

Ağır Metal Stresi Altındaki Buğday Bitkisinde Kurkuminin Antioksidan Enzim Profiline Etkisi

Filiz AYGÜN ERTÜRK^{1*}, Eren SUYABATMAZ²

^{1,2} Bayburt Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Beslenme ve Diyetetik Bölümü, 69000, Bayburt

¹<https://orcid.org/0000-0002-9973-5669>

²<https://orcid.org/0009-0006-8787-2398>

*Sorumlu yazar: filizayerturk@bayburt.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 28.03.2025

Kabul tarihi: 28.05.2025

Online Yayınlanma: 16.06.2025

Anahtar Kelimeler:

Kurkumin

Antioksidan enzim

Oksidatif stres

Ağır metal

ÖZ

Ağır metaller, bitkilerde çeşitli fizyolojik ve biyokimyasal süreçleri olumsuz etkileyerek büyüme ve gelişim üzerinde toksik etkilere yol açabilen çevresel kirlleticilerdir. Bu çalışmada, *Triticum aestivum* (buğday) bitkisinde kurşun (Pb, 3 mM) kaynaklı ağır metal stresinin neden olduğu oksidatif hasarın hafifletilmesinde kurkuminin (0, 10 ve 20 μ M) olası koruyucu etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, kurkuminin, stres altındaki bitkide antioksidan enzim aktiviteleri [süperoksit dismutaz (SOD) ve katalaz (CAT)] ile lipid peroksidasyonunun bir göstergesi olan malondialdehit (MDA) düzeyleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bulgular, ağır metal stresi altındaki buğdayda kurkumin uygulamasının SOD ve CAT aktivitelerini anlamlı şekilde artırdığını ve MDA seviyelerini azalttığını ($p < 0,05$) göstermiştir. 20 μ M kurkumin dozunun en yüksek koruyucu etkiyi sağladığı ve oksidatif stresin azaltılmasında belirgin bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, kurkuminin ağır metal kaynaklı oksidatif hasarı hafifletme ve bitkilerin savunma mekanizmalarını güçlendirme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Effect of Curcumin on Antioxidant Enzyme Profile in Wheat Plants Under Heavy Metal Stress

Research Article

Article History:

Received: 28.03.2025

Accepted: 28.05.2025

Published online: 16.06.2025

Keywords:

Curcumin

Antioxidant enzyme

Oxidative stress

Heavy metal

ABSTRACT

Heavy metals are environmental pollutants that can adversely affect various physiological and biochemical processes in plants, leading to toxic effects on growth and development. In this study, the potential protective effects of curcumin (0, 10, and 20 μ M) against lead (Pb, 3 mM)-induced heavy metal stress and consequent oxidative damage in *Triticum aestivum* (wheat) were investigated. For this purpose, the effects of curcumin on antioxidant enzyme activities [superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT)] as well as on malondialdehyde (MDA) levels, an indicator of lipid peroxidation, were evaluated under stress conditions. The results demonstrated that curcumin treatment significantly increased SOD and CAT activities and decreased MDA levels in wheat subjected to heavy metal stress ($p < 0.05$). The 20 μ M curcumin dose showed the highest protective effect and had a significant role in reducing oxidative stress. These results suggest that curcumin has the potential to alleviate heavy metal-induced oxidative damage and strengthen plant defense mechanisms.

To Cite: Aygün Ertürk F., Suyabatmaz E. Ağır Metal Stresi Altındaki Buğday Bitkisinde Kurkuminin Antioksidan Enzim Profiline Etkisi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(3): 1464-1477.

1. Giriş

Çevre kirliliği boyutlarının hızla artması; dünyadaki dengeleri bozarken, çevreye bağımlı olan canlıların da bu durumdan olumsuz etkilenmelerine neden olmaktadır. Bu etki ekosistemlerin primer

üreticileri konumundaki bitkiler üzerinde çok daha fazladır. Etmeni ne olursa olsun çevre kirliliği bitkilerde strese yol açmaktadır. Ağır metal stresi; bitkilerde verim ve kalite kaybına dolayısıyla ekonomik kayba da neden olan en önemli abiyotik stres faktörlerinden biridir. Bugün ağır metallerin neden oldukları oksidatif stresin, pek çok hücrede moleküler değişimlere ve gen mutasyonlarına yol açtığı artık iyi bilinmekte olup yaşlanma, hücre hasar ve doku yıkımında rol aldığı önemle vurgulanmaktadır (Sevgi ve Leblebici 2022). Ağır metallerin toksik etkileri, metalin türüne, konsantrasyonuna, maruz kalma süresine ve bitkinin genetik yapısına bağlı olarak değişmekle birlikte, bitkilerde ağır metal toksisitesi olduğunu gösteren en yaygın etki tohum çimlenmesi, bitki biyokütlesi ve klorofil biyosentezinde azalma gibi etkilerle bitki gelişimindeki inhibisyonudur. Kurşun (Pb), arsenikten sonra en zararlı ikinci çevresel toksindir ve endüstriyel faaliyetler, madencilik, boya ve yakıt kullanımı ile ekolojik sisteme en fazla zarar veren ağır metallerden biridir. Bitki dokularındaki aşırı kurşun, membran geçirgenliğini bozarak hücre bütünlüğü tehdit ederken, fotosentez reaksiyonlarını da olumsuz etkilemektedir. Diğer ağır metallerden farklı olarak, mitotik iğ ipliklerindeki mikrotübüllerin yapısını bozarak hücre döngüsünü aksatmaktadır. Kısacası bitkinin pek çok morfolojik, fizyolojik ve biyokimyasal özelliklerini etkileyerek oksidatif hasara neden olurken antioksidan savunma mekanizmalarına zarar vermektedir (Dalyan ve ark., 2020; Mfarrej ve ark., 2024).

Canlılar abiyotik çevresel streslere maruz kaldıklarında oluşan oksidatif hasara karşı onları bu sitotoksik etkilerden koruyan bir dizi antioksidan enzim bulundururlar. Antioksidanlar serbest radikal oluşumunu önleyerek doku hasarını önler ya da azaltırlar. Stres koşullarında süperoksit dismutaz (SOD) ve katalaz (CAT) gibi antioksidan enzimler, hücrede temel savunma sistemlerini oluşturmakta ve oksidatif hasarın neden olduğu hasara karşı kilit rol oynamaktadırlar (Ahmad ve ark., 2010; Aslankoç ve ark., 2019). Malondialdehit (MDA) seviyesi ise serbest radikallerin hücre membranındaki lipid peroksidasyonunun (oksidatif stres) bir göstergesi olarak sıklıkla kullanılmaktadır (Navabpour ve ark., 2020).

Buğday; dünyada ve Türkiye’de stratejik bir bitki olup, insanların temel enerji ve protein kaynağı durumundadır. Türk ekonomisinin dayandığı temel mahsul buğdaydır. Türkiye’de tahılların ekim alanlarının da yaklaşık %70’ini buğdayın oluşturduğu bilinmektedir (Güleç vd., 2010). Yeni alanların tarıma açılmasının mümkün olmadığı düşünüldüğünde, üretimi artırmanın en etkili yolu birim alandan alınan verimin yükseltilmesidir. Bunun için buğdayın, yüksek verimli, üstün kaliteli, biyotik ve abiyotik stres şartlarına dayanıklı çeşitler kullanılarak uygun kültürel tekniklerle yetiştirilmesi gerekmektedir. Buğdayın maruz kaldığı çeşitli streslerden biri olan ağır metal stresi, dolaylı olarak tüm insanlığı etkileyen bir durumdur. Ağır metale maruz kalan buğday bitkisinde ve farklı tahıllarda, hücre oksidasyon seviyeleri ile antioksidan savunma sisteminin anahtar enzim aktivitelerini ve bazı genlerin ifadesinin arttığını gösteren, enzimatik ve genomik/epigenomik değişimleri belirten pek çok çalışma bulunmaktadır (Kaur ve ark., 2013; Erturk ve ark., 2014; Thakur ve ark., 2017; Navabpour ve ark., 2020; Aslam ve ark., 2021; Bakır ve Açar, 2021; Awaad ve ark., 2023; Taspınar ve ark., 2023).

Oksidatif stres kaynaklı olumsuz etkilerin azaltılması veya yok edilmesi amacıyla son yıllarda yapılan pek çok çalışma; kurkuminin metal kaynaklı lipid peroksidasyonuna karşı koruma sağladığını ve antioksidan sistem üzerindeki olumsuz etkileri hafiflettiğini göstermiştir. Yanı sıra, antioksidan potansiyeli ve kanseri baskılayıcı özelliği nedeniyle son yıllarda kanser araştırmalarında da kurkumin oldukça dikkat çekmektedir (Daniel ve ark., 2004; El-Demerdash ve ark., 2009; Wang ve ark., 2017; Abubakar ve ark., 2019; Kalefetoğlu Macar ve ark., 2022). Kurkumin, Zencefilgiller familyasına ait zerdeçal (*Curcuma longa*) bitkisinin rizomlarından elde edilen major biyoaktif bileşenlerin en önemlisidir. Asya ülkelerinde bir baharat olarak kullanılan ve geleneksel tıpta değer verilen zerdeçalın temel bileşeni kurkumin, efektif bir antioksidan olarak dikkat çekmektedir. Düşük moleküler ağırlıklı ve hidrofobik bir polifenolik flavonoid olup, güçlü antioksidan özelliği, içerdiği polifenol yapısından kaynaklanmaktadır. Yapılan araştırmalar, kurkuminin antioksidan kapasitesinin E vitaminine kıyasla birkaç kat daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu etkisinin yanı sıra hücre membranında lipit peroksidasyonunu inhibe etmektedir (Kumar ve ark., 2009). Ayrıca, inflamatuvar enzimlerin aktivitesini baskılayarak veya glutatyon sentezini artırarak dolaylı yoldan antioksidan etki göstermektedir (Rajasekaran ve ark., 2011). Bu özelliği ile çeşitli kanserler, antilipidemi, gastrointestinal hastalıklar, Parkinson, Alzheimer, kardiyovasküler hastalıklar, diyabet, obezite gibi pek çok sağlık sorununda koruyucudur (Mudduluru ve ark., 2011; Hejazi ve ark., 2016; Erkul ve ark., 2021). Farmakolojik etkilerine ek olarak, metal toksisitesinin neden olduğu oksidatif hasara karşı koruyucu olduğu bildirilmiştir (Cheraghi ve ark., 2017; Zhang ve ark., 2024; Tofan ve ark., 2025). Kurkuminin metal şelatlama aktivitesi yoluyla bitkilere stres toleransı sağlayan güçlü bir polifenol olduğu biliniyor olmasına rağmen kurkuminin ağır metal ile ilişkili sito-genotoksositeye karşı terapötik etkileri hakkında özellikle bitki dokularındaki etkileri ile ilgili çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu nedenle, çalışmamızda ağır metal ile indüklenen oksidatif stresi önlemek amacıyla, antioksidan etkileri bilinen kurkuminin bitki dokularındaki lipit peroksidasyonu ve antioksidan enzimler üzerine olası koruyucu etkileri araştırılmıştır. Çalışma ile kurkuminin ülkemiz insanına daha fazla tanıtılması, tarım, gıda/besin endüstrisi ve sağlık gibi farklı kullanım alanlarında daha fazla değerlendirilmesine katkı sağlanması amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

Çalışmamızda bitkisel materyal olarak, Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesinden temin edilen buğday (*Triticum aestivum* L. Ayyıldız) tohumları, oksidatif stres ajanı olarak bir ağır metal [kurşun sülfat ($PbSO_4$)] kullanılmıştır. %1'lik sodyum hipoklorit ($NaOCl$) çözeltisinde 10 dakika bekletilerek yüzeysel sterilizasyonu sağlanmış, ardından en az 5 kez saf su ile yıkanıp kurutulmuş eşit büyüklükteki buğday tohumları, içerisinde iki kat steril Whatman No. 1 filtre kağıdı olan 12 cm çapındaki steril petrilere ekilmiştir (Ortalama 15 tohum ve 3 paralel) (Arslan ve ark., 2019). 0, 10, 20 μM kurkumin [Cur, ((1E, 6E) -1,7-bis (4-hidroksi3-metoksifenil)-1,6-heptadien-3,5-dion] içeren çözeltilerle muamele edilen petrilere ağır metal stresi için 3mM kurşun (Pb) olacak şekilde toksik

dozlar uygulanmıştır. Kontrol için sadece Tween 20 içeren saf su kullanılmıştır. Örnekler daha sonra oda sıcaklığına (25°C) ayarlanmış etüve alınarak çimlenmeye bırakılmıştır. İnkübasyonun ardından 14 günlük fidelerden kök ve gövde örnekleri alınmış ve örnekler SOD, CAT ve MDA analizleri için çalışmanın yapılacağı zamana kadar -20 °C’de bekletilmiştir.

Kurşun (Pb) ve kurkumin dozlarının belirlenmesi, literatür taraması, ön denemeler ve bitkinin fizyolojik tepkileri dikkate alınarak yapılmıştır. İlk olarak, kurkumin dozları (0, 10 ve 20 µM), literatürde benzer çalışmalarda kullanılan ve bitkilerde toksik etki oluşturmada antioksidan etki gösterdiği belirlenen konsantrasyon aralıklarına dayanılarak seçilmiştir (Khan ve ark., 2024; Zhang ve ark., 2024). Aynı şekilde, kurşun (Pb) konsantrasyonu (3 mM), literatürde buğday (*Triticum aestivum*) gibi model bitkilerde belirgin ancak öldürücü olmayan bir toksik etki oluşturduğu rapor edilen (Lamhamdi ve ark., 2013) değerler göz önünde bulundurularak ön denemeler kapsamında farklı kurşun konsantrasyonları (örneğin, 1, 3 ve 5 mM) test edilmiş ve 3 mM Pb, buğday için uygun bir stres seviyesi olarak belirlenmiştir. Araştırmada kullanılan uygulama gruplarına ait detaylar Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Araştırmada Kullanılan Uygulama Grupları

Grup adı	Kurkumin	Kurşun
Kontrol	-	-
Pb	-	3 mM
Cur1	10 µM	-
Cur2	20 µM	-
Cur1 Pb	10 µM	3 mM
Cur2 Pb	20 µM	3 mM

Ağır metal stresi (Pb) ve kurkumin varlığında buğday tohumlarındaki SOD, CAT ve MDA seviyesi spektrofotometrik olarak üç tekerrürle ölçülerek ortalamaları alınmıştır.

MDA Miktarının Belirlenmesi; Bitki dokularından MDA tayini, Madhava ve Stresty (2000) yönteminden modifiye edilerek yapılmıştır. Taze bitki dokuları (0,5 mg) bir havana alınarak trikloroasetik asit (TCA) ile homojenize edildikten sonra 10.000 rpm’de santrifüj edilip süpernatant (enzim ekstraktı) alınarak MDA ölçümü için kullanılmıştır. Tiyobarbiturik asit (TBA) ilave edilmiş olan karışımın spektrofotometrede 532 ve 600 nm’de absorbansı okunarak lipid peroksidasyonunun son ürünü olan MDA miktarı ölçülmüştür. MDA düzeyleri, nmol/mg protein cinsinden ifade edilmiştir.

SOD Enzim Aktivitesinin Belirlenmesi; Bitki dokularından SOD enzim aktivite tayini, Roy ve ark. (2020) çalışmasından modifiye edilerek yapılmıştır. Taze bitki dokuları (0,3 mg) bir havana alınarak 50 mM KH₂PO₄ (pH=7,8), polivinilpirolidon (PVP) ve etilendiamin tetra asetik asit (EDTA) kullanılarak homojenleştirilip 10.000 rpm’de santrifüj edilmiştir. Süpernatant ve reaksiyon karışımının

560 nm dalga boyunda NanoDrop Spektrofotometrede absorbansı okunarak SOD enzim aktivitesi belirlenmiştir. Enzim aktivitesi, U/mg protein cinsinden ifade edilmiştir.

CAT Enzim Aktivitesinin Belirlenmesi; Katalaz enziminin aktivite tayini, Roy ve ark. (2020) yönteminden modifiye edilerek yapılmıştır. Taze bitki dokuları (0,3 mg) bir havana alınarak 50 mM KH_2PO_4 (pH=7,8), PVP ve EDTA kullanılarak homojenleştirilip 10.000 rpm'de santrifüj edilmiştir. Süpernatant ve reaksiyon karışımının 240 nm dalga boyunda NanoDrop Spektrofotometrede absorbansı okunmuştur. CAT enzim aktivitesini ölçmek amacıyla, absorbans değerlerindeki birim zamandaki değişimler değerlendirilmiştir. Enzim aktivitesi, U/mg protein cinsinden ifade edilmiştir.

İstatistiksel Analizler: Verilerin değerlendirilmesinde “SPSS 20.0 Windows” paket programı ile GraphPad Prism kullanılmıştır. Deney grupları arasındaki farklar, tek yönlü varyans analizi (One-Way ANOVA) ile değerlendirilmiş ve $p < 0,05$ önem derecesinde istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, ağır metal (Pb) stresinin ve kurkumin uygulamasının antioksidan savunma sistemi üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla, *Triticum aestivum* tohumlarında SOD ve CAT gibi temel antioksidan enzimlerin düzeyleri ile oksidatif stres göstergesi olan MDA düzeyi analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, GraphPad Prism yazılımı kullanılarak görselleştirilmiş ve Şekil 1’de karşılaştırmalı grafik halinde sunulmuştur. Grafikte yer alan istatistiksel karşılaştırmalar (**** $p < 0.0001$, *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$) gruplar arasındaki farkların anlamlılığını göstermektedir.

Kontrol (C) grubunda SOD aktivitesi 68,47 U/mg protein, CAT aktivitesi 27,67 U/mg protein ve MDA seviyesi 18,18 nmol/mg protein olarak bulunmuştur. Pb maruziyeti (Pb grubu), SOD aktivitesini kontrol grubuna göre anlamlı şekilde azaltmış (64,79 U/mg; $p < 0,05$), CAT aktivitesini ise anlamlı olarak artırmıştır (30,78 U/mg; $p < 0,05$). Ayrıca Pb grubunda MDA seviyeleri, kontrol grubuna kıyasla anlamlı derecede yükselmiştir (51,74 nmol/mg; $p < 0,001$). Bu artış, Pb’nin membran yapısına zarar vererek oksidatif hasara neden olduğunu, lipid peroksidasyonunu önemli ölçüde artırdığını ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, kurşunun mitokondriyal oksidatif stres mekanizmalarını tetikleyerek hücrel antioksidan savunma sistemini zorladığını ortaya koymaktadır. CAT aktivitesindeki artış, Pb maruziyeti sırasında hücrenin artan hidrojen peroksit yüküyle başa çıkma mekanizması olarak yorumlanabilirken, SOD aktivitesindeki azalma kurşunun bu enzime yönelik toksik etkisini yansıtmaktadır (Sharma ve ark., 2012). Benzer şekilde, Tofan ve ark. (2025) tarafından yapılan çalışmada Pb ve/veya As stresine maruz kalan marul bitkilerine uygulanan kurkuminin su alımı ve fotosentez verimliliğinin yanı sıra antioksidan enzim kapasitesini artırarak reaktif oksijen türleri (ROS) birikimini azalttığı bildirilmiştir. SOD, ROS'a karşı ilk savunma hattını oluşturmaktadır. Pb grubunda SOD aktivitesindeki azalma nedeninin, antioksidan sistemin kapasitesini aşan çevresel strese maruz kalan bitkilerde fizyolojik işlev bozukluğuna ve enzim hasarına neden olan aşırı ROS

üretimi olabileceği; bu azalmanın ise serbest radikallere karşı diğer bir savunma hattı olan CAT artışı ile telafi edilmiş olabileceği düşünülmektedir.

Kurşun (Pb), insan faaliyetleri ile çevreye yayılan ve bitkilerde ciddi toksik etkilere neden olan en önemli ağır metallere biridir. Bitkilerde fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler düzeylerde metabolik yolları etkileyerek büyüme ve gelişimi olumsuz yönde etkileyen kurşun, özellikle ROS üretimini artırarak oksidatif strese yol açmaktadır. Bu nedenle kurşun kirliliği, bitkisel üretim ve ekosistem sağlığı açısından ciddi bir tehdit oluşturmaktadır (Sharma ve Dubey, 2005). Ertürk ve ark (2014) kurşunun bitki dokularında hormon seviyesini etkilediğini, genetik ve epigenetik değişikliklere neden olduğunu belirtirken, pek çok çalışmada da bitkilerde ağır metal (Pb) kaynaklı toksisitenin başlıca nedeninin oksidatif stres oluşumu olduğu bildirilmiştir (Navabpour ve ark., 2020; Aslam ve ark., 2021; Taspinar ve ark., 2023). Çalışma verileri de, Pb'nin hücresel oksidatif dengenin bozulmasına yol açtığını ve lipid peroksidasyonunu artırarak oksidatif hasara sebep olduğunu desteklemektedir. Pb toksisitesinin, özellikle mitokondriyal işlev bozuklukları ve serbest radikal üretimi yoluyla oksidatif stresin artmasına sebep olduğu daha önceki çalışmalarla da uyumludur (İbrahim ve Bafeel, 2009; Giannakoula ve ark., 2021).

Kurkumin uygulanan gruplarda (Cur1 ve Cur2), SOD aktivitelerinde kontrol grubuna göre anlamlı bir değişiklik gözlenmezken, CAT aktivitelerinde hafif ancak anlamlı bir artış olmuştur (sırasıyla 28,36 / 29,25 U/mg; $p < 0,05$). Kurkumin ve Pb kombine gruplarında (Cur1Pb, Cur2Pb) SOD aktiviteleri Pb grubuna göre anlamlı olarak artmış (sırasıyla 73,46 / 69,40 U/mg; $p < 0,05$), CAT aktiviteleri de benzer şekilde yükselmiştir (sırasıyla 34,67 / 35,56 U/mg; $p < 0,01$). Bu durum, kurkuminin Pb kaynaklı oksidatif hasara karşı hücresel antioksidan savunma sistemini desteklediğini ve toksisiteyi hafiflettiğini göstermektedir. 20 μ M kurkumin (Cur2) uygulaması, 10 μ M kurkumin dozuna kıyasla daha belirgin bir koruyucu etki göstermiştir. Bu bulgular, kurkuminin serbest radikalleri süpürücü etkileri ile uyumludur (Gupta ve ark., 2012). Aynı gruplarda MDA düzeyleri, Pb grubuna göre anlamlı olarak düşmüş ancak kontrol seviyelerinin üzerinde kalmıştır (sırasıyla 38,57 / 35,25 nmol/mg; $p < 0,05$). Özellikle 20 μ M kurkumin (Cur2Pb) dozu en belirgin iyileştirici etkiyi göstermiştir. MDA düzeylerinde gözlenen düşüş, lipid peroksidasyonunun azalmasıyla, hücresel membranların korunmasına işaret etmektedir. Bu sonuçlar, kurkuminin oksidatif stres kaynaklı hücre hasarını azaltarak hücre fonksiyonlarının korunmasında etkin rol oynadığını ve bu etkinliğin önceki çalışmalarla da desteklendiğini göstermektedir. Kurkuminin bu koruyucu etkisi, güçlü antioksidan özellikleri ile açıklanmaktadır (Aggarwal ve Harikumar, 2009; Khan ve ark., 2024). Kurkuminin bu koruyucu etkisi serbest radikalleri nötralize etmesine ve metallerle şelat oluşturma özelliklerine atfedilmektedir. Kurkumin, kimyasal yapısı yüksek stabiliteye sahip şelat kompleksleri oluşturmaya olanak tanır, böylece toksik metal iyonlarını uzaklaştırır (Farzaei ve ark., 2018).

Farmakolojik etkilerinin yanı sıra, metal toksisitesinin neden olduğu oksidatif hasara karşı koruyucu olduğu biliniyor olmasına rağmen (Cheraghi ve ark., 2017) kurkuminin bu toksisite üzerindeki iyileştirici etkisini özellikle bitkisel dokularda ele alan çalışmaların literatürde sınırlı olduğu

görülmektedir. Çalışmamızın bulguları, kurkuminin metal şelatlama kapasitesine dair literatürdeki mevcut verilerle örtüşmektedir (Upadhyaya, ve ark., 2014; Farzaei ve ark., 2018; Pratyusha, 2022).

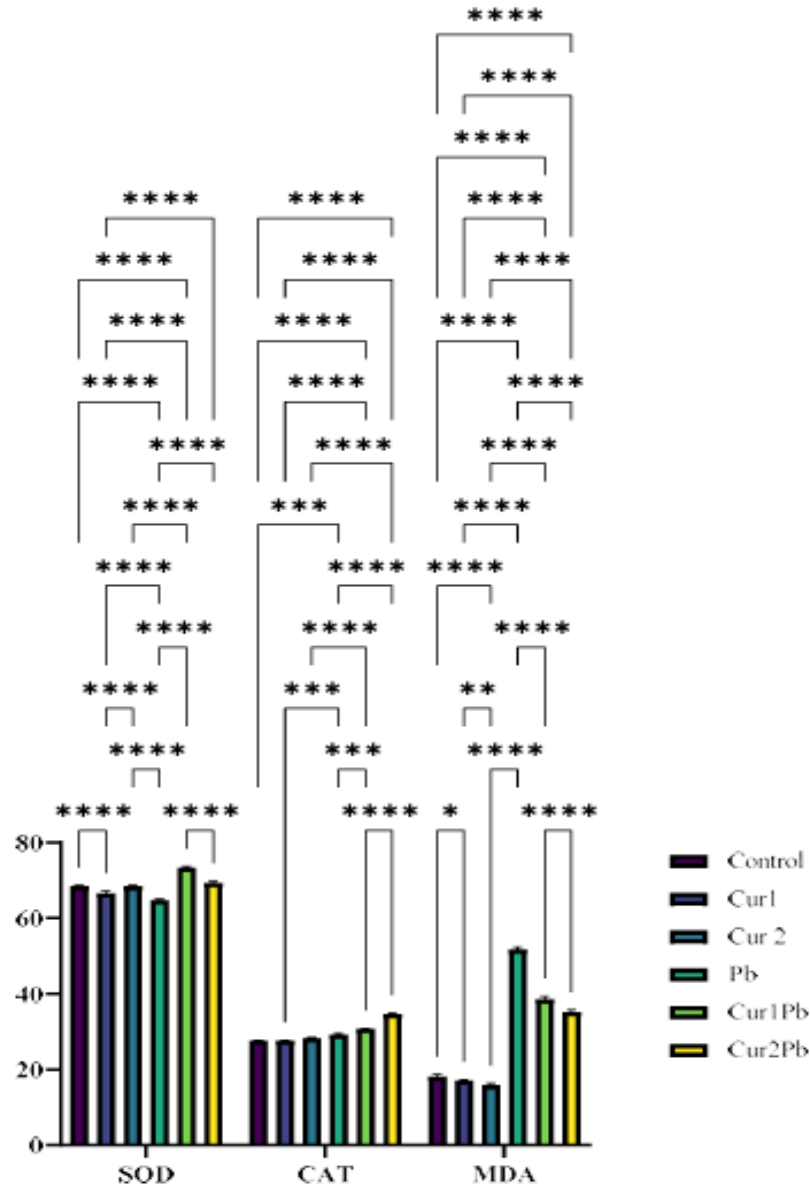
Kurkuminin farklı çevresel stres faktörlerine karşı bitkisel sistemlerde gösterdiği koruyucu etkiler, mevcut çalışmamızın bulgularıyla da örtüşmektedir. Khan ve ark. (2024) tarafından yapılan arsenik ve kurkumin etkileşimli çalışmada, kromozomal bozukluklar, mitotik indeks, oksidatif stres belirteçleri ve histokimyasal parametrelerde önemli değişimler gözlenmiştir. Zhang ve ark. (2024) tarafından arsenik toksisitesine maruz kalan ıspanak (*Spinacia oleracea* L.) bitkisi üzerinde yapılan çalışmada, kurkuminin oksidatif stres göstergelerini (H_2O_2 ve MDA) azaltarak ve antioksidan kapasiteyi artırarak arsenik kaynaklı zararı önemli ölçüde hafiflettiği gözlenmiştir. Kurşun toksisitesinin de benzer şekilde reaktif oksijen türleri aracılığıyla hücresel düzeyde hasara yol açtığı göz önünde bulundurulduğunda, kurkuminin antioksidatif özelliklerinin kurşun stresine karşı da etkili olabileceği düşünülmektedir. Bu doğrultuda, arsenik stresine karşı gözlenen iyileşmelerin benzer mekanizmalarla kurşun toksisitesinde de gerçekleşebileceği öngörülmekte olup, kurkuminin kurşun kaynaklı stres koşullarında hem oksidatif zararı azaltmada hem de bitkisel adaptif savunma yanıtlarını desteklemede potansiyel bir biyokoruyucu ajan olarak değerlendirilebileceği sonucuna varılabilir.

Kurkumin kapsüllü kitosan nanopartiküllerinin tuz ve kuraklık stresi altındaki buğday fidelerinde de toksisiteyi azalttığı belirlenmiştir (Hameed ve ark., 2024;2025). Tarımda sürdürülebilir verimlilik için ağır metal toksisitesindeki iyileştirici etkilerinin yanında tuzluluk ve kuraklık stresine karşı da kurkuminin çevre dostu bir antioksidan olarak kullanılabileceği bilinmektedir. Acar ve ark. (2022) tarafından *Allium cepa* bitkisi üzerinde yürütülen çalışmada, pestisit (pendimetalin) kaynaklı genetik ve biyokimyasal toksisiteye karşı kurkuminin koruyucu etkisi gözlenmiştir. Çalışmada kurkumin uygulamasının, kök gelişimini desteklediği, mitotik indeks, glutatyon redüktaz aktivitesi ve hücre sağlığı üzerinde olumlu etkiler gösterdiği bildirilmiştir. Çalışmalarda, oksidatif stres altındaki dokularda kurkumin uygulamasının MDA düzeyinde azalmaya ve antioksidan enzim düzeyinde artışa neden olduğunun bildirilmesi, araştırma sonuçlarımızla paralellik göstermektedir.

Literatür bulguları, hayvansal dokularda da kurkuminin çeşitli toksik etmenlere karşı benzer mekanizmalarla koruyucu etki gösterdiğini desteklemektedir. Cheraghi ve arkadaşları (2017), farelerin üreme sisteminde kurkuminin alüminyumun toksik etkilerinin neden olduğu doku hasarını antioksidan gücü sayesinde iyileştirdiğini bildirmişlerdir. Akkaya ve ark. (2021) tarafından sıçanlarda akrilonitril kaynaklı oksidatif stres modeli kullanılarak yürütülen çalışmada, kurkumin ve timokinonun karaciğer ve böbrek dokularında oksidatif hasarı azalttığı, özellikle MDA seviyelerini düşürürken SOD ve CAT gibi endojen antioksidan enzim aktivitelerini artırdığı bildirilmiştir. Seriner ve ark. (2022), diyetilnitrozamin ile oluşturulan deneysel karaciğer hasarında kurkuminin, SOD, CAT aktiviteleri ile GSH, MDA ve ileri oksidasyon protein ürünleri (AOPP) seviyeleri üzerindeki etkilerini incelemişler ve kurkumin uygulamasının MDA ve AOPP seviyelerini azaltırken, SOD ve CAT aktivitelerini artırdığını tespit etmişlerdir. Bu sonuçlar, kurkuminin hayvansal sistemlerde oksidatif dengeyi yeniden kurma potansiyelini ortaya koymakla birlikte, çalışmamızda bitkisel sistemde gözlenen benzer

etkilerle de paralellik göstermektedir. Böylece kurkuminin hem hayvansal hem de bitkisel organizmalarda benzer mekanizmalarla etki gösterdiği ve oksidatif stres kaynaklı hasarı azaltma potansiyelinin evrensel bir özellik taşıdığı söylenebilir.

Buradan hareketle, literatürde doz ve uygulama süresindeki farklılıklardan kaynaklanan farklılıklar olabilse de kurkuminin çevresel bir kirletici olan kurşunun toksik etkilerini azaltarak ağır metal kaynaklı oksidatif hasarın giderilmesinde etkili olduğunu ifade etmek gerekir. Dolayısıyla kurkumin, yalnızca antioksidan savunma sistemlerini güçlendirmekle kalmayıp, aynı zamanda hücre yapısının korunması, metabolik düzenin sürdürülmesi ve genel bitki sağlığının iyileştirilmesinde de etkili olabilecek çok yönlü bir doğal bileşiktir. Ancak, kurkuminin etkili doz aralıkları, uygulama yöntemleri ve farklı bitki türlerindeki tepkileri üzerine yapılacak daha kapsamlı moleküler ve genetik düzeyde çalışmalar, bu bileşiğin sürdürülebilir tarım uygulamalarındaki kullanım potansiyelini daha güçlü şekilde ortaya koyacaktır.



Şekil 1. Buğdayda kurkuminin biyokimyasal parametreler (SOD, CAT ve MDA) üzerine etkileri
Control, kontrol; Cur1, 10 μ M kurkumin; Cur2, 20 μ M kurkumin; Pb, 3mM kurşun; Cur1Pb, 10 μ M kurkumin + 3mM kurşun; Cur2Pb, 20 μ M kurkumin + 3mM kurşun; (*p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001, ****p < 0.0001).

4. Sonuçlar

Artan dünya nüfusu ve değişen iklim koşulları, küresel ölçekte besin talebini her geçen gün artırmaktadır. Bu bağlamda, biyotik ve abiyotik strese dayanıklı bitkilerin geliştirilmesi tarımsal verimliliğin sürdürülebilirliği için kritik bir gereklilik haline gelmiştir. Yapılan analizlerle, *Triticum aestivum* tohumlarında ağır metal ile indüklenen oksidatif stres altında kurkuminin (özellikle 20 μ M dozu), antioksidan enzim aktivitesini artırdığı ve malondialdehit düzeyini azalttığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma, kurkuminin bitkilerde ağır metal kaynaklı oksidatif stres üzerindeki etkilerini ortaya koyarak, kurkuminin, bitkilerde oksidatif stresin azaltılmasında ve savunma sistemlerinin güçlendirilmesinde potansiyel bir doğal bileşik olduğunu ortaya koymaktadır. Yanı sıra

gelecekte bu molekülün biyolojik aktivitesine yönelik araştırmalara ışık tutmakta ve sürdürülebilir tarım uygulamalarında kullanım potansiyelini vurgulamaktadır. Ayrıca, kurkuminin bu koruyucu ve iyileştirici özellikleri, sentetik antioksidanlara doğal bir alternatif olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, tarımsal uygulamalarda bitki sağlığını koruma ve verimliliği artırma açısından değerlendirilebilir. Ancak, bu doğal bileşiğin toksik metal kaynaklı hücresel hasarın önlenmesinde potansiyeli göz önünde bulundurularak, ilerleyen çalışmalarda farklı doz ve uygulama süreleri ile moleküler etki mekanizmalarının daha kapsamlı bir şekilde incelenmesi önerilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK (1919B012337493/2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı) tarafından desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Tüm yazarlar makaleye katkı sağladıklarını beyan ederler.

Kaynakça

- Abubakar K., Muhammad Mailafiya M., Danmaigoro A., Musa Chiroma S., Abdul Rahim EB., Abu Bakar Zakaria MZ. Curcumin attenuates lead-induced cerebellar toxicity in rats via chelating activity and inhibition of oxidative stress. *Biomolecules* 2019; 9(9): 453-479.
- Acar A., Singh D., Srivastava AK. Assessment of the ameliorative effect of curcumin on pendimethalin-induced genetic and biochemical toxicity. *Scientific Reports* 2022, 12(1): 2195.
- Aggarwal BB., Harikumar KB. Potential therapeutic effects of curcumin, the anti-inflammatory agent, against neurodegenerative, cardiovascular, pulmonary, metabolic, autoimmune and neoplastic diseases. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology* 2009; 41(1): 40-59.
- Ahmad P., Jaleel C., Salem M., Nabi G., Sharma S. Roles of enzymatic and nonenzymatic antioxidants in plants during abiotic stress. *Critical Reviews in Biotechnology* 2010; 30: 161-175
- Akkaya K., Yıldırım M., Değirmenci U., Ünal ND. Sıçanlarda akrilonitril ile oluşturulmuş oksidatif strese karşı timokinon ve kurkuminin olası koruyucu etkileri. *Mersin Üniversitesi Tıp Fakültesi Lokman Hekim Tıp Tarihi ve Folklorik Tıp Dergisi* 2021; 11(3): 596-604.
- Arslan E., Agar G., Aydın M. Putrescine as a protective molecule on DNA damage and DNA methylation changes in wheat under drought. *Communications Faculty of Sciences University of Ankara Series C Biology* 2019; 28(2): 170-187.

- Aslam M., Aslam A., Sheraz M., Ali B., Ulhassan Z., Najeeb U., Gill RA. Lead toxicity in cereals: Mechanistic insight into toxicity, mode of action, and management. *Frontiers in Plant Science* 2021; 11: 587785.
- Aslankoç R., Demirci D., İnan Ü., Yıldız M., Öztürk A., Çetin M., Savran EŞ., Yılmaz B. The role of antioxidant enzymes in oxidative stress - Superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and glutathione peroxidase (GPx). *Medical Journal of Süleyman Demirel University* 2019; 26(3): 362-369.
- Awaad HA., Alzohairy AM., Morsy AM., Moustafa ESA., Mansour E. Genetic analysis of cadmium tolerance and exploration of its inheritance nature in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Indian Journal of Genetics And Plant Breeding* 2023; 83(1): 41-51.
- Bakır Ö., Ağar G. Investigation of DNA methylation level in wheat genome exposed to vanadium by Using CRED-RA technique. *Anadolu Ege Tarımsal Araştırma Enstitüsü Dergisi* 2021; 31(1): 36-46.
- Cheraghi E., Golkar A., Roshanaei K., Alani B. Aluminium-induced oxidative stress, apoptosis and alterations in testicular tissue and sperm quality in Wistar rats: Ameliorative effects of curcumin. *International Journal of Fertility & Sterility* 2017; 11(3): 166.
- Dalyan E., Yüzbaşıoğlu E., Akpınar I. Physiological and biochemical changes in plant growth and different plant enzymes in response to lead stress. *Lead in Plants and the Environment. Radionuclides and Heavy Metals in the Environment* 2020; 129–147.
- Daniel S., Limson JL., Dairam A., Watkins GM., Daya S. Through metal binding, curcumin protects against lead-and cadmium-induced lipid peroxidation in rat brain homogenates and against lead-induced tissue damage in rat brain. *Journal of İnorganic Biochemistry* 2004; 98(2): 266-275.
- El-Demerdash FM., Yousef MI. Radwan FM. Ameliorating effect of curcumin on sodium arsenite-induced oxidative damage and lipid peroxidation in different rat organs. *Food and Chemical Toxicology* 2009; 47(1): 249-254.
- Erkul C., Özenoğlu A., Reis E. Zerdeçalın genel sağlık üzerine etkileri. *Türkiye Sağlık Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 2021; 4(2): 76-87.
- Erturk FA., Agar G., Arslan E., Nardemir G., Aydın M., Taspınar MS. Effects of lead sulfate on genetic and epigenetic changes and endogenous hormone levels in corn (*Zea mays* L.). *Polish Journal of Environmental Studies* 2014; 23(6): 1925-1932.
- Farzaei MH., Zobeiri M., Parvizi F., El-Senduny FF., Marmouzi I., Coy-Barrera E., Abdollahi M. Curcumin in liver diseases: a systematic review of the cellular mechanisms of oxidative stress and clinical perspective. *Nutrients* 2018; 10(7): 855.
- Giannakoula A., Therios I., Chatzissavvidis C. Effect of lead and copper on photosynthetic apparatus in citrus (*Citrus aurantium* L.) plants. The role of antioxidants in oxidative damage as a response to heavy metal stress. *Plants* 2021; 10(1): 155.

- Gupta SC. Discovery of curcumin, a component of golden spice, and its miraculous biological activities. *Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology* 2012; 39(3): 283-299.
- Güleç TE., Sönmezoglu ÖA., Yıldırım A. Makarnalık bugdaylarda kalite ve kaliteyi etkileyen faktörler. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University* 2010; 1: 113-120.
- Hameed A., Maqsood W., Hameed A., Qayyum MA., Ahmed T., Farooq T. Chitosan nanoparticles encapsulating curcumin counteract salt-mediated ionic toxicity in wheat seedlings: An ecofriendly and sustainable approach. *Environmental Science and Pollution Research* 2024; 31(6): 8917-8929.
- Hameed A., Zahid M., Hameed A., Noreen R., Ibrahim M., Farooq T., Kanwal P. Curcumin-based priming agent confers drought tolerance in wheat seedlings: A climate-smart approach. *Industrial Crops and Products* 2025; 224: 119451.
- Hejazi J., Rastmanesh R., Taleban FA., Molana SH., Hejazi E., Ehtejab G., Hara N. Effect of curcumin supplementation during radiotherapy on oxidative status of patients with prostate cancer: a double blinded, randomized, placebo-controlled study. *Nutrition and Cancer* 2016; 68(1): 77-85.
- Ibrahim Mohamed M., Bafeel Sameera O. Alteration of gene expression, superoxide anion radical and lipid peroxidation induced by lead toxicity in leaves of *Lepidium sativum*. *Journal of Animal and Plant Sciences* 2009, 4: 281-288.
- Kaur G., Singh HP., Batish DR., Kohli RK. Lead (Pb)-induced biochemical and ultrastructural changes in wheat (*Triticum aestivum*) roots. *Protoplasma* 2013; 250: 53–62.
- Kalefetoğlu Macar T., Macar O., Çavuşoğlu K., Yalçın E., Yapar K. Turmeric (*Curcuma longa* L.) tends to reduce the toxic effects of nickel (II) chloride in *Allium cepa* L. roots. *Environmental Science and Pollution Research* 2022; 29(40): 60508-60518.
- Khan Z., Thounaojam TC., Rajkumari JD., Deka BK., Rahman R., Upadhyaya H. Arsenic induced chromosomal aberrations, biochemical and morphological changes in *Vigna radiata* L.(Mung bean) seedlings and its amelioration by Curcumin. *Vegetos* 2024; 37(3): 1185-1194.
- Kumar A., Dogra S., Prakash A. Protective effect of curcumin (*Curcuma longa*), against aluminium toxicity: Possible behavioral and biochemical alterations in rats. *Behavioural Brain Research* 2009; 205: 384-390.
- Lamhamdi M., El Galiou O., Bakrim A., Novoa-Munoz JC., Arias-Estevez M., Aarab A., Lafont R. Effect of lead stress on mineral content and growth of *wheat (Triticum aestivum)* and *spinach (Spinacia oleracea)* seedlings. *Saudi Journal of Biological Sciences* 2013; 20(1): 29-36.
- Madhava RKV., Sresty TVS. Antioxidative parameters in the seedlings of pigeonpea (*Cajanus cajan* L. Millspaugh) in response to Zn and Ni stresses. *Plant Science* 2000; 157: 113-120.
- Mfarrej MFB., Javed R., Almeer R., Alsaidalani M., Kamel MH., Saleem S. Phosphorus sources enhance barley growth and mitigate lead stress via antioxidant responses, proline metabolism, and gene expression. *South African Journal of Botany* 2024; 174: 138-151.

- Mudduluru G., George-William JN., Muppala S., Asangani IA., Kumarswamy R., Nelson LD., Allgayer H. Curcumin regulates miR-21 expression and inhibits invasion and metastasis in colorectal cancer. *Bioscience Reports* 2011; 31(3): 185-197.
- Navabpour S., Yamchi A., Bagherikia S., Kafi H. Lead-induced oxidative stress and role of antioxidant defense in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Physiology and Molecular Biology of Plants* 2020; 26: 793-802.
- Pratyusha S. Phenolic compounds in the plant development and defense: An overview. *Plant Stress Physiology- Perspectives in Agriculture* 2022; 125–140.
- Rajasekaran SA. Therapeutic potential of curcumin in gastrointestinal diseases. *World Journal of Gastrointestinal Pathophysiology* 2011; 2(1): 1-14.
- Roy R., Mostofa MG., Wang J., Sikdar A., Sarker T. Improvement of growth performance of *Amorpha fruticosa* under contrasting regime of water and fertilizer in coal-contaminated spoils using response surface methodology. *BMC Plant Biology* 2020; 20: 1-15.
- Seriner R., Dağlıoğlu K., Coşkun G., Bilgin R. Examination of the effect of curcumin in experimental liver damage created by diethylnitrosamine in Swiss albino mice to superoxide dismutase and catalase activities and glutathione, malondialdehyde, and advanced oxidation protein products levels. *Biotechnology and Applied Biochemistry* 2022; 69(3): 1217-1225.
- Sevgi K., Leblebici S. Bitkilerde ağır metal stresine verilen fizyolojik ve moleküler yanıtlar. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences* 2022; 7(4): 528-536.
- Sharma P., Dubey RS. Lead toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 2005; 17: 35-52.
- Sharma R., Samant S., Sharma P., Devi S. Evaluation of antioxidant activities of *Withania somnifera* leaves growing in natural habitats of North-west Himalaya, India. *Journal of Medicinal Plants Research* 2012, 6(5): 657-661.
- Thakur S., Singh L., Zularisam AW., Sakinah M., Din MFM. Lead induced oxidative stress and alteration in the activities of antioxidative enzymes in rice shoots. *Plant Biology* 2017; 61: 595–598.
- Taspinar MS., Kuloglu SS., Aydin M., Agar G. Physiological-biochemical and molecular change in *Triticum aestivum* L. exposed to lead stress. *Research Square* 2023; 10.21203/rs.3.rs-2529649/v1
- Tofan A., Gurkan E., Arian-Abdulveli B., Balci M., Yildiztugay E., Ozfidan-Konakci C. Curcumin, a secondary metabolite, activates the defense system by regulating water status, PSII photochemistry, and antioxidant capacity in *lactuca sativa* exposed to lead and/or arsenic stresses. *Food and Energy Security* 2025; 14(1): e70027.
- Upadhyaya H., Shome S., Roy D., Bhattacharya MK. Arsenic induced changes in growth and physiological responses in *Vigna radiata* seedling: effect of curcumin interaction. *American Journal of Plant Sciences* 2014; 5(24): 3609.

- Wang XN., Zhang CJ., Diao HL., Zhang Y. Protective effects of curcumin against sodium arsenite-induced ovarian oxidative injury in a mouse model. *Chinese Medical Journal* 2017; 130(09): 1026-1032.
- Zhang X., Yan L., Liu J., Zhang Z., Tan C. Removal of diferent kinds of heavy metals by novel PPG-nZVI beads and their application in simulated stormwater infiltration facility. *Applied Sciences* 2019; 9(20): 4213.
- Zhang L., Zengin G., Ozfidan-Konakci C., Yildiztugay E., Arikani B., Ekim R. Lucini L. Exogenous curcumin mitigates As stress in spinach plants: A biochemical and metabolomics investigation. *Plant Physiology and Biochemistry* 2024; 211: 108713.