

T.C.  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ZEA MAYS'DA POTASYUM DİKROMATA KARŞI EPİBRASSİNOSTEROİD  
VE MELATONİN UYGULAMASINA VERİLEN BİYOKİMYASAL VE  
FİZYOLOJİK CEVAPLAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Zeynep Gülşah ÇANAK**

**Biyoloji Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Emel YİĞİT**

**ŞUBAT 2025**

**İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ZEA MAYS'DA POTASYUM DİKROMATA KARŞI EPİBRASSİNOSTEROİD VE  
MELATONİN UYGULAMASINA VERİLEN BİYOKİMYASAL VE FİZYOLOJİK  
CEVAPLAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Zeynep Gülşah ÇANAK**

**(36213611003)**

**Biyoloji Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. EMEL YİĞİT**

**Eş Danışman: Prof. Dr. GÜLÇİN BEKER AKBULUT**

**ŞUBAT 2025**

## TEŞEKKÜR ve ÖNSÖZ

Bu tez çalıőmasının her aőamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedен beni her konuda yönlendiren, bana inanan ve başarabileceğimi inandıran çok değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Emel YİĞİT'e

Bu tez çalıőmasının her aőamasında yardımcı olan ve bana yol gösteren hocam Sayın Prof. Dr. Gülçin BEKER AKBULUT'a, laboratuvar imkanlarından yararlandığım Prof.Dr. Burhan ATEŐ ve ekibine,

Tezin uygulama aőamasında FYL-2023-3307 numaralı proje kapsamında vermiő oldukları maddi ve manevi destekten dolayı İnönü Üniversitesi BAP birimine,

Tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalıőmalarım süresince de benden her türlü desteklerini esirgemeyen, yanımda olan, bana inanan, başarılarımla mutlu olan canım aileme,

Son olarak sevgili ocuklarım Beren İpek, İnci Simay ve Mehmet Alp, hayatıma kattığınız sonsuz sevgi, neőe ve ilham için minnettirim. Sizlerin varlığı bu yolculuğu daha anlamlı kıldı ve her zorlukta bana güç verdi. Çocuklarıma,

Teşekkür Ederim.

## ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “*Zea mays*'da Potasyum Dikromata Karşı Epibrassinosteroid ve Melatonin Uygulamasına Verilen Biyokimyasal ve Fizyolojik Cevaplar” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığıın bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Zeynep Gülşah ÇANAK



## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR ve ÖNSÖZ .....	i
ONUR SÖZÜ .....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
SEMBOLLER VE KISALTMALAR .....	vi
ÖZET .....	vii
ABSTRACT .....	viii
<b>1.GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1. Genel Bilgi.....	1
1.2. Bitkilerde Stres .....	1
1.2.1. Biyotik Stres .....	2
1.2.2. Abiyotik Stres .....	2
1.3. Ağır Metal .....	2
1.4. Krom (Cr) .....	3
1.5. Bitkilerde Ağır Metallere Verilen Tepkiler .....	4
1.6. Ağır Metallerin Bitkilere Zararı .....	4
1.6.1. Ağır Metallerin Bitkilerin Morfolojik Özelliklerine Verdiği Zararlar .....	4
1.6.2. Ağır Metallerin Bitkilerde Biyokimyasal Düzeyde Verdiği Zararlar.....	4
1.7. Reaktif Oksijen Türleri.....	5
1.7.1. Süperoksit ( $O_2^{\cdot-}$ ) Radikali.....	6
1.7.2. Singlet Oksijen ( $^1O_2$ ).....	6
1.7.3. Hidroksil ( $\cdot OH$ ) Radikali.....	7
1.7.4. Hidrojen Peroksit ( $H_2O_2$ ).....	7
1.7.5. Lipid Peroksidasyonu (LPO).....	7
1.8. Antioksidanlar .....	8
1.8.1. Enzimatik Antioksidanlar .....	8
1.8.1.1. Süperoksit dismutaz (SOD).....	8
1.8.1.2. Peroksidaz.....	8
1.8.1.3. Glutasyon redüktaz (GR) .....	8
1.8.1.4. Katalaz (KAT) .....	9
1.8.2. Enzimatik Olmayan Antioksidanlar .....	9
1.8.2.1. Glutasyon (GSH) .....	9
1.8.3. Doğal Antioksidanlar.....	9
1.8.3.1. Fenolik Bileşikler .....	10
1.8.3.2. Karotenoidler .....	10
1.9. Melatonin.....	10
1.10. Brassinosteroidler .....	11
1.11. Klorofiller .....	12
1.12. Mısır Bitkisi.....	12
<b>2.KAYNAK ÖZETLERİ .....</b>	<b>13</b>
<b>3. MATERYAL VE METOT .....</b>	<b>16</b>
3.1. Tohum Ekimi.....	16

3.2. Ön Denemeler.....	16
3.3. Bitkiden Örnek Alma .....	16
3.4. Biyokimyasal Analizler .....	17
3.4.1. Pigment Analizi .....	17
3.4.2. Enzim Analizi .....	18
3.4.3. Süperoksit Dismutaz (SOD) Analizi .....	18
3.4.4. Peroksidaz (POD) Analizi .....	18
3.4.5. Katalaz (KAT) Analizi .....	18
3.4.6. Glutasyon S-Transferaz (GST) Analizi .....	19
3.4.7. Total Glutasyon (GSH) Analizi .....	19
3.4.8. Glutasyon Redüktaz (GR) Analizi .....	19
3.4.9. Hidrojen Peroksit (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) Analizi .....	20
3.4.10. Lipid Peroksidasyonu (MDA) Analizi .....	20
3.4.11. Toplam Protein Tayini.....	20
3.4.12. Oransal Su Analizi.....	20
3.4.13. Cr Analizi .....	21
3.4.14. İstatistiki Analizler .....	21
<b>4. BULGULAR .....</b>	<b>22</b>
4.1. K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> Stresi Uygulanan <i>Z. mays</i> 'da Kİa Değişimi.....	22
4.2. K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> Stresi Uygulanan <i>Z. mays</i> 'da Kİb Değişimi.....	23
4.3. K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> Stresi Uygulanan <i>Z. mays</i> 'da Karotenoid Değişimi.....	24
4.4. K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> Stresi Uygulanan <i>Z. mays</i> 'da Toplam Klorofil Değişimi .....	25
4.5. K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> Stresi Uygulanan <i>Z. mays</i> 'da GSH Değişimi.....	26
4.6. K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> Stresi Uygulanan <i>Z. mays</i> 'da GR Aktivitesi.....	27
4.7. K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> Stresi Uygulanan <i>Z. mays</i> 'da GST Aktivitesi (U/mg protein).....	28
4.8. K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> Stresi Uygulanan <i>Z. mays</i> 'da POD Aktivitesi.....	29
4.9. K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> Stresi Uygulanan <i>Z. mays</i> 'da KAT Aktivitesi (U/mg protein) .....	30
4.10. K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> Stresi Uygulanan <i>Z. mays</i> 'da SOD Aktivitesi.....	31
4.11. K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> Stresi Uygulanan <i>Z. mays</i> 'da MDA İçeriği.....	32
4.12. K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> Stresi Uygulanan <i>Z. mays</i> 'da Oransal Su İçeriği .....	33
4.13. K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> Stresi Uygulanan <i>Z. mays</i> 'da Krom (Cr) Değişimi .....	34
<b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....</b>	<b>35</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>43</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>52</b>

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 4.1.</b> <i>Z. mays</i> 'da çimlenme öncesi MT ile EpiBr uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı K <sub>la</sub> değişimi. ....	22
<b>Çizelge 4.2.</b> <i>Z. mays</i> 'da çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı K <sub>lb</sub> değişimi. ....	23
<b>Çizelge 4.3.</b> <i>Z. mays</i> 'da çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı Karotenoid değişimi. ....	24
<b>Çizelge 4.4.</b> <i>Z. mays</i> 'da çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı Toplam Klorofil değişimi. ....	25
<b>Çizelge 4.5.</b> <i>Z. mays</i> 'da çimlenme öncesi MT ile EpiBr uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı GSH değişimi. ....	26
<b>Çizelge 4.6.</b> <i>Z. mays</i> 'da çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı GR aktivitesi. ....	27
<b>Çizelge 4.7.</b> <i>Z. mays</i> 'da çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı GST aktivitesi. ....	28
<b>Çizelge 4.8.</b> <i>Z. mays</i> 'da çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı POD aktivitesi. ....	29
<b>Çizelge 4.9.</b> <i>Z. mays</i> 'da çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı KAT aktivitesi. ....	30
<b>Çizelge 4.10.</b> <i>Z. mays</i> 'da çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı SOD aktivitesi. ....	31
<b>Çizelge 4.11.</b> <i>Z. mays</i> 'da çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı MDA içeriği. ....	32
<b>Çizelge 4.12.</b> <i>Z. mays</i> bitkisinde çimlenme sonrası uygulanan kontrol gruplarında ve çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplarda gün içi ve günlere bağlı oransal su içeriği (OSİ) (%). ....	33
<b>Çizelge 4.13.</b> <i>Z. mays</i> bitkisinde çimlenme sonrası K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> uygulanan kontrol gruplarında ve çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplarda 5. gün Cr içeriği. ....	34

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR

<b>ROT</b>	<b>: Reaktif Oksijen Türleri</b>
<b>MT</b>	<b>: Melatonin</b>
<b>SOD</b>	<b>: Süperoksit Dismutaz</b>
<b>KAT</b>	<b>: Katalaz</b>
<b>GST</b>	<b>: Glutasyon S-Transferaz</b>
<b>GSH</b>	<b>: Glutasyon</b>
<b>O<sub>2</sub></b>	<b>: Oksijen</b>
<b>O<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	<b>: Süperoksit Radikali</b>
<b>H<sub>2</sub> O<sub>2</sub></b>	<b>: Hidrojen Peroksit</b>
<b>·OH</b>	<b>: Hidroksil Radikali</b>
<b>GR</b>	<b>: Glutasyon Redüktaz</b>
<b>MDA</b>	<b>: Malondialdehit</b>
<b>Epi Br</b>	<b>: Epibrassinosteroid</b>
<b>Kla</b>	<b>: Klorofil a</b>
<b>Klb</b>	<b>: Klorofil b</b>

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### ***Zea mays*'da Potasyum Dikromata Karşı Epibrassinosteroid ve Melatonin Uygulamasına Verilen Biyokimyasal ve Fizyolojik Cevaplar**

Zeynep Gülşah ÇANAK

İnönü Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Botanik Anabilim Dalı

52+viii sayfa

2025

Danışman: Prof. Dr. Emel YİĞİT  
Eş- Danışman: Prof. Dr. Gülçin BEKER AKBULUT

Ağır metaller, yüksek yoğunlukları sebebiyle düşük konsantrasyonlarda bile toksik ve zehirleyici etki gösterebilmektedirler. Bu araştırmada, dışsal olarak uygulanan epibrassinosteroid ve melatoninin potasyum dikromat stresine maruz bırakılan *Zea mays* L. bitkisinde bazı biyokimyasal ve fizyolojik cevaplar üzerindeki etkileri değerlendirildi. Bu amaçla May tohumculuktan temin edilen *Zea mays* L. tohumlarına ekim öncesi ayrı ayrı 0.5 mM epibrassinosteroid (EpiBr) ve 100 mM melatonin (MT) uygulandı. Çimlenme sonrası bitkiler 21. günde 5 mM ve 10 mM konsantrasyonların da  $K_2Cr_2O_7$  çözeltileri ile Cr stresine maruz bırakıldı. Bu gruplarda 1., 3. ve 5. günlerde alınan örneklerde pigment analizi, enzim analizi (SOD, POD, KAT, GST, GSH, GR ), Cr tayini, MDA analizi, toplam çözünebilir protein tayini ve oransal su analizi tayini yapılarak gruplar arasındaki değişimler karşılaştırmalı olarak değerlendirildi. Yapılan bu araştırmada Cr'un artan konsantrasyonlarda bitkiler için toksik etki oluşturduğu ancak MT ve EpiBr gibi önemli fitohormonlarla bu zararlı etkilerin ortadan kaldırılabileceği saptanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Ağır metal, Melatonin, Epibrassinosteroid, Cr, *Zea mays*, Antioksidan sistem, Pigment

## ABSTRACT

Master Thesis

### **Biochemical and Physiological Responses to Epibrassinosteroid and Melatonin Application Against Potassium Dichromate in *Zea mays***

Zeynep Gülşah ÇANAK

Inonu University  
Graduate School of Nature and Applied Sciences  
Department of Botany

52+viii sayfa

2025

Supervisor: Prof. Dr. Emel YİĞİT  
Co-Supervisor: Prof. Dr. Gülçin BEKER AKBULUT

Heavy metals can show toxic and poisonous effects even at low concentrations due to their high concentrations. In this study, the effects of exogenously applied epibrassinosteroid and melatonin on some biochemical and physiological responses in *Zea mays* L. plants exposed to potassium dichromate stress were evaluated. For this purpose, 0.5 mM epibrassinosteroid (EpiBr) and 100 mM melatonin (MT) were applied separately to *Zea mays* L. seeds obtained from May Tohumculuk before sowing. After germination, plants were exposed to Cr stress with 5 mM and 10 mM concentrations of  $K_2 Cr_2 O_7$  solutions on the 21st day. In these groups, pigment analysis, enzyme analysis (SOD, POD, CAT, GST, GSH, GR), Cr determination, MDA analysis, total soluble protein determination and relative water content analysis were performed on samples taken on the 1st, 3rd and 5th days and the changes between the groups were evaluated comparatively. In this research, it was determined that Cr has a toxic effect on plants at increasing concentrations, but these harmful effects can be eliminated with important phytohormones such as MT and EpiBr.

Keywords: Heavy metal, Cr, Melatonine, Epibrassinosteroid, *Zea mays*, Antioxidant system, Pigment

# 1.GİRİŞ

## 1.1. Genel Bilgi

Ekolojik ortam, organizmaların yaşamlarında fiziksel, kimyasal, biyolojik, sosyal, ekonomik ve kültürel açıdan etkileşim halinde oldukları en önemli alanı oluşturmaktadır. Hava, toprak ve su kirliliği olarak karşımıza çıkan çevresel kirlilik, tüm ekosistem üzerinde olumsuz etkilere neden olmaktadır.

Hava, toprak ve su ekosistemi oluşturan fiziksel unsurlar iken tüm canlı organizmalar ekosistemin biyolojik unsurlarını oluşturmaktadır. Ekosistemin en önemli unsurunu oluşturan su, evsel ve endüstriyel atıkların yaşam alanlarından temizlenmesi için kullanıldığından, ekosistemde hava ve topraktan çok daha fazla kirlenmeye maruz kalan etmendir.

Yapay organik atıklar, endüstriyel ve sanayi atıkları, petro-kimya ürünleri ve atıkları, tarımsal gübreler ve ilaçlar, temizlik malzemeleri, radyoaktivite, pestisitler, inorganik tuzlar, çeşitli kimyasal maddeler ve atık ısı da ekosistemin dengesini bozan etmenler arasındadır (Hammand ve Beliles, 1980; Detlefsen, 1988; Hapke, 1991).

## 1.2. Bitkilerde Stres

Canlılar yapıları gereği buldukları ortam ile sürekli iletişim halindedir. İçinde bulunduğu ortamda organizmalar olumsuz koşullar oluşması durumunda strese maruz kalırlar. Strese verilen cevap, canlının adaptasyon mekanizmasına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Stres, çevresel koşulların organizmalarda büyüme ve gelişmeyi olumsuz yönde etkileyen durumlar olarak tanımlanmaktadır. Bir başka ifade ile canlılar üzerinde olumsuz etkileri olan çevresel faktörler olarak tanımlanır. Bitkilerde stres, bitkinin canlılığı, ürün verimi, biyokütle artışı ve asimilasyon üzerine etkisi ile ilişkilendirerek açıklanabilen bir kavramdır.

Bitkilerde stres faktörleri; biyotik ve abiyotik stres faktörleri olarak gruplandırılmaktadır.

### **1.2.1. Biyotik Stres**

Biyotik stres faktörleri; mikroorganizmaların enfeksiyonu ile diğer organizmaların olumsuz etkileri sonucu oluşan faktörler olarak tanımlanır.

### **1.2.2. Abiyotik Stres**

Abiyotik faktörler ise organizmayı etkileyen çevresel faktörler olup bunlar; su, sıcaklık, ışık, radyasyon, kimyasallar, besin ortamı, tuz oranı, manyetik ve elektriksel alanlarda meydana gelen değişimler ile ilgili çevresel faktörlerdir (Büyük ve diğ., 2012). Ağır metal kirliliği abiyotik streslerden biri olup, çevre kirliliğine neden olmaktadır. Bu da besin zinciri yolu ile tüm organizmaların yaşamını etkilemektedir. Bitkiler sesil organizmalar olması nedeni ile ağır metal kirliliğine maruz kaldıklarında, ürünlerde kalite ve verim kaybına neden olarak önemli zararlara yol açmaktadır (Hou ve diğ., 2020).

### **1.3. Ağır Metal**

Metaller, çözünen iyonlar formunda suda, gaz halinde havada, toprak ve kayalarda da mineraller veya tuzlar şeklinde tüm ortamlarda bulunmaktadır.

Ağır metaller; 5 g/cm<sup>3</sup>'ten daha yüksek yoğunlukta olan elementler olarak tanımlanır. Genel olarak ağır metaller biyolojik olarak parçalanmazlar. Bazı ağır metaller hareketsiz olmaları nedeni ile doğal yollarla çevreden temizlenemeyip aynı zamanda biriktikleri yerden taşınmazlar. Bazı ağır metallerin ise hareketli olmaları nedeni ile; bitki kök sistemi ile difüzyon, endositoz veya özel metal taşıyıcılar yoluyla alındıkları rapor edilmiştir (Ghori ve diğ, 2019).

Metal kirliliği diğer kirlenme tiplerinden farklı olup, ağır metallerin çevredeki ilk kaynağı, doğal olarak mevcut jeokimyasal kökenli materyallerdir. Çevrede ağır metaller yaygın olarak birçok ortamda bulunur. İnsan faaliyetleri ile de artabilmektedir. Ağır metaller tüm dünyada ana kayalarındaki derişimlerine bağlı olarak farklı bölgelerde değişiklik gösterirler. Buna örnek olarak serpentin topraklarda Ni, Cr, Co bulunurken, kalamın topraklarda Zn, Pb ve Cd'nin yüksek seviyede olduğu tespit edilmiştir. Doğada ağır metaller kalıcı kirliliğe neden olmaktadır (Shaw ve diğ., 2004).

Ağır metaller bitki gelişiminde gerekli olup olmamalarına göre sınıflandırılmaktadır. Zn, Cu, Co, Ni ve Mn farklı enzimler için ko-faktör olarak görev yaparlar. Bu elementler, düşük konsantrasyonlarda bitki gelişimi için gereklidir. Ancak yüksek konsantrasyonlarda bitki için zararlı olup toksik etkiye neden olmaktadır. Bu metallerin yeterli miktarda

alınmaması durumunda organizmada metabolik reaksiyonlarda bozulmalara neden olur, yüksek konsantrasyonlarda ise ciddi sağlık sorunlarına neden olmaktadır (Alves ve diğ., 2018).

Al, As, Cr, Pb ve Cd bitki gelişiminde gerekli olmayan, çok dűřuk konsantrasyonlarda dahi bitkiye zarar verebilen ve toksisiteye neden olan ağır metallerin ikinci grubuna girmektedir. Ağır metallerin kararlı bileşikler olması nedeni ile biyolojik olarak parçalanmaması, buldukları ortamda uzun süre kalıcılıkları ve olası sağlık riskleri gibi daha birçok faktörden dolayı bu kontaminantlara karşı ciddi endişeler bulunmaktadır (Miri ve diđ., 2017). Ağır metallerin dođa ve insan üzerindeki etkileri ile ilgili birçok araştırma yapılmıştır (Sevik ve diđ., 2020; Karacocuk ve diđ., 2021).

Ađır metallerin toksisite derecesi; metalin konsantrasyonu, metal, iyon, organik bileřik gibi bulunuř formu, bulunduđu yer, tűrler ve etki sűresi gibi etmenlere bađlı olarak deđiřkenlik gűstermektedir.

#### **1.4. Krom (Cr)**

Dűnyada en fazla bulunan yedinci element Cr olarak bilinmektedir. Cr oldukça toksik olup, membran yapısı ile organellerde zararlara ve metabolik aktivitelerin bozulmasına bađlı olarak bűyűmede de gerilemeye neden olmaktadır (Kimbrough ve diđ., 1999). Cr gibi yüksek toksisiteye neden olan ađır metaller yüksek konsantrasyonlarda topraktaki biyolojik aktivitelerin bozulmasına, toprak verimliliđinin dűřmesine, bunlara bađlı olarak da biyolojik çeřitlilikte azalmaya sebep olmaktadır. Ayrıca besin zinciri yolu ile tűm organizmalara geçerek önemli sađlık problemlerine neden olmaktadır (Lichtenhaler, 1996).

Cr, endűstriyel atıkların ve kanalizasyon atıklarının deřarjı ile yeraltı sularında, toprakta ve tortullarda ciddi kirlenmeye neden olur (Shanker ve diđ., 2003). Cr toksisitesi; bűyűme geriliđi, kloroz, tepede solma ve kűklerin zarar gűrmesine neden olur (Öztűrk ve diđ., 2015b). Zeid (2001); bitkilerde kromun etkisi incelenmiř ve kromun amilazların aktivitesini ve dolayısıyla řekerlerin embriyo eksenlerine tařınmasını baskıladıđı gűzlemlemiřtir. Cr ayrıca fotosentez, mineral ve su fizyolojik sűreçleri gibi temel metabolizma üzerinde zararlı etkilere neden olduđu gűstermiřtir. Bununla birlikte kromun kloroplastın űst yapısını etkileyip etkilemediđi, elektron tařıma zincirinde mi ya da karbon fiksasyonu için enzimleri inhibe ederek mi etkilediđi henűz bilinmemektedir. Aynı zamanda birçok enzimin aktivitelerini etkiler ve dolayısıyla reaktif oksijen tűrleri űretir (Yaday, 2010). Genellikle Cr bitkilerde űç tip toksik etkiye neden olur, yani fotosentez ve antosiyanin

dahil olmak üzere temel bitki pigmentlerinin sentezini değiştirir (Boonyapookana ve diğ., 2002). Bitkiyi olumsuz etkileyen Cr, glutasyon ve askorbik asit gibi önemli antioksidan moleküllerin üretimini arttırır (Shanker ve diğ., 2003). Ayrıca Cr stres toleransına katkıda bulunan alternatif metabolitlerin üretimini de indükler.

### **1.5. Bitkilerde Ağır Metallere Verilen Tepkiler**

Metallerle kirlenmiş topraklarda büyüebilmek için bitkiler üç önemli strateji geliştirmişlerdir (Baker ve Walker, 1990):

- 1.Topraktaki yüksek yoğunlukta metal konsantrasyonu bulunan ortamlarda, metallerin bitkiye hava yolu ile girişini engelleyen ve köklerinde metallerin oranını kontrol altında tutabilenler “metal dışlayıcı bitkiler” olarak isimlendirilir.
- 2.Kendi bünyelerinde metalleri biriktirerek topraktaki metal seviyelerini gösterebilen bitkiler “metal indikatörler” olarak isimlendirilir.
- 3.Toprakta bulunan metalleri kendi yapılarında ortamdan daha yüksek miktarda içeren bitkiler de “toplayıcılar” olarak isimlendirilir.

### **1.6. Ağır Metallerin Bitkilere Zararı**

#### **1.6.1. Ağır Metallerin Bitkilerin Morfolojik Özelliklerine Verdiği Zararlar**

Bitkilerin ağır metallere ilk karşı karşıya kalan organları kökleridir (Tester ve Leigh, 2001; Verma ve Dubey, 2003). Kökte, yan köklerde azalma veya artma, saçak köklerin miktarında azalma ve genel kök boyunda kısalma gibi hasarlar görülebilir. Ağır metal hasarı devam ettikçe bu zarar kök bölgesi dışında bitkinin gövdesine doğru ilerler ve uzamayı etkiler. Ayrıca ağır metal hasarı bitkinin kök ve gövdesinde yaş ve kuru ağırlıkta azalmaya neden olur bu da bitki gelişimini olumsuz etkiler (Barceló ve Poschenrieder, 1990). Ağır metal hasarı yapraklarda ise şekil değişikliklerine, yaprak alanında küçülmeye, renk değişimine ve klorofil kaybına neden olabilir (Benavides ve diğ., 2005; Lombardi ve Sebastiani, 2005).

#### **1.6.2. Ağır Metallerin Bitkilerde Biyokimyasal Düzeyde Verdiği Zararlar**

Ağır metaller, lipid peroksidasyonuna neden olur ve membran yapısının işleyişini bozabilirler (Luna ve diğ., 1994). Lipid peroksidasyonu sonucunda meydana gelen malondialdehit (MDA) iyon alınımını negatif yönde etkiler, bileşiklerin polimerizasyonuna

ve çapraz bağlanmasına neden olup, membran yapısı, enzim aktivitesi, iyon taşınımı ile hücre bileşenlerinin stabilitesini bozabilir (Li ve diğ., 2006). Cd gibi ağır metaller klorofil sentezinde görev alan enzimleri inhibe eder ve enzim aktivitesi negatif etkilenir (Ouzounidou, 1995).

Bitkilerde ağır metal stresi, diğer stres faktörlerinde de olduğu gibi singlet oksijen, süperoksit radikali, hidroksil radikali ve hidrojen peroksit gibi serbest radikallerin üretimini artırarak bitkisel dokulara zarar vermekte ve oksidatif zarara neden olmaktadır (Foyer ve diğ., 1997; Halliwell ve Gutteridge, 2002).

Cr'a toksik seviyelerde maruz kalan bitkilerde fotosentez ve solunumun etkilenmesinden dolayı bitki büyümesinde belirgin azalma görülmektedir. Cr toksisitesi bitkilerde tohum çimlenmesi ile radikula büyümesini de baskılamaktadır (Yıldız ve diğ., 2011). Cr toksisitesi  $\alpha$  ve  $\beta$ -amilaz enzimlerinin aktivitesini azaltarak embriyonun gelişimi için gerekli şekerlerin dönüşümünü engelleyerek tohum çimlenmesini baskılamaktadır.

### **1.7. Reaktif Oksijen Türleri**

Elektronlar atomun yapısındaki yörüngelerde çiftler halinde bulunur. Moleküllerdeki atomların iki elektronu olmasına rağmen, hücrenin moleküler yapısındaki bir veya daha fazla atomun bir yörüngede bir elektron içermesi de mümkündür. Düşük molekül ağırlıklı ve kararsız yapıya sahip, elektron eksikliği olan bu moleküller, temas ettikleri diğer bileşiklerle reaksiyona girerek elektron açığını doldurur veya fazlalığını bağlandıkları moleküle verirler. Diğer moleküllerle hızlı bir şekilde etkileşime girerek reaksiyona girdiği molekülün özelliklerini bozan maddelere "serbest radikaller", "oksitleyici moleküller" veya "reaktif oksijen türleri (ROT)" adı verilmektedir.

Radikaller: Bir elektronu olmayan ve dolayısıyla diğer moleküllerle hızla etkileşime girebilen moleküllerdir. Süperoksit ve hidroksil en önemli radikallerdir. Radikal olmayanlar: Elektron boşluğu olmayan ancak diğer moleküllerle radikal özelliklere sahip moleküllere göre daha zayıf etkileşime girebilen oksidanlardır. Hidrojen peroksit bu gruba en iyi örnektir (Genişel, 2010).

### 1.7.1. Süperoksit ( $O_2^{\cdot-}$ ) Radikali

Tüm oksijenli solunum yapan canlılarda bulunan Süperoksit radikali ( $O_2^{\cdot-}$ ) oksijenin bir elektron alması sonucunda oluşan ilk anyondur.  $O_2^{\cdot-}$  radikali enzimatik ya da enzimatik olmayan reaksiyonlar ile üretilebilir.  $O_2^{\cdot-}$  radikali üretiminin ana yeri kloroplast membranları üzerinde bulunan fotosistem I dır. Ayrıca mitokondride elektron kaçakları sonucunda da üretilir. Süperoksit anyonu diğer ROT'ların ( $\cdot OH$  ve  $1O_2$ ) öncülü niteliğindedir (Alscher ve diğ.,1997). Yüksek reaktiviteye sahip olan  $O_2^{\cdot-}$ , lipidlerin ve diğer biyokimyasal bileşenlerin oksidasyonuna neden olurlar. Aynı zamanda  $O_2^{\cdot-}$  radikali lipid peroksidasyonu, hücre membranı, hücre içi toksisite ve DNA hasarlarına neden olduğu belirtilmiştir (Fridovich, 1995). Bu radikalın hidrojen peroksit üretmesi ve geçiş metallerinin indirgeyicisi olması sebebiyle oldukça önemlidir. Doğrudan hasara neden olmayan  $O_2^{\cdot-}$  radikali  $H_2O_2$  ile reaksiyona girerek canlı için daha toksik bir molekül olan  $\cdot OH$  radikalini oluşturabilir. Bu reaksiyon (Haber-Weiss) demir, bakır gibi metallerin katalizörlüğünde oldukça hızlı meydana gelir  $O_2^{\cdot-}$  süperoksit dismutaz (SOD) enzimi tarafından dismutasyona uğratılabilir ve bu nedenle iç konsantrasyonunun azalmasına yol açar (Halliwell, 1982; Erdal, 2010).

### 1.7.2.Singlet Oksijen ( $^1O_2$ )

Singlet oksijen oksijenin yüksek enerjili bir formundan oluşur.  $^1O_2$ , iki elektron çiftinin aynı veya farklı yörüngelerde zıt dönüşlere sahip olduğu bir durumu ifade eder. Eşlenmemiş elektronları olmadığından radikal değildir ancak çok yüksek oksitleyici özelliklere sahiptir.  $^1O_2$  kimyasal veya fotokimyasal olarak üretilebilir. Bitkilerde  $^1O_2$ 'nin üretildiği yer, klorofillerin enerjii oksijene aktardığı kısımdır (Foyer ve diğ., 1997).  $^1O_2$  diğer moleküllerle reaksiyona girdiğinde içerdiği enerjii aktarabilir ve diğer moleküllerle kovalent reaksiyonlara da girebilir. Özellikle karbon bağları singlet oksijenin bağlandığı alanlardır.  $^1O_2$  birçok organik molekülle reaksiyona girdiği için oldukça yıkıcıdır (Cadenas, 1989). Yağ asitleri (doymamış) ile doğrudan reaksiyona girerse peroksitler açığa çıkar ve böylece  $\cdot OH$  radikalleri gibi lipid peroksidasyonunu başlatabilir.

### 1.7.3. Hidroksil ( $\bullet\text{OH}$ ) Radikali

En reaktif ve en toksik ROT olarak bilinen hidroksil radikali ( $\bullet\text{OH}$ ), neredeyse tüm hücrel bileşenler ve tüm biyolojik moleküller ile potansiyel olarak reaksiyona girip lipid peroksidasyonuna, protein hasarına ve membran yıkımına neden olup aynı zamanda farklı hücrel bileşenlere de zarar verme özelliğindedir. Toksik olan bu radikali temizleyecek bir enzimatik sistemin yokluğunda, aşırı  $\text{OH}\bullet$  birikimi hücre ölümüne yol açar (Das ve Roychoudhury, 2014).

### 1.7.4. Hidrojen Peroksit ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )

ROT,  $\text{O}_2$ 'nin  $\text{O}_2 \bullet^-$  ve  $\text{H}_2\text{O}_2$ 'ye indirgendiği birçok reaksiyonla üretilebilir.  $\text{O}_2 \bullet^-$ , kimyasal olarak indirgenebilir veya süperoksit dismutaz (SOD) tarafından  $\text{H}_2\text{O}_2$ 'ye dönüştürülebilir (Noctor ve Foyer, 2018).  $\text{H}_2\text{O}_2$  hücrede apoplastik membranlar, çeşitli NAD(P)H oksidazlar ve peroksidazların yanı sıra kloroplast, mitokondri ve peroksizom gibi organeller tarafından üretilebilir (Mubarakshina ve diğ., 2010).  $\text{H}_2\text{O}_2$ , diğer ROT ile karşılaştırıldığında nispeten uzun bir yarılanma ömrüne sahip orta derecede bir reaktiftir (Das ve Roychoudhury, 2014). Fazla  $\text{H}_2\text{O}_2$ 'nin bitki hücrelerinde oksidatif strese neden olduğu bilinmektedir.  $\text{H}_2\text{O}_2$ 'nin ayrıca birçok metabolik ve fizyolojik sürecin önemli bir düzenleyicisi olarak görev yaptığı gösterilmiştir. Membranlara karşı oldukça geçirgen olduğundan, ROT tarafından üretilen sinyallerin ikinci habercisi olarak kabul edilir (Gill ve Tuteja, 2010a; Huang ve diğ., 2019)

### 1.7.5. Lipid Peroksidasyonu (LPO)

ROT proteinler, lipitler, karbonhidratlar ve nükleik asitler gibi yapı taşlarını etkiler. Çoklu doymamış yağ asitleriyle kolayca reaksiyona girerek peroksit ürünleri oluştururlar. LPO, hücre ve organel zarlarındaki fosfolipitlerdeki doymamış yağ asitlerinin oksidasyonuna neden olan, hücre zarlarının lipit yapısını değiştiren, zar fonksiyonlarını ve hücre yapısını bozan bir reaksiyondur (Thomashow, 1999). LPO' nun neden olduğu membran hasarı geri döndürülemez. LPO'nun başlatılmasından sorumlu radikaller  $\text{O}_2$  anyonu ve  $\bullet\text{OH}$  radikali olarak bilinir. Yağ asitlerinin radikal kaynaklı dehidrojenasyonu, yağ asitlerinin radikal özellikler kazanmasına neden olur. Lipid radikalleri oldukça kararsızdır ve kararlı bir duruma ulaşmak için molekül içi bağlarını yeniden düzenleyerek konjuge dien yapısı haline gelirler. Lipid hidroperoksitler parçalandığında biyolojik olarak aktif aldehitler oluşur. Bu yıkım sonucu oluşan reaktif aldehitler ya hücre içinde metabolize

edilir ya da asıl etki yerlerinden difüze olarak hücrenin diğer kısımlarına zarar verir. Malondialdehit (MDA), üç veya daha fazla çift bağ içeren yağ asitlerinin peroksidasyonu ile oluşur. MDA, yağ asidi oksidasyonunun niceliksel bir göstergesi değildir. Ancak lipid peroksidasyonunun derecesini gösterir. Bu nedenle MDA seviyelerinin ölçülmesi vücuttaki LPO seviyelerini ölçmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. MDA, tiyobarbitürik asit ile pembe bir bileşik oluşturur ve LPO oranı bu çözeltinin absorbans değerleri kullanılarak belirlenir (Erdal, 2010).

## **1.8. Antioksidanlar**

Antioksidanlar, enzimatik ve enzimatik olmayan antioksidanlar olmak üzere ikiye ayrılırlar.

### **1.8.1. Enzimatik Antioksidanlar**

Süperoksit dismutaz (SOD), katalaz (KAT), askorbat peroksidaz (APX), guaiakol peroksidaz (POD), glutatyon redüktaz (GR), dehidroaskorbat redüktaz ve monodehidroaskorbat redüktaz bu grup enzimlerdendir

#### **1.8.1.1. Süperoksit dismutaz (SOD)**

SOD ve süperoksit anyon radikallerine karşı en önemli antioksidan savunma sistemidir. SOD bir süperoksit radikalini  $O_2$  molekülüne yükseltgeyip, diğer bir süperoksit radikalini ise daha az reaktif bir molekül olan  $H_2O_2$  'ye indirgenmesini katalize eder.

#### **1.8.1.2. Peroksidaz**

Peroksidazlar, bitkilerdeki metabolik süreçlerin düzenlenmesinde ve stresle mücadelede kritik enzimlerdir. Bitkilerde stres koşullarına yanıt olarak aktif hale gelirler ve oksijenin reaktif formlarını parçalamada görev alırlar.

#### **1.8.1.3. Glutatyon redüktaz (GR)**

Glutatyon redüktaz NADPH'a bağlı bir flavo enzimdir. Okside glutatyonun (GSSG) redükte formuna (GSH) indirgenmesinde görev almaktadır (Carocho ve Ferreira, 2013)

#### **1.8.1.4. Katalaz (KAT)**

KAT, temel olarak peroksizomlarda bulunmaktadır. Oksijenin, hücrelerdeki biyokimyasal reaksiyonlar sırasında serbest radikaller gibi reaktif formlar oluşturması, hücrelere zarar verebilir. KAT,  $H_2 O_2$ ,  $H_2 O$  ve  $O_2$  gazına dönüştürerek zararlı etkilerini ortadan kaldırır.

#### **1.8.2. Enzimatik Olmayan Antioksidanlar**

Serbest radikalleri nötralize ederek hücrelere zarar veren oksidatif stresin önlenmesine yardımcı olan ve vücutta doğal olarak bulunan veya dışarıdan alınan bileşiklerdir. GSH, askorbik asit tokoferol, antosiyanin ve karotenoidler bu grup içerisinde bulunmaktadır.

##### **1.8.2.1. Glutatyon (GSH)**

Glutatyon, ROT 'ların oluşturduğu hasara karşı organizmayı korumada önemli bir antioksidandır. Glutatyon, sistein, glutamin ve glisin aminoasitlerinden oluşur ve genellikle indirgenmiş formda bitkinin farklı kısımlarında bulunabilir (Mittler ve Zilinskas, 1992). Glutatyonun biyolojik işlevleri arasında, bitkilerde sinyal iletimi, metabolitlerin bağlanması, ksenobiyotik bileşiklerin yıkımı, amino asitlerin hücre içindeki taşınımı (Cesco ve diğ., 2021), patojen direncinin sağlanması (Király ve diğ., 2024) apoptosis (do Carmo Santos ve diğ., 2024) stres koşulları altında bazı genlerin ekspresyonu ve indirgenmiş askorbik asidin oluşumu bulunmaktadır.

#### **1.8.3. Doğal Antioksidanlar**

Doğal antioksidanlar, bitkiler ve diğer doğal kaynaklar tarafından üretilen ve vücudu oksidatif strese karşı koruyan bileşiklerdir. Bitkilerde en yaygın bulunan doğal antioksidanlar arasında fenolik bileşikler, flavonoidler, karotenoidler ve tokoferoller yer alır. Bu bileşikler, bitkilerin tüm kısımlarında, özellikle meyve, sebze, yaprak, tohum ve çiçeklerde bulunur.

### **1.8.3.1. Fenolik Bileşikler**

Polifenollerin aktiviteleri, kimyasal yapılarındaki hidroksil gruplarına bağlıdır (Khan ve diğ., 2014). Fenolik bileşikler; flavonoidler, fenolik asitler ve fenolik polimerler (tanenler) olmak üzere üç sınıfa ayrılırlar.

**Flavonoidler:** Flavonoidler, özellikle fotosentez yapan bitki hücrelerinde meydana gelen, en yaygın bitki fenolik bileşik grubudur. Çiçekli bitkilerin ana renklendirici bileşenidir. (Bestil ve Uysal, 2023).

**Fenolik Asitler:** Bir aromatik halkaya bağlı bir veya daha fazla hidroksil ( $\bullet\text{OH}$ ) grubuna sahip olan bileşiklerdir. Bu yapı, onları güçlü antioksidanlar yapar çünkü hidroksil grupları serbest radikalleri tutar ve böylece hücrelere zarar vermelerini engeller (Vuoulo ve diğ., 2019).

**Fenolik Polimerler (tanenler):** Tanenler bitkilerde doğal olarak bulunan polifenollerdir. Asıl özellikleri proteinlere bağlanarak onları çöktürmektir. Tanenlerin, insanlar ve hayvanlar tarafından tüketilen birçok gıda ve yemin besleyici değeri üzerinde büyük etkiye sahiptirler (Aydın ve Üstün, 2007).

### **1.8.3.2. Karotenoidler**

Vücutta serbest radikallerin birikmesi, hücrelerin hasar görmesine, yaşlanmaya ve çeşitli hastalıkların (kanser, kalp hastalıkları gibi) gelişmesine yol açabilir. Karotenoidler, serbest radikalleri nötralize ederek bu zararlı etkileri önler ve hücre sağlığını korur. Bu antioksidan özellikleri, kanser gibi hastalıkların gelişimini engelleyebilir ve yaşlanma sürecini yavaşlatabilir (Jomova ve Volka, 2013). Çoğunlukla bitki hücrelerinde plastidlerde bulunurlar (Nisar ve diğ., 2015). 450-570 nanometre dalga boyundaki ışınları absorblayarak enerjiyi klorofil moleküllerine transfer eden bir anten özelliği gösterirler. Karotenoidler lipid peroksidasyon ürünleri ile tepkimeye girerek zincir reaksiyonlarını sonlandırarak tekli oksijeni detoksifiye etmektedirler (Koca ve Karadeniz, 2005).

### **1.9.Melatonin**

Melatonin (N-asetil-5-metoksitriptamin) tüm bitki türlerinde içsel olarak üretilen bir indolamin olarak tanımlanır. İnsan beslenmesinde sağlıklı bir bileşen olarak değerlendirilen melatoninin domates, elma, kiraz, muz ve çilek gibi birçok meyve ve sebze türünde doğal olarak bulunduğu bilinmektedir. Ayrıca bitkilerde biyotik ve abiyotik stres koşullarına karşı direncini arttırmak amacıyla bir sinyal molekülü olarak hareket etmekle birlikte, aynı

zamanda güçlü bir serbest radikal temizleyici özelliği ile doğrudan antioksidan aktiviteye sahiptir. Yaş meyve ve sebzelerde dışsal olarak uygulanan melatonin uygulamasının hasat sonrası olgunlaşma ve yaşlanmayı geciktirdiği, üşüme zararına dayanıklılığı arttırdığı, fizyolojik ve patolojik bozulmaları azaltarak ürünlerde besin kalitesini koruduğu belirtilmektedir. Melatonin uygulamasının meyvelerde ağırlık kaybı ve çürümeyi azalttığı, renk, sertlik, toplam çözünebilir kuru madde miktarı ve titre edilebilir asitlik gibi meyve yaşlanması ile ilişkili olan kalite özelliklerindeki değişimleri de yavaşlattığı belirlenmiştir (Liu ve diğ., 2018).

Bitkilerdeki MT'nin sıcak, soğuk, kuraklık, tuz, oksidasyon, ağır metal dahil olmak üzere çeşitli streslere yanıt verdiği yaygın olarak bildirilmiştir. MT, bitkilerde ağır metal stresine karşı çok yönlü koruma sağlar. Ağır metallerin translokasyonunu kısıtlar ve MT biyosentez yollarındaki ilgili genleri düzenler, böylece ağır metal stresine mücadele etmek için dahili MT seviyelerini artırır (Goodarzi ve diğ., 2020; Farag ve diğ., 2020; Yang ve diğ., 2023).

#### **1.10. Brassinosteroidler**

Brassinostreoidler (BR) ilk kez kolza (*Brassica napus*) bitkisinin polenlerinden izole edilmiştir (Grove ve diğ., 1979). Steroid yapısında bulunan BR'ler adını Lahanagiller (Cruciferae) familyasının Brassica cinsinden almıştır. BR sentezinin mevalonik asitten başladığı belirtilmektedir. Brassinolidler (BL'ler), bitki büyümesinde ve gelişmesinde birçok rol oynayan yeni bir fitohormon sınıfıdır (Hassan, 2023). BR uygulamasının hücre bölünmesi, hücre uzaması, tuz stresi, soğuğa ve hastalık-zararlılarına tolerans, meyve dökümünü engellemek, verimi artırmak, çimlenmeyi ve kök büyümesini teşvik etmek gibi birçok amaçla kullanıldığı saptanmıştır (Algül ve diğ., 2016; Kabakcı, 2022).

Dışsal uygulanan büyüme düzenleyicilerin bitkilerde kuraklık, ağır metal stresi ve tuz stresi gibi farklı abiyotik streslere karşı toleransı artırabildiğini gösteren kanıtlar vardır. Brassinolid biyosentezinin aktif bir yan ürünü olan 24-epibrassinolit (EBL), fotosentez (Sairam, 1994), protein ve nükleik asit biyosentezi (Bajguz, 2000) gibi farklı bitki metabolik süreçlerini uyarma yeteneğine sahiptir. EBL, mısırdaki (*Zea mays* L.) ATPaz aktivitesini ve karbondioksit fiksasyonunu, fosfoenol-piruvat karboksilaz (PEPcase) ve ribuloz-1,5-bisfosfat karboksilazın (RuBPase) aktivitelerini ve buğdayda (Braun) çözünebilir protein konsantrasyonunu artırır. Normal bitki büyümesi ve gelişmesindeki rolünün yanı sıra,

EBL'nin bitkiler üzerinde anti-stres etkileri vardır; kuraklık, soğuk, tuz ve ağır metal stresi dahil olmak üzere farklı abiyotik streslerin olumsuzluklarını hafifletmeye yardımcı olur.

### **1.11. Klorofiller**

Fotosentezin değişik aşamalarında katalizör görevi yapan klorofiller fotosentez sırasında ışık enerjisinin absorbe edilmesinde görev alırlar (Kaçar ve diğ., 2006). Yapraklardaki klorofil miktarı, ışık koşulları ve mevsimsel değişiklikler gibi birçok içsel ve dışsal faktörün etkisi ile değişkenlik göstermektedir. Bitkilerde klorofil içeriği fizyolojik faaliyetlerin, bitki stresinin ve besin elementi eksikliklerinin önemli bir göstergesidir (Marschner, 1995; Penuelas ve diğ., 1995).

Klorofil çeşitlerinden a ve b yüksek bitkilerde bulunur. Klorofil a mavimsi yeşil, klorofil b ise sarımsı yeşil renge sahiptir. Klorofil a molekülünün 3. karbon atomuna metil grubu, klorofil b molekülünün 3. karbon atomuna ise aldehit grubu bağlıdır (Vardar, 1972).

### **1.12. Mısır Bitkisi**

Mısır, Poaceae (buğdaygiller) familyasına ait tek çenekli bir bitkidir. Çiçekleri tek evcikli olup, erkek (tepe püskülü) ve dişi çiçekler (koçan) aynı bitki üzerinde fakat farklı yerlerde bulunmaktadır. Mısır,  $2n=20$  kromozoma sahip diploid bir bitkidir (Morris, 2002). Mısır, günümüzde hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde önemli bir tarım ürünü olarak yetiştirilmektedir. Mısır, besin değeri, endüstriyel kullanımı ve tarımsal üretimdeki rolü ile büyük bir öneme sahiptir.

Mısır (*Zea mays* L.) tahıllar içerisinde birim alanda en yüksek verimi sağlayan C4 kültür bitkisidir (Nas ve diğ., 2024). Yüksek oranda sulama suyuna gereksinim duymaktadır (Stone ve diğ., 1996). Kuru madde ve tane verimleri sulama ile önemli ölçüde artırılabilir (Yazar ve diğ., 1999). Bununla birlikte mısır, kuraklığa oldukça duyarlı bir bitkidir (Otegui ve diğ., 1995).

Mısır tanesinin yaklaşık %60-70'ini nişasta oluşturur. Mısır nişastası, özellikle gıda endüstrisinde, tatlandırıcılar, kalınlaştırıcılar, ve çeşitli işlenmiş gıda ürünlerinin üretiminde yaygın olarak kullanılır. Ayrıca, mısırın nişastası, genellikle düşük glikemik indekse sahip olduğundan, kan şekeri üzerinde daha az etki yaparak diyabet gibi durumlarla mücadelede avantaj sağlayabilir. Mısırın protein içeriği genellikle %8-10 arasında değişir (Lajolo ve Menezes, 2003, Van der Fels-Klerx ve Lanteri, 2020).

## 2.KAYNAK ÖZETLERİ

Farklı dozlarda kurşun ve kadmiyumun mısır genotiplerindeki etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada çeşitlerin çimlenme oranlarında önemli bir baskılanma görülmemesine rağmen kök ve sürgün uzunluklarındaki azalmanın önemli seviyede olduğunu saptanmıştır (Ayhan ve diğ., 2007)

Soudek ve diğ. (2010) çeşitli ağır metallerin farklı konsantrasyonlarını (0.01, 0.05, 0.1, 0.5 ve 1 mM) keten (*Linum usitatissimum* L.) tohumlarına uygulamışlardır. Ağır metal konsantrasyon artışına paralel olarak çimlenen tohum sayısında ve kök uzunluğunda azalmalar belirlemiştir.

Opeolu ve diğ. (2010) Pb uygulanan domateste yaprak sayısı ve fide yüksekliğinin olumsuz etkilendiğini belirtmişlerdir.

Yeni ve diğ. (2016) mısır ve mercimek tohumlarına farklı konsantrasyonlarda kadmiyum ve alüminyum uygulaması yapmışlardır. Özellikle kadmiyum yoğunluğunu artışına paralel olarak mısır ve mercimekte tohum çimlenmesini engellediği saptanmıştır.

Rellán-Álvarez ve diğ. (2006) mısır bitkisine oksidatif strese tepkisini belirlemek için farklı konsantrasyonlarda kadmiyum ve civa uygulaması yapmışlardır 6 µM kadmiyum uygulaması sonrasında GSH içeriği artarken, GSSG içeriğinde artış olmazken 30 µM kadmiyum, 6 µM ve 30 µM civaya maruz bırakılan bitkilerde GSH oranı değişmezken GSSG oranında artış olmuştur.

Mısır bitkine demir ve kromun kombine ya da tek başına uygulandığı bir çalışmada büyüme parametreleri, klorofil içeriği, antioksidan enzimler, lipid peroksidasyonu ve besin alımı (bakır, çinko ve mangan) üzerine etkileri araştırılmıştır. Krom uygulaması sonrasında köklerinin bodurlaştığı ve yapraklarda solmaların olduğu belirlenmiştir. Lipid peroksidasyonu 3 ve 9 µg/L demir uygulanan yapraklarda artış göstermiştir (Mallick ve diğ., 2010).

24-Epibrassinolid hormonunun bitkilerdeki mangan (Mn) stresine karşı etkisinin araştırıldığı çalışmada *Arabidopsis thaliana* bitkileri 24 saat farklı konsantrasyonlarda Mn 26 (0.5 ve 1.0 mM) ve/veya EBL'ye (1 µM) maruz bırakılmıştır. Antioksidan sistemdeki değişiklikler ve strese bağlı gen ekspresyonları rozet yapraklarda tespit edilmiştir. Mangan uygulaması ile SOD ve KAT enzim aktivitelerinin artışı, EBL uygulamasıyla kontrol grubuna göre daha da artış göstermiştir. Hormon ve stresin kombine uygulanması sonucu

antioksidan sistem ile ilgili bazı genlerin ifadelerinde artış tespit edilmiştir. Sonuç olarak EBL'nin antioksidan sistemi Mn stresi altındaki *A. thaliana* bitkisinde koordineli bir şekilde düzenlediği bildirilmiştir (Surgun-Acar ve Zemheri-Navruz, 2021).

Soliman ve diğ. (2020), tuzluluk stresi altındaki Giza fasulyesi ile yaptıkları bir çalışmada ekim öncesinde fasulye tohumlarına azot içeren BR uygulamış ve uygulama sonucunda tek başına uygulanan BR'nin ve azotun ya da her ikisinin birlikte uygulanmasının kontrol ve tuzluluk stresi altındaki Giza fasulyesinde biyokütleyi ve bitki büyümesini artırdığını bildirmişlerdir. Bitkideki biyokütle ağırlığında ve fide boyunda tuzluluk stresi nedeniyle düşüş gözlenmiş, tohumlara BR uygulaması ile birlikte bu seviyelerde büyük oranda iyileşme olduğu saptanmıştır. Ozmolit birikimindeki ve antioksidan aktivitedeki artış nedeniyle tuz stresinin oluşturduğu osmotik stresin ve oksidatif hasarın da büyük oranda azaldığı belirtilmiştir.

Huang ve diğ. (2020), kuraklık stresi altındaki yerfıstığı tohumlarına ekim öncesi uyguladıkları 0-0.05-0.10-0.15 ve 0.20 ppm BR ile muamele etmiş, sonuç olarak ekim öncesi uygulanan BR ile bitki yapraklarının klorofil içeriğinin ve fotosentetik etkinliğin, bitkinin boyunun, kökün, gövdenin ve yaprakların kuru ağırlığının önemli derecede arttığını 34 belirtmişlerdir. Ayrıca bu sonuçlara göre yerfıstığındaki en yüksek verim için optimal BR konsantrasyonunun 0.15 ppm dozu olduğunu bildirmişlerdir

Hardal (*Brassica juncea*) köklerine yapılan 0,1 mM melatonin uygulamasının kök büyümesini uyardığı, 100 mM'nin ise engellediği görülmüştür (Chen, 2009). Aynı çalışmada düşük melatonin konsantrasyonunda içsel serbest IAA konsantrasyonu artmıştır. Araştırmacılar düşük konsantrasyonlardaki melatoninin kök büyümesi üzerine olan etkisini, melatonin ile uyarılan IAA biyosentezi tarafından tetiklendiğini öne sürmüştür. Yine Arabidopsis, soya fasulyesi, Bermuda çimi (*Cynodon dactylon*) ve Citrus gibi pek çok türe dışarıdan yapılan melatonin uygulamaları sonucunda kök ve sürgünlerde büyümelerin meydana geldiği ifade edilmiştir (Bajwa ve diğ., 2014; Shi ve Chan, 2014; Kostopoulou ve diğ., 2015; Shi ve diğ., 2015a; Wei ve diğ., 2015).

Kuraklık stresi altında kivi fidanlarına dışarıdan yapılan 0-200 µM aralığında melatonin uygulamaları sonucunda en etkili kök büyümesinin ve gelişiminin 100 µM melatonin uygulanan fidanlarda olduğu belirlenmiş ayrıca yapılan 200 µM melatonin uygulamasının yarardan çok zarara sebep olduğu ve kök büyümesinde azalmaların gerçekleştiği belirlenmiştir (Liang ve diğ., 2019). Arabidopsis bitkisine farklı

konsantrasyonlarda melatonin uygulamasının kök uzunluğu üzerine olan etkileri incelendiğinde düşük konsantrasyondaki melatoninin büyüme düzenleyici olarak görev yaptığı ancak konsantrasyon arttıkça kök uzunluğuna olan etkinin olumsuz şekilde azaldığı belirlenmiştir (Hernández ve diğ., 2015).

Patlıcan (Hadrian F1) fidelerine topraktan farklı konsantrasyonlardaki melatonin (0, 1, 5 veya 25  $\mu\text{M}$ ) uygulamaları sonucunda 3 gün süreyle gece 5°C ve gündüz 10°C sıcaklığa maruz bırakılmaları sonucunda meydana gelen üşüme stresi sonucunda 5  $\mu\text{M}$  melatonin uygulanmış fidelerde antioksidan enzim (KAT, POX ve APOX) aktivitesi artmış ve hücre zarında meydana gelen zararlanmalar ve  $\text{H}_2\text{O}_2$  içeriği azalmıştır (Yakupoğlu ve diğ., 2022).

Basit ve diğ. (2022), iki farklı çeltik çeşidinde Cr'nin (krom) olumsuz etkilerini azaltmak için ekim öncesi tohumlara 0.01  $\mu\text{M}$  BR uygulamışlardır. Uygulama sonucunda Cr'nin toksik etkisi altındaki çeltik tohumlarına uygulanan BR ile çimlenme oranında, çimlenme indeksinde, ortalama çimlenme süresinde ve tohum canlılığında pozitif etkiler gözlemlenmiştir. Ayrıca uygulanan BR'nin etkisi ile fotosentez hızında, fide yaş ve kuru ağırlıklarında, sürgün ve kök uzunluklarında da önemli derecede artış olduğunu bildirmişlerdir.

Li ve diğ. (2022), *S. lycopersicum* bitkisinde PEG'in oluşturduğu osmotik stresin yüksek  $\text{CO}_2$  ve yüksek ABA kullanılarak iyileştiğini bildirmişlerdir. Genç hıyar yapraklarının üst kısmına radyoaktif (14C) olarak işaretlenen EBL eksojen olarak uygulanmış ve yaprak tarafından hızlıca alındığı görülmüştür. EBL'nin yaprak dışındaki diğer kısımlara ise daha yavaş taşındığı saptanmıştır. Uygulanan 14C-EBL'nin sadece %6,3'lük kısmının daha genç olan yapraklara taşındığı bildirilmiştir.

Moustafa-Farag ve diğ. (2020), Bu derlemede, MT'nin tuzluluk, alkalilik, asitlik ve ağır metallerin varlığı gibi yaygın abiyotik toprak stres faktörlerinin etkilerini hafifletme, bitkilerin genel metabolizmasını güçlendirme ve zararlı maddelere karşı koyma kapasitesi hakkındaki son veriler incelenmiştir. MT'nin vasküler bitkilerin abiyotik strese direncinde önemli bir biyoaktif molekül olduğu, MT'nin toprakla ilişkili strese karşı bitki toleransını artırmadaki rolünü ve mekanizmasını, özellikle de bir antioksidan molekül olarak önemli rol oynadığını belirtilmiştir.

### **3. MATERYAL VE METOT**

Bu çalışma 2023-2024 yıllarında İnönü Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesinde yürütülmüştür. Çalışmanın yapıldığı odanın sıcaklığı 23 °C'ye, ışık periyodu da 8 saat gece 16 saat gündüz olacak şekilde ayarlandı. İlk olarak petri denemeleri yapıldı. Tohumlar 10 dk %5'lik hipoklorant çözeltisinde bekletildi. Daha sonra bu tohumlar 3 defa distile sudan geçirilerek hoagland çözeltisi içerisinde 12 saat havalandırma yapılarak bekletildi. Deneyde 9 farklı grup oluşturuldu. Her bir grup 3 tekrarlı çalışıldı. Melatonin ve epibrassinosteroid uygulamaları yapılan tohumlar ise ekimden 6 saat önce yine havalandırma yapılarak beklemeye bırakıldı. Tohumlar perlit dolu kaplara eşit olarak ekildi ve Hoagland çözeltisi ile 2 gün aralıklarla sulaması yapıldı. Yetiştirilen örnekler 21. günde 5-10 mM olarak hazırlanan farklı yoğunluklarda Cr çözeltileri uygulandı. Daha sonra 1. 3. ve 5. gün örnekleri analizler için hızlı bir şekilde, uygun ağırlıklarda tartılarak alüminyum folyo ile paketlenerek sıvı azotta donduruldu ve -40 °C'de derin dondurucuda korundu.

Bu çalışmada pigment analizi, enzim analizi (SOD, POD, KAT, GST, GSH, GR ), Cr tayini, MDA analizi, toplam çözünebilir protein tayini ve oransal su analizi tayini yapıldı.

#### **3.1. Tohum Ekimi**

Tohumlar ekilmeden önce sayıları belirlendi. Belirlenen miktara bağlı olarak tohumlar 10 dk %5'lik hipoklorant solusyonunda bekletildi daha sonra 3 kere distile sudan geçirildi. Perlit dolu saksılara kuyucuklar açılarak tohumlar ekildi. Üç günde bir örnekler Hoagland çözeltisi ile sulama yapıldı.

#### **3.2. Ön Denemeler**

Ön deneme petri kaplarında yapıldı. Uygulanacak olan Cr miktarı belirlendi. Her bir grup için 3 tekrar yapıldı. Kontrol grubu 5 mM, 10 mM, 30 mM, 50 mM, 100 mM, 300 mM olmak üzere 6 farklı dozda krom çözeltisi uygulandı ve gelişim sadece 5 mM ve 10 mM uygulanan petri kaplarında gözlemlendiği için saksı denemelerinde de bu dozun uygulanmasına karar verildi.

#### **3.3. Bitkiden Örnek Alma**

21 günün sonunda gruplandırılan örnekler 5-10 mM potasyum dikromat çözeltisi uygulandı. Takip eden 1., 3. ve 5. günlerde bitkilerin yapraklarından örnekler 0.5 mg

tartılarak alüminyum folyo içerisine alınarak sıvı azotta dondurulup -40 °C’de derin dondurucuda analizler yapılncaya kadar muhafaza edildi.

### 3.4. Biyokimyasal Analizler

#### 3.4.1.Pigment Analizi

Pigment analizi De Kok ve Graham (1980)’a göre yapıldı. 27 örnek için 3 tekrarlı olmak üzere 81 erlen hazırlandı ve etiketlendi. Örnekler ışık almayı engellemek için alüminyum folyo ile kapatıldı. Örneklerin ekstraksiyonu için %80’ lik aseton hazırlandı. 0.5 mg olarak tartılan örneklerin üzerine sıvı azot dökülerek 30 cc %80’ lik aseton ile homojenize edildi. Homojenize edilen örnekler alüminyum folyo ile kapatılmış behere konularak +4 °C’de buzdolabında 24 saat tutuldu. Bu örnekler daha sonra 5000 rpm de 10 dakika santrifüj edildi. Santrifüjden elde edilen süpernatam cam tüpe alınarak okumaya hazır hale getirildi. Pigment içeriğini saptamak için 480, 510, 645 ve 663 nanometrede ölçümleri yapılarak absorbans değerleri kaydedildi. Elde edilen değerler aşağıdaki formüllere göre hesaplandı.

Pigment hesaplama formülleri (Rajput, 2017):

$$K_{la} = \frac{12.7.(A_{663}) - 2.69.(A_{645}) \times V}{1000} \times W$$

$$K_{lb} = \frac{22.9.(A_{645}) - 4.68.(A_{663}) \times V}{1000} \times W$$

$$\text{Karotenoid} = \frac{7.6.(A_{480}) - 1.49.(A_{510}) \times V}{1000} \times W$$

$$\text{Toplam klorofil} = \frac{20.2.(A_{645}) + 8.02.(A_{663}) \times V}{1000} \times W$$

(A: Absorbans V: Hacim W: Taze ağırlık)

### **3.4.2. Enzim Analizi**

0.5 g yaprak örnekleri, seramik bir havan içerisinde sıvı azot kullanılarak öğütüldü. Ardından, 2.5 ml 0.1 M pH 7.5 Tris-HCL tamponu, 2.5 ml 0.1 mM EDTA ve 0.5 ml %1'lik PVP eklenerek homojenize edildi. Karışım, +4 °C'de 12000 rpm'de 15 dakika süreyle santrifüj edildi. Elde edilen süpernatantlar, ependorf tüplerine alınarak -40 °C'de dondurucuya kaldırıldı. Tüm işlemler, enzim aktivitesini korumak amacıyla buz üzerinde gerçekleştirildi.

### **3.4.3. Süperoksit Dismutaz (SOD) Analizi**

Süperoksit dismutaz analizi McCord ve Fridovich (1969)'e göre yapıldı. 50 mM Ph 7.8 olan fosfat tamponuna 24.8 mg sitokrom-c eklendi. Diğer yandan 10 ml NaOH içine 0.076 mg ksantin eklendi ve bu ikisi karıştırılarak A tamponu elde edildi. Daha sonra 0.2 U/ml ksantin oksidaz ve 0.1 Mm EDTA içeren B çözeltisi hazırlandı. Okuma için küvete 1ml A tamponu, 50 µl B tamponu, 100 µl örnek konularak spektrofotometrede (Biochrom Libra S22) 550 nanometrede okutuldu ve 0. ve 2. dakikaları kaydedildi. Kör olarak 1000 µl distile su kullanıldı.

### **3.4.4. Peroksidaz (POD) Analizi**

Peroksidaz aktivitesi tayini Peters ve diğ. (1989) ve MacAdam ve diğ. (1992)'nin yöntemleri modifiye edilerek yapılmıştır. 0.5 g taze yaprak dokusu 0.5 g polivinilpirolidon (PVP), 3 ml 66 mM potasyum tamponu (pH 7) ve 3 ml 100 mM KCl içerisinde homojenize edildi. Homojenat +4 °C 10000 rpm'de 10 dk santrifüj edildi. 0.04 ml 0.03 M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 3 ml 0.1 M potasyum fosfat tamponu (pH 6) ve 0.05 ml 0.2 M guaikol bir başka tüpte vortekslenerek ayrı bir solüsyon hazırlandı. 0.1 ml ekstrakt hazırlanan solüsyonun 0.9 ml'sine eklenerek spektrofotometrede 436 nm'de 0., 1. ve 3. dk'daki enzim aktivitesindeki değişim ölçüldü. Guaikol'ün ekstinksiyon katsayısı 26.6 mM<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup> olarak alındı.

### **3.4.5. Katalaz (KAT) Analizi**

Katalaz analizi Luck (1963)'a göre yapıldı. Katalaz enziminin aktivite tayininde 0.66 mM pH 7 sodyum potasyum fosfat tamponu hazırlandı ve bu tamponun 100 ml'sine 160 µl H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> eklendi. Küvete sırasıyla 200 µl ekstraksiyonda elde edilen örnek üzerine 800 µl fosfat

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> tamponu konuldu ve spektrofotometrede 240 nanometrede okutularak 1. ve 2. dakikaları kaydedildi.

#### **3.4.6. Glutasyon S-Transferaz (GST) Analizi**

Glutasyon S-transferaz analizi Habig ve diğ. (1974)'e göre yapıldı. Öncelikle 0.1 M K-Fosfat tamponu (pH 6.5) ve 0.01 M Tris-HCL tamponu (pH 7.4) hazırlandı. Daha sonra 10 ml % 96'lık etanol içerisinde 0.039 gr CDNB (1-choloro-2,4-dinitrobenzene) çözdürüldü ve CDNB tamponu ve 20 ml 0.01 M Tris-HCL tamponu içerisinde 0.1123 gr redükte glutasyon çözdürüldü ve pH 7.4'e ayarlandı. Okuma için sırasıyla 400 µl K-Fosfat tamponu, 400 µl redükte glutasyon, 100 µl örnek ve 150 µl CDNB küvete konuldu. Spektrofotometrede (Biochrom Libra S22) 344 nanometrede okutularak sonuçlar 0. ve 2. dakikaları kaydedildi.

#### **3.4.7. Total Glutasyon (GSH) Analizi**

Total glutasyon analizi Akerboom ve Sies (1981)' e göre yapıldı. 6.3 mm EDTA içeren 125 mM sodyum difosfat tamponu (pH 7.5) hazırlandı. 20 ml sodyum tamponuna 0.0474 gr DTNB ekleyerek DTNB tamponu, 20 ml sodyum tamponuna 0.00469 gr NADPH ekleyerek NADPH tamponu hazırlandı. DTNB ve NADPH tamponları su banyosunda 30°C'de inkübe edildi. Okuma için küvete 700 µl NADPH tamponu, 100 µl DTNB, 150 µl distile su, 5 µl GR, 50 µl örnek konuldu ve spektrofotometrede 412 nanometrede okutularak 0. ve 1. dakika sonuçları kaydedildi.

#### **3.4.8. Glutasyon Redüktaz (GR) Analizi**

Glutasyon redüktaz analizi Carlberg ve Mannervik (1985)'e göre yapıldı. 2 mm EDTA içeren pH 7 olan 0.2 M potasyum fosfat tamponu hazırlanarak 30°C'de inkübe edildi. 10 mm pH 7 olan Tris-HCl içerisinde 2 mm NADPH ve 10 ml distile suda 20 mM GSSG 46 hazırlandı. Okuma için küvete 500 µl K-Fosfat tamponu, 50 µl NADPH, 50 µl GSSG, 100 µl distile su, 300 µl örnek alındı spektrofotometrede (Biochrom Libra S22) 340 nanometrede okutularak 0. ve 1. dakikaları kaydedildi.

#### **3.4.9. Hidrojen Peroksit (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) Analizi**

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> analizi Loreto and Velikova (2001)' e göre yapıldı. 0.5 g yaprak örnekleri havanda sıvı azot ile öğütüldükten sonra üzerine 5 ml % 0.1'lik TCA çözeltisi eklenerek homojenize edildi. Homojenat ependorf tüplere alınarak 4 °C 12000 rpm'de 15 dakika santrifüj edildi. Ölçümden önce K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> ve KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> çözeltileri hazırlandıktan sonra uygun oranda karıştırılarak pH 7 olarak ayarlandı ve 1M KI çözeltisi hazırlandı. Daha sonra süpernatana 0.5 ml, fosfat tamponundan 0.5 ml, KI çözeltisinden 1 ml alınarak quartz küvette spektrofotometrede 390 nanometrede 0. ve 1. dakika okundu ve sonuçlar kaydedildi.

#### **3.4.10. Lipid Peroksidasyonu (MDA) Analizi**

MDA analizi Heath ve Packer (1968)'a göre yapıldı. Ekstraksiyon için. 0.5 g yaprak örnekleri sıvı azotla muamele edildi ve 5 ml TCA çözeltisi eklenerek homojenize edildi. Bu işlem her bir örnek için üç tekrarlı yapıldı. Homojenize edilen örnekler tüplere alınarak 5000 rpm'de 15 dakika santrifüj edildi. Santrifüj edilen örneklerin süpernatan kısımlarından 2 ml alınarak üzerine 2 ml TBA çözeltisi eklenerek 95°C su banyosunda 30 dk bekletildi. Su banyosundan alınan örnekler bir süre buzda bekletildikten sonra 5000 rpm'de 15 dakika santrifüj edildi. Süpernatanlardan alınan örnekler spektrofotometrede (Biochrom Libra S22) 532 ve 600 nanometrede okutularak sonuçlar kaydedildi. 532 nm'de saptanan ölçümlerden 600 nm'de yapılan ölçümler çıkarıldı ve 155 mM<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup> ekstinksiyon katsayısıyla MDA miktarı hesaplandı.

#### **3.4.11. Toplam Protein Tayini**

Total protein tayini Bradford (1976)'a yöntemine göre yapıldı. 1000 µl Bradford reaktifi konulan küvetlerin üzerine ekstraksiyon sonrası elde edilen örneklerden 50 µl örnek ilave edilerek 15 dakika karanlıkta bekletildi. Küvetler spektrofotometrede (Biochrom Libra S22) 595 nanometrede okutularak sonuçlar kaydedildi.

#### **3.4.12. Oransal Su Analizi**

Örnekler 1.5 gr ağırlığında tartılarak petri kaplarına alındı. 4 saat distile suda bekletilip yeniden tartıldı ve sonuçlar not edildi. Daha sonra örnekler suları süzülerek kuru bir petri kabından pastöre konuldu 70 °C 'de 24 saat bekletilerek yeniden tartımları yapıldı ve sonuçlar not edildi.

### **3.4.13. Cr Analizi**

Cr analizi Baumhardt ve Welch (1972); Bayçu (1995)'e göre yapıldı. 0.25 g tartılan yaprak örnekleri teflon bombalar konularak üzerine 1 ml HNO<sub>3</sub> ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> eklendi. Teflon bombalar mikrodalga cihazına yerleştirilerek 3 dakikalık programda 450 watta ışınladı. Tamamen çözünen numuneler 10 ml seyreltilerek atomik absorpsiyon spektroskopisinde ölçümü yapıldı ve sonuçlar kaydedildi.

### **3.4.14. İstatistik Analizler**

Elde edilen sonuçların istatistiksel değerlendirmeleri için bilgisayarda SPSS 25.0 programı kullanıldı. Bu programda varyans analizi yapılarak önem kontrolü için de Duncan (1955) testi uygulandı ( $p < 0.05$ ).

## 4. BULGULAR

### 4.1. K<sub>2</sub> Cr<sub>2</sub> O<sub>7</sub> Stresi Uygulanan *Z. mays*'da Kla Değişimi

**Çizelge 4.1.** *Z. mays*'da çimlenme öncesi MT ile EpiBr uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı Kla değişimi.

Gruplar	1.gün	3.gün	5.gün
Kontrol	A 9.02 ± 0.04 a	A 9.08 ± 0.01 a	A 9.07 ± 0.01 a
Kontrol-5 mM Cr	A 8.74 ± 0.01b	B 6.97 ± 0.01 c	C 5.41 ± 0.01 c
Kontrol-10 mM Cr	A 7.82 ± 0.01c	B 7.62 ± 0.01 b	C 7.46 ± 0.01 b
MT- control	A 7.50 ± 0.01a	A 7.45 ± 0.01 a	A 7.44 ± 0.01 a
MT-5 mM Cr	A 7.20 ± 0.02 b	B 7.02 ± 0.01 b	C 6.16 ± 0.01 c
MT-10 mM Cr	A 6.72 ± 0.01c	B 6.40 ± 0.01 c	B 6.35 ± 0.01 b
EpiBr- control	A 9.09 ± 0.01a	A 9.06 ± 0.01 a	A 9.05 ± 0.01 a
EpiBr-5 mM Cr	A 9.02 ± 0.01a	B 6.57 ± 0.03 c	B 6.64 ± 0.01 c
EpiBr-10 mM Cr	A 8.07 ± 0.01b	B 7.17 ± 0.04 b	B 7.07 ± 0.01 b

Farklı harflerle gösterilen değerler istatistiki açıdan ( $p < 0.05$ ) önemli, aynı harflerle gösterilen değerler önemsizdir. Sol tarafta bulunan büyük harflendirme satırlar arasındaki karşılaştırmayı, sağ tarafta bulunan küçük harflendirme ise sütunlar arasındaki karşılaştırmayı ifade eder. Her aşama (1., 3. ve 5. günler) kendi içerisinde karşılaştırılmıştır.

*Z. mays*'da çimlenme öncesi MT ile EpiBr uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı Kla değişimi ile ilgili Çizelge 4.1'deki veriler değerlendirildiğinde; EpiBr uygulamasında Kla'nın MT uygulanan gruba kıyasla daha yüksek oranda Kla içeriği ile pigment sistemi üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu saptandı. MT ve EpiBr uygulanmayan kontrol grubunda en yüksek Kla içeriği 1., 3. ve 5. günlerde 9.02-9.08-9.07  $\mu\text{g/g}$  olarak saptandı. EpiBr uygulanan grupta da 1., 3. ve 5. günde de kontrol grubuna yakın, MT uygulanan gruba göre daha yüksek Kla içeriği bulundu. Kla'da en düşük değer 5. günde 5mM Cr uygulanan kontrol grubunda 5.41  $\mu\text{g/g}$  iken, 10 mM Cr uygulanan kontrol grubunda 5. günde 7.46  $\mu\text{g/g}$  olarak gözlemlendi. Bu farklılıklar istatistiksel olarak da önemli bulundu (Çizelge 4.1) ( $p < 0.05$ ).

#### 4.2. K<sub>2</sub> Cr<sub>2</sub> O<sub>7</sub> Stresi Uygulanan *Z. mays*'da Klb Değişimi

**Çizelge 4.2.** *Z. mays*'da çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı Klb değişimi.

Gruplar	1.gün	3.gün	5.gün
Kontrol	A 2.61 ± 0.01a	A 2.59 ± 0.01a	A 2.58 ± 0.03a
Kontrol 5mM Cr	A 2.50 ± 0.01b	B 1.97 ± 0.01c	C 1.58 ± 0.01c
Kontrol 10 mM Cr	A 2.40 ± 0.01c	B 2.26 ± 0.01b	C 2.04 ± 0.01b
MT control	A 2.36 ± 0.01a	A 2.35 ± 0.01a	A 2.33 ± 0.01a
MT-5mM Cr	A 2.32 ± 0.02 a	B 2.22 ± 0.01b	C 1.74 ± 0.01 c
MT-10mM Cr	A 2.25 ± 0.03 b	C 1.87 ± 0.02 c	B 2.01 ± 0.01 b
EpiBr- control	A 2.52 ± 0.01b	A 2.51 ± 0.01a	A 2.50 ± 0.01a
EpiBr-5 mM Cr	A 2.63 ± 0.03 a	C 1.79 ± 0.01 c	B 1.94 ± 0.03 b
EpiBr-10 mM Cr	A 2.36 ± 0.01 c	B 1.99 ± 0.01b	C 1.80 ± 0.04 c

Farklı harflerle gösterilen değerler istatistiki açıdan ( $p < 0.05$ ) önemli, aynı harflerle gösterilen değerler önemsizdir. Sol tarafta bulunan büyük harflendirme satırlar arasındaki karşılaştırmayı, sağ tarafta bulunan küçük harflendirme ise sütunlar arasındaki karşılaştırmayı ifade eder. Her aşama (1., 3. ve 5. günler) kendi içerisinde karşılaştırılmıştır.

*Z. mays*'da çimlenme öncesi MT ile EpiBr uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı Klb değişimi ile ilgili Çizelge 4.2'deki veriler değerlendirildiğinde; EpiBr ve MT uygulanmayan kontrol grubunda 5mM Cr uygulanan grupta 3. gün ve 5. günde sırasıyla 1.97-1.58 µg/g ile artan günlerde azaldığı gözlemlendi. Bu azalış istatistiksel olarak önemli bulundu. Klb'nin MT uygulanan grupta 5.mM Cr uygulanan grupta Cr uygulanmayan MT kontrol grubuna göre 5. günde 1.74 µg/g ile %25.32 oranda azaldığı saptandı. Aynı şekilde 10 mM Cr uygulanan grupta da 3. günde 1.87 µg/g ile kontrol MT grubuna karşılık %20.43 daha düşük Klb içeriği gözlemlendi. EpiBr 5mM Cr uygulanan grupta Klb içeriği 1. günde 2.63 µg/g ile en yüksek değerde gözlenirken 3. ve 5. günlerde 1. güne göre içeriğin azaldığı dikkat çekti. Yine 10 mM Cr uygulanan EpiBr grubunda da 3. ve 5. günde azalış önemli bulundu (Çizelge 4.2) ( $p < 0.05$ ).

### 4.3. K<sub>2</sub> Cr<sub>2</sub> O<sub>7</sub> Stresi Uygulanan *Z. mays*'da Karotenoid Değişimi

**Çizelge 4.3.** *Z. mays*'da çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı Karotenoid değişimi.

Gruplar	1.gün	3.gün	5.gün
Kontrol	A 3.25±0.01a	A 3.22±0.02 a	A 3.21±0.01a
Kontrol 5 mM Cr	A 3.19±0.01b	B 2.39±0.01 c	B 2.30±0.01 c
Kontrol 10 mM Cr	A 2.90±0.01 c	B 2.56±0.01 b	C 2.44±0.02 b
MT control	A 2.74±0.04 a	A 2.73±0.01 a	A 2.70±0.02 c
MT-5 mM Cr	B 2.60±0.03 b	B 2.52±0.06 b	A 2.80±0.01 b
MT-10 mM Cr	C 2.49±0.03 c	B 2.64±0.03 a	A 3.04±0.01 a
EpiBr- control	A 3.01±0.01 a	A 3.02±0.03 b	A 3.00±0.01 a
EpiBr-5 mM Cr	C 3.08±0.04 a	B 3.30±0.07 a	A 3.71±0.02 c
EpiBr-10 mM Cr	C 2.98±0.02 b	B 3.37±0.02 a	A 3.84±0.01 b

Farklı harflerle gösterilen değerler istatistiki açıdan ( $p<0.05$ ) önemli, aynı harflerle gösterilen değerler önemsizdir. Sol tarafta bulunan büyük harflendirme satırlar arasındaki karşılaştırmayı, sağ tarafta bulunan küçük harflendirme ise sütunlar arasındaki karşılaştırmayı ifade eder. Her aşama (1., 3. ve 5. günler) kendi içerisinde karşılaştırılmıştır.

*Z. mays*'da çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı karotenoid değişimi ile ilgili Çizelge 4.3'deki veriler değerlendirildiğinde; EpiBr uygulamasında karotenoid içeriğinin Cr uygulanan gruplar da dahil olmak üzere MT uygulanan gruba kıyasla daha yüksek olduğu saptandı. Özellikle 3. ve 5. günlerde Cr uygulanan gruplar içerisinde EpiBr'in karotenoid miktarındaki artışlar üzerine etkisi dikkat çekti. MT uygulanan gruplarda da yine 3. ve 5. günlerde karotenoid içeriği kontrol gruplarına kıyasla yüksek bulundu. En yüksek karotenoid içeriği 5-10 mM Cr uygulanan EpiBr grubunda 3.71-3.84 µg/g olarak saptandı. En düşük karotenoid içeriği de 5-10 mM Cr uygulanan kontrol grubunda 2.29-2.30 µg/g olarak gözlemlendi. Bu farklılıklar istatistiksel olarak da önemli bulundu (Çizelge 4.3) ( $p<0.05$ ).

#### 4.4. K<sub>2</sub> Cr<sub>2</sub> O<sub>7</sub> Stresi Uygulanan *Z. mays*'da Toplam Klorofil Değişimi

**Çizelge 4.4.** *Z. mays*'da çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı Toplam Klorofil değişimi.

Gruplar	1.gün	3.gün	5.gün
Kontrol	A 11.63±0.01a	A 11.67±0.01a	A 11.65±0.01a
Kontrol 5 mM Cr	A 11.24±0.02 b	B 8.94±0.01 c	C 6.99±0.01 c
Kontrol 10 mM Cr	A 10.22±0.01b	B 9.88±0.01 b	C 9.50±0.01 b
MT control	A 9.86±0.02 a	A 9.80±0.02 a	A 9.77±0.01a
MT-5 mM Cr	A 9.52±0.01 c	B 9.24±0.02 b	C 7.90±0.01 c
MT-10 mM Cr	A 8.97±0.02 b	B 8.27±0.01 c	B 8.36±0.01 b
EpiBr- control	A 11.61±0.01 a	A 11.57±0.01 a	A 11.55±0.01 a
EpiBr-5 mM Cr	A 11.65±0.01 a	C 8.36±0.01 c	B 8.58±0.01 c
EpiBr-10 mM Cr	A 10.43±0.01 b	B 9.16±0.01b	C 8.87±0.01 b

Farklı harflerle gösterilen değerler istatistiki açıdan ( $p<0.05$ ) önemli, aynı harflerle gösterilen değerler önemsizdir. Sol tarafta bulunan büyük harflendirme satırlar arasındaki karşılaştırmayı, sağ tarafta bulunan küçük harflendirme ise sütunlar arasındaki karşılaştırmayı ifade eder. Her aşama (1., 3. ve 5. günler) kendi içerisinde karşılaştırılmıştır.

*Z. mays*'da çimlenme öncesi MT ile EpiBr uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı toplam klorofil değişimi ile ilgili Çizelge 4.4'deki veriler değerlendirildiğinde; kontrol uygulama gruplarında özellikle 1., 3. ve 5. günde 10 mM Cr uygulanan gruplarda toplam klorofil içeriğinin yüksek olması (10.22, 9.88 ve 9.50 µg/g) strese cevapta önemli bulundu. EpiBr uygulamasında toplam klorofilin 1. ve 5. günlerde 5 mM Cr uygulanan gruplarda 11.65-8.58 µg/g ile diğer gruplara kıyasla daha yüksek oranda toplam klorofil içeriği ile pigment sistemi üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu saptandı. MT uygulama gruplarında da özellikle 5mM Cr uygulama grubunda 3. günde 9.27 µg/g ile toplam klorofil içeriğinin yüksek çıkması anlamlı bulundu. Gözlenen bu değişimler istatistiksel olarak da önemli bulundu (Çizelge 4.4) ( $p<0.05$ ).

#### 4.5. K<sub>2</sub> Cr<sub>2</sub> O<sub>7</sub> Stresi Uygulanan *Z. mays*'da GSH Değişimi

**Çizelge 4.5.** *Z. mays*'da çimlenme öncesi MT ile EpiBr uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı GSH değişimi.

Gruplar	GSH (U/mg protein)		
	1.gün	3.gün	5.gün
Kontrol	A 0.55±0.02 c	A 0.54±0.01 c	A 0.50±0.04 c
Kontrol 5 mM Cr	C 0.62±0.06 b	B 0.89±0.04 b	A 1.03±0.01 b
Kontrol 10 mM Cr	C 0.87±0.05 a	B 1.23±0.06 a	A 1.52±0.03 a
MT control	A 0.71±0.01 b	A 0.70±0.02 c	A 0.71±0.02 c
MT-5 mM Cr	C 0.72±0.02 b	B 0.85±0.04 b	A 1.06±0.05 b
MT-10 mM Cr	C 0.85±0.03 a	B 1.44±0.05 a	A 2.01±0.03 a
EpiBr- control	A 0.59±0.02 c	A 0.60±0.04 c	A 0.61±0.02 c
EpiBr-5 mM Cr	C 0.75±0.01 b	B 0.90±0.02 b	A 1.06±0.03 b
EpiBr-10 mM Cr	C 1.06±0.01 a	B 1.55±0.03 a	A 1.79±0.01 a

Farklı harflerle gösterilen değerler istatistiki açıdan ( $p<0.05$ ) önemli, aynı harflerle gösterilen değerler önemsizdir. Sol tarafta bulunan büyük harflendirme satırlar arasındaki karşılaştırmayı, sağ tarafta bulunan küçük harflendirme ise sütunlar arasındaki karşılaştırmayı ifade eder. Her aşama (1., 3. ve 5. günler) kendi içerisinde karşılaştırılmıştır.

*Z. mays*'da çimlenme öncesi MT ile EpiBr uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı GSH değişimi ile ilgili Çizelge 4.5'deki veriler değerlendirildiğinde; en düşük GSH içeriğinin kontrol grubunda 0.50 U/mg protein ile 5. günde olduğu bulundu. Kontrol grupları içerisinde en yüksek GSH içeriği MT-Kontrol grubunda 0.71 U/mg protein olarak saptandı. En yüksek GSH içeriği ise 2.01 U/mg protein ile MT-10mM Cr çözültisi uygulanan grupta 5. günde 2.01 U/mg protein olarak gözlemlendi. Hem MT hem de EpiBr uygulama gruplarından 10 mM Cr stresi uygulamasını takip eden 3. ve 5. günlerde GSH içeriğinin diğer gruplara kıyasla daha yüksek olduğu saptandı. 10 mM Cr uygulanan kontrol grubunda 3. günde GSH içeriği 1.23 U/mg protein iken, MT uygulanan grupta 1.44 U/mg protein, EpiBR uygulama grubunda ise 1.55 U/mg protein olarak daha yüksek gözlemlendi. 5. günde de aynı gruplarda GSH içeriği sırasıyla 1.52-2.01 ile 1.79 olarak daha yüksek olduğu saptandı. Bu farklılıklar istatistiksel olarak da önemli bulundu (Çizelge 4.5) ( $p<0.05$ ).

#### 4.6. K<sub>2</sub> Cr<sub>2</sub> O<sub>7</sub> Stresi Uygulanan *Z. mays*'da GR Aktivitesi

**Çizelge 4.6.** *Z. mays*'da çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı GR aktivitesi.

Gruplar	GR (U/mg protein)		
	1.gün	3.gün	5.gün
Kontrol	A 1.50±0.03 c	A 1.51±0.02 c	A 1.50±0.01 c
Kontrol 5 mM Cr	B 1.62±0.04 b	B 1.69±0.01 b	A 1.97±0.03 b
Kontrol 10 mM Cr	C 2.37±0.05 a	B 2.62±0.06 a	A 3.92±0.04 a
MT kontrol	A1.33±0.02 c	A 1.34±0.04 c	A1.35±0.01 c
MT-5 mM Cr	C 1.60±0.03 b	B 1.72±0.06 b	A1.88±0.04 b
MT-10 mM Cr	C 1.75±0.04 a	B 2.13±0.04 a	A 2.54±0.02 a
EpiBr- kontrol	A 1.14±0.02 b	A 1.16±0.04 c	A 1.17±0.02 c
EpiBr-5 mM Cr	C 1.33±0.01 a	B 1.55±0.02 a	A 1.68±0.03 b
EpiBr-10 mM Cr	C 1.36±0.01 a	B 1.47±0.03 b	A 1.88±0.01 a

Farklı harflerle gösterilen değerler istatistiki açıdan ( $p<0.05$ ) önemli, aynı harflerle gösterilen değerler önemsizdir. Sol tarafta bulunan büyük harflendirme satırlar arasındaki karşılaştırmayı, sağ tarafta bulunan küçük harflendirme ise sütunlar arasındaki karşılaştırmayı ifade eder. Her aşama (1., 3. ve 5. günler) kendi içerisinde karşılaştırılmıştır.

*Z. mays*'da çimlenme öncesi MT ile EpiBr uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı GR değişimi ile ilgili Çizelge 4.6'daki veriler değerlendirildiğinde; en yüksek GR aktivitesi, sadece 10 mM Cr çözeltisinin uygulandığı gruplarda diğer gruplara göre daha yüksek olduğu gözlemlendi. Bu grupta 1., 2. ve 3. günde sırasıyla 2.37-2.62 ve 3.92 U/mg protein olarak saptandı. EpiBr 5 mM Cr uygulama grubunda günlere göre sırasıyla Gr aktivitesinin 1.33, 1.55 ve 1.68 U/mg protein ile diğer gruplara kıyasla azaldığı saptandı. Hem MT hem de EpiBr uygulama grupları içerisinde 10 mM Cr çözeltisini takip eden günlerde GR aktivitesinde düşüş dikkat çekti. Bu gruplar içerisinde EpiBr 10 mM Cr uygulanan gruplarda ise GR aktivitesi günlere göre sırası ile 1.36, 1.47 ve 1.88 U/mg protein olarak saptandı. MT 10mM Cr uygulama grubunda ise GR aktivitesi sırası ile 1.75, 2.13 ve 2.54 U/mg protein olarak gözlemlendi. Bu değişimler istatistiksel olarak da anlamlı bulundu (Çizelge 4.6) ( $p<0.05$ ).

#### 4.7. K<sub>2</sub> Cr<sub>2</sub> O<sub>7</sub> Stresi Uygulanan *Z. mays*'da GST Aktivitesi (U/mg protein)

**Çizelge 4.7.** *Z. mays*'da çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı GST aktivitesi.

Gruplar	GST Aktivitesi (U/mg protein)		
	1.gün	3.gün	5.gün
Kontrol	A 1.78±0.05 c	A 1.79±0.07 c	A 1.77±0.04 c
Kontrol 5 mM Cr	C 2.30±0.03 b	B 2.48±0.04 b	A 2.63±0.02 b
Kontrol 10 mM Cr	C 2.54±0.04 a	B 2.77±0.05 a	A 3.44±0.06 a
MT- kontrol	A 1.01±0.04 c	A 1.02±0.02 c	A 1.01±0.01 c
MT-5 mM Cr	C 1.23±0.01 b	B 1.35±0.05 b	A 1.56±0.06 b
MT-10 mM Cr	C 1.32±0.04 a	B 1.56±0.03 a	A 1.68±0.01 a
EpiBr- kontrol	A 1.16±0.04 b	A 1.18±0.05 c	A 1.17±0.05 c
EpiBr-5 mM Cr	C 1.30±0.02 a	B 1.57±0.03 b	A 1.84±0.02 b
EpiBr-10 mM Cr	C 1.29±0.06 a	B 1.70±0.06 a	A 2.09±0.03 a

Farklı harflerle gösterilen değerler istatistiki açıdan ( $p<0.05$ ) önemli, aynı harflerle gösterilen değerler önemsizdir. Sol tarafta bulunan büyük harflendirme satırlar arasındaki karşılaştırmayı, sağ tarafta bulunan küçük harflendirme ise sütunlar arasındaki karşılaştırmayı ifade eder. Her aşama (1., 3. ve 5. günler) kendi içerisinde karşılaştırılmıştır.

*Z. mays*'da çimlenme öncesi MT ile EpiBr uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı GST aktivitesi değişimi ile ilgili Çizelge 4.7'deki veriler değerlendirildiğinde; MT ve EpiBr uygulanmayan kontrol gruplarında GST aktivitesinin daha yüksek olduğu gözlemlendi. Kontrol gruplarında en yüksek aktivite 10mM Cr uygulanan grupta 5. günde 3.44 U/mg protein olarak saptandı. MT ve EpiBr uygulanan gruplarda GST aktivitesinde tüm gruplarda kontrol gruplarına karşılık düştüğü gözlemlendi. Örneğin kontrol gruplarında ve MT ile EpiBr uygulama gruplarında 5mM Cr uygulanan gruplar karşılaştırıldığında GST aktivitesi; kontrol grubunda 1., 3. ve 5. günlerde sırasıyla 2.30, 2.48 ve 2.63 U/mg protein iken, MT uygulanan gruplarda 1.23, 1.35 ve 1.56 U/mg protein, EpiBr uygulama grubunda da 1.30, 1.57 ve 1.84 U/mg protein olarak saptanmıştır. Grup içerisinde ve gruplar arasında stres uygulanan gruplarda MT ile EpiBr uygulanan gruplarda kontrol grubuna kıyasla GST

aktivitesinin azaldığı dikkat çekmiştir. Grup içerisinde ve gruplar arasında görülen değerlerdeki farklılıklar istatistiksel olarak da anlamlı bulundu (Çizelge 4.7) ( $p<0.05$ ).

#### 4.8. $K_2Cr_2O_7$ Stresi Uygulanan *Z. mays*'da POD Aktivitesi

**Çizelge 4.8.** *Z. mays*'da çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı POD aktivitesi.

Gruplar	POD Aktivitesi (U/mg protein)		
	1.gün	3.gün	5.gün
Kontrol	A0.93089±0.30262 9 c	A 0.96002±0.004168 c	A 0.95345±0.004439 c
Kontrol 5 mM Cr	C1.31158±0.195091	B 1.52442±0.195070 b	A 1.73753±0.180709 b
Kontrol 10 mM Cr	C1.59200±0.034152	B 1.80397±0.022708 a	A 2.61987±0.247299 a
MT control	A0.62164±0.01225	A 0.62167±0.009313 c	A 0.60804±0.014651 c
MT-5 mM Cr	C0.78263±0.037745	B 0.90992±0.030591 b	A 1.08528±0.130850 b
MT-10 mM Cr	C0.84923±0.055299	B 1.02042±0.063877 a	A 1.22868±0.071367 a
EpiBr- control	A0.62627±0.01157	A 0.66020±0.020121 c	A 0.64575±0.010377 c
EpiBr-5 mM Cr	C0.73476±0.044797	B 1.01551±0.164452 b	A 1.30845±0.251098 b
EpiBr-10 mM	C0.72587±0.035277	B 1.10471±0.177508 a	A 1.48780±0.198171 a

Farklı harflerle gösterilen değerler istatistiki açıdan ( $p<0.05$ ) önemli, aynı harflerle gösterilen değerler önemsizdir. Sol tarafta bulunan büyük harflendirme satırlar arasındaki karşılaştırmayı, sağ tarafta bulunan küçük harflendirme ise sütunlar arasındaki karşılaştırmayı ifade eder. Her aşama (1., 3. ve 5. günler) kendi içerisinde karşılaştırılmıştır.

*Z. mays*'da çimlenme öncesi MT ile EpiBr uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı POD aktivitesi değişimi ile ilgili Çizelge 4.8'deki veriler değerlendirildiğinde; kontrol grubunda Cr uygulamasına bağlı değişimlerde POD aktivitesinin daha yüksek olduğu saptandı. Kontrol 5 mM Cr uygulanan gruplarda 1., 3. ve 5. günlerde POD aktivitesi 1.311, 1.524 ve 1.737 U/mg protein iken MT uygulanan gruplarda 0.782, 0.909 ve 1.085 U/mg protein, EpiBr uygulama gruplarında ise 0.734, 1.015 ve 1.308 U/mg protein olarak gözlemlendi. Benzer şekilde 10 mM Cr uygulama gruplarında da en yüksek aktivite kontrol grubunda olup, günlere göre sırasıyla 1.592, 1.803 ve 2.619 U/mg protein olarak saptandı.

Grup içerisinde konsantrasyon değişimleri ve günlere bağlı olarak ortaya çıkan farklılıklar istatistiksel olarak da önemli bulundu (Çizelge 4.8) ( $p<0.05$ ).

#### 4.9. $K_2Cr_2O_7$ Stresi Uygulanan *Z. mays*'da KAT Aktivitesi (U/mg protein)

**Çizelge 4.9.** *Z. mays*'da çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı KAT aktivitesi.

KAT Aktivitesi (U/mg protein)			
Gruplar	1.gün	3.gün	5.gün
Kontrol	A 175.93±0.14 c	A 175.04±0.06 b	A 175.51±0.07 c
Kontrol 5mM Cr	C 239.69±0.06 a	B 281.07±0.11 a	A 397.87±0.10 a
Kontrol 10mM Cr	C 224.72±0.07 b	A 284.34±0.10 a	B 249.64±0.11 b
MT control	A 93.40±0.06 c	A 92.80±0.08 c	A 92.42±0.13 c
MT-5mM Cr	C 103.14±0.04 b	B 124.12±0.11 b	A 134.94±0.12 b
MT-10mM Cr	C 126.77 ±0.07 a	B 143.96±0.07 a	A 165.67±0.09 a
EpiBr control	A 72.64±0.08 b	A 72.67±0.06 c	A 72.68±0.06 c
EpiBr-5 mM Cr	C 80.58±0.09 a	B 91.51±0.07 b	A 104.22±0.06 b
EpiBr-10 mM Cr	C 80.81±0.07 a	B 114.55±0.10 a	A 170.59±0.08 a

Farklı harflerle gösterilen değerler istatistiki açıdan ( $p<0.05$ ) önemli, aynı harflerle gösterilen değerler önemsizdir. Sol tarafta bulunan büyük harflendirme satırlar arasındaki karşılaştırmayı, sağ tarafta bulunan küçük harflendirme ise sütunlar arasındaki karşılaştırmayı ifade eder. Her aşama (1., 3. ve 5. günler) kendi içerisinde karşılaştırılmıştır.

*Z. mays*'da çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı KAT aktivitesi değerlendirildiğinde; Kontrol grupları içerisinde en yüksek aktivite 397.87 U/mg protein ile 5mM Cr çözeltisi uygulanan grupta 5. günde gözlemlendi. Tüm kontrol uygulama gruplarında MT ve EpiBr uygulanan gruplara kıyasla KAT aktivitesi daha yüksek bulundu. Kontrol grubunda kontrol ile 5-10 mM Cr uygulaması yapılan gruplarda KAT aktivitesi 1. günde sırasıyla 175.93, 239.69 ve 224.72 iken 3. ve 5. günlerde 5-10 mM Cr uygulanan gruplarda aktivitenin arttığı saptandı. Çizelge 4.9'daki verilerimizi genel olarak değerlendirdiğimizde MT ve EpiBr uygulama gruplarında KAT ativisinde en belirgin azalma EpiBr uygulanan gruplarda gözlemlendi. Grup içerisinde ve günlere bağlı meydana gelen değişimler istatistiksel olarak da önemli bulundu (Çizelge 4.9) ( $p<0.05$ ).

#### 4.10. K<sub>2</sub> Cr<sub>2</sub> O<sub>7</sub> Stresi Uygulanan *Z. mays*'da SOD Aktivitesi

**Çizelge 4.10.** *Z. mays*'da çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı SOD aktivitesi.

Gruplar	SOD Aktivitesi (U/mg protein)		
	1.gün	3.gün	5.gün
Kontrol	A 64.19±0.02 c	A 64.57±0.04 c	A 64.47±0.04 c
Kontrol 5 mM Cr	C 69.34±0.03 b	B 90.17±0.02 b	A 123.92±0.10 b
Kontrol 10 mM Cr	C 89.04±0.04 a	B 122.31±0.03 a	A 131.94±0.04 a
MT kontrol	A 35.63±0.02 b	A 35.60±0.04 c	A 35.66±0.06 c
MT-5 mM Cr	C 37.31±0.09 b	B 54.02±0.04 b	A 72.60±0.04 b
MT-10 mM Cr	C 49.17±0.08 a	B 60.86±0.06 a	A 88.70±0.03 a
EpiBr kontrol	A 39.69±0.11 b	A 39.71±0.03 b	A 40.15±0.01 c
EpiBr-5 mM Cr	B 44.29±0.01 ab	A 59.50±0.05 a	A 61.12±0.06 b
EpiBr-10 mM Cr	C 49.37± 0.05 a	B 60.82±0.06 a	A 78.34±0.04 a

Farklı harflerle gösterilen değerler istatistiki açıdan ( $p<0.05$ ) önemli, aynı harflerle gösterilen değerler önemsizdir. Sol tarafta bulunan büyük harflendirme satırlar arasındaki karşılaştırmayı, sağ tarafta bulunan küçük harflendirme ise sütunlar arasındaki karşılaştırmayı ifade eder. Her aşama (1., 3. ve 5. günler) kendi içerisinde karşılaştırılmıştır.

*Z. mays*'da çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplara, çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulanan gruplarda SOD aktivitesinin MT ve EpiBr uygulanmayan gruplardan daha düşük olduğu saptandı. SOD aktivitesi, 1. gün kontrol grubunda 64.19 U/mg protein, MT-kontrol grubunda 35.63 U/mg protein, EpiBr kontrol grubunda 39.63 U/mg protein olarak gözlemlendi. 5 mM Cr uygulanan kontrol grubunda 3. günde 90.17 U/mg protein, MT-5mM Cr grubunda 54.02 U/mg protein, EpiBr-5mM 59.50 U/mg protein olarak saptandı. 10 mM Cr uygulanan kontrol grubunda 5. günde SOD aktivitesi 131.94 U/mg protein, MT-10 mM Cr uygulama grubunda 88.70 U/mg protein, EpiBr 10 mM Cr uygulama grubunda 78.34 U/mg protein olarak gözlemlendi. Grup içinde ve gruplar arasında gözlenen bu farklılıklar istatistiksel olarak da önemli bulundu (Çizelge 4.10) ( $p<0.05$ ).

#### 4.11. K<sub>2</sub> Cr<sub>2</sub> O<sub>7</sub> Stresi Uygulanan *Z. mays*'da MDA İçeriği

**Çizelge 4.11.** *Z. mays*'da çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplara çimlenme sonrası 5-10 mM Cr uygulamasını takiben kontrol grupları ile karşılaştırmalı olarak gün içi ve günlere bağlı MDA içeriği.

Gruplar	MDA (µmol MDA/g)		
	1.gün	3. gün	5. gün
Kontrol	A 0.5333±0.00569 b	A 0.5763±0.03102 b	A 0.5796±0.04475 c
Kontrol 5 mM Cr	A 0.8817±0.13307 a	C 0.5957±0.02051 b	B 0.7441±0.07527 b
Kontrol 10 mM Cr	B 0.6968±0.05818 c	B 0.6774±0.01707 a	A 1.3247±0.15646 a
MT control	A 0.5656±0.01505 b	A 0.5826±0.02266 c	A 0.5472±0.07655 c
MT-5 mM Cr	B 0.5914±0.06067 b	A 0.6710±0.10329 b	A 0.6946±0.03339 b
MT-10 mM Cr	C 0.6667±0.07966 a	B 0.7312±0.05272 a	A 0.9355±0.03592 a
EpiBr control	A 0.7183±0.04627 b	A 0.7871±0.06354 a	A 0.7237±0.02118 c
EpiBr-5 mM Cr	B 0.8043±0.02893 a	C 0.6452±0.04756 b	A 1.0151±0.10938 b
EpiBr-10 mM Cr	B 0.7505±0.07283 ab	B 0.7656±0.02051 a	A 1.4839±0.08437 a

Farklı harflerle gösterilen değerler istatistiki açıdan ( $p<0.05$ ) önemli, aynı harflerle gösterilen değerler önemsizdir. Sol tarafta bulunan büyük harflendirme satırlar arasındaki karşılaştırmayı, sağ tarafta bulunan küçük harflendirme ise sütunlar arasındaki karşılaştırmayı ifade eder. Her aşama (1., 3. ve 5. günler) kendi içerisinde karşılaştırılmıştır.

*Z. mays*'da çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplara, çimlenme sonrası 5 mM Cr uygulanan gruplarda MDA içeriği ile ilgili Çizelge 4.11 değerlendirildiğinde MT uygulanan grupta MDA içeriğinin kontrol ve EpiBr uygulanan gruplara göre daha düşük MDA içeriğine sahip olduğu gözlemlendi. Bu gruplar içerisinde çimlenme sonrası 5 mM Cr uygulanan gruplarda MDA içeriği 5. günde tüm gruplarda kendi içlerindeki kontrol gruplarına göre artış gösterdiği saptandı. Kontrol grubunda MDA içeriği 5. günde 0.5796 µmol MDA/g iken 5mM Cr uygulanan grupta 0.7441 µmol MDA/g; MT kontrol grubunda 0.5472 µmol MDA/g iken 5mM Cr uygulanan MT grubunda 0.6946 µmol MDA/g, EpiBr uygulama grubunda kontrolde 0.7237 µmol MDA/g iken 5 mM Cr uygulanan grupta 1.0151 µmol MDA/g olarak saptandı. Benzer şekilde 10 mM uygulanan gruplarda da 5. günde kontrol grubunda 1.3247 µmol MDA/g, MT uygulama grubunda 0.9335 µmol MDA/g ve EpiBr uygulama grubunda da 1.4839 µmol MDA/g en yüksek MDA içerikleri gözlemlendi.

Gruplar arasında ve günlere bağılı olarak gözlenen değişimler istatistiksel olarak da anlamlı bulundu (Çizelge 4.11) ( $p<0.05$ ).

#### 4.12. $K_2Cr_2O_7$ Stresi Uygulanan *Z. mays*'da Oransal Su İçeriği

**Çizelge 4.12.** *Z. mays* bitkisinde çimlenme sonrası uygulanan kontrol gruplarında ve çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplarda gün içi ve günlere bağılı oransal su içeriği (OSİ) (%).

Gruplar	Oransal Su İçeriği (OSİ) (%)		
	1. gün	3. gün	5. gün
Kontrol	A 90.9800±1.33702 a	A 92.2433±2.21179 a	A 90.0500±3.32181 a
Kontrol 5mM Cr	B 77.6167±3.44338 b	A 86.5167±3.38168 b	A 89.6467±3.26591 a
Kontrol 10mM Cr	A 87.0733±0.96672 a	A 90.5300±2.05040 a	A 87.3100±1.15581 a
MT control	B 83.5033±1.97739 a	A 89.3433±3.76066 b	A 94.2500±5.42896 a
MT-5 mM Cr	A 89.3200±0.91016 a	B 83.3200±2.96348 b	A 90.6767±2.39804 a
MT-10 mM Cr	B 88.1067±1.15622 a	A 94.0267±1.31712 a	B 88.3967±1.45957 b
EPrBr control	A 87.4900±1.26611 a	A 90.4767±1.81742 a	A 88.3867±4.13960 a
EPrBr-5 mM Cr	A 86.2933±2.01231 a	A 84.4100±2.86744 b	A 89.2300±1.36873 a
EPIBr-10 mM Cr	A 86.1600±2.22675 a	A 88.6800±0.72507 ab	B 74.0767±3.94624 b

Farklı harflerle gösterilen değerler istatistiki açıdan ( $p<0.05$ ) önemli, aynı harflerle gösterilen değerlerin önemsiz olduğu saptandı. Sol tarafta bulunan büyük harflendirme satırlar arasındaki karşılaştırmayı, sağ tarafta bulunan küçük harflendirme ise sütunlar arasındaki karşılaştırmayı ifade eder. Her aşama (1., 3. ve 5. günler) kendi içerisinde karşılaştırılmıştır

*Z. mays* bitkisinde çimlenme sonrası uygulanan kontrol gruplarında ve çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplarda gün içi ve günlere bağılı OSİ'nin % değişim değerlerinde kontrol olarak hazırlanan uygulama grupları arasında sonuçlara göre gruplar arasında 1. günde 77.6167 ile 5 mM Cr uygulanan grupta en düşük değer saptandı. Bu grupta 3. ve 5. günlerde OSİ'de 86.5167 ve 89.6467 ile artış olduğu gözlemlendi. Cr çözeltisinin 10 mM uygulandığı gruplar içerisinde en düşük değer EpiBr-10 mM Cr uygulanan grupta 5. Günde 74.0767 ile dikkat çekti. Çizelge 4.12 incelendiğinde 5. günde 10 mM Cr uygulanan gruplarda 3. güne kıyasla azalış saptandı. Örneğin Kontrol 10 mM uygulama grubunda 90.53 olan değer 5. günde 87.30; MT-10mM Cr uygulama grubunda 3. günde 94.0267 olan değer 5. günde 88.397'e düştü. Yine benzer şekilde EpiBr 10mM Cr uygulama grubunda 3. günde

88.68 olan değer 5. günde 74.0767 olarak gözlendi. Bu değişimler istatistiksel olarak da önemli bulundu (Çizelge 4.12) ( $p<0.05$ ).

#### 4.13. $K_2Cr_2O_7$ Stresi Uygulanan *Z. mays*'da Krom (Cr) Değişimi

**Çizelge 4.13.** *Z. mays* bitkisinde çimlenme sonrası  $K_2Cr_2O_7$  uygulanan kontrol gruplarında ve çimlenme öncesi EpiBr ile MT uygulanan gruplarda 5. gün Cr içeriği.

Gruplar	Cr (ppm) 5. Gün
Kontrol	0±0.00 c
Kontrol 5 mM Cr	2.11±0.06 b
Kontrol 10 mM Cr	6.01±0.05 a
MT Kontrol	0±0.00 c
MT-5 mM Cr	1.12±0.06 b
MT-10 mM Cr	4.31±0.08 a
EpiBr control	0±0.00 c
EpiBr-5 mM Cr	1.48±0.03 b
EpiBr-10 mM Cr	6.54± 0.07 a

Farklı harflerle gösterilen değerler istatistiki açıdan ( $p<0.05$ ) önemli, aynı harflerle gösterilen değerlerin önemsiz olduğu saptandı.

*Z. mays* bitkisinde çimlenme sonrası  $K_2Cr_2O_7$  uygulaması yapılan bitkilerde Cr içeriği 5. gün örneklerinde değerlendirildiğinde; kontrol gruplarında Cr tespit edilmemiş olup. 5mM Cr uygulanan grupta 2.11 ppm, MT 5 mM Cr uygulama grubunda 1.12 ppm, EpiBr 5mM Cr uygulama grubunda ise 1.48 ppm düzeyinde içerik saptandı. Kontrol 10 mM Cr uygulanan grupta 6.01 ppm, MT 10mM Cr uygulama grubunda 4.31 ppm, EpiBr 10 mM Cr uygulama grubunda ise 6.54 ppm oranında Cr içeriği bulundu. MT uygulama grubunda gerek kontrol gerekse EpiBr grubuna göre daha düşük Cr içeriğinin olması dikkat çekti. Gruplar arasındaki bu değişimler önemli bulundu (Çizelge 4.12) ( $p<0.05$ ).

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Günümüzde çevre kirliliği doğayı bütünüyle tehdit etmektedir. Hareketsiz yaşamları nedeni ile bitkisel organizmalarda bundan direkt olarak etkilenen önemli bir grubu oluşturmaktadır. Büyümelerini ve üretkenliklerini olumsuz yönde etkileyen farklı ağır metal stresi ile bitkiler çok sık karşı karşıya kalırlar. Ağır metal kirliliği, ürün büyümesi, toprak sağlığı, gıda güvenliği ve pazarlanabilirlik üzerindeki olumsuz etkileri nedeni ile sürdürülebilir tarımda önemli bir endişeye neden olmuştur. Arsenik (As), kadmiyum (Cd), krom (Cr), kobalt (Co), kurşun (Pb) ve civa (Hg) dahil olmak üzere çok sayıda ağır metal, antropojenik veya doğal aktiviteler yoluyla tarımsal toprak ekosistemlerine girdiklerinde bitkilerde aşırı toksisiteye neden olur (Neilson ve diğ., 2015). Madencilik, endüstrileşme ve kimyasal tarım uygulamaları gibi hızlı antropojenik aktiviteler, gıda zinciri ve çevre üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olan ağır metallerin biyolojik birikiminde ve biyolojik büyütmesinde önemli bir artışa neden olmuştur (Ali ve diğ., 2013). Ağır metaller arasında Cr, antropojenik aktiviteler, arıtma eksikliği ve düzensiz bertaraf edilmesi nedeni ile tarım topraklarında bulunan en yaygın toksik eser metallere biridir. İnsanlar için kanserojen olmasının yanı sıra, ürünlerin fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler özellikleri üzerinde büyük bir zararlı etkiye sahiptir. Toprakta Cr, Cr (III) "üç değerlikli" ve Cr (VI) "altı değerlikli" olmak üzere farklı formlarda bulunur, ancak biyota için en yaygın ve ciddi şekilde tehlikeli form Cr (VI)'dır. Krom, bitkilerin büyümesi, gelişimi ve besinleri alma yeteneği üzerinde olumsuz bir etkiyle sonuçlanan birçok fizyolojik ve metabolik yol üzerindeki etkileri nedeniyle bitkiler için çok zararlıdır. Bitkiler, ROT'u azaltmak için antioksidan potansiyelini artırmak gibi Cr'ye karşı fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler savunma yolları geliştirmiştir (Ali ve diğ., 2023; Jobby ve diğ. 2024).

Cr bitkiler için gerekli olmayan ve toksik bir element olduğundan, bitkilerde şu ana kadar Cr'ye özgü taşıyıcılar veya kanallar tanımlanmamıştır. Bunun yerine, bitki türlerinin çoğunda Cr, bazı gerekli element taşıyıcıları tarafından taşınır. Bitkiler Cr'ye maruz kaldıktan sonra, çok sayıda fizyolojik, morfolojik ve metabolik özellik olumsuz etkilenir ve bu da nihayetinde bitki ölümüne yol açar. Örneğin, Cr toksisitesi bitki gelişimini, besin emilimini ve fotosentezi etkilerken aynı zamanda ROT'un üretimini artırır ve antioksidan aktivitelerini değiştirir (Hayat ve diğ., 2012). Cr toksisitesi, bakliyat, tahıl, sebze vb. gibi tarımsal açıdan önemli ürünlerin çoğunu etkilediği için sürdürülebilir tarımımız ve gıda güvenliğimiz üzerinde büyük bir etkiye sahiptir (Huang ve diğ., 2014, Zeng ve diğ., 2014, Gao ve diğ., 2021).

Bitkinin ağır metal stresine toleransını iyileştirmek ve uyarmak için ekosistemi tehdit etmeden biyostimülanların uygulanması etkili bir yaklaşım olabilir. Bir biyostimülatör, bitki büyüme düzenleyicisi ve antioksidan olan melatonin (N -asetil-5-metoksitriptamin), redoks ve besin homeostazını, ozmotik dengeyi ve birincil ve ikincil metabolizmayı iyileştirerek bitkinin ağır metal stresine toleransını artırır (Hoque ve diğ., 2021).

Yapılan araştırmalarda ekzojen MT'nin doğrudan ROT'u temizleyerek ve antioksidan enzim aktivitelerini, fotosentetik verimliliği ve metabolit içeriğini artırarak dolaylı bir yolla farklı bitki türlerinin ağır metallere karşı stres toleransını iyileştirdiği, MT'nin, ozmotik düzenlemeyi iyileştirerek, hücre zarı tahribatını hafifleterek ve fotosentetik sistemi koruyarak Al stresi altında *Brassica rapa* ssp. *pekinensis*'in (Çin lahanası) büyümesini desteklediği belirtilmiştir (Tang ve diğ., 2017). Son zamanlarda yapılan bir çalışmada, Cr toksisitesi büyümeyi ve biyokütle üretimini azalttığı ve biberdeki yaprak fotosentez sistemini bozduğu rapor edilmiştir. Buna karşılık, MT uygulaması biber bitkisinin büyümesini ve yaprak fotosentez verimliliğini etkili bir şekilde iyileştirmiştir (Altaf ve diğ., 2023). Yapılan bu araştırmada Cr toksisitesine karşı MT uygulama gruplarında MT-kontrol grubu dahil K<sub>la</sub> içeriğinin, kontrol ve EpiBr gruplarına göre daha düşük olduğu saptandı (Çizelge 4.1). Sadece % olarak değerlendirildiğinde MT grubunda 5 mM Cr uygulanan grupta 3. Gün K<sub>la</sub> içeriği kontrol grubuna kıyasla %5.77 azalma gösterirken, Kontrol grubunda %23.32 oranında düşme dikkat çekti. Benzer şekilde 5. Günde de Kontrol grubunda %40.35 oranında azalma varken, MT grubunda %17.40 oranında azalma gözlemlendi (Çizelge 4.1). Bu durumda MT'nin K<sub>la</sub> içeriğinin korunmasında daha etkili olduğu düşünülmektedir. K<sub>l b</sub> içeriği de % olarak değerlendirildiğinde 3. günde yine 5 mM Cr stresi uygulanan kontrol grubunda %23.96 oranında azalırken, MT uygulama grupta %5.53 oranında azaldı (Çizelge 4.2). Karotenoid değişiminde de yine 3. Gün 5 mM uygulama grubundaki içerideki azalma oranı kontrol grubunda %25.78 iken, MT grubunda bu değişim %7.69 oranında gözlenirken 10 mM uygulama grubunda Karotenoid içeriği ilk grupta %20.50, ikinci grupta ise %3.30 oranında azalma gösterdi. 5. günde ise yine MT uygulama grubundaki karotenoid içeriğindeki artışlar önemli bulundu (Çizelge 4.3). Toplam klorofil açısından Çizelge 4.4 değerlendirildiğinde de 3. gün 5 mM grupta 3. gün %23.39 civarında azalmaya karşın MT grubunda bu değişim %5.71 olarak gözlemlendi. Gruplar arasındaki pigment içerik değişimleri kendi kontrol grupları ile % olarak karşılaştırıldığında MT'nin ağır metal stresine karşı pigment sistemi üzerinde kısmen etkili olduğu görülmektedir. EpiBr uygulama grubunda da K<sub>la</sub>'nın diğer gruplara kıyasla 5-10 mM Cr uygulananlarda Kontrol

ve MT gruplarına kıyasla yüksek olduğu gözlemlendi. Örneğin Kontrol 5 mM'da 1. gün KLa içeriği 8.74 µg/g, MT-5mM Cr uygulama grubunda 7.20 µg/g iken EpiBr-5 mM Cr uygulama grubunda 9.02 µg/g olarak daha yüksek saptandı. Yine 5. günde de en yüksek KLa içeriği bu grupta gözlemlendi (Çizelge 4-1). Klb içeriği de 1. ve 5. gün yine EpiBr -5mM Cr uygulama grubunda 1.94 µg/g olarak bulundu (Çizelge 4.2). Karotenoid içeriği ile Toplam Klorofil içeriği EpiBr -5-10 mM Cr uygulama gruplarında Kontrol ve MT uygulama gruplarına kıyasla genel olarak daha yüksek bulundu (Çizelge 4.3-4.4). Bu veriler Cr stresinde EpiBr'nin fotosentetik sistem üzerinde koruyucu etkisi olduğu görüşünü desteklemektedir. *Gossypium* türlerinde yapılan bir araştırmada da EpiBr uygulamasının, çoğunlukla fotosentetik pigmentlerin içeriğini iyileştirerek ve ikincil metabolizmayı düzenleyerek *Verticillium dahlia* (Vd) toksinlerini hafiflettiği rapor edilmiştir (Bibi ve diğ. 2017).

Pirinç fidelerine MT uygulaması hem yer altı hem de yer üstü alanlarda artan bitki biyokütlesiyle sonuçlandığı, Cd stresi altında, yaprak MT uygulamasının pirinç bitkisinde SOD ve POD'u artırırken, MDA'yı azalttığı rapor edilmiştir (Lv ve diğ., 2019). MT'nin, Cd birikimini azaltarak ve ROT homeostazını geri kazandırarak Cd stresi altındaki *Medicago sativa* (yonca) fidelerinin büyümesini tersine çevirdiğini gözlemiştirlerdir (Gu ve diğ, 2017). Cd birikimini azaltarak ve büyüme inhibisyonu ile fotoinhibisyonu hafifleterek, MT'nin yapraklara uygulamasının bütün bitkilerinde Cd toleransını iyileştirdiği. MT ayrıca APX, CAT ve POD gibi antioksidan enzimler tarafından ROT'un doğrudan temizlenmesi yoluyla bütün bitkilerindeki Cd kaynaklı oksidatif hasarı azalttığı bildirilmiştir (Wang ve diğ., 2019). Elma kök sapları MT ile muamele edildiğinde, Cd kaynaklı gelişme, fotosentez ve enzim aktivitesindeki düşmelerin azaldığı ve Cd stresi altındaki bitkilerde ROT ve MDA birikim seviyeleri MT uygulamasıyla düştüğü rapor edilmiştir (Hoque ve diğ., 2021). Başka bir araştırmada da MT'nin, klorofil sentezini ve bitki besin elementi kompozisyonunu iyileştirdiği ve ayrıca antioksidan savunmayı artırdığı, ROT ve MDA birikimini baskıladığı ve Pb stresi altındaki mısır ve aspir bitkilerinde elektrolit sızıntısını azalttığını gözlemiştirlerdir (Okant ve Kaya 2019, Namdjoyan ve diğ., 2020).

MT, antioksidan sistemini düzenleyerek, besin ve metabolik homeostazı koruyarak, ozmotik dengeyi değiştirerek, ikincil metabolizmayı uyararak, fotosentez yeteneğini artırarak ve strese dirençli genlerin ifadesini kontrol ederek bitkilerin savunma sistemlerini iyileştirir (Zhang ve diğ., 2016, Al-Huqail ve diğ, 2020). Bitkilerde antioksidan sistem

etkinliği, ağır metal stresine karşı bitki toleransını iyileştirmek için ROT'u da kuvvetlice temizleyen MT'nin ekzojen uygulanması yoluyla artırılabilir (Hoque ve diğ., 2021).

Yaygın endüstriyel kullanımı nedeniyle Cr, yeraltı suyu , toprak ve tortularda bulunan ikinci en sık görülen metal kirleticisidir ve önemli bir çevresel risk oluşturur (Singh ve diğ., 2013). Son zamanlarda, Cr'nin bitkilerin ihtiyaç duymadığı bir madde olması nedeniyle Cr'nin toprağı ve suyu kirletmesi konusunda endişeler vardır (Shahid ve diğ., 2017). Büyüme ve biyokütle üretimi açısından, bitkilerde Cr birikimi çok tehlikelidir ve yapısal değişikliklere neden olur (Xia ve diğ., 2019). Bir araştırmada Cr toksisitesi, mercanköşk bitkisinde biyokütle verimini, iyon homeostazını, pigment içeriğini, bağıl su içeriğini, enzim aktivitesini, uçucu yağ verimini ve askorbik asit seviyesini olumsuz yönde azaltmasına rağmen antioksidan enzimlerin aktivitesi ve Cr seviyesi arttığını saptamışlardır. MT (100 µM) uygulaması büyüme durumunu, uçucu yağ verimini ve diğer fizyolojik işlevleri önemli ölçüde iyileştirdiği MT uygulaması ile bitkinin yapraklarındaki Cr birikimini etkili bir şekilde azalttığı rapor edilmiştir (Farouk ve Al-Amri 2019a). MT uygulaması *Brassica napus* fide büyümesini, fotosistem II verimliliğini ve antioksidan enzim sistemini önemli ölçüde iyileştirdiğini ve krom toksisitesi altında ROT üretimini azalttığını gözlemişlerdir (Ayyaz ve diğ., 2020). Başka bir çalışmada, (Ayyaz ve diğ.,2020), Cr toksisitesinin *Brassica napus* büyümesini azalttığını, fotosentetik pigment moleküllerini azalttığını ve klorofil floresan parametrelerini dengesizleştirdiğini gözlemledi. Öte yandan, ekzojen MT takviyesi, Cr toksisitesi altında *Brassica napus* büyümesini artırdığı rapor edilmiştir. Aynı gruptan yapılan başka bir çalışmada da MT uygulamasının ROT üretim seviyesini azaltarak oksidatif hasarı azalttığı ve MT uygulaması ile çözünür protein konsantrasyonu, prolin seviyesi ve antioksidan enzim aktivitesi artırdığı bildirilmiştir (Ayyaz ve diğ., 2021). MT uygulaması ikincil metabolit birikimini etkili bir şekilde artırmış ve ROT, MDA seviyesinin aşırı üretimini azaltmış ve domates yaprağındaki Cr birikimini engellemiştir (Sun ve diğ., 2023; Yang ve diğ., 2023).

Brassinosteroidler (BR), çeşitli fizyolojik ve biyokimyasal aktivitelere katılan altıncı tip bitki hormonu olarak bilinir ve bitkilerde yeri doldurulamaz bir rol oynar. Nitrik oksit (NO), etilen, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>S gibi küçük moleküllü bileşikler (KMB'ler), sinyal habercileri olarak bitki büyümesi ve gelişiminde rol oynar. Son zamanlarda, KMB'lerin BR aracılı büyüme ve stres tepkilerindeki katılımı, tohum çimlenmesi, tesadüfi köklenme, gövde uzaması, meyve olgunlaşması ve stres tepkileri dahil olmak üzere bitkilerde giderek daha fazla keşfedilmektedir. BR'ler ve KMB'ler arasındaki çapraz konuşma, bitki gelişimini teşvik

eder ve antioksidan sistemi, fotosentetik kapasiteyi ve karbonhidrat metabolizmasını ve ayrıca ozmotik ayarlamayı düzenleyerek stres hasarını hafifletir. Ek olarak, BR'ler farklı stres türlerine yanıt verebilir: Cr'nin toksisitesini hafifletmek, tuz hasarının üstesinden gelmek, kuraklığa toleransı iyileştirmek, soğuk toleransını artırmak ve Cu'nun toksisitesini azaltmak gibi işlevlere sahiptir (Hu ve diğ., 2021).

BR, metal stresi altında ROT'un aşırı üretiminden kaynaklanan lipidlerin bozunmasını engelleyebilir ve antioksidan enzimlerin aktivitesini uyarabilir (Sudo ve diğ., 2008 Soares ve diğ., 2016). Hızlı sanayileşme ve kentleşme nedeniyle ağır metaller en önemli bitki stresörlerinden biri haline gelmiştir. Bitkilerde, kritik seviyelerin ötesinde ağır metallerin birikmesi oksidatif strese yol açar. Ancak BR'ler stres koşulları altında reaktif oksijen türlerinin aşırı üretiminden kaynaklanan lipidlerin bozunmasını engelleyebilir ve antioksidanların aktivitesini artırabilir (Hu ve diğ., 2021).

*Z. mays*'da GSH içeriği özellikle MT ve EpiBr ile Cr çözeltisinin uygulandığı gruplarda günlere bağlı olarak artış göstermiştir. Örneğin MT 10 mM uygulama grubunda 0.85 U/mg protein olan GSH içeriği 3. günde %69.41, 5. günde ise 3. güne kıyasla %136.47 civarında artış göstermiştir. Benzer şekilde GSH içeriği EpiBr uygulama gruplarında da artış gösterdi. EpiBr 10 mM Cr uygulama grubunda 1.06 U/mg protein olan GSH içeriği 3. Günde %46.23, 5. günde de 3. Güne kıyasla %68.87 oranında arttığı saptandı (Çizelge 4.5). MT ve EpiBr uygulama gruplarında GSH içeriğindeki artış önemli olup, Cr stresinden bitkinin korunmasını sağlamak için cevapta etkili olduğunu göstermektedir.

GR aktivitesi Çizelge 4.6'yı değerlendirdiğimizde Kontrol ve 10 mM Cr uygulama gruplarında MT ve EpiBr uygulanan gruplara kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlendi. Kontrol deney grubunda 1.50 U/mg protein olan aktivite MT-kontrol grubunda 1.33 U/mg protein, EpiBr-kontrol grubunda ise 1.14 U/mg protein olarak saptandı. Kontrol 10 mM Cr uygulama grubunda 1. günde 2.37 U/mg protein olan aktivite %10.55 oranında artarak 2.62 U/mg protein'e 5. günde %65.40 oranında artarak 3.92 U/mg proteine yükselmiştir. MT-10 mg Cr uygulama grubunda ise bu değerler günlere göre 1.75, 2.13 ve 2.54 U/mg protein olarak saptandı. EpiBr-10 mM Cr uygulama grubunda da günlere göre 1.36, 1.47 ve 1.83 U/mg protein olarak gözlemlendi. Bu sonuçlar ile; hem MT hem de EpiBr'nin oksidatif stresin zararını baskılamada etkili olduğu görüşü desteklenmektedir.

GST aktivitesinin de GR aktivitesinde olduğu gibi MT ve EpiBr uygulama gruplarında azaldığı gözlemlendi (Çizelge 4.7). Örneğin Kontrol-5mM Cr uygulama grubunda

günlere göre sırasıyla; 2.30, 2.48 ve 2.63 U/mg protein olan aktivite, MT-5mM Cr uygulama grubunda; 1.23, 1.35 ve 1.56 U/mg protein olarak saptandı. EpiBr-5 mM uygulama grubundaysa GST aktivitesi 1.30, 1.57 ve 1.84 U/mg protein olarak gözlemlendi (Çizelge 4.7).

POD aktivitesinde de GR ve GST enzimlerinde olduğu gibi benzer cevaplar alındı. MT ve EpiBr uygulanmayan gruplarda POD aktivitesinin daha yüksek olduğu saptandı. Örneğin 5. günde POD aktivitesi Kontrol uygulama gruplarında 0.95, 1.73 ve 2.61 U/mg protein iken, MT uygulama gruplarında 0.60, 1.08 ve 1.22 U/mg protein; EpiBr uygulama grubunda ise 0.64, 1.30 ve 1.48 U/mg protein olarak gözlemlendi (Çizelge 4.8). KAT aktivitesinde de MT ve EpiBr uygulanmayan 5-10 Cr uygulama gruplarında yüksek olması MT ve EpiBr uygulama gruplarında ise aktivitenin düşmesi önemli bulundu. Yine 5. Güz değerleri üzerinden sonuçlara bakıldığında 5mM Cr çözeltisinin uygulandığı grupta KAT aktivitesi 397.87 U/mg protein iken, MT uygulama grubunda 134.94 U/mg protein, EpiBr grubunda ise 104.22 U/mg protein olarak saptandı. Benzer değişiklikler diğer gruplar arasında da görülmektedir (Çizelge 4.9). SOD aktivitesi de diğer enzimlerde olduğu gibi MT ve EpiBr uygulama gruplarında azaldığı saptandı. Örneğin yine 5. gün Kontrol grubunda Cr stresine paralel saptanan değerler 64.47, 123.92 ve 131.94 U/mg protein iken, MT uygulama gruplarında bu değerler 35.66, 72.60 ve 88.70, EpiBr uygulama gruplarında ise 40.15, 61.12 ve 78.34 U/mg protein olarak saptandı (Çizelge 4.10). Tüm bu verilere dayanarak antioksidan enzim sistemi üzerinde MT ve EpiBr'nin diğer stres faktörlerinde de ifade edildiği gibi stresi hafifletici etkisi bizim deneysel çalışmalarımız ile de desteklenmiştir.

Son zamanlarda yapılan bir araştırma, EpiBr ve salisilik asit ile silisyum uygulanmasının, *Triticum aestivum* L.'nin arsenik (As) stresi altında büyümesini ve kalitesini iyileştirmek için H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, MDA ve EL içeriğini önemli ölçüde azalttığını saptamışlardır (Maghsoudi, 2019).

Kontrol grubunda MDA içeriği 5. günde 0.5796 µmol MDA/g iken 5 mM Cr uygulanan grupta 0.7441 µmol MDA/g; MT kontrol grubunda 0.5472 µmol MDA/g iken 5mM Cr uygulanan MT grubunda 0.6946 µmol MDA/g, EpiBr uygulama grubunda kontrolde 0.7237 µmol MDA/g iken 5 mM Cr uygulanan grupta 1.0151 µmol MDA/g olarak saptandı. Benzer şekilde 10 mM uygulanan gruplarda da 5. günde kontrol grubunda 1.3247 µmol MDA/g, MT uygulama grubunda 0.9335 µmol MDA/g ve EpiBr uygulama grubunda da 1.4839 µmol MDA/g en yüksek MDA içerikleri gözlemlendi. Gruplar arasında ve günlere bağlı olarak gözlenen değişimler istatistiksel olarak da anlamlı bulundu (Çizelge 4.11).

MDA'nın büyük kısmı, oksidatif strese yanıt olarak bitki zarlarındaki PUFA'ların lipid peroksidasyonundan (ROT ve/veya lipoksijenaz yoluyla) kaynaklandığından, MDA içeriği bitki zarlarındaki hasarın bir göstergesi olarak yaygın olarak kullanılır. Bu, MDA seviyeleri yüksek kalırsa ve proteinleri ve nükleik asitleri onarılamaz şekilde değiştirirse geçerlidir. MDA bazen de oksidatif stres koşulları altında hücre koruması sağlayarak olumlu bir rol oynayabilir. Bu bağlamda, MDA'nın bir koruma mekanizması olarak hareket edebileceği öne sürülmüştür. Örneğin, tuz stresi maruz bırakılan biberiye bitkilerinde yapılan gözlemlerde, MDA yapraklarda bir süreliğine artmış, ROT'u dağıtan bir antioksidan sistem etkili bir şekilde aktive olmuş ve oksidatif hasara dair hiçbir belirti gözlenmemiştir (Tounekti ve diğ., 2011 ). Bulgularımız ile de kontrol gruplarına kıyasla MT ve EpiBr uygulama gruplarında MDA içeriğindeki artışların oksidatif hasarın engellenmesinde etkili olduğu fikrini desteklemektedir (Çizelge 4.11).

OSİ EpiBr ile MT uygulanan gruplarda gün içi ve günlere bağlı OSİ'nin % değişim değerlerinde kontrol olarak hazırlanan uygulama grupları arasında sonuçlara göre gruplar arasında 1. günde 77.6167 ile 5 mM Cr uygulanan grupta en düşük değer saptandı. Bu grupta 3. ve 5. günlerde OSİ'de 86.5167 ve 89.6467 ile artış olduğu gözlemlendi. Cr çözeltisinin 10 mM uygulandığı gruplar içerisinde en düşük değer EpiBr-10 mM Cr uygulanan grupta 5. Günde 74.0767 ile dikkat çekti. Çizelge 4.12'yi değerlendirdiğimizde 5. günde 10mM Cr uygulanan gruplarda 3. güne kıyasla azalış saptandı. Bulgularımız, Cr'un artan konsantrasyonlarda ve ilerleyen günlerdeki OSİ'deki değişimleri üzerinde MT ve EpiBr'nin anlamlı bir etkisinin olmadığını gösterdi.

*Z. mays*'da Cr uygulamasına bağlı MT ve EpiBr uygulama gruplarında Cr'un bitki tarafından alınımı üzerindeki etkilerine bakıldığında; MT'nin Cr'un bitki tarafından alınımını kısıtladığı saptandı. Örneğin 10 mM Cr uygulama kontrol grubunda 6.01 ppm olan Cr içeriği MT uygulama grubunda 4.31 ppm, EpiBr uygulama grubunda ise 6.54 ppm olarak ölçüldü. 5 mM uygulama grubunda da yine kontrol grubunda 2.11 ppm, MT uygulama grubunda 1.12 ve EpiBr uygulama grubunda ise 1.48 ppm olarak saptandı (Çizelge 4.13). Bu verilere dayanarak MT'nin Cr alınımının baskılanması açısından daha etkili olduğunu söyleyebiliriz.

Ağır metallerin bitkiler üzerindeki oldukça toksik etkisi göz önüne alındığında, ağır metallerin olumsuz etkilerinin etkili ve sürdürülebilir üretim yöntemleriyle azaltılmasının önemi vardır; bu, tüketiciler için sağlık risklerini de düşürebilir. Bitkilerin olumsuz çevre

koşullarına verdiği tepkiler genellikle büyümeyi teşvik eden fitohormon gibi kimyasallarla düzenlenir. Bu tür fitohormonlar, geniş bir yelpazedeki biyokimyasal ve metabolik işlevleri geliştirerek bitki toleransını ve büyüme düzenlemesini etkiler. Bu fitohormonların işlevini ve mekanizmasını araştırmak, ağır metallerin toksisitesine karşı direncin iyileştirilmesi için çok önemlidir (Altaf ve diğ. 2023). Ayrıca, kirlenmiş topraklardan gelen mahsulde Cr birikimi insanlar ve hayvanlar için ciddi sağlık sorunlarına yol açar. Bu nedenle, Cr'nin topraktaki biyojeokimyasal aktivitesinin, bitkiler için toksisitesinin ve uzun süreli bir iyileştirme araç setinin geliştirilmesinin kapsamlı bir şekilde anlaşılması, hem sürdürülebilir tarım hem de insan sağlığı açısından faydalı olacak şekilde azaltılması için gereklidir (Ali ve diğ., 2013).

Yapılan bu araştırmada da Cr'un artan konsantrasyonlarda bitkiler için toksik etki oluşturduğu, ancak MT ve EpiBr gibi önemli fitohormonlarla bu zararlı etkilerin ortadan kaldırılabileceği saptanmıştır.

## KAYNAKLAR

- Akerboom, T. P., Sies, H. (1981). Assay of glutathione, glutathione disulfide, and glutathione mixed disulfides in biological samples, *In Methods in Enzymology* (Vol. 77, pp. 373-382). Academic Press.
- Al-Huqail, A.A.; Khan, M.N.; Ali, H.M.; Siddiqui, M.H.; Al-Huqail, A.A.; AlZuaibr, F.M.; Al-Muwayhi, M.A.; Marraiki, N. Al-Humaid, L. (2020) Exogenous Melatonin Mitigates Boron Toxicity in Wheat. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 201, 110822.
- Ali S., Mir RA, Tyagi A., Manzar N., Kashyap AS., Mushtaq M., Raina A., Park S., Sharma S., Mir ZA., Lone SA., Bhat AA., Baba U., Mahmoudi H., Bae H. (2023) Chromium Toxicity in Plants: Signaling, Mitigation, and Future Perspectives. *Plants (Basel)*. Mar 29;12(7):1502. doi: 10.3390/plants12071502. PMID: 37050128; PMCID: PMC10097182.
- Ali, H.; Khan, E.; Sajad, M.A. (2013). Phytoremediation of Heavy Metals—Concepts and Applications. *Chemosphere* 91, 869–881.
- Algül, B. E., Tekintaş, F. E., & Dalkılıç, G. G. (2016). Bitki Büyüme Düzenleyicilerinin Kullanımı Ve İçsel Hormonların Biyosentezini Arttırıcı Uygulamalar. *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 13(2), 87-95.
- Alscher, R.G., Donahue, J.L., Cramer, C.L., (1997). Reactive oxygen species and antioxidants: Relationships in green cells. *Physiol. Plant.*, 100, 224-233.
- Alves, R. N., Maulvault, A. L., Barbosa, V. L., FernandezTejedor, M., Tediosi, A., Kotterman, M., ... & Marques, A. (2018). Oral bioaccessibility of toxic and essential elements in raw and cooked commercial seafood species available in European markets. *Food Chemistry*, 267, 15-27.
- Altaf, M. A., Hao, Y., Shu, H., Mumtaz, M. A., Cheng, S., Alyemeni, M. N., ... & Wang, Z. (2023). Melatonin enhanced the heavy metal-stress tolerance of pepper by mitigating the oxidative damage and reducing the heavy metal accumulation. *Journal of Hazardous Materials*, 454, 131468.
- Altaf, M.A., Hao, Y., Shu, H., Mumtaz, M.A., Cheng, S., Alyemeni, M.N., Ahmad, P., Wang, Z., (2023). Melatonin enhanced the heavy metal-stress tolerance of pepper by mitigating the oxidative damage and reducing the heavy metal accumulation. *J. Hazardous Mat.* 454, 131468 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131468>.
- Aydın, S., & Üstün, F. (2012). Tanenler 1 Kimyasal Yapıları, Farmakolojik Etkileri, Analiz Yöntemleri. *İstanbul Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 33(1), 21-31.
- Ayhan, B., Ekmekçi, Y., & Tanyolaç, D. (2007). Erken Fide Evresindeki Bazı Mısır Çeşitlerinin Ağır Metal (Kadmiyum Ve Kurşun) Stresine Karşı Dayanıklılığının Araştırılması. *Anadolu University Journal of Sciences & Technology*, 8(2).
- Ayyaz, A., Amir, M., Umer, S., Iqbal, M., Bano, H., Gul, H.S., Noor, Y., Javed, M., Athar, H.R., Zafar, Z.U., Farooq, M.A. (2020). Melatonin induced changes in photosynthetic efficiency as probed by OJIP associated with improved chromium stress tolerance in canola (*Brassica napus L.*). *Heliyon* 6, e04364. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04364>.
- Ayyaz, A., Farooq, M.A., Dawood, M., Majid, A., Javed, M., Athar, H.U.R., Bano, H., Zafar, Z.U. (2021). Exogenous melatonin regulates chromium stress-induced feedback inhibition of photosynthesis and antioxidative protection in *Brassica napus cultivars*. *Plant Cell Rep* 40, 2063–2080. <https://doi.org/10.1007/s00299-021-02769-3>.
- Ayyaz, A., Farooq, M.A., Kanwal, A., Aslam, M., Iqbal, M., Manzoor, A., Khalid, A., Umer, S., Bano, H., Rasool, B., Zafar, Z. (2020). Differential responses of exogenous melatonin on growth, photosynthesis and antioxidant defence system in two *Brassica*

- napus L. cultivars under chromium stress. Int. J. Environ. Agri. Biotechnol.* 5, 397–411. <https://doi.org/10.22161/ijeab.52.15>.
- Bajguz, A.,** “Blockade of heavy metals accumulation in *Chlorella vulgaris* cells by 24-epibrassinolide”, *Plant Physiology and Biochemistry*, 38: 797-80 (2000).
- Bajwa, V. S., Shukla, M. R., Sherif, S. M., Murch, S. J., & Saxena, P. K.** (2014). Role of melatonin in alleviating cold stress in *Arabidopsis thaliana*. *Journal of Pineal Research*, 56(3), 238-245.
- Baker, A.J.M. and Walker P.L.,** (1990). Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants, heavy metal tolerance in Plants. In: *Shaw A.J. Evolutionary Aspects. CRC Pres, Boca Raton.* 155-177.
- Baktır İ** (2010). Bitki Büyüme Düzenleyicileri Özellikleri ve Tarımda Kullanımları. *Hasad Yayıncılık.*
- Barceló, J., & Poschenrieder, C.** (1990). Plant water relations as affected by heavy metal stress: a review. *Journal of Plant Nutrition*, 13(1), 1-37.
- Basit F., Bhat JA., Hu J., Kaushik P., Ahmad A., Guan Y., Ahmad P.** *Brassinosteroid Supplementation Alleviates Chromium Toxicity in Soybean (Glycine max L.) via Reducing Its Translocation.* *Plants (Basel).* 2022 Sep 1;11(17):2292. doi: 10.3390/plants11172292. PMID: 36079674; PMCID: PMC9460071.
- Baumhardt, G.R., Welch, L.F.,** 1972, Lead uptake and corn growth with soil applied lead, *J.Env. Qual.*, 1 (1), 92-94.
- Bayçu, G.,** 1995, *Ailanthus altissima*'da Kadmiyum Toleransı ve Fitokelatin Oluşumu, Doktora Tezi, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Benavides, M. P., Gallego, S. M., & Tomaro, M. L.** (2005). Cadmium toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17, 21-34.
- Bestil, D. N., Uysal, H.** (2023). flavonoidler ve biyolojik aktiviteleri. *Antakya Veteriner Bilimleri Dergisi*, 2(1), 49-55.
- Bibi, N.; Ahmed, I.M.; Fan, K.; Dawood, M.; Wang, X.** (2017). Role of brassinosteroids in alleviating toxin-induced stress of *Verticillium dahliae* on cotton callus growth. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24, 12281–12292.
- Boonyapookana B., Upathham ES., Kruatrachue M., Pokethitiook P., Singhakaew S.** (2002). Su mercimeği *Wolfa globosa*'da kadmiyum ve kromun fito-birikimi ve fitotoksitesisi. *Int J Phytoremed* 4:87–100.
- Bradford, M. M.** (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding, *Analytical Biochemistry*, 72, 248–254.
- Büyük, İ., Soydam-Aydın, S. ve Aras, S.** (2012). Bitkilerin stres koşullarıyla ilgili prosedürler. *Türkiye Hijyen ve Deneysel Biyoloji Bülteni/Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji* , 69 (2).
- Cadenas E.,** 1989. Biochemistry of Oxygen Toxicity. *Annual Review of Biochemistry*, 58, 79- 110.
- Carlberg, I., Mannervik, B.** (1985). Glutathione reductase, In *Methods In Enzymology* (Vol. 113, pp. 484-490). *Academic Press.*
- Carocho, M. and Ferreira, I. C.** (2013) A review on antioxidants, prooxidants and related controversy: natural and synthetic compounds, screening and analysis methodologies and future perspectives", *Food and Chemical Toxicology* 51, 15-25.
- Cesco, S., Lucini, L., Miras-Moreno, B., Borruso, L., Mimmo, T., Pii, Y., ... & Trevisan, M.** (2021). The hidden effects of agrochemicals on plant metabolism and root-associated microorganisms. *Plant Science*, 311, 111012.

- Chen, Q., Qi, W. B., Reiter, R. J., Wei, W., & Wang, B. M.** (2009). Exogenously applied melatonin stimulates root growth and raises endogenous indoleacetic acid in roots of etiolated seedlings of *Brassica juncea*. *Journal of Plant Physiology*, 166(3), 324-328.
- Clouse SD** (2009) Quick Guide: Brassinostreodis. *Current Biology*, Vol. 11, No. 22.
- Das, K., Roychoudhury, A.,** (2014). Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants, *Frontiers in Environmental Science*, 2
- Do Carmo Santos, M. L., Santos, T. A., dos Santos Lopes, N., Ferreira, M. M., Alves, A. M. M., Pirovani, C. P., & Micheli, F.** (2024). The selenium-independent phospholipid hydroperoxide glutathione peroxidase from *Theobroma cacao* (TcPHGPX) protects plant cells against damages and cell death. *Plant Physiology and Biochemistry*, 207, 108332.
- Detlefsen, V.** (1988). Status report on aquatic pollution problems in Europe. *Aquatic Toxicol*, 11, 259-286.
- Duncan, D. B.** (1955). Multiple range and multiple F tests biometrics, International Biometric Society, 11:1 1-42.
- Erdal S.** (2010). Memeli cinsiyet hormonlarının arpa ve nohut bitkilerinin büyüme ve gelişmeleri üzerine etkileri. Doktora tezi, Erzurum, Türkiye.
- Farag, M. M., Elkesh, A., Dafea, M., Khan, M., Arnao, M. B., Abdelhamid, M. T., & Ai, S.** (2020). Role of melatonin in plant tolerance to soil stressors: salinity, pH and heavy metals. *Molecules* 25(22), 5359.
- Farouk, S.; Al-Amri, S.M.** (2019). *Exogenous Melatonin-Mediated Modulation of Arsenic Tolerance with Improved Accretion of Secondary Metabolite Production, Activating Antioxidant Capacity and Improved Chloroplast Ultrastructure in Rosemary Herb. Ecotoxicol. Environ. Saf.*,180, 333-347.
- Fini, A., Brunetti, C., Di Ferdinando, M., Ferrini, F. & Tattini, M.** (2011). Stress induced flavonoid biosynthesis and the antioxidant machinery of plants. *Plant Signaling & Behavior*, 6(5) 709-711.
- Fitzgerald, M. A., & McCouch, S. R.** (2007). Not just a grain of truth: the complexity of the rice genome. *Nature Reviews Genetics*, 8(8), 565-573.
- Fridovich I.,** (1995). Superoxide Radical and Superoxide Dismutases. *Annual Review of Biochemistry*, 64, 97-112.
- Foyer, C. H. and Halliwell, B.,** (1976). The presence of glutathione , glutathione reductase in chloroplasts: a proposed role in ascorbic metabolism, *Planta*, vol. 133, 21-25.
- Foyer C. H., Delgado H.L., Dat J.F., Scott I.M.,** (1997). Hydrogen peroxide- and glutathioneassociated mechanisms of acclimatory stress tolerance and signalling. *Physiologia Plantarum*, 100 (2), 241-254.
- Gao, J.,Zhang, D., Proshad, R., Uwiringiyimana, E., Wang, Z.** (2021). Assessment of the pollution levels of potential toxic elements in urban vegetable gardens in southwest China. *Sci. Rep.*11, 22824.
- Genisel M.,** 2010. Kemik tozu solüsyonu, CaCl<sub>2</sub> ve IAA uygulamalarının tuz stresi altındaki fasulye (*Phaseolus vulgaris*) bitkisinin fizyolojik parametreleri üzerine etkileri. Y. Lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.
- Ghori, N.H., Ghori, T., Hayat, M.Q., Imadi, S.R., Gul, A., Altay, V. & Ozturk, M.** (2019). Heavy metal stress and responses in plants. *International Journal of Environmental Science & Technology* 16(3), 1807-1828. DOI: 10.1007/s13762-019-02215-8.
- Gill, S. S. ve Tuteja, N.,** 2010a, Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants, *Plant Physiol Biochem*, 48 (12), 909-930.

- Goodarzi, A., Namdjoyan, S., & Soorki, A. A.** (2020). Effects of exogenous melatonin and glutathione on zinc toxicity in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) seedlings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 201, 110853.
- Grove, M.D., G.F. Spencer, W.K. Rohwedder, N.B. Mandava, J.F. Worley, J.D. Warthen Jr., G.L. Steffens, J.L. Flippen-Anderson ve J.C. Cook Jr.** (1979). Brassinolide, a plant growth promoting steroid isolated from *Brassica napus* pollen. *Nature*. 281: 216–217.
- Habig, W. H., Pabst, M. J., & Jakoby, W. B.** (1974). Glutathione S-transferases: the first enzymatic step in mercapturic acid formation. *Journal of Biological Chemistry*, 249(22), 7130-7139.
- Halliwell B.**, (1982). Superoxide-dependent formation of hydroxyl radicals in the presence of iron salts is a feasible source of hydroxy radicals in vivo. *Biochemical Journal*, 205(2), 461-463.
- Halliwell, B., Gutteridge, J.** (2002). *Free radicals in biology and medicine*, Third edition, Oxford Uni. Press.
- Hammand, P.B., Beliles, R.P.** (1980). Metals. In: J. Doull, C.D. Klaassen and Amdur, M.O. ed. *Toxicology* 2th Ed. *McMillan Publishing Co. Inc.* 409-462, New York.
- Hapke, H.J.** (1991). Effects of metals on domestic animals. VCH Verlagsgesellschaft mbH.
- Hassan, A. Y.** (2023, July). The Effect of Spraying with the Hormone Brassinolide on the Production of Oil and Glycosides of Goat Pea (*Securigera securidaca*). In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1214, No. 1, p. 012046). IOP Publishing.
- Hayat, S., Khalique, G., Irfan, M.; Wani, A.S., Tripathi, B.N., Ahmad, A.** (2012) *Physiological Changes Induced by Chromium Stress in Plants: An Overview*. *Protoplasma*. 249, 599–611.
- Heath, R. L., & Packer, L.** (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 125(1), 189-198.
- Hernández, I. G., Gomez, F. J. V., Cerutti, S., Arana, M. V., & Silva, M. F.** (2015). Melatonin in *Arabidopsis thaliana* acts as plant growth regulator at low concentrations and preserves seed viability at high concentrations. *Plant Physiology and Biochemistry*, 94, 191-196.
- Hoque MN, Tahjib-Ul-Arif M, Hannan A, Sultana N, Akhter S, Hasanuzzaman M, Akter F, Hossain MS, Sayed MA, Hasan MT, Skalicky M, Li X, Brestič M.** (2021). Melatonin modulates plant tolerance to heavy metal stress: Morphological responses to molecular mechanisms. *Int J Mol Sci*. 2 Oct 23;22(21):11445. doi: 10.3390/ijms222111445. PMID: 34768875; PMCID: PMC8584185.
- Hou, D., O'Connor, D., Igalavithana, A.D., Alessi, D.S., Luo, J., Tsang, D.C.W., Sparks, D.L., Yamauchi, Y., Rinklebe, J. & Ok, Y.S.** (2020). Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(7), 366-381.
- Hu D, Wei L, Liao W.** (2021). Brassinosteroids in Plants: Crosstalk with Small-Molecule Compounds. *Biomolecules*. Nov 30;11(12):1800. doi: 10.3390/biom11121800. PMID: 34944444; PMCID: PMC8698649.
- Hua Y., Rui F., Ling L., Wei Y., Qiong H., Chunlin Y., Wenkai H., Wei G., Jingyan W.,** (2023). Potential roles of melatonin in mitigating the heavy metals toxicity in horticultural plants, *Scientia Horticulturae*, Volume 321, 112269, ISSN 0304-4238, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112269>.

- Huang, L., Yu, C.H., Hopke, P.K., Shin, J.Y., Fan, Z. (Tina)** (2014). Trivalent chromium solubility and its influence on quantification of hexavalent chromium in ambient particulate matter using EPA method 6800. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 64, 1439–1445.
- Huang, H., Ullah, F., Zhou, D. X., Yi, M. ve Zhao, Y.** (2019). Mechanisms of ROS regulation of plant development and stress responses, *Frontiers in Plant Science*, 10, 800.
- Huang, L., Zhang, L., Zeng, R., Wang, X., Zhang, H., Wang, L., ... & Chen, T.** (2020). Brassinosteroid priming improves peanut drought tolerance via eliminating inhibition on genes in photosynthesis and hormone signaling. *Genes*, 11(8), 919.
- Jobby, R., Sarkar, M., Bose, R., Srivastava, S., & Suprasanna, P.** (2024). Chromiomics: Mechanisms of detoxification and tolerance in plants. *Environmental Pollution*, 123991.
- Jomova, K., & Valko, M.** (2013). Health protective effects of carotenoids and their interactions with other biological antioxidants. *European Journal of Medicinal chemistry*, 70, 102-110.
- Kabakcı, M.** (2022). Salep orkidelerinin In vitro çoğaltımında bazı bitki büyüme düzenleyicilerinin etkisi (Master's thesis, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Kaçar, B., Katkat, V., & Öztürk, Ş.** (2006). Bitki Fizyolojisi. Nobel Yayın No:848, 562s, Ankara.
- Khan, N.A., Singh, S.** (2008). Abiotic Stress and Plant Responses. New Delhi: IK International.
- Khan, M. K., Zill, E. H., Dangles, O.,** (2014). "A comprehensive review on flavanones, the major citrus polyphenols", *Journal of Food Composition and Analysis* 33(1), 85-104.
- Kimbrough, D.E., et al.** (1999). A Critical Assessment of Chromium in the Environment. *Crit. Rev. Env. Sci. Technol.*, 29, 1-46.
- Király, L., Zechmann, B., Albert, R., Bacsó, R., Schwarczinger, I., Kolozsváriné Nagy, J., ... & Künstler, A.** (2024). Enhanced resistance to viruses in *Nicotiana glauca* 'Columbia' is dependent on salicylic acid, correlates with high glutathione levels, and extends to plant-pathogenic bacteria and abiotic stress. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 37(1), 36-50.
- Koca, N., & Karadeniz, F.** (2005). Gıdalardaki doğal antioksidan bileşikler. *Gıda*, 30(4).
- Kostopoulou, Z., Therios, I., Roumeliotis, E., Kanellis, A. K., & Molassiotis, A.** (2015). Melatonin combined with ascorbic acid provides salt adaptation in *Citrus aurantium* L. seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 86, 155-165.
- Li, M., Hu, C., Zhu, Q., Chen, L., Kong, Z., & Liu, Z.** (2006). Copper and zinc induction of lipid peroxidation and effects on antioxidant enzyme activities in the microalga *Pavlova viridis* (Prymnesiophyceae). *Chemosphere*, 62(4), 565-572.
- Li, S., Wang, X., Liu, X., Thompson, A. J., & Liu, F.** (2022). Elevated CO<sub>2</sub> and high endogenous ABA level alleviate PEG-induced short-term osmotic stress in tomato plants. *Environmental and Experimental Botany*, 194, 104763.
- Liang, D., Ni, Z., Xia, H., Xie, Y., Lv, X., Wang, J., ... & Luo, X.** (2019). Exogenous melatonin promotes biomass accumulation and photosynthesis of kiwifruit seedlings under drought stress. *Scientia Horticulturae*, 246, 34-43.
- Lichtenhaler H.K.** (1996). Vegetation stress: An introduction to the stress concept in plants. *J. Plant Physiol.*, 148: 4-14.
- Liu, C., Zheng, H., Sheng, K., Liu, W. ve Zheng, L.,** (2018), Effects of melatonin treatment on the postharvest quality of strawberry fruit, *Postharvest Biology and Technology*, 139, 47-55.
- Loreto, F., & 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.

- Luck, H.** (1963). Catalase: In: Methods of Enzymatic Analysis edited by HU.
- Luna, C. M., González, C. A., & Trippi, V. S.** (1994). Oxidative damage caused by an excess of copper in oat leaves. *Plant and Cell Physiology*, 35(1), 11-15.
- Ly, X., Fang, Y., Zhang, L., Zhang, W., Xu, L., Han, J., Jin, B., Zhang, X., Zhang, X., Xue, D.** (2019). Effects of melatonin on growth, physiology and gene expression in rice seedlings under cadmium stress. *Phyton* 2019, 88, 91.
- Maghsoudi, K.; Arvin, M.J.; Ashraf, M.** (2019). Mitigation of arsenic toxicity in wheat by the exogenously applied salicylic acid, 24-epi-brassinolide silicon. *J. Soil Sci. Plant Nut.* 20, 577–588.
- Mallick, S., Sinam, G., Mishra, R. K., & Sinha, S.** (2010). Interactive effects of Cr and Fe treatments on plants growth, nutrition and oxidative status in *Zea mays* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73(5), 987-995.
- Marschner, P.** (1995). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plant (Special Publications of the Society for General Microbiology)*. Second Edition. Academic Press.
- McCord, J. M., & Fridovich, I.** (1969). Superoxide dismutase: an enzymic function for erythrocyte cytochrome c (hemocyanin). *Journal of Biological Chemistry*, 244(22), 6049-6055.
- Miri, M., Akbari, E., Amrane, A., Jafari, S. J., Eslami, H., Hoseinzadeh, E., ... & Taghavi, M.** (2017). Health risk assessment of heavy metal intake due to fish consumption in the Sistan region, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189, 1-10.
- Mittler, R., & Zilinskas, B. A.** (1992). Molecular cloning and characterization of a gene encoding pea cytosolic ascorbate peroxidase. *Journal of Biological Chemistry*, 267(30), 21802-21807.
- Morris, M. L.**, 2002, Impacts of International Maize Breeding Research in Developing Countries, 1966-98, International maize and wheat improvement center (CIMMYT), Mexico, 54.
- Moustafa-Farag M., Elkelish A., Dafea M., Khan M., Arnao MB., Abdelhamid MT., El-Ezz AA., Almoneafy A., Mahmoud A., Awad M., Li L., Wang Y., Hasanuzzaman M., Ai S.** Role of Melatonin in Plant Tolerance to Soil Stressors: Salinity, pH and Heavy Metals. *Molecules*. 2020 Nov 17;25(22):5359. doi: 10.3390/molecules25225359. PMID: 33212772; PMCID: PMC7696660.
- Mubarakshina, M. M., Ivanov, B. N., Naydov, I. A., Hillier, W., Badger, M. R. Ve Krieger-Liszkay, A.,** (2010), Production and diffusion of chloroplastic H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and its implication to signalling, *Journal of Experimental Botany*, 61 (13), 3577-3587.
- Mullineaux, P. M., & Rausch, T.** (2005). Glutathione, photosynthesis and the redox regulation of stress-responsive gene expression. *Photosynthesis Research*, 86(3), 459-474.
- Namdjoyan, S., Soorki, A.A., Elyasi, N., Kazemi, N., Simaei, M.** (2020). Melatonin alleviates lead-induced oxidative damage in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) seedlings. *Ecotoxicology*. 29, 108–118.
- Nas, A., Karakaş, İ., & Tonk, F. A.** (2024). Verim ve Kalite Özellikleri Bakımından Danelik Hibrit Mısır Çeşitleri Arasındaki Farklılıkların İncelenmesi. *Acta Nat. Sci*, 5(2), 125-135.
- Neilson, S., Rajakaruna, N.** (2015). *Phytoremediation of Agricultural Soils: Using Plants to Clean Metal-Contaminated Arable Land*. In *Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants*; Springer: Cham, Switzerland, Volume 1, 159–168.
- Nisar, N., Li, L., Lu, S., Khin, N. C. & Pogson, B. J.** (2015). Carotenoid metabolism in plants. *Molecular Plant*, 8(1), 68-82.
- Noctor, G., Foyer, C.H.** (1998). Ascorbate and Glutathione: Keeping Active Oxygen Under Control, *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 49, 249-279.

- Okant, M.; Kaya, C.** (2019). The role of endogenous nitric oxide in melatonin-improved tolerance to lead toxicity in maize plants. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 26, 11864–11874.
- Onat, T., Emerk, K., Sözmen, E.Y. (Ed.),** (2002). İnsan Biyokimyası, Palme Yayıncılık, Ankara.
- Opeolu, B. O., Adenuga, O. O., Ndakidemi, P. A., & Olujimi, O. O.** (2010). Assessment of phyto-toxicity potential of lead on tomato (*Lycopersicon esculentum* L) planted on contaminated soils. *International Journal of Physical Sciences*, 5(2), 68-73.
- Otegui, M.E., F.H. Andrade and E.E., Suero.** (1995). Growth, Water Use, and Kernel Abortion of Maize Subjected to Drought at Silking. *Field Crops Research*, 40 (2): 87–94.
- Ouzounidou, G.** (1995). Cu-ions mediated changes in growth, chlorophyll and other ion contents in a Cu-tolerant *Koeleria splendens*. *Biologia Plantarum*, 37(1), 71-78.
- Öztürk M, Ashraf M, Aksoy A, Ahmad MSA (eds)** (2015b) Bitkiler, kirleticiler ve iyileştirme. Springer, New York.
- Penuelas, J., Filella, I., & Gamon, J.A.** (1995). Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance. *New Phytologist*, 131(3), 291-296.
- Rao RSS, Vardhini BV, Sujatha E, Anuradha S** (2002) Brassinosteroids-A new class of phytohormones. *Current Science*. 82(10): 1239-1245.
- Rausch, T., & Wachter, A.** (2005). Sulfur metabolism: a versatile platform for launching defence operations. *Trends in Plant Science*, 10(10), 503-509.
- Rellán-Álvarez, R., Ortega-Villasante, C., Alvarez-Fernandez, A., Campo, F. F. D., & Hernandez, L. E.** (2006). Stress responses of *Zea mays* to cadmium and mercury. *Plant and Soil*, 279, 41-50.
- Shahid, M., Shamshad, S., Rafiq, M., Khalid, S., Bibi, I., Niazi, N.K., Dumat, C., Rashid, M., I.,** (2017). Chromium speciation, bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system: A review. *Chemosphere* 178, 513–533. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.074>.
- Shanker AK., Djanaguiraman M., Pathmanabhan G., Sudhagar R., Avu dainayagam S.** (2003). Seçilen ağaç türleri tarafından krom alımı ve fitoakümülyasyonu. İçinde: Bhopal, Hindistan'da düzenlenen su ve çevre konulu uluslararası konferansın bildirileri.
- Shaw, B.P., Sahu, S.K., Mishra, R.K.,** (2004). Heavy metal induced oxidative damage in terrestrial plant , Heavy metal stres in plants, 2nd ed., Prasad, M.N.V., Springer, India, 84-126.
- Shi, H., & Chan, Z.** (2014). The cysteine<sup>2</sup>/histidine<sup>2</sup>- type transcription factor zinc finger of *Arabidopsis thaliana* 6- activated C- repeat- binding factor pathway is essential for melatonin- mediated freezing stress resistance in *Arabidopsis*. *Journal of Pineal Research*, 57(2), 185-191.
- Shi, H., Chen, K., Wei, Y., & He, C.** (2016). Fundamental issues of melatonin-mediated stress signaling in plants. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1124.
- Singh, H.P., Mahajan, P., Kaur, S., Batish, D.R., Kohli, R.K.,** (2013). Chromium toxicity and tolerance in plants. *Environ. Chem. Letters*. 11, 229–254. <https://doi.org/10.1007/s10311-013-0407-5>.
- Soares, C., de Sousa, A., Pinto, A., Azenha, M., Teixeira, J., Azevedo, R. A. et al.** (2016). Effect of 24-epibrassinolide on ROS, content, antioxidant system, lipid peroxidation and Ni uptake in *Solanum nigrum* L. Under Ni stress. *Environ. Exp. Bot.* 122, 115–125. doi:10.1016/j.envexpbot.2015.09.010
- Soliman, M., Elkelish, A., Souad, T., Alhaithloul, H., & Farooq, M.** (2020). Brassinosteroid seed priming with nitrogen supplementation improves salt tolerance in soybean. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 26, 501-511.

- Stone, L.R., Schlegel, A.J., R.E. Gwin, A.H. Khan.** (1996). Response of corn, grain sorghum, and sunflower to irrigation in the high plains of Kansas. *Agricultural Water Management*, 30: 251–259.
- Sudo, E., Itouga, M., Yoshida-Hatanaka, K., Ono, Y., and Sakakibara, H.** (2008). Gene expression and sensitivity in response to copper stress in rice leaves. *J. Exp. Bot.* 59, 3465–3474. doi:10.1093/jxb/ern196
- Sun, S., Liu, A., Li, Z., Guo, T., Chen, S., Ahammed, G.J.** (2023). Anthocyanin synthesis is critical for melatonin-induced chromium stress tolerance in tomato. *J. Hazardous Mat* 453, 131456. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131456>.
- Surgun-Acar, Y., ve Zemheri-Navruz, F.** (2021). "Exogenous Application of 24-Epibrassinolide Improves Manganese Tolerance in *Arabidopsis thaliana* L. via the Modulation of Antioxidant System". *Journal of Plant Growth Regulation*, 1–12.
- Tang, Y.; Sun, G.; Miao, M.; Li, Y.; Li, H.** Effects of exogenous melatonin on growth and physiological characteristics of Chinese cabbage seedlings under aluminum stress. *Adv. Eng. Res.* 2017, 143, 1119–1123.
- Tester, M., & Leigh, R. A.** (2001). Partitioning of nutrient transport processes in roots. *Journal of Experimental Botany*, 52(suppl\_1), 445-457.
- Tounekti, T., Vadel A.M., Oñate, M., Khemira H, Munné-Bosch, S.** (2011). Salt induced oxidative stress in rosemary plants: Damage or protection? *Environ. Exp. Bot.* 71: 298–305.
- Thomashow M.F.** (1999). Plant Cold Acclimation: *Freezing Tolerance Genes and Regulatory Mechanisms*, 50, 571-599.
- Van der Fels-Klerx, H. J., Lanteri, S.** (2020). Maize: Composition and Properties. In *Maize Chemistry and Technology*, 123-140.
- Vardar, Y.** (1972). Bitki fizyolojisi dersleri, (Ders Kitabı). *Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Kitaplar Serisi*, no:37.
- Verma, S., & Dubey, R.** (2003). Lead toxicity induces lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants. *Plant Science*, 164(4), 645-655.
- Vuolo, M. M., Lima, V. S., & Junior, M. R. M.** (2019). Phenolic compounds: Structure, classification, and antioxidant power. In *Bioactive compounds* 33-50. Woodhead Publishing.
- Wei, W., Li, Q. T., Chu, Y. N., Reiter, R. J., Yu, X. M., Zhu, D. H., ... & Chen, S. Y.** (2015). Melatonin enhances plant growth and abiotic stress tolerance in soybean plants. *Journal of Experimental Botany*, 66(3), 695-707.
- Xia, S., Song, Z., Jeyakumar, P., Shaheen, S.M., Rinklebe, J., Ok, Y.S., Bolan, N., Wang, H.,** (2019). A critical review on bioremediation technologies for Cr (VI)-contaminated soils and wastewater. *Critical Rev Environ. Sci. Technol.* 49, 1027–1078. <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1564526>.
- Xiang, C., Werner, B. L., Christensen, E. L. M., & Oliver, D. J.** (2001). The biological functions of glutathione revisited in *Arabidopsis* transgenic plants with altered glutathione levels. *Plant Physiology*, 126 (2), 564-574.
- Yadav SK** (2010) Bitkilerde ağır metal toksisitesi: bitkilerin ağır metal stres toleransında glutatyon ve fitoşelatinlerin rolüne genel bir bakış. *S. Afr. J. Bot.* 76(2):167-179.
- Yakuboğlu, G., Ardıç, Ş. K., Cuci, Y., & Korkmaz, A.** (2022). Mitigation of chilling stress effects on eggplant seedlings by exogenous application of melatonin. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 10(4), 562-568.
- Yang, H., Fang, R., Luo, L., Yang, W., Huang, Q., Yang, C., ... & Wang, J.** (2023). Potential roles of melatonin in mitigating the heavy metals toxicity in horticultural plants. *Scientia Horticulturae*, 321, 112269.

- Yazar, A., Howell, T.A., D.A. Dusek, K.S. Copeland** (1999). *Evaluation of Crop Water Stress Index for LEPA Irrigated Corn. Irrigation Science*, 18: 171–180.
- Yeni, E., Kabar, K., & Cesur Turgut, A.** (2016). *Alüminyum ve Kadmiyum Metallerinin Mısır ve Mercimek Tohumlarının Çimlenmesine Etkileri. Ziraat Fakültesi Dergisi*, 11(1), 132-140.
- Yıldız, M., Terzi, H., & Uruşak, B.** (2011). Bitkilerde krom toksisitesi ve hücrel cevaplar. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 27(2), 163-176.
- Zhang, N., Sun, Q., Li, H., Li, X., Cao, Y., Zhang, H., Li, S., Zhang, L., Qi, Y., Ren, S.** (2016). Melatonin improved anthocyanin accumulation by regulating gene expressions and resulted in high reactive oxygen species scavenging capacity in cabbage. *Front. Plant Sci.* 2016, 7, 197.
- Zeid I.M.** (2001). *Phaseolus vulgaris*'in krom ve kobalt tedavilerine tepkileri. *Biol Fabrikası* 44:111–115.
- Zeng, F., Wu, X., Qiu, B., Wu, F., Jiang, L., Zhang, G.** (2014). Physiological and proteomic alterations in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings under hexavalent chromium stress. *Planta*. 240, 291–308.

## ÖZGEÇMİŞ

**ZEYNEP GÜLŞAH ÇANAK**

### KİŞİSEL BİLGİLER

### EĞİTİM

**Lisans:** İnönü Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Biyoloji Bölümü 2005-2009

**Yüksek Lisans:** İnönü Üniversitesi Biyoloji Anabilim Dalı Botanik 2022-2025

