



Kadmiyum Toksisitesinin Adaçayı (*Salvia officinalis* L.) Bitkisinin Bazı Fizyolojik ve Biyokimyasal Özelliklerine Etkisi

Sema KARAKAŞ DİKİLİTAŞ¹, Ferhat UĞURLAR^{1*}

¹ Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Şanlıurfa

*Sorumlu Yazar (Corresponding author): ferhatugurlar@gmail.com

Özet

Yetiştirme ortamındaki yüksek seviyede bulunan kadmiyum (Cd) bitkilerde fizyolojik bozulmalara neden olup bitki gelişimini olumsuz etkilemektedir. Bu çalışmada, farklı Cd dozlarında (0 (kontrol), 100 ve 200 ppm) yetiştirilen Adaçayı (*Salvia officinalis* L.) bitkisinin fizyolojik, oksidatif stres belirteçleri ile antioksidan enzim aktiviteleri incelenerek bitkinin Cd stresine karşı gösterdiği tepki ve tolerans belirlenmiştir. Cd uygulaması yapılan bitkilerin gelişimi incelendiğinde kontrole kıyasla gövde ve kök yaş ve kuru ağırlıkları önemli ölçüde azalmıştır. Özellikle 200 ppm Cd uygulaması, bitki kuru ağırlığında % 79, kök kuru ağırlığında ise % 58 oranında azalmaya neden oldu. Yüksek seviyede Cd uygulaması, kontrole kıyasla klorofil a, klorofil b ve karotenoid içeriğini sırasıyla % 44, % 65 ve % 54 oranında düşürdü. Ayrıca yaprak bağıl su içeriği kontrole kıyaslandığında 100 ppm Cd ile % 15 ve 200 ppm Cd uygulaması ile % 33 oranında azaldı. Oksidatif stresin önemli göstergeleri olan hidrojen peroksit, malondialdehit ve elektrolit sızıntısı seviyeleri, Cd uygulamaları ile önemli artış gösterdi ve bu parametrelerde maksimum değerler 200 ppm Cd uygulamasında elde edildi. 200 ppm Cd antosiyanin içeriğini % 115, fenolik madde içeriğini ise % 47 oranında arttırdı. Ayrıca bitkilerin Cd ile muamele edilmesi antioksidan enzim aktivitelerinde önemli değişikliklere neden oldu. 200 ppm Cd ile muamele edilen bitkilerin, peroksidaz (1.8 kat) ve katalaz (3.1 kat) aktivitelerinde artış gözlemlenirken, askorbat peroksidaz aktivitesinde önemli bir azalma kaydedilmiştir. Bu çalışma, adaçayı bitkisinin Cd toksisitesine karşı gösterdiği fizyolojik ve biyokimyasal tepkilerini ortaya koymuş ve sonuçlar adaçayı bitkisinin 100 ppm düzeyindeki Cd'ya karşı direnç gösterdiğine işaret etmektedir. Çalışma Cd ile kirlenmiş topraklarda adaçayı bitkisinin ıslah materyali olarak kullanılmasında önemli bilgiler sunmaktadır.

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi

Geliş Tarihi :05.08.2024
Kabul Tarihi :20.09.2024

Anahtar Kelimeler

Cd toksisitesi
adaçayı
oksidatif stres
antioksidan enzimler

Effect of Cadmium Toxicity on Some Physiological and Biochemical Properties of the Sage Plant (*Salvia officinalis* L.)

Abstract

High cadmium (Cd) levels in the growing environment cause physiological deterioration in plants and negatively affect plant development. In this study, physiological, oxidative stress indicators and antioxidant enzyme activities of Sage (*Salvia officinalis* L.) plants grown at different Cd doses (0 (control), 100, and 200 ppm) were examined to determine the plant's response and tolerance to Cd stress. When the development of plants treated with Cd was discussed, the fresh and dry weights of stems and roots were significantly reduced compared to the control. Specifically, applying 200 ppm Cd resulted in a 79 % reduction in plant dry weight and a 58 % reduction in root dry weight. Application of high Cd concentrations decreased chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoid contents by 44 %, 65 %, and 54 %, respectively, compared to the control. Furthermore, the relative water content of leaves decreased by 15 % at 100 ppm Cd and 33 % at 200 ppm Cd compared to the control. The levels of hydrogen peroxide, malondialdehyde, and electrolyte leakage, which are important indicators of oxidative stress, showed a significant increase with Cd applications. The maximum values of these parameters were achieved with a Cd dose of 200 ppm. 200 ppm Cd increased anthocyanin content by 115 % and phenolic content by 47 %. Furthermore, Cd treatment of plants resulted in significant changes in the activities of antioxidant enzymes. While an increase in peroxidase (1.8-fold) and catalase activities (3.1-fold) was observed in plants treated with 200 ppm Cd, a significant decrease in ascorbate peroxidase activity was observed. This study revealed the physiological and biochemical responses of sage to Cd toxicity and the results suggest that sage is resistant to 100 ppm Cd. The study provides important insights into the use of sage as a remediation material in Cd-contaminated soils.

Research Article

Article History

Received :05.08.2024
Accepted :20.09.2024

Keywords

Cd toxicity
sage
oxidative stress
antioxidant enzymes

1. Giriş

Tarım alanlarındaki topraklar hatalı gübreleme, yoğun pestisit kullanımı, kirli sulama suları ve endüstriyel atıklar nedeniyle ağır metallerle kirlenmektedir (Abd Elnabi ve ark., 2023). Bitkilerin optimum büyüme ve gelişmesi için gerekli bir besin elementi olmayan ağır metallerin yüksek konsantrasyonları bitkilerde fitotoksititeye neden olmaktadır. Ağır metallerin bitkiler üzerindeki toksik etkileri, metalin cins ve miktarına, bitkinin türüne, toleransına, maruz kalma süresine bağlı olarak değişmektedir (Yadav, 2010). Bitki dokularında yüksek oranda biriken ağır metaller bitkide, fotosentez ve klorofil sentezini, enzim aktivitesini ve iyon dengesini olumsuz etkilenmektedir. Ağır metaller bitkide membran hasarına, su ve hormon dengesinin bozulmasına neden olur; hücre büyümesi durur, kök ve sürgün gelişimi azalır. Stoma hareketleri ve yaprak alanı etkilenir, klorofil sentezi azalır, genç yapraklarda kıvrılma ve sararma gözlenir. Kök gelişimi azaldığından, bitkinin iyon alımı ve beslenmesi olumsuz etkilenir (Goyal ve ark., 2020; Karakas ve ark., 2021b).

Ağır metallerden biri olan kadmiyum (Cd), doğada saf halde bulunmayan, topraklarda hareketliliği nedeniyle bitkiler tarafından kolayca alınan, uzun yarılanma ömrü olup ve çok düşük konsantrasyonlarda bile son derece toksik olan önemli bir kirleticidir (Beduk ve ark., 2022; Li ve ark., 2023). Cd, özellikle fosforlu gübreler veya antropojenik kaynaklar yoluyla topraklara bulaşmaktadır. Yetiştirme ortamında artan Cd konsantrasyonu, bitki klorofil içeriğini, besin elementi alımını olumsuz etkileyerek bitki büyüme ve gelişimini sınırlandırmaktadır (Shafiq ve ark., 2019; Shiyu ve ark., 2020; Haider ve ark., 2021). Ayrıca gelişme ortamındaki Cd'un hafif bir artışı azot metabolizması (Shahid ve ark., 2019) ve karbonhidrat metabolizmasını da olumsuz etkilemektedir (Sabir ve ark., 2019).

Yetiştirme ortamında bulunan Cd bitkilerde oksidatif strese neden olan reaktif oksijen türlerinin oluşumuna (ROT) yol açar (Kanu ve ark., 2019; Jawad Hassan ve ark., 2020; Wu ve ark., 2020). Stres altında üretilen bu ROT'lar,

çekirdek, proteinler, zarlar ve metabolitler gibi farklı hücre yapısının zarar görmesine neden olur ve sonuç olarak bitkilerde hücre ölümüne yol açar (Hussain ve ark., 2019; Xie ve ark., 2019). Bitkiler ROT'ların olumsuz etkileri ile başa çıkmak için katalaz, peroksidaz, süperoksit dismutaz ve askorbat peroksidaz gibi enzimatik antioksidanlar ile antosiyaninler, askorbik asit, karotenoidler, tokoferoller, indirgenmiş glutatyon (GSH), flavonoidler ve fenolik bileşikler gibi enzimatik olmayan antioksidanlar içeren kompleks bir savunma mekanizmasına sahiptir. Bitkilerde stres toleransı bu antioksidanları yüksek aktivite/seviyesi ile yakından ilişkilidir.

Adaçayı (*Salvia officinalis* L.) tıbbi ve aromatik bitkiler grubunda yer alan, çok yıllık, yaprak dökmeyen ve çalimsı bir bitkidir. Doğada kendiliğinden de yetişebilen bu bitki, günümüzde ülkemizin yanı sıra orta Avrupa, Arnavutluk ve Amerika'da yetişmektedir. Bu çalışmada; farklı dozlarda Cd (0, 100 ve 200 ppm) uygulamasının Adaçayı bitkisi üzerindeki fizyolojik ve biyokimyasal etkiler incelenerek bitkinin Cd stresine göstermiş olduğu toleransı bitki büyüme parametreleri, fotosentetik pigmentler, oksidatif stres belirteçleri ve antioksidan enzim aktiviteleri ile ortaya konmuş, böylece yüksek dozdaki Cd stresine karşı bitkinin tolerans durumu belirlenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışma Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesinde yarı kontrollü cam serasında yürütülmüştür. Adaçayı bitki (*Salvia officinalis* L.) tohumları Torf ve Perlit karışımı ortamda çimlendirilmiştir. Harran Üniversitesi Ziraat Fakültesi AR-GE alanından alınan topraklar kullanılmıştır. Araştırma toprağının özellikleri Tablo 1'de belirtilmiştir. Alınan topraklar kurutulup elendikten sonra 1.3 kg tartılarak 1.5 L kapasiteli plastik saksılara aktarılmıştır. Çimlenen bitkiler 4-5 yapraklı fide durumuna geldiğinde her bir saksıya bir fide aktarılmıştır. Temel gübreleme için 100 ppm N (Üre) ve 50 ppm P (KH₂PO₄) uygulanmıştır. Farklı dozlardaki Cd uygulamaları için CdCl₂ kaynağından

hazirlanan 0 ppm (kontrol), 100 ppm ve 200 ppm Cd iceren sulama sulari hazirlanmis ve ilgili saksilara haftada 3 kez sulanmistir. Bitkilerde uygulamadan 4 hafta sonra

sonlandirilmistir. Cd etkisi ve toleransini belirlemek icin bitkide bazı fizyolojik ve biyokimyasal analizler yapilmistir.

Tablo 1. Arastirma topraginin genel ozellikleri ve Cd iceriği

Derinlik	EC (dS m ⁻¹)	pH	Bünye	Kireç (%)	OM (%)	Cd (mg kg ⁻¹)
0-30	1.18	7.75	Kil	23.45	0.73	0.035

2.1. Bitki yaş ve kuru ağırlığı

Hasat edilen Adaçayı bitki üst kısmı (dal yaprak) ve köklerin taze ağırlıkları hassas teraziye belirlenmiştir. Bitkilerden eşit miktarda alınan taze örnekler biyokimyasal özellikleri incelenmek üzere (-20 °C) muhafaza edilmiştir. Geri kalan bitki kısımları 70 °C’de etüvde 72 saat bekletildikten sonra kuru ağırlıkları kaydedilmiştir (Karakas, 2013).

2.1. Yaprak bağıl su içeriği

Taze bitki yapraklarının taze ağırlığı (TA) alındıktan sonra aynı bitki yaprakları 6 saat süresince petri kaplarında deiyonize su içinde bekletilmiş ve yaprakların turgorlu ağırlıkları (TA) alınmıştır. Daha sonra aynı yapraklar 70 °C’ de 72 saat kurutulduktan sonra kuru ağırlıkları (KA) alınmış ve yaprak bağıl su içeriği (RWC) denklem 1 ile hesaplanmıştır (Bars ve Weatherley, 1962).

$$\%RWC = \frac{TA - KA}{TA - KA} \times 100 \quad \text{Denklem 1}$$

2.2. Bitkilerde klorofil ve karotenoid analizi

Adaçayı bitkisi klorofil a, klorofil b içerikleri Arnon (1949), karotenoid Rajput ve Patil (2017) tarafından önerilen yöntemler dikkate alınarak belirlendi. Taze Adaçayı yaprağı (0.5 g) 5 ml % 80 aseton:su (v/v) karışımında homojenize edilen örnekler filtreden geçirildikten sonra karışımın Klorofil a içeriği 663.5 nm, klorofil b içeriği 645 nm, karotenoid içeriği 480 nm ve 510 nm dalga boyunda % 80 aseton kontrolüne karşı UV mikropla te spektrometrede (Epoch, SN: 1611187, ABD) absorbans değerleri belirlenmiştir. Sonuçlar mg g⁻¹ taze ağırlık olarak ifade edilmiştir.

2.3. Oksidatif stres ile ilişkili parametrelerin belirlenmesi

Taze bitki yaprakları % 0.1 trichloroasetik asit (TCA) ile homojenize edilmiş ve 10.000 g’de 5 dakika süreyle santrifüj edilmiştir. Lipid peroksidasyonu (MDA) için homojenat’dan (1000 µl) alınarak yeni bir tüpe aktarılmış ve üzerine 4 ml % 20 TCA ile hazırlanmış % 5’lik tiyobarbiturik asit eklenmiştir. Karışım 30

dakika 95 °C sıcak su banyosunda bekletilmiş ve ardından buz banyosunda soğutulmuştur. Karışım 532 nm ve 600 nm’deki dalga boylarında UV mikroplate spektrometre ile absorbansları belirlenmiştir. Sonuçlar MDA nmol g⁻¹ taze ağırlık olarak belirtilmiştir (Karakas ve ark., 2021a; Weisany ve ark., 2012). Bitki Hidrojen peroksit (H₂O₂) seviyesi Loreto ve Velikova (2000) yöntemi ile küçük değişiklikler yapılan Karakas ve ark. (2021a) ile belirlenmiştir. Yaprak örnekleri (0.5 g) 5 mL % 0.1 TCA ile ekstre edildi. Ekstraktan 0.5 ml alınarak, üzerine 0.5 ml 10 mmol L⁻¹ K-fosfat tampon (pH 7.0) ve 1.5 ml 1 M KI ilave edilerek karışımın absorbans değerleri 390 nm’ de UV mikroplate spektrofotometresinde belirlendi. Sonuçlar µmol g⁻¹ taze ağırlık olarak ifade edildi. Elektrolit sızıntısı (% ES) için 0,1 g yaprak 10 ml deiyonize su içeren tüplere aktarıldı. Tüpler 32 °C 2 saat inkübasyona bırakıldıktan sonra EC1 ölçüldü. Bu aşamadan sonra 121 °C 20 dk. Bekletildikten sonra EC2 ölçüldü ve sonuçlar EC/EC2*100 formülü ile hesaplandı (Dionisio-Sese ve Tobita, 1998).

2.4. Antioksidan enzim aktivitesinin tayini

Peroksidaz (POD) enzim aktivitesi (E.C.1.11.1.7), bazı küçük düzenlemeler ile (Karakas ve ark., 2021b) Cvikrova ve ark. (1994) yöntemi kullanılarak belirlendi. Taze yaprak örnekleri (0.5 g) 10 mL 50 mmol L⁻¹ Na-fosfat tampon çözeltisinde (pH 7.0) homojenize edildi. Daha sonra, 10 µL süpernatant (50 mmol L⁻¹ Na-fosfat, 13 mmol L⁻¹ guaiacol ve 5 mmol L⁻¹ H₂O₂) içeren 290 µL reaksiyon karışımına eklendi ve bir dakikalık aralıklarla 470 nm'de UV mikroplate spektrofotometrede absorbansları belirlendi. Sonuçlar ünite mg⁻¹ T.A. olarak belirtildi. Katalaz (CAT) enzim aktivitesi (EC 1.11.1.6), Aebi (1984) yönteminde yapılan küçük değişiklikler (Karakas ve ark., 2021b) ile belirlendi. Analiz için, yukarıda elde edilen homojenat 5 µL alınarak 50 mmol L⁻¹ Na-fosfat tamponu, 10 mmol L⁻¹ H₂O₂ ve 4 mmol L⁻¹ Na₂EDTA içeren 295 µl reaksiyon karışımına eklendikten sonra 30 saniye süresince 240 nm'de UV mikroplate spektrofotometrede absorbansları belirlendi. Sonuçlar ünite mg⁻¹ T.A. olarak belirtildi. Askorbat peroksidaz (APX) enzim aktivitesinin belirlenmesinde Nakano ve Asada (1981) tarafından bildirilen prosedür uygulanmıştır. Reaksiyon karışımının (10 µl süpernatant, 50 mmol L⁻¹ K-fosfat, 0,5 mmol L⁻¹ H₂O₂, 500 µmol L⁻¹ askorbik asit ve 1 mmol L⁻¹ EDTA) 290 nm'deki absorbans değişimi 3 dakika boyunca ölçüldü. Enzim aktivitesi askorbatın ekstinksiyon katsayısı kullanılarak hesaplandı (2.8 mM⁻¹ cm⁻¹).

2.5. Antosiyanin ve fenolik madde içeriğinin belirlenmesi

Antosiyaninin belirlenmesi için 0.3 g taze bitki yaprağı üzerine 10 ml metanol (% 1 HCl içerir) ilave edilerek +4 °C 24 saat inkübasyona bırakıldı. İnkübasyon sonunda 10000 rpm'de santrifüj edilen örnekler 530 ve 657 nm spektrofotometrede absorbansları

belirlendi. Toplam antosiyanin miktarı (A530-0.25)*A657 ile hesaplanarak mg g⁻¹ taze ağırlık olarak hesaplandı (Mita ve ark., 1997). Toplam fenolik madde tayini ise Shetty ve ark. (1995) tarafından bildirilen yöntem ile belirlendi. Taze bitki yaprağına (0.5 g) 5 ml % 80 metanol (% 1 HCl içerir) ilave edilerek 95 °C 30 dakika süreyle inkübasyona bırakıldı. Daha sonra örnekler santrifüj edilip filtre edildi. Elde edilen ekstraktan 300 µl alınıp üzerine 1.5 ml fenol (% 10) ve 1.2 ml Na₂CO₃ ilave edilip 15 sn çalkalandı. Karışım 40 °C 30 dakika bekletildikten sonra absorbansları 760 nm'de spektrofotometrede okundu. Sonuçlar gallik asit ile oluşturulan bir standart kurve ile hesaplandı ve mg gallik asit g⁻¹ TA olarak ifade edildi.

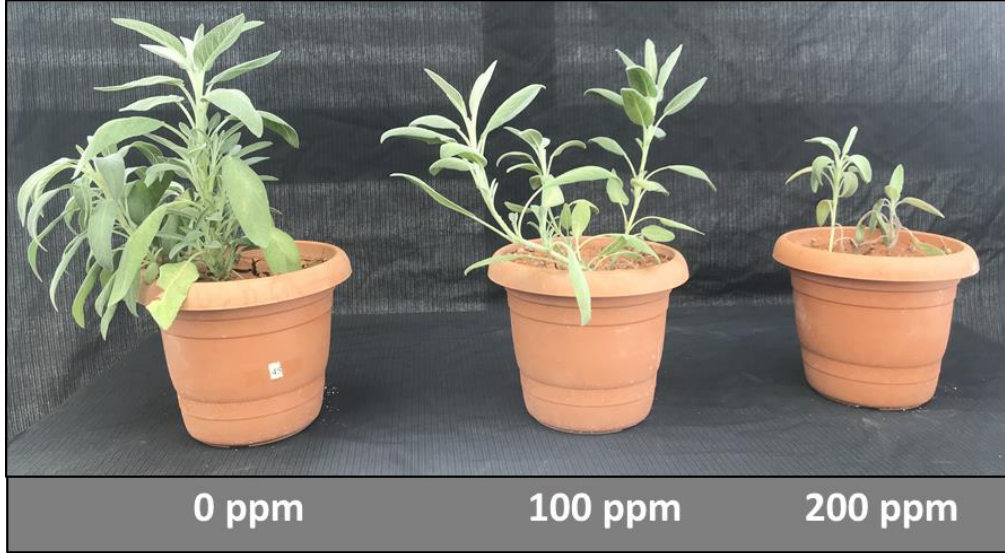
2.6. Verilerin değerlendirilmesi

Elde edilen tüm veriler SPSS (Version 22.0) programı kullanılarak varyans analizleri (ANOVA) ve Duncan Çoklu Karşılaştırma Testi ile P<0.05 önem düzeyinde analiz edilmiş ve grafikler halinde sunulmuştur.

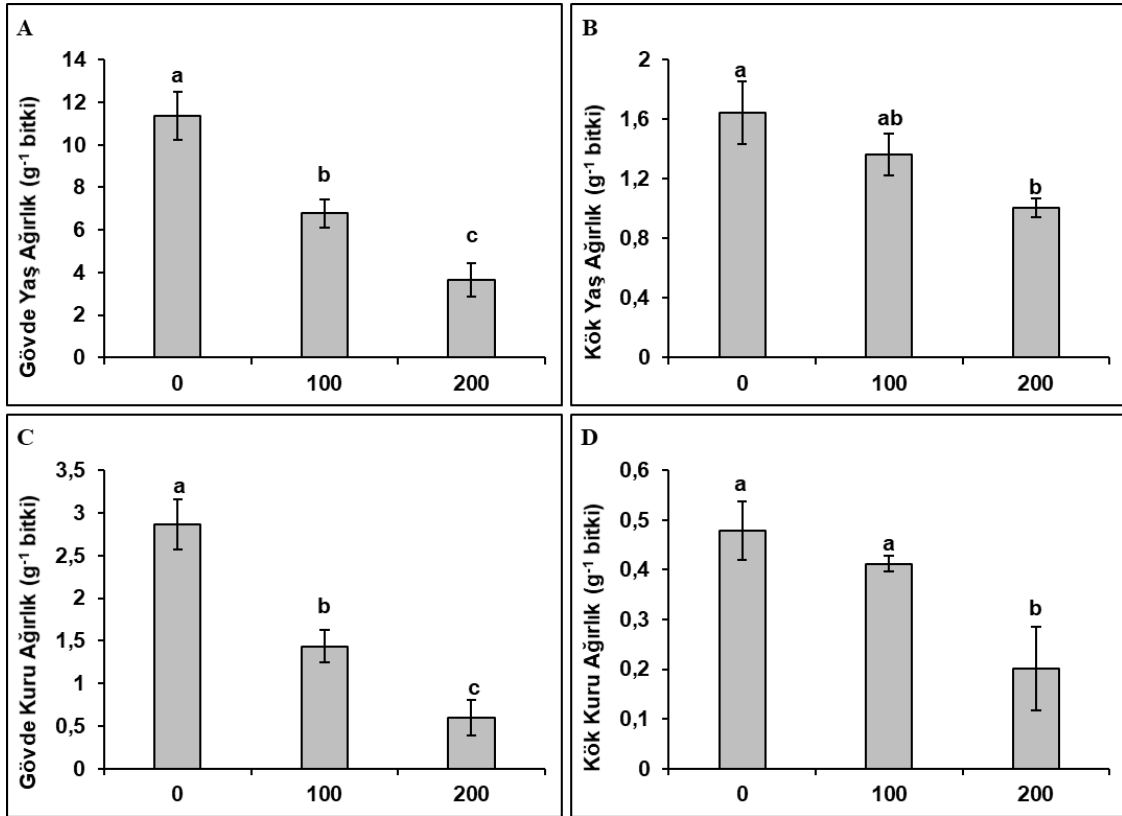
3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Bitki fizyolojik özellikleri

Adaçayı bitkisinin fizyolojik özellikleri üzerine artan dozlarda Cd uygulamasının etkileri istatistiksel olarak önemli bulunmuştur (P<0.05). Artan dozda Cd maruz kalan Adaçayı bitkisinde büyüme ve gelişme kontrole kıyasla önemli derecede azalmıştır (Şekil 1). Gövde yaş ağırlığı kontrole kıyasla 100 ppm Cd uygulaması ile % 40 ve 200 ppm Cd uygulaması ile % 68 oranında, kök yaş ağırlığı ise sırasıyla % 17 ve % 39 oranında azaldı. Artan dozlarda Cd muamalesi, bitki gövde kuru ağırlığının sırasıyla % 50 ve 79 oranında, kök kuru ağırlığının ise sırasıyla % 14 ve 58 oranında azalmasına neden oldu. En düşük bitki yaş ve kuru ağırlıklar 200 ppm Cd uygulamasında belirlendi (Şekil 2A, 2B, 2C ve 2D).



Şekil 1. Artan Cd (Cd; 0, 100 ve 200 ppm) uygulamalarına maruz kalan Adaçayı bitkisinin fizyolojik görünümünden bir kesit



Şekil 2. Artan Cd (Cd; 0, 100 ve 200 ppm) uygulamalarına maruz kalan Adaçayı bitkisinin gövde yaş ağırlığı (A), kök yaş ağırlığı (B), gövde kuru ağırlığı (C) ve kök kuru ağırlığı (D). Hata çubukları her bir uygulamanın standart hatasını göstermektedir (n=3). Harfler uygulamalar arasındaki istatistiksel farklılıkları ($p<0.05$) belirtmektedir.

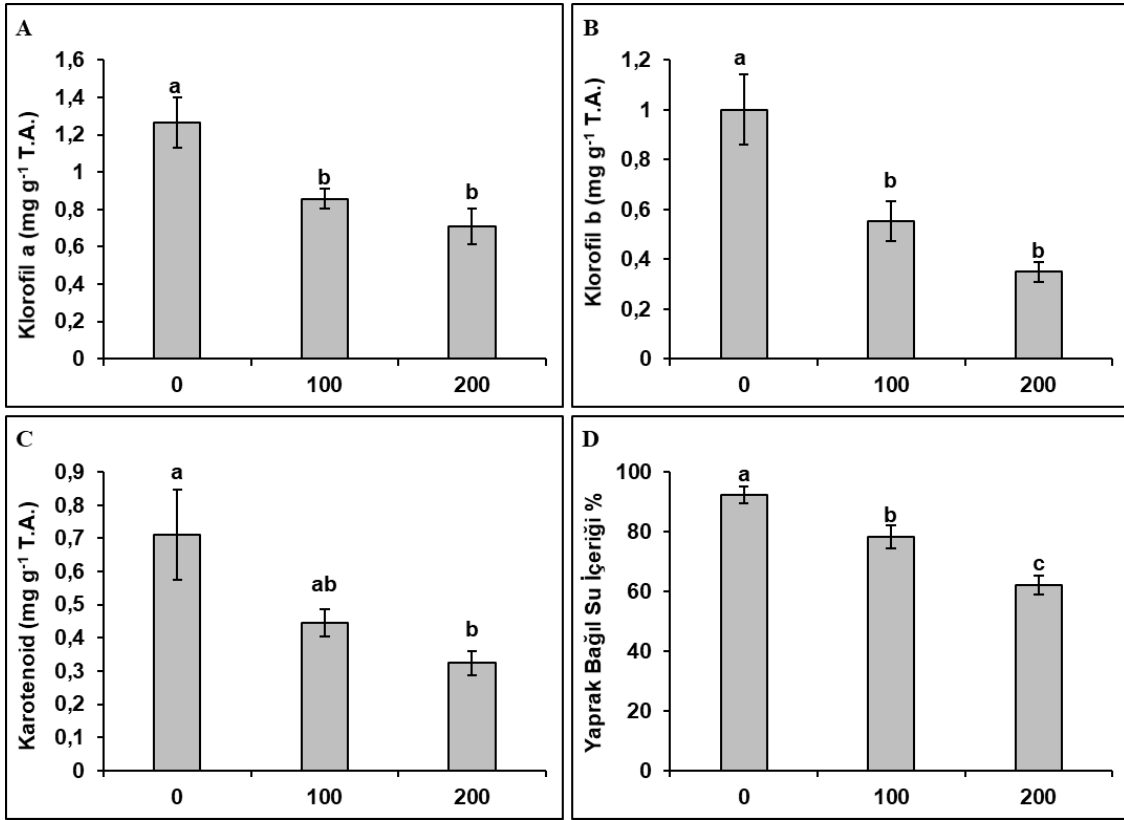
3.2. Fotosentetik pigment, karotenoid ve yaprak bağıl su içeriği

Adaçayı bitkisinin Cd ile muamele edilmesi bitki klorofil a ve klorofil b içeriğinin kontrole oranla önemli düzeyde azalmasına neden olmuş, ancak 100 ppm ve 200 ppm Cd muameleleri arasında istatistiksel açıdan farklılık bulunmamıştır ($P<0.05$). Farklı

düzeyde Cd uygulamalarının adaçayı bitkisinin karotenoid ve yaprak bağıl su içeriğine etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmuştur ($P<0.05$). Cd uygulaması kontrole kıyasla klorofil a içeriğinin sırasıyla % 32 ve % 44, klorofil b içeriğinin sırasıyla % 45 ve % 65, karotenoid içeriğinin ise sırasıyla % 37 ve % 54 oranında azalmasına neden

olmuştur (Şekil 3A, 3B ve 3C). Cd uygulamaları yaprak bağıl su içeriğinin önemli düzeyde azalmasına neden oldu ve en düşük

yaprak bağıl su içeriği 200 ppm Cd doz uygulamasında belirlendi (Şekil 3D).

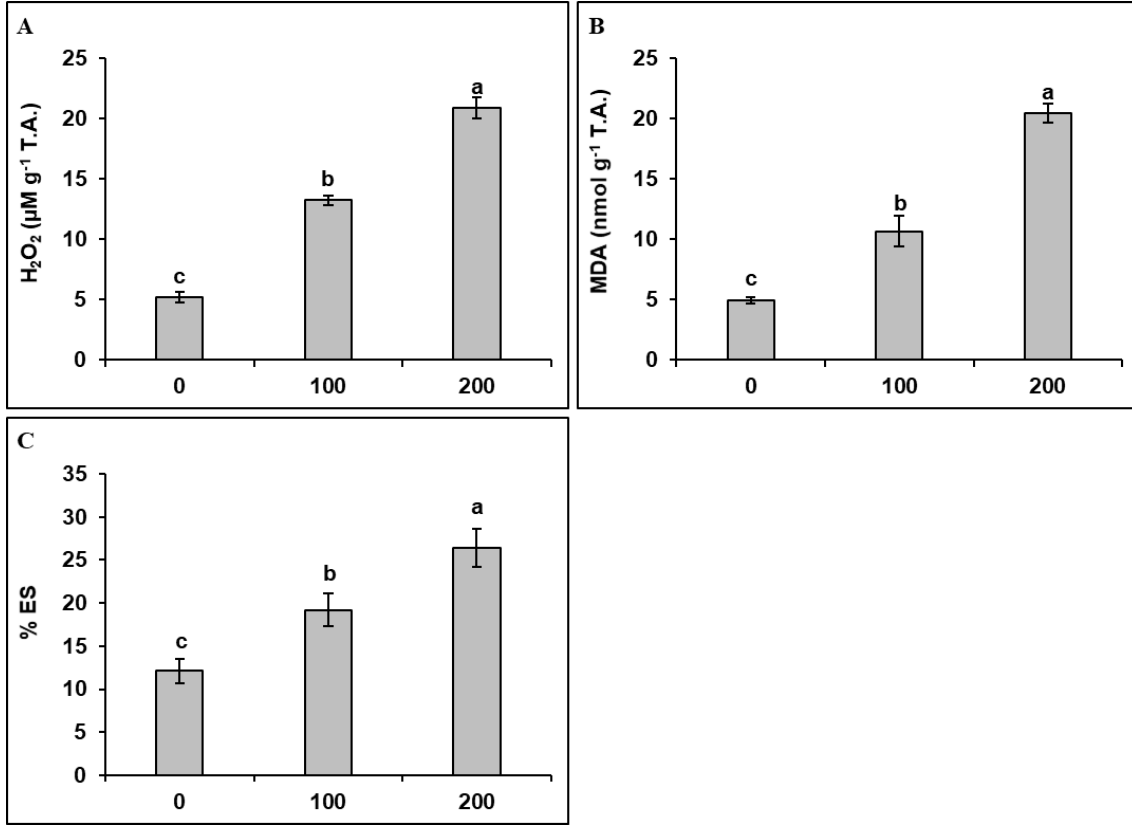


Şekil 3. Artan Cd (Cd; 0, 100 ve 200 ppm) uygulamalarına maruz kalan Adaçayı bitkisinin klorofil a (A), klorofil b (B), karotenoid (C) ve yaprak bağıl su içeriği (D). Hata çubukları her bir uygulamanın standart hatasını göstermektedir (n = 3). Harfler uygulamalar arasındaki istatistiksel farklılıkları (P<0.05) belirtmektedir.

3.3. Oksidatif stres ile ilişkili parametreler

Bitkide önemli oksidatif stres göstergeleri olana hidrojen peroksit (H₂O₂), malondialdehit (MDA) ve elektrolit sızıntısı (% ES) içerikleri Adaçayı bitkisine uygulanan Cd ile kontrole kıyasla önemli düzeyde artış göstermiş, Muameleler arasındaki farklılıklar istatistiksel olarak önemli bulunmuştur (P<0.05). (Şekil

4A, 4B, 4C). Adaçayı bitkisinde 100 ve 200 ppm Cd dozları kontrole kıyasla, H₂O₂ içeriğinin sırasıyla 2.5 ve 4 kat, MDA içeriğini ise sırasıyla 2.2 ve 4 kat, % ES içeriğinin yaklaşık olarak sırasıyla 1.5 ve 2.2 kat artmasına neden olmuştur. Yukarıda belirtilen oksidatif stres ile ilişkili bu parametrelerde en yüksek değer 200 ppm Cd uygulamasında belirlenmiştir.

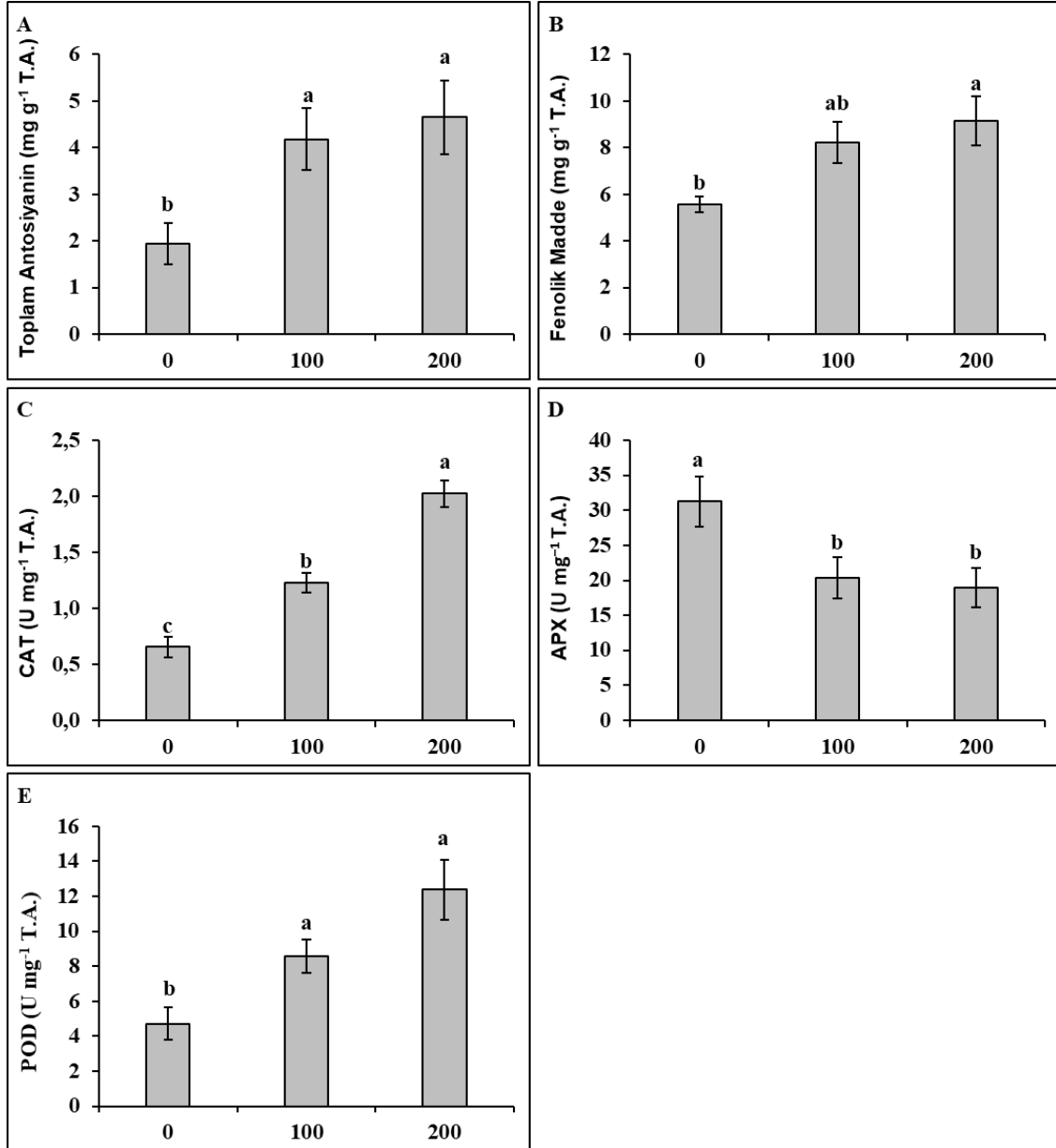


Şekil 4. Artan Cd (Cd; 0, 100 ve 200 ppm) uygulamalarına maruz kalan Aşağıy bitkisinin H₂O₂ (A), MDA (B), ES (C) değerleri. Hata çubukları her bir uygulamanın standart hatasını göstermektedir (n=3). Harfler uygulamalar arasındaki istatistiksel farklılıkları (P<0.05) belirtmektedir.

3.4. Antosiyanin ve fenolik madde içeriği

Farklı düzeyde Cd uygulamalarının adaçayı bitkisinin fenolik madde içeriğine etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmuştur (P<0.05). Cd uygulaması ile kontrole kıyasla artan antosiyanin içeriği 100 ppm ile 200 ppm Cd muameleleri arasında istatistiksel açıdan fark görülmemiştir (P<0.05). Antosiyanin içeriği 100 ppm Cd uygulaması ile % 115 ve 200 ppm Cd uygulaması ile % 140 oranında, fenolik madde içeriği ise sırasıyla % 47 ve % 64 oranında kontrole kıyasla artmıştır (Şekil 5A, 5B). Stres altındaki adaçayı bitkilerinin antioksidan enzim aktivitelerinde önemli değişimlere yol açtı. Adaçayı

bitkilerinin 100 ve 200 ppm Cd ile muamelesi POD enzimi aktivitesini sırasıyla 1.8 ve 2.6 kat, CAT enzimi aktivitesini sırasıyla 1.9 ve 3 kat arttırdı, ancak askorbat peroksidaz (APX) aktivitesinin sırasıyla 1.5 ve 1.7 kat azalmasına neden oldu. Farklı düzeyde Cd uygulamalarının adaçayı bitkisinin POD ve CAT enzim aktivitelerine etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmuştur (P<0.05). Adaçayı bitkisinin Cd ile muamele edilmesi APX enzim aktivitesinin kontrole kıyasla önemli düzeyde azalmasına neden olmuş, ancak 100 ppm ve 200 ppm Cd muameleleri arasında istatistiksel açıdan farklılık bulunmamıştır (P<0.05, (Şekil 5C, 5D ve 5E).



Şekil 5. Artan Cd (Cd; 0, 100 ve 200 ppm) uygulamalarına maruz kalan Adakayı bitkisinin antosiyanin (A) ve fenolik madde (B) içeriği, CAT (C), APX (D) ve POD (E) enzim aktiviteleri. Hata çubukları her bir uygulamanın standart hatasını göstermektedir (n = 3). Harfler uygulamalar arasındaki istatistiksel farklılıkları (P<0.05) belirtmektedir.

Cd, bitki metabolizmasında yararlı rolü olmayan bir ağır metaldir. Bitkiler Cd stresine maruz kaldığında büyüme ve gelişimde gerileme, bodurlaşma en yaygın görülen belirtilerdir. Cd toksisitesi bitkilerde bitki büyümesinin ve biyokütle veriminin azalmasına neden olur (Anlı ve ark., 2022). Çalışmamızda, Chen ve ark. (2021) ayçiçeği, Çelim ve Gülser (2020) fasulye, Hasan ve ark. (2019) domates ve Kaur ve ark. (2022) hardal bitkisinde bildirdiğine benzer bulgular gözlemlenmiş, Cd stresi adakayı bitkisi fizyolojik gelişiminde azalmalara neden olmuştur. Bitki büyümesinin azalmasının

muhtemel nedeni klorofil sentezinin azalması ve fotosentezin inhibe olmasının yanı sıra Cd'a maruz kalan köklerdeki büyümenin engellenmesi ve bitkilerin bulunduğu ortamdan su ve besin element alımındaki sınırlama ile ilişkilendirilebilmektedir (Gonçalves ve ark., 2009; Ismael ve ark., 2019). Cd stresi, klorofil içeriğini ve fotosentetik aktiviteyi olumsuz etkiler ve sonuçta bitki büyümesini engeller (Karakas ve ark., 2021b). Araştırmamızda da Cd toksisitesi bitkide klorofil ve karotenoid sentezini etkilemiş ve klorofil a, klorofil b ve karotenoid içeriğinin azalmasına yol açmıştır. Benzer

sonuclar diger arastirmacilar tarafından da bildirilmiştir (Aamer ve ark., 2018; Ali ve ark., 2018; Li ve ark., 2019; Faraz ve ark., 2020; Karakas ve ark., 2021b). Yaprak bagil su içeriği bitki su durumunun değerlendirilmesinde önemli bir parametredir ve stres koşullarında olumsuz etkilenir (Elsayed ve ark., 2011). Cd toksisitesinin yaprak bagil su içeriği üzerindeki olumsuz etkisi birçok arastirmacilar tarafından da rapor edilmiştir (Li ve ark., 2019; Sadeghipour, 2020; Ozfidan-Konakçı ve ark., 2022). Benzer sonuclar bu çalışmada da belirlenmiş olup Cd stresi ile birlikte yaprak bagil su içeriğinin azaldığı görülmüştür. Kadmiyum toksisitesi, oksidatif stresin önemli göstergeleri olan H₂O₂ ve MDA seviyelerinin artışına ve hücre zarı bozulmasının bir sonucu olan elektron sızıntısına (ES) yol açar (Kaya ve ark., 2019; Jawad Hassan ve ark., 2020). Araştırmamızda artan Cd toksisitesine bağlı olarak H₂O₂, MDA ve % ES değerleri önemli düzeyde artmıştır. Yüksek Cd varlığı nedeniyle meydana gelen oksidatif stres, bitkilerdeki normal fizyolojik ve moleküler mekanizmaların bozulmasına yol açarak bitkilerin büyümesini engellediği bildirilmiştir (Bashri ve ark., 2016). Araştırma sonuclarımızda, Cd toksisitesine maruz kalan adaçayı bitkilerinde, oksidatif stres ile ilişkili parametrelerdeki artış ve azalan biyokütle verimi belirgindi. Bitkiler, stresin azaltılması veya tolere edilmesi için reaktif oksijen türlerinin detoksifikasyonunu sağlayan çeşitli antioksidanlara sahiptirler. Antosiyaninlerin, mezofil hücrelerinin vakuollerinde ROS temizleyicileri olarak işlev gördükleri bildirilmiştir (Moustaka ve ark., 2020). Ayrıca antosiyanin-şelatlı metal kompleksleri oluşturarak, bitkilerde ağır metal stresine karşı daha yüksek bitki toleransını sağlayan koruyucu bir mekanizma olduğu da rapor edilmiştir (Chadzinikolau ve ark., 2017). Araştırma sonuclarımız, Cd stresi altındaki adaçayı bitkilerinin antosiyaninler ve fenolikler gibi enzimatik olmayan antioksidanların birikiminin arttığı görülmüştür. Benzer sonuclar diger arastirmacilar tarafından da rapor edilmiştir (Khanna ve ark., 2019; Thind ve ark., 2020; Dobrikova ve ark., 2021). Artan Cd

konsantrasyonuna bağlı olarak antosiyanin ve fenolik madde içeriğindeki artış, Adaçayı bitkisinin Cd stresine karşı toleransını artırmak için bu bileşikleri biriktirdiğini göstermektedir. Antosiyaninler ve fenolikler, oksidatif strese karşı koruyucu rol oynayarak ve metal şelatörü olarak işlev görererek adaçayı bitkisinin Cd stresine karşı toleransını artırabilir. Stres koşullarında artan APX, CAT ve POD enzim aktiviteleri H₂O₂'i parçalayarak zararsız bileşiklere dönüştürürler ve oksidatif stresin olası etkilerinden bitkilerin korunmasını sağlamada önemli rol alır (Dikilitas ve ark., 2016). Araştırmamızda, artan Cd konsantrasyonuna bağlı olarak CAT ve POD enzim aktivitelerinin arttığı bulunmuştur ve bu sonuclar Sardar ve ark. (2022) kişniş, Karakas ve ark. (2021b) *Carpobrotus acinaciformis*, Fu ve ark. (2019) arpa ve Guo ve ark. (2019) buğday bitkisinde bildirdiği sonuclarla benzerdir. Buna karşı Cd toksisitesinin adaçayı bitkisinde APX aktivitesini büyük ölçüde baskıladığı görülmüştür. Benzer sonuclar diger arastirmacilar tarafından da bildirilmiştir (Wu ve ark., 2017; Singh ve ark., 2019; de Anicésio ve Monteiro, 2022). Cd toksisitesine bağlı olarak APX aktivitesinde meydana gelen azalma, bu enzimin bulunduğu kloroplastlardaki bozukluklardan kaynaklanabilir (Lou ve ark., 2017). Ayrıca, Cd stresi altında APX aktivitesindeki azalma, enzimler arasındaki dengesizliklerden kaynaklanabilir (Soares ve ark., 2016). Kesin mekanizma bilinmemektedir, ancak enzim dengesindeki değerisiklikler APX aktivitesindeki azalmaya katkıda bulunabilir.

4. Sonuclar

Çalışmamızda, farklı dozlarda Cd uygulanan adaçayı (*Salvia officinalis* L.) bitkisinin Cd stresine karşı gösterdiği bazı fizyolojik ve biyokimyasal tepkileri incelenmiştir. Sonuclar Cd stresinin bitkinin gövde ve kök aksamlarında azalmalara neden olduğunu göstermiştir. Ayrıca yüksek dozda uygulanan Cd, bitkinin klorofil pigment içeriği ve yaprak bagil su içeriğinin önemli düzeyde azalmasına yol açmıştır. Cd stresi oksidatif stresin önemli göstergeleri olan H₂O₂, MDA ve ES'de önemli artışlara neden olmuştur. En

yüksek oksidatif stres göstergeleri 200 ppm Cd uygulamasında belirlenmiştir. Bitkilerin ağır metal stresi ile başa çıkmasında kritik rollere sahip olan antosiyanin ve fenolik madde içerikleri 100 ppm ile önemli artış göstermiş, ancak Cd dozunun artırılması bu değerleri daha da yükseltmemiştir. Bitkilerin stresle mücadelesinin değerlendirilmesinde önemli bir gösterge olan CAT, APX ve POD enzim aktivitelerinden CAT ve POD artan Cd ile artış göstermiş, APX ise artan Cd ile azalma göstermiştir. Adaçayı bitkisinin Cd toksisitesine karşı gösterdiği fizyolojik ve biyokimyasal tepkiler bitkinin Cd stresine toleransını ortaya koymuş ve özellikle 100 ppm seviyesindeki Cd'a toleransının yüksek olduğu yapılan bu çalışma ile belirlenmiştir. Çalışmamız adaçayı bitkisinin 100 ppm düzeyine kadar Cd ile kirlenmiş ortamlarda yetiştirilebileceğini öne sürmüştür. Ayrıca bu bitkinin Cd ile kirlenmiş topraklarda ıslah materyali olarak kullanılmasında önemli bir kaynak oluşturmuştur.

Yazar Katkılarının Beyanı

Bu çalışmanın tasarlanması, denemenin kurulması, yürütülmesi; Sema KARAKAŞ DİKİLİTAŞ ve Ferhat UĞURLAR, toprak ve bitki analizleri; Ferhat UĞURLAR, makalenin yazılması ve incelenmesi Sema KARAKAŞ DİKİLİTAŞ ve Ferhat UĞURLAR tarafından yapılmıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Tüm yazarlar bu makaleyle ilgili herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

- Aamer, M., Muhammad, U.H., Li, Z., Abid, A., Su, Q., Liu, Y., Adnan, R., Muhammad, A.U.K., Tahir, A.K., Huang, G., 2018. Foliar application of glycinebetaine (GB) alleviates the cadmium (Cd) toxicity in spinach through reducing Cd uptake and improving the activity of anti-oxidant system. *Applied Ecology and Environmental Research*, 16(6): 7575-7583.
- Abd Elnabi, M.K., Elkaliny, N.E., Elyazied, M.M., Azab, S.H., Elkhalfifa, S.A., Elmasry, S., Mouhamed, M.S., Shalamesh, E.M., Alhoriény, N.A., Abd Elaty, A.E., 2023. Toxicity of heavy metals and recent advances in their removal: A review. *Toxics*, 11(7): 580.
- Aebi, H., 1984. Catalase in vitro. *Methods in Enzymology*, 105: 121–126.
- Ali, E., Hussain, N., Shamsi, I.H., Jabeen, Z., Siddiqui, M.H., Jiang, L.X., 2018. Role of jasmonic acid in improving tolerance of rapeseed (*Brassica napus* L.) to Cd toxicity. *Journal of Zhejiang University-Science B*, 19(2): 130-146.
- Anli, R.Y., Akşahin, V., Dündar, Ş., Ahmet, N.A.S.E., 2022. Cadmium pollution impairs maize growth and uptake of cationic essential nutrients. *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*, 6(1): 144-153.
- Arnon, D.I., 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24: 1–15.
- Barrs, H.D., Weatherley, P.E., 1962. A Re-Examination of the Relative Turgidity Technique for Estimating Water Deficits in Leaves. *Australian Journal of Biological Sciences*, 15: 413-428.
- Bashri, G., Prasad, S.M., 2016. Exogenous IAA differentially affects growth, oxidative stress and antioxidants system in Cd stressed *Trigonella foenum-graecum* L. seedlings: Toxicity alleviation by up-regulation of ascorbate-glutathione cycle. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 132: 329-338.
- Beduk, F., Aydın, S., Aydın, M.E., Bahadır, M., 2022. Consequences of heavy metals in water and wastewater for the environment and human health. In: M., Bahadır, A., Haarstrick (Ed), *Water and Wastewater Management: Global Problems and Measures*, Springer Cham., pp. 221-228.

- Chadzinikolau, T., Kozłowska, M., Mleczek, M., 2017. Induction of phytochelatin and flavonoids in cadmium polluted *Berberis thunbergii*. *Dendrobiology*, 77: 139-146.
- Chen, L., Hu, W.F., Long, C., Wang, D., 2021. Exogenous plant growth regulator alleviate the adverse effects of U and Cd stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.) and improve the efficacy of U and Cd remediation. *Chemosphere*, 262: 127809.
- Cvikrova, M.H., 1994. Phenolic acids and peroxidase activity in alfalfa (*Medicago sativa*) embryogenic cultures after ethephon treatment. *Physiologia Plantarum*, 9: 226-233.
- Çelim, S., Gülser, F., 2020. Farklı demir formlarının kadmiyum stresi altındaki fasulye (*Phaseolus vulgaris* L. var Nana) bitkisinin gelişiminde meydana getirdiği değişimler. *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*, 4(4): 1006-1023.
- De Anicésio, É.C.A., Monteiro, F.A., 2022. Potassium reduces oxidative stress in tanzania guinea grass under cadmium toxicity. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(1): 1184-1198.
- Dikilitas, M., Karakas, S., Ahmad, P., 2016. Effect of lead on plant and human DNA damages and its impact on the environment. In: A. Parvaiz (Ed), *Plant metal interaction*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp. 41-67.
- Dionisio-Sese, M.L., Tobita, S., 1998. Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. *Plant Science*, 135: 1-9.
- Dobrikova, A.G., Apostolova, E.L., Hanć, A., Yotsova, E., Borisova, P., Sperdouli, I., Adamakis, I.D.S., Moustakas, M., 2021. Cadmium toxicity in *Salvia sclarea* L.: An integrative response of element uptake, oxidative stress markers, leaf structure and photosynthesis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 209: 111851.
- Elsayed, S., Mistele, B., Schmidhalter, U., 2011. Can changes in leaf water potential be assessed spectrally? *Functional Plant Biology*, 38(6): 523-533.
- Faraz, A., Faizan, M., Sami, F., Siddiqui, H., Hayat, S., 2020. Supplementation of salicylic acid and citric acid for alleviation of cadmium toxicity to *Brassica juncea*. *Journal of Plant Growth Regulation*, 39(2): 641-655.
- Fu, M.M., Dawood, M., Wang, N.H., Wu, F., 2019. Exogenous hydrogen sulfide reduces cadmium uptake and alleviates cadmium toxicity in barley. *Plant Growth Regulation*, 89(2): 227-237.
- Gonçalves, J.F., Antes, F.G., Maldaner, J., Pereira, L.B., Tabaldi, L.A., Rauber, R., Rossato, L.V., Bisognin, D.A., Dressler, V.L., de Moraes Flores, E.M., 2009. Cadmium and mineral nutrient accumulation in potato plantlets grown under cadmium stress in two different experimental culture conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*, 47: 814-821.
- Goyal, D., Yadav, A., Prasad, M., Singh, T. B., Shrivastav, P., Ali, A., Dantu, P.K., Mishra, S., 2020. Effect of heavy metals on plant growth: an overview. In: M., Naeem, A., Ansari, S., Gill (Ed), *Contaminants in Agriculture: Sources, Impacts and Management*, Springer, Cham., pp. 79-101.
- Guo, J., Qin, S., Rengel, Z., Gao, W., Nie, Z., Liu, H., Li, C., Zhao, P., 2019. Cadmium stress increases antioxidant enzyme activities and decreases endogenous hormone concentrations more in Cd-tolerant than Cd-sensitive wheat varieties. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 172: 380-387.
- Haider, F.U., Liqun, C., Coulter, J.A., Cheema, S.A., Wu, J., Zhang, R., Wenjun, M., Farooq, M., 2021. Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 211: 111887.
- Hasan, M.K., Ahammed, G.J., Sun, S., Li, M., Yin, H., Zhou, J., 2019. Melatonin inhibits cadmium translocation and enhances plant tolerance by regulating sulfur uptake and assimilation in *Solanum lycopersicum* L. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(38): 10563-10576.

- Hussain, S., Rao, M.J., Anjum, M.A., Ejaz, S., Zakir, I., Ali, M.A., Ahmad, N., Ahmad, S., 2019. Oxidative stress and antioxidant defense in plants under drought conditions. In: M. Hasanuzzaman, K. Hakeem, K. Nahar, H. Alharby (Ed), *Plant abiotic stress tolerance*, Springer Nature, Switzerland, pp. 207-219.
- Ismael, M.A., Elyamine, A.M., Moussa, M.G., Cai, M., Zhao, X., Hu, C., 2019. Cadmium in plants: uptake, toxicity, and its interactions with selenium fertilizers. *Metallomics*, 11(2): 255-277.
- Jawad Hassan, M., Ali Raza, M., Ur Rehman, S., Ansar, M., Gitari, H., Khan, I., Wajid, M., Ahmed, M., Shah, G.A., Peng, Y., Li, Z., 2020. Effect of cadmium toxicity on growth, oxidative damage, antioxidant defense system and cadmium accumulation in two sorghum cultivars. *Plants*, 9(11): 1575.
- Kanu, A.S., Ashraf, U., Mo, Z., Sabir, S.U.R., Baggie, I., Charley, C.S., Tang, X., 2019. Calcium amendment improved the performance of fragrant rice and reduced metal uptake under cadmium toxicity. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(24): 24748-24757.
- Karakas, S., 2013. Development of tomato growing in soil differing in salt levels and effects of companion plants on some physiological parameters and soil remediation. Doktora Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.
- Karakas, S., Bolat, I., Dikilitas, M., 2021a. The use of halophytic companion plant (*Portulaca oleracea* L.) on some growth, fruit, and biochemical parameters of strawberry plants under salt stress. *Horticulturae*, 7(4): 63.
- Karakas, S., Dikilitas, M., Akkurak H., 2021b. 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.
- Kaur, H., Hussain, S.J., Al-Huqail, A.A., Siddiqui, M.H., Al-Huqail, A.A., Khan, M.I.R., 2022. Hydrogen sulphide and salicylic acid regulate antioxidant pathway and nutrient balance in mustard plants under cadmium stress. *Plant Biology*, 24(4): 660-669.
- Kaya, C., Okant, M., Ugurlar, F., Alyemeni, M.N., Ashraf, M., Ahmad, P., 2019. Melatonin-mediated nitric oxide improves tolerance to cadmium toxicity by reducing oxidative stress in wheat plants. *Chemosphere*, 225: 627-638.
- Khanna, K., Jamwal, V.L., Sharma, A., Gandhi, S.G., Ohri, P., Bhardwaj, R., Al-Huqail, A.A., Siddiqui, M.H., Ali, H.M., Ahmad, P., 2019. Supplementation with plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) alleviates cadmium toxicity in *Solanum lycopersicum* by modulating the expression of secondary metabolites. *Chemosphere*, 230: 628-639.
- Li, Q., Wang, G., Wang, Y., Yang, D., Guan, C., Ji, J., 2019. Foliar application of salicylic acid alleviates the cadmium toxicity by modulation the reactive oxygen species in potato. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 172: 317-325.
- Li, Y., Rahman, S. U., Qiu, Z., Shahzad, S. M., Nawaz, M. F., Huang, J., Naveed, S., Li, L., Wang, X., Cheng, H., 2023. Toxic effects of cadmium on the physiological and biochemical attributes of plants, and phytoremediation strategies: A review. *Environmental Pollution*, 325: 121433.
- Loreto, F., Velikova, V., 2000. Isoprene produced by leaves protects the photosynthetic apparatus against ozone damage, quenches ozone products, and reduces lipid peroxidation of cellular membranes. *Plant Physiology*, 27: 1781-1787.

- Lou, L., Kang, J., Pang, H., Li, Q., Du, X., Wu, W., Chen, J., Lv, J., 2017. Sulfur protects pakchoi (*Brassica chinensis* L.) seedlings against cadmium stress by regulating ascorbate-glutathione metabolism. *International Journal of Molecular Sciences*, 18: 1628–1628.
- Mita, S., Murano, N., Akaike, M., Nakamura, K., 1997. Mutants of *Arabidopsis thaliana* with pleiotropic effects on the expression of the gene for β -amylase and on the accumulation of anthocyanin that are inducible by sugars. *The Plant Journal*, 11(4): 841-851.
- Moustaka, J., Tanou, G., Giannakoula, A., Adamakis, I.D.S., Panteris, E., Eleftheriou, E. P., Moustakas, M., 2020. Anthocyanin accumulation in poinsettia leaves and its functional role in photo-oxidative stress. *Environmental and Experimental Botany*, 175: 104065.
- Nakano, Y., Asada, K., 1981. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and Cell Physiology*, 22(5): 867-880.
- Ozfidan-Konakci, C., Elbasan, F., Arıkan, B., Alp, F.N., Yildiztugay, E., Keles, R., Kucukoduk, M., 2022. Ex-foliar applied extremolyte ectoine improves water management, photosystem, antioxidant system and redox homeostasis in *Zea mays* under cadmium toxicity. *South African Journal of Botany*, 147: 130-141.
- Sabir, S., Akash, M.S.H., Fiayyaz, F., Saleem, U., Mehmood, M.H., Rehman, K., 2019. Role of cadmium and arsenic as endocrine disruptors in the metabolism of carbohydrates: inserting the association into perspectives. *Biomedicine Pharmacotherapy*, 114: 108802.
- Sadeghipour, O., 2020. Cadmium toxicity alleviates by seed priming with proline or glycine betaine in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). *Egyptian Journal of Agronomy*, 42(2): 163-170.
- Sardar, R., Ahmed, S., Shah, A.A., Yasin, N.A., 2022. Selenium nanoparticles reduced cadmium uptake, regulated nutritional homeostasis and antioxidative system in *Coriandrum sativum* grown in cadmium toxic conditions. *Chemosphere*, 287: 132332.
- Shafiq, S., Adeel, M., Raza, H., Iqbal, R., Ahmad, Z., Naeem, M., Sheraz, M., Ahmed, U., Azmi, U.R., 2019. Effects of foliar application of selenium in maize (*Zea mays* L.) under cadmium toxicity. *Biological Forum-An International Journal*, 11(2): 27-37.
- Shahid, M.A., Balal, R.M., Khan, N., Zotarelli, L., Liu, G.D., Sarkhosh, A., Fernández-Zapata, J.C., Nicolás, J.J.M., Garcia-Sanchez, F., 2019. Selenium impedes cadmium and arsenic toxicity in potato by modulating carbohydrate and nitrogen metabolism. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 180: 588-599.
- Shetty, K., Curtis, O.F., Levin, R.E., Witkowsky, R., Ang, W., 1995. Prevention of Vitrification Associated with in vitro Shoot Culture of Oregano. (*Origanum vulgare*) by *Pseudomonas* spp. *Journal of Plant Physiology*, 147(3-4): 447-451.
- Shiyu, Q.I.N., Hongen, L.I.U., Zhaojun, N.I.E., Rengel, Z., Wei, G.A.O., Chang, L.I., Peng, Z.H.A.O., 2020. Toxicity of cadmium and its competition with mineral nutrients for uptake by plants: A review. *Pedosphere*, 30(2): 168-180.
- Singh, S., Singh, V.P., Prasad, S.M., Sharma, S., Ramawat, N., Dubey, N.K., Tripathi, D.K., Chauhan, D.K., 2019. Interactive effect of silicon (Si) and salicylic acid (SA) in maize seedlings and their mechanisms of cadmium (Cd) toxicity alleviation. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38(4): 1587-1597.

- Soares, C., De Sousa, A., Pinto, A., Azenha, M., Teixeira, J., Azevedo, R.A., Fidalgo, F., 2016. Effect of 24-epibrassinolide on ROS content, antioxidant system, lipid peroxidation and Ni uptake in *Solanum nigrum* L. under Ni stress. *Environmental and Experimental Botany*, 122: 115-125.
- Thind, S., Hussain, I., Ali, S., Hussain, S., Rasheed, R., Ali, B., Hussain, H.A., 2020. Physiological and biochemical bases of foliar silicon-induced alleviation of cadmium toxicity in wheat. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(4): 2714-2730.
- Weisany, W., Sohrabi, Y., Heidari, G., Siosemardeh, A., Ghassemi-Golezani, K., 2012. Changes in antioxidant enzymes activity and plant performance by salinity stress and zinc application in soybean (*Glycine max* L.). *Plant Omics*, 5: 60-67.
- Wu, X., Song, H., Guan, C., Zhang, Z., 2020. Boron mitigates cadmium toxicity to rapeseed (*Brassica napus*) shoots by relieving oxidative stress and enhancing cadmium chelation onto cell walls. *Environmental Pollution*, 263: 114546.
- Wu, Z., Liu, S., Zhao, J., Wang, F., Du, Y., Zou, S., Li, H., Wen, D., Huang, Y., 2017. Comparative responses to silicon and selenium in relation to antioxidant enzyme system and the glutathione-ascorbate cycle in flowering chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *utilis*) under cadmium stress. *Environmental and Experimental Botany*, 133: 1–11.
- Xie, X., He, Z., Chen, N., Tang, Z., Wang, Q., Cai, Y., 2019. The roles of environmental factors in regulation of oxidative stress in plant. *BioMed Research International*, 2019(1): 9732325.
- Yadav, S.K., 2010. Heavy metals toxicity in plants: an overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants. *South African Journal of Botany*, 76(2): 167-179.

Atf Şekli	Karakaş Dikilitaş, S., Uğurlar, F., 2024. Kadmiyum Toksisitesinin Adaçayı (<i>Salvia officinalis</i> L.) Bitkisinin Bazı Fizyolojik ve Biyokimyasal Özelliklerine Etkisi. <i>ISPEC Tarım Bilimleri Dergisi</i> , 8(4): 1113-1126. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.13895323 .
To Cite	Karakaş Dikilitaş, S., Uğurlar, F., 2024. Effect of Cadmium Toxicity on Some Physiological and Biochemical Properties of the Sage Plant (<i>Salvia officinalis</i> L.). <i>ISPEC Journal of Agricultural Sciences</i> , 8(4): 1113-1126. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.13895323 .