

**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HARDAL (*Brassica juncea* L.) BİTKİSİNİN KADMIYUM STRESİ ALTINDA
FİZYOLOJİK, BİYOKİMYASAL VE FİTOEKSTRAKSİYON
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Rahime ALTINTAS

TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME BÖLÜMÜ ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2022**

Dr. Öğr. Üyesi Sema KARAKAŞ DİKİLİTAŞ danışmanlığında, Rahime ALTINTAS'ın hazırladığı “Hardal (*Brassica juncea* L.) bitkisinin kadmiyum stresi altında fizyolojik, biyokimyasal ve fitoekstraksiyon etkilerinin incelenmesi” konulu bu çalışma 06 /01 /2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Oybirliğiyle

İmza

Danışman	: Dr. Öğr. Üyesi Sema KARAKAŞ DİKİLİTAŞ	
Üye	: Prof. Dr. Rukiye TIPIRDAMAZ	
Üye	: Prof. Dr. Mehmet Ali ÇULLU	

Bu tezin Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Ana Bilim Dalında yapıldığını ve enstitümüz kurallarına göre düzenlendiğini onaylarım.

Doç. Dr. İsmail HİLALİ
Enstitü Müdürü

Bu çalışma: HÜBAP Tarafından Desteklenmiştir.

Proje No : 20132

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	v
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
2.1. Ağır Metal Stresi	3
2.1.1. Bitkilerde ağır metal kirliliği	4
2.1.2. Toprakta ağır metal kirliliği	4
2.2. Cd Stresi	6
2.3. Fitoremediasyon Yöntemi	7
3. MATERYAL ve YÖNTEM	10
3.1. Materyal	10
3.1.1. Çalışma alanı	10
3.1.2. Denemede kullanılan bitki materyali	10
3.1.3. Saksıların düzenlenmesi	11
3.1.4. Denemenin yürütülmesi	11
3.2. Yöntem	12
3.2.1. Fizyolojik analizler	12
3.2.1.1. Bitki boyu	12
3.2.1.2. Üst Aksam yaş ve kuru ağırlığı	12
3.2.1.3. Kök Aksamı yaş ve kuru ağırlığı	12
3.2.2. Biyokimyasal analizler	13
3.2.2.1. Bitkilerde klorofil ve karotenoid analizi	13
3.2.2.2. Bitkilerde prolin analizi	14
3.2.2.3. Bitkilerde lipid preoksidasyonu	14
3.2.2.4. Hidrojen peroksit	15
3.2.2.5. Peroksidaz analizi (POX, E.C.1.11.1.7)	15
3.2.2.6. Katalaz analizi (CAT, E.C. 1.11.1.6.)	15
3.2.3. Fitoekstraksiyonun belirlenmesi	16
3.2.3.1. Yaprak ve kök Cd içeriği	16
3.2.4. Verilerin değerlendirilmesi	16
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	17
4.1. Bitki Fizyolojik Parametreleri	17
4.2. Bitki Biyokimyasal Parametreleri	18
4.3. Yaprak ve Kök Aksamı Cd Fitoekstraksiyonu	25
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	27
5.1. Sonuçlar	27
5.2. Öneriler	28
KAYNAKLAR	29
ÖZGEÇMİŞ	35

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HARDAL (*Brassica juncea* L.) BİTKİSİNİN KADMIYUM STRESİ ALTINDA FİZYOLOJİK, BİYOKİMYASAL VE FİTOEKSTRAKSİYON ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Rahime ALTINTAS

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr.Üyesi SEMA KARAKAŞ DİKİLİTAŞ
Yıl: 2022, Sayfa:35

Sera koşullarında yürütülen bu çalışmada hardal (*Brassica juncea* L.) bitkisinin farklı dozlarda uygulanan (0 (kontrol), 25, 50, 100, 200, 300 ppm) kadmiyum (Cd) stresine karşı göstermiş olduğu tolerans ve tepkisi incelenmiştir. Hardal bitkisi hasat edildikten sonra, fizyolojik parametrelerden (bitki boyu, üst aksam yaş ağırlık, üst aksam kuru ağırlık, kök yaş ağırlık, kök kuru ağırlık), biyokimyasal parametrelerinden klorofil a (Chl-a), klorofil b (Chl-b), karetenoid, prolin, Malondialdehide (MDA) ve antioksidant enzimler peroksidaz (POX), katalaz (CAT) incelenmiştir. Yaprak ve Kök Cd içeriği ile fitoekstraksiyon (bitkisel ekstraksiyon) kapasitesi belirlenmiştir. Cd stresinin bitki fizyolojik parametrelerinde (bitki boyu, üst aksam yaş ağırlık, üst aksam kuru ağırlık, kök yaş ağırlık, kök kuru ağırlık) azalmalara neden olduğu tespit edilmiştir. Bitki biyokimyasal parametrelerinden Chl-a ve Chl-b artan Cd stresiyile azalmıştır. En düşük Chl-a ve Chl-b 300 ppm Cd uygulamasında görülmüştür. Karetenoid içeriği 50 ppm Cd uygulamalarından sonra stresin artışına paralel olarak azalma göstermiştir. Cd stresi bitkide prolin, MDA ve H₂O₂ miktarları ile POX ve CAT antioksidan enzim içeriklerinin artmasına neden olmuştur. Kontrol ve 300 ppm Cd uygulamasındaki antioksidan enzim miktarı karşılaştırıldığında POX 12.74 kat, CAT ise 11 kat artmıştır. Bu durum artan Cd konsantrasyonuna karşı bitkinin savunma stratejisini sürdürdüğünün kanıtı olarak kabul edilmiştir. Hardal bitkisi yaprak ve köklerinde yüksek miktarda Cd iyonlarını biriktirerek ortamdaki Cd miktarının alımında etkili bulunmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Ağır metal, kadmiyum, bitkisel ıslah, fitoekstraksiyon, hardal

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION on PHYSIOLOGICAL, BIOCHEMICAL and PHOTOEXTRACTION EFFECTS OF MUSTARD (*Brassica juncea* L.) UNDER CADMIUM STRESS

Rahime ALTINTAS

Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Soil Science

Supervisor: Assist. Prof. SEMA KARAKAŞ DİKİLİTAŞ
Year: 2022, Page:35

In this study we investigated the tolerance and response of the mustard (*Brassica juncea* L.) plant to cadmium (Cd) stress treated at different levels (control (0), 25, 50, 100, 200, 300 ppm) at greenhouse conditions. After the mustard plant was harvested, physiological parameters (plant height, upper part fresh weight, upper part dry weight, root fresh weight, root dry weight), biochemical parameters such as chlorophyll a (Chl-a), chlorophyll b (Chl-b) carotenoid, proline, malondialdehyde (MDA), and antioxidant enzymes peroxidase (POX), catalase (CAT) were determined in the plants. Cd content was measured in leaf and root to determine the phytoextraction capacity. It was determined that Cd stress causes decreases in plant physiological parameters (plant height, plant fresh weight, plant dry weight, root fresh weight, root dry weight). Biochemical parameters such as Chl-a and Chl-b decreased with the increasing Cd stress in plant. The lowest Chl-a and Chl-b were observed in 300 ppm Cd application. It was determined that the carotenoid content decreased in parallel with the increase in stress after 50 ppm Cd applications. On the other hand, Cd stress increased the amounts of proline, MDA and H₂O₂ in the plant. It was determined that the antioxidant enzyme contents of POX and CAT also increased as the Cd stress increased. When the amount of antioxidant enzyme in the control and 300 ppm Cd application was compared, it was determined that there was an increase of 12.74 times in POX and 11 times in CAT enzyme levels. This clearly showed that plant defense strategy has been active throughout the Cd toxicity at determined doses. Mustard plant has proven to be a good hyperaccumulator plant in removing Cd toxicity from in the environment by accumulating high amounts of Cd ions in its leaf and roots.

KEY WORDS: Heavy metal, cadmium, fitoremediasyon, phytoextraction, mustard,

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın tasarlanması, yürütülmesi ve yazım aşamalarında yardımlarını esirgemeyen değerli tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi SEMA KARAKAŞ DİKİLİTAŞ'a desteği için çok teşekkür ederim. Prof. Dr. Rukiye TIPIRDAMAZ, Prof. Dr. Mehmet Ali ÇULLU ve Doç. Dr. Ahmet ALMACA hocalarıma katkılarından dolayı teşekkür ederim. Çalışmalarım süresince bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım her konuda yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarım Prof. Dr. İbrahim BOLAT ve Doç. Dr. Murat DİKİLİTAŞ'a, çalışmamın kurulum aşamasından analiz aşamasına kadar yardımlarını benden esirgemeyen Araő. Gör. Ferhat UĞURLAR'a, Zir. Müh. İsmail BATANSU'ya ve Zir. Müh. Ferhat GÖKÇE'ye teşekkür ederim. Maddi desteklerinden dolayı HÜBAP'a teşekkür ederim. Tüm öğrenim hayatı süresince desteklerini benden esirgemeyen, her türlü fedakârlığı yapan, başarılarımda önemli katkıları bulunan her zaman varlığını yanımda hissettiren değerli aileme sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 3.1. Çalışmanın yürütüldüğü sera alanından bir görünüm	10
Şekil 3.2. Deneme deseninden bir görünüm.....	11
Şekil 4.1. Farklı Cd uygulamalarının Hardal bitkisinin Chl-a üzerine etkisi	19
Şekil 4.2. Farklı Cd uygulamalarının Hardal bitkisinin Chl-b üzerine etkisi	19
Şekil 4.3. Farklı Cd uygulamalarının Hardal bitkisinin Karetenoid içeriğine etkisi	20
Şekil 4.4. Farklı Cd uygulamalarının Hardal bitkisinin Prolin içeriğine etkisi	21
Şekil 4.5. Farklı Cd uygulamalarının Hardal bitkisinin MDA içeriğine etkisi	22
Şekil 4.6. Farklı Cd uygulamalarının Hardal bitkisinin H ₂ O ₂ içeriğine etkisi	23
Şekil 4.7. Farklı Cd uygulamalarının Hardal bitkisinin POX antioksidant enzim içeriğine etkisi. 24	24
Şekil 4.8. Farklı Cd uygulamalarının Hardal bitkisinin CAT antioksidant enzim içeriğine etkisi. 24	24
Şekil 4.9. Farklı Cd uygulamalarının Hardal bitkisinin Yaprak ve kök aksamı Cd içeriğine etkisi 26	26

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 2.1. Toprak ve sulama sularındaki bazı ağır metal konsantrasyon sınır değerleri	5
Çizelge 4.1. Hardal bitkisinin farklı Cd dozlarındaki fizyolojik özellikleri.....	17



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Ar	Arsenik
CAT	Katalaz
Cd	Kadmiyum
Chl-a	Klorofil a
Chl-b	Klorofil b
cm	Santimetre
Co	Kobalt
Cr	Krom
Cu	Bakır
DTPA	Dietilen triamin pentaasetik asit
EBL	24-epibrassinolid
FAO	Dünya Tarım Örgütü
Fe	Demir
g	Gram
GA3	Gibberellin A3
Hg	Civa
H ₂ O ₂	Hidrojen peroksit
kg	Kilogram
L	Litre
m	Metre
M	Molarite
MDA	Malondialdehide
mg	Miligram
ml	Mililitre
mm	Milimetre
mM	Milimolar
Mn	Mangan
Ni	Nikel
nm	Nanoometre
Pb	Kurşun
POX	Peroksidaz
ppm	Parts per million (milyonda bir)
ROS	Radikal Oksijen Türleri
TBA	Tiobarbiturik Asit
TCA	Trikloro Asetik Asit
TF	Translokasyon Faktörü
U	Uranyum
WHO	Dünya Sağlık Örgütü
Zn	Çinko
6-BA	6-Benzilaminopurin
µmol	Micro mol
%	Yüzde birim
°C	Santigrant derece

1. GİRİŞ

Günümüzün hızlı nüfus artışı ile beraber kentleşme oranı artmış ve birçok önemli sorunlara neden olmuştur. Bu durum tarımsal alanların azalmasına ve çevre kirliliğinin artmasına yol açmıştır (Özyürek, 2016). Çevre kirliliğinin önlenmesi doğal kaynakların ve çevrenin kirlenmeye karşı korunması için oldukça önemlidir. İnsan yaşamı için gerekli olan besinleri sağladığımız toprak kaynakları çeşitli faaliyetler sonucunda inorganik ve organik kirleticiler ile kirlenmektedir. Bu kirleticiler arasında yer alan ve en tehlikeli kirleticilerden birisi de ağır metallerdir (Özay ve Mammadov, 2013).

Ağır metallerden kaynaklanan çevre kirliliği, endüstriyel gelişmelerin başlangıcından bu yana hızla artmıştır. Ağır metal kirleticiler arasında en yaygın olanlar arsenik, kadmiyum, kurşun, cıva, nikel, çinko krom ve bakırdır. Ağır metaller bitkinin gelişimini ve verimini, toprak mikroflorasını olumsuz etkilerler (Zhang ve ark, 2009; Alizadeh ve ark, 2012). Kadmiyum toksisitesi diğer ağır metallerden 2-20 kat daha fazla olması nedeniyle toprak, bitkiler ve diğer doğadaki canlı organizmalar için oldukça toksik bir metaldir (Banavides ve ark, 2005; Bhadkariya ve ark, 2014). Kadmiyum 0.3 ile 0.8 mg kg⁻¹ toprak arasında mevcut olduğunda çoğu bitki için çok zehirlidir. Bitkilerde Cd toksisitesinin en belirgin görünür semptomları bitki büyümesinin gecikmesi, kloroz ve bodurluktur (Banavides ve ark, 2005).

Çevremizde Cd'nin yayılmasına metal endüstrisi, pillerin kullanımı, boyalar, metalle kontamine atıklar, fosfatlı gübrelerin uygulanması neden olmaktadır (Singh ve ark, 2009).

Ağır metaller ile kirlenmiş toprakların arındırılmasında birkaç yöntem bulunmaktadır. Kirliliğin giderilmesinde ve kontrollünde fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler kullanılabilir. Bu yöntemler etkin olmasının yanında maliyetinin yüksek olması, uzun zaman alabilmesi ve çevreye zarar verebilmesi gibi olumsuz yönlere de sahiptir. Fitoremediasyon (bitkisel ıslah) kirlenmiş ortamda (ağır

metaller, tuzlar) kirleticilerin uzaklaştırılmasını amaçlayan, düşük maliyeti nedeniyle son dönemlerde oldukça yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde ağır metalle kirlenmiş alanlarda hiperakümülatör bitki yetiştirilmekte ve ortamın geri kazanımı sağlanmaktadır (Laghlimi ve ark, 2015; Karakas ve ark, 2021).

Fitoekstraksiyon fitoremediasyon altında sınıflandırılan bir toprak arıtma yöntemi olup, toprak ve sularda kirliliğe neden olan ağır metaller hiperakümülatör bitkiler tarafından kök, gövde veya yapraklarında depolarlar, hasata kadar kirleticileri ortamdaki almaya devam ederler. Hasattan sonra, kirletici ortamdaki arınmamış ise, bu döngü birkaç ürün süresince devam ettirilmelidir (Dağhan ve ark, 2012). Fitoekstraksiyonda kullanılacak bitkilerin yüksek düzeyde metal biriktirmesi ve ağır metale karşı direnç göstermesi, hızlı gelişmesi, iyi bir köke sahip olması ve hasatın kolay olması istenmektedir (Dağhan ve ark, 2012; Rascio ve ark, 2011).

Fitoekstraksiyon işleminde kullanılan bitkiler hasat edildikten sonra, depolanarak, sıkıştırma işlemi uygulanarak, kompostlama yapılarak, piroliz yapılarak veya yakarak kül haline getirilerek değerlendirilir (Seven ve ark, 2018).

Bu çalışmada; hardal (*Brassica juncea* L.) bitkisine farklı dozlarda uygulanan kadmiyum (0 (kontrol), 25, 50, 100, 200 ve 300 ppm Cd) stresine karşı göstermiş olduğu fizyolojik ve biyokimyasal tepkileri, bitki yaprak ve kök fitoekstraksiyonu belirlenmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Ağır Metal Stresi

Ağır metaller 5 g cm^{-3} 'ten yüksek yoğunluğa sahip metallerdir. Doğada (toprak ve su) çinko (Zn), demir (Fe), bakır (Cu), mangan (Mn), nikel (Ni), molibden (Mo), kobalt (Co), kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), arsenik (As), civa (Hg) ve krom (Cr) gibi yaklaşık 60'ın üzerinde metal bulunmaktadır (Baba ve ark, 2009). Ağır metaller çevresel toksik etkilere göre gruplandırıldığında en önemli grubu Pb, Zn, Cu ve Cd oluşturur (Yimsek, 2007).

Ağır metallerden bitki büyüme ve gelişiminde gerekli olanlar Zn, Fe, Cu, Mn, Ni, Mo ve Co mikro besin elementleri olup, buna karşın Cd, Pb, As, Hg ve Cr ise bitki büyümesi için gerekli olmayan elementlerdir (Niess ve ark, 1999). Ağır metallerin mikro besin elementi olsun ya da olmasın hava, su ve toprakta miktarlarının belirli düzeyin üzerine çıkması, doğadaki canlılar için önemli sorunlar teşkil ederler. Ağır metal toksisitesi bitki gelişimini, verimini ve ürün kalitesini oldukça düşürmektedir (Banavides ve ark, 2005; Shanker ve ark, 2005).

Başlıca ağır metal kaynakları, bazı anakayaçlar, biyositler, mineral gübreler, çeşitli kentsel atıklar ve atıksular, motorlu taşıtların neden olduğu egzoz gazları ve madenciliktir (Önder, 2012). Pb, Cd, Hg, As, Cr gibi ağır metallerin çevreye yayılmaları endüstriyel; pil üretimi ve kullanımı (Hg, Cd), tarımsal (Cd), madencilik (B, Cr), egzoz gazı (Pb), elektronik sanayi ve ölçü aletleri (Hg), sanayi atıkları (Cr), petrol (Pb), boyalar (Cd, Pb), tıbbi (Hg), doğal (B, Pb, Hg, Cr, Cd,) ve termik santrallerden (Pb, Hg, Cr, Cd) yayılırlar (Vanlı ve Yazgan, 2008).

Olivares ve ark. (2013), yaptıkları çalışmada yüksek konsantrasyonlarda Cu, Zn, Mn, Pb ve Cd içeren petrol üretim alanı ve maden atıklarında Hint yağı (*Ricinus communis* L.) bitkisini yetiştirmişlerdir. Bitkinin toksik koşullarla iyi gelişim

gösterdiğini ve bitkinin metal kalıntılarının arıtılmasında kullanılabilir olduğunu ifade etmişlerdir.

2.1.1. Bitkilerde ağır metal kirliliği

Ağır metallerin bitki bünyesinde bıraktığı toksik etki, metalin cinsi ve miktarı, bitkinin türü, toleransı ve maruz kalma süresine göre değişmektedir (Topdemir ve ark, 2015). Ağır metaller bitki dokularında yüksek oranda biriktiğinde, iyon dengesi, fotosentez ve klorofil sentezi, enzim aktivitesi olumsuz etkilenmektedir. Bitkide membranlarda hasar, bitki-su ilişkisinin ve hormon dengesinde bozulmaya neden olabilmektedir. Ağır metale maruz kalan bitkilerde hücre büyümesi ve uzaması durur, bitkilerin kök ve sürgün büyümeleri azalır. Hücre turgorunun ve hücre duvarı stabilitesinin ağır metallere olumsuz etkilenmesi nedeniyle stoma hareketleri etkilenir ve yaprak alanı, klorofil sentezinde azalmalar meydana gelir. Genç yapraklarda kıvrılma ve kloroz (sararma) görülür. Kök gelişimindeki azalma sebebiyle bitkilerin iyon alımı azaldığından bitki beslenmesi olumsuz yönde etkilenmektedir. (Yıldırım, 2016; Karakas, 2021).

Liu ve ark. (2019), yaptıkları çalışmada Ağaç minesini (*Lantana camara L.*) bitkisinin Cd hiperakümülatörü olup olmadığını araştırmışlardır. Denemede farklı Cd 0 (kontrol), 25, 50, 75, 100 ve 200 mg kg⁻¹ dozları uygulanmıştır. Sonuç olarak, *L. camara* bitkisinin biomasında azalma olduğu ve bitki kök ve sürgünde Cd biriktirdiğini belirtmişlerdir. Bu bitkinin Cd stresine karşı antioksidan koruma ve fotosentetik düzenleme yoluyla güçlü bir Cd toleransı sergilediğini söylemişlerdir. *L. camara*'nın Cd biriktirmesi nedeniyle hiperakümülatör özelliklerine sahip olduğu ve kirlenmiş toprakların iyileştirmesi için potansiyel Cd hiperbirikimli bitki olarak kabul edilebilirliğini ifade etmişlerdir.

2.1.2. Toprakta ağır metal kirliliği

Topraktaki ağır metal kirliliğinin en önemlisi kaynağı insan faaliyetleri sonucudur. Bunlar evsel, zirai ve endüstriyel olarak gruplandırılabilir (Türkoğlu, 2006;

Akıncı ve ark, 2016). Tarımsal alanlarındaki yanlış gübrelemeler (gübrenin türü ve miktarı, gübreleme zamanının doğru tespit edilmemesi), bitki hastalıkları ve zararlılarında yoğun pestisit kullanımı, sulama suyu olarak kirli suların arıtılmadan kullanılması, ağır metal içeren endüstriyel atıkların arıtılmadan dış ortama boşaltılması veya depolanması, maden ocakları işletmelerinde ağır metal içeren atıkların sonucu olarak topraklar ağır metaller ile kirletilmektedir (Akıncı ve ark, 2016). Topraklarda bulunan ve sulama suyunun içerdiği bazı ağır metallerin sınır değerleri Çizelge 2.1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Toprak ve sulama sularındaki bazı ağır metal konsantrasyon sınır değerleri (Chiroma ve ark., 2014).

Elementler	Toprakta ağır metal konsantrasyonu sınır değerleri ($\mu\text{g g}^{-1}$)	Sulama suyunda ağır metal konsantrasyonu sınır değerleri ($\mu\text{g g}^{-1}$)
Pb	100	0.07
Cd	3	0.01
Cr	100	0.55
Cu	100	0.02
Ni	50	1.40
Zn	300	0.20
Ar	20	0.10
Co	50	0.05
Fe	50000	0.50
Mn	2000	0.20

Ağır metallerle kirlenmiş alanların hem yönetimi hem de ıslahı çok zor ve maliyetlidir (Voglar ve ark, 2012).

Li ve ark. (2015), yaptıkları çalışmada Pb ve Cu ile kirletilmiş topraklarda aspir (*Carthamus tinctorius L.*) bitkisi yetiştirilerek bu bitkinin ağır metal stresindeki etkisini incelemiştir. Bitki büyümesinin engellenmesi ve ağır metal konsantrasyonları arasında pozitif bir ilişki gözlemlenmiştir. Pb ve Cu'nun artan konsantrasyonları ile bitki boyu, kök uzunluğu ve kılcal kök miktarının azaldığını

belirtmişlerdir. Fide dönemi hariç her iki metal karışımının aspir bitkisinin büyüme ve gelişmesinde sinerjik etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir.

2.2. Cd Stresi

Ağır metallere biri olan Cd doğada saf olarak bulunmaz. Cd topraklarda hareketliliği nedeniyle bitkiler tarafından kolay alınması, yarılanma ömrünün uzun olması, ayrıca çok düşük konsantrasyonlarda bile diğer ağır metallere kıyasla 2-20 kat daha toksik olması nedeni ile önemli kirleticilerinden birisidir (Goyer, 1991; Lyons-alcantara ve ark, 1996).

Tarımsal alanlarda toprağa ulaşan Cd'un yaklaşık %56'sı fosforlu gübrelerden, %40'ı atmosferik depolanmadan, %3-4'ü çiftlik gübresi ve atık çamuru kullanımından kaynaklanmaktadır (Yost ve Miles, 1979). Fosforlu gübreler elde edildikleri hammaddeye göre değişmekle beraber 1-75 ppm Cd ihtiva ederler. Uzun yıllar toprağa uygulanan fosforlu gübrelerin kullanımına ek olarak doğal yollarla (yanan orman alanları ve yanardağ patlamaları) toprağa karışan Cd, sınır değeri olan 3 ppm'in üzerine çıkar (Delil ve ark., 2017). Bitkiler Cd'un %90'nını topraktan alırken, %10'unu atmosferden almaktadır. Bitkilerin Cd miktarı kuru ağırlığa göre 0.5 ppm'den daha düşüktür (Asri ve ark, 2007).

Topraktan yıkanan Cd, yeraltı sularında kirliliğe yol açmaktadır (Dağhan ve ark,2012; Köleli ve Kantar, 2005; Kabata- Pendias ve ark, 1992). Bu nedenle Cd kirlenmiş ortamların arındırılması oldukça önem oluşturmaktadır. Cd, topraklardan maliyeti yüksek olan arıtım yöntemleri ile uzaklaştırılabildiği gibi düşük maliyetli, kolayca uygulanabilir fitoremediasyon yöntemi ile de arıtılabilmektedir (Dağhan ve ark, 2012).

Tunçtürk ve ark. (2020), yaptıkları çalışmada Çemen otu (*Trigonella foenum-graecum* L.) bitkisini beş farklı CdSO₄ konsantrasyonuna (0, 25, 50, 75 ve 100 mg L⁻¹) maruz bırakmışlardır. Çalışmada artan dozlarda CdSO₄ uygulamalarının bitki boyu, kök uzunluğu, kök ve gövde yaş ağırlığı, yaprak ağırlığı ve yaprak sayısı değerlerinde

azalmalara neden olduğu belirtmişlerdir. Lipit peroksidasyon ve askorbat peroksidaz aktivitesinin arttığını belirtmişlerdir. Çalışmada en yüksek Cd içeriği 100 mg L⁻¹ CdSO₄ uygulamasında tespit edilirken, en düşük Cd içeriği kontrol grubunda görülmüştür. Yine en yüksek MDA seviyesi 100 mg L⁻¹ Cd uygulamasında, en düşük MDA içeriğinin (6.34 nmol g⁻¹TA) ise kontrolden elde edildiğini tespit etmişlerdir.

De Souza ve ark. (2012), yaptıkları çalışmada Hint fasulyesi (*Ricinus communis*) bitkisinin Cd'a toleranslı olduğunu belirtmişlerdir. Bitkinin kuru ağırlığının 12 kata kadar yüksek biyokütle üretme potansiyeline sahip olduğunu söylemişlerdir.

Siddiqui ve ark. (2020), yaptıkları araştırmalarında, Hardal (*Brassica juncea*) bitkisine farklı seviyelerde Cd'a (0, 25, 50 ve 100 mg kg⁻¹) maruz bırakmışlardır. Bitkinin kök ve sürgünlerinde büyük miktarda Cd biriktirdiğini belirtmişlerdir. Cd'un kökten sürgüne transfer faktörünü (TF), büyümenin 45 ve 60 günlük süresinde >1 olduğunu belirtmişlerdir.

Chen ve ark. (2017), yaptıkları çalışmada indol-3-asetik asit (IAA), gibberellin A3 (GA3), 6-Benzilaminopurin (6-BA) ve 24-epibrassinolid (EBL), hardal (*Brassica juncea* L.) ile kadmiyum (Cd) ve uranyumun (U) stres toleransını ve fitoremediasyonunu araştırmışlardır. Biyokütle ve toplam klorofil içeriği Cd ve U stresi altında azaldığını belirtmişlerdir. Hardalın MDA ve H₂O₂ içeriği Cd ve U stresi altında artmıştır. Bu bitkinin ortamı iyileştirebileceği ifade edilmiştir.

2.3. Fitoremediasyon Yöntemi

Fitoremediasyon bitki anlamındaki “phyto” ve iyileştirme, ıslah etme anlamına gelen “remediation” kelimelerinin bir araya gelmesinden türetilmiştir. Fitoremediasyon (bitki kullanılarak ıslah) yönteminde kirleticilerin (ağır metal, tuz gibi) toprak veya su gibi ortamlardan uzaklaştırılarak ortamın temizlenmesinde bitkiler (hiperakümülatör, halofit) kullanılmaktadır (Karakas, 2013; Karakas ve ark, 2021). Fitoremediasyon; fitoekstraksiyon, fitostabilizasyon, rizofiltrasyon, fitodegradasyon, fitovolatilizasyon gibi çeşitli sınıflara ayrılır (Raskin ve ark, 1994). Fitoekstraksiyonda

kullanılan hiperakümülatör bitkiler ağır metale toleranslı olup toksisite belirtisi göstermeksizin bitki toprak üstü aksamalarında diğer bitki türlerine kıyasla 100 ila 1000 kat daha fazla ağır metalleri biriktirme yeteneğine sahiptirler (Brooks ve ark, 1998). Bu bitkiler hücre zarlarındaki taşıyıcı proteinler ile ağır metalleri alırlar. Bu proteinler, bitkilerin mineralleri kökleri ile alan veya mineral iyonlarını vakuolda depolayan taşıyıcılara benzerlik gösterirler. Bitki kökleri vasıtasıyla alınan ağır metallerin bir bölümü, bitki bünyesindeki enzimler ile bozunuma uğramakta ve kimyasal formları değiştirmekte, bir kısmı ise almış olduğu kirleticileri transpirasyon yaparak atmosfere salmaktadır. Diğer kısmı da bitkinin vejetatif organlarında depolanır ve böylece bitkinin hasat edilmesiyle ortamdaki uzaklaştırılmaktadır (Karakaş, 2013; Aybar ve ark, 2015). Çeşitli organlarında metal biriktiren yaklaşık 400 bitki türü bulunmaktadır. Asteraceae, Brassicaceae, Caryophyllaceae, Violaceae ve Eupobiaceae çeşitli kirleticileri bünyelerinde biriktirme özelliği bulunan familyaları oluşturmaktadır. Bu özelliğe sahip en büyük familya Brassicaceae'dır. Brassicaceae'nın 7 cins ve 72 türünün nikel biriktirdiği bilinmektedir (Thompson, 1997; Özbek, 2015).

Alpine pennycress (Thlaspi caerulescens) fitoekstraksiyon özelliğine sahip olup, önemli bir ağır metal olan Cd'ü yapraklarında 380 mg kg^{-1} kadar biriktirebilmektedir (Işık, 2004). Bu bitki kuru ağırlığının %3'ü kadar Zn'yu da herhangi bir toksik belirtisi göstermeksizin biriktirebilmektedir (Kirkham, 2006).

Özbek ve ark. (2013), araştırmalarında Batı Anadolu'nun karasal ve Akdeniz iklim şartlarında toprakların Cd içeriklerini ve vejetasyon durumunu belirlemek amacıyla Zn madeni alanından bitki ve toprak örnekleri toplamışlardır. Bu alanda yaygın bitki türlerinin Poaceae, Scrophulariaceae ve Brassicaceae familyasına ait olduğunu ifade etmişlerdir.

Gerard ve ark. (2000), temiz ve ağır metal ile bulaşık olan topraklar üzerinde çalışmışlardır. İngiliz çimi (*Lolium perenne* L.), marul (*Lactuca sativa* L.) ve *T. caerulescens* bitkilerini Zn ve Cd akümülatörü olarak bu topraklarda yetiştirilmiştir. İngiliz çiminin sürgünlerindeki Cd miktarı $0.1-2.3 \text{ mg kg}^{-1}$, marulun $0.4-8.3 \text{ mg kg}^{-1}$, ve *T. caerulescens*'un $8.7-647 \text{ mg kg}^{-1}$ olarak belirlemişlerdir. Marul ve İngiliz çimi

Cd'un %1'inden daha azını alırken, *T. caerulea* L. % 22'sini bünyesinde depolamıştır.

Al Chami ve ark. (2015), yaptıkları çalışmada sorgum (*Sorghum bicolor*) ve aspir (*Carthamus tinctorius*) bitkilerinin Ni, Pb ve Zn sürgün ve köklerinde biriktirdiğini, köklerin sürgünlerden daha fazla bu metalleri biriktirdiğini belirtmişlerdir. Her iki bitkide de 10 mg l⁻¹'nin üzerinde büyüme görülmemiştir. Yüksek toksisite belirtileri ve biyomasında azalma her iki bitkide de 25 mg l⁻¹'nin üzerindeki Pb ve Zn dozlarında bulunmuştur. *S. bicolor* yüksek biyomas üretimi sürgünlerdeki yüksek ağır metal depolaması nedeniyle *C. tinctorius* bitkisine göre metal alımında daha etkili bulunmuştur.

Altınözlü ve ark. (2012), Türkiye'nin serpantin alanlarında doğal olarak bulunan bitkilerin Ni depolama kapasitelerini inceledikleri çalışmalarında batı Anadolu'daki serpantin topraklarının ekstrakte edilebilir Ni içeriği ile vejetasyon arasındaki ilişkiyi belirlemişlerdir. Türkiye'ye endemik olan muğla çiviti (*Isatis pinnatiloba*) bitkisinin hiper Ni toplayıcı bir tür olduğunu belirtmişlerdir.

Yingang ve ark. (2018), tütün (*Nicotiana tabacum* L.) bitkisini üç Silikon seviyesi (0, 1 ve 4 g kg⁻¹) ile birlikte Cd (0, 1 ve 5 mg kg⁻¹) uygulamışlardır. Araştırmacılar, çalışmada kadmiyum stresi altındaki bitkilere silikon uygulayarak bitki direncini ve büyümesini artırmayı amaçlamışlardır. MDA, klorofil ve karotenoid içerikleri belirlenmiş ve Si uygulanan tütün bitkilerinde MDA içeriklerinin %5.5-%17.1 oranında azaldığı, ayrıca klorofil (%33.9-%41) ve karotenoid (%25.8-%47.3) içeriğinin de arttığı tespit edilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Çalışma alanı

Bu araştırma, Harran Üniversitesi Ziraat Fakültesi'ne ait Osmanbey Yerleşkesi Uygulama Bahçesindeki yarı kontrollü cam serada yürütülmüştür (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1. Çalışmanın yürütüldüğü sera alanından bir görünüm

3.1.2. Denemede kullanılan bitki materyali

Denemede Hardal bitkisi (*Brassica juncea* L.) kullanılmıştır. Hardal (Brassicaceae) turpgiller familyasından bir bitki türüdür. Brassicaceae familyası, toplam 338-360 cins ve yaklaşık 3.709 türden oluşan çiçekli bitkileri kapsamaktadır. Hardal bitkisi 0.3-0.8 m boylanabilen, sarı çiçekli, tek yıllık bir bitkidir. Bu bitki Zn ve Cd gibi ağır metallerle karşı yüksek toleransa sahip olup hücrelerinde depolaması nedeniyle fitoremediasyonda kullanılabilir (Anjum ve ark, 2012).

3.1.3. Saksıların düzenlenmesi

Denemede 8 litrelik plastik saksılar kullanılmıştır. Saksıların tabanlarında drenajı sağlayacak biçimde delikler açılmıştır. Denemede Şanlıurfa Harran üniversitesi Osmanbey Yerleşkesinde alınan topraklar kurutularak 2 mm'lik elekten geçirilmiştir. Her bir saksıya hava kurusu topraktan 7 kg doldurulmuştur.

3.1.4. Denemenin yürütülmesi

Deneme deseninde tesadüf parsellerine bağlı bloklar 5 tekerrürlü olacak şekilde dizayn edilmiştir. Sekiz litre hacmindeki saksılar hava kurusu toprak ile doldurulmuş ve hardal bitki tohumu ekilerek 10 adet bitki kalacak şekilde seyreltme yapılmıştır. Dört hafta sonra farklı dozlarda Cd içeren (0 (kontrol), 25, 50, 100, 200 ve 300 ppm) sulama suları ile ilgili saksılar haftada üç kez olmak üzere 7 hafta süreyle sulanmıştır. Sulama suyu miktarının belirlenmesinde tarla kapasitesi esas alınmıştır. Deneme başlangıcından 12 hafta sonra bitkiler hasat edilmiştir. Hardal (*B. juncea*) bitkisinin farklı dozlardaki Cd'a karşı göstermiş olduğu tepkileri ve tolerans düzeyi bazı fizyolojik, biyokimyasal analizler ile belirlenmiştir. Bitkinin yaprak ve köklerde depoladığı Cd miktarı belirlenmiş ve böylece fitoekstraksiyon özelliği de tespit edilmiştir (Şekil 3.2.).



Şekil 3.2. Deneme deseninden bir görünüm

3.2. Yöntem

Farklı Cd konsantrasyonunda yetiştirilen Hardal (*B. juncea*) bitkisinin hasat edilmesinden sonra fizyolojik (Bitki boyu, üst aksam yaş ağırlık, üst aksam kuru ağırlık, kök yaş ağırlık ve kök kuru ağırlık), biyokimyasal (klorofil, karatenoid, prolin, lipid peroksidasyonu (MDA), hidrojen peroksit (H₂O₂), antioksidant enzimler (POX ve CAT), fitoekstraksiyon (yaprak ve kök Cd) içerikleri belirlenmiştir.

3.2.1 Fizyolojik analizler

3.2.1.1. Bitki boyu

Bitki boyu toprak yüzeyinden başlayarak bitkinin sürgün ucuna kadar olan kısmın ölçülmesi ile belirlenmiştir.

3.2.1.2. Üst aksam yaş ve kuru ağırlığı

Bitkiler, toprak yüzeyinden kesilerek tüm aksamlarıyla birlikte (yaprak, dal) hassas terazide ağırlıkları belirlenmiştir. Bitkilerden bir miktar alınarak taze olacak şekilde derin dondurucuya (-20°C) konulmuştur. Daha sonra geri kalan bitkilerin kuru ağırlıklarını belirlemek üzere 70 °C'de etüvde kurutularak kuru ağırlıkları belirlenmiştir.

3.2.1.3. Kök aksamı yaş ve kuru ağırlığı

Hardal bitkisinin kökleri toprak ortamından alınarak yıkanmış ve topraktan arındırılması sağlanmıştır. Yıkanan köklerin nemi alındıktan sonra hassas terazide yaş ağırlıkları belirlenmiştir. Daha sonra kökler 70 °C'de etüvde kurutularak kuru ağırlıkları belirlenmiştir.

3.2.2. Biyokimyasal analizler

3.2.2.1. Bitkilerde klorofil ve karotenoid analizi

Klorofil ve karotenoid içeriği Arnon (1949)'a göre belirlenmiştir. Hasat edilen bitkiden 0.5 g taze yaprak örneği alınmış ve 5 ml %80 aseton:su (v/v) karışımında homojenize edilmiş daha sonra Whatman kağıt filtreden geçirilerek ışık geçirmeyen tüplere konulmuştur. Klorofil a (Chl a) için 663.5 nm, klorofil b (Chl b) için 645 nm de %80 aseton kontrolüne karşı UV mikroplate spektrometrede (Epoch, SN: 1611187, USA) okuması yapılmıştır. Sonuçlar aşağıdaki formüle göre mg l^{-1} taze ağırlık olarak hesaplanmış ve daha sonra $\text{mg klorofil g}^{-1}$ taze ağırlık şeklinde ifade edilmiştir (Rajput ve Patil, 2017).

$$\begin{aligned} \text{Klorofil a (mg/l)} &= 12.7A_{663.5} - 2.69A_{645} \\ \text{Klorofil b (mg/l)} &= 22.9A_{645} - 4.68A_{663.5} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Karotenoid içeriği 480 nm ve 510 nm de %80 aseton kontrolüne karşı UV mikroplate spektrometrede (Epoch, SN: 1611187, USA) belirlenmiştir. Sonuçlar aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır (Rajput ve Patil, 2017).

$$\text{Karotenoid (mg g}^{-1}\text{)} = \frac{7.6 (A_{480}) - 1.49 (A_{510}) \times V}{1000} \times W \quad (3.2)$$

A = okunan absorbans değeri

V = 80% aseton ile homojenize edilen ekstrakt son hacmi

W = Bitki ağırlığı.

3.2.2.2. Bitkilerde prolin analizi

Prolinin belirlenmesinde taze hardal yaprakları (0.5 g) %3'lük 10 ml sulfosalisilik asit içerisinde homojenize edilmiştir. Daha sonra homojenat filtre kağıdından süzölmüştür. İki mililitre süzükten alınarak 2 ml'lik asit-ninhidrin (1.25 g ninhidrin 30 ml glacial asetik asit ve 20 ml 6 M fosforik asit) karışımı ilave edilmiştir. Bir saat süreyle 100 °C de su banyosunda bırakılmıştır. Buz içinde reaksiyon sonlandırılıp 5 ml toluen eklenerek vorteks ile karıştırılmış 10 dk süreyle bekletilmiştir. Üst faz alınarak UV mikroplate spektrometrede (Epoch, SN: 1611187, USA) 515 nm absorbans değerleri belirlenmiştir. Sonuçlar aşağıdaki formül kullanılarak $\mu\text{mol g}^{-1}$ taze ağırlık olarak belirtilmiştir (Bates ve ark,1973).

$$\mu\text{mol prolin g}^{-1} \text{ taze ağırlık} = \frac{((\mu\text{g prolin ml}^{-1} \times \text{toluen hacmi(ml)}) / (115.5 \mu\text{g } \mu\text{mol}^{-1}))}{(\text{g örnek}/5)} \quad (3.3)$$

3.2.2.3. Bitkilerde lipid peroksidasyonu (MDA)

Lipid peroksidasyonu (MDA) belirlenmesi için için 0.5 g taze bitki örneği 10 ml %0.1'lik trikloro asetik asit (TCA) ile homojenize edilmiştir. Daha sonra 15000g devirde 5 dakika süreyle santrifüj edilmiştir. Homojenattan alınan 1 ml örnek üzerine 4 ml %20'lik TCA içinde çözülmüş %5'lik tiobarbiturik asit (TBA) eklenmiştir. Daha sonra karışım 95 °C'de 30 dakika inkube edilmiştir. Buz banyosu yapılarak soğutulan karışım 10000g'de 10 dakika santrifüj edilmiştir. Absorbans değerleri 532 ve 600 nm'de UV mikroplate spektrometrede (Epoch, SN: 1611187, USA) okunmuştur. MDA içeriğinin hesaplanmasında 532 nm'de okunan absorbans değerinden 600 nm'de okunan değer çıkarılmış ve 1 ml çözeltildeki MDA nmol g^{-1} taze ağırlık olarak aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır (Sairam ve Saxena, 2000).

$$\text{MDA (nmol g}^{-1}) = [(A_{532} - A_{600}) / 155000] \times 10^6 \quad (3.4)$$

3.2.2.4. Hidrojen peroksit (H₂O₂)

Hidrojen Peroksit (H₂O₂) analizi Loreto ve Velikova (2001), metoduna göre belirlenmiştir. Taze hardal bitkisi yaprağı (0.5 g) 3 ml'lik % 1 (w/v) Trikloroasetikasit (TCA) ile homojenize edilmiştir. Homojenattan 0.75 ml alınıp, üzerine 0.75 ml'lik 10 mmol L⁻¹ K-fosfat tampon (pH 7.0) çözeltisi ve 1.5 ml'lik 1 M KI çözeltisi eklenmiştir. UV mikroplate spektrometrede (Epoch, SN: 1611187, USA) 390 nm'de absorbans değeri ölçülmüştür. H₂O₂ içeriği µmol g⁻¹ taze ağırlık olarak belirtilmiştir.

3.2.2.5. Peroksidaz enzim analizi (POX, E.C.1.11.1.7)

Peroksidaz enzim analizi (POX, E.C.1.11.1.7) Cvikorová ve ark. (1994), metoduna göre yapılmıştır. Taze hardal bitkisi (0.5 g) 10 ml 50 mmol L⁻¹ Na-fosfat çözeltisi ile homojenize edilmiştir. Ekstraktan (100 µl) alınarak üzerine (13 mmol L⁻¹ guaiacol, 5 mmol L⁻¹ H₂O₂ ve 50 mmol L⁻¹ Na-fosfat (pH 6.5) çözeltisi eklenen 3 mL reaksiyon karışımının absorbans değerleri UV mikroplate spektrometrede (Epoch, SN: 1611187, USA) 470 nm'de 1 dakika ara ile 3 kez okuması yapılmıştır. Bir ünite peroksidaz aktivitesi ΔA_{470 nm}'de 0.1 absorbans/dakika olup, sonuçlar ünite mg⁻¹ olarak belirtilmiştir.

3.2.2.6. Katalaz analizi (CAT, E.C.1.11.1.6)

Katalaz enzim analizi (CAT, E.C. 1.11.1.6) Milosevic ve Slusarenko (1996), metoduna göre yapılmıştır. Taze hardal bitki yaprakları (0.5 g) 10 mL 50 mmol L⁻¹ Na-fosfat tampon çözeltisi ile homojenize edildikten sonra 50 µl bitki ekstraktına (50 mmol L⁻¹ Na-fosfat, 10 mmol L⁻¹ H₂O₂ ve 4 mmol L⁻¹ Na₂EDTA) 2.95 ml eklenmiştir. Karışımın absorbans değerleri 240 nm'de 30 sn süre UV mikroplate spektrometrede (Epoch, SN: 1611187, USA) ölçülmüştür. Sonuçlar ünite mg⁻¹ taze ağırlık olarak ifade edilmiş olup, bir katalaz enzim ünitesi 1 dakika içinde 1 µmol H₂O₂'in parçalanmasını sağlayan enzim miktarı olarak belirtilmiştir (Karakaş, 2013).

3.2.3. Fitoekstraksiyonun belirlenmesi**3.2.3.1. Yaprak ve kök Cd içeriği**

Yaprak ve kök Cd içeriği Kaçar ve İnal (2008), metoduna göre belirlenmiştir. Buna göre, 2 g bitki örneği kuru yakma yöntemi ile kül fırınında 550 °C’de 5 saat yakıldıktan sonra bitki çözeltisi 50 mL’lik ölçü balonuna aktarılmıştır. Ölçü balonu % 1’lik nitrik asit ile çizgisine kadar tamamlanmıştır. Elde edilen süzükdeki Cd içerikleri Inductively Coupled Plasma (ICP, Perkin Elmer) cihazında belirlenmiştir.

3.2.4. Verilerin değerlendirilmesi

Veriler SPSS (Version 22.0) programı ile varyans analizleri (ANOVA) ve Duncan Çoklu Karşılaştırma Testi ile veriler $P < 0.05$ önem düzeyinde analiz edilmiştir. Değerler aritmetik ortalama \pm standart hata olarak ifade edilmiştir. Sonuçlar çizelge ve grafikler halinde verilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Bitki Fizyolojik Parametreleri

Sera koşullarında saksı ortamında farklı Cd dozlarında yetiştirilen hardal bitkisinin bitki boyu, üst aksam yaş ağırlıkları, üst aksam kuru ağırlık, kök yaş ağırlık ve kök kuru ağırlıkları belirlenmiştir (Çizelge 4.1.).

Çizelge 4.1. Hardal bitkisinin farklı Cd dozlarındaki fizyolojik özellikleri

Cd uygulamaları (ppm)	Bitki Boyu (cm bitki ⁻¹)	Üst aksam Yaş Ağırlık (g bitki ⁻¹)	Üst Aksam Kuru Ağırlık (g bitki ⁻¹)	Kök Yaş Ağırlık (g bitki ⁻¹)	Kök Kuru Ağırlık (g bitki ⁻¹)
0 (kontrol)	25.60±0.93a	16.45±0.71a	1.58±0.06a	4.67±0.14a	0.49±0.02a
25	24.00±0.45b	12.87±0.47b	1.21±0.04b	3.30±0.08b	0.37±0.01b
50	23.00±0.32c	9.61±0.39c	1.06±0.02c	3.04±0.04c	0.36±0.02c
100	22.00±0.55c	8.68±0.58d	1.02±0.02d	2.80±0.06d	0.32±0.01d
200	19.80±0.86d	7.58±0.20d	0.92±0.03d	2.78±0.04d	0.30±0.01d
300	17.20±0.58e	6.38±0.30e	0.60±0.01e	2.51±0.02e	0.27±0.01e

^{a,b,c}, Aynı sütunda farklı ortalamaları ifade etmektedir. P<0.05

Hardal bitkisinin fizyolojik özellikleri üzerine farklı Cd dozlarının uygulaması istatistiksel olarak önemli bulunmuştur (P<0.05). Uygulama sonuçları Çizelge 4.1’de incelendiğinde artan Cd doz uygulamaları bitki boyunda azalmalara neden olmuştur. Kontrol bitkisinin bitki boyu 25.60 cm bitki⁻¹ ile en yüksek bulunmuştur. En düşük bitki boyu ise 17.20 cm olarak 300 ppm Cd uygulamalarında belirlenmiştir.

Üst aksam yaş ağırlık incelendiğinde en yüksek yaş ağırlık 16.45 g bitki⁻¹ ile kontrol uygulamasında belirlenmiştir. En düşük yaş ağırlık 6.38 g bitki⁻¹ olarak 300 ppm Cd uygulamalarında belirlenmiştir.

Üst aksam kuru ağırlık en yüksek yaş ağırlık değeri 1.58 g bitki⁻¹ ile kontrol uygulamasında bulunmuştur. En düşük üst aksam kuru ağırlık 0.60 g bitki⁻¹ olarak 300 ppm Cd uygulamalarında bulunmuştur.

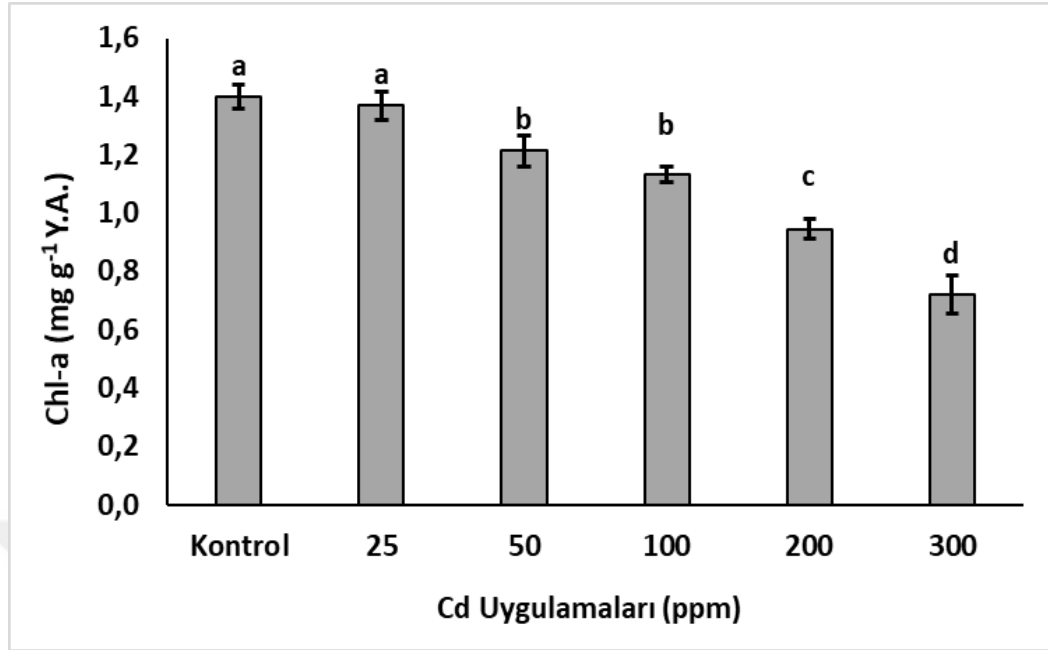
Kök yaş ve kuru ağırlık artan Cd uygulamaları ile azalmış olup, sırası ile en düşük kök yaş ağırlığı 2.51 g bitki⁻¹, en düşük kök kuru ağırlığı 0.27 g bitki⁻¹ olarak belirlenmiştir.

Cd uygulamasının bitki boyu ve bitki kuru ağırlığı'na olumsuz etkileri birçok araştırmacı tarafından farklı bitkilerde de belirtilmiştir (Tiryakioglu ve ark, 2006; John ve ark, 2009; Safarzadeh ve ark, 2013). Dursun (2012), nohutta kadmiyum dozları arttıkça bitki boyu, yaş ve kuru ağırlığının azaldığını ifade etmiştir. Bu çalışmada da benzer bulgular elde edilmiştir.

4.2. Bitki Biyokimyasal Parametreleri

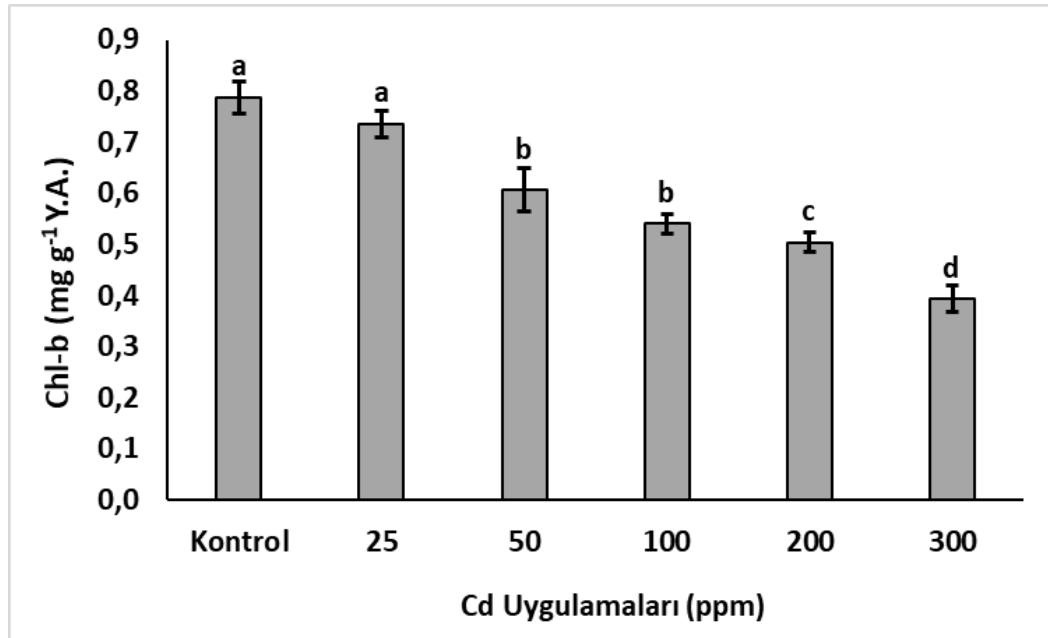
Hasat edilen hardal bitkisinde biyokimyasal parametrelerden klorofil (Chl-a ve Chl-b), karetenoid, prolin, MDA, H₂O₂, POX ve CAT antioksidan enzimleri incelenmiştir.

Hardal bitkisi Chl-a ve Chl-b içeriği üzerine Cd uygulamaları istatistiksel olarak önemli bulunmuştur (P<0.05). Cd uygulamaları hardal bitkisinde hem Chl-a hemde Chl-b azalmalara neden olmuştur. Chl-a da kontrol ile kıyaslandığında Chl-a içeriğinde en fazla azalma 300 ppm Cd uygulamasında görülmüştür (Şekil 4.1.).



Şekil 4.1. Farklı Cd uygulamalarının hardal bitkisinin Chl-a üzerine etkisi. Barlar ortalama \pm standart hata ifade etmektedir, $P < 0.05$

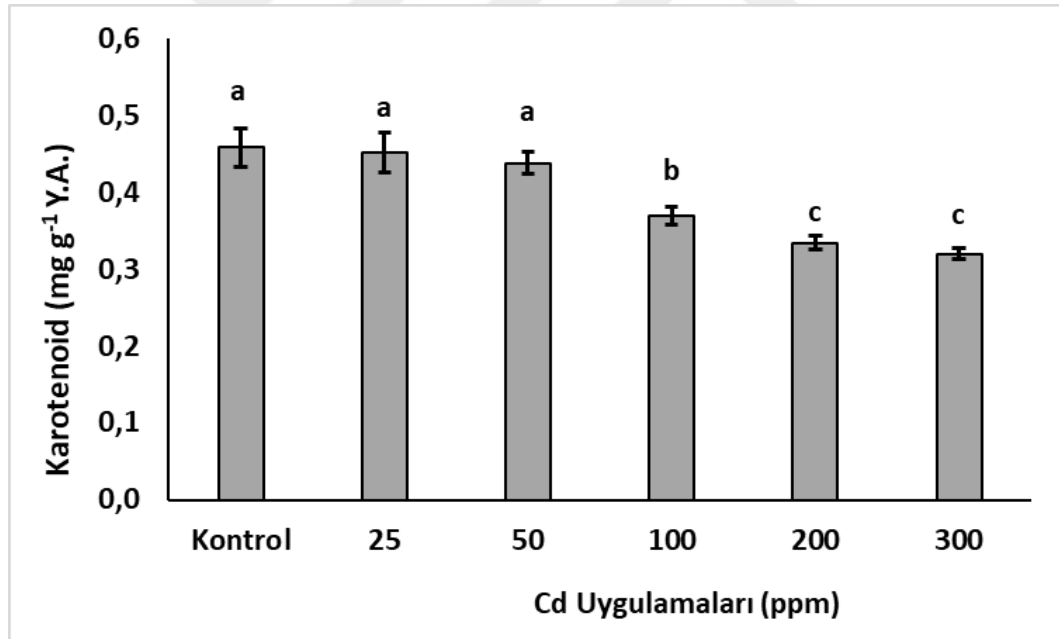
Kontrol ile kıyaslandığında artan Cd dozuyla azalış gösteren Chl-b içeriği en düşük 300 ppm Cd uygulamasında bulunmuştur (Şekil 4.2.).



Şekil 4.2. Farklı Cd uygulamalarının hardal bitkisinin Chl-b üzerine etkisi. Barlar ortalama \pm standart hata ifade etmektedir, $P < 0.05$

Ağır metaller (Cd ve Pb gibi) bitkide klorofil miktarının azalmasına neden olurlar (Yürekli ve Porgali, 2006; Doğanlar ve Atmaca, 2011). Bitkilerde, Cd toksisitesi klorofil sentezlenmesini olumsuz olarak etkileyerek yapraklarda kloroza neden olur (Das ve ark, 1997; Baryla ve ark, 2001). Besin çözeltilisindeki Cd dozunun artışı pamuk (*Gossypium hirsutum* L.) bitki yapraklarında klorofil-a, klorofil-b miktarlarını azaltmıştır (Karanlık ve ark, 2013). Benzer bulgular bu çalışmada da görülmüştür.

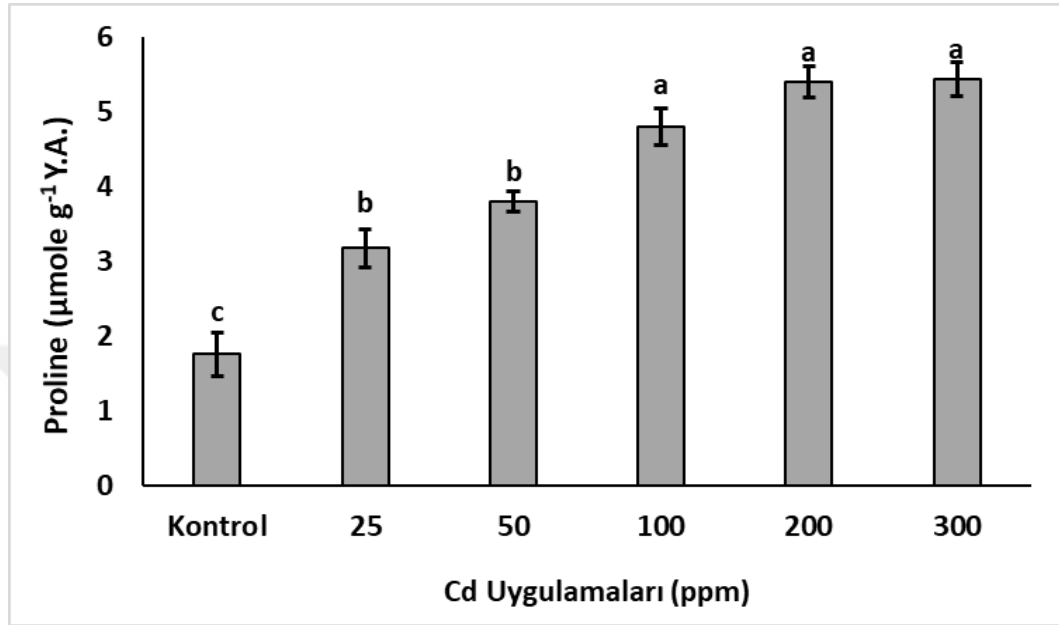
Hardal bitkisi karetenoid içeriği üzerine Cd uygulamalarının etkisi istatistiksel açıdan önemli bulunmuştur ($P<0.05$). Hardal bitkisi 50 ppm Cd uygulamalarına kadar karetenoid içeriğinde azalma görülmemiştir. Ancak 100 ppm ve sonrasındaki Cd uygulamaları stresin artışına paralel olarak karetenoid içeriğinde azalma gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 4.3.).



Şekil 4.3. Farklı Cd uygulamalarının hardal bitkisinin karetenoid içeriğine etkisi. Barlar ortalama \pm standart hata ifade etmektedir, $P<0.05$

Doğanlar ve Atmaca (2011), en düşük karetenoid miktarının ağır metale maruz kalan alanlarda olduğunu ifade etmişlerdir. Bu çalışmada da 50 ppm Cd stresinden sonra karetenoid miktarı azalmıştır.

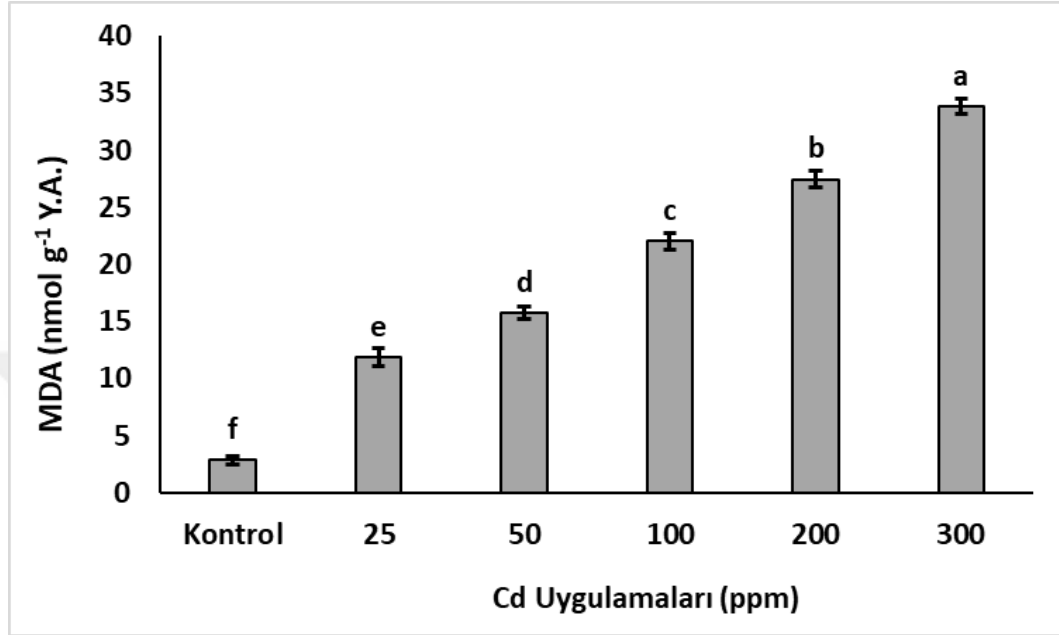
Denemede yapılan farklı dozlardaki Cd uygulamalarının bitki prolin içeriği istatistiksel olarak önemli bulunmuştur ($P<0.05$). Artan Cd stresi ile hardal bitkisinde prolin miktarını arttırdığı tespit edilmiştir (Şekil 4.4.).



Şekil 4.4. Farklı Cd uygulamalarının hardal bitkisinin prolin içeriğine etkisi. Barlar ortalama \pm standart hata ifade etmektedir, $P<0.05$

Yapılan birçok araştırmada Cd stresi ile prolin içeriğinin arttığı bildirilmiştir. Doğan (2019), Cd stresi altında yetiştirilen Rubygem çilek çeşidinde prolin miktarının arttığını tespit etmiştir. Yine irfan ve ark. (2014), *B. juncea* bitkisine farklı dozlarda uyguladıkları (0, 25, 50 ve 100 mg kg⁻¹) CdCl₂ stresinin bitkide prolin içeriğini arttırdığını bildirmiştir. Dinakar ve ark. (2008), Cd stresinde yer fıstığı (*Arachis hypogaea*) fidelerinde prolin düzeylerinin arttığını bildirmişlerdir. Benzer bulgular bu çalışmada da görülmüştür.

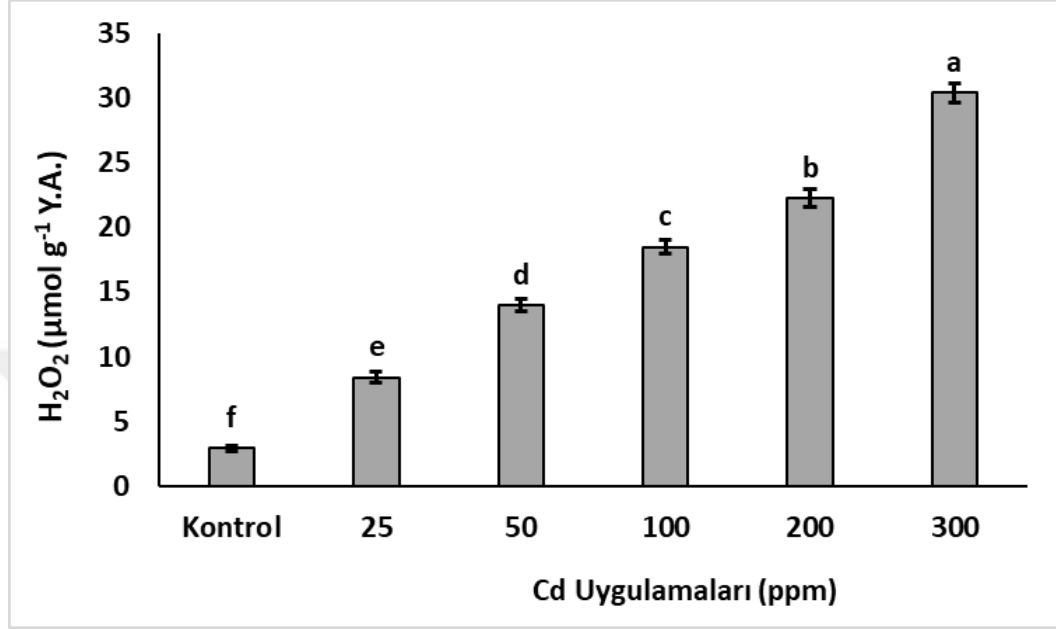
Farklı dozlardaki Cd uygulamalarının hardal bitkisi MDA içeriği istatistiksel olarak önemli bulunmuştur ($P < 0.05$). MDA içeriği Cd stresi artıkça artış göstermiştir (Şekil 4.5.).



Şekil 4.5. Farklı Cd uygulamalarının hardal bitkisinin MDA içeriğine etkisi. Barlar ortalama \pm standart hata ifade etmektedir, $P > 0.05$

Lipid peroksidasyonu sonucunda ortaya çıkan malondialdehit (MDA) bitkilerde artan Cd stresi ile artmaktadır (Dursun, 2012; Boysan Canal ve ark, 2018; Liu ve ark, 2019). Benzer MDA sonuçları bu çalışmada da görülmüştür.

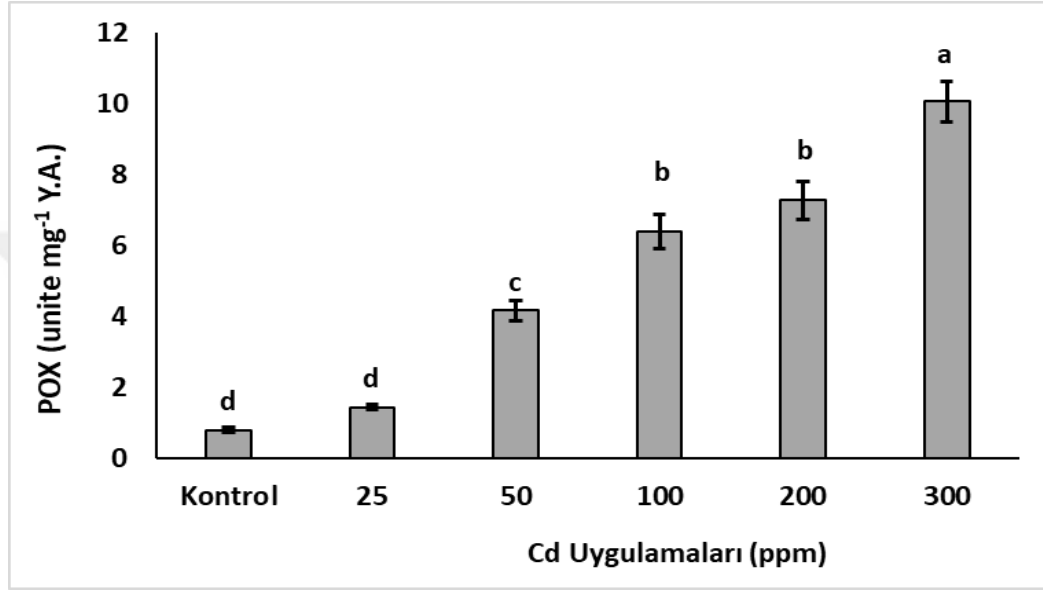
Denemede uygulanan farklı dozlardaki Cd uygulamalarının bitki H₂O₂ içeriği üzerine etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmuştur. Bitkide Cd stresi H₂O₂ içeriğinin artışına neden olmuştur (Şekil 4.6.).



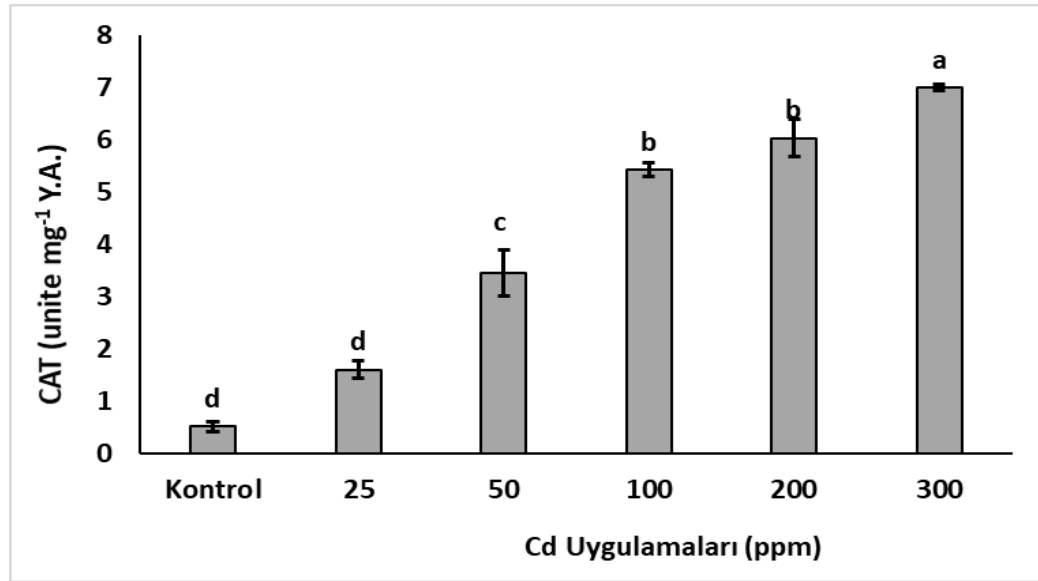
Şekil 4.6. Farklı Cd uygulamalarının hardal bitkisinin H₂O₂ içeriğine etkisi. Barlar ortalama ±standart hata ifade etmektedir, P<0.05

Karakas ve ark. (2021), kazayağı (*Carpobrotus acinaciformis*) bitkisine uygulanan farklı Cd dozları uygulanan Cd stresinin bitkide H₂O₂ miktarının artırdığını belirtmişlerdir. Benzer sonuçlar bu çalışmada da tespit edilmiştir.

POX ve CAT gibi antioksidan enzimler incelendiğinde artan Cd dozlarında her iki enzim içeriğinde artış görülmüştür. En yüksek enzim içeriği 300 ppm Cd uygulamasında belirlenmiştir. Kontrol ile kıyasla 300 ppm Cd uygulamasındaki antioksidant enzim içeriği POX'da 12.74 kat ararken, CAT'da 11 kat artış olduğu görülmüştür (Şekil 4.7. ve Şekil 4.8.).



Şekil 4.7. Farklı Cd uygulamalarının hardal bitkisinin POX antioksidant enzim aktivitesine etkisi. Barlar ortalama \pm standart hata ifade etmektedir, $P < 0.05$



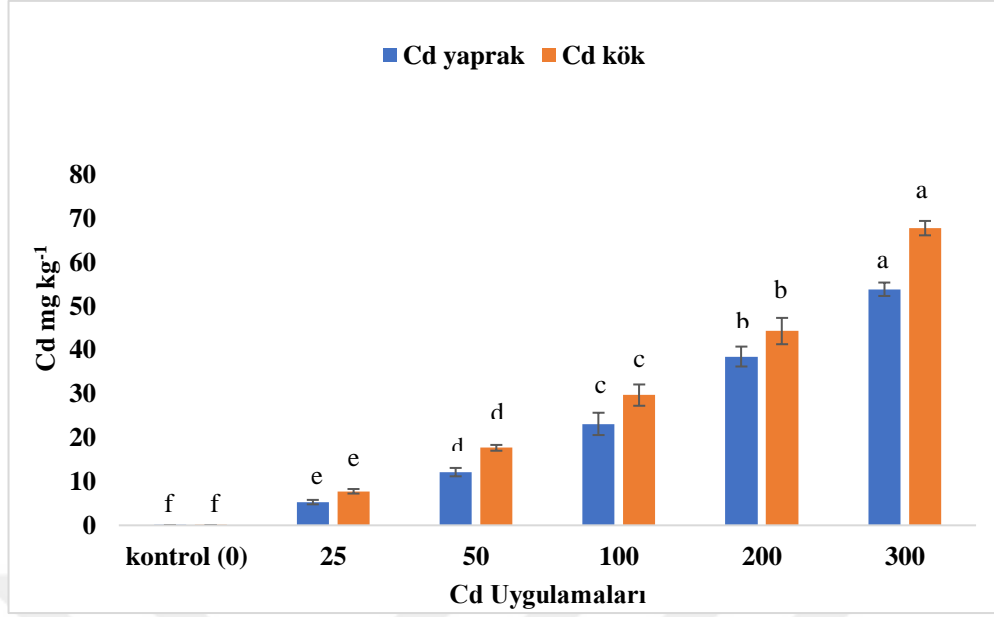
Şekil 4.8. Farklı Cd uygulamalarının hardal bitkisinin CAT antioksidant enzim aktivitesine etkisi. Barlar ortalama \pm standart hata ifade etmektedir, $P < 0.05$

Cd stresi bitkilerde oksidatif strese neden olur. Bu stresin etkisi radikal oksijen türlerinden (ROS) kaynaklanır. ROS'un zararlı etkilerinden bitki hücreleri antioksidatif enzimler sayesinde korunabilirler (Lakhdar ve ark, 2010). Ortamda bulunan Cd'un bitkide neden olduğu ROS türlerinden biri olan hidrojen peroksidin kontrolünde ve süpürülmesinde katalaz antioksidan enzimi önemli rol oynar (Martins ve ark., 2011). Boysan Canal ve ark (2018), Cd uygulamasının marul bitkisinde stresin etkisiyle CAT enzim aktivitesini artırdığı belirlenmiştir. Yine Yu ve ark (2013), artan Cd uygulamalarının pirinç (*Oryza sativa* L.) bitkisinde CAT enzim aktivitesini arttırdığını belirtmişlerdir. Bu çalışmada da benzer bulgular elde edilmiştir.

4.3. Yaprak ve Kök aksamı Cd Fitoekstraksiyonu

Ortamda artan Cd konsantrasyonu bitki organlarında Cd birikimini artırmıştır. Hardal bitkisi toprak üstü aksamı (gövde ve yaprak), ve kök aksamı Cd içeriği incelendiğinde en yüksek Cd miktarı 300 ppm Cd' a maruz kalan uygulamalarda bulunmuştur (Şekil 4.9.).

Metal iyonlar bitkinin kök, yaprak ve gövdelerinde birikebilir veya transpirasyon yoluyla yapraklardan dışarıya atılabilirler (Ximenez ve ark, 2002). Bitkinin kökleri, ağır metal taşınmasına karşı bir bariyer görevi görür ve bu köklerde işleyen potansiyel bir tolerans mekanizması olabilir (Bonnet ve ark, 2010). Artan Cd yeşil aksam ve kökte Cd miktarında artışa neden olarak bitki tarafından alınan Cd'un büyük oranının köklerde depolandığı, çok az bir oranın bitki yeşil aksamına taşındığını bildirmişlerdir (Tiryakioğlu ve ark, 2006). Cd hiperakümülyasyon'u, bitki aksamlarında (yapraklar ve gövdeler) kuru ağırlıkta 100 mg kg⁻¹ Cd fazla biriktirebilen bitki türleri olarak tanımlanmaktadır (Baker ve ark, 2000). Yapılan bu çalışmada hardal bitkisi Cd'u yaprak ve köklerinde biriktirerek toksik Cd elementi için iyi bir hiperakümülatör bitki olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.9. Farklı Cd uygulamalarının hardal bitkisinin yaprak ve kök aksamı Cd içeriğine etkisi. Barların ortalama \pm standart hata ifade etmektedir, $P < 0.05$

Trigonella foenum-graecum L. bitkisi Cd stresinde en fazla Cd'ü kök aksamında, en düşük ise yapraklarda biriktirmiştir (Tunçtürk ve ark, 2020). Benzer sonuçlar *Amaranthus tricolor* (Watanabe ve ark, 2009), *Brassica chinensis* (Liu ve ark, 2007), *Albus* (Zornoza ve ark, 2002) bitkileri için de yapılan çalışmalarla bulunmuştur. Bu çalışmada hardal bitkisi Cd'ü köklerinde daha fazla biriktirmiştir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Günümüzde en önemli çevre kirliliğinden biri ağır metal kirliliğidir. Kadmiyum düşük konsantrasyonlarında bile toksik olması ve yarılanma ömrünün oldukça uzun olması nedeniyle tarımsal alanda ciddi düzeyde zararlı bir ağır metal kirleticisidir. Kadmiyum bitki dokularında birçok fizyolojik, biyokimyasal strese neden olmaktadır. Ağır metal ile kirlenmiş ortamın hiperakümülatör bitkiler kullanarak arındırılması yöntemi fitoremediasyon (bitkisel iyileştirme) olarak adlandırılmaktadır. Fitoremediasyon teknolojisi fitoekstraksiyon, rizofiltrasyon fitostabilizasyon, fitodegradasyon, fitovolatilizasyon olarak sınıflandırılmaktadır. Cd stresinin ortamdaki uzaklaştırılmasında bitki kullanılarak, kirlenmiş ortamın arındırılması; ucuz, doğaya uygun, kolay uygulanabilir bir tekniktir.

Çalışmamızda bitkisel iyileştirme yöntemlerinden biri olan fitoekstraksiyon yöntemi uygulanmıştır. Bitki materyali hardal (*B. Juncea*), ağır metal stresi olarak farklı dozlardaki Cd (0, 25, 50, 100, 200 ve 300 ppm) kullanılmıştır. Hasat edilen hardal bitkisinde fizyolojik, biyokimyasal ve fitoekstraksiyon parametreleri araştırılmıştır. Elde edilen veriler incelendiğinde Cd stresinin bitki fizyolojik parametrelerinde azalmalara neden olduğu, biyokimyasal parametrelerinden Chl-a ve Chl-b artan Cd stresıyla azaldığı, karetenoid içeriğinin 50 ppm Cd uygulamalarına kadar artış gösterip ancak 100 ppm Cd stresinde karetenoid içeriğinin azaldığı belirlenmiştir. Yine biyokimyasal marker olan prolin, MDA ve H₂O₂ miktarlarında artış görülmüştür. POX ve CAT antioksidan enzim içerikleri de Cd stresini artıran miktarlarında artmıştır. Hardal bitkisi gerek yaprak ve gerekse kök aksamında olmak üzere Cd uygulamalarına bağlı olarak yüksek oranlarda Cd biriktirmiştir. Böylece fitoekstraksiyon yönteminde hiperakümülatör bitki olarak Cd ile kirlenmiş ortamlarda kullanılabileceği görülmüştür.

5.2. Öneriler

Hardal bitkisinin yaprak, kök gibi organlarında Cd biriktirerek bulunduğu ortamdan bu kirleticiyi uzaklaştırdığı açıkça görülmüştür. Bu bitki Cd ile kirletilmiş ortamın ıslahı mümkün olup, hiperakümülatör bitki olarak fitoekstraksiyon yönteminde önerilebilir. Yine hardal bitkisi ile diğer ağır metallerin ortamdan uzaklaştırılmasında bitkisel ıslah kapsamında önerilebilir. Fitoekstraksiyon olarak ağır metalin uzaklaştırılmasında kullanılan bu bitkinin insan ve hayvan sağlığı açısından gıda olarak tüketilmemesine, hasat sonrası bu bitkilerin uygun şekilde depolanmasına dikkat edilmelidir.

KAYNAKLAR

- AKINCI C.Y., YÜKSEK T. ve DEMİREL Ö., 2016. Ağır Metaller ile Kirlenmiş Toprağın İyileştirilmesinde Vetiver Grass (*Vetiveria zizanioides* (Linn.) nash) ve Solucanların Kullanılması. Süleyman Demirel Üniversitesi Mimarlık Bilimleri ve Uygulamaları Dergisi Araştırma makalesi MBUD 2016. 1(1):1-11. e-ISSN: 2548-0170.
- ALIZADEH, S. M., ZAHEDI-AMIRI, G., SAVAGHEBI-FIROOZABADI, G., ETEMAD, V., SHIRVANY, A. and SHIRMARDI, M., 2012. Assisted Phytoremediation of Cd-Contaminated Soil Using Poplar Rooted Cuttings. *International Agrophysics* 26, 219-224.
- ALTINÖZLÜ, H., KARAGÖZ, A., POLAT, T. ve ÜNVER, İ., 2011. Nickel Hyperaccumulation By Natural Plants İn Turkish Serpentine Soils. *Turk J Bot* 36: 269-280.
- AL-CHAMI Z., AMER N., AL-BITAR L. and 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: 3957-3970.
- ANJUM, N. A., GILL, S. S., GILL, R., HASANUZZAMAN, M. and TUTEJA, N., 2012. Mechanism Of Cadmium Toxicity And Tolerance İn Crop Plants. *Crop Improvement Under Adverse Conditions*, 17, 361-385.
- ASRİ, Ö.F., SÖNMEZ, S. ve ÇITAK, S., 2007. Kadmiyumun Çevre ve İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri. *Derim* 24. 1. 32-39p.
- AYBAR, M., BİLGİN, A. ve SAĞLAM, B., 2015. Fitoremediasyon Yöntemi ile Topraktaki Ağır Metallerin Giderimi. *Artvin Çoruh Üniversitesi Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*. Cilt:1 Sayı:1-2, 59-65.
- ARNON, D. L., 1949. A Copper Enzyme Is Isolated Chloroplast Polyphenol Oxidase In Beta Vulgaris. – *Plant Physiol* 24: 1-15.
- BABA, A., GÜNDÜZ, O., SAVE, D., GÜRDAL, G., SÜLÜN, S., BOZCU, M. ve ÖZCAN, H., 2009. Madencilik Faaliyetlerinin Tıbbi Jeoloji Açısından Değerlendirilmesi. 62. Türkiye Jeoloji Kurultayı. Ankara. 514-515.
- BHADKARIYA, R. K., JAIN V. K., CHAK G. P. S. and GUPTA S. K., 2014. Remediation Of Cadmium By Indian Mustard (*Brassica Juncea* L.) From Cadmium Contaminated Soil: A Phytoextraction Study. *International Journal of Environment*. DOI:10.3126/ije.v3i2.10533. ISSN 2091-2854.
- BAKER, A. M. J., MCGRATH, S. P., REEVES, R. D. and SMITH, J. A. C., 2000. Metal hyperaccumulator plants: A review of the ecology and physiology of a biochemical resource for phytoremediation of metal-polluted soil. In: *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water*. Eds. N Terry and G Ba nuelos, pp85–107. Lewis, Boca Raton, Florida.
- BANAVIDES, M.P., GALLEGO, S.M. and TOMARO M.L., 2005. Cadmium Toxicity In Plants, *Brazilian Journal Of Plant Physiology*, 17, 21-34.
- BARYLA, AP., CARRİER, F., FRANCK, C., COULOMB, C. and SAHUT, M., 2001. Havaux, Leaf Chlorosis in Oilseed Rape Plants (*Brassica Napus*) Grown on Cadmium-Polluted Soil: Causes And Consequences For Photosynthesis And Growth. *Planta* 212:696–709

- BATES, L. S., WALDREN, R. P. and TEARE, I. D., 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. – *Plant and Soil* 39: 205-207.
- BONNET, M., CAMARES, O. and VEÏSSEÏRE, P., 2010. Effects Of Zinc And İnfluence Of Acremonium Lolii On Growth Parameters, Chlorophyll A Fluorescence And Antioxidant Enzyme Activities Of Ryegrass (*Lolium Perenne* L. Cv Apollo). *Journal Of Experimental Botany* 51, 945-953.
- BOYSAN CANAL S. ve BOZKURT M.A., 2018. Kadmiyum Toksisitesine Karşı Demir Gübrelemesi ve Arıtma Çamurunun Marul (*Lactuca sativa* L. var. *longifolia*) Bitkisinin Gelişimine ve Antioksidatif Enzim Aktivitesine Etkisi. *YYÜ TAR BİL DERG (YYU J AGR SCI)* 2018, 28(1): 19-26.
- BROOKS, R.R., 1998. General Introduction. In: Brooks, R.R. (ed.). *Plants that hyperaccumulate heavy metals: their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration and phytomining*. CAB International, New York, pp. 1-14.
- CHEN, Y., LIU, M., DENG, Y., ZHONG, F., XU, B., HU, L., WANG, M.K. and WANG, G., 2017. Comparison Of Ammonium Fertilizers, EDTA, And NTA On Enhancing The Uptake Of Cadmium By An Energy Plant, Napier Grass (*Pennisetum Purpureum* Schumach). *J. Soils Sediments* 17, 2786.
- CVIKROVA, M., HRUBCOVA, M., VAGNER, M., MACHACKOVA, I. and EDER, J., 1994. Phenolic acids and peroxidase activity in Alfalfa (*Medicago sativa*) embryogenic cultures after ethephon treatment. – *Plant Physiological* 91(2): 226-233.
- DAĞHAN, H., KÖLELİ, N., UYGUR, V., ARSLAN, M., ÖNDER, D., GÖKSUN, V. ve AĞCA, N., 2012. Kadmiyum ile Kirlenmiş Toprakların Fitoekstraksiyonla Arıtımında Transgenik Tütün Bitkisinin Kullanımının Araştırılması. *Toprak Su Dergisi*; 1 (1): 1-6.
- DAS, P., SAMANTARAY, S. and ROUT, GR., 1997. Studies On Cadmium Toxicity In Plants: A Review. *Environ Pollut* 98:29–36.
- DELİL, A.D., YİMSEK, F.S. ve KÖLELİ, N., 017. Kadmiyum'un Kirlenmiş Topraklardan Edta Tuzlarıyla Ekstraksiyonu ve Spesiasyonu (Türlendirmesi). *Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*. Cilt 19, Sayı 56. DOI: 10.21205/Deufmd2017195638.
- DE SOUZA COSTA, E. T., EUZELINA DOS SANTOS, B. I., DA COSTA SEVERIANO, E., and HALE, B. A., 2012. “Assessing The Tolerance of Castor Bean to Cd and Pb For Phytoremediation Purposes”, *Biol Trace Element Res*,145(1):93-100.
- DINAKAR N, NAGAJYOTHI, PC., SURESH, S., UDAYKIRAN, Y., and DAMODHARAM, T., 2008. Phytotoxicity of Cadmium On Protein, Proline and Antioxidant Enzyme Activities in Growing *Arachis Hypogaea* L. Seedlings. *Environ Sci* 20:199–206.
- DOĞAN, M., 2019. Çilekte Kadmiyum Toksitesi Altındaki Bitkiler Üzerine Hümik Asit ve Silikonun Etkilerinin İncelenmesi/Investigation On The Effects Of Humic Acid and Silicon Under Cadmium Stress İn Strawberry (Doctoral Dissertation).
- DOĞANLAR, Z.B. ve ATMACA, M., 2011. Influence Of Airborne Pollution On Cd, Zn, Pb, Cu, and Al Accumulation And Physiological Parameters Of Plant Leaves In Antakya (Turkey). *Water Air Soil Pollut* 214:509–523.

- DURŞUN, B., 2012. Salisilik Asit Uygulanmış Nohut (*Cicer Arietinum L.*) Fidelerinde Kadmiyumun Yarattığı Fizyolojik ve Biyokimyasal Değişiklikler. Fırat Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. Biyoloji Anabilim Dalı. Yüksek Lisans Tezi, 41s.
- GERARD, E., ECHEVARRIA, G., STERCKEMAN, T. and MOREL, JL., 2000. Cadmium Availability to Three Plant Species Varying in Cadmium Accumulation Pattern. *J Environ Qual* 29(4): 1117-1123.
- GOYER, R. A., 1991. Toxic Effects Of Metals. In: Caserett And Doull's Toxicology. The Basic Science Of Poisons (Eds. Amdur M. O., Doull, J., Klaassen, C. D.) Pergamon Press. New York. 1032.
- IRFAN M, AHMAD A. and HAYAT S., 2014. Effect Of Cadmium On The Growth And Antioxidant Enzymes In Two Varieties Of Brassica Juncea. *Saudi J. Biol. Sci*, 21 (2014), pp. 125-131.
- IŞIK, K., 2004. Bitki Biyolojisi, Palme Yayıncılık, Ankara.
- JOHN, R., AHMAD, P., GADGIL, K. and SHARMA, S., 2009. Cadmium and Lead-Induced Changes in Lipid Peroxidation, Antioxidative Enzymes and Metal Accumulation In Brassica Juncea L. At Three Different Growth Stages, *Archives of Agronomy And Soil Science*, 55:4, 395-405.
- KABATA-PENDIAS, A. and PENDIAS, H. 1992. Trace Elements In Soils and Plants. and Edition. Crc Press, Baton Rouge.
- KACAR, B. ve İNAL, A., 2008. Bitki analizleri. Nobel Yayın Dağıtım., 891 s., Ankara.
- KARANLIK, S., ERGÜN N. ve TİRYAKİOĞLU M., 2013. Farklı Kadmiyum Düzeylerinin Pamuk Bitkisinde (*Gossypium hirsutum L.*) Büyüme, Cd, Fe, Zn Konsantrasyonu ve Antioksidatif Enzim Aktiviteleri Üzerine Etkisi. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi* 6 (2): 83-88, 2013 Issn: 1308-3945, E-Issn: 1308-027x. www.Nobel.Gen.tr.
- KARAKAS, S., DIKİLİTAS M. ve AKKURAK H., 2021. Biochemical and DNA damage responses of hydroponically grown Elands sourfig (*Carpobrotus acinaciformis L.*) leaves to cadmium stress conditions. *Applied Ecology and Environmental Research* 19(4):2649-2666.
- KARAKAS, S., 2013. Development Of Tomato Growing in Soil Differing in Salt Levels and Effects of Companion Plants on Same Physiological Parameters and Soil Remediation. Phd, University Of Harran, Sanlıurfa, Turkey.
- KIRKHAM, M. B., 2006. Review:Cadmium in Plants on Polluted Soils: Effects of Soil Factors, Hyperaccumulation, and Amendments. *Geoderma*. 137: 19–32
- KÖLELİ, N. ve KANTAR, Ç., 2005. Fosfat Kayası, Fosforik Asit ve Fosforlu Gübrelerdeki Toksik Ağır Metal (Cd, Pb, Ni, As) Konsantrasyonu. *Ekoloji Dergisi*. 14(55).
- LACKHDAR, A., LANELLI, MA., DEBEZ, AM., JEDIDI, N. and ABDELLY, C., 2010. Effect Of Municipal Solid Waste Compost and Sewage Sludge Use on Wheat (*Triticum durum*): Growth, Heavy Metal Accumulation, and Antioxidant Activity. *J. Sci. Food Agric*. 90:965-971. DOI:10.1002/Jsfa.3904.
- LAGHLIMI, M., BAGHDAD, B., EL HADI, H. and BOUABDLI, A., 2015. "Phytoremediation Mechanisms Of Heavy Metal Contaminated Soils: A Review". *Open Journal Of Ecology*, 5: 375-388.
- LI, S., ZHANG, G., GAO, W., ZHAO, X., DENG, C. and 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.
- LIU, C. P., SHEN, Z. G. and LI, X. D. 2007. Accumulation And Detoxification Of Cadmium in Brassica pekinensis and *B. chinensis*. *Biologia plantarum*, 51(1), 116-120.
- LIU S., ALI S., YANG R., TAO R. and REN B., 2019. A newly discovered Cd-hyperaccumulator *Lantana camara* L., *Journal of Hazardous Materials* 371(2019) 233–242. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.03.016>.
- LORETO, F. and VELIKOVA, V., 2001. Isoprene Produced By Leaves Protects the Photosynthetic Apparatus Against Ozone Damage, Quenches Ozone Products, and Reduces Lipid Peroxidation of Cellular Membranes. *Plant Physiology*, 127(4), 1781-1787.
- LYONS-ALCANTARA, M., TARAZONA, J.V. and MOTHERSILL, C., 1996. The Differential Effect of Cadmium Exposure on the Growth and Survival of Primary and Established Cells From Fish and Mammals. *Cell Biol. And Toxicol.* 12: 29-38.
- MARTINS, G., MARQUES, T. C. L. L. D. S., SOARES, A. M. and GOMES, M. P., 2011. Respostas Fisiológicas E Anatômicas De Plantas Jovens De Eucalipto Expostas Ao Cádmiu. *Revista Árvore*, 35, 997-1006.
- MILOSEVIC, N. and SLUSARENKO, A. J., 1996. Active Oxygen Metabolism and Lignifications in The Hypersensitive Response in Bean. – *Physiological and Molecular Plant Pathology* 49: 143-158.
- NIESS, D.H., 1999. Microbial Heavy-Metal Resistance, *Applied Microbiology and Biotechnology*. 51, 730-750.
- OLIVARES, A. R., CARRILLO-GONZÁLEZ, R., GONZÁLEZ-CHÁVEZ, M. D. C. A. and HERNÁNDEZ, R. M. S., 2013. “Potential Of Castor Bean (*Ricinus communis* L.) For Phytoremediation of Mine Tailings and Oil Production”. *Journal of Environmental Management*. 114, 316-323.
- ÖNDER, S., 2012, Atıksular ile Sulanan Zirai Alanlardaki Ağır Metal Kirliliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Konya. 3-4-11-17-24-25.
- ÖZAY, C., ve MAMMADOV, R., 2013. Ağır Metaller ve Süs Bitkilerinin Fitoremediasyonda Kullanılabilirliği. *BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi Cilt 15(1)* 67-76.
- ÖZBEK, K., CEBEL, N. ve ÜNVER İ., 2013. Extractability and Phytoavailability of Cadmium in Cd-Rich Pedogenic Soils. *Turk J Agric For* 38: 70- 79.
- ÖZBEK, K., 2015. Hiperakümülyasyon ve Türkiye Florasındaki Hiperakümülatör Türler. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi* 3 (1) 37 – 43.
- ÖZYÜREK, T., 2016. Cyclic fatigue resistance of Reciproc, WaveOne, and WaveOne Gold nickel-titanium instruments. *Journal of endodontics*, 42(10), 1536-1539.
- RAJPUT, R. D. and PATİL, R. P., 2017. The Comparative Study on Spectrophotometric Analysis of Chlorophyll and Carotenoids Pigments from Non-Leguminous Fodder Crops. *International Journal of Innovative Science, Engineering Technology*, 4,7, 140-148.
- RASCIO, N. and NAVARI-IZZO, F., 2011. Heavy Metal Hyperaccumulating Plants: How and Why Do They Do it and What Makes Them So Interesting. *Plant Science* 180 (2): 169–181.

- RASKIN, I., KUMAR, N., DUSHENKOV, S. and SALT, D., 1994. Bioconcentration of metals by plants, *Current Opinion in Biotechnology*, 5, 285-290.
- SAFARZADEH, S., RONAGHI A. and KARIMIAN N., 2013. Effect of Cadmium Toxicity on Micronutrient Concentration, Uptake and Partitioning in Seven Rice Cultivars. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59:2, 231-245.
- SAIRAM, R. K. and SEXENA, D., 2000. Oxidative Stress and Antioxidants in Wheat Genotypes: Possible Mechanism of Water Stress Tolerance. – *Journal of Agronomy and Crop Science* 184: 55-61.
- SHANKER, A.K., CERVANTES, C., LOZA-TAVERA, H. and AVUDAINAYAGAM, S., 2005. Chromium Toxicity in Plants, *Environment International*. 31, 739-753.
- SEVEN T., CAN, B., DARENDE, B.N. ve OCAK, S., 2018. Hava ve Toprakta Ağır Metal Kirliliği. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*. Sayı 1(2): 91-103.
- SIDDIQUI, H., MUKHTAR AHMED, K.B., SAMI F. and HAYAT, S., 2020. Phytoremediation of Cadmium Contaminated Soil Using *Brassica juncea*: Influence on PSII Activity, Leaf Gaseous Exchange, Carbohydrate Metabolism, Redox and Elemental Status. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 105:411–421 <https://doi.org/10.1007/s00128-020-02929-3>.
- SINGH, A., EAPEN, S. and FULEKAR, M. H., 2008. Potential of *Medicago Sativa* For Uptake of Cadmium From Contaminated Environment. *Romanian Biotechnological Letters* 14 (1), 4164-4169.
- THOMPSON, L., 1997. Exciting Environmental Technologies. *Tiras M* (2009). Türkiye’de kanola tarımı. *Doğu Coğrafya Dergisi*, 14(21), 159-172.
- TİRYAKIOĞLU, M., EKER, S., OZKUTLU, F., HUSTED, S. ve CAKMAK, I., 2006. Antioxidant defense system and cadmium uptake in barley genotypes differing in cadmium Tolerance. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 20(3), 181-189.
- TOPDEMİR, A., GÜR, N. ve KOÇAK, K., 2015. “Çeşitli Ağır Metallerin (Cu, Pb, Hg, Cd) *Malus sylvestris Miller* (Elma) ve *Cerasus vulgaris Miller* (Vişne) Bitkisi Polenlerinin Çimlenmesi ve Tüp Büyümesi Üzerine Etkileri” *Anadolu Doğa Bilimleri Dergisi*. 6: 108-112.
- TUNÇTÜRK, R., TUNÇTÜRK, M. ve NOHUTÇU, L., 2020. Kadmiyum Stresi Altında Yetiştirilen *Trigonella foenum-graecum L.* Bitkisinin Bazı Büyüme ve Fizyolojik Parametrelerinin İncelenmesi. *ÇOMÜ Zir. Fak. Derg. (COMU J. Agric. Fac.)* 2020: 8 (2): 455–464 ISSN: 2147–8384 / e-ISSN: 2564–6826 doi: 10.33202/comuagri.741782.
- TÜRKOĞLU, B. 2006. Toprak Kirlenmesi ve Kirlenmiş Toprakların İslahı. Yüksek Lisans Tezi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Adana.
- VANLI, Ö. ve YAZGAN, M., 2008. Ağır Metallerle Kirlenmiş Toprakların Temizlenmesinde Fitoremediasyon Tekniği. <http://www.tarimsal.com/fitoremediasyon/fitoremediasyon.htm>.
- VOGLAR, D., and LESTAN, D. 2013. Pilot-Scale Washing Of Pb, Zn and Cd Contaminated Soil Using EDTA and Process Water Recycling. *Chemosphere*. Cilt.91,S.7682.DOI:10.1016/J.Chemosphere.2012.12.016.
- WATANABE, T., MURATA, Y. and OSAKI, M., 2009. *Amaranthus Tricolor* Has

- the Potential for Phytoremediation of Cadmium-Contaminated Soils. Communications in soil science and plant analysis, 40(19-20), 3158-3169.
- XIMENEZ, P., RODRIGUEZ, B., MADRID, B. and CAMARA, C., 2002. Uptake of heavy metals by lupin plants in artificially contaminated sand: preliminary results. International Journal of Environmental Analytical Chemistry 82, 805-813.
- YILDIRIM D., 2016. Fitoremediasyon Sonrası Yabani Hint Yağı (*Ricinus comimnus*) ve Aspir (*Carthamus tinctorius*) Bitkilerinin Biyokütlesinden Toksik Metallerin Elektrokimyasal Yöntemle Giderimi ve Geri Kazanımı. Yüksek Lisans Tezi. Mersin Üniversitesi.
- YINGANG, L., JUN, M., YING, T., JUNYU, H., CHRISTIE, P., LINGJIA, Z., WENJIE, R., MANYUN, Z. and DENG, S., 2018. Effect of Silicon on Growth, Physiology, and Cadmium Translocation of Tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) in Cadmium-Contaminated Soil. Pedosphere, 28(4): 680–689.
- YİMSEK, F.S., 2007. Kadmiyum İle Kirlenmiş Toprakta Cd (Iı) İyonlarının Yıkanması ve Elektrokimyasal Olarak Gideriminin Araştırılması. Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı. Yüksek Lisans Tezi.
- YU, F., LIU, K., LI, M., ZHOU, Z., DENG, H. and CHEN, B., 2013. Effects of Cadmium on Enzymatic and Non-Enzymatic Antioxidative Defences of Rice (*Oryza sativa* L.), International Journal of Phytoremediation, 15:6, 513-521.
- YOST, K.J. and MILES, L.J. 1979. Journal of Environmental Science and Health A. 14: 285-311.
- YUREKLI, F. ve PORGALI, Z., 2006. The Effects of Excessive Exposure To Copper in Bean Plants. Acta Biol Cracoviensia Ser Bo 48:7–13.
- ZHANG, H., DANG, Z., ZHENG, L. C. and YI, X. Y., 2009. Remediation of Soil Co-Contaminated With Pyrene and Cadmium By Growing Maize (*Zea mays* L.). International Journal of Environmental Science and Technology 6(2), 249-258.
- ZORNOZA, P., VÁZQUEZ, S., ESTEBAN, E., FERNÁNDEZ-PASCUA, M. and CARPENA, R., 2002. Cadmiumstress in Nodulated White Lupin: Strategies to Avoid Toxicity. Plant Physiology and Biochemistry 40, 1003-1009.