

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TARLA BİTKİLERİ ANABİLİM DALI

**KADMIYUM, KROM VE KURŞUN İLE KİRLENMİŞ TOPRAKLARIN
FİTOEKSTRAKSİYONLA ARITIMINDA ASPİR (*Carthamus tinctorius* L.)
BİTKİSİNİN KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN:Yahya KARATAŞ
DANIŞMAN: Doç. Dr. Zehra EKİN

VAN-2018

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TARLA BİTKİLERİ ANABİLİM DALI

**KADMIYUM, KROM VE KURŞUN İLE KİRLENMİŞ TOPRAKLARIN
FİTOEKSTRAKSİYONLA ARITIMINDA ASPİR (*Carthamus tinctorius* L.)
BİTKİSİNİN KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: Yahya KARATAŞ

VAN-2018

KABUL VE ONAY SAYFASI

Tarla Bitkileri Anabilim Dalı'nda Doç.Dr.Zehra EKİN danışmanlığında, Yahya KARATAŞ tarafından sunulan “Kadmiyum, Krom ve Kurşun ile Kirlenmiş Toprakların Fitoekstraksiyonla Arıtımında Aspir (*Carthamus tinctorius* L.) Bitkisinin Kullanımının Araştırılması” isimli bu çalışma Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili hükümleri gereğince// tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile başarılı bulunmuş ve Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan:.....

İmza:

Üye:.....

İmza:

Üye:.....

İmza:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun / / tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

İmza

.....
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atf yapıldığını bildiririm.

Yahya KARATAŞ

ÖZET

KADMİYUM, KROM VE KURŞUN İLE KİRLENMİŞ TOPRAKLARIN FİTOEKSTRAKSİYONLA ARITIMINDA ASPİR (*Carthamus tinctorius* L.) BİTKİSİNİN KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

KARATAŞ, Yahya
Yüksek Lisans Tezi, Tarla Bitkileri Anabilim Dalı
Tez Danışmanı: Doç. Dr. Zehra EKİN
Temmuz 2018, 66 sayfa

Biyolojik temizleme yöntemleri içinde yer alan fitoekstraksiyon toprakta kirliliğe neden olan ağır metallerin, bitki kökleri vasıtası ile alınarak bitkinin yeşil aksamına taşınması ve biriktirilmesi işlemidir. Fitoekstraksiyonla metal kirleticilerin topraktan uzaklaştırılmasında biyodizel üretiminde kullanılacak enerji bitkilerinin yetiştirilmesi ise sürdürülebilir bir yaklaşımdır. Bu çalışmada, önemli bir biyodizel bitkisi olan aspir (*Carthamus tinctorius* L.)'in gelişimi, fitoekstraksiyon kapasitesi ve mineral içerikleri kadmiyum (Cd), krom (Cr) ve kurşun (Pb) ile kirlenmiş bir toprakta saksı denemesi yapılarak araştırılmıştır. Araştırmada Remzibey-05 aspir çeşidine Cd'un 0, 2.5, 5, 10, 20 mg/kg, Cr'un 0, 40, 80, 120, 160 mg/kg ve Pb'nun 0, 30, 60, 90, 120 mg/kg konsantrasyonları uygulanmıştır. 6 haftalık gelişme periyodu sonunda hasat edilen bitkilerin bitki boyu, yeşil aksam yaş ve kuru ağırlığı, ağır metal birikimi, büyüme parametrelerine göre tolerans indeksleri (Tİ), biyokonsantrasyon faktörü (BKF) ve mineral içerikleri (N, P, K, Mg, Ca, Fe, Cu, Zn ve Mn) belirlenmiştir.

Araştırma sonuçlarına göre topraklarda artan ağır metal konsantrasyonlarına bağlı olarak bitkinin Cd, Cr ve Pb alımı büyük ölçüde artmıştır. Yüksek konsantrasyonlarda artan kirletici dozlarına bağlı olarak bitki yeşil aksamı azdan çoğa doğru Cd>Pb>Cr biriktirmiştir. Aspir bitkisinin tüm ağır metal uygulamalarında biyokonsantrasyon faktörünün>1 olması Cd, Cr ve Pb ile kirlenmiş toprakların fitoekstraksiyonunda kullanım potansiyelinin yüksek olduğunu göstermiştir. Remzibey-05 aspir çeşidi başta Cr olmak üzere Pb ve Cd ağır metallerine karşı yüksek tolerans gösterdiğinden, biyodizel üretimi için bu metallerle (Cd, Cr ve Pb) ile kirlenmiş toprakların temizlenmesinde iyi bir akümülatör bitki adayı olduğu düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: *Carthamus tinctorius*, Fitoekstraksiyon, Kadmiyum, Krom, Kurşun

ABSTRACT

PHYTOEXTRACTION OF HEAVY METALS BY SAFFLOWER (*Carthamus tinctorius* L.) GROWN ON CADMIUM, CHROMIUM AND LEAD-CONTAMINATED SOILS

KARATAŞ, Yahya
M. Sc.Thesis, Department of Field Crops
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Zehra EKİN
July 2018, 66 pages

Phytoextraction, a strategy of phytoremediation, is the use of pollutant accumulating plants capable to extract and translocate pollutants to the harvestable parts. It is a sustainable approach to cultivate energy plant that can be used for biodiesel production in the removal of metal contaminants from soil by phytoextraction. In this study, under greenhouse conditions the removal of toxic metals from contaminated soil with Cd, Cr and Pb was investigated the growth, phytoextraction capacity and mineral contents of safflower (*Carthamus tinctorius* L.), an important biodiesel plant. After growth for six weeks in soils containing 0, 2.5, 5, 10 or 20 mg Cd kg⁻¹, 0, 40, 80, 120 or 160 mg Cr kg⁻¹ and 0, 30, 60, 90 or 120 mg kg⁻¹, seedlings of Remzibey-05 safflower variety were evaluated for growth parameters, plant wet and dry weights, metal accumulation, tolerance index, bioconcentration factors and mineral contents (N, P, K, Mg, Ca, Fe, Cu, Zn and Mn).

The results indicated that Cd, Cr and Pb uptake has changed dramatically. Depending on the increased concentrations of contaminants in high concentrations, safflower plant much less than Cd>Pb>Cr have accumulated. The bioconcentration factor>1 for the all heavy metal applications indicated that the safflower plants have the high potential for phytoextraction to clean up Cd, Cr and Pb-contaminated soils. Since Remzibey-05 cv. against Pb, Cd heavy metals and especially Cr showed high tolerance, it is accumulator plant in contaminated heavy metals (Cd, Cr and Pb) in arable land for biodiesel production.

Keywords: *Carthamus tinctorius*, Phytoextraction, Cadmium, Chromium, Lead



ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasında, her türlü ilgi ve yardımlarını esirgemeyen danışmanım Sayın Doç. Dr. Zehra EKİN'e teşekkür ederim. Ayrıca çalışmam boyunca benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen Ziraat Yüksek Mühendisi Remzi ÖZKAN'a, arkadaşım Ziraat Mühendisi İdris ALACABEY'e, Ziraat Mühendisi Yunus YILKAN'a, Ziraat Mühendisi Medine KARATAŞ'a, gap Uluslararası Tarımsal Araştırma ve Eğitim Merkezi görev yapan Veteriner Hekim Mehmet Emin VURAL'a ve çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve hayatımın her evresinde bana destek olan aileme ve değerli eşim Yekta KARATAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

2018

Yahya KARATAŞ



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
ÖN SÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ	7
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	11
3.1. Materyal	11
3.1.1. Bitki materyali.....	11
3.1.2. Toprak materyali	12
3.2. Yöntem.....	13
3.2.1. Saksı denemesinin kurulması	13
3.2.2. Gözlem ve ölçümler	14
3.2.3. Verilerin değerlendirilmesi	16
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	17
4.1. Artan Kadmiyum Ağır Metal Konsantrasyonlarının Bitki Büyümesi Üzerine Etkisi.....	17
4.1.1. Bitki boyu	17
4.1.2. Yaş ağırlık	18
4.1.3. Kuru ağırlık	19
4.2. Artan Kadmiyum Ağır Metal Konsantrasyonlarının Aspir Bitkisinin Cd İçeriği Üzerine Etkisi	21
4.3. Artan Kadmiyum Konsantrasyonlarında Aspir Bitkisinin Fitoekstraksiyon Kapasitesi	22
4.3.1. Tolerans indeksi	22
4.3.2. Biyokonsantrasyon faktörü	24
4.4. Artan Kadmiyum Ağır Metal Dozlarının N, P, K, Mg ve Ca Alımına Etkileri... 25	

4.5. Artan Kadmiyum Ağır Metal Dozlarının Fe, Cu, Mn ve Zn Alımına Etkileri	29
4.6. Artan Krom Ağır Metal Konsantrasyonlarının Bitki Büyümesi Üzerine Etkisi..	32
4.6.1. Bitki boyu	32
4.6.2. Yaş ağırlık	33
4.6.3. Kuru ağırlık	34
4.7. Artan Krom Ağır Metal Konsantrasyonlarının Aspir Bitkisinin Toplam Cr İçeriği Üzerine Etkisi.....	35
4.8. Artan Krom Konsantrasyonlarında Aspir Bitkisinin Fitoekstraksiyon Kapasitesi	37
4.8.1. Tolerans indeksi	37
4.8.2. Biyokonsantrasyon faktörü	38
4.9. Artan Krom Ağır Metal Dozlarının N, P, K, Mg ve Ca Alımına Etkileri	39
4.10. Artan Krom Ağır Metal Dozlarının Fe, Cu, Mn ve Zn Alımına Etkileri.....	42
4.11. Artan Kurşun Ağır Metal Konsantrasyonlarının Bitki Büyümesi Üzerine Etkisi.....	44
4.11.1. Bitki boyu.....	44
4.11.2. Yaş ağırlık	45
4.11.3. Kuru ağırlık	46
4.12. Artan Kurşun Ağır Metal Konsantrasyonlarının Aspir Bitkisinin Pb İçeriği Üzerine Etkisi	47
4.13. Artan Kurşun Konsantrasyonlarında Aspir Bitkisinin Fitoekstraksiyon Kapasitesi	49
4.13.1. Tolerans indeksi	49
4.13.2. Biyokonsantrasyon faktörü	50
4.14. Artan Kurşun Ağır Metal Dozlarının N, P, K, Mg ve Ca Alımına Etkileri	51
4.15. Artan Kurşun Ağır Metal Dozlarının Fe, Cu, Mn ve Zn Alımına Etkileri	54
4.16. Aspir Bitkisinin Fitoekstraksiyon Kapasitesini Belirlemeye Yönelik Cd, Cr ve Pb Ağır Metali Uygulama Ortalamalarının Karşılaştırılması.....	56
5. SONUÇ.....	59
KAYNAKLAR.....	61
ÖZ GEÇMİŞ.....	65

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Araştırma toprağının bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri*.....	12
Çizelge 4.1. Farklı konsantrasyonlarda Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin bitki boyuna ait varyans analiz sonuçları	17
Çizelge 4.2. Farklı konsantrasyonlarda Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin bitki boyu (cm) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*	17
Çizelge 4.3. Farklı konsantrasyonlarda Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin yaş ağırlığına ait varyans analiz sonuçları	18
Çizelge 4.4. Farklı konsantrasyonlarda Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin yaş ağırlık (g) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*	19
Çizelge 4.5. Farklı konsantrasyonlardaki Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin kuru ağırlığına ait varyans analiz sonuçları	19
Çizelge 4.6. Farklı konsantrasyonlarda Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin kuru ağırlık (g) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*	20
Çizelge 4.7. Farklı konsantrasyonlarda kadmiyum ağır metali uygulanan aspir bitkisinin Cd içeriğine ait varyans analiz sonuçları	21
Çizelge 4.8. Farklı konsantrasyonlarda kadmiyum ağır metali uygulanan aspir bitkisinin toplam Cd içeriği (μg /bitki) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*	22
Çizelge 4.9. Farklı konsantrasyonlarda Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin bitki boyu, yaş ve kuru ağırlığı tolerans indekslerine ait varyans analiz sonuçları.....	23
Çizelge 4.10. Farklı konsantrasyonlarda Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin bitki boyu, yaş ve kuru ağırlık tolerans indeksi (%) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*	23
Çizelge 4.11. Farklı konsantrasyonlardaki Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin biyokonsantrasyon faktörüne ait varyans analiz sonuçları	24
Çizelge 4.12. Farklı konsantrasyonlarda Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin biyokonsantrasyon faktörü sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*	24

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.13. Farklı konsantrasyonlarda Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin N, P, K, Mg ve Ca içeriklerine ait varyans analiz sonuçları	26
Çizelge 4.14. Farklı konsantrasyonlarda Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin N (%), P (%), K (%), Mg (%) ve Ca (%) içeriklerine ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*	28
Çizelge 4.15. Farklı konsantrasyonlarda Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin Fe, Cu, Mn ve Zn içeriklerine ait varyans analiz sonuçları	29
Çizelge 4.16. Farklı konsantrasyonlarda kadmiyum ağır metali uygulanan aspir bitkisinin Fe, Cu, Mn ve Zn (mg/kg) içeriklerine ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*	31
Çizelge 4.17. Farklı konsantrasyonlarda Cr ağır metali uygulanan aspir bitkisinin bitki boyuna ait varyans analiz sonuçları	32
Çizelge 4.18. Farklı konsantrasyonlarda Cr ağır metali uygulanan aspir bitkisinin bitki boyu (cm) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*	32
Çizelge 4.19. Farklı konsantrasyonlarda Cr ağır metali uygulanan aspir bitkisinin yaş ağırlığına ait varyans analiz sonuçları	34
Çizelge 4.20. Farklı konsantrasyonlarda Cr ağır metali uygulanan aspir bitkisinin yaş ağırlık (g) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*	34
Çizelge 4.21. Farklı konsantrasyonlardaki Cr ağır metali uygulanan aspir bitkisinin kuru ağırlığına ait varyans analiz sonuçları	35
Çizelge 4.22. Farklı konsantrasyonlarda Cr ağır metali uygulanan aspir bitkisinin kuru ağırlık (g) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*	35
Çizelge 4.23. Farklı konsantrasyonlarda krom ağır metali uygulanan aspir bitkisinin Cr içeriğine ait varyans analiz sonuçları	36
Çizelge 4.24. Farklı konsantrasyonlarda krom ağır metali uygulanan aspir bitkisinin Cr içeriği (μg /bitki) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*	36
Çizelge 4.25. Farklı konsantrasyonlarda Cr ağır metali uygulanan aspir bitkisinin bitki boyu, yaş ve kuru ağırlığı tolerans indekslerine ait varyans analiz sonuçları	37

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.26. . Farklı konsantrasyonlarda Cr ağır metali uygulanan aspir bitkisinin bitki boyu, yaş ve kuru ağırlık tolerans indeksi (%) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*	38
Çizelge 4.27. Farklı konsantrasyonlardaki Cr ağır metali uygulanan aspir bitkisinin biyokonsantrasyon faktörüne ait varyans analiz sonuçları	38
Çizelge 4.28. Farklı konsantrasyonlarda Cr ağır metali uygulanan aspir bitkisinin biyokonsantrasyon faktörü sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*	39
Çizelge 4.29. Farklı konsantrasyonlarda Cr ağır metali uygulanan aspir bitkisinin N, P, K, Mg ve Ca içeriklerine ait varyans analiz sonuçları	40
Çizelge 4.30. Farklı konsantrasyonlarda krom ağır metali uygulanan aspir bitkisinin N (%), P (%), K (%), Mg (%) ve Ca (%) içeriklerine ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*	41
Çizelge 4.31. Farklı konsantrasyonlarda Cr ağır metali uygulanan aspir bitkisinin Fe, Cu, Mn ve Zn içeriklerine ait varyans analiz sonuçları	42
Çizelge 4.32. Farklı konsantrasyonlarda krom ağır metali uygulanan aspir bitkisinin Fe, Cu, Mn ve Zn (mg/kg) içeriklerine ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*	43
Çizelge 4.33. Farklı konsantrasyonlarda Pb ağır metali uygulanan aspir bitkisinin bitki boyuna ait varyans analiz sonuçları	44
Çizelge 4.34. Farklı konsantrasyonlarda Pb ağır metali uygulanan aspir bitkisinin bitki boyu (cm) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*	44
Çizelge 4.35. Farklı konsantrasyonlarda Pb ağır metali uygulanan aspir bitkisinin yaş ağırlığına ait varyans analiz sonuçları	45
Çizelge 4.36. Farklı konsantrasyonlarda Pb ağır metali uygulanan aspir bitkisinin yaş ağırlık (g) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*	46
Çizelge 4.37. Farklı konsantrasyonlardaki Pb ağır metali uygulanan aspir bitkisinin kuru ağırlığına ait varyans analiz sonuçları	46
Çizelge 4.38. Farklı konsantrasyonlarda Pb ağır metali uygulanan aspir bitkisinin kuru ağırlık (g) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*	47

Çizelge**Sayfa**

Çizelge 4.39. Farklı konsantrasyonlarda kurşun ağır metali uygulanan aspir bitkisinin Pb içeriğine ait varyans analiz sonuçları.....	48
Çizelge 4.40. Farklı konsantrasyonlarda kurşun ağır metali uygulanan aspir bitkisinin Pb içeriği (μg /bitki) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*	48
Çizelge 4.41. Farklı konsantrasyonlarda Pb ağır metali uygulanan aspir bitkisinin bitki boyu, yaş ve kuru ağırlığı tolerans indekslerine ait varyans analiz sonuçları.....	49
Çizelge 4.42. Farklı konsantrasyonlarda Pb ağır metali uygulanan aspir bitkisinin bitki boyu, yaş ve kuru ağırlık tolerans indeksi (%) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*	49
Çizelge 4.43. Farklı konsantrasyonlardaki Pb ağır metali uygulanan aspir bitkisinin biyokonsantrasyon faktörüne ait varyans analiz sonuçları	50
Çizelge 4.44. Farklı konsantrasyonlarda Pb ağır metali uygulanan aspir bitkisinin biyokonsantrasyon faktörü sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları.....	51
Çizelge 4.45. Farklı konsantrasyonlarda Pb ağır metali uygulanan aspir bitkisinin N, P, K, Mg ve Ca içeriklerine ait varyans analiz sonuçları.....	52
Çizelge 4.46. Farklı konsantrasyonlarda kurşun ağır metali uygulanan aspir bitkisinin N (%), P (%), K (%), Mg (%) ve Ca (%) içeriklerine ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*	53
Çizelge 4.47. Farklı konsantrasyonlarda Pb ağır metali uygulanan aspir bitkisinin Fe, Cu, Mn ve Zn içeriklerine ait varyans analiz sonuçları	54
Çizelge 4.48. Farklı konsantrasyonlarda kurşun ağır metali uygulanan aspir bitkisinin Fe, Cu, Mn ve Zn (mg/kg) içeriklerine ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*	55
Çizelge 4.49. Aspir bitkisinin bitki büyümesi, fitoekstraksiyon kapasitesi ve besin maddeleri alımı yönünden kadmiyum, krom ve kurşun uygulama ortalamalarının karşılaştırılması*	56

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Fitoekstraksiyon (Bitkisel özümleme) yöntemi (Çiftçi, 2016).....	2
Şekil 1.2. Toprakta metal iyonunun alımı ve bitkide birikim mekanizması (Çiftçi, 2016).	3
Şekil 1.3. Toprakta metal iyonlarının fitoekstraksiyonunu içeren şematik süreç (Çiftçi, 2016).....	4
Şekil 3.1. Remzibey-05 aspir çeşidi ve tohumları.....	11





SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklama

Cd	Kadmiyum
Cr	Krom
Pb	Kurşun
K	Potasyum
mg	miligram
mm	Milimetre
m²	Metrekare
µg	Mikrogram
µl	Mikrolitre
ml	Mili litre
N	Azot
P	Fosfor
pH	Çözelti derecesi
°C	Santigrat derece
%	Yüzde
L	Litre

Kısaltmalar

Açıklama

BKF	Biyokonsantrasyon Faktörü
BB	Bitki Boyu
LSD	En Küçük Önemli Fark
Tİ	Tolerans İndeksi
TKYK	Toprak Kirliliği Kontrol Yönetmeliği



1. GİRİŞ

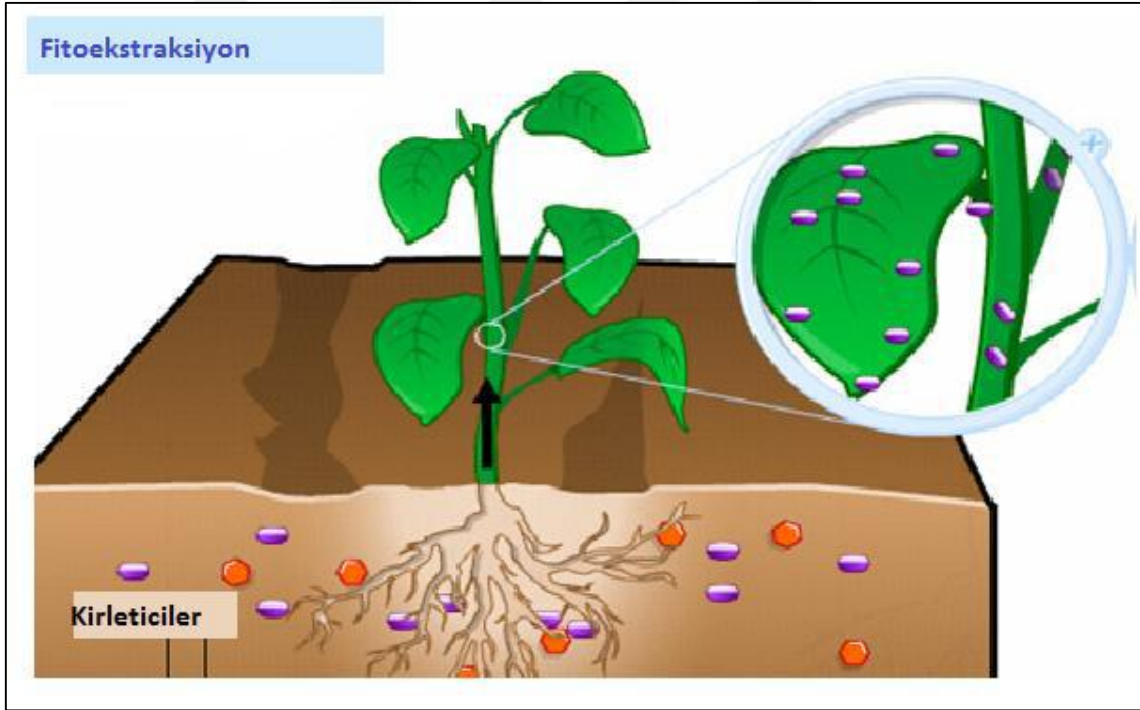
Günümüzde insan sağlığını etkileyen en önemli problemlerin başında çevre kirliliği yer almaktadır. Teknoloji devrimi ile birlikte hayat standartlarının yükselmesi ve ölüm oranlarının azalması, kentlerde yoğun bir nüfus artışı meydana getirmiş, paralelinde de hızlı bir kirlilik oluşmaya başlamıştır. Sanayi devrimi ile birlikte batı ülkelerinde gelişerek devam eden ve daha sonra diğer ülkelere de geçen seri üretim sonucunda oluşan yan ürünler dünyanın ekolojik dengesi üzerinde olumsuz etkilere sebep olmuştur ve olmaktadır. Bunun yanında sanayi devrimi, atık suların özelliklerinin değişimine neden olmuştur. Özellikle kanalizasyon atıksularındaki farklılaşma ve artış, yaşanan bölgeleri tehdit etmeye başlamıştır. Bundan dolayı özellikle 20. yüzyılın ilk başlarında atıksu arıtma tesisi çalışmalarını başlamış ve atıksuların arıtımında yer, iklim, enerji maliyeti gibi etkenlere bağlı olarak pek çok arıtma sistemi geliştirilmiştir. Ancak endüstriyel faaliyetler sonucu geniş aralıklarda ve yüksek konsantrasyonlarda çevreye yayılan kirleticilerin giderimi için bu arıtma sistemleri yeterli gelmemiş ve ileri arıtım mekanizmaları kullanımı gereği ortaya çıkmıştır. Bununla beraber ileri arıtım prosesleri yüksek teknoloji, enerji ve kimyasallar gerektirmektedir. Kalifiye eleman gerektiren bu işletmelerin ilk yatırım maliyetleri ve işletme masrafları yüksektir (Yücel, 1997).

Gelişmiş ülkeler tüm bu olumsuzlukları göz önüne alarak doğal bir arıtma sistemi planlamaya çalışmış ve sonuçta “Bitkisel Islah Sistemleri” oluşturulmuştur. Bitkilerin veya bitki ürünlerinin kirlenmiş alanları restore veya stabilize etmek için kullanımı, kirliliğin bitki tarafından seçilerek çıkarılması, ayrılması ve arındırılması yeşil ıslah (fitoremediasyon) olarak bilinmekte ve bitkilerin organik veya inorganik maddeleri giderimi, akümüle etmesi, depolaması veya parçalaması gibi doğal yetenekleri avantaj olarak kullanılmaktadır (Meagher, 2000; McIntyre, 2003).

Fitoremediasyon diğer arıtım teknolojilerine nazaran büyük avantajlara sahip olup, düşük yatırım ve işletim masrafının yanı sıra bitkide biriktirilen metallerin geri kazanımı ekonomik olarak fayda sağlamaktadır. Ekstra bir atılım sahasına gerek duyulmadığı gibi arıtılabileceği madde skalası da oldukça geniş olup uygulama boyunca toprak işlevleri devam etmekte ve toprak içindeki yaşam tekrar aktive edilmektedir.

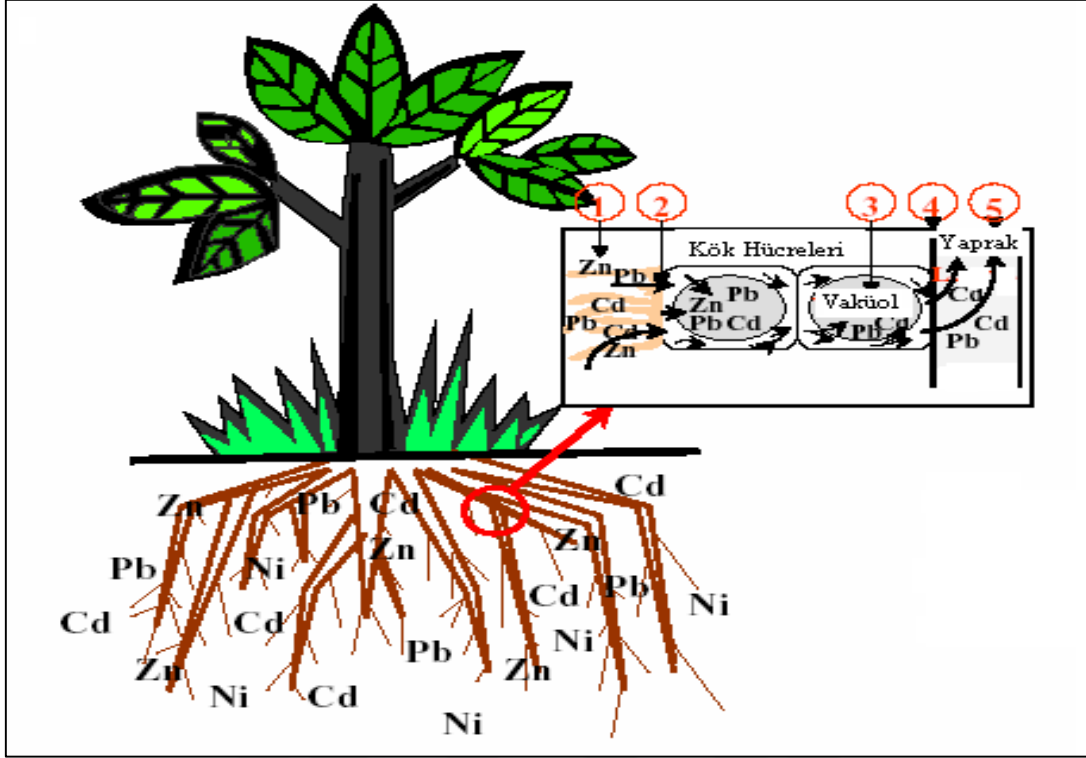
Kirlenmiş alanda bitki yetiştirildiği için o bölgede su, rüzgar ve toprak erozyonunun önüne geçilmekte ve bu da kirleticilerin yayılmasını engellemektedir (Bingöl, 2008).

Yeşil ıslahın farklı çeşitleri, bitki türlerinin kirlilik etmenlerini bertaraf etme yollarına bağlı olarak, köklerde süzme (Rizofiltrasyon), köklerde sabitleme (fitostabilizasyon), bitkisel özümleme (Fitoekstraksiyon), köklerle bozunum (Rizodegradasyon), bitkisel bozunum (Fitodegradasyon) ve bitkisel buharlaştırmadır (Fitovolatilizasyon) (EPA, 2000). Fitoakümüülasyon olarak da adlandırılan fitoekstraksiyon (Bitkisel özümleme) yöntemi, toprakta kirliliğe neden olan metalin, bitki kökleri yolu ile alınarak bitkinin yeşil aksamına (sap ve yaprak) taşınması ve biriktirilmesidir (Şekil 1.1.). Bu yöntem en çok ağır metallerle kirlenmiş topraklarda uygulanmaktadır (EPA, 2000).



Şekil 1.1. Fitoekstraksiyon (Bitkisel özümleme) yöntemi (Çiftçi, 2016).

Fitoekstraksiyon yöntemi ile metal alımı mekanizması Şekil 1.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Toprakta metal iyonunun alımı ve bitkide birikim mekanizması (Çiftçi, 2016).

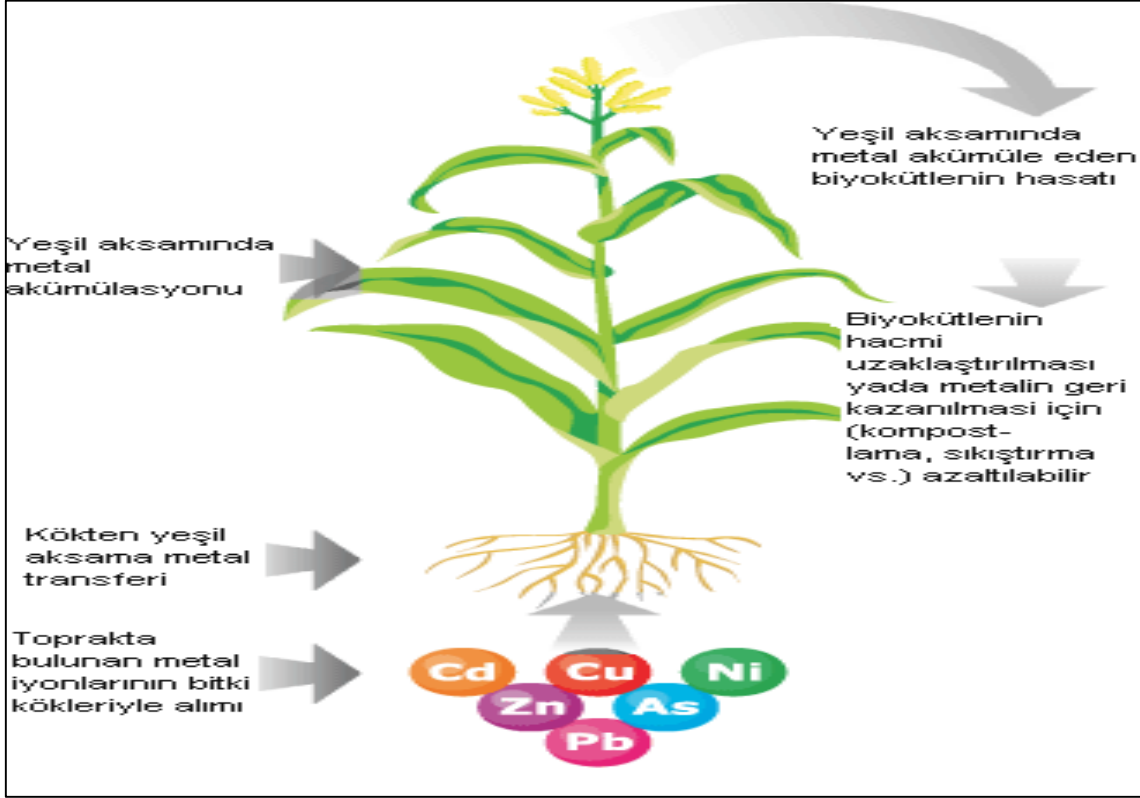
Şekil 1.2.'de numaralandırılan mekanizmalar şunlardır (Çiftçi, 2016):

1. Kök yüzey civarında metal iyonlarının bir kısmının tutulması.
2. Kökün hücreleri içerisine hücre membranları içerisinden geçerek biyoyararışlı metal iyonu taşınımı.
3. Kök içerisine absorblanmış bir metal fraksiyonunun sabitlenmesi,
4. Hareketli metal iyonlarının bir kısmının hücre zarlarına geçmesi ile bitkiye taşınımı.
5. Metal iyonlarının köklerden bitki yeşil aksamına ve yapraklarına taşınımı.

Toprakta metal iyonlarının fitoekstraksiyonu Şekil 1.3.'de şematik olarak gösterilmiştir.

Fitoekstraksiyonda kullanılacak bitkinin; hasat edilebilir aksamında yüksek oranda metal biriktirmesi, biriken ağır metale tolerans göstermesi, hızlı büyüeyebilen, derin köklü ve kolayca hasat edilebilir olması gerekmektedir (Karenlampi ve ark., 2000). Bu yöntem için uygun ve çoğu *Brassicacea*, *Euphorbiacea*, *Compositae* (*Asteraceae*), *Lamiaceae* ve *Scrophulariaceae* familyalarından olmak üzere bünyesinde

ağır metal biriktirebilen 400 kadar tür saptanmıştır (Jhee ve ark., 1999; EPA, 2000; Garbisu ve Alkorta, 2001).



Şekil 1.3. Toprakta bulunan metal iyonlarının fitoekstraksiyonunu içeren şematik süreç (Çiftçi, 2016).

Compositae familyasının bir üyesi olan aspir (*Carthamus tinctorius* L.) ise yağ, boya, vernik, yem ve ilaç sanayi gibi çok çeşitli alanlarda kullanılabilen tek yıllık bir bitkidir. Tohumlarında ortalama %30-45 yağ bulunduran, yağı yemeklik yağ ve biyoyakıt üretiminde kullanılan, yalancı safran olarak bilinen aspir, dikenli ve dikensiz formları, sarı, kırmızı, turuncu ve krem renkli çiçekleri ile önemli bir endüstri bitkisidir (Ekin, 2005). Aspir bitkisi özellikle soğuğa ve sıcaklığa olan yüksek toleransı nedeniyle kuru tarım alanlarında, tuzluluğa ve yabancı otlara olan toleransı ile de sulu tarım alanlarında değerlendirilebilecek alternatif ürünlerden birisidir (Dajue ve Mündel, 1996). Toprak tuzluluğuna dirençlilik bakımından yağ bitkileri arasında en başta gelen bitkilerdendir. Yetiştirme istekleri açısından seçici olmayıp derin ve kazık kök yapısıyla tarlayı yumuşatması, erozyonu önlemesi, yabancı otları bastırması, meyilli, kırıç ve fakir topraklarda diğer bitkilerden daha fazla verim sağlaması nedenleriyle marjinal

alanlarının değerlendirilmesinde diğer yağ bitkilerine göre önem kazanmaktadır. Günümüze kadar birçok araştırma aspirin genetik kaynakları, yetiştirme teknikleri, kimyasal bileşenleri, farmakolojik özellikleri gibi alanlarda yapılmıştır (Corleto ve ark., 1997). Bununla birlikte her türlü olumlu ve olumsuz koşulda kolaylıkla yetişebilmesi, iklim ve toprak seçiciliğinin fazla olmaması, çabuk büyüyebilmesi, gelişkin bir biyokütlesi ve yüksek yağ oranı ile önemli bir biyodizel bitkisi olan aspir bitkisinin fitoremediasyon yönteminde yeri ve potansiyeli üzerine yapılan araştırmalar sınırlı sayıda olup birçok ağır metalin etkileri halen bilinmemektedir. Günümüzde fitoekstraksiyonla metal kirleticilerin topraktan uzaklaştırılmasında biyodizel üretiminde kullanılabilir enerji bitkilerinin yetiştirilmesi ise sürdürülebilir bir yaklaşım olarak gittikçe önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada, doğal kaynaklar veya kirlenme yoluyla toprak-bitki ekosistemine giren ağır metallerden kadmiyum (Cd), krom (Cr) ve kurşunun (Pb) nemli bir biyodizel bitkisi olan aspir (*Carthamus tinctorius* L.)'in gelişimi, fitoekstraksiyon kapasitesi ve besin elementi alımına etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ

Marschner (1995), ağır metal teriminin ekolojik açıdan kirlenme ve toksisite şeklinde bir yan anlam olarak kullanıldığını ve çoğunlukla atom numarası 20'den büyük olan metallerin bu kapsama girdiğini belirterek, söz konusu elementlerin bitkilere ve bitkilerle beslenen insan ve hayvanlara toksik etki yapabildiklerini bildirmiş ve genel olarak generatif bitki kısımlarında vejetatif akşamlara göre daha az ağır metal biriktiğini, büyük bir kısmın köklerde kaldığını belirtmiştir. Ayrıca her ağır metalin bir tolerans sınırı olduğunu bu tolerans sınırının her elemente ve bitkiye göre değiştiğini, bu sınırların üzerine çıkılması durumunda metabolizmal bozuklukların oluşarak verimin düştüğünü bildirmiştir.

Huang ve Cunningham (1996), kurşun mutlak bitki besin elementi değildir. Ancak buna rağmen çok yaygın bir kirleticidir ve bu özelliği çevre kirliliği açısından oldukça endişe vericidir. US EPA'ya göre 300- 500 mg/kg'ı aşan toplam Pb' a veya 5 mg/L'yi aşan ekstrakte edilebilir Pb' a sahip topraklar genellikle iyileştirme gerektirir.

Chaney ve ark. (1997), fitoremediasyonun başarısı yeterli bitki verimliliği ve bitki gövdesindeki ağır metal konsantrasyonu ile doğru orantılı olduğunu, seçilen bitkilerin ağır metallerin yüksek konsantrasyonlarını bünyelerinde biriktirirken aynı zamanda yeterli biyokütleyide üretmesi gerektiğini ve bünyelerine çok yüksek dozda ağır metal alabilen bitkilere hiperakümatör bitki ismi verildiğini bildirmiştir.

Ebbs ve Kochian (1998), Fitoremediasyonda hangi bitkilerin kullanılabileceğini araştırıp hint hardalı, arpa ve yulafı içeren 22 çeşit bitki ile çinko (Zn) giderimi üzerine çalışmıştır. Ajan olarak EDTA kullanmışlardır. Araştırma sonunda bitkilerin çözeltide yüksek oranda bulunan Cu, Cd ve Znkonsantrasyonuna tolerans gösterdiği ve bunları bünyelerinde biriktirebildikleri ortaya konmuştur. Hint hardalı ile arpa ve yulaf karşılaştırıldığında hint hardalı daha fazla Zn'yu bünyesinde barındırabilmiş ancak arpa ve yulaf yüksek Znkonsantrasyonuna daha fazla tolerans gösterdiği saptanmıştır.

Salt ve ark. (1998), mısır ve ayçiçeğinin yüksek düzeyde biomass içeren bitkilerden olduğunu ve bunların önemli düzeyde Pb toplayabildiklerini bildirmişlerdir. Aynı çalışmayla mısır ve ayçiçeği kullanılarak her yıl 180-539 kg/ha Pb'yi

uzaklaştırarak, 2500 mg/kg'a kadar Pb ile kirlenmiş toprakların, 10 yılda iyileştirilebileceğini belirtmişlerdir.

Reeves ve ark. (2000), bugüne kadar yapılan çalışmalarla fitoremediasyon yöntemiyle topraktan kirleticilerin uzaklaştırılması için kullanılan birçok bitki tespit edilmiştir. Bu çalışmalara göre bünyesinde ağır metalleri biriktirebilen 45 bitki familyası tespit edilmiştir. Bu bitkiler Cu, Co, Cd, Mn, Ni, Se veya Zn gibi metalleri bünyelerinde 100-1000 mg/kg bitki seviyesinde biriktirebilmektedir.

Chen ve ark. (2000) tarafından yapılan bir çalışmada, Vetiver (Kabe samanı) çiminin Cd, Cu, Pb ve Zn ile kirlenmiş bir toprakta iyi büyüdüğü gözlemlenmiş ayrıca bitki gövdesinde yüksek konsantrasyonlarda Cd, Cu, Pb ve Zn tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda vetiver çiminin özellikle Cd, Pb ve Zn'un topraktan uzaklaştırılmasında etkili olabileceği ancak hasat edilen materyalin ne şekilde arıtılabileceğiyle ilgili detaylı çalışmaların yapılması gerekliliği vurgulanmıştır.

Garbisu ve Alkorta (2001), topraktaki metallerin giderilmesinde bir yeşil ıslah yöntemi olan bitkisel özümleme (fitoekstraksiyon) tekniğinin kullanılması ve bitkilerin hasat edildikten sonra maddi kazanç sağlaması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Sonuç olarak, bitkisel özümleme yaklaşımının fizibilitesinin, küçük ölçekli denemelerde kirlenmiş topraklardan metallerin geri alınabildiği ve bundan maddi kazanç sağlanmasıyla ispatlamışlardır.

Hocking ve McLaughlin (2001) tarafından yapılan bir çalışmada, sera koşullarında 17 farklı keten genotipinde tohumların Cd içerikleri araştırılmıştır. Genotipler arasında tohumların Cd içerikleri değişken olmakla beraber keten bitkisinin maksimum izin verilebilir sınır değerlerin üzerinde Cd biriktirebildiği saptanmıştır.

Madejon ve ark. (2003), yaptıkları çalışmada eski bir madende ayçiçeği yetiştirip toprağın iyileşme miktarını, ağır metalle kontamine olmamış bölgedeki sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak ayçiçeği bitkisinin bitkisel özümleme kapasitesinin çok düşük olduğu ancak bu bitkinin bölgede toprak koruma için kullanılabileceğini ayrıca bitkilerden elde edilecek bitkisel yağın endüstriyel olarak da kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Lázaro ve ark. (2006), yaptıkları çalışmada Cr, Mn ve Zn ile kontamine olmuş toprakta bir yeşil ıslah türü olan bitkisel özümleme (fitoekstraksiyon) tekniğini *Cistus ladanifer*, *Lavandula stoechas*, *Plantago subulata* ve *Thymus mastichina* bitkileriyle

çalışmışlardır. Araştırma sonucunda Akdeniz bölgesine özgü bu bitki türlerinden *P. Subulata* hariç diğer üç bitki sahip oldukları yüksek tolerans kabiliyeti sayesinde hayatta kalmış ve arıtım için iyi bir performans sergilemişlerdir. Ayrıca bu çalışmada tanımlanan 3 bitki türü hoş koku ve yağları sayesinde ekonomik fayda sağlayabilecek bir biyokütleyle sahip olduğunu ortaya koymuşlardır.

Chitra ve ark. (2011), sera koşullarında mısır, tütün ve buğday bitkilerini 3 farklı Cd (10, 30 ve 50 mg/ kg) konsantrasyonu uygulayarak yetiştirmiş ve her üç bitkinin kök ve gövdelerindeki kadmiyum konsantrasyonlarının maruz bırakıldıkları Cd konsantrasyonlarıyla orantılı olarak arttığını ve Cd konsantrasyonunun tütün bitkisinin gövdesi hariç diğer bitkilerde gövdeye nazaran köklerde daha yüksek bulunduğunu bildirmişlerdir.

Li ve ark. (2015), Cu ve Pb ağır metal stresi altında aspir (*Carthamus tinctorius L.*) bitkisinde ağır metal konsantrasyonları ve bitki büyümesinin engellenmesi arasında önemli pozitif bir ilişki olduğunu bildirmişlerdir. Araştırmacılar bitki boyu ve kök uzunluğunun artan konsantrasyonlar karşısında aşamalı olarak azaldığını fide aşaması hariç metal karışımının aspirin büyüme ve gelişme üzerinde sinerjik bir etkiye yol açtığını tespit etmişlerdir.

Al Chami ve ark. (2015), sorgum ve aspir bitkileri ile Ni, Pb ve Zn alımının mümkün olduğunu, köklerin gövdeye kıyasla daha fazla metal biriktirdiğini tespit etmişlerdir. Araştırmada Ni ağır metalinin Zn ve Pb'den daha toksik etkili olduğu belirlenmiş, metal toksisitesi bakımından sıralamanın Ni>Zn>Pb olduğu ve her iki türde de 10 mg/L üzerindeki bir derişimde büyüme olmadığı belirlenmiştir. Yüksek toksisite belirtileri ve biyokütle azalması her iki türün 25 mg/L üstündeki Pb ve Zn derişimlerinde gözlenmiştir. Araştırmacılar sorgumun yüksek biyokütle üretimi ve nispeten gövdedeki yüksek metal derişimi nedeniyle aspire nazaran ağır metal alımında daha etkili olduğunu bildirmişlerdir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Bitki materyali

Araştırmada bitki materyali olarak Eskişehir Geçit Kuşığı Tarımsal Araştırma Enstitüsü'nden temin edilen Remzibey-05 (Dikenli) aspir çeşidi kullanılmıştır (Şekil 3.1). Bu çeşidin bazı özellikleri aşağıda verilmiştir.

Remzibey-05:



Şekil 3.1. Remzibey-05 aspir çeşidi ve tohumları.

Tescil Yılı: 2005 yılında Geçit Kuşığı Tarımsal Araştırma Enstitüsünde geliştirilmiştir.

Islah Metodu: Seleksiyon

Morfolojik Özellikleri:

-Çiçek rengi sarı, tane rengi beyaz ve dikenli bir yapıya sahiptir.

-Bitki boyu 60-80 cm

Tarımsal Özellikleri:

-Erkenci

-Yazlık tabiatlı ve kuru tarım alanları için önerilir.

-Sulama ile daha yüksek verim verir.

-Verim düzeyi kuru koşullarda 100-200 kg/da ve sulu koşullarda 300-400 kg/da'dır

- Sulama ile tarımı yapıldığı alanlarda gübrenin verime etkisi yüksektir.

Kalite Özellikleri:

-Beyaz taneli, bin dane ağırlığı 46-50 g, kabuk oranı % 40, protein oranı % 14 ve yağ oranı ise % 32-35'dir.

Hastalık ve Zararlıları:

-Tavsiye edildiği bölgelerde önemli hastalık ve zararlısı yoktur.

3.1.2. Toprak materyali

Araştırmada Van ilinde 0-30 cm derinlikten alınarak getirilen tarla toprağı toprak materyali olarak kullanılmıştır. Laboratuvara getirilen toprak örnekleri taş ve bitki parçacıkları ayıklanarak havada kurumaya bırakılmıştır. Kuruyan topraklar ufalanarak saksı denemesi için 4 mm'lik elekten geçirilmiştir. Deneme toprağının bazı fiziksel ve kimyasal analizlerinin yapılması amacıyla da 2 mm'lik elekten geçirilmiş toprak örneği kullanılmış ve deneme öncesinde incelenen fiziksel ve kimyasal özellikleri açısından analiz edilerek sonuçlar Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Araştırma toprağının bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri*

Özellik	Toprak	Kaynaklar
Tekstür Sınıfı	Killi-tınlı	(Bouyoucus, 1951)
Suya doyumluk (%)	64.2	(Richards, 1954)
pH	7.1	(Kacar ve İnal, 2008)
Tuz (%)	0.042	(Kacar ve İnal, 2008)
Kireç (CaCO ₃) (%)	28.5	(Kacar ve İnal, 2008)
Organik madde (%)	1.70	(Kacar ve İnal, 2008)
Organik C (%) ¹	3.03	(Kacar ve İnal, 2008)
Toplam N (%)	1.10	(Kacar ve İnal, 2008)
Alınabilir P (mg P ₂ O ₅ /kg)	3.95	(Olsen ve Sommers, 1982)
Alınabilir K (mg K ₂ O/kg)	49.61	(Richards, 1954)
Cd (mg/kg)	0.98	Normal Değer: 0.01-2 TKKY ² Sınır Değeri (pH>6): 3
Cr (mg/kg)	16.40	Normal Değer: 10-50 TKKY Sınır Değeri (pH>6): 100
Pb (mg/kg)	9.20	Normal Değer: 2-300 TKKY Sınır Değeri (pH>6): 300

*Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bölümü Laboratuvarı, ¹Organik C (%) = Organik Madde (%) x 1,78. ²TKKY: Toprak Kirliliği Kontrol Yönetmeliği

Araştırmada kullanılan toprak killi-tınlı yapıda ve nötr reaksiyonlu olup, kireç oranı yüksektir. Deneme toprağının, azot, fosfor ve organik madde bakımından fakir, potasyum yüksek ve tuz oranı düşük, Cd, Cr ve Pb içeriklerinin ise normal sınırlar içerisinde olduğu tespit edilmiştir.

3.2. Yöntem

3.2.1. Saksı denemesinin kurulması

Saksı denemeleri Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü'ne ait iklim odasında yürütülmüştür. Tesadüf parselleri deneme desenine göre üç tekrarlamalı olarak kurulan saksı denemesinde kadmiyum (Cd), kurşun (Pb) ve krom (Cr) ağır metalleri ve farklı dozları ele alınmıştır. Denemeler aspir bitkisinin büyüme ve gelişmesi süresince %60-70 nem, 25/20 °C gündüz/gece sıcaklığı ve 16 saat aydınlık / 8 saat karanlık fotoperiyoda ayarlı iklim odasında yürütülmüştür. Toprakta homojen bir dağılım sağlamak için saksılara ekim öncesinde ağır metallere Cd için 0, 2.5, 5, 10, 20 mg/kg [Cd(NO₃)₂ formunda], Pb için 0, 30, 60, 90, 120 mg/kg [Pb(NO₃)₂ formunda] ve Cr için 0, 40, 80, 120, 160 mg/kg [Cr(NO₃)₃ formunda] konsantrasyonları hesaplanıp karıştırılmıştır. Sonrasında 2.5 L'lik her bir saksı için 2 kg toprak, 0,1 gr hassas terazide tartılarak hazır hale getirilmiştir. Araştırmada uygulanan ağır metal dozları ise, Kacar ve ark. (2010) tarafından bildirilen Cd, Pb ve Cr ortalama değerleri ve üst limit değerleri göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Ekimden önce her bir saksıya 300 mg/kg azot (NH₄)₂SO₄, 150 mg/kg fosfor (TSP) ve 200 mg/kg potasyum (KH₂PO₄) gübrelere bitkilerin temel besin ihtiyacını karşılamak üzere toprağa ilave edilmiştir (Kacar ve İnal, 2008).

Saksılara başlangıçta 6 adet aspir tohumu ekilmiş olup çimlenmeden sonra tüm saksılarda iyi çimlenmiş üç bitki kalacak şekilde seyreltilmiştir. Bitkilerin büyümesi esnasında, saksıların tümü düzenli olarak ve toprağın su tutma kapasitesinin %70'i oranında (tarla kapasitesinde) saf su ile sulanmıştır. Ekim işleminden altı hafta sonra saksılardaki bitkiler tohum oluşumundan önce hasat edilmiştir. Yeşil aksama ait veriler, ağır metal fitoekstraksiyon kapasitesini değerlendirmek için kullanılmıştır.

3.2.2. Gözlem ve ölçümler

3.2.2.1. Bitki boyu (cm)

Her bir saksıda bulunan üç bitkinin boyları cetvel yardımıyla santimetre olarak ölçülerek ortalaması alınıp kaydedilmiştir.

3.2.2.2. Yaş ağırlık (g/bitki)

Saksı denemelerinden elde edilen bitki örnekleri toprak yüzeyinden kesilerek hasat edilmiş ve olası toz ve toprak kalıntılarından arındırmak için önce %1 HCL (v/v) çözeltisi, ardından musluk suyu ile iyice durulanmış, daha sonra saf suyla iyice yıkanıp kurulandıktan sonra hassas terazide tartılmış ve ortalaması alınarak g/bitki olarak yaş ağırlığı kaydedilmiştir.

3.2.2.3. Kuru ağırlık (g/bitki)

Yaş ağırlığı ölçülen bitki örnekleri kurutma dolabında 70 °C' de sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuş ve 0.0000 hassas terazide tartılarak ortalaması alınarak g/bitki olarak kaydedilmiştir.

3.2.2.4. Bitki örneklerinde ağır metal ve besin elementi analizi

Aspir bitkisinin kurutulan yeşil aksamı değirmen yardımı ile öğütülmüştür. Öğütülen bitki örnekleri mikrodalgada (Advanced MicrowaveDigestionSystem, EthosEasy) HNO₃:HClO₄(6:2 v/v) ile yaş yakma yapılmış ve elementlerin yeşil aksam Pb, Cd ve Cr içerikleri ile N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn ve Zn içerikleri ICP-OES (iCAP 6000 SERIES, ICP Spectrometer) cihazında ölçülmüştür (AOAC, 1990). Üç paralel yapılan metal analizlerinin doğruluğu, metal içeriği belli olan standart sertifikalı bir bitki örneğinin aynı yöntemle analiz edilmesi ile kontrol edilmiştir.

3.2.2.5. Bitki büyümesi ve fitoekstraksiyon kapasitesinin değerlendirilmesi

Bitki büyüme indeksi olarak tolerans indeksi (Tİ), kök ve yeşil aksam uzunluğu, kök ve yeşil aksam yaş ve kuru maddesi gibi bitki büyüme parametrelerini esas alır ve Eş 3.1 'e göre hesaplanır (Wilkins, 1978).

$$Tİ (\%) = \frac{\text{Metal Uygulanan Bitki Büyüme Parametreleri}}{\text{Kontrol Bitki Büyüme Parametreleri}} \times 100 \quad (3.1)$$

Yapılan araştırmada bitki büyüme parametreleri gövde yaş ve kuru ağırlığı ve bitki boyudur.

Bitki toplam metal alımı ise toplam gövde metal içeriğinin toplam gövde kuru maddesinin çarpımıdır ve Cd, Cr ve Pb için Eş 3.2 'ye göre ayrı ayrı hesaplanmıştır (Shi ve Cai, 2009).

$$\text{Toplam Metal Alımı} = \text{Toplam metal içeriği} \times \text{Toplam kuru maddesi} \quad (3.2)$$

3.2.2.6. Biyokonsantrasyon Faktörü

Bitkilerin fitoekstraksiyon kapasitesini belirlemek için kullanılan biyokonsantrasyon faktörü (BKF), bitki dokusundaki toplam metal içeriğinin toprak metal içeriğine oranıdır (Marques ve ark., 2009).

$$BKF = \frac{\text{Bitki Metal İçeriği, mg/kg}}{\text{Toprak Metal İçeriği, mg/kg}} \quad (3.3)$$

Biyokonsantrasyon faktörü, bitkideki metal içeriğini hesaba kattığı için bitkilerin metal biriktirme kapasitesinin en iyi indikatörüdür. McGrath ve Zhao (2003), iyi bir metal biriktiren bitkinin BKF değerinin 1'den büyük olması gerektiğini bildirmektedir. Bununla birlikte bir bitkinin hiperakümülatör olarak kabul edilebilmesi için gövde metal içeriğinin Zn ve Mn için %1'den, Cr, Cu, Co, Pb, Ni, Se, Al ve As için %0.1'den ve Cd için %0.01'den büyük olması gerektiği bildirilmiştir (Baker ve Brooks, 1989).

3.2.3. Verilerin değerlendirilmesi

Saksı denemesinde toprak ve bitki analizleri üç tekrarlamalı olarak yapılmıştır. Bitki analiz testlerinin tümünde ortalama ve standart sapma değerleri hesaplanmıştır. Varyans analizleri CoStat version 6.3 (USA) paket programına göre yapılmış ve ortalamalar arasındaki fark En Küçük Önemli Fark (LSD) testi uygulanarak gruplandırılmıştır.



4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Artan Kadmiyum Ağır Metal Konsantrasyonlarının Bitki Büyümesi Üzerine Etkisi

4.1.1. Bitki boyu

Aspir bitkisinin farklı konsantrasyonlarda kadmiyum ağır metali uygulamalarından elde edilen bitki boyuna ait varyans analiz sonuçları Çizelge 4.1.'de, ortalama değerler ve önemlilik grupları ise Çizelge 4.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1.Farklı konsantrasyonlarda Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin bitki boyuna bağlı varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri
Konsantrasyonlar	4	78.73	30.52**
Hata	10	2.57	
Genel	14		

*: P<0.05 seviyesinde önemli ** : P<0.01 seviyesinde önemlidir.

Çizelge 4.2.Farklı konsantrasyonlarda Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin bitki boyu (cm) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*

Cd Konsantrasyonları (mg/kg)	Bitki boyu (cm)
Kontrol (Cd 0)	45.7 a ±1.60
Cd 2.5	40.6 b ± 0.45
Cd 5	38.5 b ± 2.15
Cd 10	34.8 c ± 0.65
Cd 20	32.6 c ± 2.25
LSD _{0.05}	2.921
% CV	4.17

* Aynı harflerle belirtilen ortalamalarda istatistiksel açıdan fark yoktur.

Çizelge 4.1.'de görüldüğü gibi artan konsantrasyonlarda Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinde bitki boyu değerleri arasındaki farklılıklar istatistiksel olarak önemli ($P<0.01$) bulunmuştur. Topraktaki ağır metal derişimine bağı olarak bitki boyunda kontrole göre önemli bir azalma görülmüştür. Kontrolde bitki boyu 45.7 cm iken en yüksek kadmiyum dozları olan Cd 10 ve Cd 20 uygulamalarında bitki boyu sırasıyla 34.8 ve 32.6 cm'ye gerilemiştir (Çizelge 4.2).

Yapılan pek çok araştırmada kadmiyum ağır metalinin bitkilerde kök ve gövde büyümesini engellemesine yönelik çalışma sonuçları ile uyumlu bulgulara rastlanmıştır. Nitekim kadmiyumun aspir bitkisinde gövde uzunluğunu azalttığı ve artan Cd konsantrasyonlarında en düşük değerlerin elde edildiği bildirilmiştir (Shi ve Cai,2009; Houshmandfar ve Moraghebi, 2011; Namjooyan ve ark., 2012). Toksik ağır metal alımı bitkide serbest radikal oluşumuna yol açmakta ve yaprak membran yapısının bozulmasına neden olduğundan klorofil yıkımı artarak klorofil sentezini engellemektedir (Zengin ve Munzuroğlu, 2005). Özellikle kadmiyumun proteinlerin –SH gruplarındaki enzimleri inaktive ettiği, fotosentezi engellediği, stomaların kapanmasına, transpirasyon ile su kaybının azalmasına ve klorofil biyosentezinin bozulmasına neden olduğu bilindiğinden bu durum artan dozlarda bitki büyümesindeki azalmanın da nedenidir (Marchiol ve ark., 2004; Çiftçi, 2016).

4.1.2. Yaş ağırlık

Aspir bitkisinin farklı konsantrasyonlarda kadmiyum ağır metali uygulamalarından elde edilen yaş ağırlığına ait varyans analiz sonuçları Çizelge 4.3.'de, ortalama değerler ve önemlilik grupları ise Çizelge 4.4.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3.Farklı konsantrasyonlarda Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin yaş ağırlığına ait varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri
Konsantrasyonlar	4	78.20	101.52**
Hata	10	0.77	
Genel	14		

*: $P<0.05$ seviyesinde önemli ** : $P<0.01$ seviyesinde önemlidir.

Çizelge 4.4.Farklı konsantrasyonlarda Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin yaş ağırlık (g) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*

Cd Konsantrasyonları (mg/kg)	Yaş Ağırlık (g / bitki)
Kontrol (Cd 0)	20.1 a ± 1.10
Cd 2.5	15.9 b ± 0.95
Cd 5	11.8 c ± 0.90
Cd 10	8.6 d ± 0.60
Cd 20	8.1 d ± 0.73
LSD 0.05	1.596
% CV	6.81

* Aynı harflerle belirtilen ortalamalarda istatistiksel açıdan fark yoktur.

Çalışmada farklı konsantrasyonlarda Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin yaş ağırlık değerleri arasındaki farklılıklar istatistiksel olarak önemli ($P<0.01$) bulunmuştur (Çizelge 4.3). Topraktaki artan Cd ağır metal konsantrasyonuna bağlı olarak bitkinin yaş ağırlığında kontrole göre önemli bir azalma görülmüştür. Araştırmada en yüksek yaş ağırlığı kontrol uygulamasında (20.1 g/bitki), en düşük değerleri ise yüksek kadmiyum dozları olan Cd 10 ve Cd 20 uygulamalarında (sırasıyla 8.6 ve 8.1 g/bitki) elde edilmiştir (Çizelge 4.4). Araştırma bulguları artan kadmiyum konsantrasyonlarının aspir çeşitlerinde gövde biomasını azalttığını bildiren Shi ve ark. (2010) ve Houshmandfar ve Moraghebi (2011) ile mısır ve ayçiçeği genotiplerinde Cd konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak tüm genotiplerin gövde yaş ağırlıklarında azalma olduğunu bildiren Güler (2011) ile uyumlu bulunmuştur.

4.1.3. Kuru ağırlık

Çizelge 4.5.Farklı konsantrasyonlardaki Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin kuru ağırlığına ait varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri
Konsantrasyonlar	4	5.28	16.43**
Hata	10	0.32	
Genel	14		

*: $P<0.05$ seviyesinde önemli ** : $P<0.01$ seviyesinde önemlidir.

Farklı konsantrasyonlardaki kadmiyum ağır metali uygulamalarında yetişen aspir bitkisinin kuru ağırlığına ait varyans analiz sonuçları Çizelge 4.5.'te, ortalama değerler ve önemlilik grupları ise Çizelge 4.6.'da gösterilmiştir.

Aspir bitkisinin toprak üstü aksam kuru ağırlığında Cd konsantrasyonlarına bağlı olarak istatistiksel olarak önemli ($p < 0.01$) bir azalma görülmüştür (Çizelge 4.5). Çalışmada en yüksek toprak üstü aksam kuru ağırlığı kontrol uygulamasından elde edilirken (5.2 g/bitki), en düşük değerleri ise yüksek kadmiyum dozları olan Cd 10 ve Cd 20 uygulamalarında (sırasıyla 2.3 ve 2.0 g/bitki) tespit edilmiştir (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.6. Farklı konsantrasyonlarda Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin kuru ağırlık (g) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar ($n=3$) ve önemlilik grupları*

Cd Konsantrasyonları (mg/kg)	Kuru Ağırlık (g / bitki)
Kontrol (Cd 0)	5.2 a \pm 0.96
Cd 2.5	4.0 b \pm 0.50
Cd 5	3.7 b \pm 0.55
Cd 10	2.3 c \pm 0.35
Cd 20	2.0 c \pm 0.10
LSD _{0.05}	1.031
% CV	16.52

* Aynı harflerle belirtilen ortalamalarda istatistiksel açıdan fark yoktur.

Benzer şekilde, Shi ve Cai (2009), içinde aspir bitkisinde bulunduğu sekiz potansiyel enerji bitkisi ile yaptığı denemede bitkilerin tümünde artan Cd dozlarına bağlı olarak bitki ağırlığının önemli düzeyde azaldığını bildirmişlerdir. Tiryakioğlu (2002), iki arpa çeşidiyle yaptığı denemede artan Cd dozlarına bağlı olarak gövde kuru ağırlığının önemli düzeyde azaldığını belirlemiştir. Houshmandfar ve Moraghebi (2011), aspir bitkinde gövde kuru ağırlığının uygulanan ağır metal konsantrasyonun artmasına bağlı olarak kontrole göre önemli düzeyde azaldığını bildirmiştir. Dağhan ve ark. (2012), 0, 0.2, 0.4, 0.8 ve 1.6 mg/kg Cd uygulanmış toprakta yetiştirdikleri tütün bitkilerinde kadmiyum dozu arttıkça büyümede ve bitkilerin kuru ağırlıklarında önemsiz derecede bir azalma gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Pourghasemian ve ark. (2013), dört aspir çeşidini 9 farklı Cd konsantrasyonu (0, 0.5, 1, 5, 10, 20, 50, 100 ve 500 μ M) uygulayarak yetiştirdikleri çalışmada, artan Cd dozlarının kök ve gövde ağırlığında önemli düşümlere neden olduğunu bildirmişlerdir. Kadmiyum stresinin kök ve yeşil

aksamların kuru ağırlıklarında azalmalara neden olduğunu bildiren farklı bitkiler ile yapılan çalışmalardan hintyağı bitkisinde Zhang ve ark. (2014), turp ve havuç bitkilerinde Chen ve ark. (2003), farklı buğday çeşitlerinde Öztürk ve ark. (2003), farklı ayçiçeği ve mısır çeşitlerinde Güler (2011) ve kanola bitkisinde Grispen ve ark. (2006) ve Karakaş (2013) ile araştırma bulguları uyumlu bulunmuştur.

4.2. Artan Kadmiyum Ağır Metal Konsantrasyonlarının Aspir Bitkisinin Cd İçeriği Üzerine Etkisi

Ağır metallerle kirlenmiş toprakların arıtımında bitkilerin yeşil aksam metal içeriği fitoekstraksiyon yönünden önemlidir. Aspir bitkisinin farklı konsantrasyonlarda kadmiyum ağır metali uygulamalarından elde edilen toplam Cd içeriğinin varyans analiz sonuçları Çizelge 4.7.'de, ortalama değerler ve önemlilik grupları ise Çizelge 4.8.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7.Farklı konsantrasyonlarda kadmiyum ağır metali uygulanan aspir bitkisinin Cd içeriğine ait varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri
Konsantrasyonlar	4	24582.63	101.60**
Hata	10	241.93	
Genel	14		

*: P<0.05 seviyesinde önemli ** : P<0.01 seviyesinde önemlidir.

Bitkinin en yüksek toplam Cd içeriği (211.5 µg /bitki) çalışmada kullanılan en yüksek konsantrasyon olan Cd 20 uygulamasında belirlenmiştir. Aspir bitkisinde en düşük toplam Cd içeriği 6.8 µg /bitki ile kontrol bitkisinden elde edilirken, yeşil aksamın topraktaki artan Cd konsantrasyonları karşısında daha fazla Cd ağır metalini biriktirdiği tespit edilmiştir. Araştırma sonuçlarını destekler nitelikte, bitkilerin yetiştirme ortamında kullanılan Cd konsantrasyonlarına göre kök ve yeşil aksamında daha yüksek derişimlerde Cd biriktirdiğini aspir bitkisinde Houshmandfar ve Moraghebi (2011), Pourghasemian ve ark. (2013), Shi ve Cai (2009), Shi ve ark. (2010), arpada Tiryakioğlu (2002), buğdayda Öztürk ve ark. (2003), ayçiçeği ve mısırdaki Güler (2011),

kanola da Grispen ve ark. (2006) ile Karakaş (2013) ve 18 farklı bitki türünde Shi ve ark. (2016) bildirmiştir.

Çizelge 4.8.Farklı konsantrasyonlarda kadmiyum ağır metali uygulanan aspir bitkisinin toplam Cd içeriği (μg /bitki) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*

Cd Konsantrasyonları (mg/kg)	Cd içeriği (μg /bitki)
Kontrol (Cd 0)	6.8 e \pm 1.25
Cd 2.5	42.8 d \pm 5.35
Cd 5	106.2 c \pm 16.00
Cd 10	182.1 b \pm 28.26
Cd 20	221.5 a \pm 11.16
LSD _{0.05}	28.30
% CV	13.90

* Aynı harflerle belirtilen ortalamalarda istatistiksel açıdan fark yoktur.

4.3. Artan Kadmiyum Konsantrasyonlarında Aspir Bitkisinin Fitoekstraksiyon Kapasitesi

Bitki biyokütlesi, biyokonsantrasyon faktörü ve toprak kütlesi belirli bir bitki türünün fitoremediasyonu tanımlayan üç temel değişkendir (Zhao ve ark., 2003). Bu amaçla denemede aspir bitkisinin fitoekstraksiyon kapasitesini belirlemek amacıyla elde edilen bulgulardan materyal ve yöntemde verilen denklemlere göre tolerans indeksi ve biyokonsantrasyon faktörü Cd ağır metalinin her bir dozu için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

4.3.1. Tolerans indeksi

Farklı konsantrasyonlardaki kadmiyum ağır metaline maruz kalan aspir bitkisinin tolerans indeksine bağlı varyans analiz sonuçları Çizelge 4.9.'da, ortalama değerler ve önemlilik grupları ise Çizelge 4.10.'da gösterilmiştir. Farklı konsantrasyonlarda metal uygulanan bitki büyüme parametreleri bitki boyu, bitki yaş ve kuru ağırlığı olarak hesaplanmıştır. Çalışmada ağır metal uygulanan bitki büyüme parametrelerinin (bitki boyu, bitki yaş ve kuru ağırlığı) kontrol bitki büyüme parametrelerine oranından hesaplanan tolerans indeksi değerlerinin tüm parametrelerde artan Cd konsantrasyonlarına bağlı olarak istatistiksel bakımdan önemli ($p < 0.01$) seviyede azaldığı görülmüştür (Çizelge 4.9 ve 4.10).

Çizelge 4.9. Farklı konsantrasyonlarda Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin bitki boyu, yaş ve kuru ağırlığı tolerans indekslerine ait varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri	
Konsantrasyonlar	3	Bitki boyu	133.70	11.44**
		Yaş ağırlık	1074.65	154.53**
		Kuru ağırlık	1075.48	17.24**
Hata	8	Bitki boyu	11.67	
		Yaş ağırlık	6.95	
		Kuru ağırlık	62.35	
Genel	11			

** P<0.01 seviyesinde önemlidir.

Çalışmada kadmiyum ağır metal stresi altında yetiştirilen aspir bitkisinde bitki boyu için en yüksek T_{BB} değerleri kadmiyum ağır metalinin Cd 2.5 ve Cd 5 konsantrasyonlarında (sırasıyla %88.9 ve 84.1) belirlenirken, en düşük tolerans indeksi Cd 10 ve Cd 20 uygulamalarından (sırasıyla % 76.2 ve 74.8) elde edilmiştir. Bitki yaş ağırlığı için T_I değeri en fazla Cd 2.5 uygulamasında (%79.3), en az ise Cd 20 uygulamasında (%37) bulunmuştur. Bitki kuru ağırlığında T_I artan Cd konsantrasyonlarına göre önemli seviyede ($p<0.01$) azalmış ancak istatistiksel olarak kadmiyumun Cd 2.5 ile Cd 5 ve Cd 10 ile Cd 20 uygulamaları aynı grup içerisinde yer almıştır (Çizelge 4.10).

Çizelge 4.10. Farklı konsantrasyonlarda Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin bitki boyu, yaş ve kuru ağırlık tolerans indeksi (%) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar ($n=3$) ve önemlilik grupları*

Cd Konsantrasyonları (mg/kg)	Tolerans indeksi (%)		
	T_{BB}	$T_{YAŞ}$	T_{KURU}
Cd 2.5	88.9 a \pm 3.62	79.3 a \pm 1.20	76.3 a \pm 9.55
Cd 5	84.1 a \pm 1.75	58.5 b \pm 2.26	69.7 a \pm 10.50
Cd 10	76.2 b \pm 4.00	42.9 c \pm 4.60	43.1 b \pm 6.65
Cd 20	74.8 b \pm 3.79	37.0 d \pm 0.30	38.4 b \pm 1.92
LSD _{0.05}	6.43	4.96	14.86
% CV	4.21	4.84	13.88

* Aynı harflerle belirtilen ortalamalarda istatistiksel açıdan fark yoktur.

Çalışma sonuçları genel olarak kadmiyumun topraktaki artan konsantrasyonları karşısında tüm parametrelerde bitki tolerans indeksinin azaldığını göstermektedir.

Araştırma bulguları Marchiol ve ark. (2004), Shi ve Cai (2009), Güler (2011) ve Pourghasemian ve ark. (2013) ile uyumlu bulunmuştur.

4.3.2. Biyokonsantrasyon faktörü

Aspir bitkisinin farklı konsantrasyonlardaki kadmiyum ağır metali uygulamalarından elde edilen biyokonsantrasyon faktörüne (BKF) bağlı varyans analizi sonuçları Çizelge 4.11.'de, ortalama değerler ve önemlilik grupları ise Çizelge 4.12.'de gösterilmiştir. Araştırmada aspir bitkisinde farklı Cd ağır metali konsantrasyonlarının biyokonsantrasyon faktörü üzerine etkisi istatistiki olarak önemli ($p<0.01$) olduğu belirtilmiştir (Çizelge 4.11).

Çizelge 4.11. Farklı konsantrasyonlardaki Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin biyokonsantrasyon faktörüne bağlı varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri
Konsantrasyonlar	3	53.72	10.37**
Hata	8	5.18	
Genel	11		

*: $P<0.05$ seviyesinde önemli ** : $P<0.01$ seviyesinde önemlidir.

Çizelge 4.12. Farklı konsantrasyonlarda Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin biyokonsantrasyon faktörü sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar ($n=3$) ve önemlilik grupları*

Cd Konsantrasyonları (mg/kg)	Biyokonsantrasyon Faktörü
Cd 2.5	17.1 b \pm 2.15
Cd 5	21.3 a \pm 3.15
Cd 10	17.9 b \pm 2.42
Cd 20	11.1 c \pm 0.56
LSD _{0.05}	4.28
% CV	13.51

* Aynı harflerle belirtilen ortalamalarda istatistiksel açıdan fark yoktur.

Bitkilerin fitoekstraksiyon kapasitesini belirlemek için kullanılan biyokonsantrasyon faktörü (BKF), bitki dokusundaki toplam metal içeriğinin toprak metal içeriğine oranı olup, bitkideki metal içeriğini hesaba kattığı için bitkilerin metal biriktirme kapasitesinin en iyi indikatörüdür. Araştırmada en düşük BKF değeri

topraktaki en yüksek konsantrasyonu olan Cd 20 uygulamasından (11.1), en yüksek değeri ise Cd 5 konsantrasyonunda (21.3) belirlenmiştir (Çizelge 4.12). Araştırma sonuçları artan kadmiyumun konsantrasyonları karşısında Cd 5 uygulamasına kadar biyokonsantrasyon faktörü değerinin arttığını gösterirken, Cd 10 uygulamasında azaldığını ve en yüksek doz olan Cd 20 uygulamasında ise bitki toplam metal alımının en düşük olduğu göstermektedir. Bununla birlikte BKF değerleri uygulanan bütün konsantrasyonlarda 1'in üzerinde olması aspir bitkisinin Cd akümülyasyonunda yüksek derecede etkili olduğu anlamına gelmektedir. Araştırma sonuçlarını destekler nitelikte Shi ve ark (2010) tarafından yapılan benzer bir çalışmada, iki farklı aspir çeşidinde Cd akümülyasyonu ve toleransı araştırılmış ve her iki aspir çeşidinde gövde Cd içeriğinin 148.6-277.2 mg/kg, BKF değerinin ise 2.5-6.2 arasında değiştiği ve en yüksek BKF değerinin kontrolde (6.2) en düşük değerinin (2.5) ise en yüksek Cd dozunda elde edildiği ve sonuç olarak hem gövde Cd içeriği hem de BKF değerlerinin bir Cd-akümülatörü olabilmesi için kritik seviyeyi fazlasıyla aştığından bu çeşitlerin potansiyel bir Cd akümülatörü olabileceği bildirilmiştir.

4.4. Artan Kadmiyum Ağır Metal Dozlarının N, P, K, Mg ve Ca Alımına Etkileri

Araştırmada artan kadmiyum ağır metal dozlarında aspir bitkisinin N, P, K, Mg ve Ca içeriklerine ait varyans analizi sonuçları Çizelge 4.13.'de, ortalama değerler ve önemlilik grupları ise Çizelge 4.14.'de verilmiştir. Çizelge 4.13 incelendiğinde, aspir bitkisinde farklı Cd ağır metali konsantrasyonlarının N, P, K ve Ca alımı üzerine etkisinin istatistiksel olarak $p < 0.01$ düzeyinde önemli, Mg alımı üzerine etkisinin ise istatistiksel olarak $p < 0.05$ düzeyinde önemli olduğu görülmektedir.

Araştırmada aspir bitkisinin artan Cd konsantrasyonları karşısında N (%), P (%), K (%), Mg (%) ve Ca (%) içerikleri kontrole kıyasla değerlendirildiğinde; bitkinin N ve P içeriklerinin en düşük kadmiyum konsantrasyonu olan Cd 2.5 uygulamasında önemli bir şekilde arttığı (sırasıyla %4.82 ve %0.31), K içeriğinin uygulanan tüm kadmiyum konsantrasyonlarında, Mg içeriğinin ise Cd 2.5 ve Cd 5 uygulamalarında (sırasıyla %1.029 ve 1.044) arttığı tespit edilmiştir (Çizelge 4.14). Çalışmada en düşük Ca içeriği %1.85 ile kontrolden elde edilirken, en yüksek değerleri Cd 5, Cd 10 ve Cd 20 uygulamalarından (sırasıyla %3.52, 3.67 ve 3.96) elde edilmiştir. Aspir bitkisinin

kontrole göre N ve P alımı artan dozlara bağlı olarak azalış gösterirken, K ve Ca alımı artış göstermiş, Mg alımı ise doz arttıkça artmasına rağmen Cd 10 ve 20 uygulamalarında azalış göstermiştir.

Çizelge 4.13. Farklı konsantrasyonlarda Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin N, P, K, Mg ve Ca içeriklerine ait varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri	
Konsantrasyonlar	4	N	1.507	151.90**
		P	0.005	44.36**
		K	2.194	9.36**
		Mg	0.018	3.53*
		Ca	2.426	61.80**
Hata	10	N	0.010	
		P	1.200	
		K	0.234	
		Mg	0.05	
		Ca	0.03	
Genel	14			

*: $P < 0.05$ seviyesinde önemli ** : $P < 0.01$ seviyesinde önemlidir.

Bilindiği gibi kadmiyum insan, hayvan ve bitkiler için toksik etkili olan bir ağır metal olup bitki gelişimi için gerekli olan birçok elementin alımını ve/veya kullanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Kadmiyum ayrıca bitki bünyesinde azot ve karbonhidratmetabolizmalarını değiştirerek birçok fizyolojik değişikliğe neden olmaktadır (Kacar ve İnal, 2008). Araştırmada gövde azot içeriğinin Cd uygulama dozundaki artışa bağlı olarak azalma göstermesini, kadmiyum stresi koşullarında azot metabolizmasının enzimleri olan nitrat redüktaz ve nitrit redüktazın aktivitelerinin azalmasından kaynaklandığı düşünülebilir. Nitekim bu durum bitkilerin nitrat asimilasyonunu da azaltmaktadır (Gouia ve ark.,2000). Konu ile ilgili yapılan benzer bir çalışmada da,beş farklı düzeyde Cd (0, 2.5, 5, 10 ve 20 mg/kg) Cd uygulamasında yetiştirilen dört farklı *Solanaceae* familyası bitkisinde, tüm bitkilerin gövde K içeriğinin artan Cd dozları karşısında önemli seviyede arttığı, Ca ve Mg içeriklerinde ise bir fark gözlemlenmezken kontrole göre önemli seviyede arttığı belirlenmiştir (Çıkkılı ve ark., 2016).Çiftçi (2016), çoklu metal (Kadmiyum, Kurşun ve Çinko) ile kirlenmiş bir toprağın arıtımında aspir bitkisinin fitoremediasyon kapasitesini araştırdığı

alışmasında, artan çoklu metal dozlarının gövde N ve P içeriğini azalttığını, K, Mg ve Ca içeriğini ise arttırdığını bildirmiştir.



Çizelge 4.14. Farklı konsantrasyonlarda Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin N (%), P (%), K (%), Mg (%) ve Ca (%) içeriklerine ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*

Cd Konsantrasyonu (mg/kg)	N (%)	P (%)	K (%)	Mg (%)	Ca (%)
Kontrol (Cd 0)	4.75 a ± 0.10	0.28 b ± 0.01	2.53 b ± 0.47	0.846 b ± 0.06	1.85 c ± 0.11
Cd 2.5	4.82 a ± 0.11	0.31 a ± 0.02	3.78 a ± 0.76	1.029 a ± 0.10	2.44 b ± 0.41
Cd 5	4.27 b ± 0.08	0.27 b ± 0.01	4.00 a ± 0.54	1.044 a ± 0.08	3.52 a ± 0.05
Cd 10	3.66 c ± 0.06	0.22 c ± 0.01	4.31 a ± 0.26	0.965 ab ± 0.05	3.67 a ± 0.11
Cd 20	3.18 d ± 0.12	0.20 c ± 0.01	4.83 a ± 0.10	0.983 ab ± 0.05	3.96 a ± 0.10
LSD _{0.05}	0.181	0.019	0.880	0.130	0.360
% CV	2.40	4.25	12.43	7.37	6.41

* Aynı harflerle belirtilen ortalamalarda istatistiksel açıdan fark yoktur.

4.5. Artan Kadmiyum Ağır Metal Dozlarının Fe, Cu, Mn ve Zn Alımına Etkileri

Araştırmada artan kadmiyum ağır metal konsantrasyonlarında aspir bitkisinin Fe, Cu, Mn ve Zn içeriklerine bağlı varyans analizi sonuçları Çizelge 4.15.'de, ortalama değerler ve önemlilik grupları ise Çizelge 4.16.'da gösterilmiştir. Çizelge 4.15 incelendiğinde, aspir bitkisinde farklı Cd ağır metali konsantrasyonlarının Fe, Mn ve Zn içerikleri üzerine etkisinin istatistiksel olarak $p < 0.01$ düzeyinde önemli, Cu içeriği üzerine etkisinin ise istatistiksel olarak $p < 0.05$ düzeyinde önemli olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.15. Farklı konsantrasyonlarda Cd ağır metali uygulanan aspir bitkisinin Fe, Cu, Mn ve Zn içeriklerine ait varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri	
Konsantrasyonlar	4	Fe	6016.22	21.18**
		Cu	12.05	5.41*
		Mn	410.77	85.94**
		Zn	145.97	17.68**
Hata	10	Fe	283.96	
		Cu	2.22	
		Mn	4.78	
		Zn	8.25	
Genel	14			

*: $P < 0.05$ seviyesinde önemli ** : $P < 0.01$ seviyesinde önemlidir.

Aspir bitkisi Fe ve Zn alımında artan doza bağlı olarak kontrole göre artış gösterirken Cu ve Mn alımında azalma göstermiştir (Çizelge 4.16). Çalışmada en düşük Fe, Cu, Mn ve Zn içerikleri (sırasıyla 281.87 mg/kg, 10.45 mg/kg, 52.03 mg/kg ve 28.47 mg/kg) ile kontrolden elde edilirken, en yüksek Fe alımı değerleri Cd 5 ve Cd 10 uygulamalarından (sırasıyla 388.76 mg/kg ve 392.03 mg/kg), en yüksek Cu ve Mn alımı değerleri Cd 5 uygulamasından (sırasıyla 16.05 mg/kg ve 75.69 mg/kg), en yüksek Zn alımı değerleri ise tüm Cd konsantrasyonlarında belirlenmiştir. Çalışmada aspir bitkisinin kontrole göre Cu ve Mn alımı Cd 5 uygulamasından sonra artan doza bağlı olarak azalış gösterirken, Zn alımı artış göstermiş, Fe alımı ise doz arttıkça artmasına rağmen en yüksek doz olan Cd 20 uygulamasında azalma göstermiştir.

Konu ile ilgili yapılan benzer bir çalışmada da, beş farklı düzeyde Cd (0, 2.5, 5, 10 ve 20 mg/kg) Cd uygulamasında yetiştirilen dört farklı *Solanaceae* familyası

bitkisinde, biber bitkisi hariç tüm bitkilerin gövde Fe içeriğinin artan Cd dozları karşısında önemli seviyede artmasına rağmen 20 mg/kg Cd uygulamasında azalış gösterdiği, Cu, Mn ve Zn içeriklerinin ise bitki türlerine göre artış veya azalış gösterdiği bildirilmiştir (Çıkılı ve ark., 2016). Çiftçi (2016) çoklu metal (Kadmiyum, kurşun ve çinko) ile kirlenmiş bir toprağın arıtımında aspir bitkisinin fitoremediasyon kapasitesini araştırdığı çalışmada, artan doza bağlı olarak gövde Fe, Mg ve Ca içeriklerinin arttığını, Cu içeriğinin ise azaldığını tespit etmiştir. Zhang ve ark. (2002), Cd uygulamasının fide aşamasındaki buğday genotiplerinde K, Fe, Mn, Zn ve Cu içeriklerini arttırdığını, Ca ve Mg içeriklerinde ise azalmaya sebep olduğunu bildirmiştir.



Çizelge 4.16. Farklı konsantrasyonlarda kadmiyum ağır metali uygulanan aspir bitkisinin Fe, Cu, Mn ve Zn (mg/kg) içeriklerine ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*

Cd Konsantrasyonu (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)
Kontrol (Cd 0)	281.87 c ± 6.88	10.45 b ± 0.41	52.03 c ± 1.17	28.47 b ± 1.37
Cd 2.5	349.36 b ± 13.60	13.59 ab ± 1.28	64.97 b ± 0.92	39.35 a ± 3.75
Cd 5	388.76 a ± 17.99	16.05 a ± 0.91	75.69 a ± 2.37	41.43 a ± 4.87
Cd 10	392.03 a ± 15.02	13.96 ab ± 1.57	54.81 c ± 1.71	46.49 a ± 1.41
Cd 20	366.50 ab ± 19.44	13.80 ab ± 2.44	46.05 d ± 2.71	44.14 a ± 1.14
LSD _{0.05}	30.66	2.714	3.977	5.226
% CV	4.73	10.99	3.72	7.19

* Aynı harflerle belirtilen ortalamalarda istatistiksel açıdan fark yoktur.

4.6. Artan Krom Ağır Metal Konsantrasyonlarının Bitki Büyümesi Üzerine Etkisi

4.6.1. Bitki Boyu

Aspir bitkisinin farklı konsantrasyonlardaki krom ağır metali uygulamalarından elde edilen bitki boyuna bağlı varyans analiz sonuçları Çizelge 4.17.'de, ortalama değerler ve önemlilik grupları ise Çizelge 4.18.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.17. Farklı konsantrasyonlarda Cr ağır metali uygulanan aspir bitkisinin bitki boyuna ait varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri
Konsantrasyonlar	4	48.54	26.80**
Hata	10	1.81	
Genel	14		

*: P<0.05 seviyesinde önemli ** : P<0.01 seviyesinde önemlidir.

Çizelge 4.18. Farklı konsantrasyonlarda Cr ağır metali uygulanan aspir bitkisinin bitki boyu (cm) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*

Cr Konsantrasyonları (mg/kg)	Bitki boyu (cm)
Kontrol (Cr 0)	45.7 a ±1.60
Cr 40	46.9 a ± 0.71
Cr 80	44.1 a ± 1.05
Cr 120	40.4 b ± 2.20
Cr 160	37.2 c ± 0.20
LSD _{0.05}	2.448
% CV	3.13

* Aynı harflerle belirtilen ortalamalarda istatistiksel açıdan fark yoktur.

Çizelge 4.17. incelendiğinde artan konsantrasyonlardaki krom metali uygulamalarında aspir bitkisinin bitki boyu değerleri arasındaki farklılıkların istatistiksel bakımdan önemli (P<0.01) bulunduğu görülmektedir. Çalışmada en yüksek bitki boyu değerleri kontrol, Cr 40 ve Cr 80 uygulamalarından elde edilirken (sırasıyla 45.7, 46.9 ve 44.1 cm), en düşük bitki boyu ise en yüksek krom konsantrasyonunda (37.2 cm) belirlenmiştir (Çizelge 4.18). Topraktaki krom metal derişimine bağlı olarak

Cr 120 uygulamasından itibaren bitki boyunda kontrole göre önemli bir azalma görülmüştür.

Krom tabiatında her yerde bulunabilecek bir element olup bitkiler için biyolojik olarak yararlı değildir ve eşik değerlerin üstündeki miktarlarda toksiktir (Özbek, 2010). Kromun kök hücrelerinin bölünme ve uzamasını engelleyerek kök gelişiminin engellediği ve bu durumun topraktan alınan bitki besin maddesi ile suyun azalmasına yol açarak bitki büyüme ve gelişmesini azalttığı bilinmektedir (Özbek, 2010). Yapılan çalışmalarda bazı bitki türlerinin düşük krom derişiminden etkilenmediği gözlemlenmişken, 100 µM Cr/kg kuru ağırlık konsantrasyonunun bazı bitkilerde oldukça toksik olduğu belirlenmiştir (Davies ve ark., 2002). Araştırma bulguları artan krom dozlarının (0, 50, 100 ve 150 mg/kg) ayçiçeği çeşitlerinde bitki boyunu azalttığını bildiren Ullah ve ark. (2011); *Jatropha* bitkisinde topraktaki Cr konsantrasyonundaki (0, 25, 50, 100 ve 250 mg/kg) artışa bağlı olarak bitki biomasında azalma olduğunu bildiren Yadav ve ark. (2010); Cr stresi altında yetiştirilen dört farklı kolza çeşidinde Cr konsantrasyonlarındaki artışın bitki boyunu önemli seviyede azalttığını ve en düşük bitki boyunun en yüksek Cr konsantrasyonundan elde edildiğini bildiren Gill ve ark. (2015) ile uyumlu bulunmuştur.

4.6.2. Yaş Ağırlık

Aspir bitkisinin farklı konsantrasyonlardaki krom ağır metali uygulamalarından elde edilen yaş ağırlığına bağlı varyans analiz sonuçları Çizelge 4.19.'de belirtilmiş, ortalama değerler ve önemlilik grupları ise Çizelge 4.20.'de gösterilmiştir.

Çalışmada farklı konsantrasyonlarda Cr metali uygulanan aspir bitkisinin yaş ağırlık değerleri arasındaki farklılıklar istatistiksel olarak önemli ($P < 0.01$) bulunmuştur (Çizelge 4.19). Topraktaki artan Cr metal konsantrasyonuna bağlı olarak bitkinin yaş ağırlığında kontrole göre önemli bir azalma görülmüştür. Araştırmada en yüksek bitki yaş ağırlığı kontrol uygulamasında (20.1 g/bitki) belirlenirken, en düşük değerleri ise en yüksek krom dozu olan Cr 160 uygulamasında (9.3 g/bitki) elde edilmiştir (Çizelge 4.20). Araştırma bulguları artan Cr konsantrasyonları karşısında bitki yaş ağırlığının azaldığını ve en düşük bitki yaş ağırlığının en yüksek Cr konsantrasyonundan elde

edildiğini bildiren Yadav ve ark. (2010), Ullah ve ark. (2011) ve Gill ve ark. (2015) ile uyumlu bulunmuştur.

Çizelge 4.19. Farklı konsantrasyonlarda Cr ağır metali uygulanan aspir bitkisinin yaş ağırlığına bağlı olan varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri
Konsantrasyonlar	4	52.76	76.35**
Hata	10	0.69	
Genel	14		

*: P<0.05 seviyesinde önemli ** : P<0.01 seviyesinde önemlidir.

Çizelge 4.20. Farklı konsantrasyonlarda Cr ağır metali uygulanan aspir bitkisinin yaş ağırlık (g) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*

Cr Konsantrasyonları (mg/kg)	Yaş Ağırlık (gr / bitki)
Kontrol (Cr 0)	20.1 a ± 1.10
Cr 40	16.1 b ± 0.90
Cr 80	12.7 c ± 0.90
Cr 120	11.6 c ± 0.38
Cr 160	9.3d ± 0.68
LSD _{0.05}	1.512
% CV	5.95

* Aynı harflerle belirtilen ortalamalarda istatistiksel açıdan fark yoktur.

4.6.3. Kuru Ağırlık

Farklı konsantrasyonlardaki krom ağır metali uygulamalarında yetişen aspir bitkisinin kuru ağırlığına bağlı varyans analiz sonuçları Çizelge 4.21.'de, ortalama değerler ve önemli olan gruplar ise Çizelge 4.22.'de gösterilmiştir. Çalışmada aspir bitkisinin toprak üstü aksam kuru ağırlığında artan krom konsantrasyonlarına bağlı olarak kontrole göre istatistiksel olarak önemli (p<0.01) bir azalma görülmüştür (Çizelge 4.21). Araştırmada en yüksek toprak üstü aksam kuru ağırlığı kontrol uygulamasından elde edilirken (5.2 g/bitki), en düşük değeri ise en yüksek krom dozu olan Cr 160 uygulamasında (2.4 g/bitki) belirlenmiştir (Çizelge 4.22).

Çizelge 4.21. Farklı konsantrasyonlardaki Cr ağır metali uygulanan aspir bitkisinin kuru ağırlığına bağlı varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri
Konsantrasyonlar	4	3.60	13.89**
Hata	10	0.25	
Genel	14		

*: P<0.05 seviyesinde önemli ** : P<0.01 seviyesinde önemlidir.

Çizelge 4.22. Farklı konsantrasyonlarda Cr ağır metali uygulanan aspir bitkisinin kuru ağırlık (g) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*

Cr Konsantrasyonları (mg/kg)	Kuru Ağırlık (gr / bitki)
Kontrol (Cr 0)	5.2 a ± 0.96
Cr 40	4.5 ab ± 0.54
Cr 80	4.0 bc ± 0.06
Cr 120	3.2 cd ± 0.22
Cr 160	2.4 d ± 0.18
LSD _{0.05}	0.926
% CV	13.1

* Aynı harflerle belirtilen ortalamalarda istatistiksel açıdan fark yoktur.

Kromun bitki büyümesi ve gelişimi üzerine olan toksik etkileri çimlenmenin yanı sıra kök, gövde ve yaprak büyümesi ve dolayısıyla kuru madde üretimindeki değişimleri içermektedir (Shanker ve ark., 2005). Nitekim Gill ve ark. (2015), Cr stresi altında yetiştirdikleri dört farklı kolza çeşidinde Cr konsantrasyonlarındaki artışın tüm çeşitlerde kuru ağırlığı azalttığı ve en yüksek bitki kuru ağırlığının kontrolden elde edildiğini bildirmişlerdir. Ullah ve ark. (2011), artan Cr konsantrasyonları karşısında ayçiçeği çeşitlerinin kuru ağırlıklarının farklı etkilendiğini, HiSun-33 çeşidinde dozlara bağlı olarak artarken, SanSun-33 çeşidinde azaldığını tespit etmişlerdir.

4.7. Artan Krom Ağır Metal Konsantrasyonlarının Aspir Bitkisinin Toplam Cr İçeriği Üzerine Etkisi

Aspir bitkisinin farklı konsantrasyonlardaki krom ağır metali uygulamalarından elde edilen Cr içeriğine ait varyans analiz sonuçları Çizelge 4.23.'de, ortalama değerler ve önemlilik grupları ise Çizelge 4.24.'de verilmiştir.

Çizelge 4.23. Farklı konsantrasyonlarda krom ağır metali uygulanan aspir bitkisinin Cr içeriğine bağlı varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri
Konsantrasyonlar	4	154969.70	1059.20**
Hata	10	146.30	
Genel	14		

*: P<0.05 seviyesinde önemli ** : P<0.01 seviyesinde önemlidir.

Araştırmada aspir bitkisinin en yüksek toplam Cr içeriği (546.1 µg /bitki) topraktaki en yüksek krom konsantrasyonu olan Cr 160 uygulamasından elde edilirken, en düşük toplam Cr içeriği ise 6.8 µg /bitki olarak kontrol bitkisinde belirlenmiştir. Aspir bitkisinin toprak üstü aksamın topraktaki artan Cr konsantrasyonları karşısında daha fazla Cr ağır metalini biriktirdiği tespit edilmiştir.

Çizelge 4.24. Farklı konsantrasyonlarda krom ağır metali uygulanan aspir bitkisinin Cr içeriği (µg /bitki) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*

Cr Konsantrasyonları (mg/kg)	Cr içeriği (µg /bitki)
Kontrol (Cr 0)	6.2 e ± 1.10
Cr 40	55.6 d ± 9.80
Cr 80	170.0 c ± 9.95
Cr 120	380.5 b ± 2.07
Cr 160	546.1 a ± 23.03
LSD _{0.05}	22.00
% CV	5.22

* Aynı harflerle belirtilen ortalamalarda istatistiksel açıdan fark yoktur.

Konu ile ilgili olarak yapılan araştırmalarda da besin ortamında kromun yüksek konsantrasyonlarının bitki dokularında krom birikiminde artışa sebep olduğu (Mishra ve ark., 1997; Zayed ve ark., 1998) ve herhangi bir toksisite semptomu göstermeksizin farklı bitki dokularında yüksek seviyelerde Cr biriktirebildiğini belirtmiştir (Zayed ve Terry, 2003). Nitekim Cr biriktirici *Leptospermum scoparium* yapraklarında 20.000 mg/kg, *Sutera fodina* 48.000 mg/kg, *Dicoma niccolifera* 30.000 mg/kg, *Leptospermum scoparium* ise 2470 mg/kg Cr biriktirebilmektedir (Zayed ve Terry, 2003). Bitkilerde toksik etkiye sahip olan değerler ise 5-30 mg/kg arasında olup, 2-18 mg/kg değerlerinin bitkide %10 ürün azalmasına sebep olduğu bilinmektedir (Başcı, 2009). Konu ile ilgili

olarak yapılan çalışmalarda, Ullah ve ark. (2011), ayçiçeği bitkisinde en yüksek ağır metal birikiminin kromun en yüksek dozu olan 150 mg/kg Cr uygulamasından elde edilirken, en düşük değerinin kadmiyumun en düşük dozu olan 10 mg/kg Cd uygulamasından elde edildiğini bildirmişlerdir. Çiftçi (2016), çoklu metal (Kadmiyum, Kurşun ve Çinko) ile kirlenmiş toprakta yetiştirdiği aspir bitkisinin Cr içeriğinin artan çoklu metal dozlarına bağlı olarak artış gösterdiğini bildirmiştir.

4.8. Artan Krom Konsantrasyonlarında Aspir Bitkisinin Fitoekstraksiyon Kapasitesi

4.8.1. Tolerans indeksi

Farklı konsantrasyonlardaki krom ağır metale maruz kalan aspir bitkisinin tolerans indeksine bağlı varyans analiz sonuçları Çizelge 4.25.'te, ortalama değerler ve önemli olan gruplar ise Çizelge 4.26.'da verilmiştir. Farklı konsantrasyonlarda metal uygulanan bitki büyüme parametreleri bitki boyu, bitki yaş ve kuru ağırlığı olarak hesaplanmıştır. Araştırmada farklı krom konsantrasyonlarının bitki boyu, bitki yaş ve kuru ağırlığı tolerans indeksleri üzerine olan etkisi istatistiksel olarak önemli ($p<0.01$) bulunmuştur (Çizelge 4.25).

Çizelge 4.25. Farklı konsantrasyonlarda Cr ağır metali uygulanan aspir bitkisinin bitki boyu, yaş ve kuru ağırlığı tolerans indekslerine ait varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri
Konsantrasyonlar	3	Bitki boyu	262.36
		Yaş ağırlık	583.63
		Kuru ağırlık	1215.09
Hata	8	Bitki boyu	9.27
		Yaş ağırlık	3.04
		Kuru ağırlık	31.85
Genel	11		

** $P<0.01$ seviyesinde önemlidir.

Çalışmada artan krom konsantrasyonlarına maruz bırakılarak yetiştirilen aspir bitkisinde bitki boyu, yaş ve kuru ağırlık için en yüksek T_{IBB} değerlerinin krom ağır

metalinin en düşük uygulama konsantrasyonu olan Cr 40 uygulamasından (sırasıyla %102.7, 80.0 ve 93.5) elde edilirken, en düşük tolerans indeksi değerleri ise en yüksek konsantrasyon olan Cr 160 uygulamasında (sırasıyla %81.4, 46.4 ve 46.6) belirlenmiştir (Çizelge 4.26). Araştırmada genel olarak kromun topraktaki artan konsantrasyonları karşısında tüm parametrelerde bitki tolerans indeksinin azaldığı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.26. . Farklı konsantrasyonlarda Cr ağır metali uygulanan aspir bitkisinin bitki boyu, yaş ve kuru ağırlık tolerans indeksi (%) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*

Cr Konsantrasyonları (mg/kg)	Tolerans indeksi (%)		
	Tİ _{BB}	Tİ _{YAŞ}	Tİ _{KURU}
Cr 40	102.7 a ± 5.22	80.0 a ± 1.26	93.5 a ± 1.90
Cr 80	96.5 b ± 1.06	59.9 b ± 2.36	76.7 b ± 10.25
Cr 120	88.2 c ± 1.70	57.9 b ± 1.96	61.6 c ± 0.80
Cr 160	81.4 d ± 2.40	46.4 c ± 1.05	46.6 d ± 4.25
LSD _{0.05}	5.73	3.28	10.63
% CV	3.30	2.87	8.10

* Aynı harflerle belirtilen ortalamalarda istatistiksel açıdan fark yoktur.

4.8.2. Biyokonsantrasyon faktörü

Çizelge 4.27. Farklı konsantrasyonlardaki Cr ağır metali uygulanan aspir bitkisinin biyokonsantrasyon faktörüne bağlı varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri
Konsantrasyonlar	3	2.63	108.80**
Hata	8	0.02	
Genel	11		

*: P<0.05 seviyesinde önemli **: P<0.01 seviyesinde önemlidir.

Aspir bitkisinin aynı olmayan konsantrasyonlardaki krom ağır metali uygulamalarından elde edilen biyokonsantrasyon faktörüne (BKF) bağlı varyans analizi sonuçları Çizelge 4.27.'de, ortalama değerler ve önemlilik grupları ise Çizelge 4.28.'de gösterilmiştir. Araştırmada aspir bitkisinde farklı Cr ağır metali konsantrasyonlarının biyokonsantrasyon faktörü üzerine etkisi istatistiki bakımdan önemli (p<0.01) bulunmuştur (Çizelge 4.27).

Çizelge 4.28. Farklı konsantrasyonlarda Cr ağır metali uygulanan aspir bitkisinin biyokonsantrasyon faktörü sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*

Cr Konsantrasyonları (mg/kg)	Biyokonsantrasyon Faktörü
Cr 40	1.39 c ± 0.24
Cr 80	2.12 b ± 0.12
Cr 120	3.16 a ± 0.01
Cr 160	3.41 a ± 0.14
LSD _{0.05}	0.293
% CV	6.17

* Aynı harflerle belirtilen ortalamalarda istatistiksel açıdan fark yoktur.

Araştırmada en düşük BKF değeri Cr 40 uygulamasından 1.39 olarak elde edilirken, en yüksek değerleri ise Cr 120 ve 160 konsantrasyonlarında (sırasıyla 3.16 ve 3.41) tespit edilmiştir (Çizelge 4.28). Araştırma sonuçları artan krom konsantrasyonları karşısında biyokonsantrasyon faktörü değerinin arttığını göstermektedir. Nitekim biyokonsantrasyon faktörü değerinin yüksekliği bitkilerin metalleri yüksek miktarda biriktirme potansiyelini göstermekle birlikte (Chumbley ve Unwin, 1982; Cui ve ark., 2007), hiperakümülatör olarak isimlendirilen bir bitkinin biyokonsantrasyon faktörü değerinin de 1'in üzerinde olması gerekmektedir (McGrath ve Zho, 2003). Çalışmada BKF değerleri uygulanan bütün konsantrasyonlarda 1'in üzerinde olup aspir bitkisinin Cr akümülyasyonunun yüksek olduğunu göstermektedir.

4.9. Artan Krom Ağır Metal Dozlarının N, P, K, Mg ve Ca Alımına Etkileri

Araştırmada artan krom ağır metal dozlarında aspir bitkisinin N, P, K, Mg ve Ca içeriklerine bağlı varyans analizi sonuçları Çizelge 4.29.'da, ortalama değerler ve önemli olan gruplar ise Çizelge 4.30.'da belirtilmiştir. Çizelge 4.29 incelendiğinde, aspir bitkisinde farklı Cr ağır metali konsantrasyonlarının N ve P alımı üzerine etkisinin istatistiksel olarak $p < 0.01$ düzeyinde önemli, K ve Ca alımı üzerine etkisinin istatistiksel olarak $p < 0.05$ düzeyinde önemli ve Mg alımı üzerine etkisinin istatistiksel olarak önemsiz olduğu görülmektedir. Araştırmada aspir bitkisinin artan krom konsantrasyonları karşısında N (%), P (%), K (%), Mg (%) ve Ca (%) içerikleri kontrole göre değerlendirildiğinde; bitkinin N içeriğinin azaldığı, P içeriğinin sadece en yüksek krom konsantrasyonu olan Cr 160 uygulamasında önemli bir şekilde azaldığı, K

içeriğinin uygulanan tüm krom konsantrasyonlarında arttığı, Mg içeriği bakımından uygulamalar arasında önemli bir fark olmadığı ve Ca içeriğinin ise en yüksek Cr 40 uygulamasından elde edildiği tespit edilmiştir (Çizelge 4.30).

Bilindiği üzere krom bitki bünyesinde azot metabolizmasında değişikliğe neden olmakta ve Cr stresi altındaki bitkilerin protein içeriğinde ve nitrat redüktaz aktivitesinde azalmalar görülmektedir (Vajpayee ve ark., 1999). Nitekim araştırmada da aspir bitkisinin N içeriğinin Cr uygulama dozundaki artışa bağlı olarak azalma göstermesi bu durumu destekler niteliktedir.

Çizelge 4.29. Farklı konsantrasyonlarda Cr ağır metali uygulanan aspir bitkisinin N, P, K, Mg ve Ca içeriklerine bağlı varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri	
Konsantrasyonlar	4	N	1.214	124.71**
		P	0.001	6.01**
		K	3.590	5.58*
		Mg	0.053	2.60
		Ca	1.580	3.89*
Hata	10	N	0.009	
		P	2.220	
		K	0.642	
		Mg	0.020	
		Ca	0.405	
Genel	14			

*: P<0.05 seviyesinde önemli ** : P<0.01 seviyesinde önemlidir.

Çizelge 4.30. Farklı konsantrasyonlarda krom ağır metali uygulanan aspir bitkisinin N (%), P (%), K (%), Mg (%) ve Ca (%) içeriklerine ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*

Cr Konsantrasyonu (mg/kg)	N (%)	P (%)	K (%)	Mg (%)	Ca (%)
Kontrol (Cr 0)	4.75 a ± 0.10	0.280 a ± 0.01	2.53 b ± 0.47	0.846 ± 0.06	1.85 b ± 0.11
Cr 40	4.44 b ± 0.11	0.291 a ± 0.02	3.44 ab ± 0.19	1.135 ± 0.28	3.80 a ± 0.41
Cr 80	3.96 c ± 0.12	0.273 a ± 0.01	4.60 a ± 0.90	0.992 ± 0.03	3.26 ab ± 0.13
Cr 120	3.44 d ± 0.06	0.256 ab ± 0.02	4.93 a ± 0.92	1.127 ± 0.10	3.28 ab ± 0.15
Cr 160	3.25 e ± 0.10	0.236 b ± 0.02	5.08 a ± 0.80	1.168 ± 0.06	3.16 ab ± 0.70
LSD _{0.05}	0.179	0.028	1.458	0.261	1.158
% CV	2.49	5.55	16.47	13.66	16.41

* Aynı harflerle belirtilen ortalamalarda istatistiksel açıdan fark yoktur.

4.10. Artan Krom Ağır Metal Dozlarının Fe, Cu, Mn ve Zn Alımına Etkileri

Araştırmada artan krom ağır metal konsantrasyonlarında aspir bitkisinin Fe, Cu, Mn ve Zn içeriklerine ait varyans analizi sonuçları Çizelge 4.31.'de, ortalama değerler ve önemlilik grupları ise Çizelge 4.32.'de gösterilmiştir. Çizelge 4.31 incelendiğinde, aspir bitkisinde farklı Cr ağır metali konsantrasyonlarının Fe, Mn ve Zn içerikleri üzerine etkisinin istatistiksel olarak $p < 0.01$ düzeyinde önemli, Cu içeriği üzerine etkisinin ise istatistiksel olarak $p < 0.05$ düzeyinde önemli olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.31. Farklı konsantrasyonlarda Cr ağır metali uygulanan aspir bitkisinin Fe, Cu, Mn ve Zn içeriklerine bağlı varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri	
Konsantrasyonlar	4	Fe	8921.60	32.58**
		Cu	1.574	3.86*
		Mn	378.34	246.05**
		Zn	64.83	17.40**
Hata	10	Fe	273.75	
		Cu	0.40	
		Mn	1.53	
		Zn	3.72	
Genel	14			

*: $P < 0.05$ seviyesinde önemli ** : $P < 0.01$ seviyesinde önemlidir.

Çalışmada aspir bitkisinin Fe ve Zn içerikleri artan krom konsantrasyonlarına bağlı olarak kontrole göre artış gösterirken, Cu içeriğinde azalış, Mn içeriğinde ise önce artış sonra azalış gösterdiği belirlenmiştir (Çizelge 4.32). Çizelge 4.32 incelendiğinde en düşük Fe, Mn ve Zn içerikleri sırasıyla 281.87 mg/kg, 52.03 mg/kg ve 28.47 mg/kg ile kontrolden, Cu içeriği ise Cr 160 uygulamasından (8.57 mg/kg) elde edilirken, en yüksek Fe içerikleri Cr 80, 120 ve 160 uygulamalarından (sırasıyla 415.15, 409,46 ve 391.26 mg/kg), Cu içeriği kontrolden (10.45 mg/kg), Mn içeriği Cr80 uygulamasından (81.38 mg/kg), Zn içeriği ise Cr 160 konsantrasyonunda (40.57 mg/kg) belirlenmiştir.

Çizelge 4.32. Farklı konsantrasyonlarda krom ağır metali uygulanan aspir bitkisinin Fe, Cu, Mn ve Zn (mg/kg) içeriklerine ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*

Cr Konsantrasyonu (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)
Kontrol (Cr 0)	281.87 c ± 6.88	10.45 a ± 0.41	52.03 e ± 1.17	28.47 c ± 1.37
Cr 40	360.43 b ± 4.97	10.14 ab ± 0.05	64.30 b ± 1.00	33.68 b ± 0.29
Cr 80	415.16 a ± 4.00	9.63 ab ± 0.51	81.38 a ± 1.71	37.10 ab ± 1.82
Cr 120	409.46 a ± 7.38	9.44 ab ± 0.39	65.66 c ± 0.93	37.84 ab ± 0.52
Cr 160	391.26 a ± 5.26	8.57 b ± 1.20	57.97 e d ± 1.23	40.57 a ± 3.84
LSD _{0.05}	30.10	1.160	2.255	3.511
% CV	4.45	6.61	1.89	5.43

* Aynı harflerle belitilen ortalamalarda istatistiksel açıdan fark yoktur.

4.11. Artan Kurşun Ağır Metal Konsantrasyonlarının Bitki Büyümesi Üzerine Etkisi

4.11.1. Bitki Boyu

Aspir bitkisinin farklı konsantrasyonlardaki kurşun ağır metali uygulamalarından elde edilen bitki boyuna ait varyans analiz sonuçları Çizelge 4.33.'de, ortalama değerler ve önemlilik grupları ise Çizelge 4.34.'de verilmiştir. Çizelge 4.33. incelendiğinde artan konsantrasyonlardaki kurşun ağır metali uygulamalarında aspir bitkisinin bitki boyu değerleri arasındaki farklılıkların istatistiksel olarak önemli ($P<0.01$) bulunduğu görülmektedir.

Çizelge 4.33. Farklı konsantrasyonlarda Pb ağır metali uygulanan aspir bitkisinin bitki boyuna bağlı varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri
Konsantrasyonlar	4	134.36	129.35**
Hata	10	1.038	
Genel	14		

*: $P<0.05$ seviyesinde önemli ** : $P<0.01$ seviyesinde önemlidir.

Çizelge 4.34. Farklı konsantrasyonlarda Pb ağır metali uygulanan aspir bitkisinin bitki boyu (cm) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar ($n=3$) ve önemlilik grupları*

Pb Konsantrasyonları (mg/kg)	Bitki boyu (cm)
Kontrol (Pb 0)	45.7 a \pm 1.60
Pb 30	46.3 a \pm 0.23
Pb 60	40.2 b \pm 1.16
Pb 90	36.7 c \pm 0.55
Pb 120	30.2 d \pm 0.95
LSD $_{0.05}$	1.854
% CV	2.55

* Aynı harflerle belirtilen ortalamalarda istatistiksel açıdan fark yoktur.

Çalışmada en yüksek bitki boyu değerleri kontrol ve Pb 30 uygulamalarından elde edilirken (sırasıyla 45.7 ve 46.3 cm), en düşük bitki boyu ise en yüksek kurşun konsantrasyonunda (30.2 cm) belirlenmiştir (Çizelge 4.34). Araştırma sonuçları topraktaki artan kurşun ağır metal derişimine bağlı olarak Pb 60 uygulamasından

itibaren bitki boyunun azaldığını göstermektedir. Önemli bir çevre kirleticisi olan kurşunmutlak bitki besin elementi değildir ve eşik değerlerin üstündeki miktarlarda toksik etki göstermektedir. Konu ile ilgili yapılan çalışmalarda, artan dozlarda ağır metal uygulamalarında bitkilerde toksik maddelerin düşük konsantrasyonlarında yaşamsal fonksiyonlarını devam ettirme ve adapte olabilme özelliği olan hormesis etki gösterdiği ve ağır metal alımı devam ettikçe gövde uzamasının olumsuz olarak etkilendiği bildirilmiştir (Calabrese ve Blain, 2009). Kurşun bitkilerde klorofil miktarını azaltarak vejetatif büyüme ve gelişmeyi yavaşlatmaktadır (Sayed, 1999; Srivastava ve Bhagyawant, 2014). Araştırma bulguları artan kurşun dozlarının (0, 100, 200 ve 400 $\mu\text{mol/L}$) hintyağı bitkisinde gövde gelişimini ve yaprak alanını azalttığını bildiren Romeiro ve ark. (2006); ayçiçeği çeşitlerinde topraktaki Pb konsantrasyonundaki (0, 50, 100 ve 150 mg/kg) artışa bağlı olarak bitki boyunda azalma olduğunu bildiren Ullah ve ark. (2011); Pb stresi altında yetiştirilen kolza bitkisinde Pb konsantrasyonlarındaki (0, 30, 60 ve 90 mg/kg) artışın bitki boyunu azalttığını ve en düşük bitki boyunun en yüksek Pb konsantrasyonundan elde edildiğini bildiren Ashraf ve ark. (2011) ile uyumlu bulunmuştur.

4.11.2. Yaş ağırlık

Aspir bitkisinin farklı konsantrasyonlardaki kurşun ağır metali uygulamalarından elde edilen yaş ağırlığına bağlı varyans analiz sonuçları Çizelge 4.35.'de, ortalama değerler ve önemli olan gruplar ise Çizelge 4.36.'de gösterilmiştir. Çalışmada farklı konsantrasyonlarda Pb ağır metali uygulanan aspir bitkisinin yaş ağırlık değerleri arasındaki farklılıklar istatistiksel olarak önemli ($P < 0.01$) bulunmuştur (Çizelge 4.35).

Çizelge 4.35. Farklı konsantrasyonlarda Pb ağır metali uygulanan aspir bitkisinin yaş ağırlığına bağlı varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri
Konsantrasyonlar	4	113.03	114.81**
Hata	10	0.98	
Genel	14		

*: $P < 0.05$ seviyesinde önemli ** : $P < 0.01$ seviyesinde önemlidir.

Araştırmada kurşunun uygulanan en düşük konsantrasyonunun kontrole göre yaş ağırlıkta önemli bir değişiklik oluşturmadığı ancak uygulama konsantrasyonları arttıkça bitki yaş ağırlığının azaldığı belirlenmiştir. Çalışmada en yüksek bitki yaş ağırlığı kontrol ve ilk düşük kurşun dozu olan Pb 30 uygulamalarında (20.1 ve 19.6 g/bitki) belirlenirken, en düşük değerleri ise en yüksek kurşun dozu olan Pb 120 uygulamasında (6.6 g/bitki) elde edilmiştir (Çizelge 4.36). Araştırma bulguları artan Pb konsantrasyonları karşısında bitki yaş ağırlığının azaldığını ve düşük dozlarda olumlu etkisi, yüksek dozlarda ise olumsuz etkisi olduğunu bildiren Ashraf ve ark. (2011), Güler (2011) ve Ullah ve ark. (2011) ile uyumlu bulunmuştur.

Çizelge 4.36. Farklı konsantrasyonlarda Pb ağır metali uygulanan aspir bitkisinin yaş ağırlık (g) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*

Pb Konsantrasyonları (mg/kg)	Yaş Ağırlık (gr / bitki)
Kontrol (Pb 0)	20.1 a ± 1.10
Pb 30	19.6 a ± 1.27
Pb 60	11.5 b ± 1.15
Pb 90	9.0 c ± 0.67
Pb 120	6.6 d ± 0.57
LSD _{0.05}	1.805
% CV	7.42

* Aynı harflerle belirtilen ortalamalarda istatistiksel açıdan fark yoktur.

4.11.3. Kuru ağırlık

Çizelge 4.37. Farklı konsantrasyonlardaki Pb ağır metali uygulanan aspir bitkisinin kuru ağırlığına ait varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri
Konsantrasyonlar	4	8.35	30.23**
Hata	10	2.76	
Genel	14		

*: P<0.05 seviyesinde önemli ** : P<0.01 seviyesinde önemlidir.

Farklı konsantrasyonlardaki kurşun ağır metali uygulamalarında yetişen aspir bitkisinin kuru ağırlığına ait varyans analiz sonuçları Çizelge 4.37.'de, ortalama değerler ve önemlilik grupları ise Çizelge 4.38.'de gösterilmiştir. Araştırmada Pb

konsantrasyonlarının bitki kuru ağırlığı üzerine etkisi istatistiksel olarak önemli ($p<0.01$) bulunmuştur (Çizelge 4.37).

Çizelge 4.38. Farklı konsantrasyonlarda Pb ağır metali uygulanan aspir bitkisinin kuru ağırlık (g) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar ($n=3$) ve önemlilik grupları*

Pb Konsantrasyonları (mg/kg)	Kuru Ağırlık (gr / bitki)
Kontrol (Pb 0)	5.2 a \pm 0.96
Pb 30	5.0 a \pm 0.02
Pb 60	3.2 b \pm 0.67
Pb 90	2.4 b \pm 0.02
Pb 120	1.3 c \pm 0.13
LSD _{0.05}	0.956
% CV	15.29

* Aynı harflerle belirtilen ortalamalarda istatistiksel açıdan fark yoktur.

Araştırmada en yüksek bitki kuru ağırlığı kontrol ve en düşük kurşun dozu olan Pb 30 uygulamalarından (5.2 ve 5.0 g/bitki) elde edilirken, en düşük değeri ise en yüksek kurşun dozu olan Pb 120 uygulamasında (1.3 g/bitki) belirlenmiştir (Çizelge 4.38). Konu ile ilgili yapılan benzer bir çalışmada, kurşun ve kadmiyumun mısır ve ayçiçeği bitkilerinde kuru madde üzerine etkisinin düşük dozlarda olumlu, yüksek dozlarda ise azalmaya neden olduğu belirlenmiştir (Güler, 2011). Romeiro ve ark., (2006) ise farklı kurşun dozlarında (0, 100, 200 ve 400 $\mu\text{mol/L}$) yetiştirdiği hintyağı bitkisinde gövde kuru ağırlığının en yüksek değerinin kontrolden elde edildiğini, en düşük değerlerinin ise 200 ve 400 $\mu\text{mol/L}$ uygulamalarında belirlendiğini bildirmişlerdir. Sayed (1999), kurşun stresi altında yetiştirdiği aspir bitkisinde Pb konsantrasyonlarındaki (0, 1, 10, 50 ve 100 mg/L) artışın bitki kuru ağırlığı azalttığını ve en yüksek değerinin kontrolden elde edildiğini bildirmiştir.

4.12. Artan Kurşun Ağır Metal Konsantrasyonlarının Aspir Bitkisinin Pb İçeriği Üzerine Etkisi

Aspir bitkisinin farklı konsantrasyonlardaki kurşun ağır metali uygulamalarından elde edilen Pb içeriğine ait varyans analiz sonuçları Çizelge 4.39.'da, ortalama değerler ve önemlilik grupları ise Çizelge 4.40.'da gösterilmiştir. Araştırmada kurşun

konsantrasyonlarının aspir bitkisinin Pb içeriği üzerine etkisi istatistiksel olarak önemli ($p<0.01$) bulunmuştur (Çizelge 4.39).

Çizelge 4.39. Farklı konsantrasyonlarda kurşun ağır metali uygulanan aspir bitkisinin Pb içeriğine bağlı varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri
Konsantrasyonlar	4	107440.89	589.83**
Hata	10	182.15	
Genel	14		

*: $P<0.05$ seviyesinde önemli ** : $P<0.01$ seviyesinde önemlidir.

Araştırmada aspir bitkisinin en yüksek toplam Pb içeriği (460.4 μg /bitki) çalışmada kullanılan en yüksek konsantrasyon olan Pb 120 uygulamasından elde edilirken, en düşük toplam Pb içeriği ise 11.4 μg /bitki olarak kontrol bitkisinde belirlenmiştir (Çizelge 4.40). Aspir bitkisinin toprak üstü aksamın topraktaki artan Pb konsantrasyonları karşısında daha fazla Pb ağır metalini biriktirdiği tespit edilmiştir. Araştırma sonuçlarını destekler nitelikte, bitkilerin yetiştirme ortamında kullanılan Pb konsantrasyonlarına göre kök ve yeşil aksamında daha yüksek derişimlerde Pb biriktirdiğini ayçiçeği çeşitlerinde Ullah ve ark. (2011), kanolada Ashraf ve ark., (2011), hintyağında Romeiro ve ark. (2006), mısır ve ayçiçeğinde ise Güler (2011) bildirmiştir.

Çizelge 4.40. Farklı konsantrasyonlarda kurşun ağır metali uygulanan aspir bitkisinin Pb içeriği (μg /bitki) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar ($n=3$) ve önemlilik grupları*

Pb Konsantrasyonları (mg/kg)	Pb içeriği (μg /bitki)
Kontrol (Pb 0)	11.4 e \pm 2.10
Pb 30	55.3 d \pm 1.10
Pb 60	123.7 c \pm 16.45
Pb 90	315.5 b \pm 15.05
Pb 120	460.4 a \pm 20.20
LSD $_{0.05}$	24.55
% CV	6.98

* Aynı harflerle belirtilen ortalamalarda istatistiksel açıdan fark yoktur.

4.13. Artan Kurşun Konsantrasyonlarında Aspir Bitkisinin Fitoekstraksiyon Kapasitesi

4.13.1. Tolerans indeksi

Farklı konsantrasyonlardaki kurşun ağır metaline maruz kalan aspir bitkisinin tolerans indeksine bağlı olan varyans analiz sonuçları Çizelge 4.41.'de, ortalama değerler ve önemli olan gruplar ise Çizelge 4.42.'de belirtilmiştir. Farklı konsantrasyonlarda metal uygulanan bitki büyüme parametreleri bitki boyu, bitki yaş ve kuru ağırlığı olarak hesaplanmıştır. Araştırmada farklı kurşun konsantrasyonlarının bitki boyu, bitki yaş ve kuru ağırlığı tolerans indeksleri üzerine olan etkisi istatistiksel olarak önemli ($p<0.01$) bulunmuştur (Çizelge 4.41).

Çizelge 4.41. Farklı konsantrasyonlarda Pb ağır metali uygulanan aspir bitkisinin bitki boyu, yaş ve kuru ağırlığı tolerans indekslerine bağlı varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler	Ortalaması	F Değeri
Konsantrasyonlar	3	Bitki boyu	653.89	11.44**
		Yaş ağırlık	2337.95	154.53**
		Kuru ağırlık	2524.88	17.24**
Hata	8	Bitki boyu	3.32	
		Yaş ağırlık	2.77	
		Kuru ağırlık	19.78	
Genel	11			

** $P<0.01$ seviyesinde önemlidir.

Çizelge 4.42. Farklı konsantrasyonlarda Pb ağır metali uygulanan aspir bitkisinin bitki boyu, yaş ve kuru ağırlık tolerans indeksi (%) sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar ($n=3$) ve önemlilik grupları*

Pb Konsantrasyonları (mg/kg)	Tolerans indeksi (%)		
	T _{İBB}	T _{İYAŞ}	T _{İKURU}
Pb 30	101.4 a ± 3.17	97.3 a ± 1.01	95.0 a ± 0.35
Pb 60	87.8 b ± 0.63	57.3 b ± 2.73	57.8 b ± 0.86
Pb 90	80.3 c ± 1.63	45.0 c ± 1.00	47.5 c ± 8.55
Pb 120	66.0 d ± 0.32	33.0 d ± 1.27	25.6 d ± 2.27
LSD _{0.05}	3.43	3.14	8.37
% CV	2.17	2.86	7.87

* Aynı harflerle belirtilen ortalamalarda istatistiksel açıdan fark yoktur.

Çalışmada artan kurşun konsantrasyonlarına maruz bırakılarak yetiştirilen aspir bitkisinde bitki boyu, yaş ve kuru ağırlık için en yüksek T_{IBB} değerlerinin kurşun ağır metalinin en düşük uygulama konsantrasyonu olan Pb 30 uygulamasından (sırasıyla %101.4, 97.3 ve 95.0) elde edilirken, en düşük tolerans indeksi değerleri ise en yüksek konsantrasyon olan Pb 120 uygulamasında (sırasıyla %66.0, 33.0 ve 25.6) belirlenmiştir (Çizelge 4.26). Araştırmada genel olarak artan kurşun dozları karşısında incelenen tüm parametrelerde, ağır metal uygulanan bitki büyüme parametrelerinin (bitki boyu, bitki yaş ve kuru ağırlığı) kontrol bitki büyüme parametrelerine oranından hesaplanan tolerans indekslerinin azaldığı tespit edilmiştir. Araştırma bulguları Güler (2011) ile uyumlu bulunmuştur.

4.13.2. Biyokonsantrasyon faktörü

Aspir bitkisinin farklı konsantrasyonlardaki kurşun ağır metali uygulamalarından elde edilen biyokonsantrasyon faktörüne (BKF) bağlı varyans analizi sonuçları Çizelge 4.43.'de, ortalama değerler ve önemli olan gruplar ise Çizelge 4.44.'de gösterilmiştir. Araştırmada aspir bitkisinde farklı Pb ağır metali konsantrasyonlarının biyokonsantrasyon faktörü üzerine etkisi istatistiksel olarak önemli ($p < 0.01$) bulunmuştur (Çizelge 4.43).

Çizelge 4.43. Farklı konsantrasyonlardaki Pb ağır metali uygulanan aspir bitkisinin biyokonsantrasyon faktörüne bağlı varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri
Konsantrasyonlar	3	3.03	91.00**
Hata	8	0.03	
Genel	11		

*: $P < 0.05$ seviyesinde önemli ** : $P < 0.01$ seviyesinde önemlidir.

Araştırmada en düşük BKF değeri Pb 30 ve Pb 60 uygulamalarından 1.84 ve 2.06 olarak elde edilirken, en yüksek değerleri ise Pb 90 ve Pb 120 uygulamalarında (sırasıyla 3.50 ve 3.83) tespit edilmiştir (Çizelge 4.44). Araştırma sonuçları artan kurşun konsantrasyonları karşısında biyokonsantrasyon faktörü değerinin arttığını göstermektedir. Nitekim BKF değerlerinin uygulanan bütün konsantrasyonlarda 1'in

üzerinde olması aspir bitkisinin Pb akümülyasyonunda yüksek derecede etkili olduğu anlamına gelmektedir.

Çizelge 4.44. Farklı konsantrasyonlarda Pb ağır metali uygulanan aspir bitkisinin biyokonsantrasyon faktörü sonuçlarına ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları

Pb Konsantrasyonları (mg/kg)	Biyokonsantrasyon Faktörü
Pb 30	1.84 b ± 0.04
Pb 60	2.06 b ± 0.27
Pb 90	3.50 a ± 0.16
Pb 120	3.83 a ± 0.17
LSD _{0.05}	0.343
% CV	6.48

* Aynı harflerle belirtilen ortalamalarda istatistiksel açıdan fark yoktur.

4.14. Artan Kurşun Ağır Metal Dozlarının N, P, K, Mg ve Ca Alımına Etkileri

Araştırmada artan kurşun ağır metal dozlarında aspir bitkisinin N, P, K, Mg ve Ca içeriklerine bağlı varyans analizi sonuçları Çizelge 4.45.'te, ortalama değerler ve önemlilik grupları ise Çizelge 4.46.'da verilmiştir. Çizelge 4.45 incelendiğinde, farklı Pb ağır metali konsantrasyonlarının aspir bitkisinin N, P, K, Mg ve Ca içerikleri üzerine etkisinin istatistiksel olarak $p < 0.01$ düzeyinde önemli olduğu görülmektedir. Araştırmada aspir bitkisinin artan kurşun konsantrasyonları karşısında N (%), P (%), K (%), Mg (%) ve Ca (%) içerikleri kontrole göre değerlendirildiğinde; bitkinin genel olarak N ve P içeriğinin azaldığı, K, Mg ve Ca içeriklerinin ise arttığı belirlenmiştir (Çizelge 4.46).

Araştırmada aspir bitkisinin farklı kurşun konsantrasyonlarında en düşük N ve P içerikleri sırasıyla %3.54 ve %0.190 ile Pb 120 uygulamasında, K, Mg ve Ca içerikleri ise kontrolden (sırasıyla %2.53, 0.846 ve 1.85) elde edilirken, en yüksek N içeriği kontrol ve Pb 30 uygulamalarından (sırasıyla %4.75 ve 4.69), P içeriği kontrolden (%0.280), K içeriği Pb 120 uygulamasından (%4.40), Mg ve Ca içeriği ise Pb 30 uygulamasında (%1.183 ve 4.51) belirlenmiştir (Çizelge 4.46). Kurşun ağır metalinin kökler tarafından tutularak kok gelişimini azaltması nedeniyle, bitkilerin kation ve anyon alımını azalttığı, dolayısıyla besin maddelerini engellemekte olduğu bilinmektedir (Sharma and Dubey, 2005). Nitekim araştırmada da aspir bitkisinin N, P,

Mg ve Ca içeriklerinin Pb uygulama dozundaki artışa bağlı olarak azalma göstermesi bu durumu destekler niteliktedir. Araştırma bulguları Ashraf ve ark. (2011) ile uyumlu bulunmuştur.

Çizelge 4.45. Farklı konsantrasyonlarda Pb ağır metali uygulanan aspir bitkisinin N, P, K, Mg ve Ca içeriklerine bağlı varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri	
Konsantrasyonlar	4	N	0.793	86.08**
		P	0.003	90.83**
		K	1.43	12.27**
		Mg	0.054	11.50**
		Ca	2.96	8.50**
Hata	10	N	0.009	
		P	0.014	
		K	0.116	
		Mg	0.004	
Ca	0.348			
Genel	14			

*: P<0.05 seviyesinde önemli ** : P<0.01 seviyesinde önemlidir.

Çizelge 4.46. Farklı konsantrasyonlarda kurşun ağır metali uygulanan aspir bitkisinin N (%), P (%), K (%), Mg (%) ve Ca (%) içeriklerine ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*

Pb Konsantrasyonu (mg/kg)	N (%)	P (%)	K (%)	Mg (%)	Ca (%)
Kontrol (Pb 0)	4.75 a ± 0.10	0.280 a ± 0.01	2.53 c ± 0.47	0.846 c ± 0.06	1.85 c ± 0.11
Pb 30	4.69 a ± 0.14	0.266 b ± 0.006	3.20 b ± 0.12	1.183 a ± 0.10	4.51 a ± 0.50
Pb 60	4.10 b ± 0.02	0.247 c ± 0.006	3.51 b ± 0.06	1.021 b ± 0.05	3.80 ab ± 0.31
Pb 90	3.92 c ± 0.08	0.233 d ± 0.007	3.78 ab ± 0.21	0.988 bc ± 0.07	3.41 ab ± 0.90
Pb 120	3.54 d ± 0.08	0.190 e ± 0.01	4.40 a ± 0.54	0.872 bc ± 0.04	2.94 b ± 0.75
LSD _{0.05}	0.174	0.011	0.622	0.125	1.074
% CV	2.28	2.60	9.80	6.99	17.89

* Aynı harflerle belirtilen ortalamalarda istatistiksel açıdan fark yoktur.

4.15. Artan Kurşun Ağır Metal Dozlarının Fe, Cu, Mn ve Zn Alımına Etkileri

Araştırmada artan kurşun ağır metal konsantrasyonlarında aspir bitkisinin Fe, Cu, Mn ve Zn içeriklerine bağlı varyans analizi sonuçları Çizelge 4.47.'de, ortalama değerler ve önemli olan gruplar ise Çizelge 4.48.'de gösterilmiştir. Çizelge 4.47 incelendiğinde, farklı Pb ağır metali konsantrasyonlarının aspir bitkisinin Fe, Mn ve Zn içerikleri üzerine etkisinin istatistiksel olarak $p < 0.01$ düzeyinde önemli olduğu, Cu içeriği üzerine olan etkisinin ise önemli bulunmadığı görülmektedir.

Çizelge 4.47. Farklı konsantrasyonlarda Pb ağır metali uygulanan aspir bitkisinin Fe, Cu, Mn ve Zn içeriklerine bağlı varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri	
Konsantrasyonlar	4	Fe	29365.30	551.31**
		Cu	1.73	1.60
		Mn	496.21	54.30**
		Zn	44.74	17.71**
Hata	10	Fe	53.24	
		Cu	1.08	
		Mn	9.13	
		Zn	2.52	
Genel	14			

*: $P < 0.05$ seviyesinde önemli ** : $P < 0.01$ seviyesinde önemlidir.

Çalışmada aspir bitkisinin artan kurşun konsantrasyonlarına bağlı olarak Fe içeriği artış gösterirken, Cu içeriği etkilenmemiş, Mn ve Zn içeriklerinde ise önce artış sonra azalış gösterdiği belirlenmiştir (Çizelge 4.48). Araştırmada aspir bitkisinin Cu içeriğinin 9.09-11.13 mg/kg arasında değiştiği; en düşük Fe, Mn ve Zn içeriklerinin sırasıyla 281.87 mg/kg, 52.03 mg/kg ve 28.47 mg/kg ile kontroldenelde edilirken, en yüksek Fe içeriğinin 521.36 mg/kg ile Pb 120 uygulamasında, Mn içeriğinin Pb 60 uygulamasında (76.89 mg/kg) ve Zn içeriğinin ise 38.65 mg/kg ile Pb 30 uygulamasında belirlenmiştir (Çizelge 4.48).

Çizelge 4.48. Farklı konsantrasyonlarda kurşun ağır metali uygulanan aspir bitkisinin Fe, Cu, Mn ve Zn (mg/kg) içeriklerine ilişkin ortalama değerler, standart sapmalar (n=3) ve önemlilik grupları*

PbKonsantrasyonu (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)
Kontrol (Pb 0)	281.87 e ± 6.88	10.45 ± 0.41	52.03 c ± 1.17	28.47 d ± 1.37
Pb 30	378.03 d ± 3.51	11.13 ± 0.24	65.05 b ± 4.37	38.65 a ± 0.50
Pb 60	453.00 c ± 1.47	9.09 ± 0.83	76.89 a ± 2.50	34.34 b ± 2.84
Pb 90	505.20 b ± 4.86	10.69 ± 1.98	54.20 c ± 3.61	32.95 bc ± 2.03
Pb 120	521.36 a ± 3.21	10.38 ± 0.76	43.66 d ± 2.43	30.68 cd ± 0.80
LSD _{0.05}	13.27	1.892	5.499	2.890
% CV	1.70	10.10	5.17	4.81

* Aynı harflerle belirtilen ortalamalarda istatistiksel açıdan fark yoktur.

4.16. Aspir Bitkisinin Fitoekstraksiyon Kapasitesini Belirlemeye Yönelik Cd, Cr ve Pb Ağır Metali Uygulama Ortalamalarının Karşılaştırılması

Araştırmada kadmiyum, krom ve kurşun ağır metal uygulamalarının aspir bitkisinin bitki büyümesi, fitoekstraksiyon kapasitesi ve besin maddeleri alımı yönünden ortalamalarının karşılaştırılması amacıyla hazırlanan Çizelge 4.49 aşağıda gösterilmiştir.

Çizelge 4.49. Aspir bitkisinin bitki büyümesi, fitoekstraksiyon kapasitesi ve besin maddeleri alımı yönünden kadmiyum, krom ve kurşun uygulama ortalamalarının karşılaştırılması*

Özellikler	Cd	Cr	Pb	CV (%)
Bitki boyu (cm)	38.5 c	42.9 a	39.8 b	3.33 ^{Önemli}
Yaş ağırlık (g/bitki)	12.9 b	14.0 a	13.4 ab	6.73 ^{Önemli}
Kuru ağırlık (g/bitki)	3.4	3.9	3.4	14.89 ^{ÖD}
Toplam ağır metal içeriği (µg /bitki)	111.9 c	231.7 a	193.3 b	7.70 ^{Önemli}
Bitki boyu tolerans indeksi (%)	81.0 b	92.2 a	83.9 b	5.13 ^{Önemli}
Yaş ağırlık tolerans indeksi (%)	54.4 c	61.0 b	77.5 a	6.24 ^{Önemli}
Kuru ağırlık tolerans indeksi (%)	56.9 b	69.6 a	56.5 b	18.22 ^{Önemli}
BKF	16.85 a	2.52 b	2.81 b	16.18 ^{Önemli}
N içeriği (%)	4.14 a	3.97 b	4.20 a	2.39 ^{Önemli}
P içeriği (%)	0.257 b	0.267 a	0.243 c	4.39 ^{Önemli}
K içeriği (%)	3.90 ab	4.12 a	3.49 b	15.02 ^{Önemli}
Mg içeriği (%)	0.973	1.053	0.982	10.06 ^{ÖD}
Ca içeriği (%)	3.08	3.07	3.30	16.31 ^{ÖD}
Fe içeriği (mg/kg)	355.70 c	371.64 b	427.89 a	3.70 ^{Önemli}
Cu içeriği (mg/kg)	13.57a	9.65 b	10.35 b	9.94 ^{Önemli}
Mn içeriği (mg/kg)	58.71 b	65.29 a	58.36 b	3.73 ^{Önemli}
Zn içeriği (mg/kg)	40.00 a	35.53 b	35.02 c	6.07 ^{Önemli}

* Aynı harflerle belirtilen ortalamalarda istatistiksel açıdan fark yoktur. ^{Önemli}: İstatistiksel olarak p<0.01 seviyesinde önemlidir. ^{ÖD}: Önemli Değil

Elde edilen bulgulara göre Cd, Cr ve Pb ağır metalleri aspir bitkisinin gövde gelişimi ve besin elementi içeriklerini önemli düzeyde etkilemiştir. Her üç ağır metalinde bitkinin gelişmesi ve büyümesinde önemli azalışlara neden olduğu, ayrıca aspir bitkisinin araştırma konusu olan Cd, Cr ve Pb ağır metallerini toprak üstü aksamda akümüle etme kapasitelerinin de farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Araştırmada genel olarak kadmiyumun aspir bitkisinin büyümesini en çok azaltan ağır metal olduğu belirlenmiş, en iyi bitki gelişimi ve ağır metal toleransı ise Cr ağır metalinde tespit edilmiştir. Aynı zamanda aspir bitkisinde en yüksek toplam ağır metal içeriği de yine Cr

uygulamasından elde edilmiştir. Bitkilerin fitoekstraksiyon kapasitesini belirlemek için kullanılan BKF değerleri bakımından değerlendirildiğinde ise tüm ağır metal uygulamalarında l'in üzerinde olması aspir bitkisinin başta Cd olmak üzere Cr ve Pb akümülyasyonunda yüksek derecede etkili olduğunu göstermiştir. Çalışmada bitkinin mineral içeriklerinden Mg ve Ca hariç N, P, K, Fe, Cu, Mn ve Zn içerikleri üzerine ağır metal uygulamalarının etkileri önemli olup Cd, Cr ve Pb'a göre değişkenlik göstermiştir. Araştırmada uygulamalara bağlı olarak bitki kuru ağırlık miktarlarındaki değişim ile Cd, Cr ve Pb birikimleri bir arada değerlendirildiğinde; her üç ağır metal uygulamasında da gövde kuru ağırlığı arasında önemli bir fark olmamakla birlikte bitkideki Cr birikiminin diğer metallere çok daha yüksek olduğu ve aspir bitkisinin Cr stresine daha dayanıklı, Cd stresine ise daha hassas olduğu görülmüştür. Bununla birlikte çalışmada kullanılan aspir bitkisinin hem gövde toplam Cd içeriği hem de BKF değerlerinin bir Cd-akümülyatörü olabilmesi için kritik seviyeyi fazlasıyla aştığından potansiyel bir Cd akümülyatör adayı olabileceği belirlenmiştir. January ve ark. (2008), hidroponik ortamda ayçiçeği bitkisinde Cd, Cr, Ni, As ve Fe ağır metallerinin 3'lü, 4'lü ve 5'li uygulamalarının fitoremediasyon kapasitesini araştırdığı çalışmalarında, ayçiçeğinin metal alımı tercihinin Cd=Cr>Ni, Cr>Cd>Ni>As ve Fe>As>Cd>Ni>Cr olduğunu belirlemiş ve ayçiçeğinin 3'lü metal varlığında sadece Ni hiperakümülyatörü olduğunu bildirmişlerdir. Benzer şekilde Cr, Cu, Pb ve Zn ağır metallerinin fitoekstraksiyon kapasitesini belirlemek amacıyla kolza da sera ve tarla koşullarında yapılan çalışmada, kolza bitkisinin tarlaya kıyasla sera koşullarında daha fazla miktarlarda ağır metal akümülye ettiği, metal akümülyasyon sıralamasının Cr>Zn>Cu>Pb şeklinde elde edildiği ve kolzanın kontamine topraklardan özellikle Cr fitoekstraksiyonunda kullanılabilmesi bildirilmiştir (Brunetti ve ark., 2011). Gopal ve Khurana (2011) ise Co, Ni, Cd, Cr ve Pb ağır metallerinin ayçiçeği üzerine olan toksik etkilerini ve doku konsantrasyonlarını araştırdıkları çalışmalarında, ayçiçeğinde görülen en yüksek toksik etkilerin Cd>Cr>Ni>Co>Pb sıralamasıyla olduğunu belirlemiştir.



5. SONUÇ

Doğal kaynaklar veya kirlenme yoluyla toprak-bitki ekosistemine giren ağır metallere kadmiyum, krom ve kurşunun aspirde bitki büyümesi, fitoekstraksiyon kapasitesi ve besin elementi alımına etkilerinin belirlenmesinin amaçlandığı bu çalışmada aspirin aşırı düzeyde Cd, Cr ve Pb ile kirlenmiş bir toprakta büyüme ve gelişmesine devam edebildiği ve bu ağır metalleri bünyesinde absorbe edebildiği belirlenmiştir. Araştırmada 20 mg/kg Cd, 160 mg/kg Cr ve 120 mg/kg Pb ağır metallerin çalışmada kullanılan en yüksek dozları olup Remzibey-05 aspir çeşidinde bu dozlar karşısında bitki ölümlerinin olmadığı ancak düşük konsantrasyonlu uygulamalara göre büyüme geriliği gösterdiği tespit edilmiştir. Araştırma konusu olan Cd, Cr ve Pb ağır metallerini gövdede akümüle etme kapasitelerinin de farklılık gösterdiği ve her üç ağır metal toksisitesinin benzer zararlara yol açmasına rağmen bu zararların dereceleri arasında önemli fark olduğu belirlenmiştir. Nitekim bitkide düşük seviyelerdeki Cr ve Pb uygulamalarında büyümenin bir göstergesi olan bitki boyu ve ağırlık değerlerinin arttığı, yüksek seviyelerdeki uygulamalarda ise kontrole göre azaldığı dikkat çekmektedir. Yetiştirme ortamına uygulanan farklı ağır metal konsantrasyonlarında aspir bitkisinin gövdesinde artan konsantrasyonlara bağlı olarak önemli oranda Cd, Cr ve Pb ağır metallerini biriktirdiği belirlenmiştir. Her üç ağır metal karşısında da aspirin BKF değeri 1'in üzerinde bulunmuştur. Araştırmada artan konsantrasyonlara bağlı olarak bitki tolerans indeksi değerleri, kuru ağırlık miktarlarındaki değişim ve Cd, Cr ve Pb birikimleri bir arada değerlendirildiğinde, bitkideki Cr ve Pb birikimi ile bitki büyüme ve gelişmesinin Cd'a göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen verilere dayanılarak aspir bitkisinin Cr ve Pb stresine daha dayanıklı, Cd stresine ise daha hassas olduğu söylenebilir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar ışığında Remzibey-05 aspir çeşidinin hem gövde toplam ağır metal içeriği hem de BKF değerlerinin akümülatör bir bitki olabilmesi için kritik seviyeyi fazlasıyla aştığından Cd, Cr ve Pb ile bulaşık toprakların temizlenmesinde potansiyel bir Cd, Cr ve Pb akümülatör adayı olabileceği kanısına varılmıştır.



KAYNAKLAR

- AOAC, 1990. *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. In: Helrich, K (Ed), Washington, DC.
- Al Chami, Z., Amer, N., Al Bitar, L., Cavoski, I., 2015. Potential use of Sorghum bicolor and Carthamus tinctorius in phytoremediation of nickel, lead and zinc. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **12**(12): 3957-3970.
- Ashraf, M.Y., Azhar, N., Ashraf, M., Hussain, M., Arshad, M., 2011. Influence of Lead on Growth and Nutrient Accumulation in Canola (Brassica napus L.) cultivars. *J. Environ. Biol.* **32**: 659-666
- Baker, A.J.M., Brooks, R., 1989. Terrestrial higher plants which hyper accumulate metallic elements: A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*, **1**(2): 81-126.
- Başcı N., 2009. *Cr (VI) İyonunun Süs Bitkileri Kullanılarak Toprakta Gideriminin Araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi, basılmamış). Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Bingöl, A.M., 2008. *Bor ile Kirlenmiş Zeminlerin Yeşil Islah (phytoremediation) Yöntemi ile Temizlenmesi* (Doktora Tezi, basılmamış). Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Bouyoucos, G.J., 1951. A recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soils. *Agronomy Journal*, **43**(9): 434-438.
- Brunetti G, Farrag K, Rovira PS, Nigro F, Senesi, N., 2011. Greenhouse and field studies on Cr, Cu, Pb and Zn phytoextraction by Brassica napus from contaminated soils in the Apulia region, Southern Italy. *Geoderma*, **160**: 517-523.
- Calabrese, E.J., Blain, R.B., 2009. Hormesis and plant biology. *Environ. Poll.*, **157**: 42-48.
- Chaney, R.L., Malik, M., Lim, Y.M., Brown, S.L., Brewer, E.P., Angle, J.S., Baker, A.J.M., 1997. Phytoremediation of soils metals. *Curr. Opin. Biotechnol.* **5**: 279-284.
- Chen, H.M., Zheng, C.R., Tu, C., Shen, Z.G., 2000. Chemical methods and phytoremediation of soil contaminated with heavy metals. *Chemosphere*, **41**: 229-234.
- Chen, Y.X., He Y.F., Luo Y.M., Lin Q., Wong M.H., 2003. Physiological mechanism of plant roots exposed to cadmium. *Chemosphere*, **50**: 789-793.
- Chitra, K., Sharavanan, S., Vijayaragavan, M., 2011. Tobacco, corn and wheat for phytoremediation of cadmium polluted soil. *Resent Research in Science Technology*, **3** (2): 148-151.
- Chumbley, C.G., R.J. Unwin, 1982. Cadmium and lead content of vegetable crops grown on land with a history of sewage sludge application. *Environ. Pollut. Series B, Chem. Phys.*, **4**: 231-237
- Corleto, A., Alba, E., Polignano, G.B., Vonghia, G., 1997. Safflower: A multi purpose species with unexploited potential and world adaptability. There search in Italy. *IVth International Safflower Conference*, 2-7 June, Bari (Italy). 23-31.

- Cui, S., Zhou, Q., Chao, L., 2007. Potential hyperaccumulation of Pb, Zn, Cu and Cd in endurant plants distributed in an old smeltery, northeast China. *Environmental Geology*, **51**: 1043-1048.
- Çiftçi, A., 2016. *Çoklu Metal (Kadmiyum, Kurşun ve Çinko) İle Kirlenmiş Bir Toprağın Arıtımında Yabani Hint Yağı (Ricinus communis) ve Aspır (Carthamus tinctorius) Bitkilerinin Fitoremediasyon Kapasitesinin Araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi, basılmamış). Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Mersin.
- Çıkkılı, Y., Samet, H., Dursun, S., 2016. Cadmium Toxicity and its Effects on Growth and Metal Nutrient Ion Accumulation in *Solanaceae* Plants. *Journal of Agricultural Sciences*, **22**: 576-587
- Dağhan, H., Köleli, N., Uygur, V., Arslan, M., Önder, D., Göksun, V., Ağca, N., 2012. Kadmiyum ile kirlenmiş toprakların fitoekstraksiyonla arıtımında transgenik tütün bitkisinin kullanımının araştırılması. *Toprak ve Su Dergisi*, **1(1)**: 1-6.
- Dajue, L., Mündel, H.H., 1996. *Safflower (Carthamus tinctorius L.)*. International Plant Genetic Resources Institute, 83. Rome, Italy.
- Davies, Jr. F. T., Puryear, J. D., Newton, R. J., Egilla, J. N., Saraiva Grossi, J. A., 2002. Mycorrhizal Fungi Increase Chromium Uptake By Sunflower Plants: Influence On Tissue Mineral Concentration, Growth And Gas Exchange. *J. Plant Nutr.*, **25 (11)**: 2389- 2407.
- Ebbs, S.D., Kochian, L.V., 1998. Phytoextraction of zinc by oat (*Avenasativa*), barley (*Hordeumvulgere*), and indian mustard (*Brassicab juncea*). *Environmental Science and Technology*, **32**: 802-806.
- Ekin, Z., 2005. Resurgence of Safflower (*Carthamus tinctorius L.*) Utilization: A Global View. *Journal of Agronomy*, **4 (2)**: 83-87.
- EPA, 2000. Environmental Protection Agency, "Introduction to Phytoremediation. Epa/600/R-99/107, Cincinnati, Ohio, U.S.A, p 72. www.clu-in.org
- Garbisu C., Alkorta, I., 2001. Phytoextraction: A Cost-effectiveplant-based technology for the removal of metals from the environment. *Bioresource Technology*, **77**: 229-236.
- Gill, R.A., Zang, L., Ali, B., Farooq, M.A., Cui, P., Yang, S., Ali, S., Zhou, 2015. Chromium-induced physio-chemical and ultrastructural changes in four cultivars of Brassica napus L. *Chemosphere*, **120**: 154-164
- Gopal, R., Khurana, N., 2011. Effect of heavy metal pollutants on sunflower. *African J. of Plant Sci.*, **5 (9)**: 531-536.
- Gouia, H., Ghorbal, M.H., Meyer, C., 2000. Effects of cadmium on activity of nitrate reductase and on other enzymes of the nitrate assimilation pathway in bean. *Plant Physiol. Biochem.* **38**: 629-638.
- Grispen, V.M.J., Nelissen, H.J.M., Verkleij, J.A.C., 2006. Phytoextraction with Brassica napus L.: a tool for sustainable management of heavy metal contaminated soils. *Environmental Pollution*, **144 (1)**: 77-83.
- Güler D., 2011. *Besin Çözeltisine Artan Seviyelerde Uygulanan Kadmiyum Ve Kurşunun Bazı Mısır Ve Ayçiçeği Genotiplerinin Gelişimi Ve Mineral İçeriği Üzerine Etkisinin Belirlenmesi* (Doktora tezi, Basılmamış). Atatürk Ün., Fen Bil. Enst. Toprak Bilimi ve Besleme Anabilim Dalı, Erzurum.
- Hocking, P.J., McLaughlin, M.J., 2000. Genotypic variation in cadmium accumulation by seed of line seed, and comparison with seeds of other crop species. *Australian Journal of Agricultural Research*, **51**: 427-433.

- Houshmandfar A, Moraghebi F., 2011. Effect of mixed cadmium, copper, nickel and zinc on seed germination and seedling growth of safflower. *Afri. J. Agric. Res.*, **6** (5): 1182-1187.
- Huang, J.W., Cunningham, S.D., 1996. Lead phytoextraction species variation in lead uptake and translocation. *New Phytology*, **134**: 75-84.
- Jhee, E. M., Dandridge, K. L., Christy, A. M., Jr., Pollard, J., 1999. Selective Herbivory on Low-Zinc Phenotypes of the Hyperaccumulator *Thlaspi Caerulescens* Brassicaceae. *Chemoecology*, **9**: 93-95.
- Kacar, B., İnal. A., 2008. *Bitki Analizleri*. Nobel Yayın No:1241, Fen Bilimleri:63.
- Kacar, B., Katkat, A.V., Öztürk, Ş., 2010. *Bitki Fizyolojisi*. Nobel Yayın No:848, Fen Bilimleri:28, Nobel Bilim ve Araştırma Merkezi Yayın No:46.
- Karakaş, Ö., 2013. *Bazı Ağır Metallerle Kirlenmiş Toprakların Kanola Bitkisi Kullanılarak Bitkisel Arıtım (Fitoremediasyon) Tekniği ile Islahı* (Yüksek Lisans Tezi, basılmamış). NKÜ Fen Bil. Enst. Toprak Bil. ve Bitki Besleme Anabilim Dalı, Tekirdağ. 61s.
- Karenlampi S., Schat H., Vangronsveld, J., Verkleij J.A.C., VanderLelie D., Mergeay M., Tervahauta A.I., 2000. Genetic engineering in the improvement of plants for phytoremediation of metal polluted soils. *Environmental Pollution* **107**: 225-231.
- Li, S., Zhang, G., Gao, W., Zhao, X., Deng, C., Lu, L., 2015. Plant growth, development and change in GSH level in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) exposed to copper and lead. *Arch Biol Sci Belgrade*, **67** (2): 385-396.
- Madejon, P., Murillo, J.M., Maranon, T., Cabrera, F., Soriano, M. A., 2003. Trace Element and Nutrient Accumulation in Sunflower Plants Two Years After the Aznalcollar Mine Spill. *The Science of the Total Environment*, **307**: 239-257.
- Marques, A.P.G.C., Rangel, A.O.S.S., Castro, P.M.L., 2009. Remediation of heavy metal contaminated soils: Phytoremediation as a potentially promising clean-up technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **39**:622-654.
- Marschner, H., 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2nd edition. Academic Press. London, UK. 888 p.
- Marchiol, L., Assolari, S., Sacco, P., Zerbi, G., 2004. Phytoextraction of heavy metals by canola (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus sativus*) grown on multicontaminated soil. *Environ Pollut.*, **132**: 21-27.
- McGrath, S.P., Zhao, F.J., 2003. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. *Current Opinion in Biotechnology* **14**: 277-282.
- McIntyre, T., 2003. Phytoremediation of Heavy Metals from Soils. *Advances in Biochemical Engineering/ Biotechnology*, **78**: 97-123.
- Meagher, R. B., 2000. Phyto remediation of Toxic Elemental and Organic Pollutants. *Current Opinion in Plant Biology*, **3**: 153-162.
- Mishra, S., Shanker, K., Srivastava, M. M., Srivastava, S., Shrivastav, R., Dass, S., Prakash, S., 1997. A Study On The Uptake Of Trivalent And Hexavalent Chromium By Paddy (*Oryza Sativa*): Possible Chemical Modifications In Rhizosphere. *Agriculture, Ecosystems And Environment*, **62**: 53-58.
- Namjooyan, S., Khavari-Nejad, R., Bernard, F., Namdjooyan, S., Pir, H., 2012. The effect of cadmium on growth and antioxidant responses in the safflower (*Carthamus tinctorius* L.) callus. *Turk J Agric For*, **36**: 145-152.

- Olsen, S.R., Sommers, L.E., 1982. *Phosphorus Soluble in Sodium Bicarbonate*. Pages 421-422 in A. L. Page, R. H. Miller, D. R. Keeney, eds. *Methods of Soil Analysis*. Part 2. Madison, WI: America Society of Agronomy.
- Öztürk, L., Eker S., Özkutlu F., 2003. Effect of cadmium on growth and concentrations of cadmium, ascorbic acid and sulphhydryl groups in durum wheat cultivars. **Turk.J. Agric. For.**, **27**: 161-168.
- Özbek Z., 2010. *Topraktaki Ağır Metaller İçin Sınır Değerlerin Uygulanabilirliğinin Araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi, basılmamış). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Pourghasemian, N., Ehsanzadeh, P., Greger, M. 2013. Genotypic variation in safflower (*Carthamus spp.*) cadmium accumulation and tolerance affected by temperature and cadmium levels. **Environmental and Experimental Botany**, **87**: 218–226.
- Richards, L.A., 1954. *Diagnosis and Improvement Saline and Alkaline Soils*. U.S. Dep. Agr. Handbook 60.
- Romeiro, S.; Lagôa, A.M.; Furlani, P.R.; Abreu, C.A.; Abreu, M.F.; Erismann, N.M. 2006. Lead uptake and tolerance of *Ricinus communis* L. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, **18**: 483-489.
- Salt, D.E., Smith, R.D., Raskin, L., 1998. Phytoremediation. **Annu. Rev. Plantphysiol. Plant Mol. Biol.** **49**: 643-668.
- Shanker, A. K., Cervantes, C., Loza-Tavera, H., Avudainayagam, S., 2005, Chromium Toxicity In Plants, **Environment International**, **31**: 739-753.
- Sayed, S.A., 1999. Effects of lead and kinetin on the growth, and some physiological components of safflower. **Plant Growth Regulation**, **29**:167–174.
- Sharma, P., Dubey, R.S., 2005. Lead toxicity in plants. **Braz. J. Plant Physiol.**, **17** (1):35-52.
- Srivastava, N., Bhagyawant, S.S., 2014. *In vitro* accumulation of lead nitrate in safflower seedling and its impact on plant protein. **Plant Knowledge Journal**, **3**(2):39-46.
- Shi, G., Cai, Q., 2009. Cadmium tolerance and accumulation in eight potential energy crops. **Biotechnology Advances**, **27** (5): 555–561.
- Shi, G., Liu, C., Cai, Q., Liu, Q., Hou, C., 2010. Cadmium accumulation and tolerance of two safflower cultivars in relation to photosynthesis and antioxidative enzymes. **Bull Environ Contam Toxicol**, **85** (3): 256–263.
- Shi, G., Xia, S., Liu, C., Zhang, Z., 2016. Cadmium accumulation and growth response to cadmium stress of eighteen plant species. **Environ. Sci. Pollut. Res.** , **23**: 23071-23080.
- Tiryakioglu, M., 2002. *Effect of Cadmium on Growth and Antioxidant enzymes in Two Barley Cultivars*. (Yüksek lisans tezi, basılmamış) Sabancı Üniv.
- Ullah, R., Bakht, J., Shafi, M., Iqbal, M., Khan, A., Saeed, M., 2011. Phyto-accumulation of heavy metals by sunflower (*Helianthus annuus* L.) grown on contaminated soil. **African Journal of Biotechnology**, **10** (75): 17192-17198.
- Vajpayee, P., Sharma, S. C., Tripathi, R. D., Rai, U. N., Yunus, M., 1999. Bioaccumulation Of Chromium And Toxicity To Photosynthetic Pigments, Nitrate Reductase Activity And Protein Content Of *Nelumbo Nucifera* Gaertn, **Chemosphere**, **39**: 2159-2169.
- Wilkins, D.A., 1978. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth. **New Phytology**, **80** (3): 623-633.

- Yadav, S.K., Dhote, M., Kumar, P., Sharma, J., Chakrabarti, T., Juwakar, A., 2010. Differential antioxidative enzyme responses of *Jatropha curcas* L. to chromium Stress. *Journal of Hazardous Materials*, **180**: 609–615
- Yücel, İ. H., 1997. *Bilim–Teknoloji Politikaları ve 21. Yüzyılın Toplumu*. Devlet Planlama Teşkilatı, Sosyal Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü, Araştırma Dairesi Başkanlığı, Temmuz, Ankara. ISBN: 975–19–1806–5. 123s.
- Zayed, A., Mel Lytle, C., Qian, J. H., Terry, N., 1998. Chromium Accumulation, Translocation And Chemical Speciation In Vegetable Crops. *Planta*, **206**: 293–299.
- Zayed, A. M., Terry, N. 2003. Chromium in the environment: factors affecting biological remediation. *Plant and Soil*, **249** (1): 139–156.
- Zengin, F.K., Munzuroğlu, Ö., 2005. Fasulye fidelerinin (*Phaseolus vulgaris* L.Strike) klorofil ve karotenoid miktarı üzerine bazı ağır metallerin (Ni⁺², Co⁺², Cr⁺³, Zn⁺²) etkileri. *F. Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **17**: 164–172.
- Zhang, G.P., Fukami, M., Sekimoto, H., 2002. Influence of cadmium on mineral concentrations and yield components in wheat genotypes differing in Cd tolerance at seedling stage. *Field Plants Research*, **77**: 93–98
- Zhang, H., Guo, Q., Yang, J., Chen, T., Zhu, G., Peters, M., Wei, R., Tian, L., Wang, C., Tan, D., Ma, J., Wang, G., Wan, Y., 2014. Cadmium accumulation and tolerance of two castor cultivars in relation to antioxidant systems. *Journal Of Environmental Sciences* **26**: 2048 – 2055.
- Zhao, F. J., Lombi, E., McGrath, S. P., 2003. Assessing the potential for zinc and cadmium phytoremediation with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Plant Soil*, **249**: 37–43.



ÖZ GEÇMİŞ

1985 yılında Diyarbakır'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Diyarbakır'da tamamladı. 2014 yılında Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü'nden mezun oldu. 2014 yılında Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarla Bitkileri Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Evli ve bir çocuk babasıdır.

