İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Pb, Cd, B ELEMENTLERİNİN TOPRAKLARDAN ŞELAT DESTEKLİ FİTOREMEDİASYON YÖNTEMİYLE GİDERİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ziraat Müh. Ömer VANLI

Anabilim Dalı : Çevre Mühendisliği

Programı : Çevre Bilimleri ve Mühendisliği

EKİM 2007

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Pb, Cd, B ELEMENTLERİNİN TOPRAKLARDAN ŞELAT DESTEKLİ FİTOREMEDİASYON YÖNTEMİYLE GİDERİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ziraat Müh. Ömer VANLI
(501021522)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12 Eylül 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 08 Ekim 2007

Tez Danışmanı: **Y.Doç. Dr. Mustafa S. YAZGAN**

Diğer Jüri Üyeleri **Prof.Dr. Olcay TÜNAY**

Doç.Dr. Ayşen ERDİNÇLER

EKİM 2007

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans tezi çalışmalarımın tüm aşamasında beni destekleyen, her konuda yön veren, tanımaktan ve birlikte çalışmaktan her zaman kıvanç duyacağım değerli danışmanım Sayın Y.Doç.Dr. Mustafa S. YAZGAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca deneysel çalışmalarım sırasında beni destekleyen Sayın Dr. Cemile YERLİKAYA'ya, özellikle maddi ve manevi desteğini hiç esirgemeyen ve her zaman dinleyip destek olan ailemin biricik fertleri olan eşim Aynur ile kızım Dilek Şennur'a, öneri ve tavsiyeleri ile hep yanımda olan değerli dostlarım Dr. Mehmet ÇAKMAKÇI ve Dr. Vedat UYAK'a, Pakistan uyruklu öğrencilerden Dr. Muhammed RİAZ ve doktora öğrencisi Mansoor A. BALOCH'a teşekkür ederim. Aynı zamanda öğrenimim süresince göstermiş oldukları tolerans ve desteklerden dolayı Fen Bilimleri enstitüsü sekreteri sayın Azize ÇIRTLIK ile öğrenci işleri şefi sayın Nuriye YILDIZ başta olmak üzere tüm enstitü çalışanlarına ve tezimde doğrudan veya dolaylı yardımları dokunan herkese sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezi; Ayrıca her zaman yanımda olan beni büyüterek ve bugünlere getiren, merhume anneannem Havva VANLI ve merhum dedem Mehmet VANLI'ya ithaf ediyorum.

Ekim, 2007 **Ömer VANLI**

İÇİNDEKİLER

	Sayfa no
İÇİNDEKİLER	**iv**
KISALTMALAR	**vi**
TABLO LİSTESİ	**vii**
ŞEKİL LİSTESİ	**viii**
SEMBOL LİSTESİ	**ix**
ÖZET	**x**
SUMMARY	**xi**
1. GİRİŞ	**12**
1.1 Çevre Kirleticileri ve Oluşan Etkileri	13
1.2 Kirleticilerle Mücadele Yöntemleri	14
2. FİTOREMEDİASYON	**18**
2.1 Bitkiler Tarafından Metal Alımı	20
2.2 Fitoremediasyon Yöntemleri	22
2.2.1 Fitoekstraksiyon (Bitkisel özümleme)	22
2.2.2 Fitodegredasyon (Bitkisel bozunum)	23
2.2.3 Fitostabilizasyon (Köklerle sabitleme)	24
2.2.4 Fitovolatilizasyon (Bitkisel buharlaşma)	25
2.2.5 Rizodegradasyon (Köklerle bozunum)	26
2.2.6 Rizofiltrasyon (Köklerle süzme)	27
2.2.7 Hidrolik kontrol	28
2.2.8 Vejetatif örtü sistemleri	29
2.2.9 Kıyı tampon şeritleri	30
2.3 Fitoremediasyon Yöntemiyle Giderilen Bazı Elementler	32
2.3.1 Kurşun	32
2.3.2 Kadmiyum	33
2.3.3 Bor	35
2.4 Fitoremediasyon Yönteminde Kullanılan Bazı Bitkiler	36
2.4.1 Mısır (Zea mays L.)	36
2.4.2 Ayçiçeği (Helianthus annus)	37
2.4.3 Kanola (Brassica napus)	37
2.5 Fitoremediasyonda Şelat Uygulamaları	37
2.6 Fitoremediasyon Yoluyla Kirlilik Giderme Çalışmaları	38
3. MATERYAL ve YÖNTEM	**41**
3.1 Materyal	41
3.1.1 Elementler	41
3.1.2 Bitkiler	43
3.1.3 Toprak	43

3.1.4 Şelat (EDTA) 44
3.2 Yöntem 45
3.2.1 Toprağın hazırlanması 45
3.2.2 Ekim ve bakım 46
3.2.3 Şelat eklenmesi 47
3.2.4 Hasat 47
3.2.5 Toprak ve bitki parçalarının analizi 48
3.2.6 Kimyasal analizler 50
3.2.7 Toprak ve bitki element miktarlarının hesaplanması 50
4. DENEYSEL SONUÇLAR 53
4.1 Bitkiler Tarafından Elementlerin Alınma Performansları 53
4.1.1 Ayçiçeği bitkisinin element alım performansı 53
4.1.2 Mısır bitkisinin element alım performansı 57
4.1.3 Kanola bitkisinin element alım performansı 62
4.2 Kullanılan Bitkilerin Element Alım Performansları 65
4.2.1 Kurşun alım performansları 65
4.2.2 Kadmiyum alım performansları 66
4.2.3 Bor alımı performansları 67
4.3 Şelat (EDTA) Miktarına Bağlı Olarak Bitkiler Tarafından Alınan Element Miktarları 69
4.3.1 Şelat ilave edilmeyen şartlar 69
4.3.2 2.5 mmol şelat dozları 69
4.3.3 5 mmol şelat dozları 70
4.3.4 10 mmol şelat dozları 71
4.4 Konsantrasyon Oranı Faktörünün Belirlenmesi 72
4.5 Baker Teorisine Göre Bitkilerin Fitoremediasyon Performanslarının Değerlendirilmesi 74
4.6 Fitoremediasyon Yöntemiyle Topraktaki Elementlerin Giderilme Sürelerinin Belirlenmesi 76
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 80
6. KAYNAKLAR 84
7. ÖZGEÇMİŞ 88

KISALTMALAR

EDTA : Etilen Diamin Tetra Asetik Asit
AAS : Atomik Absorpsiyon Spektrofotometre
ICP : Inductively Coupled Plasma
EPA : Environmental Protection Agency
PPM : Part Per Million

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1: Fitoremediasyon yönteminin genel karateristikleri 31
Tablo 3.1: Toprak analiz sonuçları..... 44
Tablo 3.2: Toprağa eklenen element miktarları 46
Tablo 4.1: Ayçiçeği bitkisinin Pb elementi alımı..... 54
Tablo 4.2: Ayçiçeği bitkisinin Cd elementi alımı 55
Tablo 4.3: Ayçiçeği bitkisinin B elementi alımı 56
Tablo 4.4: Mısır bitkisinin Pb elementi alımı 57
Tablo 4.5: Mısır bitkisinin Cd elementi alımı 59
Tablo 4.6: Mısır bitkisinin B elementi alımı 60
Tablo 4.7: Mısır Bitkisinin Farklı Bor Miktarlarındaki Alım Performansı 61
Tablo 4.8: Kanola bitkisinin Pb elementi alımı..... 62
Tablo 4.9: Kanola bitkisinin Cd elementi alımı 63
Tablo 4.10: Kanola bitkisinin B elementi alımı 64
Tablo 4.11: Pb elementinin bitkiler tarafından alımı 66
Tablo 4.12: Cd elementinin bitkiler tarafından alımı 67
Tablo 4.13: B elementinin bitkiler tarafından alımı 68
Tablo 4.14: Bitkilerin Şelat ilave Edilmeyen Şartlarda Element Alımları..... 69
Tablo 4.15: Bitkilerin 2.5 mmol Şelat İlave Şartlarında Element Alımları 70
Tablo 4.16: Bitkilerin 5 mmol Şelat İlave Şartlarında Element Alımları 71
Tablo 4.17: Bitkilerin 10 mmol Şelat İlave Şartlarında Element Alımları 72
Tablo 4.18: Ayçiçeği bitkisi için hesaplanan konsantrasyon oranları..... 73
Tablo 4.19: Mısır bitkisi için hesaplanan konsantrasyon oranları 73
Tablo 4.20: Kanola bitkisi için hesaplanan konsantrasyon oranları..... 74
Tablo 4.21: Baker Teorisine göre ayçiçeği bitkisinin fitoremediasyon performansının değerlendirilmesi..... 75
Tablo 4.22: Baker Teorisine göre Mısır bitkisinin fitoremediasyon performansının değerlendirilmesi..... 75
Tablo 4.23: Baker Teorisine göre Kanola bitkisinin fitoremediasyon performansının değerlendirilmesi..... 76
Tablo 4.24: Ayçiçeği bitkisi tarafından alınan elementlerin tamamının temizlenebilmesi için gereken süre 77
Tablo 4.25: Mısır bitkisi tarafından alınan elemntlerin tamamının temizlenebilmesi için gereken süre 78
Tablo 4.26: Kanola bitkisi tarafından alınan elemntlerin tamamının temizlenebilmesi için gereken süre 78

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Bitki kök yapısı 21
Şekil 2.2: Bitki hücreleri tarafından element taşınım sistemleri..... 21
Şekil 2.3: Fitoekstraksiyon yöntemi 23
Şekil 2.4: Fitodegredasyon yöntemi 24
Şekil 2.5: Fitostabilizasyon yöntemi 25
Şekil 2.6: Fitovolatilizasyon yöntemi..... 26
Şekil 2.7: Rizodegradasyon yöntemi 27
Şekil 2.8: Rizofiltrasyon yöntemi..... 28
Şekil 2.9: Hidrolik kontrol yöntemi..... 28
Şekil 2.10: Vejetatif Örtü yöntemi..... 29
Şekil 2.11: Kıyı Tampon Şeritleri yöntemi..... 30
Şekil 2.12: Şelatın moleküler yapısı ve metallerle kompleks oluşturması 37
Şekil 3.1: Kurşun Elementi Deney Şeması..... 42
Şekil 3.2: Kadmiyum Elementi Deney Şeması..... 42
Şekil 3.3: Bor Elementi Deney Şeması..... 43
Şekil 3.4: Toprağın kurutulması 45
Şekil 3.5: Bitkilerin çimlenmesi ve büyümesi..... 46
Şekil 3.6: Bitkilere şelat eklenme dönemi ve hasat hazırlıkları..... 47
Şekil 3.7: Digest için hazırlanmış bitkiler 48
Şekil 3. 8: Toprak Örneklerinin analize hazırlanması 49
Şekil 3.9: Bitki Materyallerinin Analize Hazırlanması 50
Şekil 4.1: Ayçiçeği bitkisinin Pb elementi alım grafiği..... 54
Şekil 4.2: Ayçiçeği bitkisinin Cd elementi alım grafiği 55
Şekil 4.3: Ayçiçeği bitkisinin B elementi alım grafiği 56
Şekil 4.4: Mısır bitkisinin Pb elementi alım grafiği 58
Şekil 4.5: Mısır bitkisinin Cd elementi alım grafiği..... 59
Şekil 4.6: Mısır bitkisinin B elementi alım grafiği..... 60
Şekil 4.7: Mısır Bitkisinin Farklı Bor Miktarlarıdaki Alım Performansı Grafiği 61
Şekil 4.8: Kanola bitkisinin Pb elementi alım grafiği..... 63
Şekil 4.9: Kanola bitkisinin Cd elementi alım grafiği 64
Şekil 4.10: Kanola bitkisinin B elementi alım grafiği..... 65
Şekil 4.11: Pb elementinin bitkiler tarafından alım grafiği 66
Şekil 4.12: Cd elementinin bitkiler tarafından alım grafiği..... 67
Şekil 4.13: B elementinin bitkiler tarafından alım grafiği..... 68
Şekil 4.14: Bitkilerin Şelat İlave Edilmeyen Şartlarda Element Alım Grafiği..... 69
Şekil 4.15: Bitkilerin 2.5 mmol Şelat İlave Şartlarıdaki Element Alım Grafiği..... 70
Şekil 4.16: Bitkilerin 5 mmol Şelat İlave Şartlarındaki Element Alım Grafiği..... 71
Şekil 4.17: Bitkilerin 10 mmol Şelat İlave Şartlarındaki Element Alım Grafiği..... 72

SEMBOL LİSTESİ

Pb : Kurşun
Cd : Kadmiyum
B : Bor
As : Arsenik
Cr : Krom
Cu : Bakır
Hg : Civa
Zn : Çinko
Mn : Mangan
Mo : Molibden
Ni : Nikel
Ag : Gümüş
Co : Kobalt
Se : Selenyum
Sr : Stronsiyum
Cs : Sezyum
Pu : Plutonyum
U : Uranyum
$Pb(NO_3)_2$: Kurşun Nitrat
$CdCl_2$: Kadmiyum Klorür
H_3BO_3 :Borik Asit
HF : Hidroflorik asit
HNO_3 : Nitrik Asit
H_2O_2 : Hidrojen Peroksit
HCl : Hidroklorik Asit

Pb, Cd, B ELEMENTLERİNİN TOPRAKLARDAN ŞELAT DESTEKLİ FİTOREMEDİASYON YÖNTEMİYLE GİDERİLMESİ

ÖZET

Ekosistemin kendini yenileme kabiliyetinin, insan müdahalesi sonucu azalması su ve hava ortamının kirlenmesine neden olduğu gibi toprak kaynaklarının da önemli ölçüde kirlenmesine neden olmuştur. Kirlenmiş toprakların fiziksel ve kimyasal metodlarla temizlenmesi ekonomik ve teknolojik olarak yüksek maliyetler gerektirdiğinden, bunların yerine hem ekolojik hem de ucuz bir alternatif olarak kabul edilen agronomik teknikler kullanılmaktadır. Ağır metaller, çevrede bulunan bitki ve hayvan yaşamına yüksek düzeyde kalıcılık ve zehirlilik etkisi göstermesi nedeniyle en tehlikeli ve öncelikli kirletici maddelerden biri olarak kabul edilmektedir. Kirlenmiş toprakların iyileştirilmesi amacıyla bitkilerin kullanıldığı ve özellikle ağır metallerin giderilmesinde kullanılmaya başlanılan fitoremediasyon yöntemi de bu yöntemlerden birisidir.

Bu çalışmada, Pb, Cd ve B elementleri ile kirlenmiş toprakların fitoremediasyon yöntemi ile temizlenmesi araştırılmıştır. Bu amaçla Pb, Cd ve B elementleri eklenmiş topraklara, mısır, ayçiçeği ve kanola bitkileri kullanılarak, fitoremediasyonları incelenmiştir. Ayrıca topraklara fitoremediasyon kapasitesini arttırmak üzere çeşitli dozlarda kompleks yapıcı şelat ilave edilerek, bitkilerin element giderim performanslarındaki değişimler gözlenmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında, toprağa $Pb(NO_3)_2$, $CdCl_2$ ve H_3BO_3 eklenmesinden sonra ayçiçeği, mısır ve kanola biki tohumlarının ekimleri yapılmış olup, ihtiyaç duyulan uygun aralıklarla sulamaları yapılarak gelişimleri gözlenmiştir. Bitki hasadından 7 gün önce toprağa EDTA eklenmiş ve daha sonra bitkiler hasat edilmiştir. Bitkinin kök ve toprak üstü organlarının aldıkları elementlerin belirlenmesi amacıyla saksılarda tek tek kesilerek çözünürleştirilmeleri yapılmış olup AAS ve ICP cihazları ile element içerikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında bitkilerin kğ kuru ağırlıkları başına aldıkları element miktarları tesbit edilmiştir.

REMOVAL OF Pb, Cd, B ELEMENTS FROM SOIL BY CHELATE ASSISTED PHYTOREMEDIATION METHOD

SUMMARY

As a result of human intervention to the self renewal capability of the ecosystem, not only water and air sources, but also soil resources have been contaminated to a great extent. Since the cleaning of contaminated soils by physical and chemical techniques requires expensive and difficult methods both in economical and technological sense, agronomic techniques may be used as an ecological and economical solution alternative. Uptaking of elements by plants in order to remediate contaminated soils (phytoremediation) is commonly used as one of the alternative methods.

In this study, phytoremediation of Pb, Cd and B elements from soils was investigated. Absorption capacities of corn, sunflower and canola plants were studied. Additionally, effect of chelate addition to soils for increasing the removal efficiency was investigated.

1. GİRİŞ

Artan teknolojik gelişmelere paralel olarak, toprak kirlenmesi de dünya genelinde ortaya çıkan büyük çevre problemlerinden birisi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Toprak, minerallerin ve organik artıkların parçalanarak ayrışması sonucu oluşan, yeryüzünü ince bir tabaka halinde kaplayan, canlı doğal bir kaynak olarak ifade edilmektedir. Toprak Kirliliği ise, toprağın, insan etkinlikleri sonucu oluşan çeşitli bileşikler tarafından bulaştırılmasını takiben, toprakta yaşayan canlılar ile yetişen ve yetiştirilen bitkilere veya bu bitkilerle beslenen canlılara toksik etkide bulunacak ve zarar verecek düzeyde anormal fonksiyonda bulunmasını, toprağa eklenen kimyasal materyalin toprağın özümleme kapasitesinin üzerine çıkması, toprağın verim kapasitesinin düşmesidir **(TKKY, 2005)**.

Çevre problemlerinin kaynakları temel olarak kullanılan maddelerin atık haline dönüştükten sonra doğrudan yada dolaylı olarak çevreye atılmasından kaynaklanmaktadır. Bu atıklar toprak, hava, yeraltı suyu ve yüzey sularını kirletmektedir. Bu kirlenme genellikle insan faaliyetleri sonucu evsel, endüstriyel ve tarımsal faaliyetlerden meydana gelen katı, sıvı ve gaz atıklardan oluşmaktadır.

Özellikle evsel ve bazı endüstriyel alanlardan kağıt, plastik, metal, cam, pil, elektronik, ahşap, tekstil ve kompozit gibi katı atıklar oluşabilmektedir. Bu atıkların kontrol altına alınabilmesi için geri kazanımı yapılanların tekrar ekonomiye kazandırılması amacıyla ayrı toplanırken geri kalanlar ise yakılmak suretiyle yada düzenli depolama sahalarına gönderilerek bertarafı yapılmaktadır. Evsel ve endüstriyel alanlardan oluşan atıksular ise deşarj standartlarına göre arıtımı yapılması gerekmektedir.

Toprak kirlilikleri, tarımsal alanlardan (pestisit ve ticari gübreler), madencilik alanlarından, yenilenemeyen enerji alanlarından (termik ve nükleer santralleri), sanayii alanlarından (kağıt, deri, çimento, tekstil, vb.) alanlarından ve karayolları ulaşım yakınlarındaki alanlardan ileri gelmektedir.

Toprak kaynaklarının yanında hava (atmosferik taşınım, yağış vb.), yüzey ve yeraltı su kaynakları (evaporasyon, erozyon ve filtrasyon) yollarıyla sürekli bir taşınım sözkonusudur.

Doğal kaynakların kirlenmeye karşı korunması, çevre kirliliğinin önlenmesi açısından son derece önemli olmakla birlikte, kirlenmiş alanların temizlenmesi de mevcut çevre kirliliklerinin çözümünde büyük önem arzetmektedir.

1.1 Çevre Kirleticileri ve Oluşan Etkileri

Çevre ve dolayısıyla toprak kirlenmesi mevcut veya muhtemel sağlık, ekonomik ve ekolojik risklere sebep olmaktadır. EPA'nın hazırladığı önemli kirletici maddeler listesinde toplam 129 kirletici madde bulunmaktadır.

Kirlilik oluşturan maddeler organik ve inorganik kirleticiler olarak da sınıflandırabilmektedir. İnorganik kirleticilerin başında ağır metaller ve iz elementler gelmektedir. Organik kirleticilerin en önemlisi ise kalıcı organik kirleticilerdir.

Toprağa karışan ve bu ortamda birikme yapan inorganik kirliliklerin en önemlilerinden olan ve aynı cins atomlardan meydana gelen saf maddeler olarak tanımlanan elementler, mikrobiyal aktiviteye, toprak verimliliğine, biyolojik çeşitlilik hatta besin zinciri yoluyla sıcakkanlılarda zehirlenmelere kadar birçok çevre ve insan sağlığı gibi problemlerin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir.

Ağır metaller, çevrede bulunan bitki ve hayvan yaşamına yüksek düzeyde kalıcılık ve zehirlilik etkisi göstermesi nedeniyle en tehlikeli ve öncelikli kirletici maddelerden biri olarak kabul edilmektedir. Genellikle toprak içerisinde toprak partiküllerine adsorbe olmuş halde bulunurlar. Mikrobiyal aktiviteler tarafından organik kirleticiler gibi degrade olmazlar.

Ağır metal kirliliğinin önemli bir kısmı katı atıklardan kaynaklanmaktadır. Katı atıklarda bulunan başlıca kirleticiler krom ve daha az miktarlarda olmak üzere bakır, kurşun ve çinkodur. Ayrıca arıtma çamurunda da değişik oranlarda kurşun, kadmiyum, krom, bakır, nikel, civa, çinko gibi maddeler bulunmaktadır. Karayolları ve otoyollar gerek yapımları sırasında, gerekse işletmeye açıldıktan sonra çevre üzerinde önemli baskılar oluşturmaktadır. Bu nedenle karayollarının ve otoyollarının kenarında ağır metallerden özellikle kurşun birikimi önemli bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır **(Çevre Atlası, 2007)**.

Kurşun, kadmiyum, civa, arsenik, krom vb. ağır metallerin çevreye yayılmaları aşağıdaki şekillerde olmaktadır:

- Egzoz gazı kaynaklı yayılımlar (kurşun)
- Madencilik kaynaklı yayılımlar (krom, bor)
- Endüstriyel kaynaklı yayılımlar;
    - Pil üretimi, kullanımı (civa, kadmiyum)
    - Demir çelik sanayi ve atıkları (krom)
    - Petrol rafinerisi (kurşun)
    - Boyalar (kurşun, kadmiyum)
    - Elektronik sanayi ve ölçü aletleri (civa)
- Tıbbi kaynaklı yayılımlar (civa)
- Doğal kaynaklı yayılımlar (kurşun, civa, krom, kadmiyum, bor)
- Termik santrallerde kaynaklı yayılımlar (kurşun, civa, krom, kadmiyum)
- Tarımsal kaynaklı yayılımlar (kadmiyum) (Çevre Hekim, 2006).

1.2 Kirleticilerle Mücadele Yöntemleri

Kirlenmiş sahaların belirlenmesinde gerektiğinde risk analizi yapılmakla beraber tehlikeli/zararlı maddelerin doldurulduğu, boşaltıldığı, depolandığı ve kullanıldığı yerler detaylı olarak incelenir ve gerekli toprak örnekleri alınıp analiz edilmelidir. Araştırmanın bu safhasında en önemli unsur temizlenmesi düşünülen yerlerin, uygulanacak yöntemin ekonomik vb. olma kriterlerine göre karar verilmesidir **(Özdemir, 1999)**.

Toprakların ağır metallerle kirlenmesinin önlenmesi ve kirliliğin giderilmesi amacıyla günümüzde birçok kontrol yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlardan en yaygın olarak kullanılanları;

- Kirleticiye müdahalede bulunmayarak, kirlenmiş alanın kullanımını yasaklamak,
- Kirleticiyi bölge içerisinde immobilize etmek ve bölgeyi kontrol altına almak,

- Kirlenmiş toprağı nihai bertaraf sahasına taşıyarak depolamak,
- Toprağı yerinde(in-situ) veya bölge dışında(ex-situ) arıtmak

Şeklindedir.

Ağır metallerle kirlenmiş topraklar için en uygun temizleme metodunun seçiminde bölge özellikleri, kirletici konsantrasyonu, giderilecek kirleticinin tipi, maliyet ve kirletilmiş ortamın sonraki kullanımı gibi pek çok faktörün göz önünde bulundurulması gerektiği vurgulanmıştır **(Kocaer ve ark., 2003)**.

Toprak kaynaklarının, endüstriyel ve doğal kaynaklı kirleticilerle kirlenmesinin sonucu faydalı kullanım imkanlarının azalması, bu kirleticilerin çeşitli arıtım metotları ile topraktan uzaklaştırılması gereğini ortaya çıkarmıştır. Kirlenmiş toprakların arıtımı amacıyla kullanılan ve fiziksel, kimyasal, termal ve biyolojik prosesleri içeren birçok teknoloji bulunmaktadır. Bu teknolojiler;

Kirleticilerin alıkonmasına yönelik yöntemler;

- Katılaştırma ve kararlı hale getirme,
- Camlaştırma,
- Bariyerlerle alıkoyma,
- Hidrodinamik alıkoyma,

Kirleticilerin yerinde arıtımına yönelik yöntemler;

- Toprağın yıkanması,
- Elektrokinetik arıtım,
- Hava enjeksiyonuyla vadoz bölgede kirletici arıtımı,
- Toprak buhar ekstraksiyonu,
- Biyolojik indirgeme,
- Hava enjeksiyonuyla yeraltısuyunda kirletici arıtımı,
- Reaktif bariyerler,
- Bitkisel arıtım(Fitoremediasyon)

olarak sıralanabilmektedir **(Altın, 2004)**.

Toprak kirliliğinin kontrolünde kullanılan kimyasal arıtım yöntemleri, uygulama kolaylığı ve uygulama süresinin kısalığı gibi bazı avantajlara sahip olmasına rağmen, gerek arıtım masrafının yüksek olması, gerekse arıtma sonucunda ortaya çıkan diğer kirletici formların nihai gideriminin zorlukları nedeniyle çevresel açıdan fazla tercih edilmemektedir.

Toprakta ıslah çalışmaları yapılmakla beraber kirliliğe maruz kalan potansiyel bitki, hayvan ve insan toplulukları üzerinde de mevcut ve muhtemel gerekli sağlık taramaları yapılması gerekmektedir. Kirleticinin tipine ve konsantrasyonuna göre oluşturulacak risk izleme programına göre kirleticiler giderildikten sonra da gereken önlem alınmalıdır.

Kirleticiler arasında tehlikeli grubu oluşturan ağır metalller, insanlar üzerinde zihinsel, hormonal ve nörolojik olumsuz etkiler bırakmaktadır. Ayrıca alerjik reaksiyonlara, genlerin mutasyonuna, vücuda yararlı bakterilerin ölümüne neden olmaktadır **(Siegel, 2002)**.

Özellikle tarımsal alanlardan kaynaklanan kirlilikler insan sağlığını tehdit eder hale gelmektedir. Fosfatlı gübre kullanımı ve atık sularla tarım alanlarının sulanması gibi nedenlerle bitkilerde ve suda miktarı artmakta olan kadmiyum, sınır değerleri aşıldığında bağ dokusu kanseri, kemik hastalığı ve kronik ishale yol açabildiğini belirlemiştir **(Özaslan, 2006)**.

Çalışılan Cd, Pb ve B elementleri, Türkiye topraklarında bulunma ihtimali yüksek olan elementlerdendir. Kurşun, karayolları trafiğinin yoğun olduğu bölgelerde, kadmiyum, tarımsal alanlardan gelen fosforlu gübrelerden kaynaklanmakta ve bor ise, Türkiye topraklarında bol miktarda bulunması nedeniyle topraklarda sıkça rastlanan elementlerdir. Bu nedenle tez kapsamında Türkiye'de en çok yetiştirilen bitkilerden olan mısır, kolza ve ayçiçeği kültür bitkileri ile, ilgili elementlerin alım kapasiteleri incelenmiştir.

Bu çalışmada, Pb, Cd, ve B gibi elementlerin, çeşitli bitkilerle topraktan giderilme performansının belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca farklı miktarlarda şelat eklenerek, bitkilerin element alım performanslarındaki değişimler incelenmiştir. Sözü edilen elementlerin çalışmada kullanılan ayçiçeği (Helianthus annus), mısır (Zea mays) ve kanola (Brassica napus) bitkilerindeki kök ile sap ve yapraklara taşınım miktarları hesaplanmıştır.

Deneysel çalışmalar kapsamında, toprağa $Pb(NO_3)_2$, $CdCl_2$ ve H_3BO_3 eklenmesinden sonra ayçiçeği, mısır ve kanola biki tohumlarının ekimleri yapılmış olup, ihtiyaç duyulan uygun aralıklarla sulamaları yapılarak gelişimleri gözlenmiştir. Bitki hasadından 7 gün önce toprağa EDTA eklenmiş ve daha sonra bitkiler hasat edilmiştir. Bitkinin kök ve toprak üstü organlarının aldıkları elementlerin belirlenmesi amacıyla saksılarda tek tek kesilerek çözünürleştirilmeleri yapılmış olup AAS ve ICP cihazları ile element içerikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında bitkilerin kğ kuru ağırlıkları başına aldıkları element miktarları tesbit edilmiştir.

2. FİTOREMEDİASYON

Bitki anlamındaki "*phyto*" ile ıslah anlamındaki "*remediation*" kelimelerinden türetilen ve 1991'de terminolojiye giren "*phytoremediation*", "*bioremediation*", "*botanical remediation*" ve "*green remediation*" olarak da anılmaktadır **(EPA, 2000)**. Türkçe'de "Yeşil Islah" olarak kullandığımız bu ifade bitki temel alınarak çevreyi ıslah etme teknolojileridir. Bu teknoloji ile organik ve inorganik maddeler bitki kullanılarak kirlilik oluşturduğu alandan bertaraf edilebilmektedir. Bu çalışmalarda kullanılan bitkilerde aranılan özellikler kirli alanlarda mevcut kirleticilerden zarar görmeden sağlıklı bir şekilde yetişebilmeleri, kök ve yeşil aksamlarını yeterli düzeylerde oluşturabilmeleridir.

Bu teknolojinin en önemli olumsuz yönü ise; çok ağır düzeylerde kirlenmiş alanlarda bitkilerin kısa sürede etkinliğini gösterememesidir. Bu nedenle ancak düşük düzeylerde kirlenmiş alanlarda kullanılır. Sistemin etkinliği kök derinlikleri ve iklim koşulları ile sınırlıdır. Doğal olmayan bitkilerin bu amaçla kullanılması biyolojik çeşitliliği olumsuz yönde etkileyebilir.

Fitoremediasyon, bitkilerin toprak ve/veya su ortamından organik ve/veya inorganik kirleticileri;

- Kök bölgesinde hareketsizleştirmek,
- Kökte ve bitkinin üst organlarında bünyelerine alarak depolama,
- Kökleri aracılığıyla bitkinin üst organlarına taşınarak gövde ve yapraklarında metabolize etme veya buharlaştırma yoluyla,

toprakların temizlenmesini sağlayan doğal bir teknolojidir.

1991 yılında kullanılmaya başlanan Fitoremediasyon'un ilk uygulama alanları, yapay sulak alanları ile petrol döküntü alanları olmuştur **(EPA, 2000)**.

Fitoremediasyon yöntemi, hem ekonomik hem de ekolojik bir yöntem olması, uygulama esnasında özel bir donanım gerektirmemesi ve uygulanan bölgenin

yeniden kullanılabilmesine imkan vermesi gibi avantajlara sahip olması nedeniyle günümüzde tercih edilen bir toprak ıslah yöntemi haline gelmektedir.

Bir kirleticinin bitkiler tarafından topraktan alınabilmesi için, öncelikle toprak şartlarının bitkinin isteklerine uygun olması gerekmektedir. Toprak pH'sı bu konuda en önemli parametrelerden biri olarak öne çıkmaktadır. Asidik ortamda kolayca çözümlenebilen ve hatta bazen bitkide bor gibi mikro besin elementlerinin yüksek alımdan dolayı toksik etki gösterebildiği gibi, toprak pH'sının nötüre doğru gitmesi sonucu bitkilerde alım kapasitesi düşmektedir. Benzer şekilde alkali (kireç yönünden zengin) topraklarda yetişen bitkilerin element alımlarında zorluklarla karşılaşılmaktadır. Bitki besin elementleri ve elementlerin bitkiler tarafından alınabileceği ortamın pH düzeylerinin genel olarak 5,8-6,5 arasında olması gerekmektedir. Dolayısıyla asidik şartlardaki toprakları bu sınırlar arasına çekmek için kireç, alkali ortamdaki toprakların pH değerlerinin düşürülmesinde ise bakteriler tarafından sülfürik asite dönüştürülmesi için kükürt uygulamaları yapılmaktadır.

Özellikle alkali ortamlarda ortaya çıkan bitkiler tarafından alım zorlukları, elementlerin şelat olarak adlandırılan ve toprağa ilave edilen organik moleküller tarafından kuşatılarak bitkinin kolayca alabileceği forma dönüştürülmesi ile aşılabilmektedir. Diğer taraftan topraktan element alma performansı yüksek olan bitkilerin, genel olarak özel coğrafik alanlarda yetiştikleri ve buna bağlı olarak özel gelişme şartları gerektirdikleri belirlenmiştir. Ancak çok yaygın alanlarda gelişebilen ve fitoremediasyon amacıyla başarılı bir şekilde kullanılan bitkilere de rastlanılmaktadır **(EPA, 2000)**.

Fitoremediasyon yöntemi ile giderimi yapılan çok çeşitli organik ve inorganik kirleticiler bulunmaktadır. Bitkiler tarafından topraklardan alınma potansiyeline sahip kirleticiler, elementler (Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn), Metaloidler (As,Se), radyonükleidler (90Sr, 137Cs, 239Pu, 238U, 234U), metal olmayanlar (B) ve diğer organik bileşikler (Pestisitler gibi) olmak üzere birçok maddeyi kapsamaktadır.

Şimdiye kadar ağırlığının %0,2'nin üzerinde metal biriktirebilen 400 civarında doğal hiperakümülatör bitki türü tanımlanmıştır. Bu türlerin genel karekteristiği yavaş gelişen ve sınırlı biyokütle üreten türlerden oluşmuştur. Oysa önerilen, hızlı gelişen derin köklü ve hedef materyalleri kolayca nakledip biriktiren türler olmasıdır.

Bazı elementlerin bu tür bitkilere kolaylıkla fitotoksik etki yapabilmesi de bu konuda karşılaşılan en önemli dezavantajlardan biri olarak görülmektedir **(EPA, 2000)**.

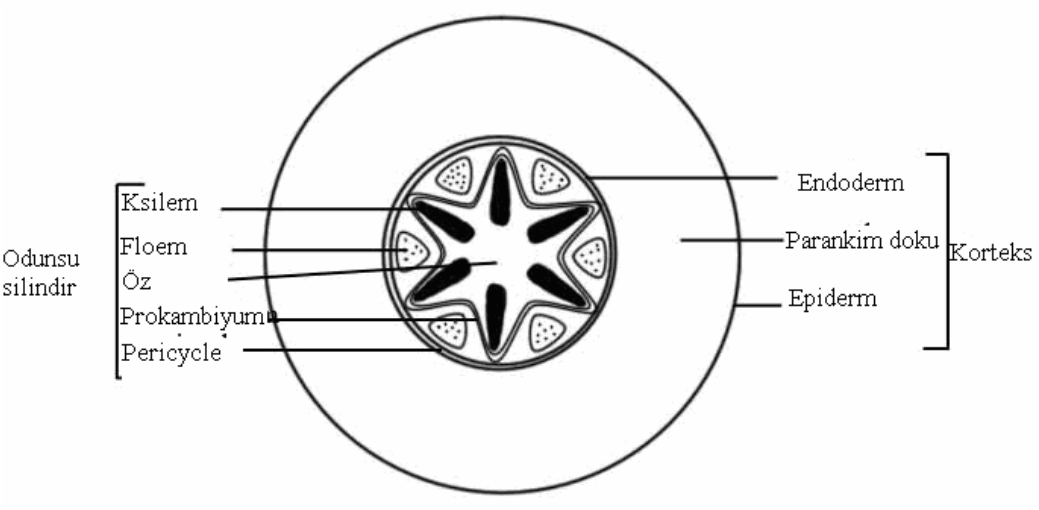
Aynı şekilde fitoremediasyon amaçlı olarak çok verimli bir şekilde kullanılan çeşitli kültürel ve yabani bitki türleri bulunmaktadır. Hipertoplayıcılar olarak adlandırılan bu bitkiler genellikle Brassicaceae, Euphorbiaceae, Asteraceae, Lamiaceae, ve Scrophulariaceae bitki familyalarında bulunmaktadır. Örnek olarak, Hindistan hardalı (Brassica juncea), Kanola (Brassica napus), Alpine pennycress (Thlaspi caerulescens), Ayçiçeği (Helianthus annuus) ve Tütün (Nicotiana tabacum), Hibrit kavak ağaçları (Populus deltoides) bu amaçla kullanılan en yüksek verimli bitkiler olarak öne çıkmaktadır.

2.1 Bitkiler Tarafından Metal Alımı

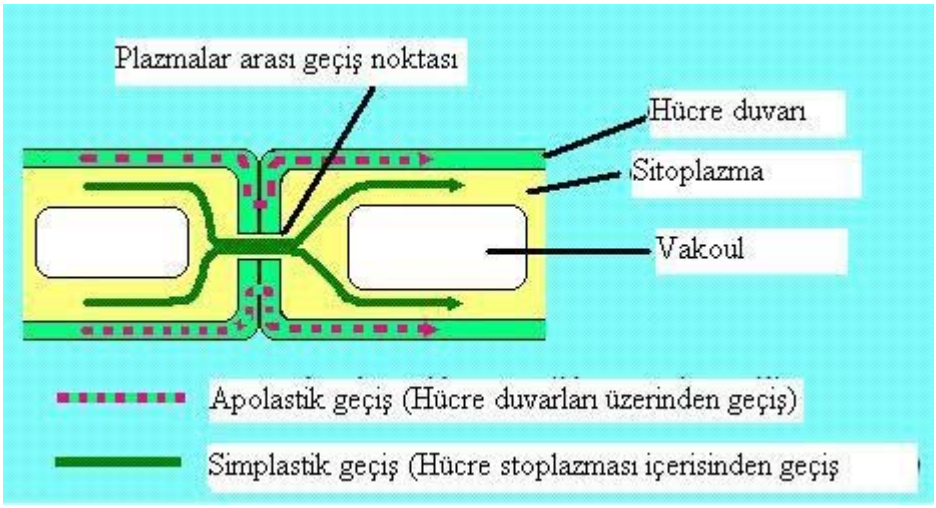
Bitkiler tarafından element alımı, genel olarak bitkinin alım sistemleri ve türe özel gereksinimler dışında toprağın bu elementi bulundurma kapasitesine ve toprak çözeltisindeki kimyasal erişilebilirliğine bağlı olarak değişir. Ayrıca katyon değişim kapasitesi ile organik madde içeriği gibi toprak özelliklerine göre de değişir. Elementler, toprakta hareketlenmelerini takiben bitkinin kök hücreleri tarafından tutulur (Şekil 2.1). Önce hücre duvarına bağlanan elementler, daha sonra taşıyıcı sistemler ve hücre içi bağlanma bölgeleri ile düzenlenerek plazma membrandan geçer (Şekil 2.2). Element iyonlarının alımının kanal proteinleri ve/veya taşıyıcı proteinler tarafından gerçekleştirildiği düşünülmektedir. Plazma membranın iç kısmının (-) yüklü olması katyonların alımı için geçiş üstünlüğü sağlamaktadır **(Clemens ve ark., 2002)**.

Toprak çözeltisinden bitki köklerine metal taşınması difüzyon ve konveksiyon yoluyla olmaktadır. Bu iki yöntemden hangisinin daha önemli ve öncelikli olduğuna dair çok fazla bilgi bulunmamaktadır. Fakat, çözeltideki toplam metal konsantrasyonunun artmasının konveksiyon yoluyla taşınımı da arttırdığı saptanmıştır.

Komplekslerin oluşumu toprak çözeltisindeki çözünmüş metal konsantrasyonunun artmasına bağlıdır. Ayrıca bitki tarafından alımda, komplekslerin bitkiler tarafından alınmaması durumunda bile bitki köküne doğru difüzyon yoluyla gerçekleşen taşınımları önemli ölçüde arttırdkları görülmüştür.



Şekil 2.1: Bitki kök yapısı



Şekil 2.2: Bitki hücreleri tarafından element taşınım sistemleri

Elementin topraktaki hareketliliği, topraktan alınması, kökte birikim ve hücre içindeki boşluklara taşınma, ksilem taşınımının etkinliği ve topraküstü kısımlarda elementin dağılımı, bitkilerde element birikimini etkileyen faktörlerdir. Elementlerin çözünürlüğü ve hareketi toprağın tipine bağlı olarak adsopsiyon, desorpsiyon ve komplex oluşturma işlemlerinden de etkilenebilmektedir.

Metallerin kök hücreleri içerisinde birikmesinden sonra uzun mesafe taşınması ksilem özsuyuna geçişleri ile gerçekleşir. Burdan da terleme gücü ile bitkinin üst kısımlarına taşınır. Metaller ksilem özsuyu içinde yaprak apoplastlarına ulaştırılır.

Taşıyıcılar simplast içine alım sağlar ve yaprak içine dağılım apoplast ve simplast yoluyla gerçekleşir **(Clemens ve ark., 2002)**.

2.2 Fitoremediasyon Yöntemleri

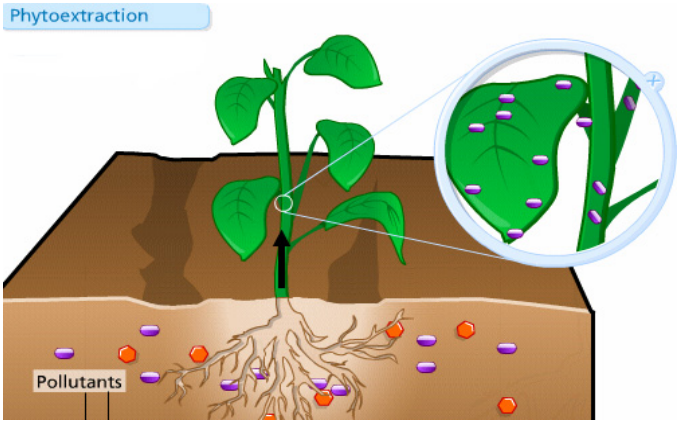
Organik ve inorganik kirleticilerin bitkiler kullanılarak giderilmesi teknolojisine genel olarak verilen bir isim olan fitoremediasyon kapsamında kullanılan bitkilere ve giderilecek kirleticilere bağlı olarak farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerin seçiminde kirleticilerin bitkiler tarafından alım ve giderim mekanizmaları, kirletici ortamının fiziksel ve kimyasal özellikleri, uygulanacak yöntemin kirleticiye uygunluğu, kirlilik konsantrasyonu, kirleticinin toprak içindeki derinliği ile iklim şartları gibi faktörlere dikkat edilmesi gerekmektedir **(EPA, 2000)**. Fitoremediasyon kapsamında söz konusu olan yöntemler aşağıda verilmiştir;

1. Fitoekstraksiyon
2. Fitostabilizasyon
3. Fitovolatilizasyon
4. Rizodegredasyon
5. Fitodegradasyon
6. Rizofiltrasyon
7. Hidrolik Kontrol
8. Vejetatif Örtü Sistemleri
9. Kıyı Tampon Şeritleri

2.2.1 Fitoekstraksiyon (Bitkisel özümleme)

Fitoekstraksiyon, özellikle inorganik kirleticilerin bitkinin kökleri tarafından alınması ve bir kısmının toprak üstü aksamına (sap ve yaprak) taşınarak biriktirilmesi yöntemidir (Şekil 2.3). Bu bitkiler diğer bitkilere oranla bünyelerinde 100 kata kadar daha fazla kirlilik etmeni biriktirebilir. Bu yöntemle bitki bünyesine alınan kirleticiler, bitki hasadı, budanması yada sökülmesi ile beraber uzaklaştırılabilmektedir. Hasat edilen kısımlar gübre olarak kullanılabildiği gibi, içindeki ağır metaller yeniden elde edilebilir. Bitkisel madencilik (*phytomining*) denilen bu yöntem; işlenerek çıkarılması ekonomik olmayan maden cevherlerinin elde edilebilmesi yolunu açmaktadır. ABD'nde bu yolla altın ve nikel gibi elementler

geri kazanılmaktadır Bu teknoloji daha çok, ağır metallerle kirlenmiş topraklarda uygulanmaktadır **(EPA, 2000)**.



Şekil 2.3: Fitoekstraksiyon yöntemi

Bu yöntem için uygun ve çoğu *Brassicacea*, *Euphorbiacea*, *Asteraceae*, *Lamiaceae* ve *Scrophulariaceae* familyalarından olmak üzere bünyesinde ağır metal biriktirebilen 400 kadar tür saptanmıştır.

Fitoextraksiyon yöntemi sonucunda hasat edilen bitki kalıntıları;

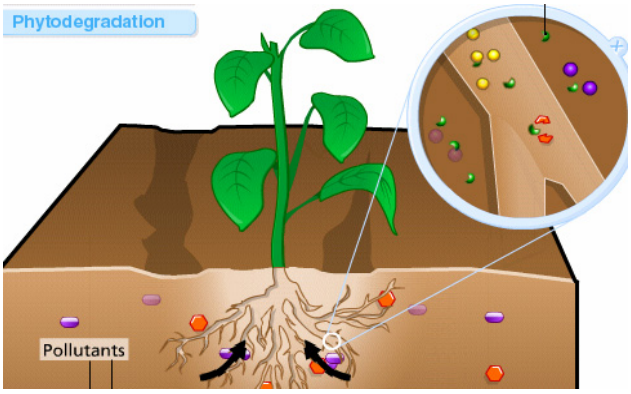
- kurutularak,
- yakılıp kül haline getirilerek,
- kompost haline getirilmesi amacıyla çürütülmesi yoluyla sınırlandırılarak,
- biyolojik metal madeni (bio-metal ore) halinde yeniden dönüşüme sokularak izole edilebilir **(Memon ve ark., 2000)**.

Bu yöntemde kirlilik taban suyuna geçmişse bitki köklerinin ulaşabileceği derinlik dikkate alınmalıdır **(Pivetz, 2001)**. Bu yöntemle topraktan alınan kirleticiler, elementler (Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn), radyonükleidler (90Sr, 137Cs, 239Pu, 238U, 234U), metal olmayanlar (B) ve bazı organiklerdir.

2.2.2 Fitodegredasyon (Bitkisel bozunum)

Fitotransformasyon olarak da bilinen fitodegradasyon, bitkiler tarafından alınan organik kirleticilerin metabolik proseslerden geçerek, bitkiler tarafından üretilen enzimler gibi bileşiklerin etkisi yoluyla bozunması yöntemidir (Şekil 2.3). Bu yöntemde ana mekanizma kirleticinin bitkiler tarafından alınması ve bitki bünyesinde metabolize olmasıdır. Bu işlem genellikle kök bölgesi ile hatta en uç kök kısımları ile sınırlıdır. Organik bileşiklerin bitki bünyesine alınabilmesi için eriyebilirliği, bitki tipi, kirlilik etmeninin toprakta kalma süresi veya eskiliği ile toprağın fiziksel ve

kimyasal yapısına bağlıdır. Hemen eriyebilen bileşiklerin bitki tarafından alınması zordur. Fitodegradasyon, toprak, tortu (sediment), çamur ve yeraltı sularının arıtılmasında kullanılmaktadır. Fitodegredasyon, yüzey sularının iyileştirilmesinde de kullanılabilmektedir. Yöntemin en önemli avantajı indirgenme veya bozulmanın fizyolojik olaylar doğrultusunda bitki içinde olması ve mikroorganizmalara bağlı olmamasıdır. Yöntemin dezavantajı ise bozulma sırasında zehirli ara ve son ürünler oluşabilmesi ve bunların çok zor tespitidir. Yapılan bir çalışmada, 70 organik bileşiği bünyesine alarak onların bozulmasını sağlayan 88 bitki türü saptanmıştır.



Şekil 2.4: Fitodegredasyon yöntemi

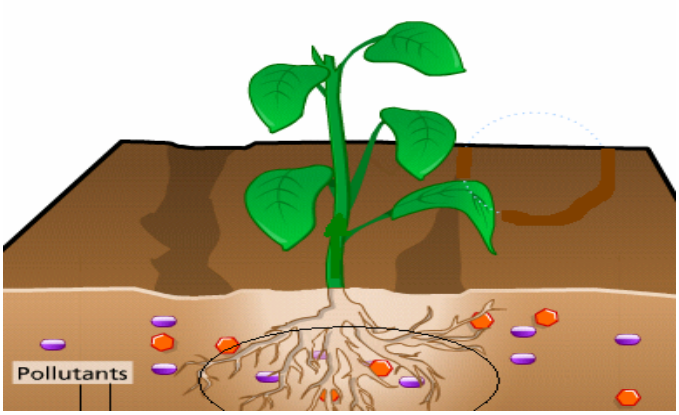
Fitodegradasyon yöntemiyle giderilebilen kirleticiler, klorlu bileşikler, pestisitler, askeri kimyasal maddeleri ve fenollerdir. Organik bileşenlerin gideriminde örnek olarak, bir su bitkisi olan papağan tüyü (Myriophyllum aquaticum) ve bir alg olan kayaotu (Nitella) bitkileri TNT'nin degredasyonunda kullanılmaktadır **(EPA, 2000)**.

2.2.3 Fitostabilizasyon (Köklerle sabitleme)

Bitkilerin kullanılmasıyla topraktaki kirleticilerin stabil hale getirerek biyolojik alınabilirliğinin azaltılması anlamındaki fitostabilizasyon, kirleticilerin hareketsizleştirilmesi, kökler tarafından biriktirilmesi, köklerin yüzeyine yapışması veya bitkinin kök bölgesinde çökelmesi şeklinde gerçekleşmektedir. Ayrıca bitki kökleri tarafından rüzgar ve su erozyonu, sızma ve toprak dispersiyonu yoluyla kirleticilerin muhtemel hareketinin engellenmesi olarak da tanımlanır (Şekil 2.4). Toprak taşınmasını gerektirmemesi önemli bir avantajdır. Ayrıca alan bitkilendirildiği için ekosistemdeki restorasyon zenginleştirilir. En önemli dezavantajı kirlilik etmenlerinin alanda kalarak uzun zaman içindeki değişikliklerle taşınabilmesi veya yıkanarak taban suyuna karışabilmesidir. Sistemde gübreleme ve

toprak ıslahı çalışmalarına, maksimum stabilizasyon etkinliği sağlamak için gerek vardır. Kök derinliği sistemin etkinliği bakımından çok önemlidir. Örneğin kavak kökleri 150-300 cm derinlikler için düşünülebilir.

Hibrit bir kavak Güney Dakota (ABD)'daki bir çalışmada ilk yıl 12 m büyüme kaydederek bünyesinde tahmin edilenden çok daha yüksek miktarlarda As ve Cd biriktirmiştir **(Pivetz, 2001)**.

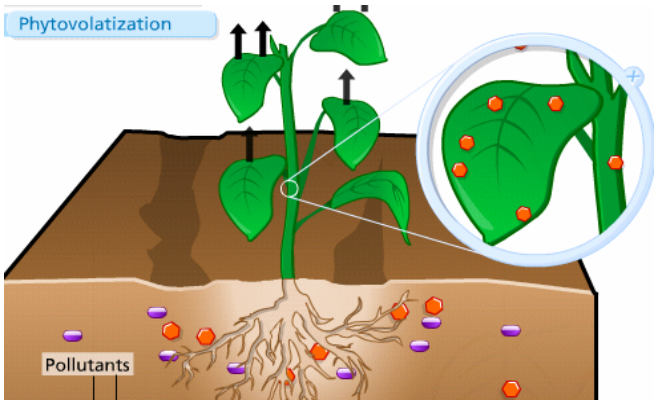


Şekil 2.5: Fitostabilizasyon yöntemi

Fitostabilizasyon yöntemi toprak, sediment ve çamurların arıtılmasında kullanılır. As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn gibi elementlerle kirlenmiş toprakların fitostabilizasyon ile iyileştirilmesi için hindistan hardalı ve çimler başarılı bir şekilde kullanılmaktadır **(EPA, 2000)**.

2.2.4 Fitovolatilizasyon (Bitkisel buharlaşma)

Fitovolatilizasyon, organik (klorlu çözücüler) ve inorganik (Hg, Se) kirletici etmenlerin bitki bünyesine alınarak, yapısının atmosfere verilecek şekilde değiştirilmesi ve atmosfere verilmesidir (Şekil 2.5).

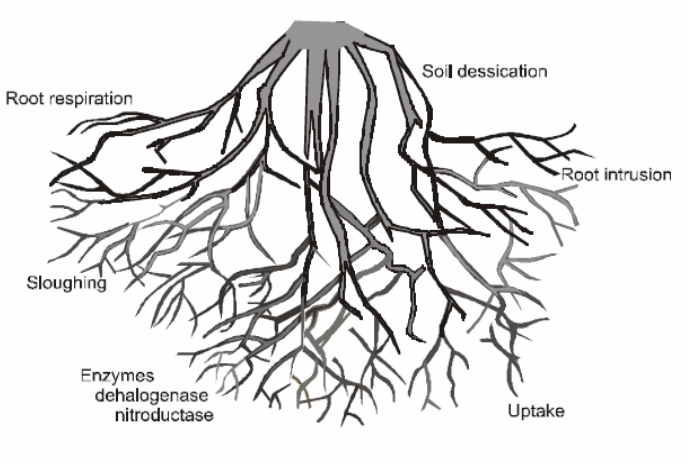


Şekil 2.6: Fitovolatilizasyon yöntemi

Fitovolatilizasyon, fitodegredasyon prosesini de içerebilmektedir. Yöntemin en önemli avantajı çok zehirli bileşiklerin (örneğin civalı bileşikler) daha az zehirli formlara dönüşmesidir. Ancak çok zararlı-zehirli materyallerin atmosfere bırakılabilmesi de bir dezavantajdır. Bu sistemde kök derinliği çok önemlidir. Yer altı suları sözkonusu ise, bitki köklerinin derin olması gerekir. Kirli yer altı suları pompalarla yüzeye çıkarılarak suyun daha sığ bitki köklerince alınması da sağlanabilir. Fitovolatilizasyon yöntemi yeraltı suları başta olmak üzere toprak, sediment ve çamur alanlarında da uygulanabilmektedir. Bu yöntemin uygulanabildiği kirleticiler arasında, Organik klorlu çözücüler ve Se, Hg ve As gibi inorganik kirleticiler yer almaktadır. Bu amaçla kullanılan bitkilerden hindistan hardalı ve kanola ile Se elementi giderilmiş ve selenat halindeki selenyum daha az toksik olan dimetil selenit gazına dönüştürülerek atmosfere salınmıştır **(EPA, 2000)**.

2.2.5 Rizodegradasyon (Köklerle bozunum)

Degradasyon, mikroorganizmalar tarafından veya bitki köklerinin etkisi ile oluşuyorsa bu olay rizodegradasyon olarak isimlendirilir. Rizodegradasyon topraktaki kök bölgesinde, organik kirleticilerin mikroorganizma faaliyetleri sonucu ayrışmasıdır (Şekil 2.6). Kök çevresinde mikrobiyal aktiviteleri etkileyen ve köklerden bırakılan şeker, aminoasit, organik asit, yağ asitleri, sterol, büyüme etmenleri, *nükleotid*, *flavanon* ve enzimler bulunur. Kirlilik yaratan organik bileşikler de bu çevrededir. Kökle bozunumun en önemli yararı kirleticilerin doğal ortamda yok olmasıdır. Ancak bunlar bitki veya atmosfere az da olsa taşınır **(Söğüt, 2004)**.



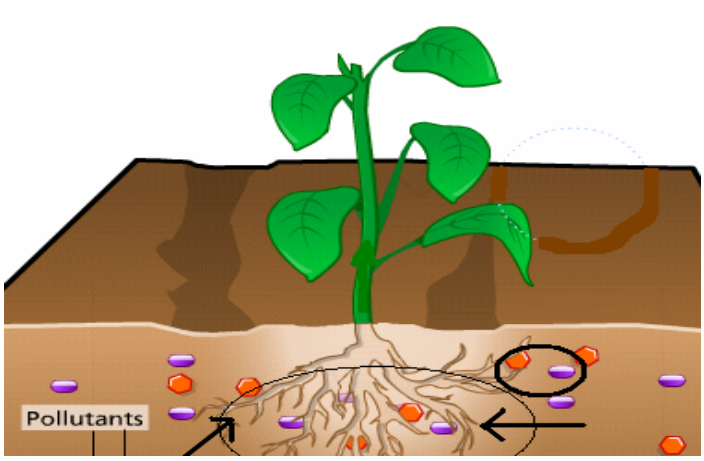
Şekil 2.7: Rizodegradasyon yöntemi

Rizodegradasyon yöntemi ile giderilen kirleticiler arasında, TPH (toplam petrollü hidrokarbonlar), PAH (çokhalkalı aromatik hidrokarbonlar), BTEX (benzen, toluen, etilbenzen, ksilen), pestisitler (herbisit, insektisit), klorlu çözücüler (TCE, TCA), PCP (pentaklorofenol), PCB (poliklorinatlı bifeniller), yüzey aktif maddeler (LAS, LAE) sayılabilir. Rizodegradasyon amacıyla kullanılan bitkiler arasında ise, Kırmızı Dut (Morus rubra L.), Nane (Mentha spicata), Yonca (Medicago sativa) ve Su kamışı (Typha latifolia) bitkileri sayılabilmektedir **(EPA, 2000)**.

2.2.6 Rizofiltrasyon (Köklerle süzme)

Rhizofiltration, biyotik ve abiyotik işlemlere bağlı olarak kirleticilerin köklerin içine alınması veya bitki köklerin üzerinde (*adsorpsiyon*) yapışıp kalmasıdır. (Şekil 2.7). Bu işlemlerin oluşu sırasında kirleticiler bitkiye alınabilir ve taşınabilir. Burada temel olan kirleticilerin bitki üzerinde veya içinde hareketsizliğinin sağlanmasıdır. Kirleticiler daha sonra çeşitli yollarla bitkiden alınabilir.

Karasal ve sucul bitkilerin kullanılmasına olanak tanıması sistemin avantajıdır. Ayrıca sistem doğal ortamlarda uygulanabilirliğinin yanısıra havuz, tank, gölet gibi yapay alanlarda da uygulanabilir. Yani kirlilik kaynağında veya uzakta bertaraf edilebilir **(Söğüt, 2004)**.



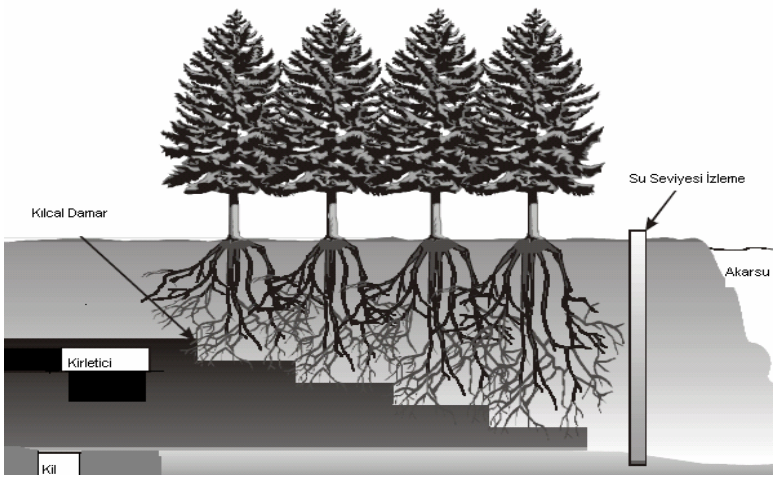
Şekil 2.8: Rizofiltrasyon yöntemi

Yeraltı suyu, yüzey suyu ve atık sular bu yöntemle arıtılabilmektedir. Rizofiltrasyon genellikle düşük kirletici konsantrasyonu ve yüksek su miktarı söz konusu olan şartlarda uygulanmaktadır. Bu teknoloji, kirleticinin bitkiye geçebilmesi için çözelti içerisinde bulunması gerektiğinden dolayı toprak, sediment ve çamurlardaki kirleticilerin giderimi için uygun değildir.

Bu teknoloji ile giderilen kirleticileri, elementler (Pb, Cd, Cu, Ni, Zn, Cr), radyonükleidler (Uranium (U), Cesium (Cs) ve Strontium (Sr)) olarak sıralamak mümkündür **(EPA, 2000)**.

2.2.7 Hidrolik kontrol

"*Phytohydraulic control*" veya "*hidrolik plume control"* olarak da bilinen hidrolik kontrol, bitki kullanılarak yer altı sularında kirlilik etmenlerinin birikmesini ve taşınmasını engellemek veya kontrol altında tutulmasıdır. (Şekil 2.8).



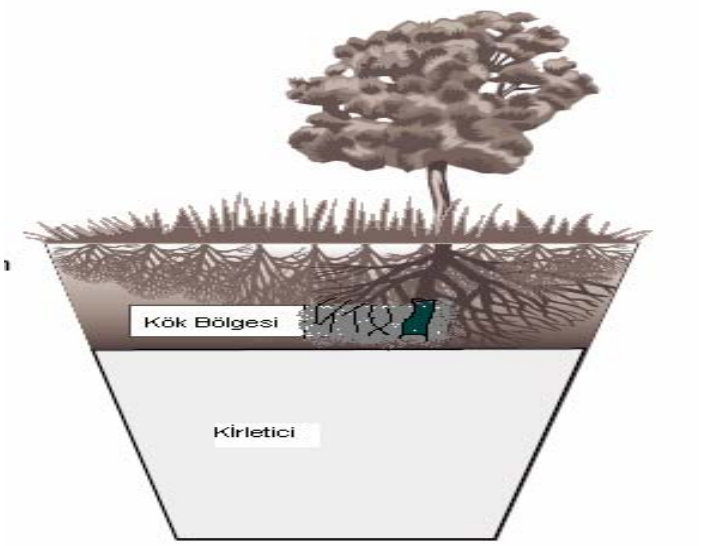
Şekil 2.9: Hidrolik kontrol yöntemi

Bu işlem yer altı ve yüzey sularına uygulanabilir. Bu sistemde daha önce bahsedilen yeşil ıslah kategorilerinin birden fazlası bir aradadır. En önemli avantajı herhangi bir yapay sistem kurulmasına gerek olmaması ve köklerin pompalardan daha fazla alana yayılması nedeniyle ıslah etki alanının çok genişlemesidir. En önemli dezavantajı ise mevsim ve iklime bağlı olarak bitkinin su alımının değişmesidir. Ancak yaprak döken ağaçlar kış boyunca istenilen görevi yapamazlar.

Söğüt ve *Eucalyptus* türleri de bu amaçlarla kullanılmaktadır. Beş yaşındaki bir *Populus* ağacının günde 100-200 litre su alması, tek bir söğüt ağacının terleme miktarının bir günde 5000 galon suya eşdeğer olması bu bitkilerin su kullanma yeteneklerini ve bu amaçla kullanımlarının önemini vurgulamaktadır **(Pivetz, 2001)**.

2.2.8 Vejetatif örtü sistemleri

Vejetatif örtü, kirleticilerin toprak yüzeyindeki uzun süreli ve kendiliğinden yetişen bitki sistemi ile kontrol altına alınması yöntemidir (Şekil 2.9).



Şekil 2.10: Vejetatif Örtü yöntemi

Vegetatif örtü topraktan buharlaşarak su kaybını engelleyici olarak, veya ıslah edici olarak iki tiptir. Birincide bitki toprağın su kaybını minimize ederken, su tutma yeteneğini de maksimize eder, kirletici etmenler de yıkanma formasyonuna indirgenemez veya hareket edemez. Yeşil ıslah amaçlı ikinci tip örtüde ise bitki bir örtü olarak suyun infitrasyonunu minimize eder ve alt tabakadaki kirliliğin bozulması amaçlanır. Mekanizmada su alımı, kök çevresi mikrobiyolojisi ve bitki

metabolizması var olup, sistemde hidrolik kontrol dahil *phytodegradation*, *rhizodegradation*, *phytovolatilization* ve *phytoextraction* kategorileri de bulunabilir. Uygulamalarda vegetatif örtü genellikle kirliliğin dağılmasını engelleyecek bariyerler şeklinde oluşturulur.Bu örtü kendini sürekli yenileyen yüzey erozyonunu minimize eden ve bakım istekleri az olan bir ekosistem olarak düşük maliyetle kurulabileceği için ABD'de katı atık depolama alanlarının örtülenmesinde alternatif olarak geliştirilmesi düşünülmektedir.

En önemli dezavantajı uygun bitki örtüsünü garantiye almak için gerekli olabilecek uzun süreli bakım ve kontrolün sağlanması gereğidir. Çünkü bitki türlerinden bazıları zaman içinde diğerine daha baskın hale gelebilir.

Bu yöntem toprak, sediment ve çamurda uygulanabilir. Bu amaçla ticari olarak kavak ağaçları ve çimler kullanılmaktadır **(EPA, 2000; Söğüt, 2004)**.

2.2.9 Kıyı tampon şeritleri

Kıyı tampon şeritleri genellikle akarsulara doğru akan yeraltı veya yüzeysel su içerisindeki kirleticilerin giderilmesi için akıntı boyunca akarsuların kıyılarına şeritler halinde uygun bitkilerin ekilmesi işlemidir (Şekil 2.10).



Şekil 2.11: Kıyı Tampon Şeritleri yöntemi

Bu ıslah ile, kirliliğin çevreye yayılmaması, taban suyuna karışmaması gibi görevler üstlenir. Sistem erozyonu da kontrol eder ve sedimenti azaltır. Kanada'da yapılan çalışmalarla buffer strips uygulamalarının toprak erozyonunu % 90, herbisit akışını % 42-70 oranlarında azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca sistemle sudaki sediment % 71-

91, azot % 67-96, fosfor % 27-97, pestisitler % 8-100 ve fekal koliformlar % 70-74 oranlarında azalabilmektedir **(Gabor ve ark., 2001)**.

Bu yöntemle en çok gübreler ve pestisitlerin giderilmesi konuları incelenmiştir. Kavaklar bu amaçla en sık kullanılan bitkiler arasındadır **(EPA, 2000)**.

Aşağıda Tablo 2.1 de fitoremediasyon yöntemlerinin hedef proses, ortam, kirletici ve kullanılan bitkiler yönüyle uygulanması ile ilgili genel bilgiler bulunmaktadır.

Tablo 2.1: Fitoremediasyon yönteminin genel karateristikleri

Mekanizma	Proses Hedefi	Ortam	Kirleticiler	Bitkiler
Fitoekstraksiyon	Kirletici Alma ve Uzaklaştırma	Toprak, Sediment ve Çamur	Metaller, Metalloidler, Radionükleidler	Hindistan Hardalı, Pennycress, Alyssum, Ayçiçeği, Hibrit Kavaklar
Rizofiltrasyon	Kirletici Alma ve Uzaklaştırma	Yüzey ve Yeraltı Suyu	Metaller, Radyonükleidler	Ayçiçeği, Hindistan Hardalı, Su Sümbülü
Fitostabilizasyon	Kirletici Etkisizleştirme	Toprak, Sediment ve Çamur	As, Cd, Cr, Cu, Hs, Pb, Zn	Hindistan Hardalı, Hibrit Kavaklar, Çimler
Rizodegredasyon	Kirletici Giderme	Toprak, Sediment ve Çamur, Yeraltı suyu	Organik Bileşikler	Kırmızı Dut, Çimler, Hibrit kavaklar, Sukamışı, Çeltik
Fitodegredasyon	Kirletici Giderme	Toprak, Sediment ve Çamur, Yeraltı suyu, Yüzey Suyu	Organik Bileşikler, Klorinat Çözücüler, Fenoller,Herbisitler	Alg, Stonewort, Hibrit Kavaklar, Siyah söğüt, Servi
Fitovolatilizasyon	Kirleticiyi buharlaştırma	Toprak, Sediment ve Çamur, Yeraltı suyu	Klorinat Çözücüler, Bazı İnorganikler (Se, Hg, As)	Kavaklar, Yonca, Siyah Locust, Hindistan Hardalı
Hidrolik Kontrol	Kirletici Bozunma	Yüzey ve Yeraltı Suyu	Suda Çözünen Organik ve İnorganikler	Hibrit kavaklar, Söğüt
Vejetatif Örtü	Erozyon Kontrolu	Toprak, Sediment ve Çamur	Organik ve İnorganik Bileşikler	Kavaklar, Çimler
Kıyı Tampon Şeritleri	Kirletici Giderme	Yüzey ve Yeraltı Suyu	Suda Çözünen Organik ve İnorganikler	Kavaklar

2.3 Fitoremediasyon Yöntemiyle Giderilen Bazı Elementler

Fitoremediasyonla giderilen elementlerin başında ağır metaller gelmektedir. Ağır metaller, periyodik tabloda bakır ile civa arasında yer alan, atom ağırlıkları 63,546 ile 200,590 arasında değişen ve 5 gr/cm^3 den daha yüksek özgül ağırlığa sahip bir grup element olarak tanımlanır **(Zenk, 1996)**.

Ağır metaller, yüksek toksisite ve kanserojen etki gösteren öncelikli tehlikeli kirleticiler olarak bilinmektedir. Metalleri diğer toksik maddelerden ayıran en önemli özellikleri insanlar tarafından oluşturulamaması ve yokedilememeleridir. Eser miktarda bile toksik etki yaptığı bilinen bu metaller, Ag, As, Be, Cd, Cr, Pb, Mn, Hg, Ni, Se ve Zn sayılabilir. Bunların dışında az miktarda yarı metal ve ametallerin de bulunduğu çoğu katı elementler içerisinde B göstermiş olduğu farklı özelliklere göre metal veya ametal sayılabilmektedir.

Ağır metaller, elementlerin çözünürlüklerine ve fizyolojik durumlarına göre organizmalar ile çevre arasında hareket halinde bulunmaktadırlar. Doğal salınım dışında, endüstriyel devrimin sonucu olarak özellkle ağır metallere olan talebin büyümesi ve artması, biyosferde metallerin yüksek dağılımına neden olmuştur.Birincil etkisi sucul bitkiler ile hayvanlarda kendini göstermekle birlikte günümüzde besin zinciri yoluyla gıdalardaki birikimlerle insanlar üzerinde de olumsuz etkiler başgöstermeye başlamıştır.

Endüstri atıksularındaki ağır metaller çevreye verilmeden önce arıtılabilmesi sözkonusu iken, toprak kirliliklerinde bu sürecin daha uzun sürede ve kontrolsüz olması bu imkanı olumsuz kılmaktadır. Ayrıca atıksuların arıtılmadan doğaya salınımları da toprakların kirletilmesine ortam hazırlamaktadır.

Atıklarda hangi fiziksel halde olursa olsun kendi aralarında solunum, sindirim veya deri absorbsiyonu ile canlı bünyesine giren ve dışarı atılamayarak girdiği ortamda birikerek uzun sürede kronik toksisite ve kanserojen etki gösteren, biyolojik arıtmaya karşı dirençli olan, yeraltı ve yüzeysel suları kirletmemeleri için kesin önlem alınması gereken atıklar tehlikeli ve zararlı atıklar sınıfındadırlar **(SKKY, 2004)**.

2.3.1 Kurşun

Kurşun, periyodik tablodaki elementlerden biri olup, simgesi Pb ve atom numarası 82 dir. Yumuşak, ağır, zehirleyici ve kolay dövülebilen mavimsi beyaz görünümünde

katı bir ağır metaldir. Kararlı elementler içinde en yüksek atom numarasına sahip olandır. Elektrik iletkenliği düşüktür. Korozyona dayanıklı olmasından dolayı aşındırıcı sıvıların (örneğin, sülfürik asit vb.) depolanmasında kullanılır. Kurşun, insan faaliyetleri ile ekolojik sisteme en önemli zararlı veren ilk element olma özelliği taşımaktadır.

Kurşun atmosfere element veya bileşik olarak yayıldığından ve her durumda toksik özellik taşıdığından çevresel kirlilik yaratan en önemli metaldir. Birçok sektörde de kullanım alanı olan kurşunun ekolojik sisteme yayılımında önemli rol oynamaktadır.

Kurşun, hava, su ve toprak yoluyla, solunumla ve besinlere karışarak biyolojik sistemlere giren son derece zehirleyici özelliklere sahip bir metaldir. Yüzbinlerce ton kurşun, kurşunlu petrolden elde edilen ve kurşun tetraetil ($(CH_3CH_2)_4Pb$) eklenerek oktan sayısı arttırılan yakıtlarla çalışan içten yanmalı motorlardan çıkan gazlarla dünya atmosferine boşaltılmaktadır. Kurşunun canlı bünyesinde farklı enzim sistemleri ile etkileşim göstermesi nedeniyle birçok organ veya sistem, kurşun birikimi için odak noktalarını oluştururlar.

Kurşun bitkilerde klorofil miktarını azaltarak vejetatif büyümeyi genellikle yavaşlatmaktadır **(Metalurji Dergi, 2003)**. Topraklara ise genellikle tarımsal alanlardaki fosforlu gübrelerin kullanımı, madencilik ve petrol rafineri alanları yoluyla karışmaktadır.

Normal tarım topraklarında bulunan Pb miktarı 2-200 ppm arasındadır. Kurşun kirliliğinin en önemli nedenlerinden biri petrol yakıtlarıdır. Üzerinde yoğun trafik bulunan otoyollar civarında Pb kirliliği söz konusu olabilmektedir **(Aktaş, 1995)**.

2.3.2 Kadmiyum

Kadmiyum, simgesi Cd ve atom numarası 48 olan kanserojen toksik bir metaldir. Aynı zamanda gümüş beyazı açık mavi renkli, parlak ve aşınabilir, yumuşak katı bir ağır metaldir. Kuru havada kararlı olup, nemli havada yavaşça okside olmaktadır.

Kadmiyumun kullanım alanı oldukça geniştir. Günümüzde kadmiyum endüstriyel olarak, Nikel/kadmiyum pillerde, korozyona karşı özellikle deniz koşullarına dayanımı nedeniyle gemi sanayinde çeliklerin kaplanmasında, boya sanaayinde, PVC stabilizatörü olarak, alaşımlarda ve elektronik sanayiinde kullanılır. Kadmiyum empürüte olarak fosfatlı gübrelerde, deterjanlarda ve rafine petrol türevlerinde

bulunur. Cd kullanım alanlarından atık kaynağı olarak en önemlisi metal kaplama endüstrileridir **(Metalurji Dergi, 2003)**.

Cd, yüksek çözünürlüğe sahip olması, bitkiler tarafından hızlı ve kolay absorblanabilmesi, yüksek hareket edebilme yeteneği ve küçük konsantrasyonlarda dahi bitkiler üzerinde zararlı etkisinden dolayı toksik elementler arasında en tehlikelisi olarak kabul edilmektedir **(Bıçakçı, 2003)**.

Kadmiyumdan uzun süreli maruz kalma sonucu en fazla etkilenen organ böbreklerdir. Böbrekte oluşan hasarın tekrar geriye dönüşü mümkün değildir. Akciğer ve prostat kanserlerinin oluşumunda kadmiyumun etkisi kesin olarak belirlenmiştir.

Bağıl olarak ender olarak bulunan bir element olan Cd, yer kabuğunda her yerde dağılmış durumdadır. Toprak ve sedimentlerdeki ortalama Cd konsantrasyonları 0,15-1 mg/kg arasındadır. Bazı kaynaklarda kirlenmemiş topraklarda Cd nin 0,04-0,32 mikrogram arasında olduğu ve 0,32 mikrogramdan daha fazla Cd bulunan toprakların kirlenmiş topraklar olarak kabul edildiği bildirilmiştir. Bitki yapraklarında 1 ppm'den daha fazla Cd bulunması, o bitkininin toksik etki göstereceği anlamına gelmektedir **(Bıçakçı, 2003)**.

Kadmiyum, genellikle topraklarda düşük konsantrasyonlarda bulunur. Sülfür, karbonat veya oksit gibi kadmiyum tuzları, suda çözülmezler. Ancak oksijen ve asitin etkisi altında çözünen tuzlara dönüşebilmektedir **(Jonnalagadda ve ark., 1993)**.

Fosfat kayasından fosforik asit üretimi sonucunda katı atık olarak Cd içeren jips (kalsiyum sülfat) atılmaktadır. Gübre sanayinden atılan kadmiyum miktarının önemli bir kısmı ürünün yani gübrenin içinde bulunmaktadır. Kadmiyum atıklarının % 56'sı gübre sanayi atıklarından, bu miktarın % 48'i ise fosfat üretiminden kaynaklanmaktadır **(Çevre Atlası, 2007)**.

Kadmiyum, bitki büyüme ve gelişimi için mutlak gerek duyulmayan elementlerin bitkilerde birikimi ve tolerans mekanizmalarının araştırıldığı birçok çalışmada model olarak kullanılmıştır **(Bıçakçı, 2003)**.

2.3.3 Bor

Bor, periyodik tabloda B simgesiyle gösterilen, atom numarası 5 olan, siyah/ kahverengi renkli, metalle ametal arası yarı iletken özelliklere sahip katı bir elementtir. Genellikle doğada tek başına değil, başka elementlerle bileşikler halinde bulunur.

Tabiatta yaklaşık 230 çeşit bor minerali vardır. Oksijenle bağ yapmaya yatkın olması sebebiyle pek çok değişik bor-oksijen bileşimi bulunmaktadır. Bor-oksijen bileşimlerinin genel adı borattır **(Yılmaz, 2002)**.

Hafifliği, gerilmeye olan direnci ve kimyasal etkilere dayanıklılığı sebebiyle; plastiklerde, sanayi elyafı üretiminde, lastik ve kağıt endüstrisinde, tarımda, nükleer enerji santrallerinde, roket yakıtlarında da kullanılmaktadır. Camın ısıyla genleşmesini önemli ölçüde indirgediği, camı asite ve çizilmeye karşı koruduğu, titreşim, yüksek ısı ve ısı şoklarına karşı dayanıklılığı sağladığı için ısıya dayanıklı cam gereçleri ve elektronik ve uzay araştırmalarında kullanılacak üstün nitelikli camların üretiminde de önemli yeri vardır **(DTM, 2007)**.

Bor, bitki gelişimi için önemli 16 temel bitki besininden biridir. Toprağın üst tabakalarındaki bor'un bir kısmı çürümüş bitki dokularından kaynaklanmaktadır. Bor, absorbsiyonun moleküler mekanizması ve transferi halen netleştirilemeiştir.Bor yavaş hareketli bitki mikrobesin maddesi olup, genellikle hücre duvarı bütünlüğünün sürdürülmesinde ihtiyaç duyulan temel besin maddelerinden en önemlisidir.

Birçok kaya ve topraklardaki B elementi toplam konsantrasyonları 5-50 mg / kg arasında bulunmuştur. Toprakta bulunan çözünebilir borun önemli bir kısmı borik asit (H_3BO_3) şeklindedir. Bor iyon formunda bulunmadığından toprak kolloidlerine bağlanmaz ve kolayca yıkanarak alt toprak katlarına iner. Kurak bölge topraklarında ise B, üst toprak katlarında yüksek konsantrasyonlara ulaşır. Topraklarda bor kalıntısı genel olarak bor madeninin bulunduğu ve çıkarıldığı alanlar civarında yükselmektedir.

Bor, bitkilerde şekerin hormon faaliyeti üzerindeki etkisini, fotosentez miktarını, köklerin büyümesini ve havadan emilen karbon dioksit miktarını artırır. Bor'un bir diğer işlevi hücre büyümesi ve yapısı olup, bor eksikliği hücre duvarlarını inceltici etki yapmaktadır. Ancak, bor'un çok yüksek konsantrasyonda bulunması toksik etki de yapabilmektedir **(Garrett, 1998)**.

Borun bitkileri için gerekli bir besin elementi olduğu, 50 yıldan daha uzun zamandır bilinmektedir. Transpirasyonun, borun bitkide yukarı doğru taşınması üzerine kesin etkili olduğu saptanmıştır. Bu durum borun esas itibariyle ksilemde taşındığını göstermektedir. Normal beslenen bitkiler 25-100 ppm arasında bor içerirler. Genellikle dikotiledon bitkilerin bor kapsamları monokotiledon bitkilere göre çok daha yüksektir **(Aktaş, 1995)**.

Türkiye B rezervi yönünden çok zengin bir ülkedir. Türkiye'nin bor madenleri, dünya rezervlerinin % 72 sini bulundurmaktadır.

2.4 Fitoremediasyon Yönteminde Kullanılan Bazı Bitkiler

Ökaryotik canlılar grubuna dahil olan bitkiler, tohumsuz ve tohumlu olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Fitoremediasyon yöntemine göre alınan metaller genellikle kapalı tohumlu grubuna ait olan dikotiledon yapraklılar tarafından alınmaktadır. Bitkiler ayrıca toprak remediasyonunda, genetik, biokimyasal ve fizyolojik özellikleri nedeniyle ideal araçlar olarak bilinmektedir.

Topraklardan kirleticilerin bitkiler tarafından fitoremediasyon yöntemiyle giderilmesi konusunda, literatürde birçok kaynak yeralmaktadır. Bu kaynaklara göre bünyesinde element biriktiren en az 45 bitki familyası bulunduğu tesbit edilmiştir. Bu bitkilerin çoğu Cu, Co, Cd, Mn, Ni, Se veya Zn elementlerini bünyelerinde 100 - 1000 mg/kg bitki seviyesinde biriktirebilmektedir **(Reeves ve Ark., 2000)**.

Bu bölümde tez kapsamında kullanılan bitkiler, genel olarak incelenmiştir.

2.4.1 Mısır (Zea mays L.)

Mısır, tek yıllık, organik maddece zengin, derin, ve su tutma kapasitesi iyi topraklarda yüksek verim potansiyeline sahip bir bitkidir. Mısır bitkisi saçak köklü bir bitki olup kök boyları dikey olarak 249 cm, yatay olarak ise 122 cm'ye kadar ulaşabilmektedir **(Kacar, 1989)**. Gerek dünyada ve gerekse ülkemizde bitkisel kökenli proteinlerin yeterli miktarda ve ekonomik anlamda üretimi için büyük önem taşıyan bitkilerden birisidir.

2.4.2 Ayçiçeği (Helianthus annus)

Tek yıllık, otsu bir kültür bitkisidir. Özellikle yağ elde etmek için yetiştirilmektedir. Boyu 4 m' ye kadar uzayabilir. Çiçekleri büyük olup, sapın uç kısmında bulunur. Kök yapısı ise kazık kök sistemine sahiptir.

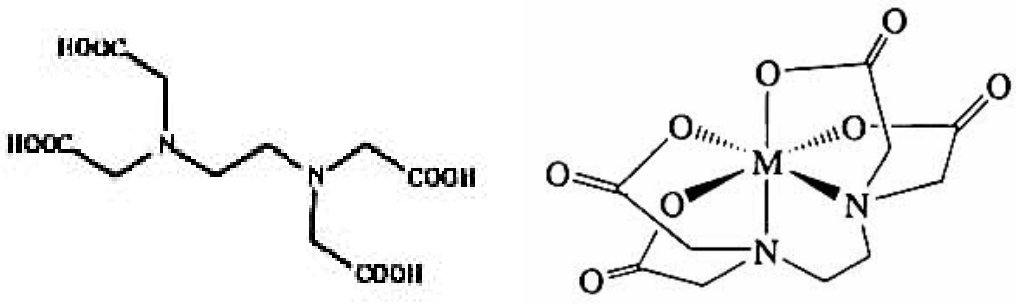
Son yıllarda ayçiçeği bitkisi ile yapılan birçok fitoremediasyon çalışmalarında, Cr6+, Mn, Cd, Ni, Cu, U, Pb, Zn, ve Sr elementlerinin alımında yüksek performans göstermektedir.

2.4.3 Kanola (Brassica napus)

Türkiyede rapiska, rapitsa, kolza isimleriyle de bilinen kanola (Canadian Oil Low Acid), kışlık ve yazlık olmak üzere iki fizyolojik döneme sahip otsu bir yağ bitkisidir. Kanola bitkisi kazık köklü bir bitkidir. Türkiye topraklarında çok yaygın olarak görülen hardal bitkisi, kolzanın yabani formudur. Yapılan çalışmalarda hindistan hardalı ve kanola'nın Se ve B elementlerini çok iyi biriktirebildiği görülmüştür **(EPA, 2000)**.

2.5 Fitoremediasyonda Şelat Uygulamaları

Fitoremediasyon amaçlı olarak kullanılan şelatlar, topraktaki metallerin toprak içerisindeki hareketlerini arttırmak ve bitki bünyesi tarafından alınmasını kolaylaştırmak amacıyla uygulanan kompleks yapıcı bileşiklerdir (Nowack ve ark., 2005) (Şekil 2.12). Şelatlar üç bileşenden oluşur. Şelat tarafından kapsanan metal, şelat maddesi (EDTA, DTPA, EDDHA, amino-asit, humik asit, fulvik asit) ve ek iyon (Na^+ ya da NH_4^+). Şelatlar kapsadıkları metali bitkinin kullanımına sunarlar fakat kendileri genelikle bitkiye girmezler **(DRT Tarım, 2007)**.



Şekil 2.12: Şelatın moleküler yapısı ve metallerle kompleks oluşturması

Fitoremediasyon amacıyla en sık kullanılan şelat, EDTA'dır. EDTA'nın kendisi kullanılan doza bağlı olarak bitkilere toksik etki de yapabilemektedir. Bu nedenle uygulanacak EDTA dozunun uygun bir aralıkta seçilmesi gerekmektedir.

EDTA metalleri topraktan sıyırmakta ve onları kompleksler halinde toprak çözeltisine katmaktadır. Bu kompleksler bitki kökleri vasıtasıyla su ve besin maddesi alımı yoluyla bitki bünyesine kolaylıkla girebilmektedir.

Topraklara şelat eklenmesi genel olarak toplam çözülmüş metal konsantrasyonunu arttırır. Normal toprak şartları altında 1 mol EDTA, 1 mol metalle kompleks oluşturur. Topraktaki şelat/metal oranı çok büyük bir öneme sahiptir. Bu oran arttıkça toprak çözeltisinde daha fazla şelat bulunacağından, çözünmüş metal miktarı da artacaktır.

EDTA, asidik yapıda olduğundan, eklenen miktara bağlı olarak toprak pH'nı düşürmektedir. Toprak pH ının düşmesi, toprak parçacıklarına bağlı olan metallerin adsorpsiyonunu azaltmakta ve metallerin toprak çözeltisi içindeki konsantrasyonlarının artmasına neden olmaktadır **(Nehnevajova, 2005)**. Ancak toprak pH'nın düşmesi, fitoremediasyon amacıyla kullanılan bitkinin gelişmesi ve canlılığının devamı açısından olumsuz sonuçlara yol açacağından bu durumun belirli bir pH derecesine kadar ancak devam etmesi söz konusu olmaktadır.

2.6 Fitoremediasyon Yoluyla Kirlilik Giderme Çalışmaları

Ağır metalleri bünyesine alan, üst organlara taşıyan, toplayan veya direnç gösteren bitkilerle oluşan biyokimyasal işlemlerin daha iyi anlaşılması ve moleküler ve genetik yaklaşımlar kullanılarak ortaya çıkan fitoremediasyonun biyokimyasının anlaşılması ile ilgili çalışmalar son yıllarda büyük bir hızla devam etmektedir. Özellikle itkilerin metalleri daha kolay ve fazla miktarda absorblaması için şelat ve benzeri kimyasalların eklenmesinin önemi ile ilgili birçok çalışma yapılmaktadır.

Bu kapsamda yapılan çalışmalardan birinde, 500 mg/L kurşun uygulanmış ve EDTA ile zenginleştirilmiş bir toprakta mısır bitkisi ile yapılan araştırmada EDTA'nın 0 (kontrol), 0,5 (düşük), 1,0 (orta), ve 2,5 mmol/kg (yüksek) düzeylerindeki Pb alınabilirliği arasındaki farklılıklar incelenmiş, yüksek ve orta EDTA düzeylerindeki bitkiler, kontrol düzeyindekilerinden daha az gelişme göstermesine rağmen bitki yapraklarındaki kurşun konsantrasyonu, arttırılan EDTA miktarı ile birlikte artış

göstermiştir. Orta düzeyde EDTA'ya maruz kalmış bitkiler, Pb'nin kökten yapraklara taşınımı en yüksek düzeyde göstermiştir **(Hovsepyan, 2005)**.

Üç bitki türü ile yapılan başka bir çalışmada kontrol bitkileri ile kurşun hiperakümülatör bitkilerinin potansiyel kullanımlarının yaprak ve gövdelerindeki Pb konsantrasyonlarının karşılaştırmaları test edilmiştir. Buna göre ayçiçeği bitkisinin, terkedilmiş maden alanlarının restorasyonu ile fabrika bölgelerindeki kirlenmiş alanlarında Pb gideriminde en iyi sonucu veren bitki olduğu görülmüştür **(Boonyapookana, 2005)**.

Bazı hiperakümülatör bitkilerde yüksek metal alımına rağmen vejetatif yapılarında farklılıklar oluşabilmektedir. Hindistan hardalı bitkisi fitotoksit simptomlarını göstermeden Zn ve Cd'yi yüksek miktarlarda biriktirmiştir. Ancak Zn ve Cd nin yüksek konsantrasyonlar kök, gövde ve yapraklardaki yapılarında fizyolojik ve morfolojik karekterlerinde değişikliğe yol açmıştır **(Maruthi Sridhar, 2004)**.

Yine başka bir çalışmada kirlenmiş alanda toplanan ve içeriğinde Cd, Cr, Cu, Ni, Pb ve Zn kirleticileri bulunan toprak numunelerinin hardal bitkileri ile saksıda uygulanması sonucunda, karışık element kirleticilerin bitkinin fizyolojik gelişimi üzerine negatif etkide bulundukları görülmüştür **(Marchiol, 2004)**.

Thlaspi caerulescens bitkisi ile yapılan çalışmada ise toprak pH'sına ve toprak çeşidine bağlı olarak Cd alım performansına etkisi araştırılmıştır. Çalışmada toprak özelliklerinin Thlaspi bitkisinin Cd alımı üzerine önemli bir etkisi saptanmıştır. Maksimum Cd alımının sağlandığı en uygun pH aralığının 5-6 olduğu belirlenmiştir. 0,6 mg/kg toprakdan, 3,7 mg/kg toprağa kadar Cd metalinin eklenmesinin, bitki biyokütlesini olumsuz etkilemediği görülmüştür. Bitkideki en yüksek Cd konsantrasyonu pH 5,1'de ve 236 mg/kg ve Cd alımı ise 228 mg/saksı olduğu gözlenmiştir **(Junta, 2004)**.

Doğu Avusturya ikliminde fitoremediasyon teknolojisiyle EDTA ile canola kullanılarak bir hayli kirlenen endüstri topraklarından Cu, Pb ve Zn elementlerinin giderimi irdelenmiştir. Açık havadaki saksı deneylerindeki çalışma sonucunda kanola, EDTA kullanılmadığı şartlarda köklerinde 130 mg/kg Cu, 30 mg/kg Pb ve 180 mg / kg Zn kuru bitki ağırlığı biriktirmiştir. Ayrıca toprak üstü aksamında ise yaklaşık 20 mg/kg Cu, 2 mg/kg Pb ve 120 mg/kg Zn biriktirdiği tesbit edilmiştir **(Wenzell ve ark., 2003)**.

Diğer bir çalışmada ise hem element eksikliği ve hem de fazlalığı(toksisitesi)'nın bitkini büyümesi üzerinde baskı yaptığı bulunmuştur. Bitkinin biyolojik alınabilirliği düzeyinin yüksekliği durumunda, temel mikronütrientler (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo ve B) ile bitkiye yarayışlı olmayan mikronütrientlerin (Cd, Pb, Hg, Cr) toksik etki yapmaktadır **(Baker ve ark., 1989)**.

Ayrıca farklı organlarında yüksek konsantrasyonlarda Pb biriktirebilen birçok bitki bulunmaktadır. Brassica juncea, topraklarda fitoremediator olarak etkili bir şekilde kullanılabilmektedir. Kurşun kirletici bir toprakta, 500 mg / kg toprağa kadar Pb biriktirebilmektedir. Ayçiçeği ve mısır 16.000 mg / kg toprak Pb konsantrasyonu olan topraklarda yetişebilmektedir **(Spirochova ve ark., 2003)**.

Kurşun yönünden kirlenmiş topraklarda yapılan diğer bir çalışmada ise, 300–4500 ppm Pb olan toprağın toplanma, kurutulma ve saksılara yerleştirilmesi, gübrelenmesi ve sera şartlarında vetiver çimlerinin büyütülmesi deneyinde kullanılmıştır. Bitkilerdeki örneklerde 1390–1450 ppm konsantrasyonlarına kadar Pb miktarları bulunmuştur. En yüksek Pb miktarı bitki köklerinde bulunmuştur. Ölümcül olmayan miktardaki yavaş hareket eden bir herbisitin EDTA ile birlikte eklenmesi, Pb'nin sürgünlere fitoekstrasiyonu yada nüfuzunu arttırıcı yönde etki etmediği görülmüştür. Vetiver çiminin şelatlanmış toprak ile birlikte kullanılması işlemi, ateş menzilinde yer alan topraklar gibi kurşunla kirlenmiş alanların iyileştirme stratejisi olarak yüksek potansiyele sahip olduğu da anlaşılmıştır **(Wilde, 2005)**.

Yapılan çalışmalar arasında bitkinin vejetatif organların miktarı yani bitki kuru ağırlıkları da bulunmaktadır. Bununla ilgili yyapılan saksı deneyi şartlarında Calamagrostis epigejosis bitkisinin dokularında biriken ve farklı konsantrasyonlarda $CdCl_2$ olarak eklenen Cd, bitkinin köklerinde 40,96 mg/kg, saplarında 25,70 mg/kg ve yapraklarında ise 9,20 mg/kg kuru madde azami birikme olduğu tesbit edilmiştir **(Lehmann ve ark., 2004)**.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada Gramineae familyasına ait olan mısır, Compositae familyasına ait olan ayçiçeği ve Cruciferae familyasına ait olan kanola bitkisi kullanılarak, Türkiye topraklarında en sık gözlenen elementlerden olan kurşun, kadmiyum ve bor elementlerinin, saksı ortamında ve açık hava şartlarında şelat (EDTA) destekli olarak ekstraksiyonları incelenmiştir. Çalışmada kullanılan element, bitki ve diğer metaryellere ait bilgilerle deneysel metotların ayrıntıları aşağıda verilmektedir.

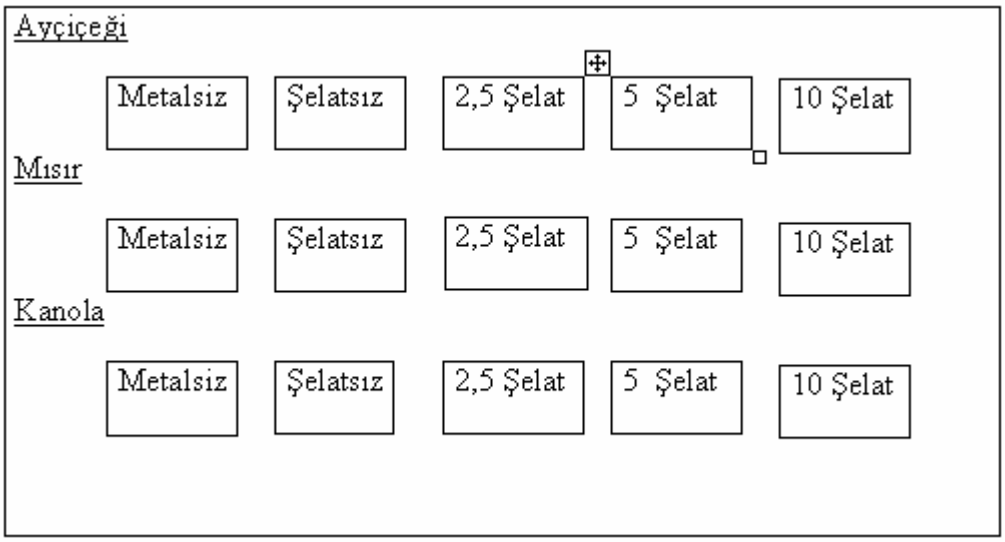
3.1 Materyal

Bu çalışmada 3 farklı bitkinin (ayçiçeği, mısır, kanola), farklı elementleri (Pb, Cd, B) alım performansları karşılaştırılmıştır. Ayrıca saksılara farklı dozlarda (0, 2.5, 5, 10 mmol/kg) şelat eklenerek element alım performanslarındaki değişimlerin belirlenmesi amaçlanmıştır.

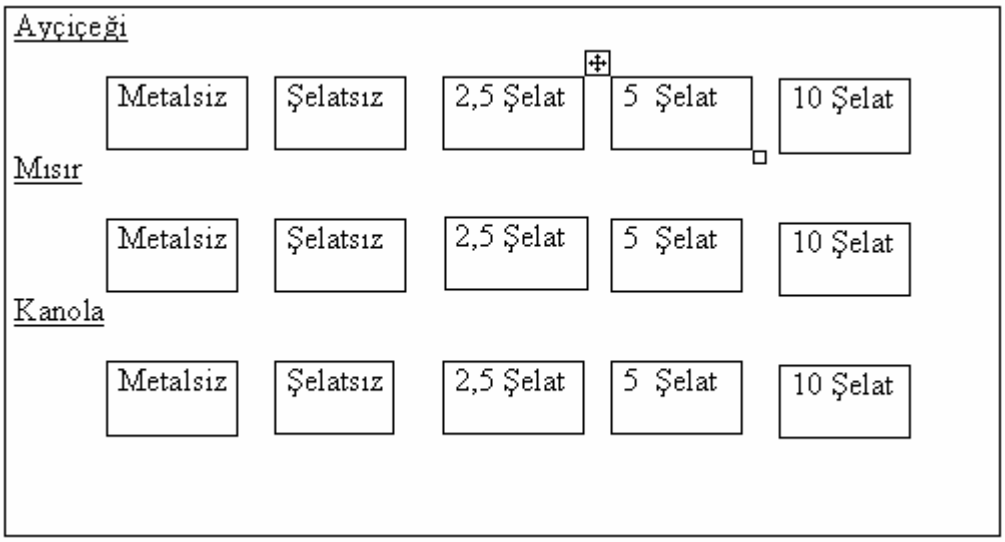
3.1.1 Elementler

Deneyi yapılan kurşun, kadmiyum ve bor elementleri, $Pb(NO_3)_2$, $CdCl_2$ ve H_3BO_3 formunda temin edilmiştir. Bu bileşikler gerekli hesaplamalardan sonra katı formunda toprağa ilave edilmiştir.

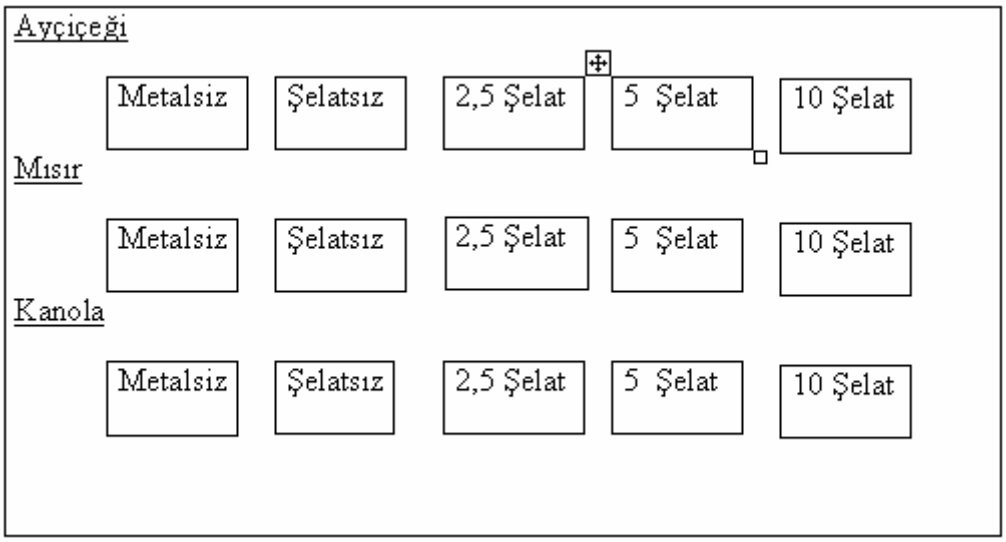
Tez kapsamında kurşun, kadmiyum ve bor elementlerinin fioremediasyonu amacıyla yapılan deneylerin şeması Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3 de verilmiştir.



Şekil 3.1: Kurşun Elementi Deney Şeması



Şekil 3.2: Kadmiyum Elementi Deney Şeması



Şekil 3.3: Bor Elementi Deney Şeması

3.1.2 Bitkiler

Fitoremediasyon çalışmalarında ayçiçeği, kanola ve mısır bitkisi kullanılmıştır. Bu bitkilerin tohumları, özel bir tohum şirketinden sağlanmıştır. Kanola için orta erkenci bir çeşit olan, "Orkan"çeşidi kullanılmıştır. Ayçiçeği tohumu olarak da tek melez (Hibrit) bir çeşit olan ve her türlü toprak ve iklim şartlarında yetişebilen, "Pactol F1" çeşidi seçilmiştir. Mısır tohumu olarak ise, kök yapısı ve bitkisi güçlü olan "MF 714" çeşidi seçilmiştir.

3.1.3 Toprak

Deneyde kullanılan topraklar, İstanbul anadolu yakasında bulunan Yenidoğan beldesindeki tarımsal araziden temin edilmiştir. Arazinin ilk 20 cm lik katmanından alınan topraklar, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Park ve Bahçeler Müdürlüğü laboratuarlarında analiz edilmiştir (Tablo 3.1).

Toprak kirliliğinin kontrolü yönetmeliğinde pH'ın 5-6 arasındaki kğ kuru topraktaki kurşun ve kadmiyum sınır değerleri 50 mg ve 1 mg olarak belirlenmiştir. Laboratuarda deney uygulama öncesinde analizi yapılan kurşun ve kadmiyum değerleri 1 mg/kg topraktan düşük çıktığı görülmüştür. Buna karşılık bor elementi miktarı ise 55 mg/kg toprak değeri çıktığı anlaşılmıştır.

Tablo 3.1: Toprak analiz sonuçları

Su ile doygunluk (%)	35
Su ile doygun toprakta pH	6,48
Toplam Tuz (%)	0,02
Kireç CaCO3 (%)	yok
Organik Madde (%)	2,43
Kum (%)	53
Kil (%)	22
Silt (%)	25
Bünye Sınıfı	Kumlu kil balçık
Fosfor P_2O_5(kg/da)	31,21
Potasyum K_2O(kg/da)	38,61

3.1.4 Şelat (EDTA)

Deneylerde, şelat olarak, molekül ağırlığı 372.24 gr ve çözünürlüğü 100 gr/lt olan EDTA kullanılmıştır. EDTA'nın moleküler formülü, $C_{10}H_{14}N_2O_8$ * 2Na-2H_2O şeklindedir. Suda az çözünür. Kristalli katı görünümüdedir. Erime noktası, 240 ^oC'dir. Topraklara uygulandığında yer altı suyuna sızması ihtimali bulunmaktadır. Toprakta orta derecede biodegrade olabilmektedir. Önemli oranda buharlaşmaları beklenmemektedir.

Toksikolojik olarak su yaşamına toksik etkide bulunmamaktadır. Örneğin balıklar için LC 50/96 saat değerleri 100 mg/lt nin üzerindedir.

3.2 Yöntem

Deneysel çalışmalar, sentetik olarak element ve şelat ilave edilmiş topraklarda, saksı ortamında ve açık hava şartlarında yürütülmüştür.

Kurşun, kadmiyum ve bor elementleri eklenmiş 3'er kg toprak içeren saksılara ayçiçeği, mısır ve kanola (kolza) tohumları ekilmiştir. Bitkiler uygun aralıklarla sulanmış ve gerekli bakımları yapılmıştır. Ekimden dokuz hafta sonra toprağa kompleks yapıcı EDTA eklenmiştir. EDTA eklendikten 1 hafta sonra bitkiler hasat edilmiştir.

Bitkilerin hasadından sonra hem toprakta hem de bitkinin çeşitli organlarında (kök, yaprak, gövde) element konsantrasyonlarını belirlemeye yönelik analizler yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle toprak ve bitki numunelerindeki elementler ekstrakte edilmiştir. Elde edilen çözelti, kurşun ve kadmiyum elementleri için AAS cihazı, bor elementi için ise ICP cihazı kullanılarak analiz edilmiştir.

3.2.1 Toprağın hazırlanması

Deneylerde kullanılan toprakların içerisindeki, taş ve diğer kaba maddeler ayıklanarak, 4 mm lik eleklerde elenmiş ve kurumaya bırakılmıştır (Şekil 3.4). Daha sonra her saksı için 3 kg toprak, 0,1 gr hassas terazilerde tartılarak hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.4: Toprağın kurutulması

Literatürlerden alınan bilgiler ışığında elementlerin bitkilere olan toksisiteleri de dikkate alınarak, toprağın kğ'ı başına 100 mg B, 250 mg Pb, 400 mg Cd eklenmiştir.

Tablo 3.2: Toprağa eklenen element miktarları

Bileşikler	Elementin atom ağırlığı/Molekül ağırlığı(gr/mol.gr)	Eklenen birim ağırlık (mg)	Eklenen bileşik ağırlığı(mg/kg toprak)	Toplam miktar(mg/3 kğ toprak)
Pb(NO3)2	207/331	250	400	1200
CdCl2	112,5/184	400	654	1962
H3BO3	10,8/62	25	143,5	430,5

Yukarıdaki tabloya göre hesaplanarak tartılan bileşikler, her saksıya eklenerek homojen hale gelinceye kadar iyice karıştırılmıştır.

3.2.2 Ekim ve bakım

Tohumların kontrollü olarak çimlenebilmesini sağlamak için, oda sıcaklığı şartlarında birden fazla tohum atılarak 2 şer adetten toplam 36 adet ayçiçeği, mısır ve kanola bitkileri çimlendirilmiştir. Her saksıda çok sayıda çimlenen bitkiler arasında iyi çimlenmiş olanları seçilmiş, saksının ortasında birer bitki kalacak şekilde seyreltme yapılmıştır.

Zaman içerisinde kanola bitkisinin toprağa eklenen bor elementinin konsantrasyonundan etkilendiği ve kurumaya başladığı görülmüştür. Bu nedenle bor dozu 25 mg a düşürülmüş ve bor elementi ile yapılan deneyler tekrarlanmıştır.



Şekil 3.5: Bitkilerin çimlenmesi ve büyümesi

3.2.3 Şelat eklenmesi

Bitkilerin vejetatif büyümelerini büyük ölçüde tamamlayıp generatif organların gelişimine başlamasından hemen önce topraklara EDTA eklenmiştir. EDTA ilavesinden 7 gün sonra bitkiler hasat edilmiştir. Literatürlerdeki mevcut veriler de dikkate alınarak toprağa 0, 2.5, 5 ve 10 mmol/kğ toprak olmak üzere EDTA ilavesi yapılmıştır. EDTA sulama amaçlı olarak kullanılan su içerisinde çözdürülerek saksılara homojen bir şekilde ilave edilmiştir.



Şekil 3.6: Bitkilere şelat eklenme dönemi ve hasat hazırlıkları

3.2.4 Hasat

Bitki numunelerine EDTA eklenmesinden itibaren 7. günün sonunda, bitki numuneleri toprağın 2 cm üzerinde çelik makasla kesilmiştir. Kökler ile yaprak ve gövde kısımları ayrılmış ve bütün numuneler deiyonize su ile yıkanarak kurumaya bırakılmıştır.



Şekil 3.7: Digest için hazırlanmış bitkiler

3.2.5 Toprak ve bitki parçalarının analizi

Toprak numuneleri, 75 ^{0}C de 2 gün süresince etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurumaya bırakılmıştır. Daha sonra etüvden alınan numuneler, desikatörde analiz süresine kadar saklanmıştır. Ardından hassas terazide 2 gr toprak numunesi tartılmıştır. Tartılan numuneler 250 ml lik beherlerde ağzı saat camı ile kapatılarak çeker ocakta 95 ^{0}C deki su banyosu üzerine yerleştirilmiştir.

Toprak analiz metodunun (EPA 3050 B) kullanıldığı işlemde 5 ml distile su ve 5 ml HNO_3 olmak üzere 10 ml lik çözelti, beherdeki numuneye eklenerek su banyosunda 15 dakika ısıtılıp, soğumaya bırakılmıştır.

Numuneler tekrar su banyosu üzerine yerleştirildikten sonra 5 ml konsantre HNO_3, 15 dakika arayla 3 tekerrür halinde katı partiküller eriyene kadar eklenmiştir.

Daha sonra 2 ml su ile 3 ml H_2O_2 den oluşan 5 ml lik çözelti, numuneye eklenmiştir. Köpürme tamamen bitinceye kadar 15'er dakika arayla 3'er ml H_2O_2 toplam miktarı 10 ml geçmeyecek şekilde eklenmiştir.

15 dakika sonra, önce 10 ml distile su daha sonra da 5 ml HCl eklendikten sonra beherdeki çözünmüş numuneler su banyosundan alınarak soğumaya bırakılmıştır.

Soğuyan numuneler 100 ml lik balon jojede Watman 41'lik filtre kağıdından geçirilmiştir. Metal eklenmiş numuneler için yapılan bu işlemlerin aynısı şahit numune için de yapılarak toprak digest işlemi tamamlanmıştır.



Şekil 3. 8: Toprak Örneklerinin analize hazırlanması

Bitki numunelerinin digest işleminde ise standart yaş yakma metodu (Bayraklı, 1987) kullanılmış olup, bir süre oda sıcaklığında kurumaya bırakılan bitki kök ve gövdeleri, 75 ^{0}C de etüvde sabit tartıma gelene kadar 3 gün bekletildikten sonra desikatörde saklanmıştır.

Numuneler, çelik makasla önce parçalanmış ve öğütücü mikserler kullanılarak kök ve toprak üstü aksamları ayrı ayrı öğütülmüştür. Öğütülen numuneler hassas terazi ile önce toplam ağırlıkları tesbit edildikten sonra, digesti yapılması için her numuneden 0,3 gr alınmıştır. Çeker ocakta bulunan hot plate üzerinde porselen krozeye konulan numunelere ilk önce 2 ml HF eklenmiştir. 10 dakika sonra ise 1 ml H_2O_2 eklenmiştir. Bu arada numunelerin yanmaması için belli aralıklarla distile su eklenmiştir. 10 dakika sonra 2 ml HNO_3 eklenmiş ve numune çözeltisi hot plate üzerinden alınarak, soğumaya bırakılmıştır.

Son işlem olarak ise, 25 ml lik balon jojeler üzerindeki filtre kağıdından geçirilen çözelti, distile su ile 25 ml ye tamamlanmıştır.



Şekil 3.9: Bitki Materyallerinin Analize Hazırlanması

3.2.6 Kimyasal analizler

Çözme sonucu elde edilen çözeltiler, içeriğindeki element miktarlarının analizi için AAS ve ICP cihazlarında analiz edilmiştir. Pb ve Cd elementleri için İTÜ Çevre Mühendisliği bölümü laboratuarındaki AAS kullanılırken, Bor elementi analizleri Kayseri Büyükşehir Belediyesine bağlı KASKİ'deki ICP cihazında yapılmıştır. Pb analizinin kalibrasyonu için 1 ppm, 2 ppm, 5 ppm'lik standartlar hazırlanmıştır. Cd analizleri için ise 0,2 ppm, 1 ppm, 4 ppm'lik standartlar hazırlanmıştır. Standartlar ve bitki örnekleri UNICAM SOOLAR 929 Atomik Absorbsiyon Spektrofotometre cihazında analiz edilmiştir. B analizi ise ICP cihazı ile yapılmıştır.

3.2.7 Toprak ve bitki element miktarlarının hesaplanması

Cihazlardaki analizler sonucunda toprak ile bitkinin kök ve toprak üstü aksamında extrakte edilen element miktarları ayrı ayrı hesaplanmıştır.

3.2.7.1. Topraktaki element konsantrasyonlarının hesaplanması

AAS cihazından elde edilen regresyon denklemi Y = 0,091X + 0,011 olarak belirlenmiştir. Toprak numunesinin element miktarları için okuma aralık standartları ise;

0,2 ppm için 0,024

1 ppm için 0,120

4 ppm için 0,372 olarak bulunmuştur.

Topraklarda bulunan element konsantrasyonları yukarıda eşitliğe göre hesaplanmıştır.

3.2.7.2. Bitkideki element konsantrasyonlarının hesaplanması

Bitki elementlerin miktarının hesaplanması için ise bitkinin kök ve toprak üstü aksamının ayrı ayrı analizleri yapılmıştır. Örnek olarak verilen hesaplamanın detayları aşağıda verilmiştir.

Cd saksı numunelerinden bir bitkiye ait hesaplamalar şu şekilde yapılmıştır;

1000 ml de 1,164 mg Cd bulunursa.
25 ml de X mg Cd bulunur.
= 0,0291 mg Cd (0,3 g bitkide)

0,3 g kökte 0,0291 mg Cd bulunursa
1,04 gr kökte X mg Cd bulunur.
= 0,100 mg Cd / 1,04 gr kök ağırlığı.

Aynı numunenin toprak üstü aksamı için ise;

1000 ml de 0,098 mg Cd bulunursa
25 ml de X mg Cd bulunur.
= 0,00245 mg Cd (0,3 g bitkide)

0,3 g yaprakta 0,00245 mg Cd bulunursa
4,95 gr yaprakta X mg Cd bulunur.
= 0,0404 mg Cd / 4,95 gr yaprak ağırlığı

Bitkide bulunan toplam Cd miktarı = 0,100 mg Cd / 1,04 gr kök ağırlığı + 0,0404 mg Cd / 4,95 gr yaprak ağırlığı
= 0,1404 mg Cd / 5,99 gr toplam bitki ağırlığı.

Bulunan bu miktar kg'a çevrilmiş ve bitkinin farklı organları için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

5,99 gr toplam bitkide 0,1404 mg Cd varsa

1000 gr toplam bitkide X mg Cd vardır.

= 23,44 mg Cd / kg bitki kuru ağırlığı,

= (0,100/0,01404)x100 = % 71,2 kökte,

= (0,0404/0,1404)x100 = % 28,8 yaprakta,

= (23,44 x 71,2) / 100 = 16,64 mg Cd /kg bitki kök ağırlığı,

= (23,44 x 28,8) / 100 = 6,75 mg Cd /kg bitki yaprak ağırlığı bulunmuştur.

4. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu çalışmada fitoekstraksiyon yöntemi kullanılarak, elementlerle (Pb, Cd, B) kirletilmiş toprakların, Ayçiçeği (*Helianthus annuus*), Mısır *(Zea Mays L.) ve* Kanola *(Brassica napus oleifera L)* kullanılarak fitoremediasyonları incelenmiştir. Değişik dozlarda fitoremediasyonda etkili olduğu bilinen kompleks yapıcı şelat (EDTA) kullanılarak, en uygun giderim dozu belirlenmiştir.

Seçilen element dozları doğal şartlar altında toprakta bulunabilecek element dozlarından daha yüksek olarak seçilmiştir. Element konsantrasyonlarının seçiminde bitkilerde ve toprakta kalabilecek kalıntı konsantrasyonlarının kolaylıkla ölçülebilmesi amaçlanmıştır. Ancak bu konsantrasyonlar bitkilere toksik etki yapma eşiğinin altında tutulmaya çalışılmıştır. Elde edilen deney sonuçları bu açıdan seçilen konsantrasyonların anlamlı olduğu sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Seçilen konsantrasyonlar, literatürdeki çalışmalarda seçilen konsantrasyonlara da benzerlik göstermektedir.

Denyesel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ilerleyen bölümlerde verilmiştir.

4.1 Bitkiler Tarafından Elementlerin Alınma Performansları

Saksılardaki topraklara ilave edilen elementler, tohumların çimlenme özelliklerini etkilememiştir. Ancak çimlenmeden sonra bitkilerin vejetatif gelişme devresinde kısmen bir yavaşlama gözlenmiştir.

Özellikle 100 mg bor eklenen saksılarda yetişen kanola ve ayçiçeği bitkisindeki gelişme bir süre sonra durmuş ve bu bitkiler kurumuştur. Bu nedenle bor dozu 25 mg'a düşürülerek bu deneyler tekrarlanmıştır.

4.1.1 Ayçiçeği bitkisinin element alım performansı

Ayçiçeği bitkisinin farklı şelat dozlarında kök ve gövdesinde biriken kurşun miktarları Tablo 4.1.'de, kadmiyum miktarları Tablo 4.2.'de, bor miktarları ise Tablo

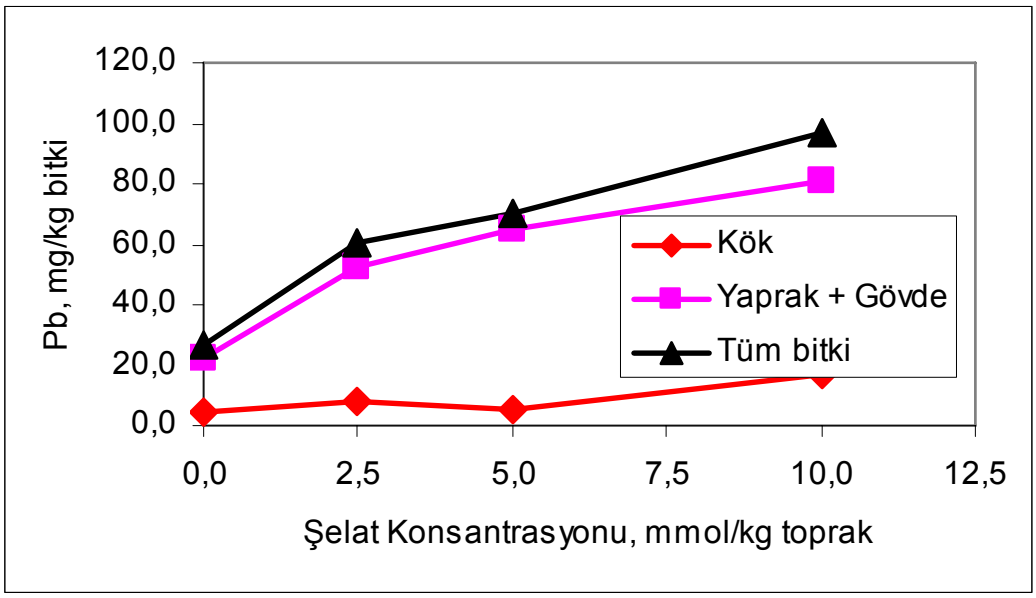
4.3.'te verilmiştir. Farklı şelat dozlarındaki Pb alım grafiği Şekil 4.1.'de, Cd alım grafiği Şekil 4.2.'de, B alım grafiği ise Şekil 4.3.'te verilmiştir.

Tablo 4.1'de ve Şekil 4.1.'de görüldüğü gibi, artan şelat dozlarına bağlı olarak kurşun alımında bir artış gözlenmiştir. Ayçiçeğindeki en yüksek birikme 10 mmol/kg toprak şelat ilavesinde 97,1 mg olarak gerçekleşmiştir. En düşük birikme ise şelat ilave edilmemiş saksılarda yetişen bitkilerde 27 mg/kg bitki şeklinde gerçekleşmiştir.

Ayçiçeği bitkisinde kurşun genel olarak yapraklarda ve gövdede birikme yapmıştır. Kökteki birikme miktarı %17 civarlarında gerçekleşirken, gövdede ve yaprakta birikme oranları tüm şelat dozlarında %80'in üzerinde gerçekleşmiştir. Bu durum ayçiçeği bitkisine geçen kurşunun köklerde çok fazla tutulmadan gövde ve yapraklara taşındığını göstermektedir.

Tablo 4.1: Ayçiçeği bitkisinin Pb elementi alımı

EDTA	Kök		Yaprak + Gövde		Tüm Bitki
mmol	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg
0,0	4,7	17,4	22,3	82,6	27,0
2,5	8,1	13,5	52,2	86,6	60,3
5,0	5,3	7,5	65,0	92,3	70,4
10,0	16,5	17,0	80,6	83,0	97,1



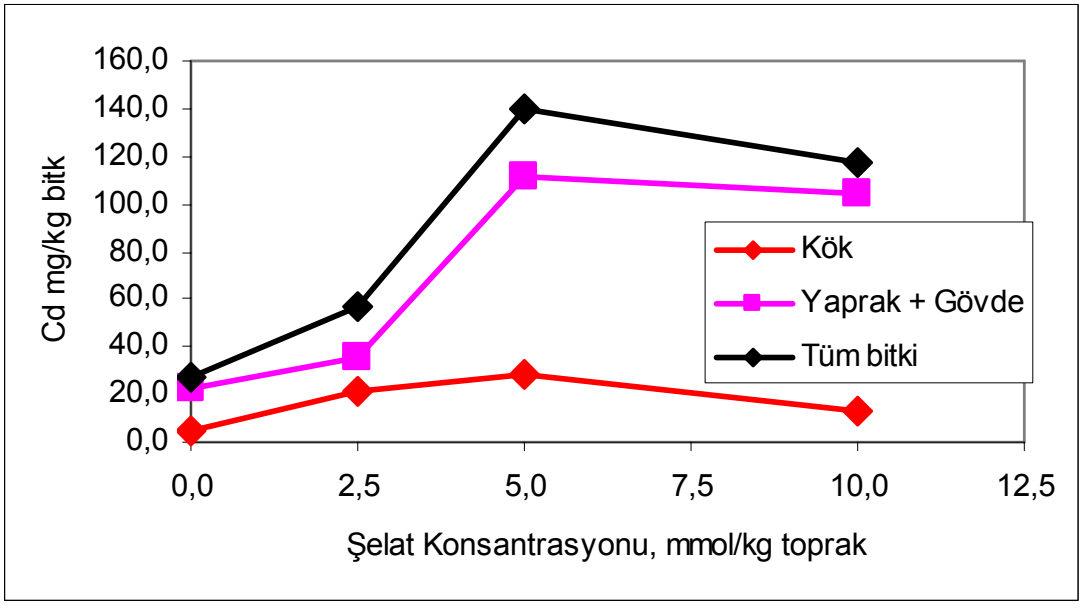
Şekil 4.1: Ayçiçeği bitkisinin Pb elementi alım grafiği

Ayçiçeği bitkilerinin Cd alımına bakıldığında tablo 4.2'de ve Şekil 4.2.'de görüldüğü gibi, 5 mmol'a kadar artan şelat dozlarında bir artış gözlenmesine rağmen 5 mmol'den sonra bir düşme gözlenmektedir. En yüksek birikme 5 mmol şelat ilavesinde 139,3 mg olarak gerçekleşmiştir. En düşük birikme ise şelat ilave edilmemiş saksılarda yetişen bitkilerde 27,3 mg olarak gerçekleşmiştir.

Ayçiçeği bitkisinde de kadmiyum genel olarak yapraklarda ve gövdede birikme yapmıştır. Ancak kökteki birikmede kurşuna göre yüksek olup %38,5 e kadar çıkabilmektedir. Gövdede ve yaprakta birikme oranları ise ortalama olarak %80'in civarlarında gerçekleşmiştir. Bu durum ayçiçeği bitkisine geçen kadmiyumun köklerde çok fazla tutulmadan gövde ve yapraklara taşındığını göstermektedir.

Tablo 4.2: Ayçiçeği bitkisinin Cd elementi alımı

EDTA	Kök		Yaprak + Gövde		Tüm Bitki
mmol	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg
0,0	5,0	18,3	22,3	81,7	27,3
2,5	21,9	38,5	35,0	61,5	56,9
5,0	28,0	20,1	111,3	79,9	139,3
10,0	12,5	10,7	104,4	89,3	116,8



Şekil 4.2: Ayçiçeği bitkisinin Cd elementi alım grafiği

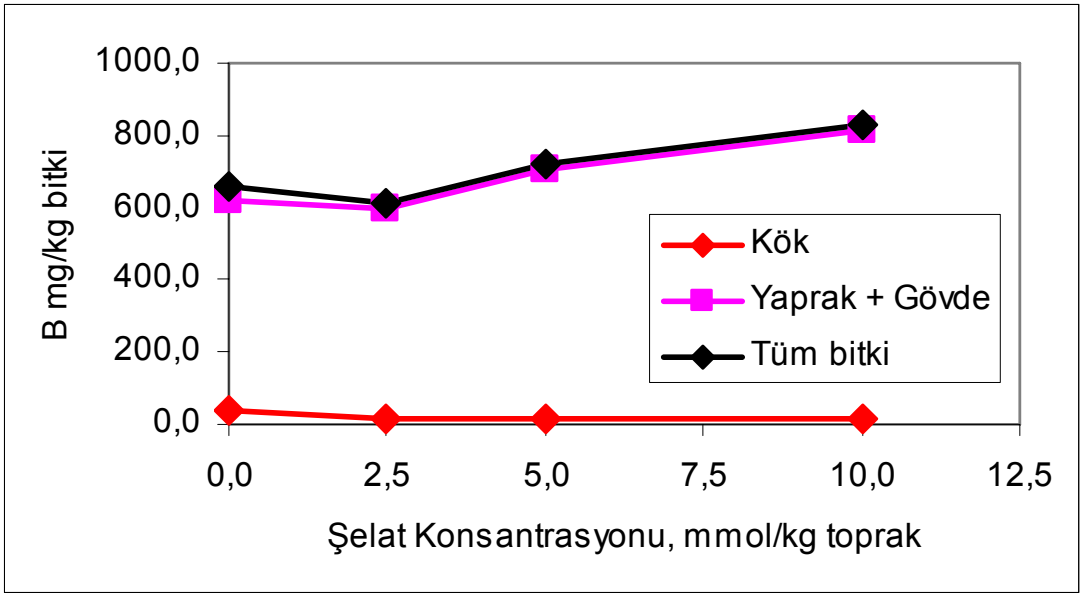
Tablo 4.3'de ve Şekil 4.3.'de görüldüğü gibi, artan şelat dozlarına bağlı olarak bor alımında bir artış gözlenmekle beraber, hiç şelat ilave edilmeyen topraklarda yetişen

ayçiçeği bitkisinin bile yüksek oranlarda bor alabildiği görülmüştür. En yüksek birikme 10 mmol/kg toprak şelat ilavesinde 827,8 mg bitki olarak gerçekleşmiştir. En düşük birikme ise şelatın 2.5 mmol ilave edilmiş saksılarda yetişen bitkilerde 609 mg olarak gerçekleşmiştir.

Ayçiçeği bitkisinde bor bariz oranlarda yapraklarda ve gövdede birikme yapmıştır. Kökteki birikme miktarı en yüksek %5,8 olarak gerçekleşirken, gövdede ve yaprakta birikme oranları ortalama olarak %97 civarlarında gerçekleşmiştir. Bu durum ayçiçeği bitkisine geçen borun köklerde çok fazla tutulmadan gövde ve yapraklara taşındığını göstermektedir.

Tablo 4.3: Ayçiçeği bitkisinin B elementi alımı

EDTA	Kök		Yaprak + Gövde		Tüm Bitki
mmol	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg
0,0	38,5	5,8	622,7	94,2	661,1
2,5	13,8	2,3	595,2	97,7	609,0
5,0	14,8	2,1	703,6	97,9	718,4
10,0	15,7	1,9	812,1	98,1	827,8



Şekil 4.3: Ayçiçeği bitkisinin B elementi alım grafiği

Genel olarak bakıldığında ise, ayçiçeği bitkisi tarafından Cd alımı, Pb alımına göre daha yüksek oranda gerçekleşmiştir. Bor alımında ise alınan bor elementinin Pb ve Cd'ye göre gövde ve yapraklara hemen taşındığı ve köklerde çok düşük oranda

birikme yaptığı gözlenmiştir. Şelat ilavesi Pb ve Cd için alım performansını önemli ölçüde etkilerken, B için çok önemli bir farklılık göstermemiştir.

4.1.2 Mısır bitkisinin element alım performansı

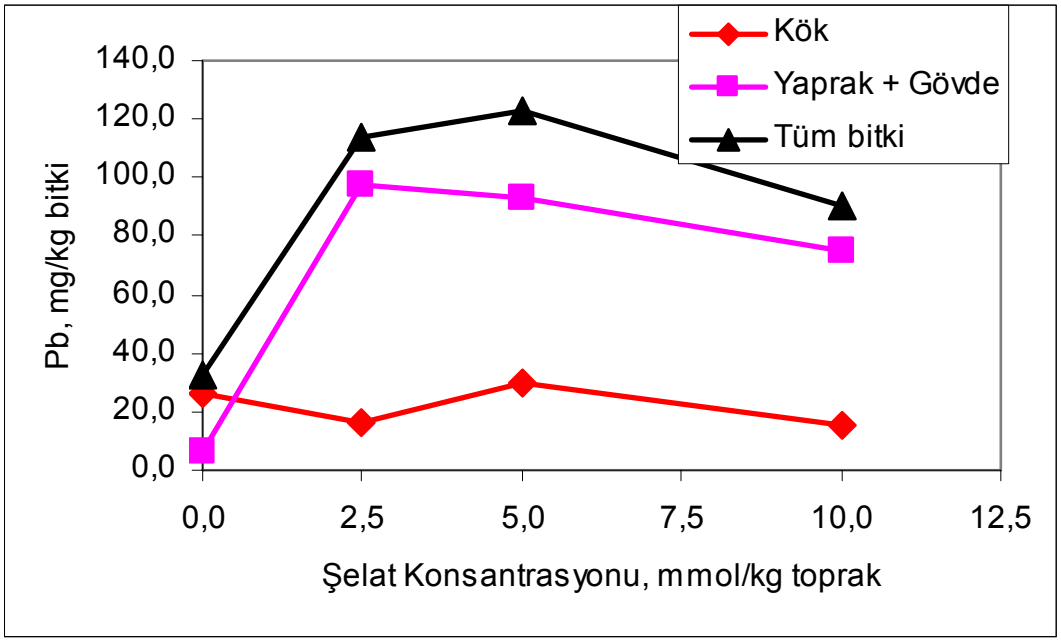
Mısır bitkisinin farklı şelat dozlarındaki kök ve gövdesinde biriken kurşun miktarları Tablo 4.4.'de, kadmiyum miktarları Tablo 4.5.'de, bor miktarları ise Tablo 4.6.'te verilmiştir. Şelat dozlarına bağlı Pb alım grafiği Şekil 4.4.'de, Cd alım grafiği Şekil 4.5.'de, B alım grafiği ise Şekil 4.6.'te verilmiştir.

Tablo 4.4'de ve Şekil 4.4.'de görüldüğü gibi, artan şelat dozlarına bağlı olarak kurşun alımında bir artış gözlenmekle beraber 5 mmol'den sonra düşme gözlenmiştir. Mısırdaki en yüksek birikme 5 mmol/kg toprak şelat ilavesinde 123 mg bitki olarak gerçekleşmiştir. En düşük birikme ise şelat ilave edilmemiş saksılarda yetişen bitkilerde 32,5 mg olarak gerçekleşmiştir.

Mısır bitkisinde kurşun şelat ilave edilmemiş olan şahit bitkiler hariç genel olarak yapraklarda ve gövdede birikme yapmıştır. Kökteki birikme miktarı şelat eklenmemiş numunede %80,5 civarlarında gerçekleşirken, gövdede ve yaprakta birikme oranı şelatın 2.5 mmol olduğu durumda %85.7 olarak gerçekleşmiştir. Bu durum mısır bitkisine geçen kurşunun şelat etkisiyle köklerde çok fazla tutulmadan gövde ve yapraklara taşındığını göstermektedir.

Tablo 4.4: Mısır bitkisinin Pb elementi alımı

EDTA	Kök		Yaprak + Gövde		Tüm Bitki
mmol	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg
0,0	26,1	80,5	6,3	19,5	32,5
2,5	16,2	14,3	97,5	85,7	113,7
5,0	30,0	24,4	93,0	75,6	123,0
10,0	15,0	16,6	75,2	83,3	90,3



Şekil 4.4: Mısır bitkisinin Pb elementi alım grafiği

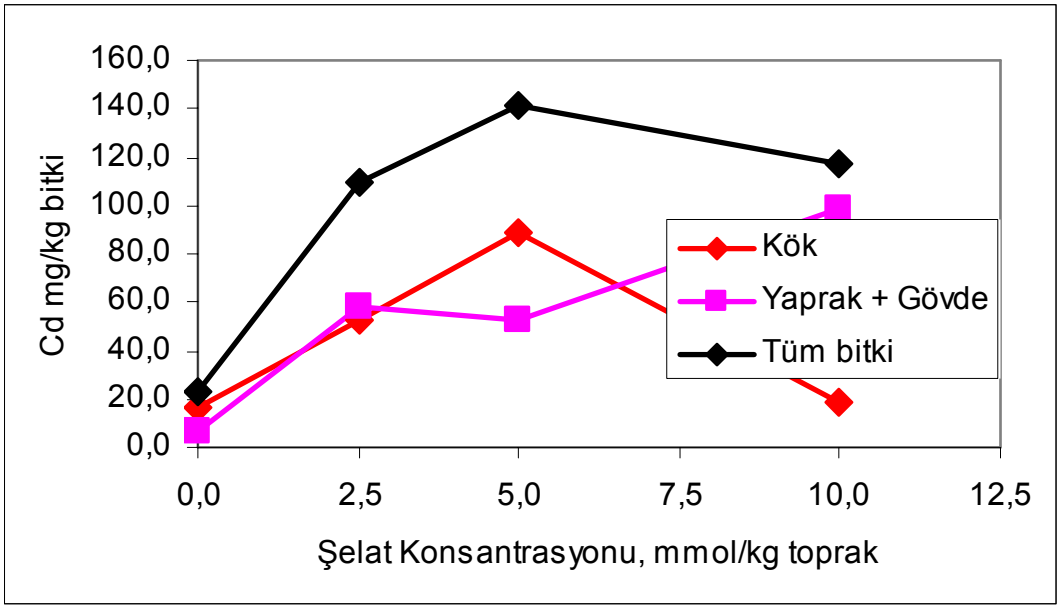
Tablo 4.5'de ve Şekil 4.5.'de görüldüğü gibi, artan şelat dozlarına bağlı olarak kadmiyum alımında önemli bir artış gözlenmekle beraber 5 mmol'den sonra düşme gözlenmiştir. En yüksek birikme 5 mmol şelat ilavesinde 141,3 mg olarak gerçekleşmiştir. En düşük birikme ise şelat ilave edilmemiş saksılarda yetişen bitkilerde 23,4 mg şeklinde gerçekleşmiştir.

Mısır bitkisinde kadmiyum, şelatsız ve 10 mmol olan numunelerde köklerde önemli bir birikme yapmazken, 2,5 ve 5 mmol'de yüksek oranlarda (%62) birikme yapmıştır. Kökteki birikme miktarı şelat eklenmemiş numunede %71,2 civarlarında gerçekleşirken, gövdede ve yaprakta birikme oranı şelatın 10 mmol olduğu durumda %84,3 olarak gerçekleşmiştir. Bu durum mısır bitkisine geçen kadmiyumun 5 mmol'den sonra köklerde çok fazla tutulmadan gövde ve yapraklara taşındığını da göstermektedir.

Ayrıca mısır, incelenen bitkiler arasında kökünde en fazla Cd tutabilen bitki olmuştur.

Tablo 4.5: Mısır bitkisinin Cd elementi alımı

EDTA	Kök		Yaprak + Gövde		Tüm Bitki
mmol	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg
0,0	16,6	71,2	6,8	28,8	23,4
2,5	52,4	47,6	58,0	52,4	110,0
5,0	88,5	62,7	52,8	37,3	141,3
10,0	18,4	15,7	98,6	84,3	116,9



Şekil 4.5: Mısır bitkisinin Cd elementi alım grafiği

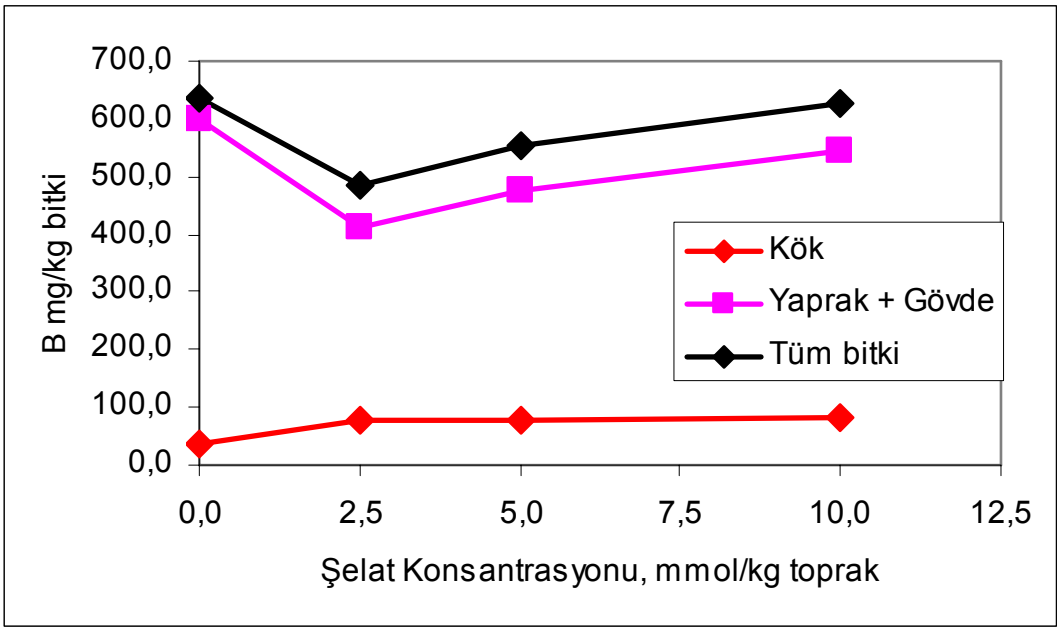
Bor açısından bakıldığında, Tablo 4.6'da ve Şekil 4.6.'da görüldüğü gibi, 2,5 mmol'den sonra artan şelat dozlarına bağlı olarak element alım miktarında bir artış gözlenmekle beraber, hiç şelat ilave edilmeyen topraklarda yetişen mısır bitkisinin yüksek oranda bor alabildiği görülmüştür. En yüksek birikme şelat ilave edilmeyen numunede 634 mg olarak gerçekleşmiştir. En düşük birikme ise 2.5 mmol şelat ilave edilmiş saksılarda yetişen bitkilerde 486,5 mg olarak gerçekleşmiştir.

Mısır bitkisinde bor bariz oranlarda yapraklarda ve gövdede birikme yapmıştır. Kökteki birikme miktarı en yüksek %15,6 olarak gerçekleşirken, gövdede ve yaprakta birikme oranları ortalama olarak %85 civarlarında gerçekleşmiştir. Bu

durum mısır bitkisine geçen borun köklerde çok fazla tutulmadan gövde ve yapraklara taşındığını göstermektedir.

Tablo 4.6: Mısır bitkisinin B elementi alımı

EDTA	Kök		Yaprak + Gövde		Tüm Bitki
mmol	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg
0,0	36,5	5,8	597,5	94,2	634,0
2,5	75,9	15,6	410,5	84,4	486,5
5,0	78,2	14,2	477,6	85,8	555,8
10,0	80,5	12,9	544,6	87,1	625,1



Şekil 4.6: Mısır bitkisinin B elementi alım grafiği

Genel olarak bakıldığında ise, Mısır bitkisi tarafından Cd alımı, Pb alımı ile birbirine yakın miktarlarda olurken ayçiçeği bitkisinde olduğu gibi bor, Pb ve Cd'ye göre daha fazla alınmıştır. Bor taşınımında ise alınan bor elementinin Pb ve Cd'ye göre gövde ve yapraklara hemen taşındığı ve köklerde çok düşük oranda birikme yaptığı gözlenmiştir.

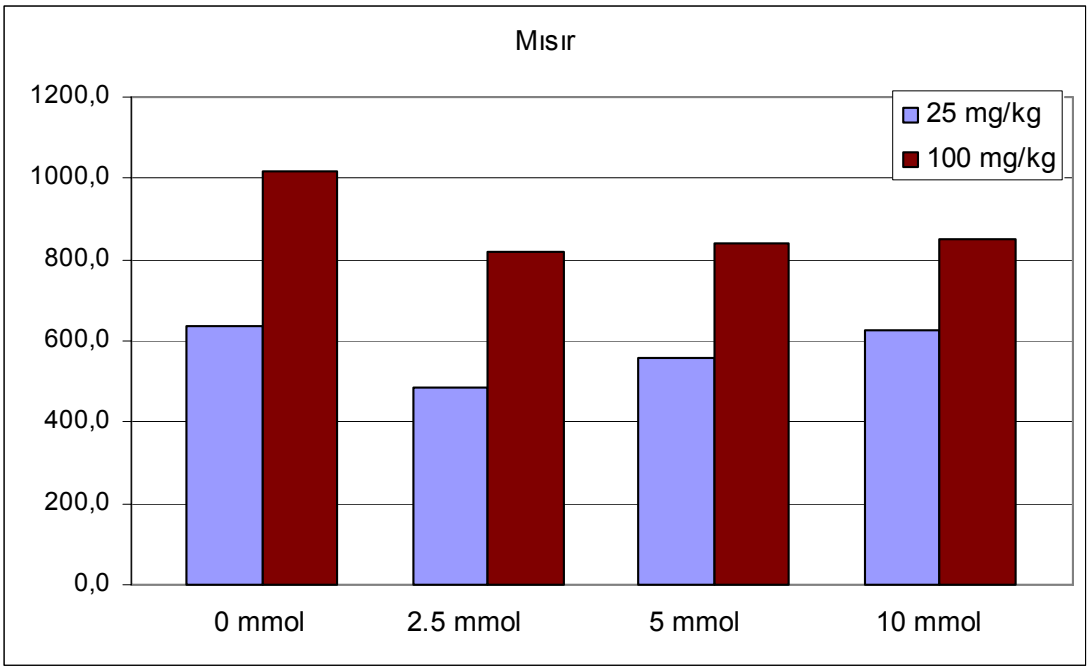
Ayçiçeği, Mısır ve kanola bitkilerindeki bor elementinin ilk deneyde ilave edilen 100 mg/kg toprak konsantrasyonlarında toksik etki görülmeyen tek bitki olan mısırın

daha sonra 25 mg/kg'lık bor dozlarındaki alım performansı Tablo 4.7 ve Şekil 4.7'de verilmiştir.

Tablodan da anlaşılacağı gibi toprağa yüksek oranda eklenen borun, mısır tarafından alım performansında yükselme görülmektedir. EDTA nın 2,5 mmol eklendiği şartlarda her iki uygulamada da düşük element alımı görülmüştür.

Tablo 4.7: Mısır Bitkisinin Farklı Bor Miktarlarındaki Alım Performansı

EDTA, mmol	Toplam	
	25 mg/kg	100 mg/kg
0,0	634,0	1015,1
2,5	486,5	820,0
5,0	555,8	838,5
10,0	625,1	850,0



Şekil 4.7: Mısır Bitkisinin Farklı Bor Miktarlarıdaki Alım Performansı Grafiği

Şekilde de görüleceği üzere her iki uygulama dozlarında en iyi bor alımı, şelatın hiç eklenmediği şartlarda oluşmaktadır. Ayrıca topraktaki bor konsantrasyonu 4 kat fazla olmasına rağmen bitki tarafından alınan miktar 2 kata kadar bile ulaşmamaktadır. Bu durum mısır bitkisinin bor alımının, topraktaki bor konsantrasyonundan çok bitki tarafından alınabilme kapasitesi gib diğer faktörlere bağlı olduğu sonucunu ortaya koymaktadır.

4.1.3 Kanola bitkisinin element alım performansı

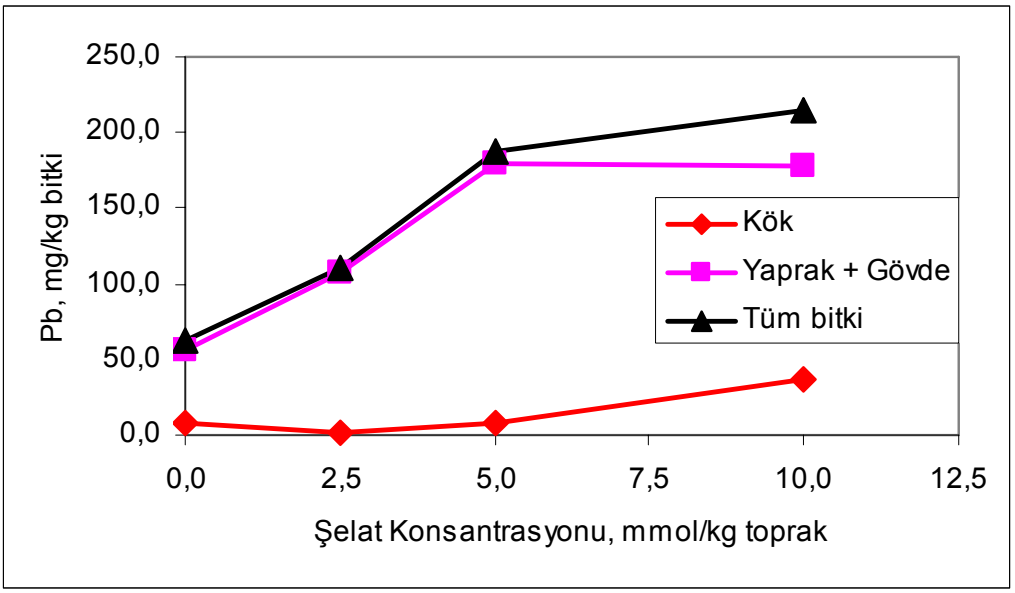
Kanola bitkisinin farklı şelat dozlarındaki kök ve gövdesinde biriken kurşun miktarları Tablo 4.8.'de, kadmiyum miktarları Tablo 4.9.'da, bor miktarları ise Tablo 4.10.'da verilmiştir. Şelat dozlarına bağlı Pb alım grafiği Şekil 4.8.'de, Cd alım grafiği Şekil 4.9.'da, B alım grafiği ise Şekil 4.10'da görülmektedir.

Tablo 4.7'de ve Şekil 4.7.'de görüldüğü gibi, artan şelat dozlarına bağlı olarak kanola bitkisinin kurşun alım miktarında bir artış gözlenmektedir. Kanoladaki en yüksek birikme 10 mmol şelat ilavesinde 215 mg olarak gerçekleşmiştir. En düşük birikme ise şelat ilave edilmemiş saksılarda yetişen bitkilerde 62,4 mg şeklinde gerçekleşmiştir.

Kanola bitkisinde kurşun genel olarak yapraklarda ve gövdede birikme yapmasına ragmen 5 mmol'den sonra köklerde birikmede artış eğilimi göstermiştir. Kökteki birikme miktarı 10 mmol şelat eklenmiş numunede %17,2 civarlarında gerçekleşirken, gövdede ve yaprakta birikme oranı şelatın 2.5 mmol olduğu durumda %98,2 olarak gerçekleşmiştir. Bu durum kanola bitkisine geçen kurşunun köklerde çok fazla tutulmadan gövde ve yapraklara taşındığını da göstermektedir. Ayrıca kanola bitkisi Pb elementini 5 mmol den sonra azalan bir artışla almaktadır. Artan şelat dozları kurşun elementinin köklerdeki konsantrasyon yüzdesini arttırmaktadır.

Tablo 4.8: Kanola bitkisinin Pb elementi alımı

EDTA	Kök		Yaprak + Gövde		Tüm Bitki
mmol	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg
0,0	7,3	11,7	55,3	88,6	62,4
2,5	2,0	1,8	108,0	98,2	110,0
5,0	7,6	4,1	180,0	95,9	187,6
10,0	37,0	17,2	178,0	82,8	215,0



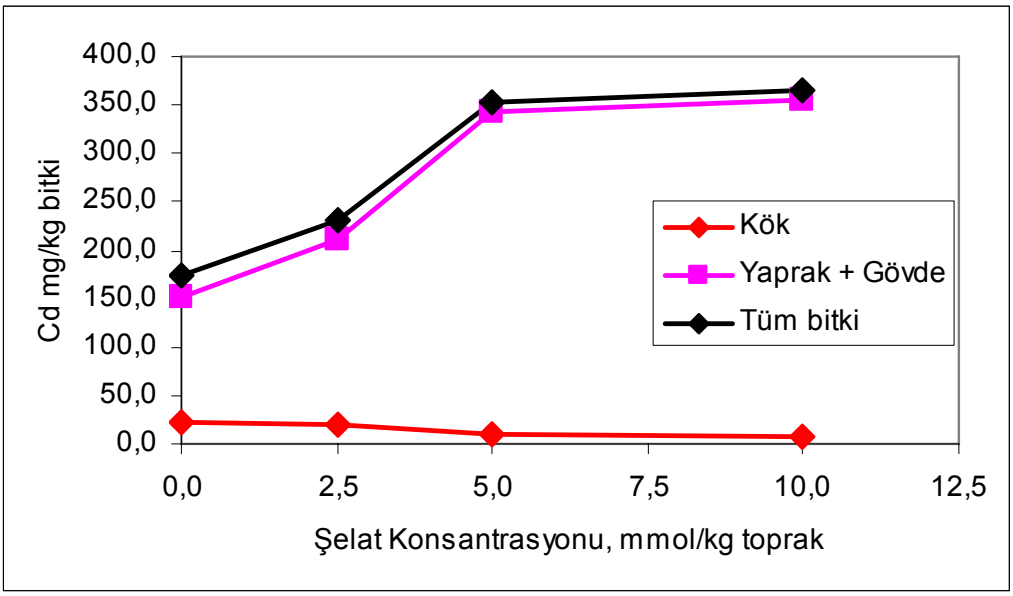
Şekil 4.8: Kanola bitkisinin Pb elementi alım grafiği

Kadmiyum açısından Tablo 4.9 ve Şekil 4.9.'da görüldüğü gibi, artan şelat dozlarına bağlı olarak bitki alımında bir artış gözlenmektedir. Kanoladaki en yüksek Cd birikmesi 10 mmol şelat ilavesinde 364 mg olarak gerçekleşmiştir. En düşük birikme ise şelat ilave edilmemiş saksılarda yetişen bitkilerde 172,9 mg/kg bitki şeklinde gerçekleşmiştir.

Kanola bitkisinde kadmiyum genel olarak yapraklarda ve gövdede birikme yapmaktadır. Kökteki birikme miktarı şelatsız numunede %13 civarlarında gerçekleşirken, gövdede ve yaprakta birikme oranı şelatın 10 mmol olduğu durumda %97,7 olarak gerçekleşmektedir. Bu durum kanola bitkisine geçen kadmiyumun gövde ve yapraklarda daha fazla tutulduğunu göstermektedir. Ayrıca kanola bitkisi Cd elementini 5 mmol den sonra azalan bir artışla almaktadır.

Tablo 4.9: Kanola bitkisinin Cd elementi alımı

EDTA	Kök		Yaprak + Gövde		Tüm Bitki
mmol	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg
0,0	22,6	13,0	150,4	87,0	172,9
2,5	20,0	8,7	210,0	91,3	230,0
5,0	9,6	2,7	342,2	97,3	351,9
10,0	8,5	2,3	355,5	97,7	364,0



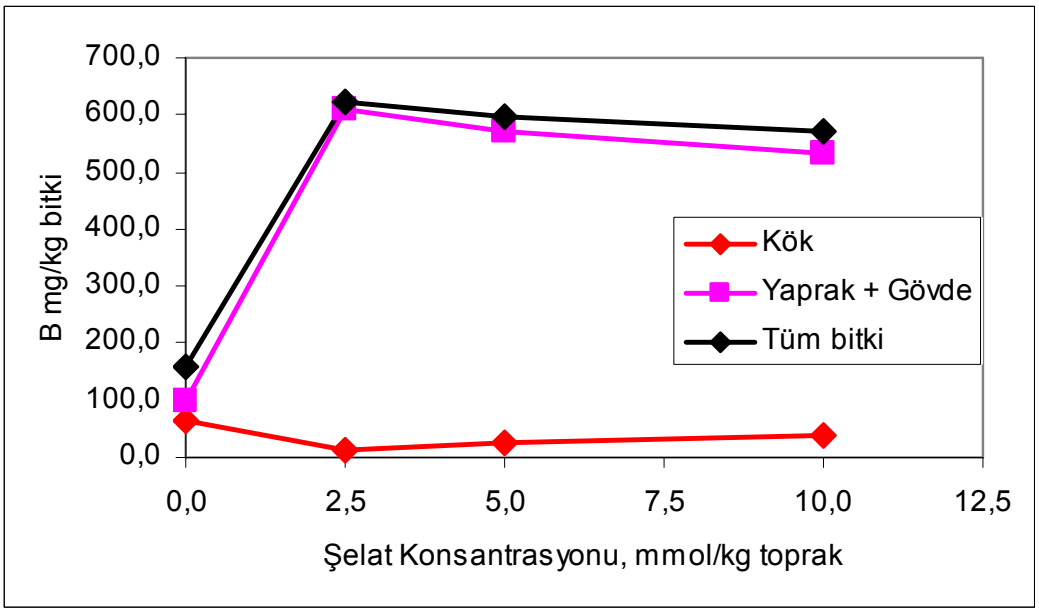
Şekil 4.9: Kanola bitkisinin Cd elementi alım grafiği

Kanola tarafından bor alımı Tablo 4.10'da ve Şekil 4.10.'da görülmektedir. Buna göre artan şelat dozlarına bağlı olarak bor alımında şelatın 2.5 mmol'den sonraki dozlarında bir azalma gözlenmektedir. En yüksek birikme 2,5 mmol şelat ilavesinde 623,8 mg olarak gerçekleşmiştir. En düşük birikme ise şelat ilave edilmemiş saksılarda yetişen bitkilerde 160,3 mg olarak gerçekleşmiştir.

Kanola bitkisinde bor genel olarak yapraklarda ve gövdede birikme yapmasına ragmen 2,5 mmol'den önce ve sonra köklerde birikmede artış eğilimi göstermiştir. Kökteki birikme miktarı şelatsız numunede %38,9 oranına kadar çıkarken, gövdede ve yaprakta birikme oranı şelatın 2.5 mmol olduğu durumda %98 olarak gerçekleşmiştir. Bu durum kanola bitkisine geçen borun diğer bitkilerde olduğu gibi gövde ve yapraklarda daha fazla tutulduğunu göstermektedir. Ayrıca kanola bitkisi B elementini 2,5 mmol den sonra azalan bir oranda almaktadır.

Tablo 4.10: Kanola bitkisinin B elementi alımı

EDTA	Kök		Yaprak + Gövde		Tüm Bitki
mmol	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg
0,0	62,4	38,9	97,9	61,1	160,3
2,5	12,5	2,0	611,4	98,0	623,8
5,0	25,2	4,3	571,3	95,7	596,5
10,0	38,0	6,7	531,2	93,3	569,1



Şekil 4.10: Kanola bitkisinin B elementi alım grafiği

Genel olarak bakıldığında ise, kanola bitkisi tarafından Cd alımı, Pb alımına göre daha yüksek oranda gerçekleşmiştir. Bor alımında ise alınan bor elementinin Pb ve Cd'ye göre gövde ve yapraklara hemen taşındığı ve köklerde çok düşük oranda birikme yaptığı gözlenmiştir.

4.2 Kullanılan Bitkilerin Element Alım Performansları

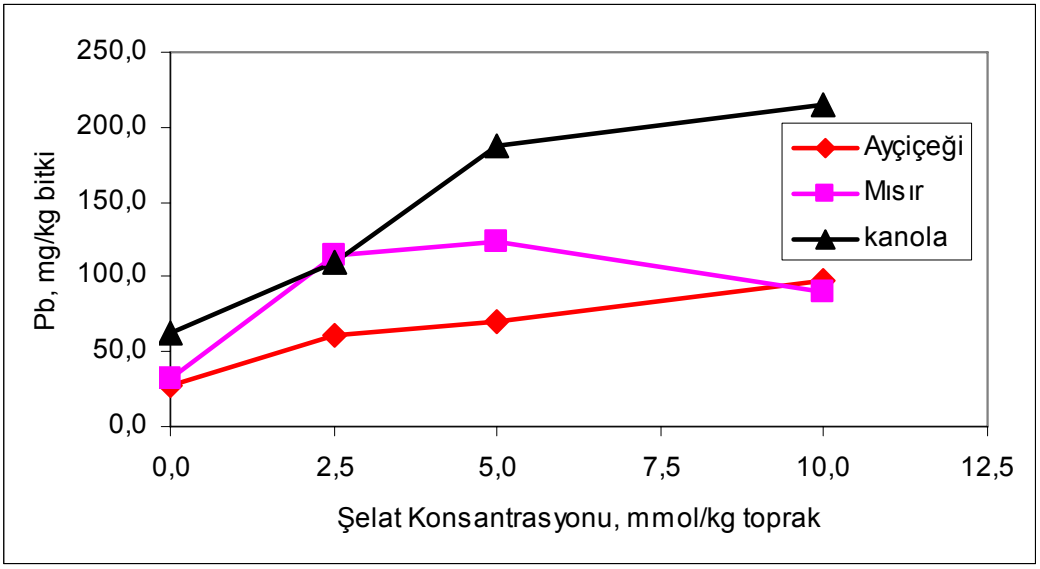
4.2.1 Kurşun alım performansları

Farklı bitkilere göre kurşun alım miktarları tablo 4.11. ve Şekil 4.11.'de verilmiştir. Bitkiler arasında Pb elementini en iyi alan bitki kanola olurken ikinci sırada mısır yeralmıştır. Kanola bitkisinin özellikle yüksek şelat dozlarında çok yüksek miktarda Pb aldığı görülmüştür.

Tüm bitkiler şelat ilavesine olumlu tepki vererek Pb elementini artan miktarlarda almıştır. Bu artış kanola bitkisinde %400 lere kadar varmıştır. Ancak mısır bitkisi 10 mmol şelat ilavesinde daima düşük miktarda Pb alımı yaparak istisnai bir durum göstermiştir. Şelatın ilave edilmediği şartlarda da en yüksek Pb alım verimi kanola tarafından gerçekleşirken, ayçiçeği ve mısır birbirlerine yakın miktarlarda Pb almıştır.

Tablo 4.11: Pb elementinin bitkiler tarafından alımı

Bitkiler	EDTA, mmol	Pb, mg/kg	Artış miktarı %
Ayçiçegi	0,0	27,0	0
	2,5	60,3	122,2
	5,0	70,4	160,7
	10,0	97,1	259,6
Mısır	0,0	32,5	0
	2,5	113,7	249,8
	5,0	123,0	278,4
	10,0	90,3	177,8
Kanola	0,0	62,4	0
	2,5	110,0	76,2
	5,0	187,6	200,6
	10,0	215,0	244,5



Şekil 4.11: Pb elementinin bitkiler tarafından alım grafiği

4.2.2 Kadmiyum alım performansları

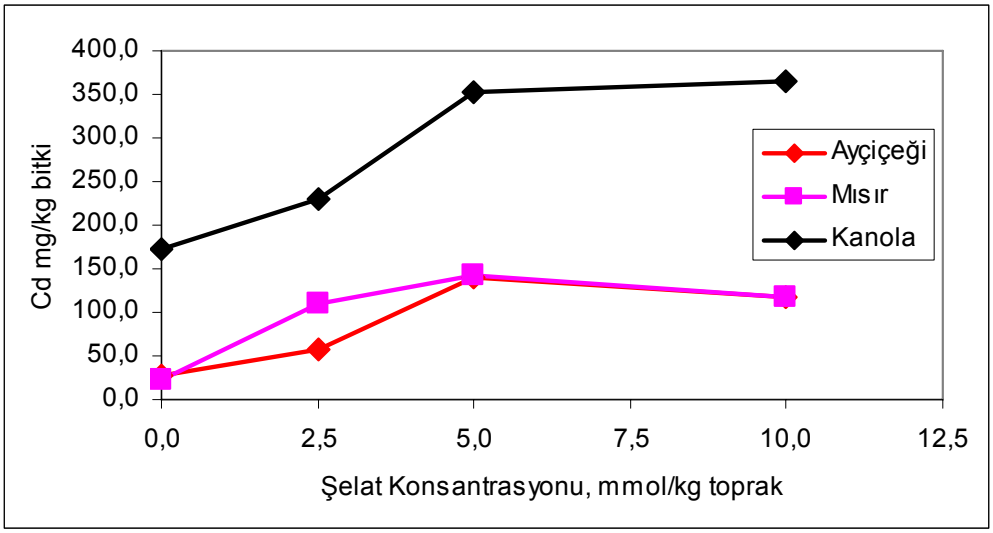
Bitkilerce kadmiyum alımı deneylerinde 5 mmol şelat dozuna kadar tüm bitkilerden şelat ilavesiyle element alımı arasında doğrusal bir ilişki gözlenmektedir.

Tablo 4.12. ve Şekil 4.12.'de 5 mmol şelattan daha yüksek dozlardaki ilaveler, kanola ve ayçiçeği bitkilerinin Cd alımını arttırmış, mısır alımını ise azaltmıştır. Kanola bitkisinde her ne kadar şelat artışı ile Cd alım miktarında bir yükseliş görülmekte ise de şelat ilave edilmemiş şartlarda bile yüksek oranda Cd alımı gerçekleşmiştir. Bu miktar ayçiçeği ve mısırın şelat destekli alımlarında daha yüksek

olarak bulunmuştur. Bu sonuç Cd alımında kanola bitkisinin bariz bir şekilde diğer 2 bitkiye göre yüksek performanslı olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.12: Cd elementinin bitkiler tarafından alımı

Bitkiler	EDTA, mmol	Cd, mg/kg	Artış miktarı %
Ayçiçegi	0,0	27,3	0
	2,5	56,9	108,4
	5,0	139,3	410,2
	10,0	116,8	327,8
Mısır	0,0	23,4	0
	2,5	110,0	370,0
	5,0	141,3	503,8
	10,0	116,9	399,5
Kanola	0,0	172,9	0
	2,5	230,0	33,0
	5,0	351,9	103,5
	10,0	364,0	110,5



Şekil 4.12: Cd elementinin bitkiler tarafından alım grafiği

4.2.3 Bor alımı performansları

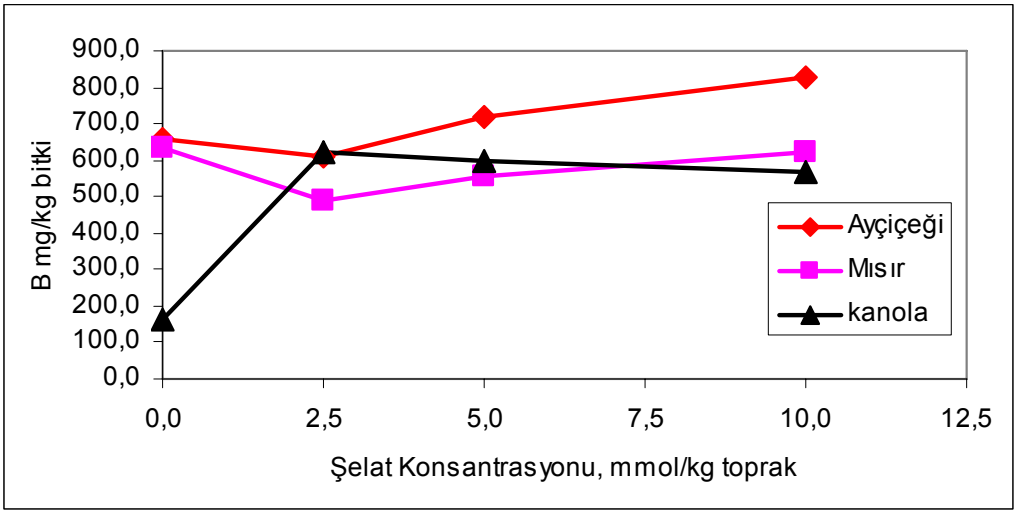
Bor elementinde ise diğer elementlerden farklı olarak tüm bitkilerin şelat ilave edilmeksizin yüksek miktarda bor biriktirebildiği görülmüştür. Tablo 4.13. ve Şekil 4.13.'de bu bitkiler içerisinde en düşük alım miktarı, kanolanın şelat eklenmemiş

deneylerinde 160,3 mg olarak görülmüştür. En yüksek alım miktarı ise, ayçiçeğinin 10 mmol şelat ilave edilen deneylerinde 827,8 mg olarak ölçülmüştür.

Şelat ilavesi ayiçeği ve mısırda önce B alımını düşürmüş daha sonra ise artışa neden olmuştur. Kanola bitkisinde ise önce B alımını arttırmış, artan şelat dozlarında ise azalmaya neden olmuştur. Bitkiler arasında B alımı açısından en yüksek verimli bitki ayçiçeği olmuştur. Ayrıca ayçiçeği ve mısır şelat ilavesine gerek olmadan yüksek B alım performansı göstermişlerdir.

Tablo 4.13: B elementinin bitkiler tarafından alımı

Bitkiler	EDTA, mmol	B, mg/kg	Artış miktarı %
Ayçiçegi	0,0	661,1	0
	2,5	609,0	-7,8
	5,0	718,4	8,6
	10,0	827,8	25,2
Mısır	0,0	634,0	0
	2,5	486,5	-23,2
	5,0	555,8	-12,3
	10,0	625,1	-1,4
Kanola	0,0	160,3	0
	2,5	623,8	289,1
	5,0	596,5	272,1
	10,0	569,1	255,0



Şekil 4.13: B elementinin bitkiler tarafından alım grafiği

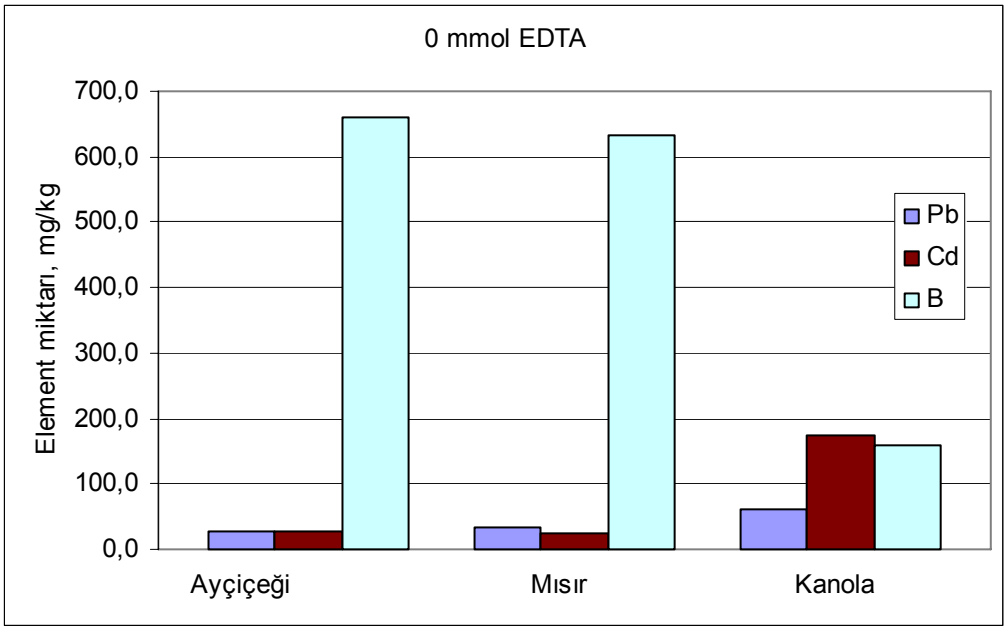
4.3 Şelat (EDTA) Miktarına Bağlı Olarak Bitkiler Tarafından Alınan Element Miktarları

4.3.1 Şelat ilave edilmeyen şartlar

Şelat uygulanmayan bitkilerin element alım performanslarının karşılaştırılması Tablo 4.14 ve Şekil 4.14'te görülmektedir. Buna göre kanola hariç diğer bitkiler bor elementini rahatlıkla biriktirebildiği görülmektedir. kanola bitkisi de diğer iki bitkiye göre Pb ve Cd metallerini biriktirebilmektedir. Bu nedenle şelat ilavesine gerek kalmadan B gideriminde ayçiçeği ve mısırın Cd ve Pb gideriminde ise kanolanın bariz bir şekilde başarılı olduğu görülmektedir.

Tablo 4.14: Bitkilerin Şelat ilave Edilmeyen Şartlarda Element Alımları

0 mmol	Pb, mg/kg	Cd, mg/kg	B, mg/kg
Ayçiçeği	27,0	27,3	661,1
Mısır	32,5	23,4	634,0
Kanola	62,4	172,9	160,3



Şekil 4.14: Bitkilerin Şelat İlave Edilmeyen Şartlarda Element Alım Grafiği

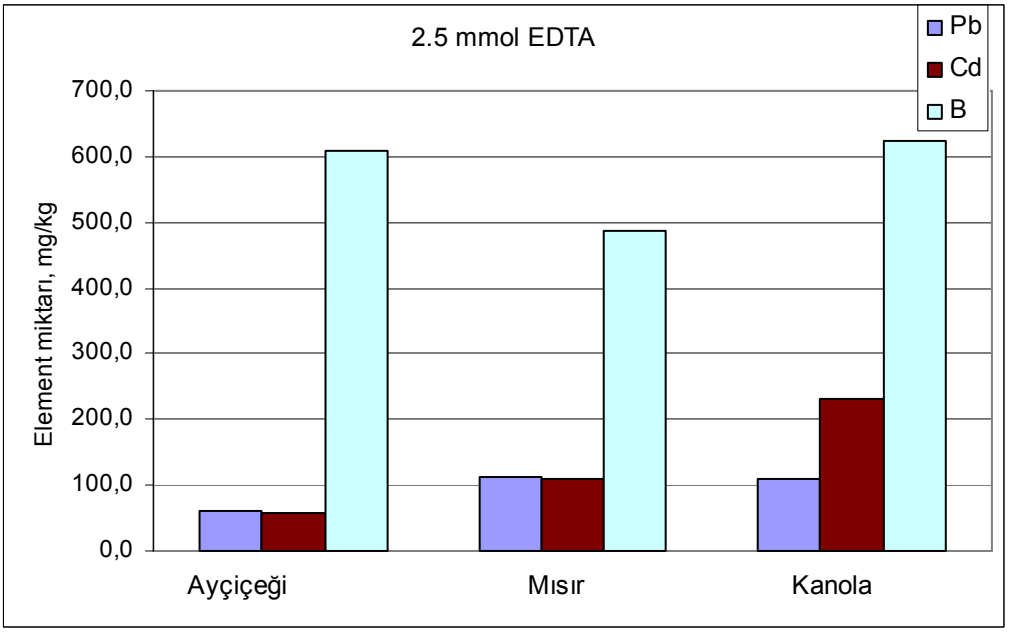
4.3.2 2.5 mmol şelat dozları

2.5 mmol şelat ilavesinde bitkilere göre element alımları Tablo 4.15 ve Şekil 4.15'te verilmektedir. Buna göre şelat ilave edilmeyen şartlarda düşük B alımı sağlayan

kanolanın alım veriminin önemli ölçüde arttığı ve diğer 2 bitkiyi geçtiği görülmektedir. Ayçiçeği ve mısırda şelat ilavesiyle B alımında küçük bir düşüş, Cd alımında ise önemli bir artış gözlenmektedir. 2.5 mmol şelat düzeyinde en yüksek Cd alım verimi kanolada görülürken, Pb alım verimleri ise kanola ve mısırda görülmektedir. B alımında ise kanola ve ayçiçeği yüksek performans sağlamaktadır.

Tablo 4.15: Bitkilerin 2.5 mmol Şelat İlave Şartlarında Element Alımları

2.5 mmol	Pb, mg/kg	Cd, mg/kg	B, mg/kg
Ayçiçeği	60,3	56,9	609,0
Mısır	113,7	110,0	486,5
Kanola	110,0	230,0	623,8



Şekil 4.15: Bitkilerin 2.5 mmol Şelat İlave Şartlarıdaki Element Alım Grafiği

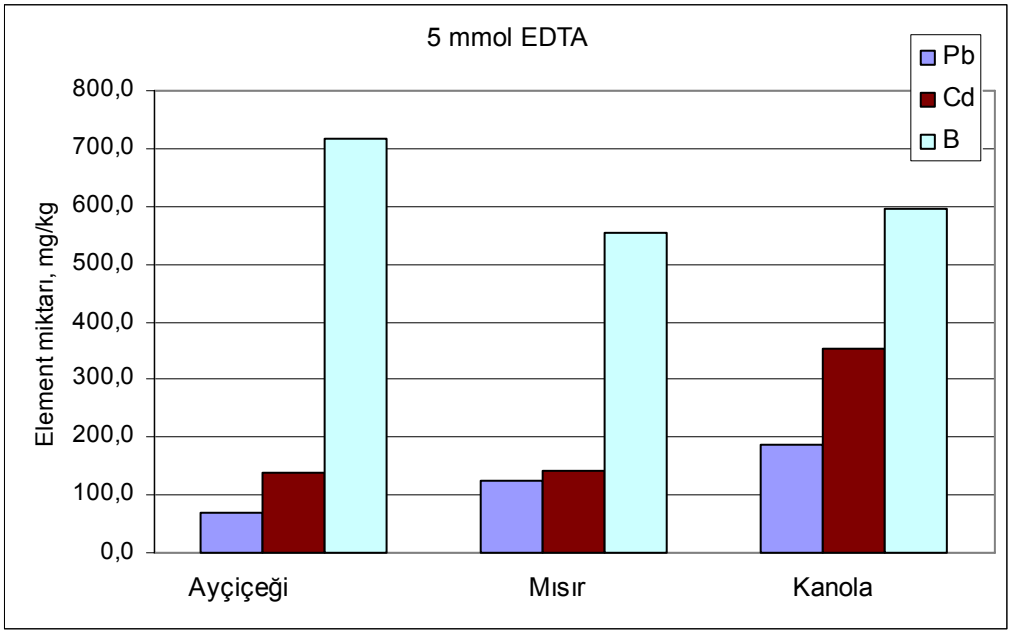
4.3.3 5 mmol şelat dozları

5 mmol şelat ilavesinde de bitkilere göre element alımları Tablo 4.16 ve Şekil 4.16'da verilmektedir. Buna göre şelat ilave edilmeyen şartlarda düşük B alımı sağlayan kanolanın 2.5 mmol deki alım verimini önemli ölçüde koruduğu, ayçiçeği bitkisinin diğer ikisini geçtiği görülmektedir. Ayçiçeği ve mısırda 5 mmol şelat ilavesiyle Pb ve Cd alımında ise önemli bir artış gözlenmektedir. 5 mmol şelat

düzeyinde de en yüksek Cd ve Pb alım verimi kanolada görülürken, B alımında ise ayçiçeği yüksek performans sağlamaktadır.

Tablo 4.16: Bitkilerin 5 mmol Şelat İlave Şartlarında Element Alımları

5 mmol	Pb, mg/kg	Cd, mg/kg	B, mg/kg
Ayçiçeği	70,4	139,3	718,4
Mısır	123,0	141,3	555,8
Kanola	187,6	351,9	596,5



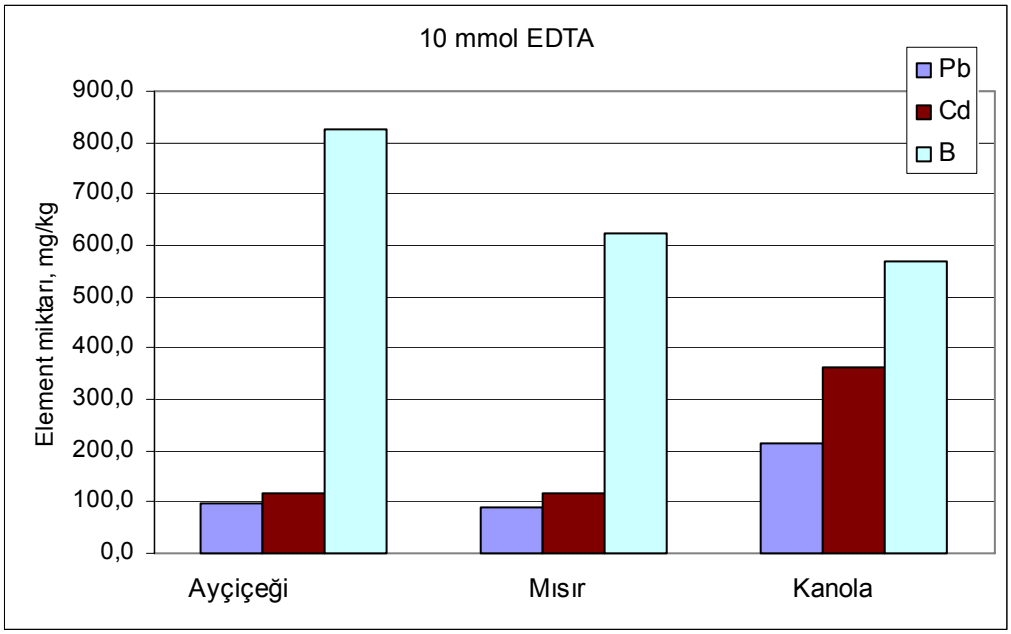
Şekil 4.16: Bitkilerin 5 mmol Şelat İlave Şartlarındaki Element Alım Grafiği

4.3.4 10 mmol şelat dozları

10 mmol şelat ilavesinde ise bitkilere göre element alımları Tablo 4.17 ve Şekil 4.17'de verilmiştir. Buna göre 5 mmol şelat ilave edilen şartlarda B alımını yüksek miktarda sağlayan ayçiçeği ve mısır bitkileri 10 mmol şelat dozunda alım performanslarını daha da yükseltmiş olup, ayçiçeği bitkisinin aynı şekilde diğer iki bitkiyi geçtiği ve kendisinin tüm şelat dozlarındaki en yüksek verimine ulaştığı görülmektedir. Pb ve Cd elementleri alımında ise kanola bitkisi yine kendisinin tüm şelat dozlarındaki en yüksek verimine ulaştığı görülmüştür.

Tablo 4.17: Bitkilerin 10 mmol Şelat İlave Şartlarında Element Alımları

10 mmol	Pb, mg/kg	Cd, mg/kg	B, mg/kg
Ayçiçeği	97,1	116,8	827,8
Mısır	90,3	116,9	625,1
Kanola	215,0	364,0	569,1



Şekil 4.17: Bitkilerin 10 mmol Şelat İlave Şartlarındaki Element Alım Grafiği

4.4 Konsantrasyon Oranı Faktörünün Belirlenmesi

Bitkilerce element alımlarının büyüklüğü, konsantrasyon oranı (KO) cinsinden ifade edilmektedir. Konsantrasyon oranı, bitkinin toprak üstü aksamındaki element oranının topraktaki element oranına oranı olarak tanımlanmaktadır.

KO= (Bitkideki toplam element / bitki toprak üstü aksamının yaş ağırlığı (mg/kg)) / (Topraktaki toplam element / yaş toprak ağırlığı (mg/kg)

Konsantrasyon oranının yüksek olması, bitkinin o elementi bünyesine daha kolay alaraka biriktirdiği anlamna gelmektedir.

Bu oran farklı bitkiler ve farklı elementler için hesaplanarak, en yüksek fitoremediasyon performanslarının bulunması amacıyla kullanılmaktadır. Bu amaçla mısır, ayçiçeği ve kolza bitkisi için farklı şelat dozlarındaki konsantrasyon oranları Tablo 4.18, Tablo 4.19 ve Tablo 4.20'de verilmektedir.

Tablo 4.18: Ayçiçeği bitkisi için hesaplanan konsantrasyon oranları

Element	EDTA, mmol	Konsantrasyon oranı (KO)
Pb	0,0	0,0104
	2,5	0,0243
	5,0	0,0303
	10,0	0,0375
Cd	0,0	0,0065
	2,5	0,0103
	5,0	0,0327
	10,0	0,0306
B	0,0	2,9270
	2,5	2,7979
	5,0	3,3077
	10,0	3,8174

Ayçiçeği bitkisinde, en yüksek konsantrasyon oranı bariz bir farkla bor elementinde görülmekte iken, en düşük konsantrasyon kurşun metalinde görülmüştür. Kadmiyum elementi ise, bor'a göre çok düşük oranlarda kalmakla beraber kurşun elementine yakın oranlarda kalmıştır. Ayrıca tüm elementlerde arttırılan şelat dozuna bağlı olarak, genelde artış yönünde bir konsantrasyon oranı görülmüştür.

Tablo 4.19: Mısır bitkisi için hesaplanan konsantrasyon oranları

Element	EDTA, mmol	Konsantrasyon oranı (KO)
Pb	0,0	0,0029
	2,5	0,0454
	5,0	0,0433
	10,0	0,0350
Cd	0,0	0,0020
	2,5	0,0170
	5,0	0,0154
	10,0	0,0288
B	0,0	2,7810
	2,5	1,9107
	5,0	2,2228
	10,0	2,5349

Mısır bitkisinde ise yine aynı şekilde, en yüksek konsantrasyon oranı bariz bir farkla bor elementinde görülmekte fakat bu oran ayçiçeği bitkisindeki değerlere oranla düşük miktarlarda kalmaktadır. En düşük konsantrasyon oranına, kadmiyum metalinde rastlanmıştır. Kurşun elementinde de, kadmiyum elementine yakın oranlar elde edilmiştir. Ayrıca B elementindeki şelat eklenmemiş numunelerde en yüksek

olmakla beraber, elementlerin genelinde arttırılan şelat miktarına bağlı olarak, artan bir oran görülmüştür.

Tablo 4.20: Kanola bitkisi için hesaplanan konsantrasyon oranları

Element	EDTA, mmol	Konsantrasyon oranı (KO)
Pb	0,0	0,0260
	2,5	0,0507
	5,0	0,0845
	10,0	0,0835
Cd	0,0	0,0430
	2,5	0,0600
	5,0	0,0979
	10,0	0,1017
B	0,0	0,4525
	2,5	2,8248
	5,0	2,6395
	10,0	2,4542

Kanola bitkisinde de, en yüksek konsantrasyon oranı B elementinde görülmüştür. En düşük konsantrasyon oranı ise kurşun elementinde görülmüştür. Kadmiyum için konsantrasyon oranı ise, diğer bitkilerde olduğu gibi kurşun elementine yakın miktarlarda kalmıştır. Ayrıca Pb ve Cd elementlerinde diğer bitkilerde görülen şelat dozuna bağlı artış kanolada pek görülememiştir.

4.5 Baker Teorisine Göre Bitkilerin Fitoremediasyon Performanslarının Değerlendirilmesi

Fitoremediasyon amacıyla kullanılan bitkilerin performanslarının değerlendirilmesi amacıyla kullanılan Baker Teorisine göre bitkiler, iyi toplayıcılar ve kökte tutucular olarak 2'ye ayrılmaktadır. Baker teorisine göre iyi bir toplayıcı bitki, toprak üstü aksamında yüksek oranda element biriktirebilen bitki olarak tanımlanmaktadır. Buna göre toprak üstü aksamında biriken element miktarının köklerinde biriken element miktarına oranı 1'den yüksek olan bitkiler iyi toplayıcı bitkiler olarak sınıflandırılmaktadır. Bu oranın 1'den düşük olduğu bitkiler ise köklerinde tuttukları elementleri, toprak üstü aksamına iyi iletemeyen bitkiler (kökte tutucular) olarak değerlendirilmektedir. Baker Teorisine göre iyi toplayıcılar fitoekstraksiyon yönteminde, kökte tutucular ise fitostabilizasyon yönteminde kullanılabilmektedir.

Tez kapsamında 10 haftalık bir yetiştirme süresi sonunda elde edilen bulgulara göre yapılan değerlendirmeler ayçiçeği için Tablo 4.21, mısır için Tablo 4.22 ve kanola için Tablo 4.23'de verilmiştir.

Tablo 4.21: Baker Teorisine göre ayçiçeği bitkisinin fitoremediasyon performansının değerlendirilmesi

Element	EDTA, mmol	Kökte biriken, mg	Topraküstü aksamda biriken, mg	Topraküstü aksamdaki element/kökteki element
Pb	0,0	0,003	0,149	45,393
	2,5	0,006	0,350	61,571
	5,0	0,004	0,436	117,422
	10,0	0,012	0,540	46,726
Cd	0,0	0,004	0,142	40,704
	2,5	0,015	0,224	14,619
	5,0	0,020	0,712	36,375
	10,0	0,009	0,668	76,646
B	0,0	0,015	3,425	222,494
	2,5	0,006	3,274	593,043
	5,0	0,006	3,870	655,265
	10,0	0,006	4,466	709,851

Tablo 4.22: Baker Teorisine göre Mısır bitkisinin fitoremediasyon performansının değerlendirilmesi

Element	EDTA, mmol	Kökte biriken, mg	Topraküstü aksamda biriken, mg	Topraküstü aksamdaki element/kökteki element
Pb	0,0	0,094	0,066	0,706
	2,5	0,058	1,024	17,509
	5,0	0,108	0,977	9,042
	10,0	0,054	0,790	14,628
Cd	0,0	0,035	0,048	1,371
	2,5	0,110	0,412	3,745
	5,0	0,186	0,375	2,015
	10,0	0,039	0,700	18,158
B	0,0	0,073	4,601	62,987
	2,5	0,152	3,161	20,822
	5,0	0,156	3,677	23,511
	10,0	0,161	4,193	26,046

Tablo 4.23: Baker Teorisine göre Kanola bitkisinin fitoremediasyon performansının değerlendirilmesi

Element	EDTA, mmol	Kökte biriken, mg	Topraküstü aksamda biriken, mg	Topraküstü aksamdaki element/kökteki element
Pb	0,0	0,003	0,194	66,206
	2,5	0,001	0,378	467,822
	5,0	0,003	0,630	207,237
	10,0	0,015	0,623	42,095
Cd	0,0	0,002	0,226	100,000
	2,5	0,002	0,315	157,500
	5,0	0,001	0,513	532,484
	10,0	0,001	0,533	625,880
B	0,0	0,037	0,392	10,470
	2,5	0,007	2,445	326,581
	5,0	0,015	2,285	151,006
	10,0	0,023	2,125	93,282

Yapılan değerlendirmeler sonucunda deneylerde kullanılan bitkilerde hesaplanan topraküstü aksamındaki element / kökteki element oranlarının çok yüksek olduğu görülmüştür. Buna göre, her üç bitki de bünyelerine aldıkları elementleri, toprak üstü aksamına başarı ile iletmiştir. Kullanlan bitkiler bu bakımdan Baker Teorisine göre iyi toplayıcı bitkiler olarak değerlendirilmiştir.

4.6 Fitoremediasyon Yöntemiyle Topraktaki Elementlerin Giderilme Sürelerinin Belirlenmesi

Toprakta bulunan elementlerin tamamının bitkilerce giderilme süresi, fitoremediasyonun uygulanabilirliğini gösteren en önemli parametrelerden birisidir. Yüksek oranda element alabildiği halde topraktaki toplam element miktarında önemli bir azalmaya neden olmayan bitkiler, yüksek fitoremediasyon verimlerine rağmen bu amaçla başarılı olarak kullanılamamaktadır. Bu nedenle bitkinin bünyesine aldığı element miktarının üzerinde yer aldığı topraktaki toplam element miktarı ile karşılaştırılması gerekmektedir. Tablo 4.24, Tablo 4.25 ve Tablo 4.26'da kullanılan bitkiler tarafından alınan toplam element miktarı ile tez kapsamında seçilen ve toprağa eklenen element konsantrasyonlarının (Cd= 400 mg/kg, Pb= 250 mg/kg, B=25 mg/kg) bu yöntemle topraktan alınabilmesi için gereken süreler verilmektedir. Karşılaştırma imkanı sağlaması açısından toprağa eklenen element

konsantrasyonunun sabit (100 mg/kg) olması durumunda hangi bitkinin ne kadar sürede ilgili elementi topraktan alabileceği de hesaplanmıştır. Ayrıca tez kapsamında bitkinin yetişme vejetasyonu tamamlanmadan hasat yapıldığı için, bitkinin hasat süresi sonuna kadar beklenmesi halinde (hasat edilen kuru ağırlığın kabaca 4 katı kadar daha fazla vejetatif aksam üreteceği kabul edilmiştir) bitkiler tarafından alınabilecek element miktarları da hesaplanarak tabloda verilmiştir. Tablolardaki değerler, bir fikir vermesi ve karşılaştırma yapılması amacıyla hesaplanmış ve bitkinin topraktaki element miktarından bağımsız olarak her yetiştirme döneminde aynı miktarda elementi, topraktan bünyesine katacağı kabulune dayalı sonuçlardır. Daha gerçeğe yakın ve detaylı hesaplamalar için bu amaçla hazırlanmış modeller kullanılmaktadır.

Tablo 4.24: Ayçiçeği bitkisi tarafından alınan elementlerin tamamının temizlenebilmesi için gereken süre

Ayçiçeği	EDTA, mmol	Topraküstü aksamda biriken, mg	Toprağın tamamen temizlenebilmesi için gereken süre, yıl	100 mg/kg element konsantrasyonunun temizlenebilmesi için gereken süre, yıl	100 mg/kg element konsantrasyonunun vejetasyon süresinin tamamlanması sonrasında temizlenebilmesi için gereken süre, yıl
Pb	0,0	0,149	1674,0	669,6	167,4
	2,5	0,350	715,2	286,1	71,5
	5,0	0,436	573,9	229,6	57,4
	10,0	0,540	463,2	185,3	46,3
Cd	0,0	0,142	2807,7	701,9	175,5
	2,5	0,224	1785,7	446,4	111,6
	5,0	0,712	561,6	140,4	35,1
	10,0	0,668	598,8	149,7	37,4
B	0,0	3,425	7,3	29,2	7,3
	2,5	3,274	7,6	30,5	7,6
	5,0	3,870	6,5	25,8	6,5
	10,0	4,466	5,6	22,4	5,6

Ayçiçeği bitkisinin element alımı açısından, en iyi sürenin bor elementinin 10 mmol EDTA dozunda görüldüğü (5,6 yıl), en uzun sürenin ise kadmiyum elementinin EDTA eklenmemiş şartlarında (2807,7 yıl) elde edildiği görülmüştür. 100 mg element/kg dozu için yapılan hesaplmalarda, her üç elementin de bor elementini en iyi sürelerde giderdiği görülmektedir. Ayrıca, 0 ve 2,5 mmol şartlarında kurşunun

Tablo 4.25: Mısır bitkisi tarafından alınan elemntlerin tamamının temizlenebilmesi için gereken süre

Mısır	EDTA, mmol	Topraküstü aksamda biriken, mg	Toprağın tamamen temizlenebilmesi için gereken süre, yıl	100 mg/kg element konsantrasyonunun temizlenebilmesi için gereken süre, yıl	100 mg/kg element konsantrasyonunun vejetasyon süresinin tamamlanması sonrasında temizlenebilmesi için gereken süre, yıl
Pb	0,0	0,066	3767,3	1506,9	376,7
	2,5	1,024	244,2	97,7	24,4
	5,0	0,977	256,0	102,4	25,6
	10,0	0,790	316,5	126,6	31,6
Cd	0,0	0,048	8346,4	2086,6	521,6
	2,5	0,412	971,3	242,8	60,7
	5,0	0,375	1068,0	267,0	66,8
	10,0	0,700	571,7	142,9	35,7
B	0,0	4,601	5,4	21,7	5,4
	2,5	3,161	7,9	31,6	7,9
	5,0	3,677	6,8	27,2	6,8
	10,0	4,193	6,0	23,8	6,0

Tablo 4.26: Kanola bitkisi tarafından alınan elemntlerin tamamının temizlenebilmesi için gereken süre

Kanola	EDTA, mmol	Topraküstü aksamda biriken, mg	Toprağın tamamen temizlenebilmesi için gereken süre, yıl	100 mg/kg element konsantrasyonunun temizlenebilmesi için gereken süre, yıl	100 mg/kg element konsantrasyonunun vejetasyon süresinin tamamlanması sonrasında temizlenebilmesi için gereken süre, yıl
Pb	0,0	0,194	1291,4	516,6	129,1
	2,5	0,378	661,4	264,6	66,1
	5,0	0,630	396,8	158,7	39,7
	10,0	0,623	401,3	160,5	40,1
Cd	0,0	0,226	1773,0	443,3	110,8
	2,5	0,315	1269,8	317,5	79,4
	5,0	0,513	779,2	194,8	48,7
	10,0	0,533	750,1	187,5	46,9
B	0,0	0,392	63,8	255,3	63,8
	2,5	2,445	10,2	40,9	10,2
	5,0	2,285	10,9	43,8	10,9
	10,0	2,125	11,8	47,1	11,8

kadmiyumdan daha kısa sürede giderildiği fakat 5 ve 10 mmol şartlarında ise kadmiyumun kurşundan daha kısa sürede giderildiği belirlenmiştir.

Mısır bitkisi tarafından, en iyi süre bor elementinin şelat eklenmemiş şartlarında görülmüş (5,4 yıl), en uzun sürenin ise kadmiyum elementinin EDTA eklenmemiş şartlarında (8346 yıl) gerçekleştiği görülmüştür. 100 mg element /kg dozu için yapılan hesaplamalarda, her üç element için de bor elementi en iyi giderilme süresine sahip olmuştur. Ayrıca EDTA'nın eklendiği tüm şartlarda kurşunun kadmiyumdan daha kısa sürede tarafından giderildiği tesbit edilmiştir.

Kanola bitkisinde ise, en kısa giderim süresi, bor elementinin 2,5 mmol EDTA dozunda görülmüş (10,2 yıl), en uzun süre ise kadmiyum elementinin EDTA eklenmemiş şartlarında (1773 yıl) görülmüştür. 100 mg element /kg toprak dozlarında ise bor elementinin ayı şekilde en iyi giderilme süresine sahip olduğu, kurşun ve kadmiyumun ise artan şelat dozlarına bağlı olarak giderilme sürelerinde azalma gösterdiği görülmüştür.

Tüm bunlara bağlı olarak vejetasyon süreleri beklenmesi durumunda tabloda da görüleceği gibi giderilme süreleri her üç bitkidede önemli miktarlarda azalma göstermektedir. Uygulanan şelat ilaveleri genel olarak alım sürelerini kısaltmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kullanılan bitkiler arasında en yüksek birikim konsantrasyonları, beklenildiği üzere kanola bitkisinde gözlenmiştir. Bu durum, bir hipertoplayıcı olarak bilinen ve fitoremediasyon amacıyla yoğun olarak kullanılan kanola bitkisinin yüksek alım performansını doğrulamıştır.

Şelat ilavesi açısından bakıldığında ise, şelat ilave edilmeyen şartlarda Pb ve Cd alımında yüksek verim gösteren Kanolanın bor alımında şelat ilavesi ile yüksek alım verimlerine ulaştığı görülmüştür. Bor elementinde, diğer elementlerden farklı olarak ayçiçeği ve mısır bitkisinin şelat ilave edilmeksizin yüksek miktarda bor biriktirebildiği görülmüştür.

Artan şelat dozları, deneylerin çoğunda element alımını arttırıcı etki göstermiştir. Bor alımında özellikle kanola bitkisinin şelat ilave edilmeyen şartlara göre alım veriminin önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Ayçiçeği ve mısırın ise zaten yüksek alım bor performansları önce biraz düşmüş ancak artan şelat dozlarında tekrar yükselişe geçmiştir. Kurşun alımında da artan şelat dozları genel olarak element konsantrasyonunu arttırmış ve bu artış kanolada % 400'lere yaklaşmıştır. Şelat ilave edilmeyen dozlarda birbirine yakın Pb alımı gösteren üç bitki arasından şelat artışına bağlı olarak kanolada çok yüksek bir artış gözlenmiştir. Cd elementi açısından bakıldığında ise 5 mmol şelat konsantrasyonundan daha yüksek konsantrasyonlarda ayçiçeği ve mısır bitkilerinin alım verimlerinde bir düşme görülmüştür. Kanola bitkisi ise bu konsantrasyon sonrasında azalan bir artış görülmüştür. Artan şelat dozlarında verim düşüklüklerinin ortaya çıkmasına şelat ilavesinin toprak pH'sını düşürmesinin neden olduğu düşünülmektedir.

Bitkilerin değişik organlarında element birikimlerinin değerlendirmesinde ise, kanola bitkisinin yapraklarında en fazla Pb, Cd ve B biriktiren bitki olduğu görülmektedir. Sadece B elementini ise tüm bitkiler önemli ölçüde yapraklarına taşımışlardır. Köklerinde yüksek oranlarda depolamada, tüm elementler için en iyi performansı mısır bitkisi göstermiştir. Bu durumun mısırın çok gelişmiş bir saçak kök yapısına

sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Benzer şekilde köklerinde en düşük konsantrasyonda depolama, özellikle ayçiçeği bitkisinde görülmektedir. Bunun nedenin de mısırın aksine, ayçiçeğinin çok fazla kılcal kök ihtiva etmeyen kazık kök yapısına sahip olması olarak düşünülmektedir.

Bor elementinde şelat ilavesinin bitkilerde element alım miktarını çok fazla arttırmaması, şelat ilavesinin özellikle ağır metallerde, metallerin toprak çözeltisine geçmesini kolaylatırarak bitki alımını arttırması prensibini doğrulamıştır. Topraklarda genel olarak borat tuzu halinde bulunan borun, şelat ilavesinden metaller gibi etkilenmediği gözlenmiştir. Borun toprak çözeltisine geçişinin artırılmasının, toprak içerisindeki su miktarının yüksek tutulması ve bu yolla borat tuzlarının çözeltiye geçmesinin kolaylaştırılması yoluyla mümkün olabileceği düşünülmektedir. Ancak bu durumda borun yeraltı suyuna doğru hareketi de artacağından, bu yöntem de özellikle çok fazla su tüketen bitkilerin kullanılması durumunda verimli sonuçlar alınabileceği düşünülmektedir.

Konsantrasyon oranı açısından bitkiler incelendiğinde, bütün bitkilerde en yüksek konsantrasyon oranı bor elementinde, en düşük konsantrasyon ise Pb elementinde görülmüştür. Ayrıca toprak üstü aksamında element biriktirebilme performansının değerlendirilmesi amacıyla kullanılan Baker teorisine göre, her üç bitki de bünyelerine aldıkları elementleri, toprak üstü aksamına başarı ile iletmiş olup, bu bitkiler iyi toplayıcı bitkiler olarak değerlendirilmiştir.

Elementlerin topraklardan bitkiler tarafından alım süreleri incelendiğinde, bu sürelerin bor hariç çok uzun olduğu görülmüştür. Bor için gerekli giderim süreleri 5-12 yıl arasında gerçekleşmiştir. Bu durum aslında fitoremediasyon açısından beklenen bir sonuç olarak gerçekleşmiştir. Fitoremediasyonda normal olarak toprakların temizlenmesi için öngörülen süreler 10-30 yıl arasında olmaktadır. Dolayısıyla bu tez kapsamında bitkiler tarafından toprakların temizlenmesi için gereken sürelerin benzer mertebede olanları (özellikle bor bitkisinde elde edilen süreler), beklenilen bir sonuç olarak değerlendirilmektedir. Ancak kadmiyum ve kurşun için gerekli olan süreler çok uzun bulunduğundan, bu bitkilerin benzer şartlar altında adı geçen elementlerin giderilmesi amacıyla kullanılmasının ekonomik ve pratik olmadığı sonucu ortaya çıkmaktadır.

Tez kapsamında kullanılan element konsantrasyonları, sonuçların analizinin kolay olabilmesi açısından nisbeten yüksek tutulmuştur. Bu konsantrasyonların düşük

olması durumunda ortaya çıkacak olan süreler daha kısa olacaktır. Ayrıca deneylerde kullanılan bitkiler, deneysel şartların bozulmaması, bitki kayıplarının en aza indirilmesi ve konsantrasyona yönelik hesapların yapılması amacıyla normal vejetasyon sürelerinin tamamlanması beklenmeden 10 haftalık bir yetiştirme süresi sonrasında hasat edilmiştir. Normal süreleri 14-15 hafta arası olan bu tür bitkiler için bu süre kısa bir süre sayılmaktadır. Bu sürelerin tamamlanmasının beklenmesi durumunda, toplam element miktarı açısından çok daha fazla alım gerçekleşecektir. Buna dair hesaplar tez içerisindeki ilgili tablolarda verilmiştir. Ayrıca fitoremediasyonda kullanılan bitkilerin bünyelerinde biriktirdikleri element miktarının arttırılması amacıyla, bitkilerin yüksek miktarda topraküstü aksam yetiştirmelerine yönelik bitki besin maddesi (gübreleme) ve bakım uygulamaları ile de fitoremediasyon için gereken süreler azalabilecektir.

Fitoremediasyonun bir arıtım teknolojisi olarak kullanılması durumunda sadece bitkilerin kirletici madde alım performanslarının yüksek olmasının yeterli olmadığı ve diğer bazı fiziksel, kimyasal, fizyolojik ve meteorolojik faktörlerin de fitoremediasyon prosesenin verimliliğini ve uygulanabilirliğini etkilediği bilinmektedir. Örneğin toprakta kirletici maddenin hangi derinlikte bulunduğu bitki seçiminde önemli bir kısıtlayıcı ve belirleyici faktör olarak ortaya çıkmaktadır. 30 cm'den daha derin topraklarda otsu gövde ve saçak kök yapısına sahip bitkiler çok fazla etkili olamayacaktır. Bu tür alanlarda odunsu gövde yapısı ve gelişmiş kök yapısına sahip ağaç türlerinin kullanılması gerekecektir. Benzer şekilde toprağın yapısı ve pH'sı da bitki yetiştiriciliği açısından belirleyici fiziksel ve kimyasal faktörlerin başında gelmektedir. Ayrıca fitoremediasyon amacıyla kullanılmış ve bünyesinde element ihtiva eden bitkilerin nihai uzaklaştırma imkanları da fitoremediasyon için uygun bitki seçimini etkilemektedir. Örnek olarak hayvan beslenmesi ihtimali olan bitkilerin seçimi durumunda kirleticiyi özellikle yapraklarında değil de köklerinde biriktiren bitkilerin tercih edilmesi gerekmektedir. Normal olarak, ağır metal ihtiva eden çoğu bitkinin hayvan beslenmesinde kullanılması hayvan ve insan sağlığı açısından riskli olacağından bu tür bir uygulamanın başından itibaren takip edilmesi veya mümkünse bu tür uygulamalardan kaçınılması en uygun olanıdır. Ancak selenyum gibi ağır metallerin hayvan beslenmesinde gerekli olduğu ve Se içeren bitkilerin bu tür bir amaçla kullanılması da fitoremediasyon uygulamaları arasında yer almaktadır.

Bu nedenle fitoremediasyon uygulamalarında tüm bu faktörlerin birlikte düşünülerek uygun bitki seçiminin yapılması söz konusu olmaktadır.

Fitoremediasyon amacıyla verim arttırma aşamasıyla şelat eklenmesi yaygın uygulama örneklerinden birisidir. Ancak toprağa eklenen şelatın ilave bir masraf ortaya çıkarması şelatın minimum düzeyde kullanılmasını gerektirmektedir. Bu amaçla minimum şelat kullanımyla maksimum kirletici giderimi sağlayan bitkilerin seçilmesi de önem kazanmaktadır.

Bitki kullanılarak topraklardan element biriktirme işleminde amaç, toprakta tutulmuş halde bulunan elementlerin daha kontrol edilebilir ve taşınabilir forma dönüştürülmesidir. Bu nedenle fitoremediasyon yöntemi, nihai bir uzaklaştırma veya giderme yöntemi olarak düşünülmemelidir. Nihai uzaklaştırma veya giderim, fitoremediasyon sonucunda ortaya çıkan bitkilerin yakılarak veya uygun bir depolama alanında depolanarak gerçekleştirilebilmektedir.

Sonuç olarak, fitoremediasyon alanı yeni ve ekolojik bir alan olmakla birlikte büyük potansiyele sahip bir imkandır. Fitoremediasyonun daha ileri aşamasında, botanik bilimini, genetik biyoteknolojisini, toprak kimyasını ve mikrobiyolojisini, aynı zamanda tarımı ve çevre bilimini birleştiren, disiplinlerarası bir çalışma alanı gerektirecektir.

6. KAYNAKLAR

Aktaş, M., 1995. Bitki Besleme ve Toprak Verimliliği, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak Bölümü, Ankara.

Altın, A., 2004. Yeraltısuyu ve toprak kirliliği arıtımında kullanılan yöntemler,1.Ulusal Çevre Kongresi, ÇEVRE 2004, 13-15 Ekim 2004, Sivas.

Baker, AJM. & Brooks, RR., 1989. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate elementlic elements: a review of their distribution, ecology and phytochemistry. Biorecovery1: 81-126.

Bayraklı, Fethi., 1987. Toprak ve Bitki Analizleri, 19 Mayıs Üniv. Ziraat Fak.Samsun.

Bıçakçı, E., 2003. Türkiyede yetişen farklı pamuk genotiplerinin metal stresine karşı taranması ve seçilen genotiplerin in vitro rejenerasyonu. Y.T.Ü. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Boonyapookana, B., 2005. Phyto accumulation of Lead by Sunflower (Helianthus annuus), Tobacco (Nicotiana tabacum), and Vetiver (Vetiveria zizanioides),USA.

Clemens, S., Palmgren, M.G. ve Kramer, U., 2002. "A long way ahead: understanding and engineering plant element accumulation", Trends in plant Science,7:309-314.

EPA (Environmental Protection Agency), 2000**.** Introduction to Phytoremediation, EPA/600/R-99/107, National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati, Ohio 45268,USA.

Gabor, T. S., North, A. K., Ross, L. C. M., Murkin, H. R., Anderson, J. S. ve Turner, M. A. 2001. "Beyond The Pipe: The Importance of Wetlands and Upland Conservation Practises in Watershed Management : Function and Values for Water Quality and Quantity" Ducks Unlimited Canada. 52 p.

Garrett, D., 1998. "Borates:Handbook of Deposits, Processing, Properties and Use", San Diego Academic Press, USA.

Gezgin, S. Dursun, N., Hamurcu, M., Harmankaya, M., önder, M., Sade, B., Topal, A., Soylu, S., Akgün, N., Yorgancilar, M., Ceyhan, E., Çiftçi, N., Acar, B., Gültekin, İ., Şeker, C., ve Babaoglu, M., 2002. Determination of B Contents of Soils in Central Anatolian Cultivated Lands and Its Relations between Soil and Water Characteristics. Boron in Plant and Animal Nutrition. In: Goldbach HE, Brown PH, Rerkasem B, Thellier M, Wimmer MA & Bell RW (Eds.). Boron in Plant and Animal Nutrition pp. 391-400. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers.USA.

Henry, J. 2000. "An Overview of The Phytoremediation of Lead and Mercury". U.S. EPA, Office of Solid Waste and Emergency Response Technology Innovation Office. Report May-Aug. 2000. 51 p.

Hovsepyan, A. and Greipsson, S., 2005. EDTA Enhanced Phytoremediation of Lead-Contaminated Soil by Corn,USA.

http://www.cedgem.gov.tr/Cevreatlasi/Atlasin_Metni.Pdf, 2007. Çevre Bakanlığı Sitesi, Ankara.

http://www.drt.com.tr.

http://www.dtm.gov.tr/ead/bor

http://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi 136.

Jonnalagadda, S. B., Rao, P. V., 1993. 'Toxicity, bioavailability and element speciation', Comparative biochemistryand physiology, Part C: Pharmacology, toxicology, and endocrinology 106(3), 585-595.

Junta, Y., 2004**.** Effect of soil characteristics on Cd uptake by the hyperaccumulator Thlaspi caerulescens, Hertfordshire AL5 2JQ, UK.

Kacar, Burhan, 1989. Bitki Fizyolojisi, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi yayınları Ders kitabı sayfa 88. Ankara.

Kirleticiler-1, Ağır Metaller, 2006. Çevre için hekimler derneği, (www. cevrehekim.org)

Kocaer, F. ve Başkaya, H.S., 2003 Elementlerle Kirlenmiş Toprakların, Temizlenmesinde Uygulanan Teknolojiler,Bursa.

Lehmann, C. Rebele, F., 2004. Assessing the Potential for Cadmium Phytoremediation with Calamagrostis epigejos: A Pot Experiment, Germany.

Marchiol, L., 2004. Phytoextraction of heavy elements by canola (Brassica napus) and radish (Raphanus sativus) grown on multicontaminated soil, Italy.

Maruthi Sridhar, B.B., 2004. Anatomical changes due to uptake and accumulation of Zn and Cd in Indian mustard (Brassica juncea), USA.

Memon, A.R., Aktopraklıgil, D., Özdemir, A., Vertii, A. 2000. "Heavy Metal Accumulation and Detoxification Mechanisms in Plants" Tübitak MAM, Institute for genetic Engineering and Biotechnology, Kocaeli, Turkey.

Nehnevajova,E., Herzig, R., Federer, G., Erismann, K-H., 2005, Screenıng Of Sunflower Cultıvars For Metal Phytoextractıon In A Contamınated Fıeld Prıor To Mutagenesıs, Switzerland.

Nowack, B., VanBriesen, J.M., 2005, Chelating agents in the Environment, American Chemical Society, USA.

Özaslan, M., 2006 Sürdürülebilir Rekabet Avantajı Elde etmede Sektörel Stratejiler ve Uygulamalar, Organik Tarım Sektörü.

Özdemir, K., 1999. Kirlenmiş Zeminlerin Islahı. İTÜ Çevre Mühendisliği bölümü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Pivetz, B. E. 2001. " Phytoremediation of Contaminated Soil and Ground Water at hazardous Waste Sites" United States Environmental Protection Agency EPA, 540/S-01/500, 36 p.

Reeves RD, Baker AJM ., 2000. In I Raskin, BD Ensley, eds, Phytoremediation of Toxic Elements. John Wiley & Sons, New York, pp 193–229.USA.

Siegel, F.R., 2002. Environmental Geochemistry of Potentially Toxic Metals, Verlag Berlin Heidelberg, New York, USA.

Söğüt, Z., Zaimoğlu Z., Erdoğan, R.K., Doğan, S., 2004. Su kalitesinin arttırılmasında bitki kullanımı(yeşil ıslah-Phytoremediation), Çukurova Ü., Adana.

Spirochova, I. K., Puncocharova J., Kafka, Z., Kubal, M., Soudek, P., Vanek, T., 2003. 'Accumulation of heavy elements by *in vitro* cultures of plants', Water, Air, and Soil Pollution: Focus 3, 269-276.

SKKY (Su Kirliliği Kontrolu Yönetmeliği), 2004, Resmi Gazete 31/12/2004, Sayı:25687, Ankara.

TKKY (Toprak Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği), 2005, Resmi Gazete 31/05/2005, Sayı:25831, Ankara.

Wenzel1 W.W., Unterbrunner R., Sommer P., Sacco P., 2003. Chelate-assisted phytoextraction using canola (Brassica napus L.) in outdoors pot and lysimeter experiments, Austria.

Wilde, E.W., 2005. Phytoextraction of lead from firing range soil by Vetiver grass, USA.

Yılmaz, A., 2002. "Her Derde Deva Hazinemiz Bor", TUBİTAK-Bilim ve Teknik Dergisi, Ankara.

Zenk, M.H., 1996. "Heavy element detoxification in higher plants-a review" 179:21-30.

7. ÖZGEÇMİŞ

Ömer VANLI, 1974 yılında Gaziantep'te doğdu. 1997 yılında Harran Üniversitesi Ziraat Fakültesinden Ziraat Mühendisi olarak mezun oldu. 1998 yılında Selçuk Üniversitesinde Pedagojik Formasyon eğitimi aldı. 2000 yılında Gaziantep'te bir süre özel bir Paulownia fidanlığında mühendis olarak çalıştı. 2001 yılında devlet memuru olarak atandığı İTÜ'de, halen mühendis kadrosunda görev yapmaktadır. 2002 yılında başlamış olduğu İTÜ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Programı'ndan yüksek lisans ünvanı ile mezun olmuştur. Evli ve bir kız çocuğu babasıdır.