo 4.23.	Kök biyolojik biriktirme faktörlerine ait değerlerin varyans analizi sonuçları.....	98
Tablo 4.24.	Gövde biyolojik biriktirme faktörlerine ait değerlerin varyans analizi sonuçları.....	98
Tablo 4.25.	Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Cu biyolojik biriktirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar...	99
Tablo 4.26.	Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Zn biyolojik biriktirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar...	100
Tablo 4.27.	Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Ni biyolojik biriktirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar...	101
Tablo 4.28.	Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Cd biyolojik biriktirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar...	101
Tablo 4.29.	Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Cr biyolojik biriktirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar...	102
Tablo 4.30.	Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Pb biyolojik biriktirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar...	103
Tablo 4.31.	Yer değiştirme faktörlerine ait değerlerin varyans analizi sonuçları.....	104
Tablo 4.32.	Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin Cu yer değiştirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar.....	105
Tablo 4.33.	Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin Zn yer değiştirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar.....	106
Tablo 4.34.	Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin Ni yer değiştirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar.....	106
Tablo 4.35.	Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin Cd yer değiştirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar.....	107
Tablo 4.36.	Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin Cr yer değiştirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar.....	108
Tablo 4.37.	Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin Pb yer değiştirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar.....	108

## ÖZET

Anahtar Kelimeler: Arıtma çamuru, ağır metal, bitkilerle arıtım, kükürt, tarımsal jips, EDTA

Bu çalışmada, arıtma çamurlarının içerdiği ağır metallerin daha önce çalışılmamış yerel bitkiler tarafından giderimi ve bu giderime kükürt, tarımsal jips ve EDTA kimyasallarının etkisi tespit edilmiştir. Deneme bitkileri olarak *Conyza canadensis*, *Conium maculatum* (Baldıran), *Datura stramonium*, *Brassica juncea* (Hint hardalı), *Pelargonium hortorum* (Sardunya) ve *Brassica oleraceae var. oleraceae* (Karalahana) seçilmiş, bu bitkilerin çamurdan, Pb, Zn, Cu, Cr, Ni ve Cd metallerini alma potansiyelleri incelenmiştir.

En yüksek Cu, Cr ve Pb konsantrasyonları hiperbiriktirici *Brassica juncea*'da saptanmış, Cu: 109,92 mg kg<sup>-1</sup> kök-48,82 mg kg<sup>-1</sup> gövde, Cr: 169,58 mg kg<sup>-1</sup> kök-64,69 mg kg<sup>-1</sup> gövde ve Pb: 42,27 mg kg<sup>-1</sup> kök-81,5 mg kg<sup>-1</sup> gövde olarak tespit edilmiştir. Kök dokusunda en yüksek Zn konsantrasyonu *Brassica juncea*'da saptanırken (680,99 mg kg<sup>-1</sup> kök), bitki Zn'yu gövde dokusuna taşıyamamış en yüksek gövde konsantrasyonu *Datura stramonium*'da olmuştur (259,45 mg kg<sup>-1</sup> gövde). Cd metalinde öne çıkan bitki *Conyza canadensis* olmuş, bitki kök ve gövdesinde sırasıyla 2,81 mg kg<sup>-1</sup> ve 3,61 mg kg<sup>-1</sup> Cd saptanmıştır. En yüksek Ni konsantrasyonları *Datura stramonium* bitkisinde tespit edilmiş, kök ve gövdede 57,29 mg kg<sup>-1</sup> ve 18,42 mg kg<sup>-1</sup> olmuştur. Deneme bitkilerinden *Brassica juncea*, *Datura stramonium* ve *Conyza canadensis* öne çıkan bitkiler olmuş, *Conium maculatum*, *Brassica oleraceae var. oleraceae* ve *Pelargonium hortorum* bitkileri hiperbiriktirici özellik gösterememişlerdir. EDTA kimyasalı Cd metali hariç diğer tüm metallerde en etkili metal alımını sağlayan uygulama olurken, Cd gideriminde ise kükürt etkili uygulama olmuştur. Bitkiler çamurdaki mevcut ağır metalleri ortalama olarak %65 oranında giderebilmiş, %35'lik kısım ise bitki tarafından düşük alınabilir formda olmuştur.

Biyolojik biriktirme faktörlerine baktığımızda bitkilerin Cu, Cd ve Pb'u aktif olarak biriktirdiği (>1) belirlenmiştir. Deneme bitkileri Zn, Ni ve Cr'u aktif olarak dokularında biriktirememiş, tüm bitkilerde saptanan biyolojik biriktirme faktörleri 1'den düşük gerçekleşmiş, bitkiler hiperbiriktirici özellik gösterememişlerdir. Yer değiştirme faktörlerine genel olarak baktığımızda ise, deneme bitkilerinin Cd ve Pb'u hemen hemen tüm uygulamalarda aktif olarak üst dokularına naklettiği tespit edilmiş, faktör değerleri >1 olarak saptanmıştır.

# HEAVY METAL REMOVAL FROM SEWAGE SLUDGE BY PLANTS

## SUMMARY

Keywords: Sewage sludge, heavy metal, phytoextraction, sulfur, agricultural gypsum, EDTA

In this study, the phytoextraction of heavy metals from sewage sludge by native plants and the effects of sulfur, agricultural gypsum and EDTA chemicals to this process have been determined. *Conyza canadensis*, *Conium maculatum* (Poison hemlock), *Datura stramonium*, *Brassica juncea* (India mustard), *Pelargonium hortorum* (Geranium) ve *Brassica oleraceae* var. *oleraceae* (Black cabbage) were growing on sewage sludge for the removal of Pb, Zn, Cu, Cr, Ni and Cd.

Among the plants tested, the concentration of Cu, Cr and Pb in *Brassica juncea* was significantly higher than the others such as Cu: 109.92 mg kg<sup>-1</sup> root-48.82 mg kg<sup>-1</sup> shoot, Cr: 169.58 mg kg<sup>-1</sup> root-64.69 mg kg<sup>-1</sup> shoot and Pb: 42.27 mg kg<sup>-1</sup> root-81.5 mg kg<sup>-1</sup> shoots. While the maximum root Zn concentration was obtained at *Brassica juncea* (680.99 mg kg<sup>-1</sup>), highest shoot level was determined at *Datura stramonium* (259.45 mg kg<sup>-1</sup>). *Conyza canadensis* was the most conspicuous plant at the Cd removal, such as 2.81 mg kg<sup>-1</sup> and 3.61 mg kg<sup>-1</sup> Cd obtained at root and shoot. The highest Ni concentrations were obtained at *Datura stramonium*, concentrations in order of 57.29 mg kg<sup>-1</sup> and 18.42 mg kg<sup>-1</sup> for root and shoot. Whilst *Brassica juncea*, *Datura stramonium* ve *Conyza canadensis* were obtained as the most evident plants at heavy metal removal, *Conium maculatum*, *Brassica oleraceae* var. *oleraceae* and *Pelargonium hortorum* were not appear to accumulate tested metals. Except Cd, EDTA was the most effective amendment at the phytoextraction process for all metals. Also the most pronounced effect was obtained at sulfur for Cd removal. Tested plants were removed heavy metals from sewage sludge by 65% and the residual of 35% was not removed by plants for the lower bioavailability.

For all the plants, maximum biological accumulation factors (>1) were observed for Cu, Cd and Pb whereas factors were obtained lower for Zn, Ni and Cr (<1). Translocation factors were determined >1 only for Cd and Pb metals.



## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Aritma çamuru evsel aktivitelerden gelen atıklardan, endüstriyel atıklardan ve cadde süprüntülerinden oluşan kompleks bir organik maddedir. Hızlı nüfuz artışı ve şehirleşmenin ve dolayısıyla arıtma sistemlerinin giderek artması sonucunda da oluşan arıtma çamuru miktarı her geçen gün artmaktadır. Çalışmada kullanılan arıtma çamurlarının temin edildiği Sakarya Atık Su Arıtma Tesisine günde yaklaşık 100 bin m<sup>3</sup> atıksu girmekte ve arıtım işlemi neticesinde yaklaşık olarak 100 ton KM/gün arıtma çamuru oluşmaktadır. Sadece İstanbul' da arıtma tesislerinden 2010 yılında 620 ton KM/gün, 2040'da ise 1476,9 ton KM/gün arıtma çamuru çıkacağı tahmin edilmektedir. Arıtma çamurlarının bu kısa süre içindeki artışları bunların bertarafalarında ciddi problemler oluşturmakta, günümüzde uygulanan düzenli depolama ve yakma metotları ise çevresel risklerinin yanında uzun dönemde düşük sürdürülebilirliğe sahip seçenekler olmaktadır.

Aritma çamurlarının yüksek konsantrasyonlarda azot, fosfor, iz elementler ve organik madde içermesi nedeniyle tarımsal amaçlı bertarafı ise dünyada kabul görmüş bir uygulama olmakla birlikte teknolojik alandaki ilerlemeler ve geliştirilen pazarlama, arıtma çamurlarının bir toprak iyileştiricisi olarak kullanılmasını desteklemektedir. ABD'de arıtma çamurlarının %67'si tarımsal faaliyetlerde kullanılmaktadır. Avrupa'da ise bu oran %36 düzeyinde olup İngiltere, Fransa, Norveç, İsveç ve İspanya gibi ülkelerde tarımda kullanılan arıtma çamuru miktarı %50 civarındadır. Arıtma çamuru tarımsal amaçlı kullanımının dışında, ıslah edilen arazilerin restorasyonu için uygun substratı sağlayarak kirlenmiş veya bozulmuş alanların iyileştirilmesinde de kullanılmaktadır. Fakat içerdiği yüksek ağır metal, organik mikrokirletici ve patojen içeriği çamurun arazide bertarafında kaygı yaratmaktadır. Ağır metaller toprak ortamında çoğu zaman rastlanan elementlerdir, fakat arıtma çamurlarının geniş ve yaygın uygulamaları yâda yüksek metal konsantrasyonuna sahip arıtma çamurlarının bilinçsizce uygulanması, tarımsal-

ekosistem içindeki pek çok organizmayı olumsuz etkilemektedir. Arıtma çamuru uygulaması sonucunda artan ağır metal yükü ile etkilenen temel organizmalar tarımsal ürünler, otlayan çiftlik hayvanları, insanlar ve toprak mikroorganizmaları olmaktadır. Ayrıca ağır metallerin toprakta kararlı yapıda olması, çamur uygulamasının durdurulmasından çok yıllar sonra bile kültür bitkilerinin ağır metalleri almalarında artışlara neden olmaktadır. Bu nedenle arıtma çamurlarının arazide bertarafından önce ağır metal içeriğinin giderilmesi çevresel açıdan bir zorunluluk haline gelmiş aynı zamanda yasal yönetmeliklerle de düzenlenmiştir.

Günümüzde arıtma çamurlarından ağır metallerin giderilmesinde çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Fakat bunlar pahalı giderim yöntemleri olmalarının yanında çevresel açıdan riskleri gidermede etkili yöntemler değildir. Bitkilerin çevreyi temizlemede kullanılması fikrinin temeli ise çok eskilere dayanmakla birlikte, uygulamalarla birleşmiş bilimsel buluşlar bu fikrin, fitoremediasyon adı altında çevresel bir proses olarak gelişmesini sağlamıştır. Günümüzde umut verici bir teknoloji olarak ön plana çıkan bitkilerle arıtım prosesi şimdiye kadar toprak ve sulardaki kirlilikleri gidermek amacıyla çoğu araştırmada çalışılmış fakat bu prosesin hem toksik ağır metalleri hem de faydalı besin elementlerini içeren arıtma çamurlarındaki etkinliği az çalışılmış bir konu olmuş, sadece kısıtlı uygulamalarla kalmıştır.

Bu çalışmada; bu eksikliği gidermek amacıyla arıtma çamurlarındaki ağır metallerin, bitkilerle giderilmesi hedeflenmiş, ağır metal içeriği azaltılarak aynı zamanda da stabil hale getirilen arıtma çamurlarının tarımsal arazide bertarafı amaçlanmıştır. Arıtma çamurlarının tarımsal amaçlı kullanımlarının sağlanmasıyla, çöp depolama alanlarına giden yük azalacak ve deponi alanlarının ekonomik ömürleri uzayacaktır. Dünya ve özellikle bütünleşme yolunda olduğumuz AB standartlarında sürdürülebilir üretim söz konusu olacak, bilinçsizce yapılan bertaraf sonunda oluşan çevresel riskler önlenecek ve arıtma çamurlarının bertaraf edilmesi için harcanan ek masraf ortadan kalkacaktır.

Bu amaç doğrultusunda, arıtma çamurlarının döküldüğü alanlarda yapılan arazi çalışmalarında kendiliğinden yetişen bitkilerden en fazla metal biriktirme ve yüksek

biyokütle oluşturma özelliklerine sahip olanlar tespit edilmiştir. Sonrasında bu bitkilerin, arıtma çamurundan ağır metal giderim potansiyelleri, ortam pH'ına, iz elementlerin hareketliliklerinin arttırılmasına ve şelatlayıcı (kıskaçlayıcı) özelliğe sahip kimyasalların ilavesine bağlı olarak saptanmıştır. Ayrıca köklerinden salgıladıkları protonlarla toprak ortamını asitlendirebilen ve böylece ağır metallerin serbest metal iyonları şeklinde çözeltilmeye geçişini sağlayan bitkilerin arıtma çamuruna ekilerek, bu bitkilerin ağır metal giderim potansiyelleri araştırılmıştır. Aynı zamanda verimli bir fitoekstraksiyon prosesinin gerçekleşebilmesi için metal ekstraksiyon oranını dönüşümlü olarak devam ettirebilecek, mevcut iklim koşullarına uyumlu hiperbiriktirici bitki türlerinin tanımlanmasına ihtiyaç vardır. Bu amaç doğrultusunda ülkemiz koşullarına uygun yüksek biriktirici özelliğe sahip yerel bitki türleri tespit edilerek dünya literatürüne tanıtılmış ve kazandırılmıştır.

## **BÖLÜM 2. KONUNUN BİLİMSEL VE TEKNOLOJİK UYGULAMADAKİ YERİ**

Arıtma çamurlarının yüksek konsantrasyonlarda azot, fosfor, iz elementler ve organik madde içermesi nedeniyle gübre ve toprak iyileştiricisi olarak tarım alanlarında kullanımı, kabul görmüş bir uygulamadır. Fakat kaynağa bağlı olarak değişmekle birlikte [1, 2], içerdikleri yüksek ağır metal konsantrasyonları arazide bertarafda kaygı yaratmaktadır. Toprakta kararlı yapıda kalan ağır metaller, çamur uygulamasının durdurulmasından uzun yıllar sonra bile bitkilerin yapısına geçebilmektedir. Arıtma çamurlarında sıklıkla rastlanan ağır metaller Cu, Cd, Pb, Zn ve Ni'dir. Bazı metaller çamur üzerinde büyüyen bitkilerin tüketilmesi yoluyla insan sağlığına zararlı olabilecek düzeylere ulaşabilmektedir. Arıtma çamurlarında tespit edilen ağır metal konsantrasyonları genel olarak  $680\text{--}24000\text{ mg kg}^{-1}$  Zn,  $6\text{--}240\text{ mg kg}^{-1}$  Cd ve  $50\text{--}12980\text{ mg kg}^{-1}$  Ni arasında değişmektedir [2]. Ortalama Pb, Cu ve Cr konsantrasyonları ise sırasıyla  $369\text{ mg kg}^{-1}$ ,  $602\text{ mg kg}^{-1}$  ve  $429\text{ mg kg}^{-1}$ 'dir [3].

Atıksuların arıtılması sonucu, ağır metaller arıtma çamurunda konsantre olmaktadır. Ağır metal limit değerlerini geçmeyen çamurların tarım topraklarında kullanılmasına izin verilmekle birlikte, tekrarlamalı kullanım toprak ağır metal seviyesini yükseltmektedir. Bu nedenle metal seviyesinin daha da düşürülmesine gerek duyulmaktadır.

Arıtma çamurlarından ağır metallerin giderilmesinde, kimyasal sızma ve bakteriyel sızma önerilen proseslerdir, fakat bu metotlar hem pahalı hem de atık su arıtma sistemlerinde ilave yapılara ihtiyaç duymaktadır. Ağır metallerin bitkiler kullanılarak giderilmesi ise ümit verici ucuz bir yöntem olmakla birlikte kimyasal ve bakteriyel arıtmalara göre zaman isteyen ve geniş araziye ihtiyaç duyan bir yöntemdir. Ülkemizde, bertarafı önce arıtma çamurlarının 3 aydan 12 aya kadar depolanması yaygın bir

uygulamadır. Bu yüzden bu depolama periyodu sırasında bitkiler kullanılarak çamurun stabilize edilmesi ve aynı zamanda ağır metallerin de giderilmesi uygulanabilir bir yöntem olarak görülmektedir [1].

Bitkilerle stabilizasyon değişik çalışmalarda yerel ve yerel olmayan bitkiler kullanılarak veya sulak alan bitkileriyle araştırılmış ve çalışmalar devam etmektedir. Samake ve ark. (2003), çamur yataklarında bitki yetiştirerek çamur stabilizasyonunu araştırdıkları çalışmalarında, arıtma çamurlarının yaklaşık 5 ayda stabilize olduğunu, *E. coli* sayısının önemli ölçüde azaldığını, fitotoksik maddelerin giderildiğini ve çamurun susuzlaştırılmasının iyileştiğini belirtmektedir [4].

Gupta ve Sinha (2007), deri endüstrisine ait çamurların döküldüğü alanda büyüyen 4 bitkinin (*Sida acuta*, *Ricinus communis*, *Calotropis procera*, *Cassia fistula*) fitoekstraksiyon potansiyellerini araştırdıkları çalışmalarında, metal birikimini, çalışılan tüm bitkilerde yüksek konsantrasyonlarda tespit etmişler ve genel olarak *S. acuta* ve *C. fistula* bitkilerini deri endüstrisi atıklarıyla kirlenmiş alanlardan çoğu metallerin temizlenmesinde uygun bulmuşlardır [5].

Liu ve ark. (2005) çalışmalarında, yedi bitki türünün susuzlaştırılmış çamurdan Zn ve Cu'nun fitoekstraksiyonunu incelemişler, hiperbiriktirici bitkiler olan *Thlaspi caerulescens* ve *Sedum alfredii*'nin Zn'yu büyük oranda giderirken çamurun tarımsal karakteristikleri olan pH, organik madde içeriği ile azot, fosfor ve potasyum konsantrasyonlarının 4 aylık büyüme periyodunda önemli ölçüde değişmediğini, böylece bir sonraki ürünün bu maddelerle büyümesini sürdürebileceğini tespit etmişlerdir [6].

Singh ve Sinha (2005) ise bahçe toprağına belli oranlarda (10%, 25%, 35%, 50%, 75%, ve 100%) deri endüstrisine ait yüksek konsantrasyonlarda ağır metal içeren (12500 mg Cr kg<sup>-1</sup> kuru ağır.; 843 mg Fe kg<sup>-1</sup> kuru ağır.; 74 mg Mn kg<sup>-1</sup> kuru ağır.; ve 311 mg Zn kg<sup>-1</sup> kuru ağır.) arıtma çamuru ilave etmişler ve toprakta yetiştirdikleri *B. juncea*'nın Cr, Fe, Zn, Mn'ı biriktirme ve toleranslılığını araştırdıkları çalışmada, bitkileri ekimden 30, 60 ve 90 gün sonra hasat etmişlerdir. Bitkideki ağır metal birikimini uygulanan çamur oranına ve maruz kalma süresine bağlamışlar, tüm metaller için en yüksek birikim yeri

olarak önce kökler sonra gövde ve daha sonrasında da yaprakları belirtmişlerdir. Köklerden gövdeye en az taşınan metal Cr olmuş, gövde ve yapraklarda yaklaşık olarak aynı konsantrasyonlarda metal biriktiği gözlenmiştir. Bitkideki maksimum Cr, Fe, Zn ve Mn metal birikimleri sırasıyla 1218 mg kg<sup>-1</sup>, 1172 mg kg<sup>-1</sup>, 331 mg kg<sup>-1</sup> ve 592 mg kg<sup>-1</sup> kuru ağırlık ile 90 gün boyunca %100 çamur uygulamasında büyüyen *B. juncea*'nın köklerinde saptanmıştır. Sonuçlar bitkinin bu metalleri etkili bir şekilde biriktirdiğini göstermiştir [7].

Başka bir çalışmada da 5 bitki türünün arıtma çamurundan zehirli ve yararlı elementleri giderme verimleri incelenmiş çamurda yetişen bitkilerde ağır metal gideriminin, bitkideki konsantrasyon yanında toplam biyokütleyle de bağlı olduğuna değinilmiştir. Örneğin çalışmada kullanılan *Vetiveria zizanooides* ve mısır, hiperbiriktirici bitkilere göre 4 ile 40 kat fazla kuru gövde biyokütlesi oluşturabilmiştir. Biyokütle ve alan başına Zn giderimi baz alındığında mısır (köklerde 201 mg kg<sup>-1</sup>, toprak üstü dokuda 256 mg kg<sup>-1</sup> Zn), ile hiperbiriktirici *Alocasia marorrhiza* (köklerde 738 mg kg<sup>-1</sup>, toprak üstü dokuda 458 mg kg<sup>-1</sup>) çamurdan Zn'yu gidermede eşit etki göstermiştir [1].

Diğer bir çalışmada ise, mısır ve *Alocasia antiquorum* bitkileri susuzlaştırılmış arıtma çamurunda yetiştirilmiş ve dokularındaki Zn birikimleri farklı olmasına rağmen (*Zea mays* için kök kuru ağırlıkta 245 mg Zn kg<sup>-1</sup>, gövdede 370 mg Zn kg<sup>-1</sup> olurken, *A. antiquorum*'da kök kuru ağırlıkta 1250 mg Zn kg<sup>-1</sup>, gövdede 430 mg Zn kg<sup>-1</sup>) çamurdan Zn'yu gidermede eşit derecede etkili olmuşlardır [6].

Ağır metallerin bitkilerle giderimi yani fitoekstraksiyonu için hiperbiriktirici bitkilerin etkinliği pek çok araştırmada çalışılmışsa da bu bitkilerin çamurdaki hem toksik ağır metalleri hem de faydalı besin elementlerini giderme etkinliği az çalışılmış bir konudur. Günümüze kadar yapılan bilimsel çalışmalar konuyla ilgili deneyimi arttırsa da etkili bir ağır metal gideriminin başarıyla uygulanabilmesi, bu prosese ait mekanizmaların ve bu prosesin verimine etki eden parametrelerin iyi bir şekilde anlaşılmasına bağlıdır.

Özellikle ortam özelliklerinin ağır metallerin alınabilirliği üzerindeki bilinen etkisi nedeniyle ortam özelliklerinin iyi tespit edilmesi gerekir. Çünkü gerektiği takdirde

proses verimini arttırmak için bu özelliklerin değiştirilmesi gerekebilir. Etkili kimyasal ıslah edicilerin geliştirilmesi ve bunların etkili uygulamaları ile ise fitoekstraksiyonda çarpıcı ilerlemeler kaydedilmiştir.

Bu amaç doğrultusunda fitoekstraksiyon prosesi, hiperbiriktirici bitkiler ve bu bitkilerin ekolojik rolü, metal çözünürlüğü ve kullanılabilirliği ve bunlara etki eden parametreler, şelatlayıcı maddelerin metal çözünürlüğü ve metal giderimindeki etkisi, metal birikiminin biyolojik mekanizmaları, prosesin avantaj ve dezavantajları ile fitoekstraksiyonun nicel boyutu bu bölümde ele alınacaktır.

## 2.1. Fitoekstraksiyon Prosesi

Bitkilerle arıtım prosesi yani fitoekstraksiyon; kirleticilerin bitki kökleriyle alımı ve sonrasında bitkinin toprak üstü aksamına taşınımı ile giderilmesidir. Gövde, dal ve yapraklarda depolanan metaller, bitki hasat edilerek alandan uzaklaştırılır [8].

Fitoekstraksiyon çalışmaları, doğal olarak mineralize olmuş topraklarda ve maden sahalarında yaşayan endemik türlerin ve çeşitli yabani bitkilerin keşfedilmesiyle başlamıştır [9, 10]. İlk olarak 16. yy'da Florentine'li botanist Andrea Cesalpino Toskany Tiber vadisinde bulunan yüksek magnezyum ve demir içeren kayaçlar (ultramafik kayaçlar) üzerinde yetişen *Alyssum bertolonii* bitkisini keşfetmiştir. 1948 yılında aynı bölgede *A. bertolonii* bitkisindeki olağandışı nikel birikimi rapor edilmiştir. Nikel içeriği %0,42 olan toprakta yetişen bitkinin kuru yapraklarında %0,79 (7900 mg kg<sup>-1</sup>), yapraklardan elde edilen külde ise %9,21 nikel saptanmıştır. İkinci nikel bitkisi *A. murale*'nin keşfi ise 1961 yılında Rus bilim adamı Doksopula tarafından olmuştur. [11]. 19. yüzyılın sonlarında *Thlaspi caerulescens* ve *Viola calaminaria* yapraklarında yüksek seviyelerde metal biriktirdikleri belgelenen diğer bitki türleridir [9]. *V. calaminaria* bitkisinde tespit edilen çinko konsantrasyonu kuru ağırlığında 10000 mg kg<sup>-1</sup>'dir (%1), bu konsantrasyon bitkinin külünde %10 Zn'ya denktir [12]. Sonraki yıllarda kirlenmiş topraklardan metallerin bitkiler kullanılarak ekstrakte edilmesi fikri yeniden ele alınmış ve geliştirilmiş, Severne ve Brooks (1972) ile Cole (1973) batı Avustralya'dan *Hybanthus floribundus*'da olağandışı nikel birikimini rapor etmişlerdir. Bitki %0,07-

0,10 nikel içeren topraktan %1,38'e kadar nikeli biriktirebilmiştir [11]. 1983 yılında hiperbiriktirici bitkilerin pratik olarak kullanılabileceği ortaya atılmış, 1991 yılında Zn ve Cd fitoekstraksiyonu ile ilgili ilk arazi denemeleri yürütülmüştür [9, 13]. 1995 yılında da *Streptanthus polygaloides* bitkisinin hektardan 100 kg'm üzerinde nikel kaldırmasıyla bu bitkilerin fitoekstraksiyonda kullanılmaları uygulamada gerçekleştirilmiştir [13].

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, ağır metallerin fitoekstraksiyonunun uygulanabilirliğine bakılmış ve prosesin verimli olabilmesi için hem iyi bir biyokütle verimine hem de iyi bir metal hiperbirikimine ihtiyaç duyulduğu üzerinde durulmuştur [14]. Ayrıca istikrarlı, ispatlanmış ve sağlam tarımsal uygulamalar kullanılarak kolay ekilebilen, yüksek biyokütleli bitkilerin metal biriktirme kapasitelerinin değerlendirilmesinin önemi vurgulanmıştır [10, 14]. Son yıllarda arıtma çamurlarından ağır metallerin fitoekstraksiyonu ile ilgili yürütülen çalışmalarda ise ağır metal giderim veriminin sadece bitki türüne bağlı olmadığı çamurun karakteristiklerine de bağlı olduğu saptanmıştır [1]. Özellikle ağır metallerin sahip oldukları düşük biyoyararlanımlık nedeniyle, yapılan çalışmalarda şelatlayıcı maddelerin ilavesinin üzerinde durulmuş, bu kimyasalların kirleticilerin biyoyararlanımlıklarını arttırdığı ve normal bitkilerde bile bazen hiperbirikimi teşvik ettiği görülmüştür [14].

Fitoekstraksiyon prosesi sonucunda oluşan metalce zengin bitki materyallerinin bertarafı için ise en sık kullanılan yöntem kontrollü yakmadır. İşlem sırasında ağır metaller külde en az 10 kat konsantre hale gelmekte ve işlemin sonunda yüksek metal muhtevası içeren kül oluşmakta, bu külden metallerin geri kazanılması metal biriktirici bitkilerin küllerine değer katmaktadır [15, 16]. Fakat küllendirme işleminin ekonomik açıdan uygulanabilirliği bitkinin içerdiği ağır metal miktarına bağlıdır. Örneğin, hiperbiriktirici bitki türü *Thlapsi caerulesces* biyokütlesinin külü %20–40 oranında Zn içerirken, *Zea mays* için bu oran sadece %0,5'dir. Bir önceki zengin cevher, bir sonraki ise bertaraf edilmesi gereken fitotoksik bir atıktır [17].

Diğer bir hiperbiriktirici bitki türü *Brassica juncea* hektar başına 18 ton mahsul üretebilmekte ve mevcut tarımsal uygulamalara ve farklı iklim koşullarına sahip



yetiştirme ortamlarına kolaylıkla adapte olabilmektedir. Gövdesinde %3,5'lük Pb ile sadece yüzey üstü biyokütlesinin hasat edilmesi ve küllendirilmesi ile hektar başına 630 kg kurşunu ortamdan ekstrakte edebilmektedir. Köklerinde hasat edilmesiyle Pb ekstraksiyonu daha da artmaktadır [16]. Literatürde külü  $40 \text{ mg kg}^{-1}$ 'ın üzerinde kurşun içeren bir bitkiden kurşunun geri kazanılmasının ekonomik açıdan uygun olduğu belirtilmiştir [17].

Halen araştırma aşamasında olan diğer bitki dokusu bertaraf yöntemleri ise güneş, ısı ve hava kurutması, kompostlama, sıkıştırma-presleme ve eritmedir [15].

## 2.2. Hiperbiriktirici Bitki Türleri

Yüksek konsantrasyonda metallerle kirlenmiş ortamlarda az sayıdaki bitki türü yaşayabilmekte ve yüksek seviyelerdeki zehirli metalleri tolere edip, bünyesinde biriktirebilmektedir (%1 ile 5) [8, 9, 10, 13]. Bu bitkiler metal hiperbiriktiricisi olarak adlandırılmakta ve doğal ortamlarında büyürken genel olarak  $10 \text{ mg kg}^{-1}$ 'dan fazla Hg'yı,  $100 \text{ mg kg}^{-1}$ 'dan fazla Cd ve As'i,  $1000 \text{ mg kg}^{-1}$ 'dan fazla Co, Cr, Cu, Pb'u ve  $10000 \text{ mg kg}^{-1}$ 'dan fazla Ni, Mn ve Zn'yu biriktirebilmektedirler [8, 9, 18]. Bu konsantrasyonlar, kirlenmemiş ortamlarda büyüyen normal bitki türleriyle karşılaştırıldığında 100 kat daha fazladır [9, 13, 14].

45 bitki familyasına ait yaklaşık 400 bitki türünün, metalleri hiperbiriktirebildiği bilinmektedir [9, 12]. Bu bitkiler yıllık büyüyen küçük otlardan, uzun süreli çalı ve ağaçlara kadar değişmektedir [10, 13]. Literatürde günümüze kadar en fazla çalışılmış bitki türlerinin başında *Alyssum murale*, *Thlaspi caerulescens*, *Nicotiana tabacum*, *Zea mays*, *Brassica juncea*, *Salix viminalis* gelmektedir [19]. Fakat bitkilerle iyileştirme planının etkinliği uygun bitkinin yâda bitkilerin seçilmesine bağlıdır. Temizlenmesi hedeflenen ortamın mevcut yerel bitkilerle iyileştirilmesi düşünülmelidir, çünkü bu bitkiler yerel iklime, hastalık ve zararlılara adapte olmuş türlerdir [8]. Verimli bir fitoekstraksiyon prosesinin gerçekleştirilebilmesi için metal ekstraksiyon oranını dönüşümlü olarak devam ettirebilecek, mevcut iklim koşullarına uyumlu hiperbiriktirici bitki türlerinin tanımlanmasına ihtiyaç vardır. Bu amaç doğrultusunda bu çalışmada da,

ülkemiz koşullarına uygun yüksek biriktirici özelliğe sahip yerel bitkiler belirlenecek ve dünya literatürüne kazandırılacaktır.

Literatürde tespit edilmiş en yüksek ağır metal konsantrasyonu Güney Afrika'da doğal yollarla yetişmiş bir yabancı bitkide, *Berkheya condii* kaydedilmiş  $7880 \text{ mg kg}^{-1}$  Ni'dir [13]. *Berkheya condii*'de deneysel yollarla ulaşılmış en yüksek konsantrasyon ise  $5000 \text{ mg kg}^{-1}$  Ni'dir, buda hektar başına 22 ton kuru biyokütle ile 110 kg nikel verimine eşitir [13]. Gövdedeki nikel konsantrasyonu  $50\text{--}100 \text{ mg Ni kg}^{-1}$  kuru ağırlığa ulaştığında pek çok bitki önemli bir mahsul azalması yönünde zarar görürken [17], Ni hiperbiriktiricisi bitki türleri olan *Alyssum lesbiacum* ve *Thlaspi goesingense* herhangi bir biyokütle azalması olmadan çok yüksek konsantrasyonlarda nikeli biriktirebilmektedirler. *Thlaspi goesingense*'nin kuru ağırlığında  $9490 \text{ mg kg}^{-1}$  Ni biriktiği bulunmuştur [8]. *Alyssum* bitki türünde yapraklarının kuru ağırlığında 1000 ile  $30000 \text{ mg kg}^{-1}$  arasında Ni içerdiği saptanan 48 farklı tür tespit edilmiştir [8]. Yaklaşık 1,5 m'lik gövde uzunluğu ile yüksek biyokütleli bir bitki olan *Berkheya condii*'nin gövde kuru ağırlığında  $11600 \text{ mg kg}^{-1}$  (% 1,16) kadar nikeli biriktirebildiği belirtilmiştir [20]. Çinko hiperbiriktirici bitkiler olan *Thlaspi caerulescens* ve *Arabidopsis halleri* herhangi bir zehirlilik belirtisi göstermeden gövde kuru ağırlığında  $30000 \text{ mg kg}^{-1}$ 'a kadar çinkoyu biriktirebildikleri rapor edilmiş bitkilerdir [21]. Del Rio-Celestino ve ark. (2006) çalışmalarında, *Cichorium intybus*'un gövde Pb konsantrasyonunu  $>1000 \text{ mg kg}^{-1}$  olarak saptamışlardır [22].

Ayrıca Ganges ve Vivez bitki türlerinin herhangi bir zehirlilik belirtisi göstermeden kuru ağırlıklarında sırayla  $10000 \text{ mg kg}^{-1}$ 'a ve  $12500 \text{ mg kg}^{-1}$ 'a kadar kadmiyumu biriktirebildikleri bulunmuş, Puyde Wolf ve Pragon bitki türlerinin kuru ağırlıklarında sırasıyla  $2300 \text{ mg kg}^{-1}$  ve  $4800 \text{ mg kg}^{-1}$  Cd biriktirebildikleri tespit edilmiştir [8]. Kontrolsüz şartlarda doğal olarak yetişmiş *Thlaspi caerulescens* bitkisinde tespit edilen en yüksek gövde kuru ağırlık Cd konsantrasyonu ise  $3600 \text{ mg kg}^{-1}$ 'dir [23]. *Sedum alfredii* son yıllarda tanımlanmış Zn hiperbiriktiricisidir ve gövde kuru ağırlığında yaklaşık olarak %2 Zn konsantrasyonunu biriktirebilmektedir [1].

Clemente ve ark. (2005), asidik karakterde ve metalce zengin zehirli atıkların etrafa saçılmaları ile kirlenmiş bir arazide *Brassica juncea* (L.) Czern'in iki farklı türünü

yetiştirmişler, bunların metal birikimleri ve metal fitoekstraksiyonunda uygulanabilirliklerini çalışmışlar, organik toprak iyileştiricilerinin ve kirecin, biyokütle üretimi ve bitkilerin yaşamlarını sürdürmeleri üzerindeki etkilerini değerlendirmişler ve özellikle düşük pH'a (<6) sahip parsellerde büyüyen *B. juncea*'nın yapraklarındaki Zn, Cu, ve Pb konsantrasyonlarının yükseldiğini, sırasıyla maksimum 2029 mg kg<sup>-1</sup>, 71 mg kg<sup>-1</sup> ve 55 mg kg<sup>-1</sup> değerlerine ulaştığını tespit etmişlerdir [24].

Arıtma çamurlarının da sahip olduğu yüksek konsantrasyonlardaki nikel ve çinko içeriği nedeniyle de, bu çalışmada *Brassica juncea* kontrol bitkisi olarak denenmiştir. Ayrıca arıtma çamurlarının döküldüğu arazide tespit edilen yüksek biyokütleli üç adet baskın bitki türü olan *Conyza canadensis*, *Conium maculatum*, *Datura stramonium* deneylerde kullanılmak üzere seçilmişler, kök bölgesini asitlendirme özelliğine sahip olduğu bilinen *Pelargonium hortorum* bitkisi de çalışmaya dâhil edilmiştir. *Datura stramonium* literatürde tıbbi bitki olarak geçmektedir. Bu bitki ile, toprakların temizlenmesinin yanı sıra dünyada ilaç hammaddesi üretilmesi de hedeflenmektedir. Bu bitkiden ilaç yapımında kullanılan alkaloidler; hyoscyamin ve scopolamin elde edilmekte, bu maddeler ABD'de bitki orijinli etkili madde sıralamasında ilk 10 içinde yer almaktadır. Arıtma çamuru besin elementlerince zengindir, bu nedenle yüksek biyokütle oluşturmaları sağlanan bölge ve ülkemize özgü yerel bitkilerin ağır metal alım ve biriktirme potansiyelleri, biyokütle oluşumu dikkate alınarak tespit edilecektir.

### 2.3. Ekolojik Rol

Metal hiperbirikimi ana kayalardan kaynaklanan minerallerce zengin topraklarda yetişen bitkilerin evrimsel adaptasyonudur. Bu özellik, yüksek metal konsantrasyonları büyümelerine zararlı olan diğer bitkilere nazaran bazı bitkilere ekolojik bir avantaj sağlamaktadır. Bu rekabetçi avantaj, bu özel bitkileri meydana getirmiştir. Dolayısıyla, metal hiperbiriktirici türler spesifik mineral zenginliğe sahip sınırlı bir coğrafi alanda ortaya çıkmışlardır [9].

Metal hiperbirikiminin ekolojik rolü hala tamamen açık değildir, fakat bitkideki metal hiperbirikiminin bitkinin yenebilir kısımlarını tatsız yada yenildiğinde öldüren hale

getirerek mantar ve böcek saldırılarına karşı koruma sağladığı ileri sürülmüştür [9]. Zararlılara karşı savunma mekanizması ilk olarak 1987 yılında Ernst tarafından bakır hiperbiriktiricisi *Silene vulgaris* (*Silene cucubalus*) bitkisinde (yaprak kuru ağırlığında 1400 mg kg<sup>-1</sup>'a kadar bakır) tespit edilmiştir. Bakırca zengin yâda kireç taşından oluşmuş otlak topraklarda, kireçtaşı otlak populasyonunun tohumları kelebek larvaları tarafından tahrip edilirken, bakırca zengin toprakta büyüyen bitkilere kelebek larvası saldırısı olmamıştır, bu bitkilere tırtıllar nakledildiğinde ise tırtıllar ölmüştür [11]. Yeni kanıtlar nikel hiperbirikiminin *Streptanthus polygaloides*'de fungal ve bakteriyel patojenlere ve *S. polygaloides* ve *T. montanum*'da böcek saldırılarına karşı koruyucu fonksiyon oluşturduğunu göstermiş, çinko hiperbiriktiricisi *T. caerulescens*'de biriktirilen çinkonun zararlılara karşı etkisi deneylerle kanıtlanmıştır [12, 17]. Ayrıca hücre duvarında yüksek seviyelerde metal biriktirilmesi, kuru şartlarda oluşacak nem kayıplarına mani olmaya yardımcı olmaktadır. Bazı hiperbiriktirici bitkilerin suyun az olduğu durumlarda, dallarında yüksek metal konsantrasyonlarını biriktirerek, ozmotik basınç ayarlama yoluyla, nem yönetim stratejisi oluşturdukları gözlenmiştir [25].

#### 2.4. Metal Çözünürlüğü ve Kullanılabilirliği

Arıtma çamurlarının bir arazide uzun süre depolanmaları sonucunda çamurun yapısındaki organik maddelerin parçalanması ve çoğu zamanda toprağın asitlenmesi ile çamurda yavaş yavaş yeni bir biyokimyasal denge oluşmakta ve sonuç olarak çamur kaynaklı elementlerin bitkiler tarafından alınabilirliği arıtma çamurlarının biyolojik parçalanmasından sonra değişiklik göstermektedir [26]. Özellikle ağır metaller, katı ortam bileşeniyle, fizikosorpsiyon, spesifik adsorpsiyon, presipitasyon ve organiklerle bileşik oluşturma yoluyla etkileşirler. Bu sorpsiyon/desorpsiyon mekanizmalarının kapsamı, metallerin bitkiler tarafından alınabilirlik potansiyelleri üzerinde temel etkiye sahiptir. Metallerin, katı ortam bileşeniyle bu etkileşimleri sonucunda oluşan kısıtlı çözünürlük, bitkideki metal hiperbirikimini sınırlayan en temel faktördür [27].

Metallerin arıtma çamurlarında bulunduğu formlar çözünür, yer değiştirebilir, organik maddeye bağlı ve çökelmiş şeklindedir. Metal durumunda sadece serbest metal iyonları, ortamda çözünmüş metal bileşikleri yâda iyon değişim alanlarında inorganik katı ortam

bileşenine adsorbe formunda bulunan metaller, bitkiler tarafından alım için uygundur. Bunlar kökler tarafından kolaylıkla alınabilir yâda kök salgıları ile kolaylıkla çözülebilir, fakat bu oran topraktaki toplam metal içeriğinin sadece küçük bir kısmını oluşturmaktadır [8, 12]. Katı ortamdaki organik maddeye bağlanmış, çökelmiş (oksitler, hidroksitler, karbonatlar) yâda silikat mineral yapılarının içine gömülmüş halde bulunan metaller ise bitki alımı için uygun değildir [8]. Bu yüzden metallerin buldukları ortam ile etkileşimlerinin iyi anlaşılması, fitoekstraksiyonun uygulanabilirliği açısından çok önemlidir [9].

Aynı evsel arıtma tesisinden alınan 12 adet arıtma çamuru numunesinde yapılan incelemelerde, metallerin çoğunluğunun (toplam Zn'nun %42'si ve toplam Pb'nun %58'si) mineral kısımda (oksidlenebilir ve tortu kısım) bulunduğu tespit edilmiştir [28]. Fakat ağır metallerin bitkiler tarafından alınabilirliği, toprağa çamur ilavesinin ardından çözünebilir/kolayca parçalanabilir organik madde ve kararsız inorganik bileşiklerin mikroorganizmalar tarafından parçalanması ile metallerin toprak çözeltisine hemen salınması sonucunda çok yüksek olmaktadır [28].

Bazı çalışmalarda bitkilerin ağır metal alımlarının, ortamdaki toplam metal içeriği ile bağlantılı olduğuna değinilmiştir. Yapılan çalışmalarda bitkilerin, düşük Cd içeren çamurlara nazaran yüksek Cd içeren çamurlardan daha fazla Cd'ü aldıkları bulunmuştur. Düşük Cd konsantrasyonlarında, Cd çamurdaki organik madde özellikle fulvik asit ile sıkı bağ oluştururken, yüksek Cd konsantrasyonlarında çok daha fazla Cd katyon değişim alanlarını daha zayıf bir şekilde işgal etmektedir. Fakat bununla birlikte yüksek metal yükleme oranları her zaman zayıf tutunmayı ifade etmemektedir. Örneğin, düşük çamur miktarı uygulamasına (hektar başına 191 ton) nazaran, hektar başına 765 tonluk yüksek oranda çamur uygulamasında, Zn'nun toprak katı bileşenine daha sıkı bağlandığı tespit edilmiştir. Sonuçta Fe hidrat, Mn oksitler ve fosfat gibi çamur bileşenleri de metal kullanılabilirliğini sınırlayan faktörlerdir [28].

Çamur arıtım yöntemlerinin, çamur kaynaklı metallerin biyokullanılabilirliğine etkisi çoğu araştırmada incelenmiş ve Cd'un bitkiler tarafından alınabilirliği kurutma yatağında kurutulmuş çamur uygulanmış toprakta, sıvı çamura göre daha düşük

bulunmuştur. Bu muhtemelen, çamurlar arasındaki fiziksel farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Aynı arıtma tesisinde oluşmuş ve oksijensiz ortamda çürütülmüş fakat biri lagünde kurutulmuş diğeri filtreden geçirilmiş iki adet çamurda yapılan denemelerde ise, farklı işlemlerin Cd ve Zn'nun bitkiler tarafından alınabilirlikleri üzerinde önemli etkisi olduğu anlaşılmıştır. Her iki çamurda aynı yaşta iken, filtreden geçirilerek susuzlaştırılan çamurdaki ağır metallerin, 3 kat daha fazla organik madde içeren ve yüksek pH'a sahip lagünde kurutulan çamurdaki ağır metallere nazaran bitkiler tarafından yüksek alınabilirliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak çamur susuzlaştırma ve stabilizasyon işlemlerinin, çamurdaki toplam metal içeriğinde ve metallerin hareketliliğinde önemli etkisi olduğu saptanmıştır [28].

#### **2.4.1. Ağır metallerin çözünürlüğüne etki eden parametreler**

Ağır metallerin çözünürlüğü ve kökler tarafından absorpsiyonu üzerinde önemli etkisi olan fiziko-kimyasal parametreler; pH, organik madde, katyon değişim kapasitesi, ağır metallerin kimyasal yapıları, sıcaklık, nem, ortamda bulunan elementlerin kimyasal kompozisyonu, ortamın karbonat muhtevası, klorür içeriği ve kil muhtevasının türü ve seviyesidir [9, 18]. Etkili bir fitoekstaksiyon ve bitki gövdesinde önemli metal birikimlerinin gerçekleşebilmesinin çözünebilir metallerin bolluğuna oldukça bağlı olması nedeniyle, bu parametreler, metal çözünürlüğünü ve kullanılabilirliğini arttırmak için değiştirilebilir [12].

##### **2.4.1.1. pH**

pH, ortamdaki metallerin bitkiler tarafından alınabilirliğine etki eden en önemli parametredir. pH'ın düşürülerek (<6 pH) ortamın asitlendirilmesinin bilinen etkisi, H<sup>+</sup> iyonunun mineral yüzeylerdeki bağlanma bölgeleri için rekabeti nedeniyle metallerin toprak partiküllerine bağlanmasının azalması ve böylece elementlerin çözünürlüklerinin artmasıdır [29, 30]. Mo ve Se hariç düşük pH'larda tüm temel iz elementlerin çözünürlüklerinin arttığı belirtilmektedir. Özellikle pH 6,5'un altında ağır metallerin ortamda, bitkiler için daha alınabilir formda buldukları saptanmıştır [3]. pH'ın yükselmesi ise ağır metallerin kil mineralleri ve organik maddelerin üzerine

adsorpsiyonunu arttırır [9, 10]. pH değeriindeki bir birimlik artışın, Zn ve Cu hareketliliğinde yaklaşık olarak 100 kat azalmaya neden olduğu belirtilmektedir [3].

Çamur pH'ının önemi, çamur kaynaklı metallerin kullanılabilirliği ile ilgili çoğu çalışmada dikkate alınmış fakat net bir biçimde ortaya konmamıştır. Çünkü bir toprağa çamur eklendiğinde toprak özellikleri çamur özelliklerine nazaran baskın olmakta ve çamurun pH tamponlama etkisi hızla bastırılmaktadır. Çamurdaki pH tamponlama kapasitesi, inorganik çamur bileşeni ile kontrol edilmektedir. Yapılan çalışmalar çamur uygulamasından sonra pH'da oluşan bu azalmanın yâda artmanın, çamur arıtma prosesi esnasında P'u çökeltmek için kullanılan  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{AlCl}_3$  yâda  $\text{FeCl}_3$ 'ün kullanımına bağlı olarak değiştiğini göstermiştir.  $\text{Ca(OH)}_2$  uygulanan çamur, ortam pH'ını arttırmakta,  $\text{AlCl}_3$  başlangıçta pH'da bir değişiklik yapmamakta fakat yıllık düzenli uygulamalar pH'ı düşürmektedir.  $\text{FeCl}_3$  ise ilk ve sonraki yıllarda ortam pH'ını düşürmektedir [31].

Ayrıca kompostlama, pelletleştirme ve küllendirme işlemleri susuzlaştırılmış çamurun pH'ını 1 birim düşürmekte, bazı arıtma çamurlarındaki yüksek oranlardaki mineralize olmuş N ve parçalanmaya hazır organik madde, çamur pH'ını etkilemektedir. Yüksek oranlarda çamur uygulanmış (hektar başına 50 ton) kumlu topraklarda organik N'un mineralizasyonu, başlangıç pH'ını 1,5 birim yükseltmiştir. Fakat bunu takiben 100 gün sonra pH'da düşme olmuş ve 350 günün sonunda ise başlangıç pH'ının yarı değerine ulaşılmıştır. Fakat çamurun asitlenmesinde sadece organik N mineralizasyonu etkili değildir. Organik S parçalanması, Al bileşiklerinin hidrolizi ve  $\text{FeS}$  yâda  $\text{FeS}_2$ 'ün oksidasyonu, pH'ı düşürmekte ve bitkilerin metal alımlarını arttırmaktadır [28].

Başka bir çalışmada ise çamur uygulamasının ardından oluşan pH'daki bu düşüş, sülfidlerin oksidasyonuna, organik maddenin parçalanmasına ve nitrifikasyona bağlanmıştır. Özellikle yüksek miktarlarda uygulanan çamurun toprak pH'ı üzerindeki etkisinde fazla olmuştur [31]. Ayrıca ortama ilave edilen gübrelerinde pH'ın azalmasında ve artmasında etkisi vardır. Yüksek oranda  $\text{NH}_4$  içeren gübreler toprak pH'ını düşürmekte ve Cd alımını arttırmaktadır [32].

Yanai ve ark. (2006), *T. caerulescens*'in Cd alımına pH'ın etkisini inceledikleri çalışmalarında, toplam Cd konsantrasyonu 0,6–3,7 mg kg<sup>-1</sup> arasında değişen toprakta pH 4,4'e nazaran pH 5,1-7,6 aralığında en yüksek bitki biyokütlesini tespit etmişler, bitkideki en yüksek Cd konsantrasyonunu (236 mg kg<sup>-1</sup>) pH 5,1'de tespit etmişlerdir. Toplam Cd konsantrasyonu 2,6–314,8 mg kg<sup>-1</sup> arasında değişen toprakta ise gövde Cd konsantrasyonunu 10,9-1196 mg kg<sup>-1</sup> olarak saptamışlardır [33]. Chaney ve ark. (1999), ortamın asitlendirilmesinin Zn ve Cd fitoekstraksiyonuna etkisini araştırmışlar ve yüksek verim için gerekli olan mikroelementleri sağlaması ve metal biyokullanılabilirliğini arttırması amacıyla toprağı asitlendirmek için (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>'ün toprak ilavesi olarak kullanılmasını önermişlerdir [34].

pH sadece metallerin biyokullanılabilirliklerine etki etmez, ayrıca asidik ortamda metallerin artan kök içine alım prosesine de etki eder [9, 10]. Örneğin kükürttün ortamda bulunan *Thiobacillus* ototrofik bakterileri tarafından oksidasyonu sonucunda oluşan sülfürik asit nedeniyle pH'ın düşmesinin, çoğu elementin özellikle Cu, Zn, Pb ve Cd'un bitkiler tarafından alınabilirliğini arttırdığı tespit edilmiştir [29, 35]. Literatürde 453 g elementsel kükürttün, 1359 g kalsiyum karbonatı nötralize edebilecek kadar asit oluşturduğu belirtilmektedir [36]. Ayrıca yapılan çalışmalarda kükürt ilavesinin toprak pH'ını 5,5'den 3,3'e 80 günde düşürdüğü tespit edilmiştir. [37].

Asitlendirme uygulamalarıyla toprak pH'ının düşürülmesi metal çözünürlüğünü arttırmaktadır fakat pH ayarlaması bitkilerin asidik şartlara karşı toleranslılığı ve oluşabilecek maliyet nedeniyle kısıtlanmaktadır. Ayrıca toprak asitlenmesiyle bağlantılı olarak bazı negatif etkilerde ortaya çıkabilmektedir. Özellikle suni asit bileşiklerinin uygulanmaları ile gerçekleştirilen pH değerindeki ani azalmalar sonucunda ortamdaki kirleticilerin yüksek hareketlilikleri sebebiyle kirleticilerin yeraltı suyuna sızma riski oluşabilmektedir. Bu yüzden ortam pH'ı, hedeflenen değere ve bitki kuru biyokütlesinde kabul edilemez bir azalmanın olduğu noktaya göre ayarlanmalı, aşırı asit uygulamalarından kaçınılmalıdır. Fakat bu nokta toprak tipine ve bitki türüne bağlı olarak değişiklik gösterir [12]. Ayrıca literatürde asit uygulamalarını takiben ortamın kireçlenerek pH seviyesinin nötr (pH=7) seviyelere yükseltilmesi ile tarım



uygulamalarının yada ekosistem gelişiminin kaldığı yerden devam edebileceğine işaret edilmiştir [34].

Bu negatif etkiler nedeniyle son yıllarda yapılan çalışmalarda pH'ın ucuz, çevreye uyumlu ve bulunabilir doğal elementler kullanılarak düşürülmesi hedeflenmiştir. pH düşürmede kullanılan maddeler arasında elementsel kükürt, sülfürik asit, alüminyum sülfat, demir ve amonyum polisülfat maddeleri sayılmakla birlikte ortam pH'ının düşürülmesinde en etkili madde olarak elementsel kükürt belirtilmektedir [36].

Wang ve ark. (2006), *T. caerulescens*'in Cd ve Zn alımına pH'ın etkisini inceledikleri çalışmalarında, pH seviyesini hazırladıkları kükürt çözeltileri ile düşürmeyi hedeflemişlerdir. Cd ve Zn'nun çözünebilir formları pH'ın düşmesiyle büyük bir artış göstermiş, düşük pH bitkinin metal alımını önemli bir biçimde etkilemiştir. En yüksek bitki biyokütlesi, en düşük pH değerinde (4,74) saptanırken, en yüksek gövde metal konsantrasyonu ikinci en düşük pH değerinde (5,27) saptanmıştır [23].

Robinson ve ark. (1999), nikel hiperbiriktiricisi *Berkheya coddii*'nin nikel ve kobalt alımına, MgCO<sub>3</sub>, CaCO<sub>3</sub>, kükürt, şelatlayıcı kimyasallar (NTA, DTPA, EDTA) ve asidik maden döküntülerinin etkisini saptamak için saksı denemeleri gerçekleştirmişler, hem MgCO<sub>3</sub>'ün hem de CaCO<sub>3</sub>'ün, bitkinin metalleri almasında önemli azalmalara sebep olduğunu, aynı zamanda metallerin topraktaki çözünürlüklerini de azalttığını saptamışlardır. Kükürt ve asidik maden döküntülerinin ilavesinin ise, kontrol uygulamalarına göre, bitkideki nikel ve kobalt alımını çarpıcı bir şekilde arttırdığını tespit etmişlerdir. Elementsel toz kükürdü 0 - 0,625 - 1,25 - 2,5 ve 5 g kg<sup>-1</sup> oranlarında toprağa ilave etmişler, ilave edilen en yüksek kükürt konsantrasyonunda (5 g kg<sup>-1</sup>), toprak pH'ı 5,5 değerine ulaşmış ve maksimum etki de bu seviyede tespit edilmiştir, bitkideki nikel ve kobalt seviyeleri sırasıyla 1331 ve 290 mg kg<sup>-1</sup> olarak tespit edilmiş, bu değerler kontrol bitkisinde saptanan seviyelerden 3 ve 5 kat yüksek olmuştur (400 ve 56 mg kg<sup>-1</sup>). Sonuç olarak kükürtün, metallerle kirlenmiş topraklarda yetiştirilen bitkilerin metal alımlarını arttırmada düşük maliyetli bir ıslah edici olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır [38].

Sterrett ve ark. (1996), kentsel toprağın metal içeriğini tespit etmek ve toprak ıslah edicilerin bahçe bitkilerinin ağır metal alımlarına etkisini saptamak için Tanya salatalığını yetiştirmiş, ıslah ediciler olarak da NPK gübresi, kireç taşı  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)$  ve kireçlenmiş arıtma çamuru kompostu kullanmışlardır. Kireç taşının ve kireçlenmiş arıtma çamuru kompostunun toprağa ilavesi pH'ı yükseltmiş ve salatalıktaki Cd ve Zn konsantrasyonlarında azalmaya sebep olmuş fakat fosfat gübresinin ilavesi toprak pH'ını düşürmüş ve özellikle Cd konsantrasyonunu arttırmıştır [39].

Bunlara ilave olarak bulunabilir bir doğal element olan tarımsal jips, tuzlu ve alkali topraklarda pH'ı düzenleme özelliğine sahip bir bileşiktir ve ülkemiz doğal jips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) yatakları bakımından büyük bir potansiyele sahiptir. pH'ı 8,0 ve üzerinde olan topraklarda tarımsal jipsin bileşiminde bulunan kalsiyum, bikarbonat ( $\text{HCO}_3$ ) anyonları ile birleşerek  $\text{CaCO}_3$  şeklinde çökelirken proton ( $\text{H}^+$ ) açığa çıkmakta, bu da pH'ın düşmesine yardımcı olmaktadır. Tarımsal jips kullanımı ile başlangıçta 8,0–8,5 gibi yüksek olan pH bu mekanizma ile 7,5–7,8'e kadar düşebilmektedir. Ayrıca tarımsal jips kireçli topraklarda çok sık karşılaşılan demir, çinko ve mangan gibi besin maddesi noksanlıklarının giderilmesinde de etkilidir. Kireçli topraklarda bol miktarda bulunan serbest karbonat ve bikarbonat anyonları demir, çinko ve mangan gibi besin maddeleri ile çökelir. Tarımsal jips uygulaması ile serbest karbonat ve bikarbonatlar, kalsiyum karbonat şeklinde çökeldiği için demir, çinko ve manganın bitkilerin alabileceği sülfat formunda toprakta bulunması sağlanmış olur [40, 41, 42, 43, 44].

Bu amaç doğrultusunda bu çalışmada da pH, arıtma çamuruna elementsel kükürt ilave edilerek daha önceden gerçekleştirilmiş olan inkübasyon deneyleri doğrultusunda belli bir zaman aralığında kademeli olarak hedeflenen değere (pH=5,4) düşürülecek ve tarımsal jips ilavesi ile pH düşürülecek böylece iz elementlerin hareketliliğinin arttırılması sağlanacaktır.

#### **2.4.1.2. Katyon değişim kapasitesi**

Metallerin fitoekstraksiyonunda etkili diğer bir önemli parametrede katyon değişim kapasitesidir. Kolloid yüzeylerince adsorbe olunan katyonların miktarı, 100 gram fırın

kurusu toprak üzerinden miliekivalan olarak tanımlanmakta (meq/100 g toprak), bu da katyon değişim kapasitesi olarak bilinmektedir. Katyon değişim kapasitesi, ortamın katyonları adsorplama kabiliyetini gösteren bir parametredir. Bu parametre, pH, organik madde içeriği ve toprak tekstürü gibi faktörlere bağlı olmakla birlikte topraklarda meydana gelen çok önemli kimyasal olaylardan biri olup, toprakların verimliliği ile de çok yakından ilgilidir [27, 36]. Bir toprağın katyon değişim kapasitesi kil minerallerinin çeşidine, çokluğuna ve organik kolloidlerin miktarına bağlı olarak değişir. Genel bir kural olarak, kil ve organik kolloidleri yüksek oranda içeren bir toprağın KDK'si, organik kolloidleri yâda organik maddesi az olan kumlu bir toprağa göre çok fazladır. Çoğunlukla 1:1 tabakalı killerin KDK değeri 10–20 meq/100 g, 2:1 tabakalı killerin KDK'leri 40–80 meq/100 g ve organik kolloidlerin KDK değeri ise 100–200 yâda daha fazla meq/100 g dolaylarındadır [36]. Literatürde arıtma çamurlarının katyon değişim kapasitesi 1,3–89,6 meq/100 g arasında saptanmıştır [45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55].

Kaba tekstür yapıya sahip bir toprak 5 meq/100 g KDK değerine sahip olmakta ve 5 mg kg<sup>-1</sup> kadmiyumu bünyesinde tutabilmektedir. Bununla birlikte ince tesktürlü toprağın KDK değeri 15 meq/100 g olmakta ve 20 mg kg<sup>-1</sup> kadmiyumu tutabilmektedir. Kumlu toprakta büyüyen bitkinin Cd içeriği, daha ağır yapılı toprakta yetişen bitkininkine nazaran daha yüksek olmaktadır [56].

Bir toprağa arıtma çamuru ilave edildiğinde katyon değişim kapasitesi yükselmektedir. Bu artışın nedeni, arıtma çamurlarının mikroorganizmalar tarafından biyolojik parçalanması sonucunda oluşan humik maddelerin, karmaşık kimyasal bileşikler ile bileşik oluşturmaya yönelmesidir. Sonuçta oluşan bileşikler başlangıçta meydana gelen humik maddelere göre daha kararlı yapıdadır. Humik maddelerin önemli özellikleri, metal iyonlarıyla ve hidroksit oksitlerle, suda çözünebilen ve çözünemeyen bileşikler oluşturabilmeleri ve ortamdaki kil materyali ve organik bileşiklerle etkileşime girebilmeleridir. Kumlu yâda killi bir toprağa %25 oranında arıtma çamuru kompostu ilavesinin, toprağın katyon değişim kapasitesini %500–600 oranında arttırdığı tespit edilmiştir [57]. Organik maddenin yani humusun sahip olduğu KDK değerinin yüksek olmasıyla birlikte organik maddenin mikroorganizmalar tarafından parçalanması ile arıtma çamurunun bileşimi zamanla değişmekte, organik yapıdaki bağlanma alanları

kaybolmakta, organik kısma bağlı olan ağır metaller, ortam çözeltisine bırakılmaktadırlar. Böylelikle metal kullanılabilirliği, toprağa çamur ilavesinin ardından çözünebilir/kolayca parçalanabilir organik madde ve kararsız inorganik bileşiklerin parçalanması ile metallerin toprak çözeltisine hemen salınması sonucunda çok yüksek olmaktadır [28].

Genel olarak metallerin toprak partiküllerine tutunması metallerin sistemdeki aktivitelerini azaltır. Bu yüzden toprağın yüksek kation değişim kapasitesi, metallerin toprak partiküllerine tutunmalarını ve metallerin hareketsiz hale gelmelerini arttırır dolayısıyla metallerin bitkiler tarafından alınabilirlikleri azalır [9]. Kation değişim kapasitesi, pH değeri, organik madde ve toprağın kil içeriğinin artması ile artış gösterir [27]. Yapılmış çalışmalarda toprakların KDK'nin pH'ın sürekli bir işlevi olduğu, pH'ın 3-4 dolaylarında olduğu asidik ortamlarda KDK değerinin en düşük düzeyde bulunduğu ve pH'ın giderek artması (8-9'a kadar) ile de söz konusu değer giderek yükseldiği ortaya konmuştur. pH'ın yükselmesi ile KDK değerinin artış göstermesinin nedeni kil minerallerinin kenarlarından hidros-Al ve Fe oksitlerinden ve toprak organik maddesinde bulunan karboksil ve fenolik gruplardan OH- gruplarının iyonize olması şeklinde açıklanmaktadır [36].

#### **2.4.1.3. Organik madde**

Organik madde muhtevası da, metallerin bitkiler tarafından alınabilirliğine etki eden diğer bir parametredir. Özellikle toprağa arıtma çamurlarının ilave edilmesi sonucunda toprağın organik madde muhtevasının artması, organik maddeye bağlanan metallerin de artmasına neden olmaktadır [1]. Çamurdaki ağır metallerin organik maddeye adsorplanması sonucunda, hareketlilikleri azalmakta ve bu nedenle de bitki kökleri tarafından alımları da gerilemektedir [3, 27]. Toprağın mineral kısmı ile karşılaştırıldığında, organik madde yüksek bir kation değişim kapasitesine sahiptir. Bu faktör Cu, Zn, Ni ve Cd gibi ağır metallerin organik maddeye bağlanmasında ve bitkiler tarafından alınabilirliklerinin azalmasında önemlidir [3]. Fakat arıtma çamurları genel olarak %50-60 kadar organik kısım içerirler. Geriye kalan kısım ise parçalanmaz yapıdadır. Bu organik maddenin yaklaşık olarak %40-50 kadarı oldukça hızlı ayrışır.

Kalan kısım ise çok yavaş ayrışır. Bu yüzden arıtma çamurları sürekli ayrışan ve mineralize olan bir yapıya sahiptir ve organik madde ayrıştıkça bağlı iz elementler çözünebilir forma dönüşmekte ve bitki alımı için uygun hale gelmektedir. Bu yüzden bitkilerin metalleri organik maddenin yapısından almaları daha kolaydır [3].

Çamurdaki organik maddenin mikroorganizmalar tarafından parçalanması ağır metallerin ortam çözeltisine salınmasında önemli bir faktördür. Bu durum arıtma çamuru uygulamasının akabinde hemen yâda belli bir süre sonra meydana gelir. Bazı topraklarda, arıtma çamurlarındaki organik madde metalleri hareketsiz hale getirir. Fakat çözünür organik madde-metal bileşiklerinin oluşması ile ve organik maddenin mikroorganizmalar tarafından parçalanması yoluyla, organik maddenin bileşik oluşturma kapasitesinin kaybolması ile metaller ortam çözeltisine salınırlar. Arıtma çamurundaki kolay parçalanabilir formdaki organik maddenin toprak mikroorganizmaları tarafından parçalanması hızlıdır (ortam ve çevre koşullarına göre birkaç hafta). Bu ilk fazı, inatçı formdaki organik maddenin yavaş parçalanma periyodu takip eder. Çamurdan gelen organik maddenin önemi, çamurdaki Cd ve Zn'nun çoğunlukla organik kısım ile bağlantılı olmasındandır [28].

Arıtma çamuru zamanla parçalanır, huminleşme olur ve son ürün olarak humusa dönüşür. Bunun alt ürünüde humik asit ve humattır. Hümik molekülünün katyon değişim bölgeleri hidrojen iyonu ile doldurulduğu zaman oluşan madde hümik asit, katyon değişim bölgeleri hidrojen haricinde başka bir katyon ile doldurulursa bu madde humattır. Tüm gerekli metaller hümik asitlerle şelat yapabilir. Hümik asit-metal bileşikleri bitki beslemede belirleyici bir unsurdur. Küçük miktardaki hümik asitler bile bitkiyi hassas hale getirmede, plazmanın geçirgenliğini arttırmada ve bitkilerce besin elementlerinin alınımının hızlanmasında aktif rol oynarlar. Ayrıca hümik asit ve türevlerinin bitki zarının geçirgenliğini arttırdığı, bununda bitkinin besin elementlerini almasını kolaylaştırdığı tespit edilmiştir. Toprakta bulunan demir, mangan, bakır ve çinko gibi ağır metaller suda zor çözünür bileşiklerdir. Fakat organik maddenin bu minerallerle meydana getirdiği bileşikler minerallerin çözünürlüğünü artırır ve bitkinin bu metalleri alımı artar [19].

Humusun katyonları gevşek tutmasının sebebi, sürekli parçalanması ve sonuçta oluşan hümik asit ve humatların metal iyonaları ile bileşik oluşturmasındandır. Organik madde ilavesi ortamın katyon değişim kapasitesini artırır fakat zamanla parçalanır, hümik ve fulvik asitler oluşur, bunlarda elementlerle bileşik oluşturur ve bitki bunları kolay alır. Hümik asidin KDK'si 500-1500 meq/100 g'dır. Hümik maddeler negatif yüklüdür bu nedenle elementleri tutar ve bileşik oluşturur, bitkide bunu kolay alır. Humik maddelerin KDK değeri 200 ile 500 meq/100 g arasında değişir. Bu değer humik maddeler için yüksek, fulvik asitler için düşüktür [19].

#### 2.4.1.4. Ağır metallerin kimyasal yapıları

Ağır metallerin bitkiler tarafından alınabilirlikleri, bunların kimyasal formlarına da bağlıdır. Örneğin, eşit miktarlardaki mikro-kirleticiler, toprağa mineral tuz formunda ve çamur formunda verildiklerinde, bitkide meydana gelen zehirlilik, mineral tuz formunda daha yüksek olmuştur. Bunun sebebi çamur içindeki ağır metallerin tuz formlarına göre, bitkiler tarafından daha düşük bir alınabilirliğe sahip olmalarıdır. [27].

Ayrıca ağır metallerin ortamdaki hareketlilikleri ve kökler tarafından alınabilirlikleri, ortamda bulunan diğer elementlerin birbirleriyle etkileşimlerine de bağlıdır. Belli elementler, bazı ağır metallerle etkileşerek bunların bitkiler tarafından alınabilirliklerini azaltabilmektedir. Bitkilerin ortamda bulunan temel elementleri (Ca, Mg, P, K ve N), ağır metallere nazaran tercih etmeleri, ağır metallerin absorpsiyonunu sınırlayan bir faktördür [27]. Örneğin Fe ve Mn'nın hidroksitlerinin, sorpsiyon ve desorpsiyon mekanizmaları ile ağır metallerin alınabilirliklerini etkilediği saptanmıştır. Ortamda bulunan fosfor, metal iyonlarıyla birleşerek çözünebilir yâda çözünemeyen bileşikler oluşturmaktadır. Ortofosfat, pH'a da bağlı olarak Zn'nun ortamda alıkonmasını azaltabilmekte yâda arttırabilmektedir. Ortamda ortofosfatın bulunması durumunda, Cu'ın sorpsiyonunda da azalma olduğu belirtilmiştir. Örneğin toprakta Cd'un tutunması, toprağın Fe muhtevassından etkilenmektedir [3]. Özellikle Pb ve Cd gibi metaller, Fe ve Al hidroksitler tarafından güçlü bir şekilde tutulurlar. Dolayısıyla bu hidroksitlerin toprakta fazla bulunması metal alınabilirliğini azaltır. Toprakta kireç ( $\text{CaCO}_3$ ) miktarı arttıkça da metaller çözünmez karbonatlar şeklinde çökeler ve bitkiler tarafından

alınmazlar [58]. Cd ve Zn gibi metallerin de çözünürlüğü yüksek olurken, Cu ve Pb gibi metaller daha hareketsiz ve fulvik asitlerle daha kolay organik bileşik oluşturabilmektedirler [59].

Arıtma çamurunun kimyası, çamur girdilerinin özelliklerine ve uygulanan arıtma prosesine göre de farklılık göstermektedir. Örneğin, oksijenli ortamda çürütülen çamur, oksijensiz ortamda çürütülen çamura göre genellikle daha yüksek azot muhtevası içermektedir. Organik madde-ağır metal ilişkisi de oksijenli ve oksijensiz ortamda çürütülen çamurlarda farklıdır. Örneğin, mezofilik anaerobik çürüme esnasındaki mikroorganizma dönüşümü, organik madde-ağır metal bileşiklerinin kararlılıklarını ve metallerin düşük çözünürlüğe sahip sülfidler şeklinde çökmelerini artırır. Çürütme prosesinin kapsamı, sonuçta oluşan çamurun C, N ve P içeriğini etkilerken, susuzlaştırma prosesi de oluşan çamurun elektriksel iletkenliğini etkilemektedir [28].

Çamur tuzluluğunun da metal alınabilirliğine etkisi önemli olmakla birlikte üzerinde fazla çalışılmamış bir konudur. Açık havada kurutulmuş çamur çok yüksek elektriksel iletkenliğe sahiptir ( $>12$  dS/m). Olgunlaşma dönemi tuz muhtevasını azaltmakta ve yüksek tuz seviyeleri sabit kalmaktadır. Klorürün Cd'un artan hareketliliğine ve alınabilirliğine etkisinin önemi Cd-klor bileşiklerinin oluşması sonucunda, açık havada kurutulmuş çamur uygulanmış topraktaki buğday ve pazı dokularındaki Cd artmıştır. Ayrıca Cd alımı ile klorür konsantrasyonu arasında güçlü bir doğru orantı saptanmıştır [28].

Yüksek miktarlarda Ca, P ve Al içeren çamurlar, ağır metallerin alıkonmasında yüksek kapasiteye sahiptir. Cd alıkonmasında çamurdaki inorganik bileşenin önemi, oksijensiz ortamda çürütülen çamurlarda organik kısmın 0,7 M NaOCl kullanılarak giderilmesi ile saptanmaya çalışılmış ve arıtma çamurlarına inorganik artıktaki %69–52 oranında Cd alıkonduğu tespit edilmiştir. 15 yıl boyunca hektar başına 2700 ton oranında çamur uygulanmış ve kontrol toprağına göre Cd'un ortam katı bileşenine daha sıkı tutunduğu saptanmıştır. Ayrıca çamur uygulanmış toprakta, kontrol toprağına göre inorganik bileşen, Cd tutma kapasitesi bakımından yüksek bir kısma sahip olmuştur [28].

Arıtma çamurlarında metallerin tutulma kapasitesi ve kuvveti çamura Fe, kireç, fosfat ve alüminyum işlenmiş alümina-silikat ilavesi ile artmıştır. Fakat bununla birlikte kireç ile stabilize edilmiş yada alkali ile stabilize edilmiş arıtma çamurlarının kullanılması bazı metallerin hareketliliğini önemli ölçüde arttırmıştır. Örneğin, toplam Cu'nun %40-50'si ve toplam Ni'nin %25'i bazı durumlarda suda çözünür hale gelmiştir. Hareketlilikteki bu artış hektar başına 100 ton oranında kireçle stabilize edilmiş arıtma çamuru uygulanmış toprağın 80 cm derinliğindeki artan Cu, Pb ve Zn konsantrasyonlarına bağlanmıştır [28].

Ayrıca kristal olmayan yapıdaki Fe ve Al oksitler de metallerin alıkonmasında önemli bir rol oynar. Özellikle yüksek öneme sahip amorf hidroksitler metallerin alıkonmasında kristal yapıdaki Fe oksitlere göre daha reaktiftirler. Örneğin, kentsel çamur, kırsal çamurdan daha fazla Cd ve Zn içerirken, kentsel çamurdaki Cd ve Zn'nun 0,1 M  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 'de ekstrakte edilebilirliği çarpıcı bir biçimde düşük bulunmuştur. Bu durum kentsel çamurdaki sınırlı Cd ve Zn hareketliliğinin sebebi olarak görülmektedir [28].

## 2.5. Metal Fitoekstraksiyonunda Şelatlayıcı Maddelerin Rolü

50 yılı aşkın bir süredir EDTA'yı da kapsayan sentetik şelatlar hem toprakta hem de sulu büyüme ortamlarında yetiştirilen bitkilere mikro element sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. 1980'lerin sonu, 1990'ların başlarında ise ilk olarak EDTA, fitoekstraksiyon prosesinin verimini arttırmak amacıyla bir şelatlayıcı madde olarak önerilmiştir [18]. Fitoekstraksiyondaki bu kısa dönemdeki ilerlemelerde, etkili kimyasal ıslah edicilerin geliştirilmesi ve bunların etkili uygulamaları ile olmuştur [10].

Sentetik şelatlar (EDTA, CDTA, DTPA, EGTA, EDDHA, HEDTA ve NTA) ve organik asitler (sitrik asit ve tartarik asit gibi düşük moleküler ağırlıklı doğal organik asitler) gibi şelatlayıcı maddelerin uygulanması ortam katısından ortam çözeltilisine metal desorpsiyonunu ve köklerden gövdeye metal taşınımını arttırmaktadır [12, 18]. Metaller ortamda bitki tarafından alınabilir formda ise çoğu ağır metalin köklerde hızla biriktiği gözlenmiştir. Fakat absorplanan metallerin çok az bir kısmı gövdeye nakledilmektedir [12]. Bu özel kimyasalların kullanılması ile bitkilerin zehirli metalleri gövdelerinde biriktirebilme yetenekleri geliştirilmektedir [10].



Fitoekstraksiyonda yaygın olarak kullanılan EDTA, çoğu metal için yüksek ekstraksiyon gösterir ve Pb fitoekstraksiyonu için günümüzde bulunmuş en iyi şelatlayıcı maddedir. Literatürde belirtilen çoğu saksı denemelerinde toprak yüzeyine uygulanan EDTA miktarı 2,5 ile 10 mmol kg<sup>-1</sup> arasında değişmektedir. EDTA'nın yüksek konsantrasyonlarda uygulanması ise bitkilere toksik etki yapmakta ve kök hücre zarını stabil hale getiren Zn<sup>+2</sup> ve Ca<sup>+2</sup> iyonlarını kısıpçaladığı için zar yapısını bozmakta, bitki büyümesini engellemektedir [60]. Bu yüzden kimyasal destekli fitoekstraksiyonlarda şelat ilavesinden önce bitkinin yüksek bir biyokütleyle ulaşması istenmektedir [61]. Bu kimyasalların bitkinin hasat edilmesinden birkaç gün yâda hafta önce uygulanması daha uygun olmaktadır [10].

Şelatlayıcı maddelerin etkinlikleri metal türüne, ortamdaki metal içeriğine, ortamın karakteristiğine, bitki türüne ve uygulanan EDTA miktarına göre değişiklik göstermektedir [18]. Örneğin EDTA'nın toprağa 10 mmol kg<sup>-1</sup> oranında ilave edilmesi, mısırın gövdesindeki Pb birikimini % 1,6'ya kadar arttırmıştır [12], 1200 mg kg<sup>-1</sup> Pb içeren toprağa 10 mmol kg<sup>-1</sup> EDTA uygulandığında *B. juncea*'nın gövdesindeki Pb birikimi >% 1 olmuştur [10]. Bu veriler şelatlayıcı madde ilavesinin köklerden gövdeye Pb taşınımını önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir.

Literatürde Pb'a ek olarak şelat destekli fitoekstraksiyonun diğer metallere de uygulanabileceğine işaret edilmektedir. EDTA uygulamasının bitkideki Cd, Cu, Ni ve Zn birikimini teşvik ettiği belirtilmekle birlikte bu şelatların metal seçiciliği de bilinmektedir. Örneğin EGTA, Cd<sup>+2</sup> için yüksek çekiciliğe sahiptir, fakat Zn<sup>+2</sup> için bu söz konusu değildir çünkü EGTA Zn<sup>+2</sup>'yi bağlayamaz. EDTA, HEDTA ve DTPA, Zn için seçilebilirler. Fakat çinkonun DTPA ile oluşturduğu bağ çok kuvvetlidir ve bitkiler Zn'yu bu bileşikten kullanamadıkları için muhtemelen Zn eksikliği belirtileri gösterebilmektedir [9]. EDTA, Cd, Cu, Ni, Pb ve Zn'nin fitoekstraksiyonunu arttırmada özellikle etkilidir [10].

Pogrzeba ve ark., arıtma çamurlarından ağır metal gideriminde fitoekstraksiyon prosesinin etkinliğini araştırdıkları çalışmada, şelatlayıcı madde olarak EDTA

kullanmışlar, 2,5 mmol kg<sup>-1</sup> EDTA uyguladıkları beyaz hardal bitkisinin gövde Cd ve Zn konsantrasyonlarının, köklere nazaran daha yüksek olduğunu tespit etmişler, gövde Zn konsantrasyonunun 497 mg kg<sup>-1</sup>'dan 1222 mg kg<sup>-1</sup>'a, Cd konsantrasyonunun 1,26 mg kg<sup>-1</sup>'dan 17,01 mg kg<sup>-1</sup>'a, Pb konsantrasyonunun 3,6 mg kg<sup>-1</sup>'dan, 53,1 mg kg<sup>-1</sup>'a, kök Pb konsantrasyonunun ise 21,0 mg kg<sup>-1</sup>'dan 108,5 mg kg<sup>-1</sup>'a yükseldiğini saptamışlardır [62].

Chiu ve ark. (2005), eğrelti otu ve mısırın arsenik, çinko ve bakır fitoekstraksiyonu için etkinliklerini ve farklı şelatlayıcı maddelerin bu bitkilerin metal alımlarına etkisini incelemişler, As içeren toprağa 20 mmol kg<sup>-1</sup> NTA, ve Cu içeren toprağa 20 mmol kg<sup>-1</sup> HEIDA uygulamasının her iki bitkinin gövdesindeki As ve Cu konsantrasyonunu 3–4 kat arttırdığını bulmuşlardır. NTA'nın uygulanması ise eğrelti otu ve mısırın gövdesindeki Zn birikimini sırasıyla 37 ve 1,5 kat arttırmıştır [63].

Lai ve Chen (2005), tek ve çoklu metallere kirlenmiş toprakların *Dianthus chinensis* ile fitoekstraksiyonuna EDTA'nın etkisini incelemişler, 5 mmol kg<sup>-1</sup> EDTA uygulamasının tek ve çoklu metallere kirlenmiş toprakların hem solüsyonundaki hem de saf su ile ekstrakte edilebilen ekstraktlarındaki Cd, Zn yada Pb konsantrasyonlarında ve bitkinin gövdesinde biriktirilen metal konsantrasyonlarında önemli bir artışa neden olduğunu tespit etmişlerdir. Önerilen metodu özellikle Pb fitoekstraksiyonunda çok etkili bulmuşlardır [64].

Bu çalışmada da, arıtma çamurunda sıklıkla rastlanan metaller için yüksek ekstraksiyon verimi sergilemesi nedeniyle EDTA kimyasalının çamura ilave edilmesinin, metallerin bitkiler tarafından alınabilirliklerine ve bitkilerin ağır metalleri giderim ile gövdelerine taşıma verimine etkisi tespit edilecektir.

## 2.6. Metal Hiperbirikiminin Biyolojik Mekanizmaları

Büyüme ve yaşam döngüsünü tamamlayabilmek için bitkiler sadece makro besin elementlerine (N, P, K, S, Ca, Mg) değil aynı zamanda temel mikro besin elementlerine de (Fe, Zn, Mn, Ni, Cu, Mo) ihtiyaç duyarlar. Bitkiler bu elementleri almak, nakletmek, depolamak ve zehirsiz hale getirmek için özel mekanizmalar geliştirmişlerdir [9].

Bitkilerin ağır metale karşı dayanıklılığını da kontrol eden bu mekanizmalar kısaca şöyle sıralanabilir; 1) iyon alımında seçici davranış 2) membranların yapısında ve işlevlerinde farklılık oluşturarak geçirimsizliği artırmak 3) bitkinin değişik dokularında depolayarak immobil şekilde tutmak 4) fiske etme ve çözünmüş formda metabolizmada tutmak (protein komplekslerine bağlamak) 5) enzim sistemlerinde fizyolojik bir metalin toksik bir metalle yer değiştirmesine adaptasyon 6) bitkiden metallerin dışarı atılması [58]. Fitoekstraksiyon prosesinin başarıyla uygulanabilmesi, bu mekanizmaların iyi bir şekilde anlaşılmasına bağlıdır.

### 2.6.1. Kök bölgesi etkileşimi

Bitkiler, ağır metallerin kökler tarafından alınabilirliklerini arttırmak için bazı özel mekanizmalara sahiptirler. Bu yolla bitkiler düşük iyon temininde, kök bölgesinin kimyasal ortamını değiştirerek iyonların katı ortam bileşeninden, çözeltiliye desorpsiyonunu teşvik ederler.

Bu mekanizmalardan biri, kök bölgesinden metal şelatlayıcı moleküllerin salgılanmasıyla, ortam katısına bağlı metallerin kısıpçalanması ve çözdürülmesidir. Bu şelatlayıcı moleküller, düşük moleküler ağırlıklı peptitlerdir ve fitoşelatlayıcılar olarak adlandırılırlar [25]. Metaller sadece serbest haldeki hidrat edilmiş metal katyonları yani iyon formunda ve organik moleküllerle oluşturduğu moleküler organik bileşikler şeklinde bitkiler tarafından alınabilmektedirler [36, 65]. Metallothioneinler şeklinde de ifade edilen bu metal şelatlayıcı proteinler, bitkide metalleri algılayıcı fonksiyona da sahiptirler ve metaller bitkide bu kıskaç bileşikleriyle bileşik oluşturmuş şekilde biriktirilirler [10].

Günümüze kadar fitoekstraksiyon çalışmalarında temel başarılar suni şelatlayıcı maddelerin kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir, fakat köklerden salgılanan doğal bileşiklerin bu amaç için kullanılması belirgin avantajlar sağlamaktadır. Bu düşük moleküler ağırlıklı organik asitler (oxalik, asetik, fumaric, sitrik, tartarik), iz elementlerin çözünür formlarını harekete geçmesini sağlayan çözme ve/veya bileşik oluşturma proseslerinde önemli rol oynarlar [19]. Örneğin bazı çim türleri, köklerinden mugineic ve avenic asitler adı verilen organik asit salgırlarlar, bu maddeler toprağa

bağlanmış demirin ve çinkonun bitkiler tarafından alınırılığını önemli ölçüde arttırmaktadır [9]. Phytosiderophores şeklinde ifade edilen demir-şelatlayıcı bileşiklerde, bitkilerde ayrıntılı olarak çalışılmıştır. Bu bileşik demir eksikliğine bir tepki olarak bitki tarafından salgılanmakta ve esas itibariyle topraktaki Cu, Zn ve Mn'yi hareketlendirmektedir. Arpa ve mısırın salgıladığı mugineic ve deoxymugeneic asitler ile yulafın salgıladığı avenic asit ise en iyi çalışılmış şelatlayıcı moleküllerdir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda Ni hiperbiriktiricisi *Alyssum lesbiacum*'un nikeli elde etmek ve taşımak için mükemmel bir Ni şelatlayıcısı olan histidine'i kullandığı rapor edilmiştir [10].

Elde edilen deneysel veriler, bitkiye zehirli olmayan seviyede metal içeren ortamlarda bile hiperbiriktirici bitki türlerinin, etraflarındaki biriktirici olmayan bitkilere nazaran gövdelerinde yüksek metal konsantrasyonlarını biriktirebildiklerini göstermiştir. Bu artan metal biriktirme yeteneğini açıklayan tek mekanizma, hiperbiriktiricilerin kök bölgesinde metalleri çözünür hale getirebilmeleridir. Örneğin çinko hiperbiriktiricisi *Thlapsi caerulescens* çinkoyu toprağın hareketsiz kısmından ekstrakte edebilir. *T. caerulescens*'in biriktirici olmayan *T. arvense* ile birlikte ekilmesi, biriktirici olmayan bitkinin gövdesindeki çinko birikimini arttırmıştır, bu da hiperbiriktirici bitkilerin metal çözünürlüğünü arttırmak için kök bölgesini değiştirebildiklerini göstermektedir [12].

McGrath ve ark. (2001), metallerle kirlenmiş toprakların bitkilerle temizlenmesinde bitki ve kök bölgesi etkileşimlerini çalışmışlar ve bazı doğal hiperbiriktiricilerin köklerini yüksek kullanılırılığa sahip metallere doğru çoğalttıklarını bulmuşlardır, buna zıt olarak biriktirici olmayan bitki türlerinin bu bölgelerden kaçındıklarını tespit etmişlerdir [21]. Bu durum hiperbiriktiricilerin diğer biriktirici olmayan türlerle aynı toprakta büyüdüklerinde daha çok metali absorplama mekanizmalarından biridir.

Diğer mekanizma ise, köklerden proton pompaları şeklinde ifade edilen H<sup>+</sup> iyonlarının salgılanması ile kök bölgesinin asitlendirilmesidir. Böylelikle ortamdaki bağlanma bölgelerine bağlanmış metal iyonlarıyla, yer değiştirmek için rekabet eden protonlar, metal iyonlarının bağlandıkları ortam katisından, ortam solüsyonuna desorpsiyonlarını sağlarlar [8, 9, 10]. Genel olarak, kök bölgesi pH'ını etkileyen temel faktörün, bitki

tarafından alınan azotun formu olduğu kabul edilir. Eğer bitki tercihen  $\text{NH}_4^+$  aldıysa ve bunun sonucunda  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  oranı  $>1$  olduğunda elektriksel nötralityi korumak için bitki köklerden proton ( $\text{H}^+$ ) salgılar. Böylece kök bölgesi asitlenir. Diğer yanda, bitki azotu  $\text{NO}_3^-$  olarak aldığıında bitki köklerden  $\text{HCO}_3^-$  salgılar ve kök bölgesi pH'ı yükselir. Yapılan deneysel çalışmalarda buğday bitkisinin kök bölgesi pH'ında meydana gelen 2,2 birimlik farkın bitki tarafından alınan azotun formuna göre değiştiği saptanmıştır. Soya fasulyesi,  $\text{NH}_4^+$  ile gübrelendiğinde ise kök bölgesi pH'ının düştüğü gözlenmiştir [59, 66]. Özellikle şalgam bitkisi kök bölgesi pH'ını 4,5'un altına kadar asitlendirebilmekte ve bilhassa Al'u hareketlendirebilmektedir [59].

Sardunya ve diğer saksı bitkilerinde, tarlada yetişen bitkilere nazaran besin maddesi ve su temini sınırlıdır. Dolayısıyla bu bitkilerin kök bölgesi pH'ı üzerindeki etkileri daha belirgindir [67]. *Pelargonium hortorum* bitkisinin köklerinden salgıladığı protonlarla rhizosfer pH'ını düşürebildiği [68, 69] ve yapraklarında toksik seviyelerdeki Fe ve Mn konsantrasyonlarını biriktirebildiği belirtilmiştir [69]. Örneğin, Raymond (2004), farklı Geranium türlerinin ortam pH'ına etkisini incelediği çalışmasında, özellikle *Pelargonium hortorum* türünün ortam pH'ını 6,3'den 4,8'e düşürebildiğini saptamıştır. Çalışmada ayrıca *Pelargonium hortorum* bitkisinin en iyi 5,8–6,3 pH aralığında yetiştiği, yüksek tuz muhtevasına, yüksek sıcaklıklara, yüksek ışığa ve düşük su içeriğine dayanıklı bir bitki olduğunu belirtmiştir. [67]. *Pelargonium hortorum* kısa sürede büyük biyokütle oluşturabilmesi yanında diğer bitkilere kıyasla günlük olarak yüksek konsantrasyonlarda çözülmüş gübreyi de bünyesine alabilme yeteneğine sahip bir bitkidir.

Bu amaç doğrultusunda *Pelargonium hortorum* bitkisi tek bir bitkiden çelikleme yöntemi ile çoğaltılarak arıtma çamuruna ekilmiş ve bu bitkinin arıtma çamurundan ağır metal giderim potansiyeli araştırılmıştır.

*Pelargonium hortorum* bitkisine ilave olarak çalışmada yerel bitkilerin de ağır metalleri hiperbiktirme yeteneklerini araştırmak amacıyla, literatür incelemesi yapılmış ve bu konu ile ilgili olarak Ünver (2006)'nın, metalleri bitki yolu ile saflaştırıp teknolojide katma değer sağlamak amacıyla yapmış olduğu çalışma dikkate alınarak lahanagiller bitki familyasına ait bitkilerin nikeli ve kadmiyumu hiperbiktirebildiği görülmüştür

[70]. Literatür incelendiğinde ise bu konudaki çalışmaların sınırlı olduğu görülmüş özellikle dünyadaki örneklere bakıldığında ülkesel ölçekte tam tarama yapan başka bir çalışma olmadığı saptanmıştır. Bu amaç doğrultusunda *Brassica oleraceae* var. *oleraceae* bitki türü arıtma çamuruna ekilmiş ve bu bitkinin özellikle nikel ve kadmiyum ağır metallerini çamurdan giderme potansiyelleri araştırılmıştır.

### 2.6.2. Kökler tarafından metal absorpsiyonu

Metallerin kök hücrelerinin içine alımları metallerin canlı dokuya girişlerinin ilk noktasıdır ve fitoekstraksiyon prosesi için temel öneme sahip basamaktır. Toprak hacminden, bitki köklerine metal taşınımından sorumlu 2 mekanizma vardır; iletim (kütle akışı) ve difüzyon. İletimin olabilmesi için çözünmüş metal iyonlarının toprak katısından kök yüzeyine doğru hareket etmesi gerekir. Kök bölgesindeki su, kökler tarafından absorplanır ve yer değiştirerek yapraklardan terleme yoluyla atmosfere verilir. Kök bölgesinden suyun alınması toprak hacminden kök yüzeyine doğru bir hidrolik eğim oluşturur. Kütle akışı yoluyla temin edilen metal oranına nazaran bazı iyonlar iletim yoluyla kökler tarafından daha hızlı absorplanırlar. Bu yüzden köklere bitişik toprakta hızlı bir biçimde metal yönünden tükenmiş bir tabaka oluşur. Bu durum toprak çözeltisi ve adsorbe olmuş elementleri tutan toprak partikülleri hacminden kök yüzeyi ile temasta olan çözeltiliye doğru bir konsantrasyon eğimini oluşturur. Bu konsantrasyon eğimi de kökleri çevreleyen topraktan metale tükenmiş katmana doğru bir iyon difüzyonunu sağlar [9]. Böylece ortamda bulunan metal iyonlarının kök yüzeyine taşınımları sağlanmış olur.

Kök yüzeyine taşınan metal iyonları sahip oldukları yüklerinden dolayı, lipofilik yapıda olan hücre zarlarının bir tarafından diğer tarafına serbestçe hareket edemezler. Bu yüzden iyonların kök hücrelerinin içine girişlerine genel olarak taşıyıcı fonksiyona sahip zar proteinleri aracılık eder. Bu zar taşıyıcıları iyonların hücre içine nakledilmeden önce tutunduğu bir hücre dışı bağlanma alanı ve hücre içi ve hücre dışı ortamı birbirine bağlayan bir zar yapısı rolüne sahiptir. Taşıyıcı zar yapısı bağlı iyonların yani taşıyıcılara bağlanmış metal iyonlarının hücre dışından zarın hidrofobik ortamından geçerek hücre içine girişlerine aracılık eder. Ayrıca bu bağlama alanı iyonların

taşınmasındaki seçicilikten de sorumludur ve hassas mekanizmalarda, metal iyonlarının hücre içi konsantrasyonlarını fizyolojik aralık içinde muhafaza eder [9]. Literatürde belirtilen ayrıntılı kanıtlarda da, Zn, Cu ve Ni'in kök hücrelerinin içine belli bir taşıyıcı ile taşındığı belirtilmektedir [12].

Hiperbiriktirici bitkiler sadece gövdelerinde yüksek konsantrasyonlarda metalleri biriktirmezler, seçicilik de sergilerler ve ortam çözeltisinden sadece özel metalleri biriktirebilirler [12]. Örneğin bazı taşıyıcılar iki değerlikli iyonları tanıyabilir fakat tek ve üç değerlikli iyonları tanıyamaz. İyon alımındaki bu seçicilik zar taşıyıcılarının yapısına ve özelliklerine bağlıdır. Bu karakteristikler, taşıyıcıların özel iyonları tanımasını, bağlamasını ve zarı geçmelerine aracılık etmelerini sağlar [9]. Fakat hiperbiriktirici özellikteki bitkiler sadece yaşamları için gerekli elementleri değil, kadmiyum ve arsenik gibi gerekli olmayan elementleri de biriktirirler. Bu alım mekanizması köklerdeki algılayıcı taşıyıcı fonksiyona sahip moleküllerin iki değerlikli çinko iyonunun analoğu olan kadmiyumu ayırt edememelerine bağlanmaktadır. Benzer şekilde fosforun analoğu olan arsenatın, fosfor ile ayırt edilememesi neticesinde fosfor alım mekanizmasıyla alınması öngörülür [12]. Benzer şekilde bitki  $AsO_4^{-3}$ 'ü,  $PO_4^{-3}$ 'ün alım mekanizması ile  $Cd^{+2}$ 'yi de  $Fe^{+2}/Ca^{+2}$  alım mekanizması ile alır. Aynı şekilde  $Al^{+3}$ 'de,  $Fe^{+3}$  ve  $Mg^{+2}$ 'nin alım mekanizması ile alınır. [59]. Örneğin, nikel hiperbiriktiricisi *Alyssum bertolonii* gövdesinde kobalta ve çinkoya nazaran nikeli biriktirebilir. Benzer bir davranış olarak çinko hiperbiriktiricisi *Thlaspi caerulescens*'de sulu çözeltiden çinkoyu, manganı, kobaltı, nikeli, kadmiyumu ve molibdatı biriktirebilir fakat gümüşü, kromu, bakırı, alüminyumunu, demiri yâda kurşunu biriktirmez yâda çok düşük konsantrasyonlarda biriktirebilir [12]. Bu seçicilik mekanizmasının ya symplast içine metal alımı yâda metalin ksileme aktarılması sırasında metallerin kök plazma zarının bir ucundan diğer ucuna taşınmaları ile ilgili olduğu öne sürülmüştür. Fakat yapılan deneyler nikel hiperbiriktiricisi *A. bertolonii*'nin kesip çıkarılan köklerindeki nikel, kobalt ve çinkonun eşit birikimi ve bu metallerin alım için rekabetleri, hiperbiriktiricilerin köklerinin içine metal alımlarında çokta seçici olmadığını göstermiş, bu yüzden hiperbiriktirici türlerdeki metal seçiciliğinin ksileme yüklemesinde gerçekleştiği öne sürülmüştür [12].

### 2.6.3. Köklerden gövdeye taşınım

İyonların ortam çözeltisinden kök sitoplâzmasına absorpsiyonundan sonra ksileme taşınması membran taşıma proteinleri tarafından gerçekleştirilen sıkı kontrollü bir prosestir [65]. Metaller ksilem kanalına boşaltılmalarından sonra kök basıncı ve terleme akımı ile gövdeye taşınır ve ksilem kanalından yapraklardaki mezofil hücrelerine tekrar absorplanırlar [9, 12].

Çoğu zehirli metal için köklerden gövdeye nakledilen metal oranı, bu metallerin alım oranları ile karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. Genel olarak köklerden gövdeye kolay taşınan metaller Ag, B, Li, Mo ve Se, orta derecede taşınanlar Mn, Ni, Cd ve Zn, kök hücrelerine güçlü bağlanıp gövdeye zor taşınanlar Co, Cu, Cr, Pb, Hg ve Fe'dir [19]. Köklerden gövdeye Pb taşınımını tahmin etmek için gövde: kök konsantrasyonu oranı kullanılarak sabit bir zaman periyodu için gövdeye nakledilen Pb miktarının kökler tarafından absorplanan Pb miktarından %30 daha az olduğu bulunmuştur. Köklerden gövdeye olan bu yavaş Pb taşınımını nedeniyle kökler Pb ve diğer ağır metallerin nakledilmesi için temel bariyerler olarak dikkate alınır. Karakteristik bir gözlem olarak gövde: kök metal konsantrasyonları 1'den büyük olan nikel, çinko yâda kobalt hiperbiriktiricilerinin, hiperbiriktirilen metaller için etkili bir kökten gövdeye taşınım sistemine sahip oldukları yorumlanır [12].

### 2.6.4. Metallerin sıkıştırılması ve bileşik oluşturma

Metalleri yüksek konsantrasyonlarda biriktirebilen bitki türleri, zehirli ağır metalleri binlerce ppm konsantrasyonunda bünyelerinde biriktirebilmek için ilave mekanizmalara ihtiyaç duyarlar [9]. Bu mekanizmalardan biri, metal katyonlarının bitkiler tarafından sentezlenen yüksek çekiciliğe sahip özel ligandlarla bileşik oluşturması ve böylelikle çözeltideki serbest metal iyonlarının konsantrasyonlarının azaltılarak hücrelerde ve alt hücrelerde metal zehirliliğinin önlenmesidir [8, 12]. Moleküler ağırlığı 200'ün altında olan bu özel organik bileşiklerle metallerin bileşik oluşturması özellikle Ni'e toleranslılıkta büyük rol oynamaktadır [9, 12]. Örneğin bir Ni hiperbiriktiricisi olan *T. goesingense*'deki yüksek tolerans, nikelin histidine ile birleşik oluşturması ve böylece



metalin inaktif duruma getirilmesiyle sağlanır [9]. Kök içinde,  $Ni^{+2}$ 'yi kısıpçaylayan histidine'nin yüksek miktarlarda dışsal olarak verilmesi, *Alyssum montanum* bitkisinde ksileme nakledilen Ni oranının 50 kat artmasını sağlamıştır [65]. Nikel hiperbiriktiricisi *Alyssum lesbiacum*'da nikel maruz bırakıldığında ksilem özsuyundaki histidine konsantrasyonunun büyük miktarlarda arttığı gözlenmiştir. *T. caerulescens*'de Zn, köklerde histidine ile yâda organik asitlerle birleşmiş halde bulunmakta yâda gövdede bileşik oluşturmadan serbest iyon formunda bulunmaktadır [14]. *A. halleri* bitkisinin yapraklarında ise Zn çoğunlukla malate ile birleşmiş halde bulunmaktadır, köklerde bulunma formu ise Zn-histidine bileşiğı şeklindedir. Ksilem özsuyunda mevcut olan Zn'nun çoğunluğu ise serbest hidrat edilmiş  $Zn^{+2}$  katyonları ve Zn-sitrat şeklindedir [8]. *T. goesingense*'deki hücre içi nikelin çoğunun sitrat ile bileşik oluşturduğu ve vakuollerde de sitrat-Ni bileşiğı şeklinde depolandığı bulunmuştur. Histidine'nin ise *T. goesingense*'de nikelin hücre zarının bir tarafından diğere tarafına taşınmasında yardımcı olduğu tespit edilmiştir [8].

Pek çok metal için son basamak metalin herhangi bir hücreyel prosesten uzak bir yere depolanmasıdır çünkü metal hücreyel proseslerde bozulmalara neden olabilmekte yâda bu proseslere engel olabilmektedir [8]. Metallerin depolanması ve sıkıştırılması için hücreyel yer ise apoplast ve vakuollerdir [12]. Örneğın nikel hiperbiriktiricisi *T. goesingense*'nin yapraklarındaki hücre içi nikelin % 75'inin yaprak vakuollerinde konumlandığı bulunmuştur [12]. Çinkonun vakuollerde sıkıştırılmasının ise Zn hiperbiriktiricisi olan *T. caerulescens*'in gövdesindeki Zn toleranslılığını sağlayan mekanizma olduğu ileri sürülmüştür. Zehirli bir metal olan kadmiyum ise bitkilerde thiol'ce zengin peptitlerin ailesinden olan fitoşellatlayıcılara bağlanarak zehirsiz hale getirilerek bitkide biriktirilmektedir [9]. *Arabidopsis halleri*'de Zn çoğunlukla gövdede malate ile birleşmiş olarak bulunmakta, köklerde ise malate, sitrat ve fosfat ile birleşmiş halde bulunmaktadır [14].

Metallerin depolandığı hücre tipleri hiperbiriktirici bitki türlerinde farklılık gösterir. Örneğın *T. caerulescens*'in epidermis hücrelerinde mezofil hücrelerine nazaran 5–6,5 kat daha çok Zn bulunmuştur. *A. halleri* ise epidermal hücrelerinin yerine mezofil hücrelerinde daha çok Zn ve Cd biriktirmektedir [8, 65]. Ayrıca trichomes metallerin

depolanmasında ve zehirsiz hale getirilmesinde temel bir role sahiptir. *Brassica juncea*'daki Cd birikiminin tüm yaprakla karşılaştırıldığında trichomes de 40 kat daha yüksek saptanmıştır. *Alyssum lesbiacum* ve *Arabidopsis halleri* hiperbiriktiricilerinde de en yüksek Ni ve Zn oranları trichomes'de saptanmıştır [65].

Kökler gibi yıl boyu süren organlarda da yapraklara göre çeşitli problemler vardır. Yaprakların dökülmesi ile zehirli metallerin giderimi sağlanırken, köklerde bu söz konusu değildir. Köklerde ağır metallere karşı toleranslılığın kapasitesi bitkinin metallerin çözünebilir yâda çözünmeyen formlarını köklerde tutarak yâda gövdeye salarak bir denge oluşturmasına bağlıdır. Bitki çözünür metal formlarını yapraklara nakledip, yaprak dökülmesi ile metallerin bertarafını sağlarken, çözünmeyen metal formlarını kök hücrelerinde tutar. Genel olarak yaşlı kökler bitki tarafından biriktirilen ağır metallerin etkisiz hale getirildiği başlıca alanlardır [11].

+2 değerlikli nikel, bitkideki çoğu aminoasit ile bileşik oluşturabilmektedir. Örneğin soya fasulyesi ile yapılan deneylerde ksilem sıvısındaki nikelin çoğunun aminoasitlerle özellikle de karboksilik asit ile ilişkisi olduğu bulunmuştur. Diğer bir çalışmada ise *Alyssum* familyasından *A. lesbiacum*'daki nikelin serbest histidine'ye bağlandığı bulunmuş özellikle bitkideki nikel konsantrasyonu ile serbest histidine seviyesi arasında lineer bir ilişki saptanmıştır. Sonuç olarak aminoasit-nikel bileşikleri nikelin taşınımında etkili olurken, karboksilik asit nikelin depolanmasında etkili olmuştur [11].

Kobalt ise bitkide organik ligandlarla polar bileşikler oluşturmaktadır. Çinko ve kadmiyum ise çoğunlukla aynı bitkiler tarafından biriktirildikleri için hiperbirikimleri birlikte düşünülür. Çinko bitki için temel elementtir. Çinko içeren enzimler, DNA, RNA ve protein sentezlerinde ve metabolizmalarında kullanılan enzimlerdir. Çinko 200 kadar enzimin kofaktörüdür. Fakat çok yüksek konsantrasyonları, ksilem elementlerinin bloke edilmesine neden olur. Çinkoya toleranslı bitkiler genellikle yüksek seviyelerde organik asit içerirler ve çinko-sitrat bileşikleri oluştururlar yâda çinko, malik asite bağlanır [11].

## 2.7. Avantajlar ve Dezavantajlar

Bitkilerle iyileştirme prosesinin belirlenen özel bir proje için en uygun metot olup olmadığını saptamak için avantajları ve dezavantajları iyi bilinmelidir. Mevcut arıtma yöntemleri ile karşılaştırıldığında fitoekstraksiyonun düşük maliyetli olması, bu prosesin en göze çarpan avantajıdır. Özellikle metal seviyesi düşük ve ekonomik madencilige uygun olmayan toprakları temizlemek yüksek maliyetli bir işlemdir [16]. Örneğin toprak yaklaşık olarak % 0,35 nikel içeriyorsa bu oran geleneksel madenciliğin yapılabilmesi için gerekli ekonomik konsantrasyonun altında bir değerdir [13]. Böyle araziler fitoekstraksiyon yöntemi ile çok düşük maliyetlere temizlenebilmektedir. Böylece metal oranı düşük arazilerden metallerin geri kazanılması da söz konusu olacaktır. Örneğin çinko hiperbiriktiricisi *T. caerulescens*'in toplam 150–450 mg kg<sup>-1</sup> Zn kirliliğine sahip bir arazide yetiştirildiğinde, gövde kuru ağırlığında 2000–8000 mg kg<sup>-1</sup> çinkoyu biriktirebildiği rapor edilmiştir. Toplam çinko alımı bir büyüme sezonu için hektar başına 40 kg'a denktir [21].

Hektar başına 25 ton, bir bitkinin yılda maksimum biyokütle verimidir. Yıllık çinko giderimi ise hektar başına 12,5 kg'dır. Bu bitki hiperbiriktirici değil ise 500 mg kg<sup>-1</sup> çinko biriktirir ki bu değer zehirliliğin başladığı eşik değerdir. Buna zıt olarak hiperbiriktirici bitki hektar başına yıllık 5 ton biyokütle verimi ve maksimum birikim konsantrasyonu 20000 mg kg<sup>-1</sup> olduğunda, hektardan yıllık 100 kg çinko giderebilir [11].

Fitoekstraksiyon prosesinin maliyeti ile ilgili geçerli tahminler geniş çapta değişkendir ve tahminlerin temel alındığı koşullara göre az bir bilgi mevcuttur fakat maliyet genel olarak, bitkilendirme için hektar başına 25000 \$ olarak tahmin edilmektedir, bakım, izleme, kontrol testleri v.s.'de eklendiğinde toplam iyileştirme maliyeti hektar başına 150000 \$ ile 250000 \$ arasında değişmektedir [15]. Aynı toprağın kazılıp başka bir yerde depolanmasının maliyeti ise en az 950000 \$'dır [9]. Literatürde 1 ton toprağın fitoekstraksiyon ile temizlenmesinin tahmini maliyetinin 25–100 \$ arasında değiştiği, aynı toprağın kimyasal arıtma yâda kazılıp bir arazide depolama maliyeti ise ton başına 100–500 \$ olduğu belirtilmektedir [12].

Diğer bir avantajı, daha az miktarda ve geri dönüşebilen metalce zengin bitki artıklarının oluşmasıdır. Örnek olarak ağır metallerle kirlenmiş 1 hektarlık bir alanın temizlenebilmesi için yaklaşık olarak 5000 ton toprak tehlikeli atık şeklinde arazi dolgusu olarak bertaraf edilmelidir. Buna zıt olarak ortamdaki metalleri alan bitkiler yakıldıktan sonra bertaraf edilmesi gereken külün miktarı 25 ile 30 ton arasında değişmektedir [15]. Yakma sonucunda oluşan metalce zengin kül, genel olarak kuru bitki materyalinin sadece %7 ağırlığı kadardır ve güvenle depolanabilmektedir [20].

Anderson ve ark. (1999), Ni hiperbiriktiricileri *Alyssum bertolonii* ve *Berkheya coddii*'nin fitomadencilik potansiyellerini test etmek amacıyla yaptıkları çalışmalarında, farklı gübreleme uygulamalarının *Alyssum bertolonii*'nin büyümesine etkisini araştırmışlar ve bitkideki Ni konsantrasyonunda ( $7600 \text{ mg kg}^{-1}$ ) önemli bir kayıp olmadan bitkinin biyokütlesinin yaklaşık 3 kata ( $4,5 \text{ ton hektar}^{-1}$ 'dan  $12 \text{ ton hektar}^{-1}$ 'a) kadar artırılabilceğini göstermişlerdir. Paralel deneyleri, *Berkheya coddii* ile gerçekleştirmişler, fakat hektar başına 20 ton üzerinde biyokütle verimini elde etmelerine rağmen Ni konsantrasyonu *A. bertolonii*'deki kadar yüksek olmamıştır. Bununla birlikte, toplam verim oldukça yüksek olmuştur. Aynı çalışmada ayrıca bitkinin altını hiperbiriktirmesi, besin çözültisine, amonyum tiyosiyanat ilave edilerek teşvik edilmiş, *Brassica juncea*'nın kuru ağırlıkta  $57 \text{ mg kg}^{-1}$ 'in üstünde altını biriktirebildiği tespit edilmiştir. Ayrıca talyumun hiperbirikimi ( $>500 \text{ mg kg}^{-1}$  kuru ağırlık), *Iberis intermedia* ve *Biscutella laevigata* (Brassicaceae)'da tespit edilmiş, *Iberis* % 0,4 Tl'u ve *Biscutella*'da % 1,5'un üzerinde Tl'u biriktirebilmiştir. Talyumun bitkide gerçekleşen bu yüksek birikimi, hayvan ve insan sağlığı, kirli toprakların bitkilerle temizlenmesi ve Tl'un fitomadenciligi açısından önemlidir. *Iberis intermedia* bitkisi için yapılan hesaplamalarda, kuru ağırlığında % 0,08 Tl içeren hektar başına 10 ton biyokütle mahsulü ile hektardan 1200 \$ net kazanç elde edilebileceği saptanmıştır. Bu değer buğdaydan elde edilecek gelirin iki katıdır. İki kazancın aynı olabilmesi için hektar başına 10 ton biyokütle mahsulünün kuru ağırlığında  $170 \text{ mg kg}^{-1}$  (% 0,017) Tl olması yeterlidir (net kazanç hektar başına 500 \$'dır). Bu çalışmada fitomadencilik işlem modeli ve ekonomisi sunulmuş, avantaj ve dezavantajları tartışılmıştır [71].

Robinson ve ark. (1997), Ni hiperbiriktirici bitkisi *Berkheya coddii*'nin kirlenmiş toprakların fitoekstraksiyonu ve nikelin fitomadenciliği için potansiyelini saptamak amacıyla, saksı ve arazi denemeleri gerçekleştirmişlerdir. Arazide gerçekleştirilen denemeler, orta derecede bir gübrelemeden sonra bitki kuru biyokütlesinin, hektar başına 22 tona ulaşabileceğini göstermiştir. Azot ve fosfor gübreleri gibi çeşitli toprak iyileştiricilerinin kullanıldığı saksı denemeleri, azot ilavesinin artırılmasıyla nikel alımının arttığını, fakat fosfora bir reaksiyon oluşmadığını göstermiştir. Gövdenin aralıklarla hasat edilmesi, yeni büyüyen bitkideki Ni içeriğinin artmasını teşvik etmiştir (1800 mg kg<sup>-1</sup> Ni ile karşılaştırıldığında 5500 mg kg<sup>-1</sup> olmuştur). Büyüme ortamına Ni ilave edilmiş (% 0–1 oranında) saksılarda büyüyen bitkilerde, bitkinin Ni muhtevası yaklaşık olarak % 1 kuru kütle değerine ulaşmıştır. Orta ölçüde kirlenmiş toprakların (100 mg kg<sup>-1</sup> Ni) *Berkheya coddii*'nin sadece 2 mahsulüyle temizlenebileceğini hesaplamışlardır. Bu bitki türünün fitomadencilik için potansiyelini de değerlendirmişler ve dünyanın pek çok alanında hektar başına 100 kg Ni verimine ulaşılabilirliğini belirtmişlerdir [20].

Literatürde kaydedilmiş en yüksek nikel konsantrasyonu *B. condii* bitkisinde 7880 mg kg<sup>-1</sup>'dir, 1 hektar bitki 168 kg nikel giderebilir ve nikelin dünya fiyatı kg başına 7,65 \$ alındığında buna denk düşen verim 1285 \$'dır. Bu bitkinin yakılmasından elde edilen enerji ile (288 \$) birleştirilirse verim hektar başına 1311 \$ olmaktadır. Şimdiye kadar yapılan deneysel çalışmalarda *B. condii* yabancı bitkisinde 7880 mg kg<sup>-1</sup> nikel alımı gerçekleştirilememiştir, 5000 mg kg<sup>-1</sup> daha gerçekçi bir konsantrasyon değeridir ve hektar başına 22 ton kuru biyokütle ile 110 kg nikel verimi sağlanabilir. Dünya nikel birim fiyatı kg başına 7,65 \$ olarak alındığında hektar başına elde edilen kazanç 841,5 \$ olmaktadır. Enerjiden elde edilecek kazanç eklendiğinde üreticiye % 50 civarında bir geri dönüş söz konusu olacaktır [13].

Fitoekstraksiyon prosesinin geniş bir aralıktaki zehirli metallere uygulanabilirliği, çevresel rahatsızlığı azaltması, hava ve su kaynaklı ikincil atıkları da giderebilmesi, arıtımın ardından bitkinin ortamı terk ederek elverişli bir ortam bırakması literatürde belirtilen diğer avantajlarındandır [15, 16].

Fitoekstraksiyon prosesinin literatürde belirtilen en yaygın dezavantajı çoğu metal biriktirici bitkilerin yavaş büyüyen, küçük ve/veya çalı bitkileri olup, düşük biyokütle üretmeleri ve belirsiz büyüme ihtiyaçlarına ihtiyaç göstermeleridir [15, 16]. Düşük biyokütle üretimi metallerin fitoekstraksiyon potansiyellerini sınırlayan en önemli biyolojik parametredir. Bunun nedeni, bitkilerin büyümeye harcamacakları enerjiyi, metalleri tolere etmeye harcamalarıdır [72]. Fazlasıyla üretken bitki türlerinde biyokütle üretim potansiyeli hektar başına yaklaşık 100 ton yaş ağırlıktır. Bu parametrenin değerleri yıllık metal giderim potansiyelini hektar başına maksimum 400 kg metalle sınırlar [9]. Örneğin Zn ve Cd hiperbiriktiricisi olan *Thlaspi caerulescens* hektar başına tipik olarak 2–5 ton gövde kuru madde biyokütle oluştururken, Ni hiperbiriktiricisi *Alyssum bertolonii* ve *Berkheya coddii* küçük ölçekli arazi denemelerinde hektar başına sırasıyla 9 ve 22 ton gövde kuru madde oluşturabilmiştir [14].

Fakat literatürde yüksek metal birikiminin yâda yüksek biyokütle üretiminin ortamdaki metallerin giderilmesinde önemli olup olmadığı tam olarak net değildir. Şu örnek duruma netlik kazandırabilir; pH'ı ayarlanmış kirli topraklarda büyüyen *Zea mays* ve *Brassica juncea* gibi yüksek biyokütleli mahsul bitkilerinin, %50 mahsul azalmasına eriştiği tahmin edilmektedir. Optimum şartlarda bu bitkiler hektar başına 20 ton kuru ağırlığa ulaşabilmektedir. Genellikle 100 mg Zn: 1 mg Cd kirliliğe sahip alanlarda büyüyen bitkiler hasat edildiğinde gövde biyokütlesi 500 mg kg<sup>-1</sup> Zn içermekte ve bitkilerde önemli bir verim azalması meydana gelmektedir. Verimin %50 azalması durumunda (hektar başına 10 ton) kuru biyokütle 500 mg kg<sup>-1</sup> Zn içermektedir. Böylelikle bir bitki hektar başına yılda sadece 5 kg Zn'yu giderebilir fakat *T. caerulescens*, topraktaki hem Zn'yu hem de Cd'u giderebilir, diğer bitkilerle karşılaştırıldığında ise düşük biyokütle oluşturur fakat 25000 mg kg<sup>-1</sup> Zn'ya kadar mahsulde azalma olmadan toleranslıdır. Hatta hektar başına 5 ton'luk düşük mahsul, verimin azalmasının başlangıcıdır ve bu noktada bile Zn giderimi hektar başına 125 kg olabilmektedir. Sonuç olarak yüksek miktarlarda biriktirme yeteneği ve metallere karşı yüksek toleranslılık, çok miktarda biyokütle oluşumundan daha önemlidir [17].

Diğer bir dezavantaj ise hiperbiriktirici bitki türlerinin genelde sadece bir elementi biriktirebilmeleridir. Tüm metalleri biriktirebilen bitki türü henüz bulunmamıştır. Fakat birkaç bitki türü iki adet metali aynı anda biriktirebilmektedir. *Thlaspi caerulescens*

çinko ve kadmiyumu, *Haumaniastrum katangense* ise bakır ve kobaltı aynı anda hiperbiriktirebilen bitki türlerindedir [11].

Literatürde belirtilen diğer dezavantajlar uzun zaman gereksinimi, derinlik sınırlaması, bitkinin hayvanlar tarafından tüketilmesiyle kirleticilerin besin zincirine girme ihtimali, iklim ve hidrolojik koşulların bitki türlerinin büyüme oranını kısıtlaması, bitkinin kirleticileri alımlarını kolaylaştırmak için şelatlayıcı kimyasallara ihtiyaç duyulmasıdır [15, 16]. Özellikle suda yüksek çözünürlüğe sahip şelat-zehirli bileşikler göz önünde tutulursa bazı şelatlayıcıların kullanımına bağlı olarak ve bu bileşiklerin toprağın derin katmanlarına hareketi ile muhtemelen yeraltı suyu ve nehir ağzı, haliç kirliliği gibi riskler oluşabilmektedir [8].

## 2.8. Metal Birikiminin Nicel Değerlendirilmesi

Biyolojik biriktirme faktörü ve yer değiştirme faktörü, bitkilerle temizleme prosesinin verimliliğinin belirlenmesinde nicel bir unsur olarak sık kullanılan yöntemlerdir. Biyolojik biriktirme faktörü, bitkinin gövde yâda kök metal konsantrasyonun, toprak metal konsantrasyonuna oranıdır. Biyolojik biriktirme faktörü 1'in altında olduğunda bitkinin az miktarda metal absorpladığı, 1'in üzerinde olduğunda ise aktif olarak metal biriktirdiği kabul edilmektedir. Bu katsayının hiperbiriktirici bitkiler için 1'den büyük olması istenir [14]. Kuru ağırlık bazında bu eşik değer Zn ve Ni için yaklaşık %3 civarındadır ve Cd, Pb gibi zehirli metaller için ise oldukça düşüktür [9].

Hiperbiriktirici özelliği sahip olmayan bitkiler kirliliği topraklarda büyüdüklerinde biyolojik biriktirme faktörü genellikle <0,2 olmaktadır [14]. Örneğin 40 biyolojik biriktirme faktörüne sahip bir bitki eğer hektar başına 5 ton ürün oluşturabilirse 10 mahsul ekiminde, toprağın 20 cm'lik kalınlığında metal konsantrasyonunu yarıya indirdiği ölçülmüştür fakat 20 biyolojik biriktirme faktörüne sahip bir bitkinin aynı etkiyi gösterebilmesi için hektar başına en az 10 ton ürün oluşturması gereklidir [8]. Biyolojik biriktirme faktörü düşükçe, daha fazla metal giderimi için biyokütle veriminin yükselmesi gerekmektedir [14]. 5000 mg kg<sup>-1</sup> toplam metal konsantrasyonuna sahip

toprakta kuru ağırlığında %5'e kadar ( $50,000 \text{ mg kg}^{-1}$ ) metalleri biriktirebilen bir bitki 10 biyolojik biriktirme faktörüne sahip olmaktadır [12].

Diğer bir nicel değerlendirme yöntemi olan yer değiştirme faktörü, bitki dokularındaki ağır metal konsantrasyonlarının ölçülmesine dayanan, bitkinin fitoekstraksiyon amacı için değerlendirilmesini ve özellikle bitkinin ağır metalleri köklerinden hasat edilebilir kısımlarına doğru taşıma yeteneğini belirleyen bir parametredir [73]. Yer değiştirme faktörü, bitkinin toprak üstü dokularındaki metal konsantrasyonunun, kök dokusundaki metal konsantrasyonuna oranlanması ile belirlenmekte ve hiperbiriktirici bitkilerde  $\geq 1$  olması istenmektedir [12, 74, 75, 76]. Bu tanımlama fizyolojik temellidir ve metal hiperbirikiminin biyolojik mekanizmalarını araştıran çalışmalarda çok kullanışlıdır [12].

Başka bir değerlendirme yönteminde ise, bitkileri hiperbiriktirici olarak değerlendirmek için sınır değerler, Cd için  $100 \text{ mg kg}^{-1}$ , Ni, Cu, Co için  $1,000 \text{ mg kg}^{-1}$  ve Zn ile Mn için  $10,000 \text{ mg kg}^{-1}$  olarak belirtilmiştir [77].

## 2.9. Gelecekteki Stratejiler

Bitkilerle kirlenmiş ortamların temizlenmesinin etkili bir gelişiminin sağlanabilmesi için her biri birbirinden farklı olan toprak yapısı ve bitki kimyası nedeniyle her bir element ayrı ayrı düşünülmekte, ticari olarak uygulanabilirliğin geliştirilmesi için de hem agronomik yönetim uygulamaları hem de bitki genetik yetenekleri mükemmelleştirilmeye çalışılmaktadır. Bitkiler ile ağır metallerin giderilmesi, önemli bir araştırma alanıdır ve önemli ticari uygulama imkânları sunmakta, bitki biyokimyası, beslenmesi ve stres fizyolojisi ile ilgili önemli sorulara cevap sağlamaktadır.

Bitkilerle iyileştirme daha başlangıç aşamasında olmasına rağmen önemli bir çevresel temizleme teknolojisi olarak kabul edilmektedir. İleriki gelişmeler ise, bitki biyolojisi, toprak kimyası, toprak mikrobiyolojisi, ziraat ve çevre mühendisliklerinin ortak olduğu multi disiplinler araştırmaları gerektirmektedir. Çevrenin temizlenmesinde bitkilerin kullanılması gelecek için yeşil ve temiz bir gezegenin yanında ekolojik bir yöntem de sunmaktadır.



Bitkilerle arıtım prosesinin geliştirilmesi için gelecekteki stratejiler ise şöyle özetlenebilir:

1. Mevcut hiperakümülatör bitkilerin tarımsal uygulamalar yoluyla biyokütlelerinin artırılması
2. Toprak ıslah ediciler kullanılarak hiperbirikimin ve gövdeye taşınımın artırılması
3. Büyüme arttırıcı hormonların yâda diğer elementlerin kullanılması ile gövde ve kök gelişiminin artırılması
4. Geleneksel yollarla yüksek biriktirici özelliğe sahip bitkilerin üretilmesi
5. Birikimi arttırmak için bitki simbiyozları ile birlikte bakyeri yâda fungilerin kullanılması
6. Genleriyle oynanmış bitkilerin kullanılması [11].

## **BÖLÜM 3. MATERYAL VE METOT**

### **3.1. Çalışmada Kullanılan Arıtma Çamuru ve Çamurun Fiziko-kimyasal ve Kimyasal Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler**

#### **3.1.1. Arıtma çamuru**

Çalışmada kullanılan evsel nitelikli arıtma çamuru, Adapazarı kent merkezi atıksuları ile ön arıtıma tabi tutulmuş ve limit değerleri sağlamış endüstriyel atıksuların arıtımını sağlayan Adapazarı Büyükşehir Belediyesi'ne ait Karaman Evsel Atıksu Arıtma Tesisi'nden temin edilmiştir. Arıtma tesisi uzun havalandırmalı biyolojik arıtma tesisi olmakla birlikte tesise günde yaklaşık 100 bin m<sup>3</sup> atıksu girmekte ve arıtım işlemi neticesinde günlük yaklaşık olarak 100 ton KM arıtma çamuru oluşmaktadır.

Bant filtreden çıkan yaklaşık %20 kuru maddeye sahip ham çamur kekleri, hiçbir stabilizasyon işlemine tabi tutulmadan, bitki ekiminde kullanılmıştır. Arıtma çamurunun fiziksel ve kimyasal karakterizasyonu, literatürde kabul görmüş referanslar temel alınarak tespit edilmiş, bitkilerin hasadının ardından çamur numunelerinde pH, EC, ağır metal, organik madde, toplam N ve fekal koliform tayinleri tekrarlanmıştır. Hava kuru numuneler porselen bir havanda ezilmiş, 2 mm gözenekli elekten geçen kısım analizlerde kullanılmıştır [78].

#### **3.1.2. pH (H<sub>2</sub>O)**

pH, 1:5 (w/v) metoduna göre 10 g hava kuru çamur numunesi 50 ml saf suyla seyreltilip 1 saatlik bekleme süresinin sonunda cam elektrotlu pH metre ile ölçülmüştür [78, 79].

### 3.1.3. EC ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )

EC, 1:5 (w/v) metoduna uygun olarak 15 g hava kuru çamur numunesi 75 ml saf su ilave edilerek, 1 saat çalkalanıp, ardından basınç pompası ile Whatman 42 filtre kâğıdı yerleştirilmiş Buchner hunisinden süzülüp, elde edilen süzüntüde sıcaklık dikkate alınarak EC elektrotu ile tespit edilmiştir [78].

### 3.1.4. Organik madde (%)

Organik madde muhtevası iki farklı metot uygulanarak saptanmıştır; (1) Walkley-Black metoduna göre % organik maddesinin tespiti (2) fırın kuru ağırlık ilkesine göre (LOI) % olarak hesaplanması.

Walkley-Black metoduna göre arıtma çamurunun % organik maddesi; 1 g öğütülmüş (0,15 mm) hava kuru çamur numunesinde, potasyum dikromatın ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ), organik karbon bileşikleri ile indirgenmesi ve sonrasında indirgenmeyen dikromatın, ferrous amonyum sülfat ile titre edilerek oksitlenmesi-indirgenmesi ile kuru ağırlıkta tespit edilmiştir [79, 80].

Fırın kuru ağırlık ilkesine göre yapılan ölçümde; etüvde kurutulmuş (105 °C) ve elekten geçirilmiş (<2 mm) çamur numunesinden, 5 g alınmış ve kül fırınında  $375 \pm 5$  °C'de bir gece boyunca (16 saat) yakıldıktan sonra meydana gelen organik madde kayıplarının fırın kuru ağırlık ilkesine göre (LOI) kuru ağırlıkta tespit edilmiştir [78, 80].

### 3.1.5. Toplam azot (%)

Çalışmada kullanılan arıtma çamurunun toplam azot içeriği, bileşikler içindeki azotun derişik sülfürik asit ile amonyağa dönüştürülmesi ve amonyağın ortam içinde amonyum sülfat halinde tutulması prensibine dayanan Kjeldahl metodu ile belirlenmiş ve % olarak ifade edilmiştir [78, 81, 82, 83, 84].

### 3.1.6. P (Fosfor, %)

Fosfor içeriği, öğütölmüş ve elekten geçirilmiş (<2 mm) 5 g hava kuru çamur numunesine, Bingham metoduna (suda çözünlür P metodu) uygun olarak 50 ml saf su ilave edilip 10 dakika kadar 200 devirde çalkalandıktan sonra filtre edilip, elde edilen süzüntüden 2 ml alınıp üzerine 2 ml askorbik asit eklenerek 20 dakikanın sonunda 682 nm dalga boyunda spektrofotometrik olarak tespit edilmiştir [85, 86].

### 3.1.7. K (Potasyum, %)

Potasyum içeriği, öğütölmüş ve elekten geçirilmiş (<2 mm), 5 g hava kuru çamur numunesinin 1 N amonyum asetat (NH<sub>4</sub>OAc) çözültisi ile ekstrakte edilmesinin ardından ICP (Perkin Emler, Optima 2100 DV) plazma yayım spektroskopisi ile tespit edilmiştir [79].

### 3.1.8. Katyon değişim kapasitesi (cmol (+) kg<sup>-1</sup>)

Kasyon değişim kapasitesi (KDK), BaCl<sub>2</sub> tetikleyici yer değiştirme metoduna göre, 2 g (<2 mm) öğütölmüş hava kuru çamur numunesinin BaCl<sub>2</sub>-2H<sub>2</sub>O ekstraksiyon çözültisi ile ekstrakte edilmesinin akabinde, ilave edilen toplam Mg<sup>+2</sup> iyonlarının miktarından, çözültideki Mg<sup>+2</sup> iyonlarının konsantrasyonunun çıkarılması ile bulunmuştur [87].

### 3.1.9. Organik karbon (%)

Organik karbon muhtevası, Walkley-Black metoduna göre; 1 g öğütölmüş hava kuru çamur numunesinde (0,15 mm), potasyum dikromatın (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>), organik karbon bileşikleri ile indirgenmesi ve sonrasında indirgenmeyen dikromatın, ferrous amonyum sülfat ile titre edilerek oksitlenmesi-indirgenmesi ile kuru ağırlıkta % olarak bulunmuştur [79, 80].

### 3.1.10. C/N oranı

C/N oranı, organik karbon/toplam azot oranlamasıyla tespit edilmiştir.

### 3.1.11. Ağır metal muhtevası

Çalışmada kullanılan arıtma çamurunun ağır metal muhtevasını saptamak amacıyla Karaman Evsel Atıksu Arıtma Tesisi'ndeki bant filtre ünitesinden çıkan arıtma çamurundan alınan numuneler, polietilen numune alma kapları ile alındıktan sonra laboratuara getirilmiştir. Numuneler ilk olarak 48 saat 70 °C'de kurutulduktan sonra porselen havanda öğütülen kuru numuneler 2 mm gözenekli elekten geçirilmiş ve elekten geçen kısım ağır metal analizlerinde kullanılmıştır.

Sonrasında 250 mg çamur numunesi üzerine 6 ml HNO<sub>3</sub> (65%), 1 ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (30%) eklenerek mikrodalga fırınında (MWS-3, DAP 60S, Berghof Products Inst. Germany) 10 dakika 170 °C, 15 dakika 200 °C, 10 dakika 100 °C ve 10 dakika 100 °C olmak üzere toplam 45 dakika yakılmıştır. Numuneler soğutulduktan sonra ultra saf su ile 25 ml'ye tamamlanmıştır [78].

Ayrıca stok numune çözeltileri hazırlanarak ve uygun seyreltmeler yapılarak analiz çözeltileri hazırlanmıştır. Stok çözeltiler, ekstraksiyon çözeltisi ile numunedeki element konsantrasyonunu içine alacak şekilde seyreltilerek en az 5 kalibrasyon çözeltisi hazırlanmıştır. Tanık deney numunesi ise, deney numunesi alınmadan, numune yerine saf su kullanılarak ve deney numunesine uygulanan bütün işlemler aynen uygulanarak hazırlanmıştır. Kalibrasyon çözeltileri, deney çözeltileri ve tanık deney numunelerindeki Pb, Zn, Cu, Cr, Ni, ve Cd ağır metallerinin absorbanları ICP (Perkin Emler, Optima 2100 DV) plazma yayım spektroskopisinde ölçülmüş ve sonuçlar ppm biriminde kuru ağırlık (mg kg<sup>-1</sup> kuru ağır.) olarak ifade edilmiştir [78].

### 3.1.12. Fekal koliform tayini

Çamur numuneleri uygun seyreltmeye tabi tutulmuş, tek ve çift kuvvet olarak hazırlanan Laktozlu Broth besiyerine 3'er adet olmak üzere, 3X0,1 ml, 3X1 ml tek kuvvet besiyerine, 3X10 ml çift kuvvet besiyerine ekim yapılmış ve 35 °C'de 24 saat inkübasyondan sonra pozitif sonuç veren tüpler tespit edilmiştir. İkinci aşamada pozitif sonuç veren tüplerden, Brilliant Green besiyerlerine ekim yapılmış ve gaz oluşumu için 44,5 °C'de 24 saat inkübe edilmiştir. Bu sürenin sonunda gaz oluşumu görülen tüpler fekal koliform olarak değerlendirilmiş, En Muhtemel Sayı (EMS) ilgili tablolardan okunarak numunelerdeki fekal koliform miktarı (EMS g<sup>-1</sup>) tespit edilmiştir.

## 3.2. Bitkisel Materyalin Belirlenmesi ve Saksı Denemesinin Kurulması

### 3.2.1. Bitkisel materyal

Karaman Eysel Atıksu Arıtma Tesisi'nde oluşan arıtma çamurlarının döküldüğü arazide gözlemler yapılmış ve çamur yığınlarının üzerinde yetişmiş yöresel bazı bitki türleri tespit edilmiştir. Arazide kendiliğinden büyüyen bu bitkiler, arıtma çamurundaki hem organik yükü hem de ağır metal muhtevasını gelişimi için kullanabilme yeteneğine sahiptirler. Bu bitkilerden yüksek biyokütleyle sahip olan üç adet dominant bitki türü saptanmış; *Conyza canadensis*, *Conium maculatum*, *Datura stramonium* bitki türleri (Şekil 3.1) deneylerde kullanılmak üzere seçilmişlerdir.

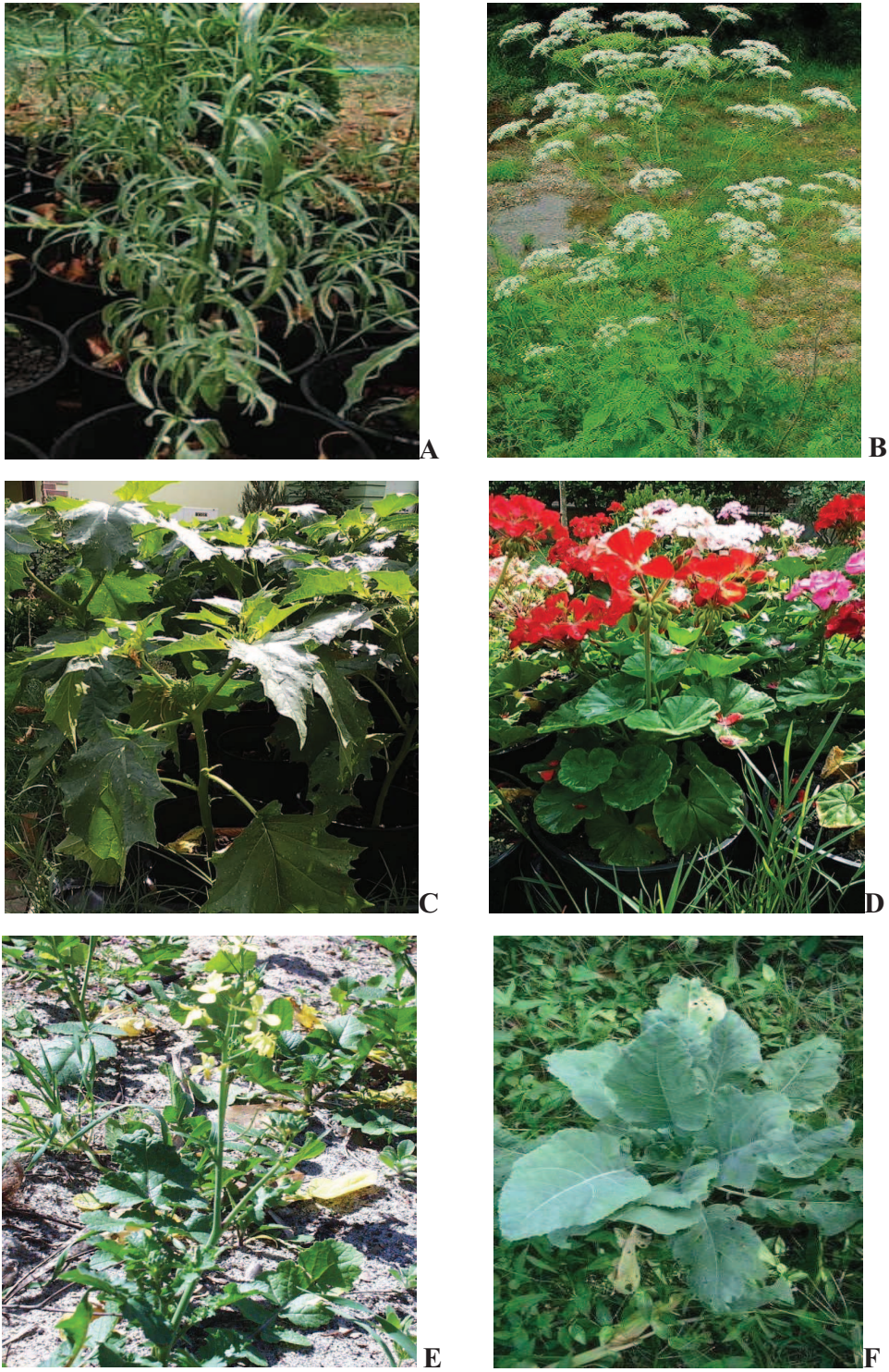
Fitoekstraksiyon denemelerinde günümüze kadar en çok çalışılan bitki türü *Brassica juncea*'dır [88]. Özellikle *Brassica juncea*'nın da içinde olduğu Brassica familyasına ait pek çok sayıdaki yabancı bitki nikel ve çinko fitoekstraksiyonunda özel bir öneme sahiptir [25]. Arıtma çamurlarında bulunması muhtemel ağır metalleri yüksek konsantrasyonlarda biriktirmesi sebebiyle, literatürde genel hiperbiktirici olarak belirtilen *Brassica juncea* (Şekil 3.1) çalışmada kontrol uygulaması olarak kullanılmıştır.

Hiperbiktirici bitkilerin yanı sıra bazı bitkiler temel iyonların eksikliği söz konusu olduğunda, toprak çözeltisindeki iyon konsantrasyonlarını arttırmak için özel

mekanizmalar geliştirmişlerdir. Yapılan literatür incelemelerinde, *Pelargonium hortorum* (Şekil 3.1) bitkisinin köklerinden salgıladığı protonlarla rhizosfer pH'ını düşürebildiği [68, 69] ve yapraklarında toksik seviyelerdeki Fe ve Mn konsantrasyonlarını biriktirebildiğine rastlanmıştır [69]. Bu amaç doğrultusunda *Pelargonium hortorum* bitkisinin arıtma çamurundan ağır metal giderim potansiyeli araştırılmıştır.

Çalışmada yerel bitkilerin de ağır metalleri hiperbiriktirme yeteneklerini araştırmak amacıyla, literatür incelemesi yapılmış ve bu konu ile ilgili olarak lahanagiller bitki familyasına ait bitkilerin nikeli ve kadmiyumu hiperbiriktirebildiği görülmüştür [70]. Literatür incelendiğinde ise bu konudaki çalışmaların sınırlı olduğu görülmüş özellikle dünyadaki örneklere bakıldığında ülkesel ölçekte tam tarama yapan başka bir çalışma olmadığı saptanmıştır. Bu amaçla *Brassica oleraceae var. oleraceae* (Şekil 3.1) bitki türü arıtma çamuruna ekilmiş ve bu bitkinin özellikle nikel ve kadmiyum ağır metallerini çamurdan giderim potansiyelleri araştırılmıştır.

Sonuç olarak arıtma çamuru besin elementlerince zengindir, bu nedenle yüksek biyokütle oluşturmaları sağlanan bölge ve ülkemize özgü yerel bitkilerin ağır metal (Pb, Zn, Cu, Cr, Ni ve Cd) alım ve biriktirme potansiyelleri, biyokütle oluşumu dikkate alınarak tespit edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan bitkiler. **A;** *Conyza canadensis*, **B;** *Conium maculatum*, **C;** *Datura stramonium*, **D;** *Pelargonium hortorum* **E;** *Brassica juncea* **F;** *Brassica oleraceae* var. *oleraceae*



### 3.2.2. Saksı denemesinin kurulması ve yürütülmesi

Bitki denemesi, hava koşulları da dikkate alınarak Karaman Evsel Atıksu Arıtma Tesisi'nin yakınındaki boş bir alanda açık havada kurulmuş ve yürütülmüştür (Şekil 3.2). Bitkilerin ekimleri tesadüf parselleri, 2 faktörlü faktöriyel deneme planına göre düzenlenmiştir. Yetiştirme ortamları ana faktör, seçilen bitkiler alt faktör olarak ele alınmıştır. Ana faktör olarak dört uygulama; Kontrol (K), Saf elementel kükürt (S), Tarımsal jips ( $\text{CaSO}_4+2\text{H}_2\text{O}$ ) ve EDTA uygulaması şeklindedir. Alt faktöriyel olarak da her arıtma çamuru uygulaması için, ekilmesine karar verilen 6 adet bitki uygulaması gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.1). Deneme planı Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Deneme planı

Yetiştirme Ortamı	Uyg.	Bitki					
		<i>Conyza canadensis</i>	<i>Conium maculatum</i>	<i>Datura stramonium</i>	<i>Pelargonium hortorum</i>	<i>Brassica juncea</i>	<i>Brassica oleraceae</i> var. <i>oleraceae</i>
		Saksı no					
	P1	1-2-3-4	17-18-19-20	33-34-35-36	49-50-51-52	65-66-67-68	81-82-83-84
Aritma	P2	5-6-7-8	21-22-23-24	37-38-39-40	53-54-55-56	69-70-71-72	85-86-87-88
Çamuru	P3	9-10-11-12	25-26-27-28	41-42-43-44	57-58-59-60	73-74-75-76	89-90-91-92
	P4	13-14-15-16	29-30-31-32	45-46-47-48	61-62-63-64	77-78-79-80	93-94-95-96

P1; Kontrol

P2; Saf elementel kükürt

P3; Tarımsal jips

P4; EDTA kimyasalı

$N = \text{yetiştirme ortamı} * \text{bitki çeşidi} * \text{uygulama} * \text{tekerrür}$

$N = 1 * 6 * 4 * 4$

$N = 96$

Çalışma konusu, araştırma deseninde bir yetiştirme ortamı, altı bitki çeşidi, kontrol dâhil dört uygulama ve dört tekerrürlü olmak üzere toplam ( $N = 1 * 6 * 4 * 4 = 96$ ) 96 bitki üzerinde denenmiştir.



Şekil 3.2. Saksı denemesi

### 3.2.3. Yetiştirme ortamlarının hazırlanması

Her yetiştirme ortamında, bitkiler 4 tekerrürlü olarak denenmiştir. Denemeler 4,5 litre kapasiteli koyu renkli silindirik plastik saksılarda, 4,5 kg (yaş ağırlık) arıtma çamuru tartılarak yapılmıştır.

#### 3.2.3.1. Kükürt uygulaması

Ortam pH'ının düşürülmesi, fitoekstraksiyonun arttırılmasında etkili bir stratejidir. Ortam pH'sının düşürülmesinde, ucuz, çevreye uyumlu, bulunabilir ve en etkili madde olarak doğal elementel kükürt kullanılmıştır [36].

Yapılan literatür incelemelerinin sonucunda, bu çalışmada uygulanacak hedef pH değeri 5,5 olarak belirlenmiştir. Kükürt uygulamasında pH'ı 5,5'e çekmek için gerekli saf elementel kükürt miktarı laboratuvar ortamında kükürt inkübasyon deneyi (Şekil 3.3) ile saptanmış (100 g yaş ağırlık arıtma çamuruna 1 g S) ve buna uygun olarak 4,5 kg (yaş ağırlık) çamur dozunda 45 g S ilavesi yapılmıştır. Yapılan inkübasyon deneyinde hedeflenen pH değerine yaklaşık olarak 2 aylık bir sürede (65 gün) ulaşılmıştır. Yerel

aktarlardan temin edilen elementsel kükürt tohum ekimi veya dikiminden hemen önce çamura toz halinde homojen olarak karıştırılmıştır.



Şekil 3.3. Laboratuvar kükürt inkübasyon deneyi

### 3.2.3.2. Tarımsal jips uygulaması

Elementsel kükürde ilave olarak bulunabilir bir doğal element olan tarımsal jips kullanımı ile başlangıçta 8,0–8,5 gibi yüksek olan pH değerlerinin 7,5–7,8'e kadar düşebildiği ve iz elementlerin hareketliliklerinin arttığı literatürde belirtilmektedir [40].

Çalışmada kullanılan tarımsal jips yerel zirai marketlerden temin edilmiştir. Deneme bitkilerine uygulamasında ise, hektara 1 ton hesabıyla, 4,5 kg (yaş ağırlık) çamur dozunda 1,8 g jips uygulanmıştır [89]. Bitkilere tarımsal jips ilavesi kükürt uygulaması ile aynı zamanda yapılmış, arıtma çamuruna toz halinde homojen olarak karıştırılmıştır.

### 3.2.3.3. EDTA uygulaması

Ağır metal fitoekstraksiyon veriminin yüksekliği pek çok çalışmada EDTA ile korelasyonlu bulunmuştur. Fakat bu şelatlayıcı maddenin etkinliği metal türüne, ortamdaki metal içeriğine, ortamın karakteristiğine, bitki türüne ve uygulanan EDTA miktarına göre değişiklik gösterir. Literatürde çoğu saksı denemelerinde uygulanan EDTA miktarının 2,5 ile 10 mmol kg<sup>-1</sup> arasında değiştiği belirtilmektedir [18].

EDTA, Cd, Cu, Ni, Pb ve Zn'nin fitoekstraksiyonunu arttırmada özellikle etkili bir maddedir [10]. Deneme bitkilerine 5 mmol kg<sup>-1</sup> EDTA (Titriplex III, Merck) baz alınarak 4,5 kg (yaş ağırlık) çamur miktarında 8,37 g EDTA uygulanmıştır. Bitkiye oluşturabileceği toksik etkiler nedeniyle EDTA ilavesi, bitkiler belli bir büyüklüğe ulaştıklarında ve hasada 2 hafta kala yapılmıştır. Uygulanan EDTA kimyasalı çamurun her yerine nüfuz etmesi ve etkisinin fazla olması amacıyla sulu çözelti halinde çamura ilave edilmiştir.

### 3.2.3.4. Kontrol uygulaması

Kontrol uygulamasında, arıtma çamuruna her hangi bir katkı maddesi uygulanmamış olup, arıtma çamuru doldurulan saksılara sadece bitkilerin ekimi gerçekleştirilmiştir.

### 3.2.4. Bitkilerin ekimi

*Conyza canadensis*, *Conium maculatum*, *Datura stramonium* deneme bitkilerinin tohumları, arıtma çamurlarının yığıldığı alanda yetişen mevcut bitkilerden temin edilmiştir. *Brassica juncea* bitkisinin tohumları ise hem arıtma çamurlarının yığıldığı bölgeden hem de yerel tohum marketlerinden temin edilmiştir. Ağustos ayının ilk haftasında *Conyza canadensis* (Şekil 3.4, Şekil 3.5), *Conium maculatum* (Şekil 3.7, Şekil 3.8), *Datura stramonium* (Şekil 3.10, Şekil 3.11) ve *Brassica juncea* (Şekil 3.13, Şekil 3.14) bitkilerinin tohumları ham arıtma çamuru doldurulmuş her saksıya 6 adet ekilmiş, çimlenmeden sonra 3'er bitkiye seyreltilmiştir.

*Pelargonium hortorum* bitkisi tek bir bitkiden çelikleme yöntemi ile çoğaltılarak Ağustos ayının ilk haftası arıtma çamuru doldurulmuş saksılara ekilmiştir (Şekil 3.16, Şekil 3.17).

*Brassica oleraceae var. oleraceae* bitkisi için, şubat ayı içerisinde yaklaşık 3 haftalık bir periyotta tarla ortamında yerel tohum marketlerinden temin edilen tohumlar ekilmiş, fideler yetiştirildikten sonra Mart ayının ilk haftası fideler arıtma çamuru konulmuş yetiştirme ortamlarına 1'er fide şeklinde dikilmiştir (Şekil 3.18).



Şekil 3.4. *Conyza canadensis* deneme planı



Şekil 3.5. *Conyza canadensis* bitkisi



Şekil 3.6. Hasattan önce *Conyza canadensis* deneme planı



Şekil 3.7. *Conium maculatum* deneme planı



Şekil 3.8. *Conium maculatum* bitkisi



Şekil 3.9. Hasattan önce *Conium maculatum* deneme planı



Şekil 3.10. *Datura stramonium* deneme planı





Şekil 3.11. *Datura stramonium* bitkisi



Şekil 3.12. Hasattan önce *Datura stramonium* deneme planı



Şekil 3.13. *Brassica juncea* deneme planı



Şekil 3.14. *Brassica juncea* bitkisi



Şekil 3.15. Hasattan önce *Brassica juncea* deneme planı



Şekil 3.16. *Pelargonium hortorum* deneme planı



Şekil 3.17. *Pelargonium hortorum* bitkisi



Şekil 3.18. *Brassica oleraceae* var. *oleraceae* deneme planı

### 3.2.5. Bitkilerin bakımı

Çalışmada yetiştirilen bitkilerin bakımları düzenli olarak yapılmış, herhangi bir böceklenme problemi yaşanmamıştır. Sulama yoluyla meydana gelebilecek ağır metal kayıpları saksıların altına toplama kabı koyularak engellenmiştir. Sulama gerekli olduğunda bitkiler çeşme suyu ile sulanmış ve kontrollü sulama ile saksılardan fazla su çıkışına izin verilmeyecek şekilde bir sulama programı uygulanmıştır. Hava sıcaklıkları dikkate alınarak gün aşırı, yeterli miktarda sulama yapılmıştır. Saksılara herhangi bir ticari gübre ilave edilmemiştir.

### 3.2.6. Bitkilerin hasadı ve örnekleme

Bir büyüme periyodunun sonunda deneme bitkileri kökleri ile birlikte hasat edilmişlerdir. Hasattan önceki bitki deneme planları *Conyza canadensis* bitkisi için Şekil 3.6'da, *Conium maculatum* bitkisi için Şekil 3.9'da, *Datura stramonium* bitkisi için Şekil 3.12'de ve *Brassica juncea* bitkisi için Şekil 3.15'de verilmiştir. *Pelargonium hortorum* ve *Brassica oleraceae var. oleraceae* bitkileri için hasattan önceki deneme planları sırasıyla Şekil 3.16 ve Şekil 3.18'de verilmiştir.

Bitki örnekleri bütün olarak plastik torbalara konularak ve etiketlenerek laboratuara getirilmişlerdir. Laboratuara getirilen bitkilerde ilk olarak gövde ve kök uzunlukları ölçülmüştür. Sonrasında kök ve gövde örnekleme amacıyla tüm bitki numuneleri kök ve toprak üstü aksamalarına bir makas yardımıyla ayrılmışlardır. Daha sonra bitkiler çeşme suyunun altında temizlenmiş, saf suyla iki kere durulanmışlardır. Çamur parçalarından arındırılan bitki kök ve gövdeleri kâğıt havlu ile kurularak gövde ve kök yaş ağırlıkları ölçülmüştür.

### 3.2.7. Bitki numunelerinin ağır metal analizleri için hazırlanması

Bitki numuneleri, kâğıt zarflara yerleştirilerek ve etiketlenerek sabit tartıma gelene kadar (1 gece boyunca = 16 saat) etüvde 80 °C'de kurutulmuşlar ardından gövde ve kök kuru ağırlıkları ölçülmüştür. Kuruyan bitki numuneleri değirmende öğütülerek ve kuru

numuneler 2 mm gözenekli elekten geçirilerek kapaklı polietilen kaplara konulmuş ve ağır metal analizleri için hazır hale getirilmişlerdir [78, 90].

### **3.3. Bitkilerde İncelenen Parametreler ve Kullanılan Yöntemler**

#### **3.3.1. Biyokütle verimleri**

Biyokütle verimi, bitkilerin hasat edildikten sonra yaş ve kuru (1 gece boyunca = 16 saat, etüvde 80 °C'de kurutulduktan sonraki) ağırlıklarının ölçülmesiyle belirlenmiştir [78].

#### **3.3.2. Görsel gözlemler**

Düzenli olarak yapılan görsel gözlemlerde, yetiştirilen bitkilerde, ağır metallerle bağlantılı olarak oluşabilecek fitotoksik semptomlar ve ağır metallerin bitki kök ve gövde gelişimi üzerindeki etkileri, bitki kalite kriterleri olan bitki boyu, gövde çapı, çiçek sayıları, yaş ve kuru ağırlık, kök gelişimi ile bitki formuna bakılarak tespit edilmiştir.

#### **3.3.3. Ağır metal analizleri**

Kurutulmuş (80 °C) ve öğütülmüş (<2 mm) 300 mg bitki numuneleri üzerine 2 ml HNO<sub>3</sub> (65%), 3 ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (30%) eklenerek çalkalanmış ve 5-10 dakika beklendikten sonra mikrodalga fırınında (MWS-3, DAP 60S, Berghof Products Inst. Germany) 5 dakika 145 °C, 10 dakika 180 °C ve 10 dakika 100 °C olmak üzere toplam 30 dakika yakılmıştır. Numuneler soğutulduktan sonra ultra saf su ile 20 ml'ye tamamlanmıştır [78].

Ayrıca stok numune çözeltileri hazırlanarak ve uygun seyreltmeler yapılarak analiz çözeltileri hazırlanmıştır. Stok çözeltiler, ekstraksiyon çözeltisi ile numunedeki element konsantrasyonunu içine alacak şekilde seyreltilerek en az 5 kalibrasyon çözeltisi hazırlanmıştır. Tanık deney numunesi ise, deney numunesi alınmadan, numune yerine

saf su kullanılarak ve deney numunesine uygulanan bütün işlemler aynen uygulanarak hazırlanmıştır.

Kalibrasyon çözeltileri, deney çözeltileri ve tanık deney numunelerindeki Pb, Zn, Cu, Cr, Ni, ve Cd ağır metallerinin absorpsanları ICP (Perkin Emler, Optima 2100 DV) plazma yayım spektroskopisinde ölçülmüş ve sonuçlar ppm biriminde kuru ağırlık ( $\text{mg kg}^{-1}$  kuru ağır.) olarak ifade edilmiştir [78].

#### **3.3.4. Biyolojik biriktirme faktörü**

Her bitkiye ait biyolojik biriktirme faktörü, her metal için bitki gövde ve kök metal konsantrasyonlarının ( $\text{mg kg}^{-1}$  kuru madde), çamur metal konsantrasyonuna ( $\text{mg kg}^{-1}$  kuru madde) oranlanması ile bulunmuş olup literatürde verilmiş mevcut değerlerle karşılaştırılmıştır [14].

#### **3.3.5. Yer değiştirme faktörü**

Her bitkiye ait yer değiştirme faktörü, her metal için bitkinin gövde metal konsantrasyonunun ( $\text{mg kg}^{-1}$  kuru madde), kök metal konsantrasyonuna ( $\text{mg kg}^{-1}$  kuru madde) oranlanması ile belirlenmiştir, literatürde verilmiş mevcut değerlerle karşılaştırılmıştır [74, 75].

#### **3.3.6. Sonuçların değerlendirilmesinde kullanılan istatistiksel yöntemler**

Çalışmada elde edilen bulguların istatistik analizi Statgraphics© Centurion XV programı kullanılarak yapılmıştır. Bulgulara varyans, regresyon ve korelasyon analizi uygulanmış ve ortalamalar arasındaki farklılıklar LSD testi ile bulunmuştur.

## BÖLÜM 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Arıtma Çamuru Karakterizasyonu

Çalışmada kullanılan arıtma çamurunun fizikokimyasal ve kimyasal karakterizasyonu Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Çalışmada kullanılan arıtma çamurunun fizikokimyasal ve kimyasal karakterizasyonu

pH (H <sub>2</sub> O)	6,7
EC (µS cm <sup>-1</sup> )	1997,55
Organik madde (%)	54
Toplam azot (%)	4,10
P (Fosfor, %)	3,15
K (Potasyum, %)	0,12
Kasyon değişim kapasitesi (cmol (+) kg <sup>-1</sup> )	8,53
Organik karbon (%)	31,21
C/N oranı	7,61

Çalışmada kullanılan arıtma çamurunun pH değeri 6,7 olarak tespit edilmiştir (Tablo 4.1). Ön çökeltim havuzlarından çıkan ham arıtma çamurlarının pH değeri 5,0–8,0 arasında değişmekle birlikte çürütülmüş yada stabilize arıtma çamurlarındaki pH seviyesi ise 6,5–7,5 arasında değişmektedir [91]. Bulunan pH değeri literatür değerleri ile paralellik göstermektedir.

Denemenin sonunda, bitkiler hasat edildikten sonra ölçülen pH değerleri, başlangıç pH değerlerine kıyasla beklenildiği gibi kükürt ve tarımsal jips uygulamalarında farklılık göstermiştir. Kükürt uygulanan çamur pH’sı başlangıç değeri olan 6,7’den 3,9’a kadar gerilemiş, en düşük pH değeri *Datura stramonium* bitkisinde tespit edilmiştir. Elde edilen pH değerleri literatürde daha önceden kükürt ile ilgili çalışmalarda elde edilen verilerle uyumlu çıkmıştır [23, 38]. Tarımsal jips uygulamasının ardından ise pH değeri 7,8’lere yükselmiş, bu durum jipsin bileşiminde bulunan kalsiyumun, bikarbonat (HCO<sub>3</sub>) anyonları ile birleşerek CaCO<sub>3</sub> şeklinde çökmesine bağlanmıştır. Kontrol ve



EDTA uygulamaları çamur pH'sını etkilememiş, pH değeri ölçülen çamurlarda 6,5-7,0 aralığında saptanmıştır.

Çalışmada kullanılan arıtma çamurunun EC değeri  $1997,55 \mu\text{S cm}^{-1}$  ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de) olarak tespit edilmiştir (Tablo 4.1). Ölçülen değer, arıtma çamurları için literatürde belirtilen değere göre düşük olmakla birlikte bitki yetiştirme ortamları için tavsiye edilen EC değerleri  $750\text{--}3490 \mu\text{S cm}^{-1}$  arasında değişmektedir. Çalışmada kullanılan çamur, bitkiler için yetiştirme ortamı olarak düşünülürse, elde edilen EC değeri uygun görülmektedir.

Bitkilerin hasadının ardından saksılarda kalan arıtma çamurlarında EC ölçümü tekrarlanmıştır. Tüm uygulamalarda EC değeri yükselmiş, en önemli etki kükürt uygulamasında saptanmış, en yüksek EC değeri  $5962 \mu\text{S cm}^{-1}$  ile bu uygulamada tespit edilmiştir. Diğer uygulamalar arasında önemli bir fark gözlenmemiş, ortalama EC değeri  $3169\text{--}3727 \mu\text{S cm}^{-1}$  arasında değişmiştir. Düşük pH'nın katyon çözünürlüğüne pozitif etkisi çözeltideki katyon konsantrasyonunu artırmış ve bu nedenle EC değerleri kükürt uygulamalarında yükselmiştir. Çamur tuzluluğunun metal alınabilirliğine etkisi önemli olmakla birlikte üzerinde fazla çalışılmamış bir konudur. Açık havada kurutulan çamur çok yüksek elektriksel iletkenliğe sahiptir ( $>12 \text{ dS m}^{-1}$  ( $=12 \text{ mS cm}^{-1}=12000 \mu\text{S cm}^{-1}$ )). Olgunlaşma dönemi ise tuz muhtevasını azaltmakta ve yüksek tuz seviyeleri sabit kalmaktadır [28]. Çalışmadaki denemenin açık havada gerçekleşmesi kullanılan arıtma çamurunun EC değerinin yükselmesine neden olmuştur.

Arıtma çamurları genel olarak %50–60 kadar organik madde içermektedir. Organik maddenin yaklaşık %40–50 kadarı oldukça hızlı ayrışmakla birlikte kalan kısım çok yavaş ayrışmaktadır. Bu yüzden arıtma çamurları sürekli ayrışan ve mineralize olan bir yapıya sahiptir ve organik madde ayrıştıkça bağlı iz elementler çözünebilir forma dönüşmekte ve bitki alımı için uygun hale gelmektedir [3]. Walkley-Black metoduna göre arıtma çamurunun organik maddesi % 53,80 olarak bulunmuştur. Fırın kuru ağırlık ilkesine göre yapılan ölçümde ise organik madde muhtevası % 54 olarak bulunmuştur (Tablo 4.1). Değerler birbirine yakın, bitki büyümesi için uygun ve yeterli bulunmuştur.

Deneme sonunda yapılan organik madde analizlerinde ise bütün uygulamalarda çamur organik maddesinde önemli bir değişiklik olmamış, organik madde ortalama %52 tespit edilmiştir. Bu düşük azalış, bitkilerin hasadı esnasında bitki köklerinin bir kısmının çamurda kalması ve dolayısıyla organik maddeyi yükseltmesine bağlanmıştır.

Genel olarak, arıtma çamurlarının toplam azot içeriği (%), <0,1–17,6 arasında değişmektedir [92]. Çürütülmüş arıtma çamurları ise kuru ağırlık olarak %1–6 azot içermektedir. Tipik olarak ise %3,3'dür. Tarımsal amaçlı kullanılan ticari gübrelerin azot oranı ise %11–82 arasındadır. Ticari gübrelerle karşılaştırıldığında arıtma çamurlarında azot muhtevası düşüktür fakat arıtma çamurunun azot kaynağı olarak kullanılmasının avantajı, çürütülmüş arıtma çamurundaki azotun, organik ve bitkilerin alabileceği inorganik formlarda bulunması ve tarımsal amaçlı kullanımlarında yavaş salınımlı gübre görevi görmesidir. Çalışmada kullanılan arıtma çamurunun toplam N (toplam kjeldahl azotu = amonyak azotu + organik azot) miktarı % 4,10 olarak tespit edilmiştir (Tablo 4.1). Ticari gübrelerle karşılaştırıldığında düşük bir değerdir fakat bu değer bitkilerin büyümesi için yeterli bir seviyedir. Özellikle kolay ayrışabilir organik maddenin mikrobiyal parçalanmasının devam etmesi sebebiyle çamurdaki mevcut azotun bitkiler tarafından alınabilir formlara dönüşmesi sürmektedir.

Bitkilerin hasadının ardından kalan çamurlarda saptanan toplam azot değeri ise %2,316'dır. Arıtma çamurunun azot muhtevası %43 oranında azalmıştır. Elde edilen değer ham çamurdaki organik azotun toprağa serilmesinin ardından 1 yıllık süredeki mineralizasyon oranı olan %40 ile uyumlu bulunmuştur.

Arıtma çamurları tipik olarak %0,1–14,3 arasında fosfor içermektedir. Ortalama fosfor içeriği ise % 2,5'dur [92]. Bu değer tarımsal amaçlı kullanılan ticari gübreler için %10–44 arasında değişmektedir. Arıtma çamurundaki fosfor da azot gibi organik ve inorganik formlarda bulunmaktadır. Yalnız fosforun inorganik formu yıkanmamakta ve toprakta birirmektedir. Çalışmada kullanılan arıtma çamurunun P içeriği %3,15 olarak bulunmuştur (Tablo 4.1). Elde edilen değer literatürde arıtma çamurları için belirtilen ortalama değerden (%2,5) yüksektir. Arıtma çamurları ile ilgili daha önceden yapılmış

çalışmalara baktığımızda ise çamurun P içeriğinin yaklaşık olarak % 2,04–2,45 arasında olduğu görülmüştür [1, 6, 93, 94].

Arıtma çamurlarının potasyum içeriği (%), 0,02–2,64 arasında değişmektedir. Ortalama potasyum içeriği (%) ise 0,40'dır [92]. Tarımsal amaçlı kullanılan ticari gübrelerin potasyum içeriği ise %10–36 arasında değişmektedir. Arıtma çamurlarında genel olarak potasyum seviyesi N ve P'ye göre genellikle daha düşüktür, bunun nedeni potasyumun suda çözünürlüğünün fazla olması ve susuzlaştırma yâda diğer arıtım basamaklarında sulu faza geçerek çıkış suyundan bertaraf edilmesidir. Bu çalışmada kullanılan arıtma çamurunun K içeriği % 0,12 olarak bulunmuştur (Tablo 4.1). Tespit edilen değer literatürde belirtilen ortalama değerden (% 0,40) biraz düşüktür.

Literatürde arıtma çamurlarının katyon değişim kapasitesinin 1,3–89,6 cmol(+) kg<sup>-1</sup> arasında değiştiği belirtilmektedir [45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55]. Çalışmada kullanılan arıtma çamurunun katyon değişim kapasitesi de (KDK) 8,53 cmol (+) kg<sup>-1</sup> olarak tespit edilmiştir (Tablo 4.1). Bulunan değer biraz düşüktür fakat bunun nedeni çalışmada sadece susuzlaştırma ünitesinden çıkan ham çamurun kullanılması, arıtma çamurunun herhangi bir stabilizasyon işlemine tabi tutulmaması, dolayısıyla çamurun organik maddesinin parçalanmaması ve humus oranının düşük olması şeklinde açıklanabilir. Torri ve Lavado'da (2007), Buenos Aires şehrine ait atıksu arıtma tesisinden temin ettikleri evsel nitelikli ve herhangi bir stabilizasyon işlemi uygulanmamış, çürütülmemiş çamur kullanmışlar ve yakın sonuçlara ulaşmışlardır, 11,95 cmol (+) kg<sup>-1</sup> [45].

Organik karbon muhtevası kuru ağırlıkta % 31,21 olarak bulunmuştur (Tablo 4.1). Literatürde arıtma çamurlarının organik karbon muhtevasının % 6 ile 21 arasında değiştiği belirtilmektedir [5, 95, 96, 97]. Çalışmamızda kullanılan arıtma çamurunun organik karbon değeri, literatürden tespit edilen değerlere nazaran yüksek çıkmıştır, fakat bu durum çamurun organik madde muhtevasının da yüksek olması (% 54) ile ilişkilidir. Örneğin, Gupta ve Sinha (2007) çalışmalarında, deri endüstrisine ait arıtma çamurunun organik karbon değerini % 6,17 olarak tespit etmişlerdir, fakat bu çalışmada çamurun organik maddesi de düşüktür, % 10,63 [5]. Kidd ve ark. (2007), yaptıkları

çalışmada, arıtma çamurunun organik karbon değerini % 19,2 olarak tespit ederken [96], Toribio ve ark. (2006), ise çalışmalarında kullandıkları evsel nitelikli arıtma çamurunun organik karbon değerini % 20,3 olarak bulmuşlardır [95].

Ham çamurun C/N oranı, organik karbon/azot oranlamasıyla tespit edilmiş olup,  $31,21 / 4,10 = 7,61$  olarak bulunmuştur (Tablo 4.1). Elde edilen değer Toribio ve ark. (2006) ile Senesi ve ark. (2007)'nin buldukları C/N oranından (sırasıyla 16 ve 16,2) düşük olarak saptanmıştır [95, 98].

Tablo 4.2'de çalışmada kullanılan arıtma çamurunun ağır metal muhtevası ve sonuçların Türkiye, ABD ve Avrupa Birliği Yönetmelikleri'nde belirtilen toprakta kullanılabilir stabilize arıtma çamurunda müsaade edilen maksimum ağır metal seviyeleri ( $\text{mg kg}^{-1}$  fırın kuru materyal) ile karşılaştırılması yer almaktadır.

Tablo 4.2. Arıtma çamurunun ağır metal muhtevası ve sonuçların Türkiye, ABD ve Avrupa Yönetmelikleri'nde belirtilen toprakta kullanılabilir stabilize arıtma çamurunda müsaade edilen maksimum ağır metal seviyeleri ( $\text{mg kg}^{-1}$  fırın kuru materyal) ile karşılaştırılması

Parametreler ( $\text{mg kg}^{-1}$ kuru ağır.)	Arıtma Çamuru	TKKY*	AB**	AB 2025 hedef**	US EPA***
Zn	1435	4000	2500-4000	1500	2800
Cu	18,6	1750	1000-1750	600	1500
Cr	242,8	1200	-	600	1200
Pb	34,0	1200	750-1200	200	300
Ni	79,2	400	300-400	100	420
Cd	3,4	40	20-40	5	39
Hg					
As					
Se					
Fe	15234				

\* Toprak Kirliliği ve Kontrolü Yönetmeliği EK I-B

\*\* AB Talimatları 86/278/EEC, 2005.

\*\*\* EPSTEIN, E., Land application of sewage sludge and biosolids, Lewis Publishers, 2002.

Sonuçlara baktığımızda çalışmada kullandığımız arıtma çamurunun ağır metal muhtevasının TKKY, AB ve USEPA Yönetmeliklerinde belirtilen sınır değerleri sağladığı görülmektedir (Tablo 4.2). Ağır metal limit değerlerini geçmeyen çamurların tarım topraklarında kullanılmasına izin verilmekle birlikte, tekrarlanan uygulamalar toprağın metal oranını yükseltmekte ve metallerin kararlı yapıda olması zamanla ağır metallerin ortamda birikmesine neden olmaktadır. Sonuç olarak toprak kalitesi

bozulmaktadır. Bu nedenle metal seviyesinin daha da düşürülmesine gerek duyulmaktadır.

#### 4.2. Fekal Koliform Miktarı

Bant filtreden çıkan ham arıtma çamurunda başlangıç fekal koliform sayısı  $4,2 \times 10^7$  olarak saptanmış olup, bir büyüme periyodu sonunda bitkilerin hasat edilmesi ile kalan arıtma çamurlarında tespit edilen fekal koliform sayıları Tablo 4.3’de verilmiştir. Arıtma çamurlarında patojen sayıları yönünden sınıflandırma ve standartlar USEPA yönetmeliklerinde verilmiştir. Bu yönetmelikte fekal koliform sayısı 1 gr kuru maddede  $10^3$  adetten az olan çamur A sınıfı kabul edilmekte ve bu çamurun tarım toprakları dâhil sebze ve meyve bahçelerinde uygulanmasında bir sakınca görülmektedir. Aynı yönetmelikte fekal koliform sayısı 1 gr kuru maddede  $2 \times 10^6$ ’nın altında olan çamur ise B sınıfı olarak kabul edilmekte ve bu çamurların mera alanlarında ve tarım arazilerinde kontrollü kullanımlarına izin verilmektedir [99]. Literatürde ham arıtma çamurunun fekal koliform miktarının ise  $10^7$ - $10^8$  EMS  $g^{-1}$  arasında değiştiği belirtilmektedir [100]. Çalışmadan elde ettiğimiz sonuçlar literatürde belirtilen değerlerle uyumlu görülmektedir.

Tablo 4.3. Arıtma çamurundaki fekal koliform miktarları

Bitki	Uygulamalar*	Fekal koliform (EMS $g^{-1}$ )
<i>Conyza canadensis</i>	Başlangıç	$4,2 \times 10^7$
	P1	$1,7 \times 10^5$
	P2	$6 \times 10^2$
	P3	$1,4 \times 10^5$
	P4	$5,5 \times 10^4$
<i>Pelargonium hortorum</i>	P1	$1,7 \times 10^5$
	P2	$1,6 \times 10^1$
	P3	$2,2 \times 10^5$
	P4	$1 \times 10^5$
<i>Datura stramonium</i>	P1	$2,3 \times 10^5$
	P2	$1,2 \times 10^2$
	P3	$1,9 \times 10^5$
	P4	$1 \times 10^5$

\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

Fekal koliform sayısı azalımında bitki çeşidinden çok arıtma çamuruna ilave edilen katkı maddeleri etkili olmuştur. Bitki ekiminden önce ham çamurda tespit edilen fekal koliform sayısı, USEPA (1993) standartlarının üzerinde tespit edilmiş ve çamur A veya B sınıfına girememiştir. Denemenin sonunda bitkilerin hasadı ile fekal koliform miktarında önemli azalmalar görülmüştür. Kontrol, jips ve EDTA uygulamalarında birbirinden farksız olarak fekal koliform sayısı  $10^2$  oranında azalmış ve B sınıfı standartları sağlanmıştır. Kükürt uygulamasında ise  $10^5$  oranında azalış tespit edilmiş, fekal koliform yönünden çamur A sınıfı standartlarını sağlamıştır. Kükürt ilavesinde en belirgin azalma *Pelargonium hortorum* bitkisinde tespit edilmiş, hem kükürdün pH düşürücü etkisi hem de bitkinin kök bölgesini asitlendirme yeteneği, patojen gideriminde daha etkin olmuştur. Bu bitkinin ardından en önemli azalma kükürt uygulamasını takiben en düşük pH'nın tespit edildiği *Datura stramonium*'da tespit edilmiştir.

Açık havada gerçekleştirilen denemede bir büyüme periyodu sonunda ham arıtma çamurunun stabilize olması sağlanmış, çamur tarımsal bertarafta risk oluşturmayacak sınıfa girmiştir. Kükürt ilavesine ek olarak kullanılan bitkilerin özellikleri sayesinde de ham çamurun A sınıfı kategorisine girmesi sağlanmıştır (Tablo 4.3). Benzer sonuçlar Crush ve ark. (2006), Malack ve ark. (2007), Estrada ve ark. (2004) tarafından yapılan çalışmalarda da saptanmış, elde edilen sonuçlar Estrada ve ark. (2006) ve Pourcher ve ark. (2007)'nin bulduğu değerlerden yüksek olmuştur [100, 101, 102, 103, 104].

### 4.3. Bitkisel Materyal

#### 4.3.1. Biyokütle verimi

Arıtma çamurunda yetiştirilen *Conyza canadensis* bitkisine kükürt ilavesinin bitki gelişimine etkisi Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Kükürt ilavesinin *Conyza canadensis* bitkisinin gövde ve kök gelişimine etkisi

Arıtma çamurunda yetiştirilen *Conyza canadensis* bitkisine tarımsal jips ilavesinin bitki gelişimine etkisi Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Tarımsal Jips ilavesinin *Conyza canadensis* bitkisinin gövde ve kök gelişimine etkisi

Arıtma çamurunda yetiştirilen *Conyza canadensis* bitkisine EDTA ilavesinin bitki gelişimine etkisi Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3. EDTA ilavesinin *Conyza canadensis* bitkisinin gövde ve kök gelişimine etkisi

Arıtma çamurunda yetiştirilen *Conyza canadensis* bitkisine kontrol uygulamasının bitki gelişimine etkisi Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.4. Kontrol uygulamasının *Conyza canadensis* bitkisinin gövde ve kök gelişimine etkisi

Arıtma çamurunda yetiştirilen *Pelargonium hortorum* bitkisine kükürt ilavesinin bitki gelişimine etkisi Şekil 4.5’de verilmiştir.





Şekil 4.5. Kükürt ilavesinin *Pelargonium hortorum* bitkisinin gövde ve kök gelişimine etkisi

Arıtma çamurunda yetiştirilen *Pelargonium hortorum* bitkisine tarımsal jips ilavesinin bitki gelişimine etkisi Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Tarımsal jips ilavesinin *Pelargonium hortorum* bitkisinin gövde ve kök gelişimine etkisi

Arıtma çamurunda yetiştirilen *Pelargonium hortorum* bitkisine EDTA ilavesinin bitki gelişimine etkisi Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. EDTA ilavesinin *Pelargonium hortorum* bitkisinin gövde ve kök gelişimine etkisi

Arıtma çamurunda yetiştirilen *Pelargonium hortorum* bitkisine kontrol uygulamasının bitki gelişimine etkisi Şekil 4.8’de verilmiştir.



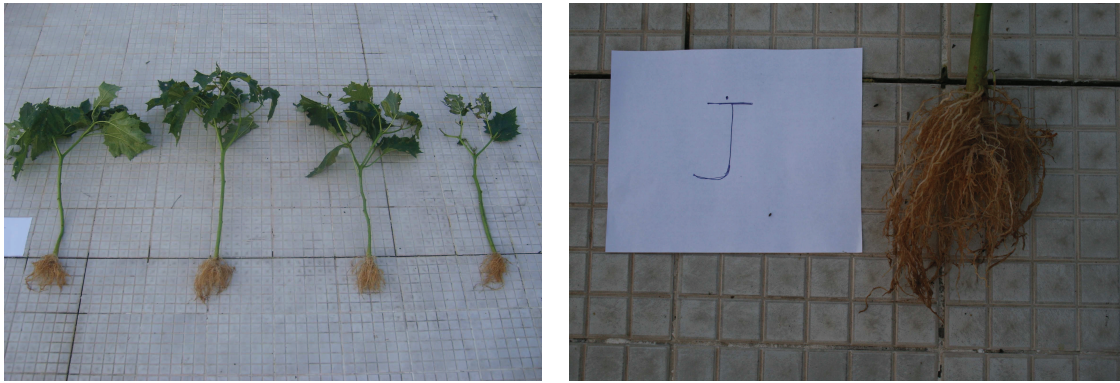
Şekil 4.8. Kontrol uygulamasının *Pelargonium hortorum* bitkisinin gövde ve kök gelişimine etkisi

Arıtma çamurunda yetiştirilen *Datura stramonium* bitkisine kükürt ilavesinin bitki gelişimine etkisi Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9. Kükürt ilavesinin *Datura stramonium* bitkisinin gövde ve kök gelişimine etkisi

Arıtma çamurunda yetiştirilen *Datura stramonium* bitkisine tarımsal jips ilavesinin bitki gelişimine etkisi Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. Tarımsal jips ilavesinin *Datura stramonium* bitkisinin gövde ve kök gelişimine etkisi

Arıtma çamurunda yetiştirilen *Datura stramonium* bitkisine EDTA ilavesinin bitki gelişimine etkisi Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11. EDTA ilavesinin *Datura stramonium* bitkisinin gövde ve kök gelişimine etkisi

Arıtma çamurunda yetiştirilen *Datura stramonium* bitkisine kontrol uygulamasının bitki gelişimine etkisi Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12. Kontrol uygulamasının *Datura stramonium* bitkisinin gövde ve kök gelişimine etkisi

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin kök ve gövde biyokütle verimlerine ait varyans analiz sonuçları Tablo 4.4’de verilmiştir.

Tablo 4.4. Kök ve gövde biyokütle verimlerine ait değerlerin varyans analizi sonuçları

Varyasyon Kaynağı	KARELER ORTALAMASI		
	S.D.	Kök	Gövde
Bitki (A)	5	934,08***	996,33***
Uygulama (B)	3	18,28***	55,77***
A*B	15	49,35***	42,71***
Hata	72	7,59	13,68

Kök ve gövde biyokütlesi ağırlığına bitki, kullanılan farklı katkı maddeleri ve interaksiyon etkisi istatistiki olarak önemli bulunmuştur ( $p<0.001$ ) (Tablo 4.4). Bitkilerden en yüksek kök biyokütlesi *Conium maculatum* bitkisinde tespit edilmiş, bunu *Brassica oleraceae* bitkisi takip etmiştir. *Brassica juncea*, *Datura stramonium* ve *Pelargonium hortorum* benzer kök biyokütlesi üretirken *Conyza canadensis* en düşük kök biyokütlesine sahip olan bitki olmuştur (Tablo 4.5). Arıtma çamuruna ilave edilen farklı katkı maddelerinin kök biyokütle ağırlığına etkisinde, en yüksek ağırlık EDTA uygulamasında tespit edilmiş, jips uygulaması ile aynı istatistiki grupta yer almıştır. Jips uygulaması kök biyokütlesinin artışında etkili olmuş, biyokütle artışında pH'nın düşmesinden ziyade jipsin demir, çinko ve mangan gibi besin elementlerinin alınabilirliklerini artırması daha önemli bulunmuştur. Kontrol uygulaması bu uygulamaları takip etmiş ve en düşük ağırlık pH'yı düşüren kükürt uygulamasında tespit edilmiş, pH'nın azalması kök biyokütle artışında etkili olmamıştır (Tablo 4.5).

Tablo 4.5. Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök biyokütle verim ortalamaları (g) ve oluşan gruplar

Bitki*	Uygulamalar**				Ort.
	P1	P2	P3	P4	
1	16,86	21,21	17,02	16,44	17,88c
2	33,08	34,43	34,97	29,99	33,12a
3	32,94	22,13	33,85	32,02	30,23b
4	15,3	15,75	15,22	15,17	15,36d
5	14,37	15,0	14,87	24,82	17,26cd
6	18,27	16,35	18,25	18,6	17,86c
Ort.	21,80b	20,81c	22,36a	22,84a	21,95

\*Bitki: 1: *Brassica juncea*; 2: *Conium maculatum*; 3: *Brassica oleraceae* var. *Oleraceae*; 4: *Conyza canadensis*; 5: *Pelargonium hortorum*; 6: *Datura stramonium*

\*\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

Kök biyokütle verimine benzer şekilde bitki türüne de bağlı olarak gövde biyokütle ağırlıkları istatistiki olarak farklı bulunmuştur (Tablo 4.6). *Brassica oleraceae* en yüksek biyokütle verimi oluşturmuş, bunu farklı istatistik gruplarda yer alan sırasıyla *Datura stramonium*, *Conium maculatum*, *Conyza canadensis*, *Pelargonium hortorum* izlemiştir. *Brassica juncea* en düşük gövde biyokütlesi üreten bitki olmuştur. Katkı maddelerinden jips ilave edilmiş arıtma çamurunda yetiştirilen bitkiler en yüksek gövde kuru ağırlığı oluşturmuş bunu istatistiki olarak benzer grup içinde yer alan EDTA ve kükürt uygulamaları takip etmiştir. Kök biyokütlesinde olduğu gibi gövde biyokütlesinin

artışında da pH azalmasından ziyade jips ilavesi ile bitki besin elementlerinin alınabilirliklerinin artması daha önemli bulunmuştur. Herhangi katkı maddesi ilave edilmemiş kontrol uygulamasında en düşük kuru ağırlık tespit edilmiştir (Tablo 4.6).

Tablo 4.6. Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin gövde biyokütle verim ortalamaları (g) ve oluşan gruplar

Bitki*	Uygulamalar**				Ort.
	P1	P2	P3	P4	
1	19,39	21,94	19,73	18,79	19,97e
2	31,25	36,11	38,03	31,01	34,10c
3	43,23	41,57	44,33	41,67	42,70a
4	28,9	31,27	28,55	28,7	29,35d
5	27,07	27,3	31,02	29,72	28,78d
6	35,9	28,67	43,97	41,45	37,5b
Ort.	30,96b	31,14b	34,27a	31,89b	32,06

\*Bitki: 1: *Brassica juncea*; 2: *Conium maculatum*; 3: *Brassica oleraceae* var. *Oleraceae*; 4: *Conyza canadensis*; 5: *Pelargonium hortorum*; 6: *Datura stramonium*

\*\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

Bu çalışmada EDTA uygulamasının kontrole kıyasla bitki biyokütlelerinde önemli bir etkisi olmamıştır. En göze çarpan etki *Conium maculatum* bitkisinin kök biyokütlesinde kontrol uygulamasına kıyasla tespit edilen %10'luk azalmadır (Tablo 4.5). Benzer şekilde pH düşürücü özelliğe sahip kükürt uygulamasında kontrole kıyasla *Brassica oleraceae* bitkisinde biyokütle azalmasına neden olmuş, kök biyokütlesi %33 azalmıştır (Tablo 4.5). Bunun nedeni kükürt ilavesini takiben pH'nın düşmesi ve bitkiler için gerekli iz elementlerin yanında bitki büyümesini olumsuz etkileyecek ağır metallerinde alımlarının artmasıdır. Elde edilen bulgularla literatür verileri karşılaştırıldığında birçok çalışmada *Brassica juncea*'nın EDTA'ya olan duyarlılığına değinilmiş, EDTA uygulamasını takiben bitkinin kök ve gövdesinde azalma tespit edilmiştir [105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112]. Bu çalışmada EDTA'nın *Brassica juncea* biyokütlesine etkisi önemsiz olurken, bu etki Jiang ve ark. (2003)'deki gibi gövde biyokütlesinde daha belirgin olmuştur (Tablo 4.6) [113]. İncelenen çalışmalarda 0,25 mmol kg<sup>-1</sup> gibi düşük EDTA uygulamalarında bile *Brassica juncea* bitkisinin kök gövde kuru ağırlıklarında önemli azalmalar görülmüştür [114]. Bu çalışmada 5 mmol kg<sup>-1</sup> EDTA uygulamasını takiben bitki biyokütlelerinde önemli azalmalar saptanmamış, bunun sebebi olarak deneme bitkilerinin uzun süre EDTA'ya maruz bırakılmayıp sadece ağır metalleri almalarındaki artış sağlanıp kısa sürede hasat edilmeleri neden olmuş olabilir.

Literatürde farklı bitkilerle yapılan çalışmalar incelediğinde de benzer sonuçlar görülmüş, 5 mmol kg<sup>-1</sup> EDTA uygulamasını takiben bitki biyokütelleri olumsuz etkilenmiş, yapraklarda gözle görülür belirtiler gözlenmiş bunu takiben hızlı bir yaşlanma ve gövdede kuruma olmuştur [115, 116]. Bu çalışmada kullanılan bitkilerde EDTA uygulamasını takiben gözle görülür bir toksit etki gözlenmemiş olup bu durum deneme bitkilerinin yerel iklim koşullarına uygun, dayanıklı yabancı bitkilerden seçilmelerine ve ılıman iklim koşullarına bağlanmıştır. Gövde biyokütlesi açısından en belirgin etki, jips uygulamasında görülmüş *Conium maculatum* ve *Datura stramonium* bitkilerinin gövde biyokütellerinde %18’lik artış tespit edilmiştir (Tablo 4.6). Bu etki, literatürde marjinal alanların ıslahında kullanıldığı belirtilen jipsin, bitki büyümesi için gerekli iz elementlerin hareketliliğini artırma özelliğine sahip olmasına bağlanmıştır [40]. En yüksek kök biyokütle artışı ise köklerinden salgıladığı protonlarla rhizosfer pH’ını düşürebildiği ve yapraklarında toksik seviyelerdeki Fe ve Mn konsantrasyonlarını biriktirebildiği literatürde belirtilen *Pelargonium hortorum*’da saptanmış, bitki kök biyokütlesi EDTA uygulamasında %42 oranında artmıştır (Tablo 4.5) [68, 69]. Bu etki bitki büyümesi için temel elementler olan Fe ve Mn iz elementlerinin EDTA ilavesini takiben bitki tarafından alınabilirliklerinin artması ile meydana gelmiştir.

#### 4.3.2. Ağır metal konsantrasyonu

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin kök ağır metal konsantrasyonlarına ait varyans analiz sonuçları Tablo 4.7’de verilmiştir. Kök dokusunda incelenen ağır metallerin tamamı bitki çeşidi, kullanılan katkı maddesinden ve interaksiyon etkisinden istatistiki olarak önemli derecede etkilenmiştir ( $p<0.001$ ) (Tablo 4.7).

Tablo 4.7. Kök ağır metal konsantrasyonlarına ait değerlerin varyans analizi sonuçları

Varyasyon Kaynağı	KARELER ORTALAMASI						
	S.D.	Cu	Zn	Ni	Cd	Cr	Pb
Bitki (A)	5	16404,4***	216649,00***	2677,41***	9,89***	15578,3***	4075,21***
Uygulama (B)	3	11534,9***	121086,00***	1707,35***	0,53***	16685,7***	1410,84***
A*B	15	2277,54***	31776,5***	523,17***	0,81***	3524,29***	1603,66***
Hata	72	17,84	644,30	9,83	0,05	35,94	6,01

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin gövde ağır metal konsantrasyonlarına ait varyans analiz sonuçları Tablo 4.8’de verilmiştir. Bitki köklerinde tespit edilen ağır metal miktarlarına benzer şekilde, gövdede tespit edilen ağır metal konsantrasyonları da bitki çeşidi, katkı maddesi ve interaksiyondan istatistiki olarak önemli derecede etkilenmiştir ( $p<0.001$ ) (Tablo 4.8).

Tablo 4.8. Gövde ağır metal konsantrasyonlarına ait değerlerin varyans analizi sonuçları

Varyasyon Kaynağı	KARELER ORTALAMASI						
	S.D.	Cu	Zn	Ni	Cd	Cr	Pb
Bitki (A)	5	1024,45***	38713,0***	129,15***	20,44***	1567,37***	9958,75***
Uygulama (B)	3	610,16***	26538,7***	35,32***	0,66***	527,55***	7950,38***
A*B	15	355,349***	6550,11***	35,36***	0,95***	642,64***	4825,81***
Hata	72	2,12	254,12	2,12	0,14	1,90	4,69

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin kök ve gövde Cu konsantrasyon ortalamaları ve oluşan gruplar Tablo 4.9’da verilmiştir.

Tablo 4.9. Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Cu konsantrasyon ortalamaları ( $\text{mg kg}^{-1}$  kuru ağır.) ve oluşan gruplar

Bitki*	Kök Uygulamalar**					Gövde Uygulamalar**				
	P1	P2	P3	P4	Ort.	P1	P2	P3	P4	Ort.
1	43,56	93,25	69,80	109,92	96,51a	2,45	26,51	7,80	48,82	21,39a
2	23,15	35,52	28,45	64,02	37,78c	3,28	5,87	5,10	13,59	6,96b
3	15,63	34,20	25,17	65,07	35,02c	2,00	2,65	2,64	6,04	3,33c
4	6,95	8,91	11,87	19,22	11,74d	11,37	1,79	7,13	6,89	6,80b
5	12,34	15,64	8,10	8,38	11,12d	7,01	7,78	6,09	9,5	7,60b
6	12,01	93,68	41,06	80,68	56,86b	3,64	26,87	6,4	23,67	21,40a
Ort.	18,94d	46,87b	30,66c	69,54a	41,50	9,63c	11,58b	5,86d	17,92a	11,25

\*Bitki: 1: *Brassica juncea*; 2: *Conium maculatum*; 3: *Brassica oleraceae* var. *Oleraceae*; 4: *Conyza canadensis*; 5: *Pelargonium hortorum*; 6: *Datura stramonium*

\*\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

Genel olarak kök dokularında tespit edilen Cu konsantrasyonu, gövdede tespit edilen Cu konsantrasyonundan daha yüksek olmuştur. Ortalama olarak gövdedeki konsantrasyon köklere kıyasla 3,7 kat daha düşük gerçekleşmiştir. Bitki çeşitlerinden hiperbiktirik olarak bilinen *Brassica juncea* hem kök, hem de gövdesinde en fazla Cu biriktiren bitki olmuş, bitki kök dokusunda  $109,92 \text{ mg kg}^{-1}$ ’e kadar Cu’ı biriktirebilmiştir. Gövdedeki Cu bakımından *Datura stramonium* bu bitki ile istatistiki olarak aynı grupta yer almıştır. *Conium maculatum*, *Conyza canadensis*, *Pelargonium hortorum* ve *Brassica oleraceae*



kök ve gövdelerinde tespit edilen Cu konsantrasyonu bakımından iyi bir hiperbiktirici özelliği göstermemiştir (Tablo 4.9).

Katkı maddelerinden birinci derecede EDTA ve ardından pH düşürücü kükürt bitki metal alımında etkili olmuştur. Kükürt uygulaması pH'yı düşürmüş bu da *Brassica juncea* dokularındaki metal konsantrasyonunu artırmıştır. Jips uygulaması kontrole kıyasla kök Cu konsantrasyonunu artırmakla birlikte aynı bitkilerin gövdelerinde tespit edilen Cu konsantrasyonu hiçbir katkı maddesi ilave edilmemiş kontrol uygulamasından daha düşük gerçekleşmiştir. Bunun nedeni tarımsal jipsin bileşiminde bulunan kalsiyumun, bikarbonat ( $\text{HCO}_3$ ) anyonları ile birleşerek  $\text{CaCO}_3$  şeklinde çökelirken ortamda bulunan Cu metalinide çöktürmesine ve alınabilirliğini azaltmasına bağlanmıştır. EDTA'nın metal alımını artırıcı etkisi *Brassica juncea* bitkisinde çok etkili olmuş, kontrole kıyasla kök Cu konsantrasyonu yaklaşık 4 kat artmıştır. Gövde Cu konsantrasyonu bu bitkide ve aynı uygulamada kontrole kıyasla 20 kat artmıştır (Tablo 4.9).

Tespit edilen en yüksek Cu konsantrasyonları *Brassica juncea* bitkisinde olmuş, EDTA ilavesi diğer uygulamalara kıyasla daha etkili olmuştur. Bitki kontrol uygulamasına kıyasla, kök dokusunda %60, gövdede ise %95 daha yüksek Cu konsantrasyonlarını biriktirmiştir (Tablo 4.9). Elde edilen % değerler literatürde aynı bitkide saptanan değerlerden yüksek olmuştur [24]. Kükürtün ortam pH'sını düşürücü ve metal alımını artırıcı etkisi en yüksek *Datura stramonium*'da olmuş, bitki kök dokusuna  $93,68 \text{ mg kg}^{-1}$ 'e kadar Cu'ı almıştır (Tablo 4.9), elde edilen değer Clemente ve ark. (2005)'in düşük pH'larda ( $<6$ ) tespit ettikleri Cu konsantrasyonundan yüksek olmuştur [24]. *Conium maculatum* ve *Brassica oleraceae* bitkilerinde de metal alımını artırıcı uygulama kükürt olmuş, köklerdeki konsantrasyon gövdeye kıyasla fazla olmuştur.

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin kök ve gövde Zn konsantrasyon ortalamaları ve oluşan gruplar Tablo 4.10'da verilmiştir.

Tablo 4.10. Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Zn konsantrasyon ortalamaları (mg kg<sup>-1</sup> kuru ağır.) ve oluşan gruplar

Bitki*	Kök Uygulamalar**					Gövde Uygulamalar**				
	P1	P2	P3	P4	Ort.	P1	P2	P3	P4	Ort.
1	259,19	378,57	337,87	680,99	414,15a	38,54	124,57	73,62	250,86	121,90c
2	145,55	206,97	143,84	314,84	202,80c	42,98	54,63	56,14	92,64	61,60de
3	156,05	165,17	116,05	223,75	165,25d	56,25	62,10	58,02	112,84	72,30d
4	69,49	89,86	126,91	59,18	86,36f	17,02	74,45	63,83	69,84	56,28e
5	112,85	154,59	108,27	124,67	125,1e	179,01	132,47	121,33	127,56	140,09b
6	70,40	409,88	156,72	359,20	249,05b	155,33	177,26	117,92	259,45	177,49a
Ort.	135,59d	234,17b	164,94c	293,77a	207,12	81,52c	104,25b	81,81c	152,2a	104,94

\*Bitki: 1: *Brassica juncea*; 2: *Conium maculatum*; 3: *Brassica oleraceae* var. *Oleraceae*; 4: *Conyza canadensis*; 5: *Pelargonium hortorum*; 6: *Datura stramonium*

\*\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

Genel olarak kök dokularında tespit edilen Zn konsantrasyonu, Cu ile benzer şekilde gövdeye nazaran daha fazla olmuştur. Ortalama olarak kökteki konsantrasyon gövdeye kıyasla yaklaşık 2 kat daha yüksek olmuştur. Tespit edilen Cu konsantrasyonları ile benzer olarak *Brassica juncea* kök dokularında en yüksek Zn konsantrasyonunu biriktiren bitki olmuş, bitki 680,99 mg kg<sup>-1</sup>'e kadar Zn'yi biriktirebilmiştir. *Datura stramonium* ise en yüksek gövde Zn konsantrasyonunu biriktirmiş, 259,45 mg kg<sup>-1</sup> Zn tespit edilmiştir. Hem kök hem de gövdedeki konsantrasyonlar açısından deneme bitkileri istatistiki olarak farklı gruplarda yer alırken, *Conium maculatum*, *Conyza canadensis*, *Pelargonium hortorum* ve *Brassica oleraceae* kök ve gövdelerindeki konsantrasyon bakımından iyi bir hiperbiriktirici özelliği gösterememişlerdir (Tablo 4.10). Bu bitkilerin gövdelerinde tespit edilen Zn konsantrasyonları literatürde bitki dokularında olması gereken Zn konsantrasyonları aralığında yer almıştır.

Katkı maddelerinden birinci derecede EDTA ve ardından pH düşürücü kükürt bitki Zn alımında etkili olmuştur. Kükürt ve EDTA uygulamalarının metal alımını artırıcı etkisi hiperbiriktirici bitki *Brassica juncea* ve *Datura stramonium*'da yüksek etkili saptanmıştır. Jips uygulaması kontrole kıyasla kök Zn konsantrasyonunu artırmakla birlikte, aynı bitkilerin gövdelerinde tespit edilen Zn konsantrasyonu kontrol ve jips uygulamalarında benzer olmuştur. Metal alımı EDTA ve kükürt uygulamasına nazaran jips ilavesinde düşük gerçekleşmiş, buda jipsin bileşimindeki kalsiyumun, bikarbonat (HCO<sub>3</sub>) anyonları ile birleşerek CaCO<sub>3</sub> şeklinde çökelirken Zu'yu da çöktürmesine bağlanmıştır. EDTA'nın metal alımını artırıcı etkisi kök dokularındaki metal

konsantrasyonu için *Brassica juncea* bitkisinde çok etkili olurken, gövde dokularındaki metal konsantrasyonunda *Datura stramonium* bitkisini takiben *Brassica juncea* bitkilerinde etkili olmuştur. *Brassica juncea* bitkisinde kontrole kıyasla kök Zn konsantrasyonu yaklaşık 2,6 kat artarken, *Datura stramonium* bitkisinde kontrole kıyasla gövde Zn 1,7 kat, *Brassica juncea* gövde Zn konsantrasyonu ise 6,5 kat artmıştır. Bu iki bitkiye ek olarak EDTA uygulaması *Conium maculatum* ve *Brassica oleraceae* bitkilerinde de etkili olmuş, *Conium maculatum* bitkisinde kontrol uygulamasına kıyasla kök ve gövde Zn konsantrasyonlarını 2 kat, *Brassica oleraceae* bitkisinde ise sırasıyla 1,4 ve 2 kat artırmıştır (Tablo 4.10).

Deneme bitkilerindeki en yüksek Zn konsantrasyonu EDTA ilave edilmiş *Brassica juncea*'nın köklerinde saptanmış ( $680,99 \text{ mg kg}^{-1}$ ), kontrole kıyasla kökte %62 oranında Zn bitki dokusuna alınmıştır. Gövdedeki konsantrasyon ise kontrole kıyasla %84 olmuştur (Tablo 4.10). Elde edilen değer Pogrzeba ve ark.'nın *Brassica juncea*'da saptadığı giderimden yüksek çıkmıştır [62]. Literatür incelendiğinde *Brassica juncea* bitkisinde tespit edilen Zn konsantrasyonları  $>1000 \text{ mg kg}^{-1}$ 'dir [24, 62]. Bu çalışmada *Brassica juncea* bitkisinde kontrole kıyasla giderilen %Zn miktarı yüksek çıkmakla birlikte, bitkinin dokularında saptanan Zn konsantrasyonları daha önceden yapılan çalışmalara nazaran düşük çıkmıştır (Tablo 4.10). Bunun sebebi bitkilerin yetiştirildiği arıtma çamurunun Zn içeriğinin nispeten düşük olması olabilir. Bu nedenle bitki dokularında saptanan Zn konsantrasyonu literatürle karşılaştırıldığında düşük çıkmış, dokulardaki Zn giderim oranları yüksek olmuştur. Sridhar ve ark. (2005)'da düşük Zn konsantrasyonlarına tabi tuttıkları bitkilerde benzer sonuçlar almışlar [117], bu çalışmada elde ettiğimiz konsantrasyonlar Singh ve Sinha (2005)'ın aynı bitkide saptadıkları sonuçlardan yüksek olmuştur [7].

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin kök ve gövde Ni konsantrasyon ortalamaları ve oluşan gruplar Tablo 4.11'de verilmiştir.

Tablo 4.11. Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Ni konsantrasyon ortalamaları (mg kg<sup>-1</sup> kuru ağır.) ve oluşan gruplar

Bitki*	Kök Uygulamalar**					Gövde Uygulamalar**				
	P1	P2	P3	P4	Ort.	P1	P2	P3	P4	Ort.
1	11,50	31,27	23,84	65,68	33,07b	4,12	5,43	4,20	11,50	6,31c
2	9,43	15,82	12,11	24,07	15,36d	4,67	3,67	2,59	5,95	4,22d
3	12,92	19,07	15,53	25,18	18,18c	3,98	4,97	4,39	6,68	5,01d
4	7,82	7,58	11,29	8,7	8,85e	2,11	6,42	7,41	8,22	6,04c
5	14,95	12,93	7,87	6,53	10,57e	12,12	5,59	7,01	5,02	7,43b
6	14,91	59,3	31,99	57,29	40,87a	18,42	10,41	8,19	11,82	12,21a
Ort.	11,92d	24,33b	17,11c	31,24a	21,15	7,57b	6,08c	5,63c	8,20a	6,87

\*Bitki: 1: *Brassica juncea*; 2: *Conium maculatum*; 3: *Brassica oleraceae* var. *Oleraceae*; 4: *Conyza canadensis*; 5: *Pelargonium hortorum*; 6: *Datura stramonium*

\*\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

Kök dokularında tespit edilen Ni konsantrasyonu, Zn ve Cu konsantrasyonlarına benzer şekilde gövdeye nazaran daha fazla olmuştur. Ortalama olarak köklerdeki konsantrasyon gövdeye kıyasla 3 kat daha yüksek gerçekleşmiştir. Bitki çeşitlerinden *Datura stramonium* hem kök hem de gövdede yüksek Ni tespit edilen bitki olmuş, kök dokularında 59,3 mg kg<sup>-1</sup>'e kadar Ni'e biriktirmiştir. *Conium maculatum*, *Conyza canadensis*, *Pelargonium hortorum* ve *Brassica oleraceae* kök ve gövdelerinde tespit edilen Ni konsantrasyonu bakımından iyi bir hiperbiriktirici özelliği göstermemiş, köklerdeki konsantrasyonda *Conyza canadensis* ve *Pelargonium hortorum* bitkileri aynı istatistiki grupta yer almış, gövdede ise *Brassica juncea* ile *Conyza canadensis* bitkileri aynı istatistiki gruplarda yer alan bitkiler olmuştur (Tablo 4.11).

Hem kök hem de gövdede önceki uygulamalarla benzer şekilde EDTA birinci derecede etkili olurken, ikinci derecede etkili katkı maddesi kökte kükürt, gövdede ise kontrol uygulaması olmuştur. Gövde Ni konsantrasyonlarında kükürt ve jips uygulamaları aynı derecede etkili olan katkı maddeleri olmuştur. EDTA'nın kök dokularındaki metal konsantrasyonuna etkisi en fazla *Brassica juncea* bitkisinde olmuş, kontrol uygulamasına kıyasla 5,7 kat artırmıştır. Gövde dokularındaki en yüksek metal alımı ise hiçbir katkı maddesi ilave edilmemiş *Datura stramonium* bitkisinde gözlenmiştir. EDTA uygulaması ayrıca *Conium maculatum* ve *Brassica oleraceae* bitkilerinde de kontrol uygulamasına nazaran kök ve gövde Ni konsantrasyonlarında artışa neden olmuştur. Kök Ni konsantrasyonu bu bitkilerde ve aynı uygulamalarda kontrole kıyasla *Conium*

*maculatum*'da 2,5 ve *Brassica oleraceae*'da 2 kat artmış, gövde Ni konsantrasyonu ise sırasıyla 1,3 ve 1,7 kat kadar artmıştır (Tablo 4.11).

Bitki dokularında saptanan Ni konsantrasyonları literatürde hiperbirikirici bitkilerde saptanan Ni konsantrasyonlarından düşük çıkmıştır [38, 62]. En yüksek metal konsantrasyonu *Brassica juncea* bitkisinde olmuş ( $65,68 \text{ mg kg}^{-1}$ ), kontrole kıyasla kökte %82, gövdede ise %64 oranında Ni birikmiştir (Tablo 4.11). Bitkideki konsantrasyonların düşük fakat kontrol uygulamasına nazaran konsantrasyonların yüksek olması bitkilerin yetiştiği arıtma çamurunun Ni muhtevasının düşük olmasından kaynaklanmıştır.

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin kök ve gövde Cd konsantrasyon ortalamaları ve oluşan gruplar Tablo 4.12'de verilmiştir.

Tablo 4.12. Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Cd konsantrasyon ortalamaları ( $\text{mg kg}^{-1}$  kuru ağır.) ve oluşan gruplar

Bitki*	Kök Uygulamalar**					Gövde Uygulamalar**				
	P1	P2	P3	P4	Ort.	P1	P2	P3	P4	Ort.
1	0,58	1,49	0,70	2,76	1,38c	0,28	0,47	0,39	1,47	0,65c
2	0,82	0,55	0,63	0,73	0,68d	0,34	0,47	0,53	0,81	0,53cd
3	0,65	0,73	0,52	0,83	0,68d	0,24	0,27	0,23	0,37	0,28d
4	2,29	2,81	2,28	2,23	2,40a	2,22	3,61	2,35	2,42	3,15a
5	2,29	2,23	2,38	2,17	2,27ab	2,43	2,04	1,72	2,10	2,07b
6	2,31	2,15	2,18	1,87	2,13b	1,65	2,35	1,94	1,91	1,96b
Ort.	1,49b	1,66a	1,45b	1,77a	1,59	1,52a	1,53a	1,19b	1,51a	1,44

\*Bitki: 1: *Brassica juncea*; 2: *Conium maculatum*; 3: *Brassica oleraceae* var. *Oleraceae*; 4: *Conyza canadensis*; 5: *Pelargonium hortorum*; 6: *Datura stramonium*

\*\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

Genel olarak kök dokularında tespit edilen Cd konsantrasyonu, gövdede tespit edilen Cd konsantrasyonundan yüksek olmakla birlikte *Conyza canadensis*'de ortalama olarak tespit edilen konsantrasyonlar gövdede daha yüksek olmuştur. Bitki çeşitlerinden *Conyza canadensis* hem kök hem de gövdesinde en fazla Cd saptanan bitki olmuştur. Bu bitkiyi *Datura stramonium* takip etmiştir. Gövdedeki konsantrasyon bakımından *Pelargonium hortorum* bitkisi *Datura stramonium* ile aynı istatistikî grupta yer almıştır. *Brassica juncea*, *Conium maculatum* ve *Brassica oleraceae* kök ve gövdelerinde tespit

edilen Cd konsantrasyonu bakımından iyi bir hiperbiriktirici özelliği göstermemiştir (Tablo 4.12).

Köklerde birinci derecede EDTA etkili olurken, gövdede en etkili katkı maddesi kükürt olmuştur. Kükürt ilavesi sonucunda pH'daki azalmanın bitkilerin gövdesindeki Cd konsantrasyonundaki etkisi daha fazla olmuş, kükürt uygulamasında en yüksek değer bu çalışmada ilk kez denenen *Conyza canadensis*'de saptanmıştır. Kükürt bu bitkide hem Cd konsantrasyonlarını artırmış hem de Cd'un kökten gövdeye etkili taşınımını sağlamıştır. EDTA ve kükürt uygulamaları hem kök hem de gövdede istatistiki olarak aynı grupta yer alan katkı maddeleri olmuş, düşük pH'nın metal alımına etkisi, EDTA kimyasalının metal alımını artırıcı etkisi ile benzer bulunmuştur. Kökteki Cd konsantrasyonunda, jips uygulaması kontrol uygulaması ile benzer şekilde etkili olmuştur. Gövdedeki konsantrasyon açısından kükürt uygulaması, EDTA ve kontrol uygulamaları ile aynı istatistiki grupta yer almış ve jips uygulamasından daha etkili olmuştur. Jipsin bileşiminde bulunan kalsiyum, bikarbonat ( $\text{HCO}_3$ ) anyonları ile birleşerek  $\text{CaCO}_3$  şeklinde çökelirken Cd'un çökelmesine neden olmuş, Cd'un alınabilirliği düşmüştür. EDTA'nın metal alımını artırıcı etkisi *Brassica juncea* bitkisinde çok etkili olmuş, kontrole kıyasla kök ve gövde Cd konsantrasyonunu yaklaşık 5 kat artırmıştır. *Conyza canadensis* bitkisinde ise kükürt uygulaması daha etkili olmuş ve kök Cd konsantrasyonunu kontrol bitkisine kıyasla 1,2 kat artırmıştır. Aynı bitkinin gövdesindeki en yüksek konsantrasyon ise kontrol uygulamasında gerçekleşmiştir (Tablo 4.12).

Bitki dokularında tespit edilen en yüksek Cd konsantrasyonları diğer metallerden farklı olarak *Conyza canadensis*'de olmuş, en yüksek kök Cd konsantrasyonu kükürt ilavesinde saptanmış ( $2,81 \text{ mg kg}^{-1}$ ), en yüksek gövde Cd konsantrasyonu ise kükürt uygulamasında tespit edilmiştir ( $3,61 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Tablo 4.12). EDTA uygulamasının bitki dokularındaki Cd alımını artırıcı etkisi en fazla *Brassica juncea*'da olmuş, bitki kontrole kıyasla kök ve gövdesinde sırayla %79 ve %81 oranında Cd'u almıştır. *Brassica juncea* bitkisindeki konsantrasyonlar daha önceden yapılmış olan çalışmalarda saptanan değerlerle yakın olmakla birlikte [62, 117], arıtma çamurunun Cd muhtevasının düşük olması ve çamur

bünyesindeki Cd'un organik maddeye bağlanıp alınabilirliğinin düşük gerçekleşmesi bitkilerdeki Cd konsantrasyonlarının nispeten düşük olmasını sağlamıştır.

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin kök ve gövde Cr konsantrasyon ortalamaları ve oluşan gruplar Tablo 4.13'de verilmiştir.

Tablo 4.13. Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Cr konsantrasyon ortalamaları ( $\text{mg kg}^{-1}$  kuru ağır.) ve oluşan gruplar

Bitki*	Kök Uygulamalar**					Gövde Uygulamalar**				
	P1	P2	P3	P4	Ort.	P1	P2	P3	P4	Ort.
1	17,25	88,20	64,29	169,58	84,83a	1,75	33,77	12,40	64,69	28,15a
2	16,93	75,35	20,10	97,08	52,37c	1,37	1,85	1,37	7,83	3,11d
3	41,17	44,55	24,57	73,46	45,94d	1,77	2,48	2,02	4,40	2,67d
4	5,49	10,51	11,07	10,39	9,36e	10,08	1,91	3,18	2,78	4,49c
5	15,02	13,69	5,84	7,35	10,47e	4,13	2,97	3,45	6,01	4,14c
6	19,73	131,41	46,12	93,77	72,76b	2,84	6,23	2,76	6,74	11,03b
Ort.	19,27d	60,62b	28,66c	75,27a	45,95	7,92b	8,20b	4,20c	15,41a	8,93

\*Bitki: 1: *Brassica juncea*; 2: *Conium maculatum*; 3: *Brassica oleraceae* var. *Oleraceae*; 4: *Conyza canadensis*; 5: *Pelargonium hortorum*; 6: *Datura stramonium*

\*\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

Ortalama olarak kökteki Cr konsantrasyonu gövdeye kıyasla 5 kat daha yüksek gerçekleşmiştir. Bitki çeşitlerinden *Brassica juncea* hem kök hem de gövdesinde en fazla Cr alan bitki olmuştur. Bu bitkiyi *Datura stramonium* bitkisi takip etmiştir. *Conium maculatum*, *Conyza canadensis*, *Pelargonium hortorum* ve *Brassica oleraceae* bitkileri kök ve gövdelerinde tespit edilen Cr konsantrasyonu bakımından iyi bir hiperbirikirici özelliği gösterememişlerdir (Tablo 4.13).

Cu konsantrasyonları ile benzer şekilde EDTA en etkili katkı maddesi olurken, kükürt bitkilerin metal alımında ikinci dereceden etkili katkı maddesi olmuştur. Kökte ise jips uygulaması kontrole kıyasla metal alımını artırmakla birlikte aynı bitkilerin gövdelerinde tespit edilen Cr konsantrasyonu kontrol uygulamasında daha yüksek olmuştur. Jipsin metalleri çöktürücü etkisi gövdeye metal taşınımında olumsuz yönde etkili olmuş, Cr'un kökten gövdeye taşınımı jips uygulamasında düşük gerçekleşmiştir. EDTA'nın metal alımını artırıcı etkisi *Brassica juncea* bitkisinde çok etkili olmuş, kontrole kıyasla kök ve gövde Cr konsantrasyonunu sırasıyla 10 ve 37 kat artmıştır (Tablo 4.13).

Bitki dokularındaki en yüksek Cr konsantrasyonu *Brassica juncea*'da saptanmış (169,58 mg kg<sup>-1</sup> kök), EDTA bu bitkide en etkili uygulama olmuştur. Bitki kök ve gövdesinde kontrole kıyasla %89 ve %97 Cr'u konsantre etmiştir (Tablo 4.13). Elde edilen sonuçlar Ghosh ve Singh (2005)'in aynı bitkide saptadıkları sonuçlardan yüksek olmuştur [118]. Singh ve Sinha (2005)'in %100 çamur uyguladıkları çalışmada elde ettikleri sonuçlar ise bu çalışmada aynı bitkide elde edilen Cr konsantrasyonlarından yüksek gerçekleşmiştir [7]. pH düşürücü özelliğe sahip kükürt uygulaması da *Datura stramonium*'da etkili olmuş, bitki köklerinde kontrole göre %85 Cr'u gidermiştir (Tablo 4.13).

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin kök ve gövde Pb konsantrasyon ortalamaları ve oluşan gruplar Tablo 4.14'de verilmiştir.

Tablo 4.14. Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Pb konsantrasyon ortalamaları (mg kg<sup>-1</sup> kuru ağır.) ve oluşan gruplar

Bitki*	Kök Uygulamalar**					Gövde Uygulamalar**				
	P1	P2	P3	P4	Ort.	P1	P2	P3	P4	Ort.
1	21,93	33,70	24,95	42,27	58,21a	10,34	76,00	14,57	81,5	75,60a
2	3,55	12,62	13,42	17,81	11,85e	4,17	12,09	10,22	18,82	11,32e
3	17,48	18,95	20,02	27,32	20,94d	3,1	21,72	13,55	24,17	15,63c
4	21,62	24,23	33,68	18,68	24,56c	11,13	16,10	15,74	16,34	14,83cd
5	33,63	19,39	17,64	16,19	21,71d	17,00	15,45	7,22	16,32	13,99d
6	24,65	31,07	28,71	24,72	27,29b	15,58	33,22	7,34	14,91	17,76b
Ort.	20,48d	28,33b	23,07c	37,83a	27,42	10,22d	32,43b	11,44c	47,01a	24,85

\*Bitki: 1: *Brassica juncea*; 2: *Conium maculatum*; 3: *Brassica oleraceae* var. *Oleraceae*; 4: *Conyza canadensis*; 5: *Pelargonium hortorum*; 6: *Datura stramonium*

\*\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

Genel olarak kök dokularında tespit edilen Pb konsantrasyonu, gövdeye nazaran daha fazla olmuş, bir tek *Brassica juncea*'da köklere nazaran gövdedeki birikim yüksek tespit edilmiş, bu durum bitkinin Pb'u gövdeye nakletme yeteneğine bağlanmıştır. Bitki çeşitlerinden *Brassica juncea* hem kök hem de gövde dokularında en yüksek Pb alan bitki olmuş, ikinci en yüksek konsantrasyon *Datura stramonium*'da tespit edilmiştir. *Conium maculatum*, *Conyza canadensis*, *Pelargonium hortorum* ve *Brassica oleraceae* kök ve gövdelerinde tespit edilen Pb konsantrasyonu bakımından iyi bir hiperbiriştirici özelliği gösterememiştir (Tablo 4.14).



Kök ve gövde Pb konsantrasyonu açısından önceki uygulamalarla benzer şekilde EDTA birinci derecede etkili olurken, ikinci derecede etkili katkı maddesi kükürt olmuştur. Bu durum EDTA'nın bitkilerdeki metal alımını artırmasının önemi kadar kükürt ilavesinin de metal gideriminde etkili bir kimyasal olduğunu göstermiştir. Hem kök hem de gövde Pb konsantrasyonlarında aynı bitkilerin metal alımları kontrol uygulamasına nazaran jips uygulamasında daha yüksek gerçekleşmiştir. Bu durum jipsin etkisine nazaran deneme bitkilerinin kurşunu gidermedeki yeteneklerine bağlanmıştır. EDTA'nın bitki dokularındaki metal konsantrasyonuna etkisi en fazla *Brassica juncea* bitkisinde olmuş, kontrol uygulamasına kıyasla kök ve gövde kurşun konsantrasyonunu sırasıyla 2 ve 8 kat artırmıştır. *Datura stramonium* bitkisinde ise kükürt uygulaması daha iyi sonuç vermiş ve Pb konsantrasyonunu kontrol bitkisine kıyasla kökte 1,2 gövdede 2 kat artırmıştır (Tablo 4.14).

Bu çalışmada bitki dokularında tespit edilen en yüksek Pb konsantrasyonu EDTA uygulamasındaki *Brassica juncea*'da olmuştur. Bitki kök dokularında 42,27 mg kg<sup>-1</sup>'e kadar Pb'yi biriktirirken, gövdeye aktardığı konsantrasyon ortalama olarak 81,5 mg kg<sup>-1</sup> olmuştur. Bitki kök dokularında kontrole kıyasla %48 Pb'u alırken, bu değer gövdede %87'dir (Tablo 4.14). Sonuç olarak EDTA ilavesi Pb'nun kökten gövdeye taşınımını artırmış, Pb konsantrasyonları köke nazaran gövdede yüksek olmuştur. EDTA uygulamasının gövde Pb konsantrasyonunu köklere göre artırdığı diğer bitki *Conium maculatum* olmuştur. Elde edilen değerler Pogrzeba ve ark. tarafından *Brassica juncea* bitkisinde saptanan değerlerle uyumlu bulunmuş [62], Bricker ve ark. (2001) ve Kumar ve ark. (1995)'nin buldukları değerlerden yüksek çıkmıştır [16, 119]. Literatürde düşük EDTA ilavelerinde de bitkideki birikimin düşük olduğu rapor edilmektedir [119, 120].

Literatürde EDTA'nın Pb alımına ve gövdeye taşınımına etkisi açıktır. Bununla birlikte kükürt uygulamasında bitkinin kök ve gövde dokularında tespit edilen değerler, düşük pH'larda (<6) yapılan denemelerde elde edilen sonuçlardan (55 mg kg<sup>-1</sup>) yüksek bulunmuştur [24]. EDTA'ya ilave olarak kükürt uygulamasında da gövdedeki birikim köklere nazaran daha fazla olmuş (*Brassica juncea*, *Brassica oleraceae*, *Datura stramonium*), kükürt Pb'nin gövdeye nakledilmesini artırmıştır (Tablo 4.14). Sonuç olarak kükürt ilavesi EDTA ile benzer şekilde Pb'nun kökten gövdeye taşınımında etkili

olmuş, bu durum hem bitkilerin nakletme yeteneklerine hem de kükürtün pH'ı düşürücü etkisine bağlanmıştır.

#### 4.3.3. Ağır metal giderim verimi

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin kök ağır metal giderim verimlerine ait varyans analiz sonuçları Tablo 4.15'de verilmiştir. Kök dokusunda tespit edilen ağır metal giderim verimlerine bitki, kullanılan farklı katkı maddeleri ve interaksiyon etkisi istatistiki olarak önemli derecede etkili bulunmuştur ( $p<0.001$ ) (Tablo 4.15).

Tablo 4.15. Kök ağır metal giderim verimlerine ait değerlerin varyans analizi sonuçları

Varyasyon Kaynağı	KARELER ORTALAMASI						
	S.D.	Cu	Zn	Ni	Cd	Cr	Pb
Bitki (A)	5	5,82***	9,02***	897540,0***	1174,28***	7,58***	1,10***
Uygulama (B)	3	5,08***	5,48***	710895,0***	403,21***	7,95***	606489,0***
A*B	15	665820,00***	8,58***	133995,0***	284,56***	1,44***	448624,0***
Hata	72	17785,2	616584,0	7334,6	26,74	30775,6	5193,81

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin gövde ağır metal giderim verimlerine ait varyans analiz sonuçları Tablo 4.16'da verilmiştir. Bitki köklerinde tespit edilen ağır metal giderim verimlerine benzer şekilde, gövdede tespit edilen ağır metal giderim verimleri de bitki çeşidi, katkı maddesi ve interaksiyon açısından istatistiki olarak önemli bulunmuştur ( $p<0.001$ ) (Tablo 4.16).

Tablo 4.16. Gövde ağır metal giderim verimlerine ait değerlerin varyans analizi sonuçları

Varyasyon Kaynağı	KARELER ORTALAMASI						
	S.D.	Cu	Zn	Ni	Cd	Cr	Pb
Bitki (A)	5	881150,00***	5,38***	229056,00***	19689,4***	602042,00***	2,89***
Uygulama (B)	3	404410,00***	2,49***	30477,0***	183,85***	256526,00***	4,03***
A*B	15	185859,00***	5,65***	29883,5***	886,17***	327873,00***	1,67***
Hata	72	3302,84	464393,00	2625,6	189,08	1425,51	8523,09

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin kök ve gövde Cu giderim verimleri ortalamaları ve oluşan gruplar Tablo 4.17'de verilmiştir.

Tablo 4.17. Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Cu giderim verimleri ortalamaları (mg bitki<sup>-1</sup>) ve oluşan gruplar

Bitki*	Kök Uygulamalar**					Gövde Uygulamalar**				
	P1	P2	P3	P4	Ort.	P1	P2	P3	P4	Ort.
1	734,46	1978,53	1180,32	2958,82	1713,03a	45,97	581,82	154,26	917,54	424,90b
2	761,35	1231,36	996,56	1916,73	1226,5b	102,86	212,08	189,16	419,29	230,85c
3	516,71	756,18	856,53	2077,93	1051,84c	88,15	108,73	117,59	252,37	141,71d
4	106,44	138,99	180,78	291,30	179,38d	328,06	56,59	202,16	197,40	196,05c
5	177,54	234,56	119,91	208,37	185,09d	189,79	213,40	187,03	283,94	218,54c
6	218,49	1536,68	748,83	1495,46	999,86c	125,94	714,41	278,99	947,45	766,70a
Ort.	419,16d	979,38b	680,49c	1491,44a	892,61	313,46b	314,50b	188,19c	503,00a	329,79

\*Bitki: 1: *Brassica juncea*; 2: *Conium maculatum*; 3: *Brassica oleraceae* var. *Oleraceae*; 4: *Conyza canadensis*; 5: *Pelargonium hortorum*; 6: *Datura stramonium*

\*\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

Kök dokularında tespit edilen Cu giderim verimi, gövdede tespit edilen Cu giderim veriminden daha fazla olmuştur. Ortalama olarak gövdedeki giderim, köklere kıyasla 2,7 kat daha düşük gerçekleşmiştir. Bitki çeşitlerinden *Brassica juncea* kök dokularında en fazla Cu gideren bitki olmuş, gövdedeki en yüksek giderim verimi *Datura stramonium*'da saptanmıştır (Tablo 4.17). Elde edilen verimler bitki dokularında saptanan Cu konsantrasyonları ile doğru orantılı çıkmıştır. Cu giderim verimlerinin bu bitkilerde yüksek olması, yüksek biyokütle oluşturmalarından ziyade bitkilerin dokularında yüksek Cu konsantrasyonlarını biriktirebilmelerinden kaynaklanmıştır.

Kök ve gövdedeki metal giderim verimlerinde, Cu konsantrasyonlarındakine benzer şekilde katkı maddelerinden birinci derecede EDTA, ardından kükürt etkili olmuştur. Kök metal gideriminde uygulanan katkı maddeleri istatistiki olarak farklı olurken, gövdedeki metal gideriminde kükürt ve kontrol uygulamaları istatistiki olarak aynı grupta yer almıştır. Jips uygulamasının deneme bitkilerinin metal giderimlerinde artırıcı bir etkisi olmamıştır. Bu etki dokularda saptanan konsantrasyonları ile benzer çıkmış, jipsin bileşiminde bulunan kalsiyumun, bikarbonat (HCO<sub>3</sub>) anyonları ile birleşerek CaCO<sub>3</sub> şeklinde çökelirken ortamda bulunan Cu metalinide çöktürmesine ve alınabilirliğini azaltmasına bağlanmıştır. EDTA'nın metal alımını artırıcı etkisi en fazla *Brassica juncea* bitkisinde olmuş (2958,82 mg kg<sup>-1</sup> kök), kontrole kıyasla kök Cu verimi yaklaşık 4 kat artmıştır. En etkili gövde Cu giderimi ise *Datura stramonium* bitkisinin EDTA uygulamasında tespit edilmiş (947,45 mg kg<sup>-1</sup> gövde), kontrole kıyasla yaklaşık 7,5 kat artış gözlenmiştir. *Datura stramonium* gövde dokusunda, hiperbiriktirici *Brassica juncea* ile yakın Cu giderim verimi göstermiş (947,45 mg kg<sup>-1</sup> gövde ve 917,54

mg kg<sup>-1</sup> gövde), elde edilen sonuçlar *Datura stramonium*'un yüksek gövde biyokütlesi oluşturmaya bağlanmıştır (Tablo 4.17).

Deneme bitkilerinde tespit edilen en yüksek Cu giderim verimi *Brassica juncea* bitkisinde olmuş, EDTA ilavesi bitkideki Cu konsantrasyonlarını artırmış dolayısıyla giderim verimide yüksek olmuştur. Bitki Cu konsantrasyon verileri ile aynı doğrultuda kontrol uygulamasına kıyasla bitki kök dokusunda %75 oranında Cu'yu giderirken, gövdedeki Cu verimi %95 olmuştur (Tablo 4.17). Sonuçlar Clemente ve ark. (2005)'nın buldukları sonuçlardan yüksektir [24]. Kükürt ilavesi *Datura stramonium*'da hem kök hem de gövde Cu konsantrasyonunu EDTA'ya göre artırırken (Tablo 4.9), aynı bitkideki Cu giderim veriminde gövdede EDTA kükürten daha etkili olmuştur (Tablo 4.17). Bu durum EDTA ilavesinin bitki gövde biyokütlesini artırması ile açıklanabilir.

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin kök ve gövde Zn giderim verimleri ortalamaları ve oluşan gruplar Tablo 4.18'de verilmiştir.

Tablo 4.18. Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Zn giderim verimleri ortalamaları (mg bitki<sup>-1</sup>) ve oluşan gruplar

Bitki*	Kök					Gövde				
	P1	P2	Uygulamalar**			P1	P2	Uygulamalar**		
			P3	P4	Ort.			P3	P4	Ort.
1	4314,41	8031,00	5758,67	11198,9	7325,74a	754,81	2739,82	1447,88	4715,66	2414,54d
2	4899,65	7075,15	5016,37	9451,84	6610,75b	1340,24	1989,69	2126,29	2849,22	2076,36de
3	5131,92	3635,18	3902,65	7174,05	4960,95c	2427,55	2577,96	2550,90	4700,91	3064,33c
4	1064,83	1413,74	1932,12	897,33	1327,01f	491,19	2330,13	1818,71	2005,20	1661,31e
5	1624,45	2315,71	1612,11	3095,03	2161,83e	4845,15	3603,26	3755,69	3788,33	3998,11b
6	1285,50	6727,31	2863,20	6662,53	4384,64d	5557,50	5114,05	5157,31	10819,50	6662,09a
Ort.	3053,46d	4866,35b	3514,19c	6413,28a	4461,82	2569,41b	3059,15b	2809,47b	4813,14a	3312,79

\*Bitki: 1: *Brassica juncea*; 2: *Conium maculatum*; 3: *Brassica oleraceae var. Oleraceae*; 4: *Conyza canadensis*; 5: *Pelargonium hortorum*; 6: *Datura stramonium*

\*\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

Genel olarak kök dokularında tespit edilen Zn giderim verimi gövdeye nazaran daha fazla olmuştur. Ortalama olarak kökteki giderim verimi gövdeye kıyasla yaklaşık 1,3 kat daha yüksek saptanmıştır. *Brassica juncea* bitkisinde en yüksek kök Zn giderimi saptanırken, gövde metal giderimi en fazla *Datura stramonium*'da olmuştur (Tablo 4.18). Elde edilen verimler, bitki dokularında saptanan Zn konsantrasyonları ile orantılı çıkmıştır. Bu iki bitkinin yüksek verim değerleri ile öne çıkması, yüksek biyokütle

oluşturmalarından ziyade dokularındaki yüksek Zn konsantrasyonlarından kaynaklanmıştır.

Metal giderim veriminde en etkili katkı maddesi EDTA kimyasalı olmuştur. İkinci derecede etkili katkı maddesi ise pH düşürücü özelliğe sahip kükürt olmuştur. Gövde metal giderim veriminde kükürt, jips ve kontrol uygulamaları aynı istatistiki grupta yer alan katkı maddeleri olmuştur. EDTA'nın metal giderimini arttırıcı etkisi kökte en yüksek *Brassica juncea*'da olurken (11198,9 mg kg<sup>-1</sup>), gövdede *Datura stramonium* bitkisinde olmuştur (10819,50 mg kg<sup>-1</sup>). *Brassica juncea* bitkisinde kontrole kıyasla kök Zn giderim verimi 2,5 kat artarken, *Datura stramonium* bitkisinde kontrole kıyasla gövde Zn giderim verimi 2 kat artmıştır (Tablo 4.18).

Bitki dokularında saptanan Zn konsantrasyonları ile aynı şekilde, EDTA *Brassica juncea*'da ki Zn giderim veriminde çok etkili olmuş, bitkinin köklerindeki Zn giderim verimi kontrole kıyasla %62, gövdede ise %84 olmuştur (Tablo 4.18). Literatürde hiperbirikirici kabul edilen bitkinin dokularında saptanan Zn giderim verimi daha önceden yapılan çalışmalarda tespit edilen değerlerden düşük çıkmıştır [62]. Bu durum bitkinin yetiştirildiği arıtma çamurun Zn muhtevasının düşük ve bitkilere sınırlı kök yayılma alanı veren saksı içinde yetiştirilmesinden kaynaklanmış, benzer sonuçlar Sridhar ve ark. (2005) tarafından da saptanmıştır [117].

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin kök ve gövde Ni giderim verimleri ortalamaları ve oluşan gruplar Tablo 4.19'da verilmiştir.

Tablo 4.19. Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Ni giderim verimleri ortalamaları (mg bitki<sup>-1</sup>) ve oluşan gruplar

Bitki*	Kök Uygulamalar**					Gövde Uygulamalar**				
	P1	P2	P3	P4	Ort.	P1	P2	P3	P4	Ort.
1	193,85	663,18	405,70	1080,29	585,75b	78,27	119,74	82,99	216,50	124,38d
2	315,03	551,42	426,65	724,49	504,39c	147,66	133,79	98,25	184,55	141,06cd
3	429,80	414,49	530,35	809,57	546,05bc	172,22	205,59	193,01	278,51	211,83b
4	120,16	119,1	172,03	132,14	135,86d	60,56	200,9	211,60	235,43	177,12bc
5	215,22	193,99	116,90	162,27	172,09d	328,56	154,57	217,28	149,03	212,36b
6	272,30	972,77	583,73	1060,33	722,28a	653,08	303,33	360,81	494,38	452,90a
Ort.	257,73d	485,82b	372,56c	661,51a	444,40	240,06a	186,32b	193,66b	259,74a	219,94

\*Bitki: 1: *Brassica juncea*; 2: *Conium maculatum*; 3: *Brassica oleraceae* var. *Oleraceae*; 4: *Conyza canadensis*; 5: *Pelargonium hortorum*; 6: *Datura stramonium*

\*\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

Tespit edilen diğerk metal giderimlerine benzer olarak kök dokularında tespit edilen Ni giderim verimi, gövdede tespit edilen giderim veriminden daha yüksek olmuştur. Ortalama olarak kökteki verim gövdeye kıyasla 2 kat daha yüksek gerçekleşmiştir. Bitki çeşitlerinden *Datura stramonium* hem kök hem de gövdesinde en fazla Ni gideren bitki olmuştur (Tablo 4.19). Bu durum bitkinin yüksek biyokütle oluşturmasından ziyade dokularında saptanan yüksek Ni konsantrasyonlarından kaynaklanmıştır.

Kök ve gövdedeki Ni giderim verimi bakımından EDTA ardından kükürt en etkili katkı maddeleri olmuştur. EDTA'nın metal giderim verimini artırıcı etkisi kökte *Datura stramonium* ve *Brassica juncea* bitkilerinde saptanmış, kontrole kıyasla sırasıyla 6 ve 4 kat artış sağlanmıştır. Gövdede ise EDTA ilavesi *Brassica juncea* bitkisinde çok etkili olmuş, kontrole kıyasla kök Ni giderim verimini 3 kat artırmıştır (Tablo 4.19). Elde edilen sonuçlar bitki dokularında saptanan Ni konsantrasyonları ile benzerlik göstermiştir (Tablo 4.11).

Bitki dokularında saptanan Zn giderim verimi ile benzer şekilde Ni giderim verimlerinde literatürde hiperbiktirici bitkilerde belirtilen değerlerden düşük çıkmıştır [38, 62]. Bu durum yetiştirme ortamı olarak kullanılan arıtma çamurunun düşük Ni içermesinden kaynaklanmıştır. Kök biyokütlesinde saptanan en yüksek Ni giderimi ( $1080,29 \text{ mg kg}^{-1}$ ) EDTA uygulamasını takiben *Brassica juncea*'da olurken, gövdede kontrol uygulamasında *Datura stramonium* bitkisinde tespit edilmiştir ( $653,08 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Tablo 4.19). EDTA, deneme bitkilerindeki metal giderim verimlerini artırmada, konsantrasyon verileri ile aynı doğrultuda en etkili uygulama olmuştur.

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin kök ve gövde Cd giderim verimleri ortalamaları ve oluşan gruplar Tablo 4.20'de verilmiştir.

Tablo 4.20. Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Cd giderim verimleri ortalamaları (mg bitki<sup>-1</sup>) ve oluşan gruplar

Bitki*	Kök Uygulamalar**					Gövde Uygulamalar**				
	P1	P2	P3	P4	Ort.	P1	P2	P3	P4	Ort.
1	9,93	31,62	11,98	45,49	24,75b	5,69	10,37	7,71	27,70	12,87d
2	26,62	18,99	22,25	22,03	22,48bc	10,55	16,96	19,87	25,19	18,14d
3	21,55	16,07	17,78	26,76	20,54c	10,14	10,99	10,28	15,39	11,70d
4	35,04	44,19	34,75	33,90	36,97a	121,81	113,79	67,17	69,54	93,08a
5	32,91	33,53	35,46	53,97	38,97a	65,71	54,9	53,17	62,70	59,12c
6	42,31	35,34	39,75	34,81	38,05a	58,76	67,45	85,30	80,25	72,94b
Ort.	28,06b	29,96b	26,99b	36,16a	30,29	45,44b	45,74b	40,58c	46,8a	44,64

\*Bitki: 1: *Brassica juncea*; 2: *Conium maculatum*; 3: *Brassica oleraceae* var. *Oleraceae*; 4: *Conyza canadensis*; 5: *Pelargonium hortorum*; 6: *Datura stramonium*

\*\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

Diğer metal giderim verimlerinden farklı olarak kök dokularında tespit edilen Cd giderim verimi, gövdede tespit edilenden düşük olmuştur. Ortalama olarak gövdedeki metal giderim verimi köktekinden 1,4 kat yüksek gerçekleşmiştir. Bu durum bitkilerin dar yetiştirme ortamlarında sınırlı kök biyokütlesi oluşturmalarına bağlanabilir. *Conyza canadensis* kök ve gövdedeki yüksek Cd giderim verimi ile öne çıkan bitki olmuştur (44 mg kg<sup>-1</sup> kök ve 121,81 mg kg<sup>-1</sup> gövde). Bitkinin gövdesinde saptanan Cd giderim verimi köklere göre yüksek olmuştur, bu durum aynı bitkinin Cd’u gövde dokusuna daha fazla nakletmesi ile açıklanabilir. Aynı şekilde bitkinin dokularındaki Cd konsantrasyonlarına baktığımızda da en yüksek konsantrasyonlar bu bitkide saptanmış, dolayısıyla da Cd giderim verimi yüksek olmuştur (Tablo 4.20).

Kök ve gövdedeki Cd gideriminde EDTA en etkili katkı maddesi olmuş, bu etki en fazla *Brassica juncea* bitkisinde saptanmış, kontrole kıyasla kök ve gövde Cd giderimini yaklaşık 5 kat artmıştır (Tablo 4.20). Saptanan değerler Pogrzeba ve ark. [62] ve Sridhar ve ark. (2005)’in [117] saptadığı değerlere yakın olmakla birlikte, arıtma çamurunun düşük Cd muhtevası, deneme bitkilerinde saptanan Cd verimlerinin nispeten düşük olmasına neden olmuştur.

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin kök ve gövde Cr giderim verimleri ortalamaları ve oluşan gruplar Tablo 4.21’de verilmiştir.

Tablo 4.21. Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Cr giderim verimleri ortalamaları (mg bitki<sup>-1</sup>) ve oluşan gruplar

Bitki*	Kök Uygulamalar**					Gövde Uygulamalar**				
	P1	P2	P3	P4	Ort.	P1	P2	P3	P4	Ort.
1	294,48	1872,47	1093,96	2789,17	1512,52b	34,04	739,01	244,61	1215,59	558,31a
2	553,63	2578,55	707,28	2908,33	1686,95a	42,82	67,42	50,98	241,12	100,58d
3	1357,21	986,38	836,11	2355,65	1383,84c	77,52	100,84	90,11	184,06	113,14cd
4	84,15	165,74	168,55	157,42	143,97d	291,64	60,01	90,82	80,45	130,73c
5	216,06	205,14	86,68	182,52	172,60d	111,95	80,29	106,67	180,16	119,76cd
6	360,3	2153,27	840,65	1741,29	1273,88c	108,22	178,32	122,14	283,20	397,97b
Ort.	477,64d	1326,93b	622,21c	1689,07a	1028,96	261,03b	204,32c	117,56d	364,09a	236,75

\*Bitki: 1: *Brassica juncea*; 2: *Conium maculatum*; 3: *Brassica oleraceae* var. *Oleraceae*; 4: *Conyza canadensis*; 5: *Pelargonium hortorum*; 6: *Datura stramonium*

\*\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

Genel olarak kök dokularındaki Cr giderimi, gövdede tespit edilen giderimden fazla olmuştur. Ortalama olarak gövdede birikim köklere kıyasla 4 kat daha düşük gerçekleşmiştir. Bitki çeşitlerinden *Conium maculatum* kök dokularında en fazla Cr gideren bitki olmuş, gövdede giderilen Cr bakımından hiperbiriktirici *Brassica juncea* etkili bitki olmuştur (Tablo 4.21). *Brassica juncea* köklerinde daha fazla Cr'u alırken, en yüksek kök Cr giderim verimi *Conium maculatum*'da olmuş, bu durum bitkinin *Brassica juncea*'ya göre oluşturduğu yüksek kök biyokütlesine bağlanmıştır.

Metal gideriminde en etkili katkı maddesi EDTA etkili olmuştur. EDTA'nın kök metal alımını artırıcı etkisi en fazla *Conium maculatum* bitkisinde olmuş (2908,33 mg kg<sup>-1</sup> kök), kontrole kıyasla Cr giderimini 5 kat artırmış, %81 oranında Cr'u gidermiştir. Gövdedeki metal gideriminde ise *Brassica juncea* bitkisinde EDTA uygulaması en iyi sonucu vermiş (1215,59 mg kg<sup>-1</sup> gövde), Cr giderim verimi kontrol bitkisine kıyasla 36 kat artmış, %97 oranında giderim verimi sağlanmıştır (Tablo 4.21). Elde edilen sonuçlar literatürde aynı bitkide saptanan sonuçlardan yüksek seyretmiştir [118].

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin kök ve gövde Pb giderim verimleri ortalamaları ve oluşan gruplar Tablo 4.22'de verilmiştir.



Tablo 4.22. Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Pb giderim verimleri ortalamaları (mg bitki<sup>-1</sup>) ve oluşan gruplar

Bitki*	Kök Uygulamalar**					Gövde Uygulamalar**				
	P1	P2	P3	P4	Ort.	P1	P2	P3	P4	Ort.
1	371,66	714,77	425,47	694,92	651,70a	200,59	1428,04	287,62	1531,38	861,90a
2	120,25	437,87	468,41	533,72	390,06d	129,03	437,61	387,29	585,13	384,77c
3	572,6	423,58	679,27	874,60	637,51b	132,31	901,43	603,34	1007,0	661,02b
4	331,31	381,71	512,99	283,80	377,45d	321,84	504,83	448,57	468,99	436,06c
5	483,01	291,10	262,58	402,18	359,72d	459,91	422,12	224,31	485,58	397,98c
6	449,42	510,17	526,00	458,71	486,07c	553,47	954,70	321,91	622,85	613,23b
Ort.	388,04d	499,86b	479,12c	541,32a	548,45	297,19d	774,78b	378,84c	783,49a	665,61

\*Bitki: 1: *Brassica juncea*; 2: *Conium maculatum*; 3: *Brassica oleraceae* var. *Oleraceae*; 4: *Conyza canadensis*; 5: *Pelargonium hortorum*; 6: *Datura stramonium*

\*\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

Cd giderim verimi ile benzer olarak kök dokularında tespit edilen Pb giderimi, gövdedekinden düşük olmuştur. Ortalama olarak kökteki birikim gövdeye kıyasla 1,2 kat daha düşük gerçekleşmiştir. Bu durum bitkilerin yüksek gövde biyokütlesi oluşturmalarına bağlanmıştır. Bitki çeşitlerinden hiperbiriktirici *Brassica juncea* kök ve gövde dokularında en fazla Pb gideren bitki olmuştur (Tablo 4.22).

EDTA bitki dokularındaki metal gideriminde en etkili kimyasal olmuş, kükürt bitkilerin metal veriminde ikinci dereceden etkili katkı maddesi olmuştur. Metal giderim verimine EDTA'nın etkisi en fazla *Brassica juncea* bitkisinde tespit edilmiş, kontrole kıyasla kök ve gövde metal giderimleri sırasıyla 2 ve 8 kat artmıştır (Tablo 4.22).

Dokularda saptanan konsantrasyonlar ile benzer olarak en yüksek verim *Brassica juncea*'nın kök ve gövdesinde tespit edilmiş (694,92 mg kg<sup>-1</sup> kök ve 1531,38 mg kg<sup>-1</sup> gövde), bitkinin kökündeki Pb giderim verimi kontrole kıyasla %47, gövdesinde ise %87 olmuştur (Tablo 4.22). Elde edilen verim literatürde daha önceden yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında yüksek çıkmıştır [62, 119]. Bu durum bitkinin yüksek biyokütle oluşturmaları ile ilişkilidir.

#### 4.3.4. Biyolojik biriktirme faktörü

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin kök biyolojik biriktirme faktörlerine ait varyans analiz sonuçları Tablo 4.23'de verilmiştir. Kök dokusunda tespit edilen biyolojik biriktirme faktörlerinin tamamı bitki çeşidi, kullanılan katkı

maddesinden ve interaksiyon etkisinden istatistiki olarak önemli derecede etkilenmiştir ( $p<0.001$ ) (Tablo 4.23).

Tablo 4.23. Kök biyolojik biriktirme faktörlerine ait değerlerin varyans analizi sonuçları

Varyasyon Kaynağı	KARELER ORTALAMASI						
	S.D.	Cu	Zn	Ni	Cd	Cr	Pb
Bitki (A)	5	47,42***	0,10***	0,42***	0,84***	0,26***	3,53***
Uygulama (B)	3	33,34***	0,06***	0,27***	0,04***	0,28***	1,21***
A*B	15	6,58***	0,01***	0,08***	0,07***	0,06***	1,38***
Hata	72	0,05	0,0003	0,001	0,004	0,0006	0,005

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin gövde biyolojik biriktirme faktörlerine ait varyans analiz sonuçları Tablo 4.24’de verilmiştir. Bitki köklerinde tespit edilen biyolojik biriktirme faktörlerine benzer olarak, gövdede tespit edilen biyolojik biriktirme faktörleri de bitki çeşidi, katkı maddesi ve interaksiyondan istatistiki olarak önemli bulunmuştur ( $p<0.001$ ) (Tablo 4.24).

Tablo 4.24. Gövde biyolojik biriktirme faktörlerine ait değerlerin varyans analizi sonuçları

Varyasyon Kaynağı	KARELER ORTALAMASI						
	S.D.	Cu	Zn	Ni	Cd	Cr	Pb
Bitki (A)	5	2,96***	0,019***	0,02***	1,76***	0,02***	8,61***
Uygulama (B)	3	1,76***	0,012***	0,005***	0,05***	0,008***	6,90***
A*B	15	1,03***	0,003***	0,005***	0,08***	0,01***	4,17***
Hata	72	0,006	0,0001	0,0003	0,01	0,00004	0,004

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin kök ve gövde Cu biyolojik biriktirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar Tablo 4.25’de verilmiştir.

Tablo 4.25. Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Cu biyolojik biriktirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar

Bitki*	Kök Uygulamalar**					Gövde Uygulamalar**				
	P1	P2	P3	P4	Ort.	P1	P2	P3	P4	Ort.
1	2,34	5,01	3,72	9,67	5,18a	0,13	1,43	0,41	2,63	1,15a
2	1,24	1,91	1,53	3,44	2,03c	0,17	0,31	0,27	0,73	0,37b
3	0,84	1,83	1,35	3,49	1,88c	0,11	0,14	0,14	0,32	0,18c
4	0,37	0,48	0,64	1,03	0,63d	0,61	0,09	0,38	0,37	0,36b
5	0,66	0,84	0,43	0,45	0,59d	0,37	0,42	0,32	0,51	0,41b
6	0,64	5,03	2,21	4,33	3,05b	1,70	1,33	0,34	1,22	1,15a
Ort.	1,01d	2,52b	1,64c	3,73a	2,22	0,52c	0,62b	0,31d	0,96a	0,60

\*Bitki: 1: *Brassica juncea*; 2: *Conium maculatum*; 3: *Brassica oleraceae* var. *Oleraceae*; 4: *Conyza canadensis*; 5: *Pelargonium hortorum*; 6: *Datura stramonium*

\*\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

Kök dokularında tespit edilen Cu biyolojik biriktirme faktörü (>1), gövdeden (<1) daha yüksek olmuş, deneme bitkileri Cu metalini kökte biriktirme eğilimi göstermişlerdir. Hem kök hem de gövdede en yüksek Cu biyolojik biriktirme faktörü hiperbiriktirici *Brassica juncea*'da saptanmıştır. Kök dokularındaki birikimde *Conyza canadensis* ve *Pelargonium hortorum* bitkileri hariç diğer bitkiler aktif olarak Cu'ı biriktirmiş, biriktirme faktörleri 1'den yüksek gerçekleşmiştir. Gövdedeki birikime baktığımızda ise *Brassica juncea* ve *Datura stramonium*'un Cu'ı dokularında biriktirdiği görülmüştür (Tablo 4.25).

Tüm uygulamalar kök dokularındaki biriktirme faktörlerinin 1'in üzerinde gerçekleşmesini sağlamış, en etkili uygulamalar EDTA ve kükürt olmuştur. EDTA'nın biyolojik biriktirme faktörünü artırıcı etkisi en fazla *Brassica juncea* bitkisinde olmuş, kontrole kıyasla kök ve gövde Cu biriktirme faktörünü sırasıyla 4 ve 20 kat artırmıştır. Cu'nın gövdeye taşınımında da EDTA ve kükürt uygulamaları etkili olmuş, bu etki özellikle *Brassica juncea* ve *Datura stramonium* bitkilerinde tespit edilmiş, bu uygulamalarda her iki bitkideki faktörler 1'in üzerinde olmuştur (Tablo 4.25).

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin kök ve gövde Zn biyolojik biriktirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar Tablo 4.26'da verilmiştir.

Tablo 4.26. Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Zn biyolojik biriktirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar

Bitki*	Kök Uygulamalar**					Gövde Uygulamalar**				
	P1	P2	P3	P4	Ort.	P1	P2	P3	P4	Ort.
1	0,18	0,26	0,23	0,47	0,28a	0,02	0,08	0,05	0,17	0,08c
2	0,10	0,14	0,10	0,22	0,14c	0,03	0,03	0,04	0,06	0,04de
3	0,10	0,11	0,08	0,15	0,11d	0,04	0,04	0,04	0,07	0,05d
4	0,05	0,06	0,09	0,04	0,06f	0,01	0,05	0,04	0,05	0,04e
5	0,08	0,10	0,07	0,08	0,08e	0,12	0,09	0,08	0,09	0,10b
6	0,04	0,28	0,11	0,24	0,17b	0,10	0,12	0,08	0,18	0,12a
Ort.	0,09d	0,16b	0,11c	0,20a	0,14	0,05c	0,07b	0,05c	0,10a	0,07

\*Bitki: 1: *Brassica juncea*; 2: *Conium maculatum*; 3: *Brassica oleraceae* var. *Oleraceae*; 4: *Conyza canadensis*; 5: *Pelargonium hortorum*; 6: *Datura stramonium*

\*\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

Tüm bitkilerde saptanan biyolojik biriktirme faktörleri 1'den düşük gerçekleşmiş, bitkiler hiperbiriktirici özellik gösterememişlerdir. Bu durum çalışmada kullanılan arıtma çamurunun Zn içeriğinin yüksek olmasından kaynaklanmıştır. Bitki çeşitlerinden *Brassica juncea* kök dokularında en yüksek biriktirme faktörü saptanan bitki olurken, gövdesinde en yüksek biriktirme faktörü saptanan bitki *Datura stramonium* olmuştur (Tablo 4.26).

Katkı maddelerinden birinci derecede EDTA ardından kükürt bitkilerin biyolojik biriktirme faktöründe etkili olmuş, fakat bu uygulamalarda biyolojik biriktirme faktörlerinin 1'in üzerine çıkmasını sağlayamamıştır (Tablo 4.26).

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin kök ve gövde Ni biyolojik biriktirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar Tablo 4.27'de verilmiştir.

Tablo 4.27. Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Ni biyolojik biriktirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar

Bitki*	Kök Uygulamalar**					Gövde Uygulamalar**				
	P1	P2	P3	P4	Ort.	P1	P2	P3	P4	Ort.
1	0,14	0,39	0,30	0,83	0,41b	0,05	0,07	0,05	0,14	0,08c
2	0,12	0,19	0,15	0,30	0,19d	0,05	0,04	0,03	0,07	0,05e
3	0,16	0,24	0,19	0,31	0,23c	0,05	0,06	0,05	0,08	0,06de
4	0,10	0,09	0,14	0,11	0,11e	0,02	0,08	0,09	0,10	0,07cd
5	0,18	0,16	0,10	0,08	0,13e	0,15	0,07	0,09	0,06	0,09b
6	0,18	0,75	0,40	0,72	0,51a	0,23	0,13	0,10	0,15	0,15a
Ort.	0,15d	0,30b	0,21c	0,39a	0,26	0,096a	0,076b	0,071b	0,10a	0,08

\*Bitki: 1: *Brassica juncea*; 2: *Conium maculatum*; 3: *Brassica oleraceae var. Oleraceae*; 4: *Conyza canadensis*; 5: *Pelargonium hortorum*; 6: *Datura stramonium*

\*\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

Çinko ile benzer şekilde deneme bitkilerinin dokularında hesaplanan biriktirme faktörleri 1'in üzerine çıkamamış, bitkiler aktif olarak Ni'i biriktirememişlerdir. İstatistiki olarak bitki dokularında en yüksek Ni biriktirme faktörü *Datura stramonium* bitkisinde saptanmıştır (Tablo 4.27).

EDTA biyolojik birikimde en etkili katkı maddesi olmuş, bunu kükürt takip etmiştir. Fakat bu iki uygulamada biriktirme faktörlerinin 1'in üzerine çıkmasını sağlayamamış, bitkiler Ni'i aktif olarak biriktirememişlerdir (Tablo 4.27).

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin kök ve gövde Cd biyolojik biriktirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar Tablo 4.28'de verilmiştir.

Tablo 4.28. Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Cd biyolojik biriktirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar

Bitki*	Kök Uygulamalar**					Gövde Uygulamalar**				
	P1	P2	P3	P4	Ort.	P1	P2	P3	P4	Ort.
1	0,17	0,44	0,21	0,81	0,41c	0,08	0,14	0,11	0,43	0,19c
2	0,24	0,16	0,19	0,22	0,20d	0,1	0,14	0,15	0,24	0,16cd
3	0,19	0,22	0,15	0,25	0,20d	0,07	0,08	0,07	0,11	0,08d
4	0,67	0,82	0,67	0,65	0,71a	0,24	1,06	0,69	0,71	0,92a
5	0,67	0,65	0,70	0,63	0,66ab	0,71	0,60	0,50	0,61	0,61b
6	0,68	0,63	0,64	0,55	0,62b	0,48	0,69	0,57	0,56	0,58b
Ort.	0,44b	0,49a	0,43b	0,52a	0,46	0,45a	0,45a	0,35b	0,44a	0,42

\*Bitki: 1: *Brassica juncea*; 2: *Conium maculatum*; 3: *Brassica oleraceae var. Oleraceae*; 4: *Conyza canadensis*; 5: *Pelargonium hortorum*; 6: *Datura stramonium*

\*\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

Kök dokularında tespit edilen Cd biriktirme faktörü gövdedekinden yüksek olmakla birlikte elde edilen değerler birbirine yakın olmuştur. İstatistiki olarak bitki dokularında saptanan en yüksek Cd biriktirme faktörü *Conyza canadensis* bitkisinde olmuştur (Tablo 4.28).

EDTA ve kükürt uygulamaları, en etkili katkı maddeleri olmuş, bununla birlikte bu iki uygulama bitkilerin Cd’u kökte biriktirmelerinde yeterli olmamış, biyolojik biriktirme faktörleri kökte 1’in altında seyretmiştir. Gövdede ise 1’in üzerinde gerçekleşen biriktirme faktörü yalnızca kükürt uygulanmış *Conyza canadensis* bitkisinde olmuş, faktör değeri 1’in üzerine çıkmıştır (Tablo 4.28). Elde edilen sonuçlar bitkinin kükürt ilavesinde Cd’u gövdesinde hiperbiriktirdiğini göstermiş, sonuçlar konsantrasyon değerleri ile uyumlu çıkmıştır.

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin kök ve gövde Cr biyolojik biriktirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar Tablo 4.29’da verilmiştir.

Tablo 4.29. Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Cr biyolojik biriktirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar

Bitki*	Kök Uygulamalar**					Gövde Uygulamalar**				
	P1	P2	P3	P4	Ort.	P1	P2	P3	P4	Ort.
1	0,07	0,36	0,26	0,69	0,35a	0,01	0,14	0,05	0,26	0,12a
2	0,07	0,31	0,08	0,40	0,21c	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01cd
3	0,17	0,18	0,10	0,30	0,19d	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01d
4	0,02	0,04	0,04	0,04	0,04e	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01c
5	0,06	0,05	0,02	0,03	0,04e	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01cd
6	0,08	0,54	0,19	0,38	0,30b	0,11	0,02	0,01	0,02	0,04b
Ort.	0,08d	0,25b	0,12c	0,31a	0,19	0,03b	0,03b	0,01c	0,06a	0,03

\*Bitki: 1: *Brassica juncea*; 2: *Conium maculatum*; 3: *Brassica oleraceae* var. *Oleraceae*; 4: *Conyza canadensis*; 5: *Pelargonium hortorum*; 6: *Datura stramonium*

\*\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

Cr ağır metali için hesaplanan biyolojik biriktirme faktörleri gövdeye nazaran kök dokularında daha yüksek olmuş, bitki çeşitlerinden *Brassica juncea* istatistiki açıdan dokularında en yüksek biriktirme faktörü saptanan bitki olmuştur (Tablo 4.29). Bununla birlikte Ni ve Zn ile benzer şekilde tüm bitkilerde saptanan faktörler 1’in altında olmuş, bitkiler Cr’u hiperbiriktirici özellik gösterememişlerdir. Bu durum hem bitkilerin Cr’u

düşük alışlarına hem de çamurdaki başlangıç Cr muhtevasının düşük olmasına bağlanabilir.

Katkı maddelerinden birinci derecede EDTA ve ardından kükürt istatistki açıdan deneme bitkilerine ait biriktirme faktörlerinde etkili olmuş, fakat bu uygulamalar biyolojik biriktirme faktörlerinin 1'den büyük olmasını sağlayamamış, bitkiler Cr'u hiperbiriktirici özellik gösterememişlerdir (Tablo 4.29).

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin kök ve gövde Pb biyolojik biriktirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar Tablo 4.30'da verilmiştir.

Tablo 4.30. Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin kök ve gövde Pb biyolojik biriktirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar

Bitki*	Kök Uygulamalar**					Gövde Uygulamalar**				
	P1	P2	P3	P4	Ort.	P1	P2	P3	P4	Ort.
1	0,64	1,87	0,73	3,59	1,71a	0,01	2,82	0,43	5,63	2,22a
2	0,10	0,37	0,39	0,52	0,34e	0,12	0,35	0,30	0,55	0,33e
3	0,51	0,55	0,58	0,80	0,61d	0,09	0,64	0,39	0,71	0,46c
4	0,63	0,71	0,99	0,55	0,72c	0,32	0,47	0,46	0,48	0,43cd
5	0,98	0,57	0,51	0,47	0,63d	0,50	0,45	0,21	0,48	0,41d
6	0,72	0,91	0,84	0,72	0,80b	0,45	0,97	0,21	0,44	0,52b
Ort.	0,60d	0,83b	0,67c	1,11a	0,80	0,25d	0,95b	0,33c	1,38a	0,73

\*Bitki: 1: *Brassica juncea*; 2: *Conium maculatum*; 3: *Brassica oleraceae* var. *Oleraceae*; 4: *Conyza canadensis*; 5: *Pelargonium hortorum*; 6: *Datura stramonium*

\*\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

Genel olarak kök Pb biriktirme faktörü gövdeye nazaran yüksek olmakla birlikte elde edilen değerler birbirine yakın çıkmıştır. Bitki çeşitlerinden hiperbiriktirici *Brassica juncea* dokularında 1'in üzerinde Pb biriktirme faktörü saptanan bitki olmuştur (Tablo 4.30).

Kök ve gövdedeki Pb biriktirme faktörü açısından önceki uygulamalarla benzer şekilde EDTA ve kükürt en etkili katkı maddeleri olmuştur. Bu katkı maddelerinin etkisi en fazla *Brassica juncea* bitkisinde saptanmış, bu uygulamalar bitkideki faktör değerlerinin 1'in üstüne çıkmasını sağlamıştır. Sonuç olarak bu iki uygulama literatür ile benzer şekilde bitkinin Pb'u hiperbiriktirmesini sağlamıştır (Tablo 4.30).

Her bitki için ayrı ayrı hesaplanan biyolojik biriktirme faktörlerine baktığımızda deneme bitkilerinin ağır metallere Cu, Cd ve Pb'ü aktif olarak biriktirdiği belirlenmiştir. Cu metali için çamurdan bitkiye en yüksek birikim hiperbiriktirici *Brassica juncea*'da saptanmış, bitkinin köklerinde saptanan biyolojik biriktirme faktörü 9'lara kadar yükselmiştir. EDTA uygulaması bitkilerin metali almalarında çok etkili olmuş, en yüksek biriktirme faktörleri de bu uygulamada gerçekleşmiştir. Bu bitkiden sonra hiperbiriktirici özellik gösteren bitki *Datura stramonium* olmuş, bu bitki hem kökte hem de gövdede Cu metalini hiperbiriktirebilmiştir. Her iki bitki için tüm uygulamalarda biriktirme faktörü >1 olarak bulunmuştur (Tablo 4.25). Cd metali için ise *Conyza canadensis*'de hiperbirikim gözlenmiş, bitki EDTA uygulamasına nazaran kükürt uygulamasında aktif olarak Cd'ü biriktirmiştir (Tablo 4.28). Pb metalinde ise hiperbirikim sadece *Brassica juncea*'da gözlenmiş, bitki kükürt ve EDTA uygulamalarında kurşunu çamurdan hiperbiriktirebilmiş ve bu uygulamalarda hesaplanan biyolojik biriktirme faktörü >1 olmuştur (Tablo 4.30). Sonuçlar literatürde daha önceden saptanan değerlerle uyumlu olmakla birlikte, çalışmada hesaplanan biyolojik biriktirme faktör değerleri, bu bitkilerin hiperbiriktirici olarak kabul edilebileceğini göstermektedir [9, 14, 16].

#### 4.3.5. Yer değiştirme faktörü

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin yer değiştirme faktörlerine ait varyans analiz sonuçları Tablo 4.31'de verilmiştir. Deneme bitkilerinde incelenen yer değiştirme faktörlerinin tamamı istatistiksel olarak bitki çeşidi, kullanılan katkı maddesinden ve interaksiyon etkisinden önemli derecede etkilenmiştir ( $p < 0.001$ ) (Tablo 4.31).

Tablo 4.31. Yer değiştirme faktörlerine ait değerlerin varyans analizi sonuçları

Varyasyon Kaynağı	KARELER ORTALAMASI						
	S.D.	Cu	Zn	Ni	Cd	Cr	Pb
Bitki (A)	5	1,93***	2,25***	0,77***	1,84***	0,88***	0,39***
Uygulama (B)	3	1,90***	0,38***	0,23***	0,07***	1,12***	1,97***
A*B	15	1,28***	0,65***	0,28***	0,21***	0,77***	0,41***
Hata	72	0,02	0,01	0,01	0,06	0,01	0,02



Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin Cu yer değiştirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar Tablo 4.32’de verilmiştir.

Tablo 4.32. Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin Cu yer değiştirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar

Bitki*	Uygulamalar**				Ort.
	P1	P2	P3	P4	
1	0,05	0,28	0,11	0,27	0,18c
2	0,14	0,16	0,18	0,21	0,17c
3	0,13	0,07	0,10	0,09	0,10c
4	0,66	0,22	0,60	0,36	0,71b
5	0,57	0,50	0,80	1,22	0,77ab
6	0,70	0,26	0,15	0,28	0,85a
Ort.	0,40b	0,25b	0,32b	0,87a	0,46

\*Bitki: 1: *Brassica juncea*; 2: *Conium maculatum*; 3: *Brassica oleracea* var. *Oleracea*; 4: *Conyza canadensis*; 5: *Pelargonium hortorum*; 6: *Datura stramonium*

\*\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

Yer değiştirme faktörü bitkilerin metalleri toprak üstü dokularına taşıma yeteneklerini göstermektedir. Önceki bölümlerde bitki dokularında saptanan Cu konsantrasyonları gövdeye göre kök dokusunda yüksek çıkmış, buda bitkilerdeki yer değiştirme faktörlerinin genel olarak 1’den düşük olmasına neden olmuş, bu durumda da bitkiler Cu’ı aktif olarak gövdelerine taşıyamamışlardır. Bu durum bitkilerin gövde dokularında köklere nazaran düşük konsantrasyonlarda metali biriktirmelerinden kaynaklanmıştır. 1 değerinin üstünde yer değiştirme faktörü saptanan tek bitki *Pelargonium hortorum* olmuş, EDTA uygulaması bitkinin Cu’ı gövdesine nakletmesini sağlamıştır (Tablo 4.32).

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin Zn yer değiştirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar Tablo 4.33’de verilmiştir.

Tablo 4.33. Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin Zn yer değiştirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar

Bitki*	Uygulamalar**				Ort.
	P1	P2	P3	P4	
1	0,15	0,33	0,22	0,37	0,26e
2	0,30	0,27	0,39	0,30	0,31e
3	0,36	0,37	0,51	0,50	0,43d
4	0,24	0,83	0,50	1,18	0,69c
5	1,6	0,88	1,11	1,02	1,15a
6	2,20	0,43	0,75	0,73	1,03b
Ort.	0,81a	0,52d	0,58c	0,68b	0,64

\*Bitki: 1: *Brassica juncea*; 2: *Conium maculatum*; 3: *Brassica oleraceae* var. *Oleraceae*; 4: *Conyza canadensis*; 5: *Pelargonium hortorum*; 6: *Datura stramonium*

\*\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

Zn metalinde tespit edilen yer değiştirme faktörleri bitki çeşidi ve uygulanan katkı maddesi bakımından istatistiki olarak farklı bulunmuştur. *Pelargonium hortorum* en yüksek yer değiştirme faktörünü oluşturmuş, bitki kükürt uygulaması hariç diğer tüm uygulamalarda 1'in üzerinde ( $\geq 1$ ) yer değiştirme faktörü sergileyerek, Zn metalini aktif olarak gövdeye taşımıştır. Elde edilen 1'e yakın yer değiştirme faktörleri, bitkinin kök ve gövde metal konsantrasyonlarının birbirine yakın olmasından kaynaklanmıştır. EDTA ve kontrol uygulamalarında bitkilerin metalleri gövdeye aktarmaları etkili olmuş, kükürt beklenenin aksine metallerin gövdeye taşınımında etkili olamamış, en düşük yer değiştirme faktörünü sağlamıştır (Tablo 4.33).

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin Ni yer değiştirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar Tablo 4.34'de verilmiştir.

Tablo 4.34. Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin Ni yer değiştirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar

Bitki*	Uygulamalar**				Ort.
	P1	P2	P3	P4	
1	0,37	0,17	0,17	0,17	0,22d
2	0,49	0,24	0,21	0,24	0,30c
3	0,31	0,27	0,28	0,26	0,28cd
4	0,30	0,86	0,65	0,94	0,68a
5	0,82	0,44	0,91	0,77	0,74a
6	1,23	0,17	0,26	0,21	0,47b
Ort.	0,59a	0,36b	0,41b	0,43b	0,45

\*Bitki: 1: *Brassica juncea*; 2: *Conium maculatum*; 3: *Brassica oleraceae* var. *Oleraceae*; 4: *Conyza canadensis*; 5: *Pelargonium hortorum*; 6: *Datura stramonium*

\*\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

*Datura stramonium* hariç diğer deneme bitkileri Ni'i gövde dokularına aktaramamış, elde edilen yer değiştirme faktörleri <1 olmuştur. Bu durum bitkilerin Ni'i gövdeye kıyasla kök dokularında biriktirmelerinden kaynaklanmıştır. Farklı katkı maddelerinin yer değiştirme faktörüne etkisi benzer ve az olmuştur (Tablo 4.34).

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin Cd yer değiştirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar Tablo 4.35'de verilmiştir.

Tablo 4.35. Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin Cd yer değiştirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar

Bitki*	Uygulamalar**				Ort.
	P1	P2	P3	P4	
1	0,52	0,32	0,57	0,53	0,49c
2	0,44	0,86	0,82	1,11	0,81b
3	0,36	0,36	0,45	0,45	0,40c
4	1,85	1,36	1,03	1,08	1,33a
5	1,08	0,92	0,72	1,08	0,95b
6	0,72	1,10	0,90	1,02	0,93b
Ort.	0,83b	0,82b	0,75c	0,88a	0,82

\*Bitki: 1: *Brassica juncea*; 2: *Conium maculatum*; 3: *Brassica oleraceae* var. *Oleraceae*; 4: *Conyza canadensis*; 5: *Pelargonium hortorum*; 6: *Datura stramonium*

\*\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

En yüksek Cd yer değiştirme faktörü *Conyza canadensis* bitkisinde saptanmış, tüm uygulamalarda bitkide saptanan değerler 1'in üzerinde olmuştur. Bunun nedeni olarak bitkinin gövdesinde köklere göre daha fazla Cd biriktirmesi görülmüştür. Katkı maddelerinin etkisi en yüksek EDTA uygulamasında olmuş, *Brassica juncea* ve *Brassica oleraceae* bitkileri hariç diğer tüm bitkilerde yer değiştirme faktörlerini 1'in üzerinde seyretmiş, bitkiler Cd'u aktif olarak gövde dokularına nakletmişlerdir (Tablo 4.35).

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin Cr yer değiştirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar Tablo 4.36'da verilmiştir.

Tablo 4.36. Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin Cr yer değiştirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar

Bitki*	Uygulamalar**				Ort.
	P1	P2	P3	P4	
1	0,10	0,38	0,19	0,38	0,26c
2	0,08	0,02	0,07	0,08	0,06d
3	0,04	0,05	0,08	0,06	0,06d
4	1,84	0,17	0,28	0,26	0,64a
5	0,27	0,21	0,62	0,82	0,48b
6	0,47	0,04	0,05	0,07	0,41b
Ort.	0,28b	0,15d	0,22c	0,43a	0,32

\*Bitki: 1: *Brassica juncea*; 2: *Conium maculatum*; 3: *Brassica oleraceae* var. *Oleraceae*; 4: *Conyza canadensis*; 5: *Pelargonium hortorum*; 6: *Datura stramonium*

\*\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

Cd ile benzer şekilde en yüksek Cr yer değiştirme faktörü *Conyza canadensis* bitkisinde tespit edilmiş, bitki kontrol uygulamasında gövdesinde köke göre daha fazla Cr biriktirerek >1 yer değiştirme faktörünü sağlamış ve dolayısıyla gövdeye Cr metalini aktif olarak gövdeye taşımıştır. Farklı katkı maddelerinin Cr yer değiştirme faktörüne etkisi en yüksek EDTA uygulamasında olmuştur (Tablo 4.36).

Farklı yetiştirme ortamlarında yetiştirilen altı farklı bitkinin Pb yer değiştirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar Tablo 4.37’de verilmiştir.

Tablo 4.37. Farklı yetiştirme ortamlarında altı farklı bitkinin Pb yer değiştirme faktör ortalamaları ve oluşan gruplar

Bitki*	Uygulamalar**				Ort.
	P1	P2	P3	P4	
1	0,01	1,51	0,59	1,56	0,92a
2	1,24	0,97	0,76	1,06	1,01a
3	0,17	1,17	0,67	0,88	0,73b
4	0,53	0,67	0,47	0,89	0,64b
5	0,51	0,79	0,41	1,01	0,68b
6	0,63	1,08	0,25	0,62	0,65b
Ort.	0,52b	1,03a	0,53b	1,00a	0,77

\*Bitki: 1: *Brassica juncea*; 2: *Conium maculatum*; 3: *Brassica oleraceae* var. *Oleraceae*; 4: *Conyza canadensis*; 5: *Pelargonium hortorum*; 6: *Datura stramonium*

\*\*Uygulamalar: P1: Kontrol; P2: Kükürt; P3: Tarımsal jips; P4: Edta

Biyolojik biriktirme faktör değerlerinin aksine bitkilerde saptanan yer değiştirme faktörleri çoğunlukla  $\leq 1$  şeklinde olmuş, bunun nedeni olarak bitkilerin kök ve gövdelerinde yakın konsantrasyonlarda Pb biriktirmeleri görülmüştür. Farklı bitkilerin yer değiştirme faktörüne etkisi istatistiki açıdan çok farklı bulunmamış, en yüksek Pb

yer değiştirme faktörü *Brassica juncea* ve *Conium maculatum* bitkilerinde tespit edilmiştir. Yer değiştirme faktörüne katkı maddelerinin etkisinde EDTA ve kükürt uygulamaları en etkili katkı maddeleri olmuş, faktör değerlerinin 1'in üzerine çıkmasını sağlamıştır (Tablo 4.37).

Bitkilerin metalleri toprak üstü dokularına nakletme yeteneklerini gösteren yer değiştirme faktörlerine genel olarak baktığımızda, deneme bitkilerinin Cd ve Pb'u aktif olarak üst dokularına naklettiği görölmektedir (Tablo 4.35, Tablo 4.37). Cu, Ni ve Cr metallerinin ise bitkiler tarafından toprak üstü dokulara taşınmaları düşük gerçekleşmiştir. EDTA uygulaması metallerin taşınmalarında etkili olurken, *Conyza canadensis* Cd metalinin kökten gövdeye taşınımında tüm uygulamalar için etkili bitki olmuştur (Tablo 4.35). Pb metalinde ise *Brassica juncea*'da en yüksek yer değiştirme faktörleri saptanmış, kükürt ve EDTA bu bitkideki metal taşınımında etkili maddeler olmuştur (Tablo 4.37). Saptanan değerler Bricker ve ark. (2001)'nin buldukları değerlerle benzer olmuş [119], Kumar ve ark. (1995)'nin buldukları değerlerden ise düşük gerçekleşmiştir [16].

## BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu araştırmanın amacı, arıtma çamurlarının içerdiği ağır metallerin daha önce çalışılmamış yerel bitkiler tarafından giderimini ve bu giderime kükürt, tarımsal jips ve EDTA kimyasallarının etkisini belirlemektir. Deneme bitkilerinin ağır metal alımları ve farklı uygulamaların bitki metal giderimine etkisine ilişkin elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

Sonuçlar incelendiğinde, genel olarak köklerde saptanan ağır metal konsantrasyonlarının gövdeye nazaran yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum denemede test edilen ağır metallere Ni, Cd ve Zn'nun gövde dokusuna orta derecede taşınan özellikte olmalarına, Cu, Cr ve Pb'nun ise kök hücrelerine güçlü bağlanıp gövdeye zor taşınan metaller olarak kabul edilmelerine bağlanmıştır. En yüksek metal konsantrasyonları hiperbiriktirici *Brassica juncea*'da saptanmış, bitki Cu, Cr ve Pb'ü hem kök hem de gövde dokusunda yüksek konsantrasyonlarda biriktirmiştir. EDTA uygulaması ise metallerin alımında en etkili uygulama olmuştur. Bitkideki en yüksek konsantrasyonlar Cu: 109,92 mg kg<sup>-1</sup> kök-48,82 mg kg<sup>-1</sup> gövde, Cr: 169,58 mg kg<sup>-1</sup> kök-64,69 mg kg<sup>-1</sup> gövde ve Pb: 42,27 mg kg<sup>-1</sup> kök-81,5 mg kg<sup>-1</sup> gövde olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürde aynı türlere ait bitkilerde saptanmış konsantrasyonlarla uyumlu çıkmıştır. Bitkilerin hasadının ardından arıtma çamurlarında tekrarlanan ağır metal analizlerinde *Brassica juncea*'nın arıtma çamurundaki Cr'un %65'ini bünyesinde biriktirdiği, %35'lik kısmın ise çamurda kaldığı ve bitki tarafından alınmadığı saptanmıştır. Bu durum çamur bünyesindeki Cr'un yaklaşık %65'lik kısmının bitki tarafından kolay alınabilir formda olduğunu, geri kalan miktarın ise çamurda alınmaz formda olduğunu göstermiştir. Aynı bitkideki Pb birikiminde ise arıtma çamurundaki Pb'nun yaklaşık %54'ünün bitkilerle giderildiği, geri kalan %46'lık kısmın ise bitkiler tarafından alınmadığı tespit edilmiştir. Merrington ve ark. (2003) çalışmalarında arıtma çamurlarındaki toplam Pb'nun %58'inin mineral kısımda (oksidlenebilir ve tortu

kısım) olduğunu belirtmişlerdir [28]. Elde edilen sonuçlar literatür verileri ile uyumlu olmakla birlikte, EDTA ilavesiyle alınabilirliği düşük olan Pb'nun çözünürlüğü sağlanarak, bitki tarafından alımı artırılmıştır.

*Conyza canadensis* ve *Pelargonium hortorum* bitkileri hariç diğer tüm deneme bitkileri köklerinde literatürde belirtilen yeterli düzeyin üstünde Cu'ı biriktirmiş, bitkiler Cu metalini ihtiyaçlarının üzerinde konsantre etmiştir [121]. Gövde dokularında ise yeterli düzeyin üzerinde birikim gösteren bitkiler *Brassica juncea* ve *Datura stramonium* olmuş, bu iki bitki Cu'ı hem toprak üstü aksamalarına taşımış hem de ihtiyaçları üzerinde biriktirmişlerdir. Aynı zamanda arıtma çamurundaki Cu'nun %65'inin bitki tarafından alındığı, çamurda kalan %34'lük kısmın ise bitki tarafından alınabilirliği düşük formda olduğu belirlenmiştir.

Kök dokusunda en yüksek Zn konsantrasyonu *Brassica juncea*'da saptanırken (680,99 mg kg<sup>-1</sup> kök), bitki Zn'yu gövde dokusuna taşıyamamış en yüksek gövde konsantrasyonu *Datura stramonium*'da olmuş (259,45 mg kg<sup>-1</sup> gövde), bu bitki Zn'yu etkili bir biçimde gövdesine taşımıştır. En etkili uygulamalar ise başta EDTA ardından kükürt olmuştur. Bitkilerin hasadının ardından saksılarda kalan arıtma çamurlarında tespit edilen Zn seviyelerine bakıldığında ise arıtma çamurundaki toplam Zn'nun EDTA ve kükürt uygulamalarında bitkiler tarafından sadece %23 oranında alındığı, çamurda kalan %76'lık kısmın ise bitkiler tarafından alınmadığı saptanmıştır.

Kontrole kıyasla bitkilerin dokularında saptanan Zn konsantrasyonları daha önceden yapılan çalışmalara nazaran düşük çıkmış, bu durum bitkilerin yetiştirildiği arıtma çamurunun Zn içeriğinin düşük olmasına bağlanmıştır. Sridhar ve ark. (2005)'da düşük Zn konsantrasyonlarına tabi tuttıkları bitkilerde benzer sonuçlar almışlardır [117]. Bununla birlikte tüm deneme bitkileri Zn'yu köklerinde, büyümeleri için yeterli Zn seviyelerinin üzerinde biriktirmiştir. Gövdedeki Zn konsantrasyonlarında ise *Brassica juncea*, *Pelargonium hortorum* ve *Datura stramonium* yeterli düzeyin üzerinde Zn birikimini gerçekleştirmiş, bitkiler gövde dokularında toksik seviyelerdeki Zn'yu tolere etmiştir.

Cd metalinde öne çıkan bitki *Conyza canadensis* olmuş, bitki kök ve gövdesinde sırasıyla 2,81 mg kg<sup>-1</sup> ve 3,61 mg kg<sup>-1</sup> Cd saptanmıştır. Kükürt ilavesi sonucunda pH'daki azalmanın bitkilerin gövdesindeki Cd konsantrasyonundaki etkisi daha fazla olmuş, kükürt uygulamasında en yüksek Cd konsantrasyonu bu çalışmada ilk kez denenen *Conyza canadensis*'de saptanmıştır. Kükürt bu bitkide hem Cd konsantrasyonlarını artırmış hem de Cd'un kökten gövdeye etkili taşınımını sağlamıştır. Hasat sonrası saksılarda kalan çamurda Cd konsantrasyonları tespit edilmiş, kükürt uygulamasında *Conyza canadensis*'in çamurdaki Cd'un %68'ini dokularına aldığı, geri kalan %31'lik kısmın ise bitki tarafından zor alınabilir formda olduğu saptanmıştır. Diğer uygulamalarda bu oran düşmüştür. Bununla birlikte arıtma çamurunun Cd muhtevasının düşük olması ve çamur bünyesindeki Cd'un organik maddeye bağlanıp alınabilirliğinin düşük gerçekleşmesi bitkilerdeki Cd konsantrasyonlarının nispeten düşük olmasına neden olmuştur.

En yüksek Ni konsantrasyonları *Datura stramonium* bitkisinde tespit edilmiş, kök ve gövde Ni konsantrasyonları 57,29 mg kg<sup>-1</sup> ve 18,42 mg kg<sup>-1</sup> olmuştur. Bitki dokularında saptanan Ni konsantrasyonları literatürde hiperbiritirici bitkilerde saptanan Ni konsantrasyonlarından düşük çıkmıştır. Bu durum bitkilerin yetiştiği arıtma çamurunun Ni muhtevasının düşük olmasından kaynaklanmıştır. EDTA ve kükürt uygulamaları en etkili uygulamalar olmuş hasat sonrası çamurda kalan ağır metallerin tespiti, bize bitkinin bu uygulamalarda başlangıç Ni konsantrasyonunun %74'ünün bitki tarafından alındığını, %25'inin ise çamurda kaldığını göstermiştir.

Deneme bitkilerinden *Brassica juncea*, *Datura stramonium* ve *Conyza canadensis* dokularında saptanan yüksek metal konsantrasyonları ile öne çıkan bitkiler olmuş, *Conium maculatum*, *Brassica oleraceae* var. *oleraceae* ve *Pelargonium hortorum* bitkileri hiperbiritirici özellik gösterememişler, bu bitkilerde tespit edilen metal konsantrasyonları literatürde bitki dokularında olması gereken yeterli konsantrasyon aralığında kalmıştır. EDTA kimyasalı Cd metali hariç diğer tüm metallerde en etkili metal alımını sağlayan uygulama olmuş, en yüksek konsantrasyonlar EDTA ilave edilen bitkilerde saptanmıştır. Bitkilerin Cd alımlarında ise EDTA'ya kıyasla pH düşürücü özelliği ile kükürt en etkili uygulama olmuş, *Conyza canadensis*'deki en yüksek Cd konsantrasyonları kükürt ilavesinde tespit edilmiştir. Genel olarak ise



kükürt, EDTA'nın ardından ikinci en etkili uygulama olmuştur. Kükürdün gövdeye taşınımını artırıcı etkisi Pb'da daha belirgin olmuş, kükürt uygulaması Pb'nun gövdeye nakledilmesini artırmıştır. Sonuç olarak kükürt ilavesi EDTA ile benzer şekilde Pb'nun kökten gövdeye taşınımında etkili olmuş, bu durum hem bitkilerin metalleri nakletme yeteneklerine hem de kükürdün pH'yı düşürücü etkisine bağlanmıştır. Jips uygulaması bitkilerdeki metal birikiminde etkili olamamış, bunun nedeni tarımsal jipsin bileşiminde bulunan kalsiyumun, bikarbonat ( $\text{HCO}_3$ ) anyonları ile birleşerek  $\text{CaCO}_3$  şeklinde çökelirken ortamda bulunan ağır metalleri de çöktürmesine ve dolayısıyla metallerin bitkiler tarafından alınabilirliğinin azalmasına bağlanmıştır.

Metal giderimlerine baktığımızda, EDTA ve kükürt ilavesi çamur bünyesindeki metallerin çözünürlüğünü artırarak, bitki tarafından alımlarını artırmıştır. Kontrol ve jips uygulamaları ise genel olarak kolay alınabilir formdaki metallerin bitkiler tarafından alımını sağlamış, metallerin çözünürlüklerinin artırılmasında herhangi bir etkide bulunmamış, metal giderimleri de bu uygulamalarda düşük gerçekleşmiştir. Fitoekstraksiyon proseslerinde genel olarak metal ekstraksiyon oranını dönüşümlü olarak devam ettirebilecek bitkilere ihtiyaç vardır. Fakat çamurun kompleks kimyasal yapısı metallerin farklı formlarda olmalarına neden olmakta ve bu durum bitkilerin metal alımlarını zorlaştırmaktadır. Elde edilen sonuçlar arıtma çamurlarından metallerin bitkilerle gideriminde metal çözünürlüğünü artırıcı kimyasalların önemini bir kez daha ortaya çıkarmıştır. Ayrıca hasat zamanını optimize etmek için daha çok bilgiye ihtiyaç vardır. Çünkü bitkide metal birikim oranı azaldığında, bitki hasat edilmelidir. Böylece her bir büyüme döngüsünün sürekliliği azaltılarak bir büyüme mevsiminde daha çok mahsulün hasat edilmesi söz konusu olacaktır. Çalışmada denenen bitkiler çamurdaki mevcut ağır metalleri ortalama olarak %65 oranında giderebilmiştir. Geri kalan %35'lik kısım ise bitki tarafından düşük alınabilir formda olmakla birlikte bu kısmın bitki tarafından alımını sağlamak ancak şelatlayıcı kimyasalların ilavesi ile söz konusu olabilir. Bununla birlikte organik maddenin ayrışmasının devam etmesi metallerin serbest iyon halinde çözeltiye aktarılmasını devam ettirmekte, böylelikle bir sonraki bitkinin aynı çamurda büyümesinin sağlanması ile arıtma çamurunun metal muhtevasının çok düşük seviyelere çekilmesi sağlanacaktır.

Bitki dokularındaki metal konsantrasyonlarının biyokütle ile çarpıcı sonucunda elde edilen metal giderim verimlerine baktığımızda ise Zn, Ni ve Pb giderim verimleri, bitki dokularındaki konsantrasyonlar ile doğru orantılı olmuş, Ni gideriminde *Datura stramonium*, Pb gideriminde *Brassica juncea*, Zn gideriminde kökte *Brassica juncea*, gövdede *Datura stramonium* en yüksek metal giderim verimlerini sağlayan bitkiler olmuştur. Zn, Ni ve Pb için elde edilen ortalama kök: gövde giderim verimleri sırasıyla  $7325,74 \text{ mg kg}^{-1}$ :  $6662,09 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $722,28 \text{ mg kg}^{-1}$ :  $452,90 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $651,70,89 \text{ mg kg}^{-1}$ :  $861,90 \text{ mg kg}^{-1}$  şeklindedir. Hiperbiriktirici *Brassica juncea*'da saptanan Zn giderim verimi daha önceden yapılan çalışmalarda tespit edilen değerlerden düşük çıkmıştır. Bu durum bitkinin yetiştirildiği arıtma çamurunun Zn muhtevasının düşük ve bitkilere sınırlı kök yayılma alanı veren saksı içinde yetiştirilmesinden kaynaklanmıştır. Aynı durum Ni içinde geçerli olmuş, bu durum arıtma çamurunun düşük Ni muhtevasına ve dolayısıyla Ni konsantrasyonlarının da düşük gerçekleşmesine bağlanmıştır.

Bitki dokularındaki Cu giderim veriminde *Brassica juncea* kök dokularında en fazla Cu ( $1713,03 \text{ mg kg}^{-1}$ ) gideren bitki olurken, gövdedeki en yüksek giderim verimi *Datura stramonium*'da saptanmıştır ( $766,70 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Cd giderim veriminde de konsantrasyon ile benzer doğrultuda en yüksek verim *Conyza canadensis* bitkisinde ( $36,97 \text{ mg kg}^{-1}$  kök ve  $93,08 \text{ mg kg}^{-1}$ ) olmuş, farklı olarak en etkili uygulama EDTA kimyasalı olmuştur. Bitki dokularında saptanan Cr konsantrasyonlarında farklı olarak en yüksek kök giderim verimi bitki çeşitleri arasında en yüksek kök biyokütlesini oluşturan *Conium maculatum*'da saptanmış ( $1686,95 \text{ mg kg}^{-1}$ ), gövdede ise konsantrasyonlar ile doğru orantılı olarak *Brassica juncea* en yüksek verimi sağlayan bitki olmuştur ( $558,31 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Tüm deneme bitkilerinde en etkili uygulama EDTA olmuş, bunu kükürt takip etmiştir. EDTA bitki için zehirli olan metallerin hareketliklerini artırıp bitkilerin metal alımını artırırken aynı zamanda bitki büyümesi için gerekli temel elementlerinde bitki dokusuna geçişlerini sağlamış ve böylece bitkiler bu uygulamada hem yüksek biyokütle hem de yüksek giderim verimleri sağlamışlardır. Dolayısıyla kükürdün pH düşürücü etkisinden ziyade EDTA'nın element alımını artırıcı etkisi metal giderim verimlerinde daha fazla olmuştur.

Literatürde arıtma çamurları içindeki organik maddenin yaklaşık %40–50 kadarının oldukça hızlı ayrıştığı, kalan kısmın ise yavaş ayrıştığı belirtilmektedir [3]. Organik madde ayrışıkça bağlı iz elementler çözünebilir forma dönüşmekte ve bitki alımı için uygun hale gelmektedir. Bu sebeple ilk etapta bitkinin çamurdan ağır metal alımları düşük gerçekleşmekte, organik maddenin zamanla ayrışması ile metaller alınabilir forma dönüşmektedir. Bu çalışmada kullanılan arıtma çamurunun organik maddesi bitki denemesinin sonunda fazla azalmamış, buda bitkilerin metal alımlarını düşürmüştür. Bu çamurda kolay ayrışabilir organik maddenin mikrobiyal parçalanması devam etmekte böylelikle metallerin alınabilir formlara dönüşmesi sürmektedir.

Her bitki için ayrı hesaplanan biyolojik biriktirme faktörlerine baktığımızda deneme bitkilerinin ağır metallere Cu, Cd ve Pb’u aktif olarak biriktirdiği belirlenmiştir. Cu metali için çamurdan bitkiye en yüksek birikim hiperbiriktirici *Brassica juncea*’da saptanmış, bitkinin köklerinde saptanan biyolojik biriktirme faktörü 9’lara kadar yükselmiştir. EDTA uygulaması bitkilerin metal alımlarında çok etkili olmuş, en yüksek biriktirme faktörleri de bu uygulamada gerçekleşmiştir. *Brassica juncea*’dan sonra hiperbiriktirici özellik gösteren bitki *Datura stramonium* olmuş, bu bitki hem kökte hem de gövdede Cu metalini hiperbiriktirebilmiştir. Her iki bitki için tüm uygulamalarda biriktirme faktörü >1 olarak bulunmuştur. Diğer deneme bitkileri Cu’ı çoğunlukla kök dokularında biriktirmeye yönelmiş ve köklerdeki faktörler gövdeye kıyasla daha yüksek gerçekleşmiştir. Cd metali için ise *Conyza canadensis*’de hiperbirikim gözlenmiş, bitki EDTA uygulamasına nazaran kükürt uygulamasında aktif olarak Cd’u biriktirmiştir. Pb metalinde hiperbirikim sadece *Brassica juncea*’da gözlenmiş, bitki kükürt ve EDTA uygulamalarında kurşunu çamurdan hiperbiriktirebilmiş ve sadece bu uygulamadaki biyolojik biriktirme faktörü >1 olmuştur. Sonuçlar literatürde daha önceden saptanan değerlerle uyumlu olmakla birlikte, çalışmada hesaplanan biyolojik biriktirme faktör değerleri, bu bitkilerin hiperbiriktirici olarak kabul edilebileceğini göstermektedir. Deneme bitkileri Zn, Ni ve Cr’u aktif olarak dokularında biriktirememişler, tüm bitkilerde saptanan biyolojik biriktirme faktörleri 1’den düşük gerçekleşmiş, bitkiler hiperbiriktirici özellik gösterememişlerdir. Bu durum hem bitkilerin bu metalleri düşük alımlarına hem de çamurdaki başlangıç metal muhtevasının düşük olmasına

bağlanabilir. Bununla birlikte literatürde şimdiye kadar yapılan kapsamlı çalışmalarda bitkilerin topraktan metal giderimine odaklanılmış, toprak ve arıtma çamurlarının kimyasal yapılarının çok farklı olması ve çamurun kompleks yapısı sebebiyle de çamurdan metal giderimi daha farklı gerçekleşmiştir. Özellikle arıtma çamurlarının organik madde muhtevasının toprağa nazaran yüksek olması bitkilerin metal giderimlerinin düşük olmasına neden olmuş, bu da biyolojik biriktirme faktörlerinin 1'in altında seyretmesini sağlamıştır.

Bitkilerin metalleri gövde dokularına taşıma yeteneklerini gösteren yer değiştirme faktörlerine genel olarak baktığımızda, deneme bitkilerinin Cd ve Pb'u hemen hemen tüm uygulamalarda aktif olarak üst dokularına naklettiği tespit edilmiş, faktör değerleri  $>1$  olmuştur. EDTA uygulaması metallerin taşınmalarında etkili olurken, *Conyza canadensis* Cd metalinin kökten gövdeye taşınımında tüm uygulamalar için etkili bitki olmuştur. Pb metalinde ise *Brassica juncea*'da en yüksek yer değiştirme faktörleri saptanmış, kükürt ve EDTA bu bitkideki metal taşınımında etkili maddeler olmuştur.

Cu, Ni ve Cr metallerinin ise bitkiler tarafından gövdeye taşınmaları düşük gerçekleşmiş, bu durum bitkilerin kök dokularında gövdeye nazaran yüksek konsantrasyonlarda metali biriktirmelerinden kaynaklanmıştır. Cu metalinde  $>1$  yer değiştirme faktörü saptanan tek bitki *Pelargonium hortorum* olmuş, EDTA uygulaması bitkinin Cu'ı gövdesine taşınmasını sağlamıştır. *Datura stramonium* hariç diğer deneme bitkileri Ni'i gövde dokularına aktaramamış, elde edilen yer değiştirme faktörleri  $<1$  olmuştur. Bu durum bitkilerin Ni'i gövdeye kıyasla kök dokularında biriktirmelerinden kaynaklanmıştır. En yüksek Cr yer değiştirme faktörü *Conyza canadensis* bitkisinde tespit edilmiştir. Zn metali için ise *Pelargonium hortorum* en yüksek yer değiştirme faktörünü oluşturmuş, bitki kükürt uygulaması hariç diğer tüm uygulamalarda 1'in üzerinde ( $\geq 1$ ) yer değiştirme faktörü sergileyerek, Zn metalini aktif olarak gövdeye taşımıştır. Saptanan değerler Bricker ve ark. (2001)'nin buldukları değerlerle benzer olmuş [119], Kumar ve ark. (1995)'nin buldukları değerlerden ise düşük gerçekleşmiştir [16].

Sonuç olarak hasat sonrasında çamurdaki başlangıç metal konsantrasyonları bitkiler tarafından azaltılmıştır. Denemenin sonunda çamurda saptanan metal konsantrasyonları sırayla 2,67 mg kg<sup>-1</sup> Cu, 1100,5 mg kg<sup>-1</sup> Zn, 20,59 mg kg<sup>-1</sup> Ni, 2,0 mg kg<sup>-1</sup> Cd, 21,64 mg kg<sup>-1</sup> Pb, 84,98 mg kg<sup>-1</sup> Cr olarak tespit edilmiştir.

Ayrıca denemenin sonunda bitkilerin hasadı ile fekal koliform miktarında önemli azalmalar görülmüştür. Kontrol, jips ve EDTA uygulamalarında birbirinden farksız olarak fekal koliform sayısı 10<sup>2</sup> oranında azalmış ve B sınıfı standartları sağlanmıştır. Kükürt uygulamasında ise 10<sup>5</sup> oranında azalış tespit edilmiş, fekal koliform yönünden çamur A sınıfı standartlarını sağlamıştır. Açık havada gerçekleştirilen denemede bir büyüme periyodu sonunda ham arıtma çamurunun stabilize olması sağlanmış, çamur tarımsal bertaraf risk oluşturmayacak sınıfa girmiştir. Kükürt ilavesine ek olarak kullanılan bitkilerin özellikleri sayesinde de ham çamurun A sınıfı kategorisine girmesi sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürde benzer çalışmalarda saptanan sonuçlarla yakın çıkmıştır.

Bu çalışmada ulaşılmak istenen hedefler doğrultusunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

— Arazide bertaraf, arıtma çamurlarının geri dönüşüm olarak en fazla tüketilebileceği yöntemdir. Fakat bu bertarafı sınırlayan en önemli faktör içerdikleri ağır metallerdir. Evsel nitelikli arıtma çamurlarının ağır metal oranları nispeten düşüktür fakat tekrarlanan uygulamalar toprağın metal oranını yükseltmekte ve toprak kalitesini bozmaktadır. Bu nedenle arıtma çamurlarındaki kirletici konsantrasyonlarının kaynaktan azaltımının yanında son ürünlerdeki kirletici konsantrasyonlarının da giderilmesi gerekmektedir. Şimdiye kadar, bitkilerin ağır metal alımı, metal kapsamı yüksek topraklarda çalışılmış, bu prosesin arıtma çamurlarındaki etkinliği az çalışılmış bir konu olmuştur. Bu eksikliği gidermek amacıyla arıtma çamurlarındaki ağır metallerin, bitkilerle giderilmesi sağlanmış, arazide bertarafa hazır son ürün elde edilmiştir.

— Ağır metaller düşük çözünürlüğe sahiptir ve bu düşük çözünürlük bitkideki metal birikiminde sınırlayıcı bir faktördür. Fitoekstraksiyondaki ilerlemeler de, etkili ıslah

edicilerin geliştirilmesi ve bunların etkili uygulamaları ile olmuştur. Fakat bu kimyasalların yüksek maliyetleri ve çevreye olan zararları geniş uygulamalarda sıkıntı yaratmaktadır. Bu yüzden, metal şelatlama özelliğine sahip ucuz ve çevreye uyumlu kimyasal bileşiklerin bulunmasına ihtiyaç vardır. Bu çalışmada da, kükürdün bitkilerdeki metal birikimine etkisi incelenmiş, ortam pH'sını düşürerek metal giderimini artıran kükürdün EDTA'ya alternatif olabileceği sonucuna varılmıştır.

— Çalışmanın sonunda metal kapsamı azaltılmış arıtma çamurunun, son bertaraf olarak araziye uygulanması durumunda gübre değeri taşıyıp taşımadığı tespit edilmiş, arıtma çamurunun organik maddesinde önemli bir azalma saptanmamıştır. Böylelikle bir sonraki ürünün, bu besin elementleri ile büyümesini sürdürebileceği sonucuna varılmıştır.

— Çalışmada metal ekstraksiyon oranını dönüşümlü olarak devam ettirebilecek, mevcut iklim koşullarına uyumlu hiperbiriktirici bitki türleri tanımlanmış, ülkemiz koşullarına uygun hiperbiriktirici özelliğe sahip yerel bitkiler belirlenerek, dünya literatürüne kazandırılmıştır.

— Arıtma çamurlarının tarımsal amaçlı kullanımlarının sağlanmasıyla, çöp depolama alanlarına giden yük azalacak ve deponi alanlarının ekonomik ömürleri uzayacaktır. Dünya ve özellikle bütünleşme yolunda olduğumuz AB standartlarında sürdürülebilir üretim söz konusu olacak, bilinçsizce yapılan bertaraflar sonunda oluşan çevresel riskler önlenecek ve arıtma çamurlarının bertaraf edilmesi için harcanan ek masraf ortadan kalkacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] WU, Q.T., HEI, L., WONG, J.W.C., SCHWARTZ, C., MOREL, J.L., (2007), 'Co-cropping for phyto-separation of zinc and potassium from sewage sludge', *Chemosphere*, 68: 1954–1960.
- [2] SCHAECKE, W., TANNEBERG, H. and SCHILLING, G.,(2002), 'Behavior of heavy metals from sewage sludge in a Chernozem of the dry belt in Saxony – Anhalt /Germany' , *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 165: 609-617.
- [3] EPSTEIN, E., Land application of sewage sludge and biosolids, Lewis Publishers, 2002.
- [4] SAMAKE, M., WU, Q.T., MO, C.H., MOREL, J.L., (2003), 'Plants grown on sewage sludge in South China and its relevance to sludge stabilization and metal removal', *Journal of Environmental Sciences-China*, 15 (5): 622-627.
- [5] GUPTA, A.K. and SINHA, S., (2007), 'Phytoextraction capacity of the plants growing on tannery sludge dumping sites', *Bioresource Technology*, 98: 1788-1794.
- [6] LIU, X.M., WU, Q.T., BANKS, M.K., EBBS, S.D., (2005), 'Phytoextraction of Zn and Cu from sewage sludge and impact on agronomic characteristics', *Journal of environmental science and health part A- toxic/hazardous substances&environmental engineering* , 40 (4):823-838.
- [7] SINGH, S., SINHA, S., (2005), 'Accumulation of metals and its effects in *Brassica juncea* (L.) Czern. (cv. Rohini) grown on various amendments of tannery waste', *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 62: 118–127.
- [8] PEER, W.A., BAXTER, I.R., RICHARDS, E.L., FREEMAN, J.L., MURPHY, A.S., 'Phytoremediation and hyperaccumulator plants'.
- [9] LASAT, M.M., 'The use of plants for the removal of toxic metals from contaminated soil', American Association for the Advancement of

Science Environmental Science and Engineering Fellow.

- [10] RASKIN, I., SMITH, R.D. and SALT, D.E., (1997), 'Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment', *Current Opinion in Biotechnology*, 8:221-226.
- [11] BROOKS, R.R., Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals, their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration and phtomining, CABI Publishing, 1998.
- [12] RASKIN, I., ENSLEY, B.D., Phytoremediation of toxic metals, A Wiley-Interscience Publication John Wiley&Sons, Inc., 2000.
- [13] BROOKS, R.R., CHAMBERS, M.F., NICKS, L.J. and ROBINSON, B.H., (1998), 'Phytomining', *Trends in Plant Sciences*, 3 (9):359-362.
- [14] McGRATH, S.P. and ZHAO, F.J., (2003), 'Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils', *Current opinion in biotechnology*, 14:277-282.
- [15] RALINDA R. MILLER, P.G., (1996), 'Phytoremediation', Technology Overview Report, TO-96-03, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, EPA, 615 William Pitt Way, Pittsburgh, USA.
- [16] KUMAR, P.B.A.N., DUSHENKOV, V., MOTTO, H. and RASKIN, I., (1995), 'Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soils', *Environ. Sci. Technol.*, 29: 1232-1238.
- [17] CHANEY, R.L., MALIK, M., LI, Y.M., BROWN, S.L., BREWER, E.P., ANGLE, J.S. and BAKER, J.M.A., (1997), 'Phytoremediation of soil metals', *Current Opinion in Biotechnolo.*, 8: 279-284.
- [18] EVANGELOU, M.W.H., EBEL, M., SCHAEFFER, A., (2007), 'Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soil. Effect, mechanism, toxicity, and fate of chelating agents', *Chemosphere*, 68: 989–1003.
- [19] KABATA-PENDIAS, A., Trace Elements in Soils and Plants, Third Edition, CRC Pres, 2001.
- [20] ROBINSON, B.H., BROOKS, R.R., HOWES, A.W., KIRKMAN, J.H., GREGG, P.E.H., (1997), 'The potential of the high-biomass nickel hyperaccumulator *Berkheya coddii* for phytoremediation and phytomining' *Journal of Geochemical Exploration*, 60: 115- 126.



- [21] MCGRATH, S.P., ZHAO, F.J. & LOMBI, E., (2001), 'Plant and rhizosphere processes involved in phytoremediation of metal-contaminated soils', *Plant and Soil*, 232: 207–214.
- [22] DEL RIO-CELESTINO, M., FONT, R., MORENO-ROJAS, R., DE HARO-BAILON, A., (2006), 'Uptake of lead and zinc by wild plants growing on contaminated soils', *Industrial Crops and Products*, 24: 230-237.
- [23] WANG, A.S., ANGLE, J.S., CHANEY, R.L., DELORME, T.A. & REEVES, R.D., (2006), 'Soil pH effects on uptake of Cd and Zn by *Thlaspi caerulescens*', *Plant and Soil*, 281:325–337.
- [24] CLEMENTE, R., WALKER, D.J., BERNAL, M.P., (2005), 'Uptake of heavy metals and As by *Brassica juncea* grown in a contaminated soil in Aznalcollar (Spain): The effect of soil amendments', *Environmental Pollution*, 138: 46-58.
- [25] KRAMER, U., CHARDONNENS, A.N., (2001), 'The use of transgenic plants in the bioremediation of soils contaminated with trace elements', *Appl. Microbial Biotechnol*, 55 (6): 661-72.
- [26] HOODA, P.S., MCNULTY, D., ALLOWAY, B.J. and AITKEN, M.N.,(1997), 'Plant Availability of Heavy Metals in Soils Previously Amended with Heavy Applications of Sewage Sludge', *J Sci Food Agric*, 73: 446-454.
- [27] OFFICE FOR OFFICIAL PUBLICATIONS OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, Transfer Processes, Environment themes, General water land air industry waste, nature, urban, funding, law economics assessment, nuclear issues, risks, education, Chapter 6, L–2985 Luxembourg, ISBN 92–894–1800–1.
- [28] MERRINGTON, G., OLIVER, I., SMERNIK, R.J., MCLAUGHLIN, M.J., (2003), 'The influence of sewage sludge properties on sludge-borne metal availability', *Advances in Environmental Research*, 8: 21–36.
- [29] FORSBERG, L.S., LEDIN, S., (2006), 'Effects of sewage sludge on pH and plant availability of metals in oxidising sulphide mine tailings', *Science of the Total Environment*, 358: 21– 35.
- [30] CLEMENTE, R., WALKER, D.J., BERNAL, M.P., (2005), 'Uptake of heavy metals and As by *Brassica juncea* grown in a contaminated soil in Aznalco' llar (Spain): The effect of soil amendments', *Environmental*

*Pollution*, 138: 46-58.

- [31] ADAMS, J.F., Soil chemical tests to determine the heavy metal availability in a sludge-amended soil, Doctorate Thesis, Kansas State University, Agronomy, 1985.
- [32] NEHNEVAJOVA, E., HERZIG, R., FEDERER, G., ERISMANN, K.H. and SCHWITZGUEBEL, J.P., (2005), 'Screening of sunflower cultivars for metal phytoextraction in a contaminated field prior to mutagenesis', *International Journal of Phytoremediation*, 7:4, 337 – 349.
- [33] YANAI, J., ZHAO, F.J., MCGRATH, S.P., KOSAKI, T., (2006), 'Effect of soil characteristics on Cd uptake by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*', *Environmental Pollution*, 139: 167-175.
- [34] CHANEY, R.L., LI, Y.M., ANGLE, J.S., BAKER, A.J.M., REEVES, R.D., BROWN, S.L., HOMER, F.A., MALIK, M., CHIN, M., (1999), 'Improving metal hyperaccumulators wild plants to develop commercial phytoextraction systems: Approaches and progress', In *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water*, eds N Terry, GS Banuelos, CRC Pres, Boca Raton, FL.
- [35] ROIG, A., CAYUELA, M.L, SANCHEZ-MONEDERO, M.A., (2004), 'The use of elemental sulphur as organic alternative to control pH during composting of olive mill wastes', *Chemosphere*, 57: 1099–1105.
- [36] TISDALE, S.L., NELSON, W.L., Çeviren: Prof. Dr. Nuri Güzel, Toprak Verimliliği ve Gübreler, Üçüncü Baskı, Çukurova Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Yayınları, No: 168, Ders Kitabı No: 13, Adana 1982.
- [37] FOYE, D.S., Mobility and extraction potential of lead from impacted rifle range soil using *P. sativum* and *B. juncea*, Master Thesis, Queen's University, Biology Department, Canada, 2001.
- [38] ROBINSON, B.H., BROOKS, R.R.. and CLOTHIER, B.E., (1999), 'Soil Amendments Affecting Nickel and Cobalt Uptake by *Berkheya coddii*: Potential Use for Phytomining and Phytoremediation', *Annals of Botany* 84: 689-694.
- [39] STERRETT, S.B., CHANEY, R.L., HIRSCH, C.E. and MIELKE, H.W., (1996), 'Influence of amendments on yield and heavy metal accumulation of lettuce grown in urban garden soils', *Environ. Geochem. Health.*, 18: 135-142.
- [40] GÜNEŞ, A., ALPASLAN, M., İNAL, A., (2004), 'Jips'in gübre olarak

kullanılması', *Hasad*, 19 (227): 67-71.

- [41] VISCONTI, F., PAZ, J.M., RUBIO, J.L., (2010), 'What Information Does the Electrical Conductivity of Soil Water Extracts of 1 to 5 Ratio (w/v) Provide for Soil Salinity Assessment of Agricultural Irrigated Lands?', *Geoderma*, 154: 387-397.
- [42] PEREZ-LOPEZ, R., NIETO, J.M., LOPEZ-COTO, I., AGUADO, J.L., BOLIVAR, J.P., SANTISTEBAN, M., (2010), 'Dynamics of Contaminants in Phosphogypsum of the Fertilizer Industry of Huelva (SW Spain): From Phosphate Rock Ore to the Environment', *Applied Geochemistry*, 25: 705-715.
- [43] LIU, M., LIANG, Z.W., MA, H.Y., HUANG, L.H., WANG, M.M., (2010), 'Responses of Rice (*Oryza saliva* L.) Growth and Yield to Phosphogypsum Amendment in Saline-Sodic Soils of North-East China', *Journal of Food Agriculture & Environment*, 8:2, 827-833.
- [44] CAMACHO-TAMAYO, J.H., BARBOSA, A.M., PEREZ, N.M., et al., (2009), 'Operational Characteristics of Four Metering Systems for Agricultural Fertilizers and Amendments', *Engenharia Agricola*, 29:4, 605-613.
- [45] TORRI, S.I., LAVADO, R., (2007), 'Zinc distribution in soils amended with different kinds of sewage sludge', *Journal of Environmental Management*, 10.1016/j.jenvman.2007.07.026.
- [46] TORRI, S.I., LAVADO, R.S., (2007), 'Dynamics of Cd, Cu and Pb added to soil through different kinds of sewage sludge', *Waste Management*, doi:10.1016/j.wasman.2007.01.020.
- [47] VACA-PAULIN, R., ESTELLER-ALBERICH, M.V., LUGO-DE LA FUENTE, ZAVALETA-MANCERA, H.A., (2006), 'Effect of sewage sludge or compost on the sorption and distribution of copper and cadmium in soil', *Waste Management*, 26: 71-81.
- [48] HSEU, Z.Y., (2006), 'Extractability and bioavailability of zinc over time in three tropical soils incubated with biosolids', *Chemosphere*, 63: 762-771.
- [49] THAWORNCHASIT, U., PAKULANON, K., (2007), 'Application of dried sewage sludge as phenol biosorbent', *Bioresource Technology*, 98: 140-144.
- [50] NGOLE, V., MPUCHANE, S., TOTOLO, O., (2006), 'Survival of faecal

coliforms in four different types of sludge-amended soils in Botswana', *European Journal of Soil Biology*, 42: 208–218.

- [51] LIU, X., ZHANG, S., WU, W., LIU, H., (2007), 'Metal sorption on soils as affected by the dissolved organic matter in sewage sludge and the relative calculation of sewage sludge application', *Journal of Hazardous Materials*, 149: 399–407.
- [52] WANG, C., HU, X., CHEN, M.L., WU, Y.H., (2005), 'Total concentrations and fractions of Cd, Cr, Pb, Cu, Ni and Zn in sewage sludge from municipal and industrial wastewater treatment plants', *Journal of Hazardous Materials*, B119: 245–249.
- [53] GASCO, G., MENDEZ, A., GASCO, J.M., (2005), 'Preparation of carbon-based adsorbents from sewage sludge pyrolysis to remove metals from water', *Desalination*, 180: 245-251.
- [54] MORADI, A., ABBASPOUR, K.C., AFYUNI, M., (2005), 'Modelling field-scale cadmium transport below the root zone of a sewage sludge amended soil in an arid region in Central Iran', *Journal of Contaminant Hydrology*, 79: 187– 206.
- [55] ZUPANCIC, M., BUKOVEC, P., MILACIC, R., SCANCAR, J., (2006), 'Critical evaluation of the use of the hydroxyapatite as a stabilizing agent to reduce the mobility of Zn and Ni in sewage sludge amended soils', *Waste Management*, 26: 1392–1399.
- [56] ABDI, A.N., Effects of sludge amendments on soil cation Exchange capacity, organic matter and subsequent heavy metal uptake by vegetables, Master Thesis, Eastern Michigan University, Environmental Biology, 1987.
- [57] PEPPAS, A., KOMNITSAS, K. and HALIKIA, I., (2000), 'Use of Organic Covers for Acid Mine Drainage Control', *Minerals Engineering*, 13(5), 563-574.
- [58] ERKEK, H.F., Krom ile kirletilmiş toprakların bitkiler aracılığıyla arıtımı (fitoremediasyon), Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Çevre Mühendisliği, 2004.
- [59] PRASAD, M.N.V., Heavy Metal Stress in Plants From Biomolecules to Ecosystems, Second Edition, Springer, 2004.
- [60] CHEN, Y.H., MAO, Y., HE, S.B., GUO, P., XU, K., (2007), 'Heat stress increases the efficiency of EDTA in phytoextraction of heavy metals',

*Chemosphere*, 67: 1511–1517.

- [61] LOMBI, E., ZHAO, F.J., DUNHAM, S.J. and MCGRATH, S.P., (2001), ‘Phytoremediation of Heavy Metal–Contaminated Soils: Natural Hyperaccumulation versus Chemically Enhanced Phytoextraction’, *J. Environ. Qual.*, 30:1919–1926.
- [62] POGRZEBA, M., KUCHARSKI, R., SAS-NOWOSIELSKA, A., MALKOWSKI, E., KRYNSKI, K., KUPERBERG, J.M., ‘Heavy metal removal from municipal sewage sludges by phytoextraction’, Symposium presentation.
- [63] CHIU, K.K., YE, Z.H., WONG, M.H., (2005), ‘Enhanced uptake of As, Zn, and Cu by *Vetiveria zizanioides* and *Zea mays* using chelating agents’, *Chemosphere*, 60: 1365–1375.
- [64] LAI, H.Y., CHEN, Z.S., (2005), ‘The EDTA effect on phytoextraction of single and combined metals-contaminated soils using rainbow pink (*Dianthus chinensis*)’, *Chemosphere*, 60: 1062–1071.
- [65] CLEMENS, S., PALMGREN M.G. and KRAMER, U., (2002), ‘A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation’, *Trends in plant sciences*, 7 (7): 309-315.
- [66] GOBRAN, G.R., WENZEL, W.W., LOMBI, E., Trace Elements in the Rhizosphere, CRC Press, 2001.
- [67] RAYMOND, C. A., ‘Factors Affecting Media pH and Nutrient Uptake in Geraniums’, Dissertation submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park, Doctor of Philosophy, 2004.
- [68] FISHER, P. R., ARGO, W. R., “Iron-Out”: A nutritional program for geraniums and other crops prone to iron and manganese toxicity at low media-pH, University of New Hampshire, Cooperative Extension, February 22, 2001.
- [69] SMITH, B. R., FISHER, P. R., ARGO, W. R., (2004), ‘Water-Soluble Fertilizer Concentration and pH of a Peat-Based Substrate Affect Growth, Nutrient Uptake, and Chlorosis of Container-Grown Seed Geraniums’, *Journal of Plant Nutrition*, Vol. 27, No. 3, pp. 497–524.
- [70] ÜNVER, İ. ‘Kimi Brassicacea Türlerinin Nikel ve Kadmiyum Biriktirme Özelliklerinin Belirlenmesi’, Ankara Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, TÜBİTAK Destekli Proje, TOVAG, 2006–2009.

- [71] ANDERSON, C.W.N., BROOKS, R.R., CHIARUCCI, A., LACOSTE, C.J., LEBLANC, M., ROBINSON, B.H, SIMCOCK, R., STEWART, R.B., (1999), 'Phytomining for nickel, thallium and gold', *Journal of Geochemical Exploration*, 67: 407–415.
- [72] ANGLE, J. S. and LINACRE, N. A., (2005), 'Metal Phytoextraction - A Survey of Potential Risks', *International Journal of Phytoremediation*, 7:3, 241 – 254.
- [73] MARCHIOL, L., ASSOLARI, S., SACCO, P., ZERBI, G., (2004), 'Phytoextraction of heavy metals by canola (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus sativus*) grown on multicontaminated soil', *Environmental Pollution*, 132: 21-27.
- [74] GHOSH, M., SINGH, S.P., (2005), 'A comparative study of cadmium phytoextraction by accumulator and weed species', *Environmental Pollution*, 133: 365–371.
- [75] MATTINA, M.J.I., LANNUCCI-BERGER, W., MUSANTE, C., WHITE, J.C., (2003), 'Concurrent plant uptake of heavy metals and persistent organic pollutants from soil', *Environmental Pollution*, 124: 375–378.
- [76] EVANGELOU, M.W.H., BAUER, U., EBEL, M., SCHAEFFER, A., (2007), 'The influence of EDDS and EDTA on the uptake of heavy metals of Cd and Cu from soil with tobacco *Nicotiana tabacum*' *Chemosphere*, 68: 345–353.
- [77] PEER, W.A., MAMOUDIAN, M., LAHNER, B., REEVES, R.D., MURPHY, A.S. and SALT, D.E., (2003), 'Identifying model metal hyperaccumulating plants: germplasm analysis of 20 Brassicaceae accessions from a wide geographical area', *New Phytologist*, 159: 421–430.
- [78] KALRA, Y. P., MAYNARD, D. G., (1991), Methods manual for forest soil and plant analysis. Forestry Canada, Northwest Region, Northern forest Centre, Edmonton, Alberta. Information Report NOR-X319.
- [79] RYAN, J., ESTEFAN, G. and RASHID, A., 2001. Soil and Plant Analysis Laboratory Manual. Second Edition. Jointly published by the International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA) and the National Agricultural Research Center (NARC). Available from ICARDA, Aleppo, Syria. x+172 pp.

- [80] SCHULTE, E. E., Chapter 8, 'Recommended Soil Organic Matter Tests', University of Delaware Cooperative Extension, College of Agriculture & Natural Resources.
- [81] CRAFT, C. B., SENECA, E. D., BROOME, S. W., (1991), 'Loss on Ignition and Kjeldahl Digestion for Estimating Organic Carbon and Total Nitrogen in Estuarine Marsh Soils: Calibration with Dry Combustion', *Estuaries*, Vol. 14, No. 2, p. 75–179.
- [82] SOIL ANALYSIS, 011303 English.
- [83] Determination of Nutrients, Determination of Kjeldahl nitrogen, EN 0000:2003 Horizontal – 16.
- [84] Determination of Nutrients, Determination of Kjeldahl nitrogen - Determination of Kjeldahl nitrogen, nitrate and nitrit included, EN 0000:2003 Horizontal – 16.
- [85] PIERZYNSKI, G., M., Methods of Phosphorus Analysis for Soils, Sediments, Residuals, and Waters, Southern Cooperative Series Bulletin No. # 396, June, 2000.
- [86] Recommended Chemical Soil Test Procedures for the North Central Region, North Central Regional Research Publication No. 221 (Revised), Missouri Agricultural Experiment Station SB 1001.
- [87] ROSS, D. S., Chapter 9, 'Recommended Methods for Determining Soil Cation Exchange Capacity', University of Delaware Cooperative Extension, College of Agriculture & Natural Resources.
- [88] PALMER, C. E., WARWICK, S. and KELLER, W., (2001), 'Brassicaceae (Cruciferae) Family, Plant Biotechnology, and Phytoremediation', *International Journal of Phytoremediation*, 3:3, 245 – 287.
- [89] KILIÇ, İ., SEFEROĞLU, S., (2005), 'Aydın Yöresinde yetiştirilen çileklerde farklı kalsiyumlu gübrelerin verim ve kaliteye etkileri üzerine bir araştırma', *ADÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 2 (2): 87-94.
- [90] HUE, N. V., UCHIDA, R., and HO, M. C., Chapter 2 'Sampling and Analysis of Soils and Plant Tissues How to Take Representative Samples, How the Samples are Tested' Plant Nutrient Management in Hawaii's Soils, Approaches for Tropical and Subtropical Agriculture, J. A. Silva and R. Uchida, eds. College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii at Manoa, ©2000.

- [91] POLPRASERT, C., (1996), *Organic waste recycling Technology and Management*, Second Edition, John Wiley & Sons.
- [92] McFARLAND, M. J., *Biosolids Engineering*, edited by McGraw-Hill, 2000.
- [93] RAMIREZ, W.A., DOMENE, X., ORTIZ, O., ALCANNIZ, J.M., (2008), 'Toxic effects of digested, composted and thermally-dried sewage sludge on three plants', *Bioresource Technology*, 99; 7168–7175.
- [94] KOSOBUCKI, P., KRUK, M., BUSZEWSKI, B., (2008), 'Immobilization of selected heavy metals in sewage sludge by natural zeolites', *Bioresource Technology*, 99; 5972–5976.
- [95] TORIBIO, M., ROMANYA, J., (2006), 'Leaching of heavy metals (Cu, Ni and Zn) and organic matter after sewage sludge application to Mediterranean forest soils', *Science of the Total Environment*, 363: 11 – 21.
- [96] KIDD, P.S., DOMINGUEZ-RODRIGUEZ, M.J., DIEZ, J., MONTERROSO, C., (2007), 'Bioavailability and plant accumulation of heavy metals and phosphorus in agricultural soils amended by long-term application of sewage sludge', *Chemosphere*, 66: 1458–1467.
- [97] INDORIA, A. K. and POONIA, S. R., (2006), 'Phytoextractability of lead from soil by some oilseed crops as affected by sewage sludge and farmyard manure', *Archives of Agronomy and Soil Science*, 52:6, 667 – 677.
- [98] SENESI, N., PLAZA, C., BRUNETTI, G., POLO, A., (2007), 'A comparative survey of recent results on humic-like fractions in organic amendments and effects on native soil humic substances', *Soil Biology & Biochemistry*, 39: 1244–1262.
- [99] USEPA, Part 503-standards for the use or disposal of sewage sludge, USA, 1993.
- [100] MALACK, M.H., BUKHARI, A.A., ABUZAIID, N.S., (2007), 'Fate of pathogens in sludge sand drying beds at Qateef, Khobar and Damam: A case study', *Int. J. Environ. Res.*, 1:1, 19-27.
- [101] CRUSH, J.R., SARATHCHANDRA, U., DONNISON, A., (2006), 'Effect of Plant Growth on Dehydration Rates and Microbial Populations



in Sewage Biosolids', *Bioresource Technology*, 97: 2447-2452.

- [102] ESTRADA, I.B., ALLER, A., ALLER, F., GOMEZ, X., MORAN, A., (2004), 'The Survival of *Escherichia coli*, Faecal Coliforms and *Enterobacteriaceae* in General in Soil Treated with Sludge from Wastewater Treatment Plants', *Bioresource Technology*, 93: 191-198.
- [103] ESTRADA, I.B., GOMEZ, E., ALLER, A., MORAN, A., (2006), 'Microbial Monitoring of the Influence of the Stabilization Degree of Sludge when Applied to Soil', *Bioresource Technology*, 97: 1308-1315.
- [104] POURCHER, A.M., FRANCOISE, P.B., VIRGINIE, F., AGNIESZKA, G., VASILICA, S., GERARD, M., (2007), 'Survival of Faecal Indicators and Enteroviruses in Soil After Land-Spreading of Municipal Sewage Sludge', *Applied Soil Ecology*, 35: 473-479.
- [105] FIRDAUS, E.B., TAHIRA, S.A., (2010), 'Efficiency of Seven Different Cultivated Plant Species for Phytoextraction of Toxic Metals from Tannery Effluent Contaminated Soil Using EDTA', *Soil & Sediment Contamination*, 19:2, 160-173.
- [106] KARCZEWSKA, A., GALKA, B., KABALA, C. Et al., (2009), 'Effects of Various Chelators on the Uptake of Cu, Pb, Zn And Fe By Maize and Indian Mustard from Silty Loam Soil Polluted by the Emissions from Copper Smelter', *Fresenius Environmental Bulletin*, Conference Information: 10th Symposium on Trace Elements in the Food Chain, MAY 11-14, 2008 Pulawy, POLAND 18:10A, Sp. Iss. SI, 1967-1974.
- [107] DUQUENE, L., VANDENHOVE, H., TACK, F., et al., (2009), 'Enhanced phytoextraction of uranium and selected heavy metals by Indian mustard and ryegrass using biodegradable soil amendments', *Science of The Total Environment*, 407:5, 1496-1505.
- [108] QIU, R.L., LIU, W., ZENG, X.W., et al., (2009), 'Effects of exogenous citric acid and malic acid addition on nickel uptake and translocation in leaf mustard (*Brassica juncea* var. *foliosa* Bailey) and *Alyssum corsicum*', *International Journal of Environment and Pollution*, 38:1-2, 15-25.
- [109] JOHNSON, A., GUNAWARDANA, B., SINGHAL, N., (2009), 'Amendments for Enhancing Copper Uptake by *Brassica juncea* and *Lolium perenne* from Solution', *International Journal of Phytoremediation*, 11:3,215-234.
- [110] MEERS, E., TACK, F.M.G., VAN SLYCKEN, S., et al., (2008), 'Chemically assisted phytoextraction: A review of potential soil

- amendments for increasing plant uptake of heavy metals', *International Journal of Phytoremediation*, 10:5, 390-414.
- [111] LAI, H.Y., CHEN, S.W., CHEN, Z.S., (2008), 'Pot experiment to study the uptake of Cd and Pb by three Indian mustards (*Brassica juncea*) grown in artificially contaminated soils' *International Journal of Phytoremediation*, 10:2, 91-105.
- [112] LESTAN, D., LUO, C.L., LI, X.D., (2008), 'The use of chelating agents in the remediation of metal-contaminated soils:A review', *Environmental Pollution*, 153:1, 3-13.
- [113] JIANG, X.J., LUO, Y.M., ZHAO, Q.G., BAKER, A.J.M., CHRISTIE, P., WONG, M.H., (2003), 'Soil Cd Availability to Indian Mustard and Environmental Risk Following EDTA Addition to Cd-Contaminated Soil', *Chemosphere*, 50, 813-818.
- [114] LUO, C., SHEN, Z., LI, X., BAKER, A.J.M., (2006), 'The Role of Root Damage in the Chelate-Enhanced Accumulation of Lead by Indian Mustard Plants', *International Journal of Phytoremediation*, 8:4, 323 – 337.
- [115] CHEN, Y., LI, X., SHEN, Z., (2004), 'Leaching and uptake of heavy metals by ten different species of plants during an EDTA-assisted phytoextraction process', *Chemosphere*, 57, 187-196.
- [116] LUO, C., SHEN, Z., LI, X. (2005), 'Enhanced phytoextraction of Cu, Pb, Zn and Cd with EDTA and EDDS', *Chemosphere*, 59: 1–11.
- [117] SRIDHAR, B.B.M., DIEHL, S.V., HAN, F.X., MONTS, D.L., SU, Y., (2005), 'Anatomical changes due to uptake and accumulation of Zn and Cd in Indian mustard (*Brassica juncea*)', *Environmental and Experimental Botany*, 54: 131–141.
- [118] GHOSH, M., SINGH, S.P., (2005), 'Comparative Uptake and Phytoextraction Study of Soil Induced Chromium by Accumulator and High Biomass Weed Species', *Applied Ecology And Environmental Research*, 3:2, 67-79.
- [119] BRICKER, T.J., PICHTEL, J., BROWN, H.J., SIMMONS, M., (2001), 'Phytoextraction of Pb and Cd from a Superfund Soil: Effects of Amendments and Croppings', *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 36:9, 1597 – 1610.
- [120] VASSIL, A.D., KAPULNIK, Y., RASKIN, I., and SALT, D.E., (1998), 'The Role of EDTA in Lead Transport and Accumulation by Indian Mustard', *Plant Physiol.*, 117: 447–453.

- [121] İBRİKÇİ, H., GÜLÜT, K.Y., GÜZEL, N., Gübrelemede Bitki Analiz Teknikleri, Ç.Ü. Ziraat Fakültesi, Genel Yayın No:95 Ders Kitapları Yayın No:8, Adana 1994.

## ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Sakarya'da tamamladı. 1997 yılında girdiği Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nden 2001 yılında mezun oldu. 2001–2004 yılları arasında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimini tamamladı. 2004 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda doktora öğrenimine başladı. 2004 yılı Ocak ayında Sakarya Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak başladığı görevine halen devam etmektedir.