

**FESLEĞEN (*Ocimum basilicum* L.) BİTKİSİNDE SİSTEİNİN
ARSENİK VE KROM TOKSİSİTESİNE KARŞI FİZYOLOJİK VE
BİYOKİMYASAL ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

VESİLE YALÇIN

**DOKTORA TEZİ
BİYOLOJİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. HÜLYA TORUN**

DÜZCE, 2024

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**FESLEĞEN (*Ocimum basilicum* L.) BİTKİSİNDE SİSTEİNİN ARSENİK VE
KROM TOKSİSİTESİNE KARŞI FİZYOLOJİK VE BİYOKİMYASAL
ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Vesile YALÇIN tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Biyoloji Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Hülya TORUN

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Hülya TORUN

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Ernaz ALTUNDAĞ ÇAKIR

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Engin EROĞLU

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Dilek ÜNAL

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Doç. Dr. Nihal GÖREN SAĞLAM

İstanbul Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 07/06/2024

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

07 Haziran 2024

Vesile YALÇIN

Meleklerim Asel, Asya ve Aymina'ma

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Sayın Doç. Dr. Hülya TORUN'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen süreç boyunca göstermiş oldukları anlayış, sağladıkları kolaylıklar ve samimiyetlerinden dolayı tez izleme komitemde yer alan hocalarım Sayın Prof. Dr. Ernaz ALTUNDAĞ ÇAKIR ve Sayın Prof. Dr. Engin EROĞLU'na şükranlarımı sunarım.

Doktora eğitimim boyunca sağlamış oldukları burs olanaklarından dolayı TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı (BİDEB) 2211-Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı'na ve 100/2000 Doktora Burs Programı kapsamında Yükseköğretim Kurulu (YÖK)'na teşekkürü borç bilirim.

Tez çalışması kapsamında fenolik bileşen analizlerinde desteklerini esirgemeyen Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) Biyoloji Bölümü öğretim üyesi Sayın Dr. Öğr. Üyesi Nesrin ÇOLAK'a içtenlikle teşekkür ederim.

Araştırmanın iyon ve uçucu yağ bileşen analizlerini gerçekleştiren Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi (DÜBİT)'ne teşekkürlerimi sunarım.

Doğdukları günden itibaren hayatımı güzelleştiren, anlamlandıran, varlıklarına her gün binlerce kez şükrettiğim canım kızlarım Asel, Asya ve Aymina'ma bu süreçte ihtiyacım olan her zaman anlayış göstererek ders çalışmama olanak sağladıkları için tüm kalbimle teşekkür ederim. Hayatımın her aşamasında olduğu gibi doktora eğitim sürecimde de desteklerini her zaman hissettiğim değerli aileme ve yoldaşıma çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP-2023.11.01.1374 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

07 Haziran 2024

Vesile YALÇIN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
KISALTMALAR.....	xvii
SİMGELER	xix
ÖZET	xx
ABSTRACT	xxi
EXTENDED ABSTRACT	xxii
1. GİRİŞ	1
1.1. ABİYOTİK STRES	5
1.2. AĞIR METAL STRESİ	5
1.2.1. Ağır Metal(oid) Stresine Neden Olan Etmenler	7
1.2.2. Bitkilerde Ağır Metal(oid)lerin Alınımı ve Taşınımı	8
1.2.3. Bazı Ağır Metal(oid)lerin Bitkiler Üzerine Etkisi	9
1.2.3.1. Arsenik	9
1.2.3.2. Krom	11
1.3. AĞIR METALLERİN BİTKİLER ÜZERİNDEKİ İKİNCİL ETKİSİ: OKSİDATİF STRES	12
1.3.1. Reaktif Oksijen Türleri (ROS)	13
1.4. FİTOREMEDİASYON	15
1.5. HİPERAKÜMÜLATÖR BİTKİLER	16
1.6. AĞIR METALLERE KARŞI KORUMA MEKANİZMALARI.....	17
1.6.1. Kaçınma Mekanizması	17
1.6.2. Tolerans Mekanizması.....	18
1.6.2.1. Ağır Metal(oid) Bağlayıcı Ligandlar	18
1.6.3. Antioksidan Savunma Sistemi	20
1.6.3.1. Enzimatik Antioksidanlar	20
1.6.3.2. Enzimatik Olmayan Antioksidanlar	22
1.7. SİSTEİN.....	24
1.8. FESLEĞEN (<i>OCIMUM BASİLİCUM</i> L.).....	25
2. MATERYAL VE YÖNTEM	28
2.1. BİTKİ MATERYALİ VE YETİŞTİRME ORTAMI.....	28
2.2. ARSENİK, KROM VE SİSTEİN UYGULAMALARININ FESLEĞEN BİTKİSİNDE MORFOLOJİK VE FİZYOLOJİK PARAMETRELERE ETKİSİ	32
2.2.1. Büyüme Parametrelerinin Belirlenmesi.....	32
2.2.2. Bağlı Su İçeriğinin Belirlenmesi	32
2.2.3. Klorofil Floresansının Belirlenmesi.....	32
2.2.4. Fotosentetik Pigment İçeriğinin Belirlenmesi	32
2.2.5. Elektrolit Sızıntısı Miktarının Belirlenmesi.....	33
2.2.6. Fotosentez Etkinliğinin Belirlenmesi.....	33
2.2.7. Element İçeriğinin Belirlenmesi.....	33

2.2.8. Taşıma Faktörü	33
2.3. ARSENİK, KROM VE SİSTEİN UYGULAMALARININ FESLEĞEN BİTKİSİNDE BİYOKİMYASAL PARAMETRELERE ETKİSİ	34
2.3.1. Lipid Peroksidasyonu Miktarının Belirlenmesi	34
2.3.2. Hidrojen Peroksit İçeriğinin Belirlenmesi	34
2.3.3. Antioksidan Enzim Aktiviteleri	34
2.3.3.1. Enzim Ekstratlarının Hazırlanması ve Total Protein Miktarının Belirlenmesi.....	34
2.3.3.2. Katalaz (CAT) Aktivitesinin Belirlenmesi	35
2.3.3.3. Süperoksit Dismutaz (SOD) Aktivitesinin Belirlenmesi	35
2.3.3.4. Askorbat Peroksidaz (APX) Aktivitesinin Belirlenmesi.....	35
2.3.3.5. Glutasyon Redüktaz (GR) Aktivitesinin Belirlenmesi	35
2.3.3.6. Peroksidaz (POX) Aktivitesinin Belirlenmesi	36
2.3.4. Fenolik Asit İçeriğinin Belirlenmesi	36
2.3.5. Uçucu Yağ Bileşenlerinin Belirlenmesi	37
2.3.6. İstatistiksel Analizler	37
3. BULGULAR.....	39
3.1. ARSENİK, KROM VE SİSTEİN UYGULAMALARININ FESLEĞEN BİTKİSİNDE MORFOLOJİK VE FİZYOLOJİK PARAMETRELERE ETKİSİ	39
3.1.1. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Kök Uzunluğuna Etkisi.....	39
3.1.2. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Kök Yaş Ağırlığına Etkisi..	40
3.1.3. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Kök Kuru Ağırlığına Etkisi	41
3.1.4. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Gövde Uzunluğuna Etkisi..	42
3.1.5. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Gövde Yaş Ağırlığına Etkisi	43
3.1.6. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Gövde Kuru Ağırlığına Etkisi	44
3.1.7. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Yaprak Uzunluğuna Etkisi	45
3.1.8. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Yaprak Yaş Ağırlığına Etkisi	46
3.1.9. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Yaprak Kuru Ağırlığına Etkisi.....	47
3.1.10. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Yaprak Bağlı Su İçeriğine Etkisi.....	48
3.1.11. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Klorofil Floresansına Etkisi	49
3.1.12. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Fotosentetik Pigment İçeriğine Etkisi.....	50
3.1.13. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Elektrolit Sızıntısına Etkisi	55
3.1.14. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Transpirasyon Oranına Etkisi.....	56
3.1.15. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Net Fotosentez Oranına Etkisi.....	57
3.1.16. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Stoma İletkenliğine Etkisi	58
3.1.17. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Hücreler Arası Karbondioksit Konsantrasyonuna Etkisi	59
3.1.18. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Kökte Element İçeriğine Etkisi.....	60
3.1.19. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Gövdede Element İçeriğine	

Etkisi.....	61
3.1.20. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Yaprakta Element İçeriğine Etkisi.....	64
3.1.21. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Arsenik ve Krom Birikimine Etkisi.....	65
3.2. ARSENİK, KROM VE SİSTEİN UYGULAMALARININ FESLEĞEN BİTKİSİNDE BİYOKİMYASAL PARAMETRELERE ETKİSİ	68
3.2.1. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Lipid Peroksidasyonuna Etkisi.....	68
3.2.2. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Hidrojen Peroksit İçeriğine Etkisi.....	71
3.2.3. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Katalaz Aktivitesine Etkisi	74
3.2.4. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Süperoksit Dismutaz Aktivitesine Etkisi	77
3.2.5. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Askorbat Peroksidaz Aktivitesine Etkisi	80
3.2.6. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Glutatyon Redüktaz Aktivitesine Etkisi	83
3.2.7. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Peroksidaz Aktivitesine Etkisi.....	86
3.2.8. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Fenolik Asit İçeriğine Etkisi	89
3.2.9. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Uçucu Yağ Bileşenlerine Etkisi.....	103
4. TARTIŞMA.....	107
4.1. ARSENİK, KROM VE SİSTEİN UYGULAMALARININ FESLEĞEN BİTKİSİNDE MORFOLOJİK VE FİZYOLOJİK PARAMETRELERE ETKİSİ	107
4.1.1. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Kök Uzunluğuna Etkisi ...	107
4.1.2. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Kök Yaş Ağırlığına Etkisi	108
4.1.3. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Kök Kuru Ağırlığına Etkisi	108
4.1.4. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Gövde Uzunluğuna Etkisi	108
4.1.5. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Gövde Yaş Ağırlığına Etkisi	109
4.1.6. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Gövde Kuru Ağırlığına Etkisi	109
4.1.7. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Yaprak Uzunluğuna Etkisi	110
4.1.8. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Yaprak Yaş Ağırlığına Etkisi	110
4.1.9. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Yaprak Kuru Ağırlığına Etkisi.....	110
4.1.10. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Yaprak Bağlı Su İçeriğine Etkisi.....	111
4.1.11. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Klorofil Floresansına Etkisi	111
4.1.12. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Fotosentetik Pigment İçeriğine Etkisi.....	112

4.1.13. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Elektrolit Sızıntısına Etkisi	113
4.1.14. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Fotosentez Etkinliğine Etkisi.....	113
4.1.15. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Element İçeriğine Etkisi	115
4.1.16. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Arsenik ve Krom Birikimine Etkisi.....	117
4.2. ARSENİK, KROM VE SİSTEİN UYGULAMALARININ FESLEĞEN BİTKİSİNDE BİYOKİMYASAL PARAMETRELERE ETKİSİ	120
4.2.1. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Lipid Peroksidasyonuna Etkisi.....	120
4.2.2. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Hidrojen Peroksit İçeriğine Etkisi.....	121
4.2.3. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Antioksidan Enzim Aktivitelerine Etkisi	122
4.2.4. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Fenolik Asit İçeriğine Etkisi	126
4.2.5. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Uçucu Yağ Bileşenlerine Etkisi.....	127
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	129
6. KAYNAKLAR	133
ÖZGEÇMİŞ	168

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Bitkilerde ağır metal(oid)toksitesinin etkileri.....	7
Şekil 1.2. Moleküler oksijenin suya indirgenmesi ve serbest oksijen radikallerinin oluşumu	14
Şekil 1.3. Sistein biyosentez yolu	24
Şekil 2.1. Tohumların %5'lik sodyum hipoklorit ile sterilizasyonu.....	29
Şekil 2.2. İklim dolabında yetiştirilen bitkiler	30
Şekil 2.3. Foliar sistein uygulaması	30
Şekil 2.4. Arsenik, krom ve sistein uygulanan fesleğen bitkilerinin genel görünümü ...	31
Şekil 3.1. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kök uzunluğuna etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	40
Şekil 3.2. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kök yaş ağırlığına etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	41
Şekil 3.3. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kök kuru ağırlığına etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	42
Şekil 3.4. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövde uzunluğuna etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	43
Şekil 3.5. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövde yaş ağırlığına etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	44
Şekil 3.6. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövde kuru ağırlığına etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	45
Şekil 3.7. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprak uzunluğuna etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	46
Şekil 3.8. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprak yaş ağırlığına etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan	

çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	47
Şekil 3.9. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprak kuru ağırlığına etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	48
Şekil 3.10. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprak bağıl su içeriğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	49
Şekil 3.11. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının klorofil floresansına etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	50
Şekil 3.12. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının klorofil a içeriğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	51
Şekil 3.13. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının klorofil b içeriğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	52
Şekil 3.14. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının klorofil a+b içeriğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	53
Şekil 3.15. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının klorofil a/b oranına etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	53
Şekil 3.16. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının toplam karotenoid içeriğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	54
Şekil 3.17. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının elektrolit sızıntısına etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	55
Şekil 3.18. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının transpirasyon oranına etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan	

çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	56
Şekil 3.19. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının net fotosentez oranına etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	57
Şekil 3.20. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının stoma iletkenliğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	58
Şekil 3.21. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının hücreler arası karbondioksit konsantrasyonuna etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	59
Şekil 3.22. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kökte lipid peroksidasyonuna etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	69
Şekil 3.23. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövdede lipid peroksidasyonuna etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	70
Şekil 3.24. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprakta lipid peroksidasyonuna etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	71
Şekil 3.25. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kökte hidrojen peroksit içeriğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	72
Şekil 3.26. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövdede hidrojen peroksit içeriğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	73
Şekil 3.27. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprakta hidrojen peroksit içeriğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	74
Şekil 3.28. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kökte katalaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan	

çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	75
Şekil 3.29. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövdede katalaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	76
Şekil 3.30. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprakta katalaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	77
Şekil 3.31. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kökte süperoksit dismutaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	78
Şekil 3.32. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövdede süperoksit dismutaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	79
Şekil 3.33. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprakta süperoksit dismutaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	80
Şekil 3.34. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kökte askorbat peroksidaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	81
Şekil 3.35. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövdede askorbat peroksidaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	82
Şekil 3.36. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprakta askorbat peroksidaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	83
Şekil 3.37. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kökte glutatyon redüktaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	84
Şekil 3.38. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövdede glutatyon redüktaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait	

değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	85
Şekil 3.39. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprakta glutatyon redüktaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	86
Şekil 3.40. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kökte peroksidaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	87
Şekil 3.41. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövdede peroksidaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	88
Şekil 3.42. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprakta peroksidaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	89
Şekil 3.43. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kökte toplam fenolik asit (bireysel fenolik asit toplamı) içeriğine etkisi a) çözünebilir serbest, b) ester konjuge, c) glikozit konjuge ve d) hücre duvarına bağlı formlar. Σ HBA: Toplam Hidroksibenzoik Asitler, Σ HSA: Toplam Hidroksisinnamik Asitler, Σ FA: Toplam Fenolik Asitler. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	94
Şekil 3.44. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövdede toplam fenolik asit (bireysel fenolik asit toplamı) içeriğine etkisi a) çözünebilir serbest, b) ester konjuge, c) glikozit konjuge ve d) hücre duvarına bağlı formlar. Σ HBA: Toplam Hidroksibenzoik Asitler, Σ HSA: Toplam Hidroksisinnamik Asitler, Σ FA: Toplam Fenolik Asitler. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	98
Şekil 3.45. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprakta toplam fenolik asit (bireysel fenolik asit toplamı) içeriğine etkisi a) çözünebilir serbest, b) ester konjuge, c) glikozit konjuge ve d) hücre duvarına bağlı formlar. Σ HBA: Toplam Hidroksibenzoik Asitler, Σ HSA: Toplam Hidroksisinnamik Asitler, Σ FA: Toplam Fenolik Asitler. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	102

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 1.1. Stres faktörleri	5
Çizelge 1.2. ROS'un reaktivitesi, oluşumu ve süpürülmesi	13
Çizelge 2.1. Çalışmaya ilişkin uygulama grupları	31
Çizelge 3.1. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kökte Ca, K, Mg ve Fe içeriğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	61
Çizelge 3.2. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövde Ca, K, Mg ve Fe içeriğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	63
Çizelge 3.3. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprakta Ca, K, Mg ve Fe içeriğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	65
Çizelge 3.4. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kök, gövde ve yaprakta arsenik birikimine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	67
Çizelge 3.5. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kök, gövde ve yaprakta krom birikimine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	68
Çizelge 3.6. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kökte fenolik asit (serbest, ester, glikozit, hücre duvarı bağlı form) içeriğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	93
Çizelge 3.7. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövdede fenolik asit (serbest, ester, glikozit, hücre duvarı bağlı form) içeriğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	97
Çizelge 3.8. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprakta fenolik asit (serbest, ester, glikozit, hücre duvarı bağlı) içeriğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).	101
Çizelge 3.9. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kökte uçucu yağ bileşenlerine etkisi	105

Çizelge 3.10. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövdede uçucu yağ bileşenlerine etkisi.....	105
Çizelge 3.11. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprakta uçucu yağ bileşenlerine etkisi.....	106

KISALTMALAR

Anet	Net Fotosentez Oranı
ANOVA	Varyans Analizi
APX	Askorbat Peroksidaz
As	Arsenik
AsA	Askorbik Asit
BSA	Sığır Serum Albumin
Ca	Kalsiyum
CAT	Katalaz
Cd	Kadmiyum
Cr	Krom
Cu	Bakır
Cys	Sistein
DHA	Dehidroaskorbat
DHAR	Dehidroaskorbat Redüktaz
EDTA	Etilendiamintetraasetikasit
FA	Fenolik Asit
FAO	Gıda ve Tarım Örgütü
FC	Folin–Ciocalteu
Fe	Demir
FeA	Ferulik Asit
GA	Gentisik Asit
HCl	Hidroklorik Asit
GR	Glutasyon Redüktaz
GSGG	Yükseltgenmiş Glutasyon
GSH	İndirgenmiş Glutasyon
HCO	Hücreler arası CO ₂ 'nin ortamdaki CO ₂ 'ye oranı
H ₂ O ₂	Hidrojen Peroksit
ICP – MS	İndüktif Eşleştirilmiş Plazma - Kütle Spektrometresi
KA	Kuru Ağırlık
KaA	Kafeik Asit
MT	Metallotiyonin
Mn	Mangan
NADH	Nikotinamid Adenin Dinükleotit
NADPH	Nikotinamid Adenin Dinükleotit Fosfat
NBT	Nitro Blue Tetrazolium
P	Fosfor
PAL	Fenilalanin Amonyum Liyaz
Pb	Kurşun
PC	Fitoşelatin
<i>p</i> -HBA	Hidroksibenzoik Asit
PKA	Protokateşik Asit
<i>p</i> -KuA	Kumarik Asit
POX	Peroksidaz
PSI	Fotosistem I
PSII	Fotosistem II
ROS	Reaktif Oksijen Türleri
SI	Stoma İletkenliği
SOD	Süperoksit Dismutaz

SPSS	Statistical Package for Social Sciences
SrA	Siringik Asit
TBARS	Tiyobarbütirik Asit Reaktif Ürünleri
TCA	Trikloroasetikasit
UV	Ultraviyole
VaA	Vanilik Asit
YA	Yaş Ağırlık
WHO	Dünya Sağlık Örgütü
Zn	Çinko



SİMGELER

°C	Santigrat derece
%	Yüzde
cm	Santimetre
dk	Dakika
g	Gram
kg	Kilogram
L	Litre
m	Metre
mg	Miligram
mL	Mililitre
mm	Milimetre
mM	Milimolar
ppm	Milyonda bir birim
rpm	Dakikadaki devir sayısı
s	Saniye
μM	Mikromolar
μg	Mikrogram
μL	Mikrolitre

ÖZET

FESLEĞEN (*Ocimum basilicum* L.) BİTKİSİNDE SİSTEİNİN ARSENİK VE KROM TOKSİSİTESİNE KARŞI FİZYOLOJİK VE BİYOKİMYASAL ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Vesile YALÇIN

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Biyoloji Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Hülya TORUN

Haziran 2024, 167 sayfa

Doğal ve antropojenik kaynaklardan çevreye yayılan ağır metal(oid)ler gün geçtikçe artmakta ve çevre kirliliği tehlikeli boyutlara ulaşmaktadır. Toprağa, suya ve havaya yayılan bu metal(oid)ler bitki metabolizmasında toksik etki yapmakta ve besin zinciri yoluyla hayvan ve insan sağlığını olumsuz etkilemektedir. Bu çalışmada, dışarıdan sistein (Cys) uygulamasının arsenik (As) ve krom (Cr) toksisitesi altında yetiştirilen fesleğen (*Ocimum basilicum* L. cv. midnight) fidelerinde oluşan stresi hafifletici etkisi morfolojik, fizyolojik ve biyokimyasal düzeyde araştırılmıştır. Bu amaçla, hidroponik ortamda yetiştirilen fidelerde kök, gövde ve yaprak uzunluğu, yaş ve kuru ağırlık, bağıl su içeriği (RWC), klorofil floresansı, klorofil a, b ve toplam karotenoid miktarları, elektrolit sızıntısı, fotosentez etkinliği (transpirasyon oranı, stoma iletkenliği, net fotosentez oranı, hücreler arası karbondioksit konsantrasyonu), Ca, Mg, Fe, K, Cr ve As içeriği, lipid peroksidasyonu (TBARS), hidrojen peroksit (H₂O₂) içeriği, enzimatik olan (katalaz (CAT), süperoksit dismutaz (SOD), peroksidaz (POX), askorbat peroksidaz (APX), glutatyon redüktaz (GR)) ve olmayan (fenolik asit) antioksidan savunma sistemi bileşenleri belirlenmiştir. As ve Cr stresi ile dışsal Cys uygulamalarının bu parametrelere etkisi metal(oid) türüne, uygulama dozlarına ve farklı bitki organlarına göre değişkenlik göstermiştir. Buna göre dıştan Cys uygulaması As ve Cr toksisitesi altındaki fesleğen fidelerinin büyüme parametreleri, RWC, klorofil floresansı, klorofil a, b ve toplam karotenoid miktarları ve fotosentez etkinliğini artırırken, elektrolit sızıntısı, TBARS ve H₂O₂ içeriğini azaltmıştır. Diğer taraftan artan As ve Cr konsantrasyonlarına bağlı olarak fesleğen fidelerinde sırasıyla kök>gövde>yaprak dokularında akümülyasyon tespit edilmiş ve Cys'in özellikle kökte As ve Cr birikimini önemli miktarda azalttığı belirlenmiştir. As ve Cr toksisitesi antioksidan enzim içeriğini uygulama dozu ve enzim çeşidine göre farklı etkilerken Cys'in en yüksek etkisi POX aktivitesinde belirlenmiştir. Ayrıca bireysel fenolik asit içeriği artan As ve Cr konsantrasyonunda ve Cys ile birlikte uygulandığında genel olarak artış göstermiştir. Bununla birlikte As ve Cr maruziyeti uçucu bileşen çeşidinde ve miktarında değişkenliğe neden olurken yaprakta 1,8-cineole, gövdede tetradecane ve kökte nonadecane uçucu yağın ana bileşenleri olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre dıştan Cys uygulaması, As ve Cr toksisitesine karşı fesleğen fidelerinde stres etmeninin oluşturduğu etkiyi azaltmaktadır. Bununla birlikte, bu tez çalışması kapsamında, fesleğenin As ve Cr ile kirlenmiş topraklarda fitoremediasyon için potansiyel bir bitki olabileceği ortaya konulmuştur.

Anahtar Sözcükler: Antioksidan savunma, Arsenik, Krom, *Ocimum basilicum*, Sistein

ABSTRACT

INVESTIGATION OF PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL EFFECTS OF CYSTEINE ON ARSENIC AND CHROMIUM TOXICITY IN BASIL (*Ocimum basilicum* L.)

Vesile YALCIN

Düzce University

Graduate School, Department of Biology

Doctoral Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hulya TORUN

Jun 2024, 167 pages

Heavy metal(oid)s emitted to the environment from natural and anthropogenic sources are increasing day by day and environmental pollution is reaching dangerous dimensions. These metal(oid)s, which spread to soil, water and air, have a toxic effect on plant metabolism and adversely affect animal and human health through the food chain. In this study, the stress alleviating effect of exogenous cysteine (Cys) application on basil (*Ocimum basilicum* L. cv. midnight) seedlings grown under arsenic (As) and chromium (Cr) toxicity was investigated at morphological, physiological and biochemical levels. For this purpose, seedlings grown in hydroponic culture were determined root, shoot and leaf length, wet and dry weight, relative water content (RWC), chlorophyll fluorescence, chlorophyll a, b and total carotenoid content, electrolyte leakage, photosynthetic efficiency (transpiration rate, stomatal conductance, net photosynthesis rate, intercellular carbon dioxide concentration), Ca, Mg, Fe, K, Cr and As content, lipid peroxidation (TBARS), hydrogen peroxide (H₂O₂) content, enzymatic (catalase (CAT), superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POX), ascorbate peroxidase (APX), glutathione reductase (GR)) and non-enzymatic (phenolic acid) antioxidant defence system components were determined. The effects of As and Cr stress and exogenous Cys applications on these parameters varied according to metal(oid) type, application doses and different plant organs. Accordingly, exogenous Cys application increased growth parameters, RWC, chlorophyll fluorescence, chlorophyll a, b and total carotenoid contents, photosynthetic efficiency, and decreased electrolyte leakage, TBARS and H₂O₂ content of basil seedlings under As and Cr toxicity. On the other hand, depending on the increasing As and Cr concentrations, accumulation was detected in the root>stem>leaves, respectively, in basil seedlings and Cys significantly reduced As and Cr accumulation especially in the root. While As and Cr toxicity affected the antioxidant enzyme content differently according to the application dose and enzyme type, the highest effect of Cys was determined in POX activity. Furthermore, individual phenolic acid content generally increased with increasing As and Cr concentration and when co-applied with Cys. However, As and Cr exposure caused variability in the type and amount of volatile components, while 1,8-cineole in leaf, tetradecane in stem and nonadecane in root were determined as the main components of essential oil. According to these results, external application of Cys decreased the effect of As and Cr toxicity on basil seedlings. However, within the scope of this thesis study, it was revealed that basil could be a potential plant for phytoremediation in As and Cr contaminated soils.

Keywords: Antioxidant defence, Arsenic, Chromium, Cysteine, *Ocimum basilicum*

EXTENDED ABSTRACT

INVESTIGATION OF PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL EFFECTS OF CYSTEINE ON ARSENIC AND CHROMIUM TOXICITY IN BASIL (*Ocimum basilicum* L.)

Vesile YALCIN

Düzce University

Graduate School, Department of Biology

Doctoral Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hulya TORUN

Jun 2024, 167 pages

1. INTRODUCTION

Heavy metal(oid)s are emitted to the environment as a result of natural resources and various anthropogenic activities. Since these metals are permanent in nature, do not undergo biodegradation, and show toxic effects even at low concentrations, they cause disruption of ecological and biological balance. This situation negatively affects plant growth and development and poses a threat to human health through the food chain.

Stress is defined as any factor that affects or inhibits the growth and development of a plant. Stress factors are divided into two categories as biotic and abiotic factors. While biotic factors consist of bacteria, insects, nematodes and fungi, abiotic factors include factors such as heavy metals, drought, salinity, temperature, cold and radiation. Among these, heavy metal toxicity is among the most destructive abiotic stress factors. Heavy metal(oid) toxicity negatively affects many morphological, physiological and biochemical processes such as decreased growth and yield, damage to biomolecules such as DNA, lipids, proteins, photosynthetic activity, stomatal conductance and reduced transpiration. Plants use various defence mechanisms such as phytochelatins, metallothioneins, organic acids, heat shock proteins, phytohormones, vacuole detoxification, antioxidant defence system, secondary metabolite production to cope with these stress factors.

Arsenic (As) is a metalloid with toxic and carcinogenic effects. As is an important groundwater pollutant and adversely affects agricultural production and yield as a result of the use of groundwater as drinking and irrigation water. It is found in both organic and inorganic forms in nature and inorganic forms are more toxic. As, which is not an essential element for plants, is taken into the plant body through carriers responsible for the transport of essential mineral nutrients and negatively affects metabolic processes.

Chromium (Cr), like As, has toxic and carcinogenic effects and is the most polluting metal in groundwater after As. It is widely present in the environment in the form of chromate. Cr is not an essential element and therefore there is no special mechanism for its uptake and transport. It is taken into plant cells via phosphate and sulphate transporters and shows phytotoxic effect.

Cysteine (Cys) is the first product of sulfur assimilation and is the precursor of many molecules such as phytochelatin, methionine, glucosylates, metallothioneins. The thiol group in its structure are metal binding structures and thus show antioxidant properties.

Basil is a medicinal plant belonging to the Lamiaceae family, cultivated worldwide. Different parts of the plant such as leaves, flowers and shoots are rich in phenolics, terpenoids, saponins, tannins, flavonoids. Its high metabolite content is used in various industrial activities and shows protective effect against stress factors.

Remediation of heavy metal contaminated areas is of great importance for food safety, groundwater quality and agricultural production. Therefore, external application of antioxidant agents is the right approach to grow healthy plants in these areas. The role of Cys in mitigating metal toxicity has been proven, but there are limited studies in this field.

In this study, the effect of exogenous Cys application in alleviating the harmful effects of As and Cr stresses in basil plants will be examined by physiological, morphological and biochemical parameters.

2. MATERIAL AND METHODS

In this study, purple-leaved basil (*Ocimum basilicum* L. cv. midnight) seeds were sterilised with 5% sodium hypochlorite and sown in cardboard cups containing vermiculite. Germinated seeds were first watered with water containing Hoagland's solution, and only Hoagland's solution was given to the plants with true leaves. Plants reaching four true leaves were foliarly treated with Cys for half an hour every day for four days and then As and Cr were mixed into Hoagland's solution and given as irrigation water for ten days. In the study, there were ten treatment groups as control, 100 μ M As, 300 μ M As, 100 μ M Cr, 300 μ M Cr, Cys, Cys+100 μ M As, Cys+300 μ M As, Cys+100 μ M Cr, Cys+300 μ M Cr. At the end of the period, morphological measurements of the plants were carried out and harvested.

Within the scope of the study, shoot, root and leaf length, wet and dry weight, leaf

relative water content, chlorophyll fluorescence, chlorophyll a and b content, total carotenoid content, electrolyte leakage, photosynthesis efficiency (transpiration rate, stomatal conductance, net photosynthesis rate) were determined, Intercellular carbon dioxide concentration, Ca, Mg, Fe, K, Cr and As content in roots, stems and leaves, lipid peroxidation, hydrogen peroxide content, enzymatic (CAT, SOD, POX, APX, GR) and non-enzymatic (phenolic acid) antioxidant defence system components in leaves, roots and stems were determined. Control and all experimental groups treated with different concentrations of As and Cr and exogenous Cys were carried out in 3 replicates. Analysis of variance and Duncan's Multiple Comparison Test were used to determine whether there was a difference between the treatments using SPSS 22.0 package programme.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

According to the results of the study, in parallel with the increased concentrations of As and Cr, the decrease in the shoot, root, leaf length, age and dry weight of the basil was recorded and this reduction was improved by the application of external Cys. In general, the reducing effect of As and Cr toxicity on growth parameters at different concentrations has been improved by external Cys administration.

The stresses of As and Cr caused a deterioration of the water balance in basil leaves compared to the control group and reduced the water content of the leaves. Exogenous Cys administration showed a positive effect outside of the high concentration of As. When the effect of As and Cr on Fv/Fm was evaluated, it was noted that it decreased compared to control plants, while Cys had a significant effect only on low As concentration. It was determined that doses of As and Cr in different concentrations reduced the content of chlorophyll a, b and total carotenoids, and this negative effect was eliminated by exogenous Cys treatment. The increase in electrolyte leaking value in plants under stress was determined and the administration of exogenous Cys showed a partial healing effect.

Due to the negative effect of heavy metals on photosynthetic apparatus, the functioning of stomata, photosynthesis and transpiration rates are also affected. According to the findings from our study, photosynthetic activities (net photosynthesis rate, transpiration rate, stoma conductivity) were significantly reduced in increasing concentrations adversely affected by As and Cr levels, and more in these As concentrations. Exogenous Cys administration resulted in an increase in all administration groups except for the high

concentration of As. The intercellular concentration of CO₂ was found to be related to non-stomatous factors as a result of the parallel increase in As and Cr toxicity. Cys treatment caused a slight decrease in the concentration of intercellular CO₂ except for the high concentration of As.

The plant nutrients that plants need to grow and develop interact with toxic metals, limiting the nutrient uptake of plants. In our study, it was found that compared to control plants, the content of Ca, Mg, Fe and K in general increased in stressful plants. In all three vegetative organs, the nutritional elements have already been determined as K>Ca>Mg>Fe, respectively. The effect of Cys on these elements was generally negative compared to the groups applied As and Cr alone. On the other hand, when looking at the accumulation of As and Cr, it was determined that both toxic elements were accumulated in high concentrations in the roots, and that the accumulation was in the root>stem>leaf, respectively. The effect of Cys on As and Cr accumulation has been shown to prevent a high degree of buildup in the roots. TF value was calculated to determine the phytoremediation capacity of basil applications of 100-300 µM As and Cys+300 µM As, TF is <1 and basil is a suitable species for As stabilization. Cys+100 µM As dose is TF>1 and the plant was able to carry the metalloid from the root to the above-ground parts. 100-300 µM Cr dose is TF<1 and basil can be used as a phytostabilizer in Cr-contaminated areas. Cys+100-300 Cr dose is TF>1 and Cys transported Cr metal to the above-ground parts.

Lipid peroxidation was generally increased in all stress treatments and decreased with Cys treatment. However, while the H₂O₂ content increased in all groups where As and Cr were applied, it also generally increased with exogenous Cys application. Plants can protect themselves against oxidative stress with antioxidant enzymes. In our study, As and Cr exposure affected antioxidant enzymes differently depending on the application dose and enzyme type, and Cys was most effective in POX activity.

In our study, it was determined that individual FA content caused an increase in As and Cr applications alone and toxic metal application together with Cys. However, As and Cr exposure caused variability in the type and amount of volatile components, while 1,8-cineole in leaf, tetradecane in stem and nonadecane in root were determined as the main components of essential oil.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

Within the scope of this thesis study demonstrate that the external application of Cys to basil plants resulted in successful outcomes in terms of growth, development, secondary metabolite production and the impact on the antioxidant defence system against As and Cr toxicity. The observation that basil has the capacity to concentrate arsenic and chromium accumulation in the root zone suggests that it may be a suitable species for the purpose of phytostabilisation. These results also show that basil is moderately tolerant to As and Cr stress and external Cys application increases this tolerance and basil can be used effectively in phytoremediation.

The findings of this study indicate that basil is a suitable candidate for cultivation in edible gardens in areas experiencing stress due to heavy metal contamination, particularly in the presence of arsenic and chromium.

Cys has metal(oid) selectivity due to its different effects on As and Cr, and its usability in contaminated areas can be investigated by determining its effects on different heavy metal(oids).

Studies can be carried out on the effectiveness of Cys as an antioxidant molecule in regulating stress tolerance in different stress factors such as salinity, drought, high temperature and radiation.

The transcriptome and proteome changes associated with arsenic (As) and chromium (Cr) tolerance in basil plants can be examined, thereby facilitating research on the molecular mechanisms involved in the tolerance of medicinal and aromatic plants.

In this study, As and Cr toxicity and the role of Cys on this toxicity were determined in terms of enzymatic and non-enzymatic antioxidant system activity. In future studies, the effect of heavy metal(oid) stress and Cys applications on phytohormones and the relationship between phytohormone and antioxidant system can be determined.

1. GİRİŞ

Ağır metaller doğal olarak oluşan elementlerdir ve jeojenik ve antropojenik faaliyetler sonucu çevreye yayılan dünyadaki toksik kirleticilerin ana bileşenlerinden birini oluşturmaktadır (Liu vd., 2018; Mansoor vd., 2021; Sperdouli, 2022). Ağır metaller ekosistemlere ağırlıklı olarak pestisitler, fosil yakıt tüketimi, sentetik gübreler, endüstriyel faaliyetler, petrokimyasalların dökülmesi gibi çeşitli antropojenik faaliyetler (Liu vd., 2018; Haider vd., 2021; Paithankar vd., 2021) ve volkanik patlamalar, minerallerin ayrışması, deniz tuzu serpintisi, orman yangınları gibi jeojenik kaynaklar sonucu yayılmaktadır (Masindi & Muedi, 2018). Ağır metallerin doğada kalıcı olması, biyodegradasyona uğramaması, düşük konsantrasyonlarda bile toksik etki göstermesi, su ve toprakta biyobirikimi ekolojik ve biyolojik dengenin bozulmasına yol açmaktadır (Edelstein & Ben-Hur, 2018; Suman vd., 2018; Anjitha vd., 2021; Mansoor vd., 2021). Bunun sonucunda ürün verimliliği, gıda güvenliği, insan sağlığı tehlikeye girmekte ve küresel bir endişe kaynağı oluşturmaktadır (Gupta vd., 2018; Osmolovskaya vd., 2018).

Yer kabuğunda bulunan yaklaşık 90 elementin yaklaşık %60'ı kadarı ağır metalleri oluşturmaktadır (Sharma & Dietz, 2006). Ağır metaller, nispeten yüksek yoğunluğa ($>5 \text{ g cm}^{-3}$), atom ağırlığına ve atom numarasına sahip metal ve metaloidler olarak tanımlanmaktadır (Nowicka, 2022; Malik & Kaur Sandhu, 2023). Bu metaller redoks kapasitesine göre redoks inaktif (hücrel antioksidan havuzunun aktivitesini azaltan ve metabolik dengeyi bozan) ve redoks aktif metaller (Fe ve Cu gibi Haber-Weiss ve Fenton benzeri reaksiyonlara doğrudan dahil olan) olarak sınıflandırılmaktadır (Viehweger, 2014). Ayrıca ağır metaller Cu, Fe, Zn, Ni, Mn, Co gibi hem esansiyel mikro besin elementlerini, hem de As, Cr, Cd, Pb ve Hg gibi esansiyel olmayan elementleri içermektedir (Vaculík vd., 2020; Malik vd., 2022b). Esansiyel mikro besin elementleri düşük konsantrasyonlarda bitki için gerekli iken diğerleri bitkiler için gerekli değildir ve bilinen önemli bir fizyolojik işlevi yoktur (Thakur vd., 2022).

Bitki büyümesi ve metabolizması ağır metal kontaminasyonundan ciddi şekilde etkilenmektedir (Ahmad vd., 2023). Ağır metallere karşı toksisitenin gözle görülür belirtileri arasında nekroz, kloroz, solgunluk, yaşlanma, bodur büyüme, düşük biyokütle üretimi, tohum üretiminde azalma ve nihayetinde ölüm yer almaktadır (Kumar vd.,

2019a). Bunun yanı sıra kökler ağır metallere karşılaştıkları ilk organdır ve ağır metal maruziyeti kök hücrelerinin büyümesini ve bölünmesini engelleyerek su ve besin maddelerinin emilimini azaltmakta ve büyümeyi olumsuz etkilemektedir (Dutta vd., 2018; Ghori vd., 2019). Bununla birlikte ağır metal stresi önemli enzimlerin, proteinlerin denatürasyonuna neden olmakta ve biyomoleküllerden temel metal iyonlarının yer değiştirme reaksiyonlarını engellemektedir (Ghori vd., 2019). Bu durum membran bütünlüğü, solunum, fotosentez ve homeostazinin bozulmasına neden olmaktadır (Hossain vd., 2012). Ayrıca hücrel redoks sistemini bozarak ve hücre içi reaktif oksijen türleri (ROS) üreterek oksidatif strese neden olmaktadır (Khalid vd., 2020). ROS kaynaklı oksidatif strese karşı bitkiler çeşitli enzimatik (katalaz (CAT), süperoksit dismutaz (SOD), askorbat peroksidaz (APX), glutatyon redüktaz (GR), glutatyon peroksidaz (GPX)) ve enzimatik olmayan (glutatyon (GSH), tokoferol, fenolik asitler, karotenoidler, askorbik asit (AsA), protein olmayan aminoasitler) bileşenlerden oluşan gelişmiş antioksidan savunma sistemi geliştirmiştir (Hasanuzzaman vd., 2020; Zulfiqar & Ashraf, 2021; Nahar vd., 2022). Bununla birlikte bitkilerin toksik metal stresi ile başa çıkmak için daha farklı mekanizmalara da sahip olduğu bilinmektedir. Bunlar arasında organik asitler, GSH, fitoşelatin (PC), metalotiyonin (MT), ısı şoku proteinleri ve fitohormonların üretimi yer almaktadır (Thakur vd., 2022).

Arsenik (As), toksik ve kanserojenik etki gösteren hem çevre hem de sağlık açısından endişe yaratan bir yarı metal (metaloit) dir (Abbas vd., 2018; Rehman vd., 2021). Ayrıca tarım, hayvan yemi, tıp, elektronik, metalurji, kimyasal savaş ajanları vb. alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Shaji vd., 2021). Önemli bir yeraltı suyu kirleticisi olan As, yer altı sularının içme ve sulama suyu olarak kullanılması sonucu sürdürülebilir tarımsal üretim, insan sağlığı ve geçim kaynakları için ciddi tehditler oluşturmaktadır (Brammer & Ravenscroft, 2009; Abedi & Mojiri, 2020). As, doğada dimetilarsinik asit ve monometilarsinik asit gibi organik formlarda ve arsenit [As(III)] ve arsenat [As(V)] olarak inorganik formlarda bulunmaktadır (Bali & Sidhu, 2021). İnorganik formlar doğal ortamda yaygındır ve organik formlardan daha toksiktir (Abbas vd., 2018; Bali & Sidhu, 2021). As bitki metabolizması için gerekli olmayan bir element olmasına rağmen temel mineral besinlerin taşınmasından sorumlu taşıyıcılar yoluyla alınmaktadır (Zulfiqar & Ashraf, 2022). As(V) fosfat taşıyıcıları tarafından alınırken, As(III) aquaporinler yoluyla alınmaktadır (Clemens & Ma, 2016). As stresine maruz

kalan bitkilerde kök çoğalması ve uzamasının engellenmesi, yapraklarda solma, kıvrılma ve nekroz, fotosentez, solunum, transpirasyon süreçlerinde bozulma, bitki büyümesi ve veriminde azalma, reaktif oksijen türlerinin aşırı oluşumu gibi pek çok olumsuz etki görülmektedir (Finnegan & Chen, 2012; Nahar vd., 2022).

Krom (Cr) toksik ve kanserojenik bir elementtir ve toprak, sedimen ve yer altı sularında As'ten sonra en önemli ikinci metal kirleticidir (Kar vd., 2008; Ogundiran & Afolabi, 2008; Ferreira vd., 2019; Rahman & Singh, 2019; Mushtaq vd., 2022; Ali vd., 2023). Krom yeryüzünde Cr (III) ve Cr (VI) olmak üzere iki formda bulunmakta ve Cr (VI), Cr (III)'e kıyasla daha zararlıdır (Qin & Wang, 2017; Kapoor vd., 2022). Cr (VI) hareketli ve sudaki çözünürlüğü yüksek olup genellikle kromat (CrO_4^{2-}) ve dikromat ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) formunda bulunmaktadır (Bhunja vd., 2022; Nowicka, 2022). Cr (III) ise az hareketli ve çevrede kromit (FeOCr_2O_3 , ferrokrom) formundadır (Cervantes vd., 2001; Ertani vd., 2017). Cr'nin toprak-bitki transferi ve farklı bitki kısımlarındaki birikimi, kimyasal formuna, bitki türüne ve toprağın fiziko-kimyasal özelliklerine göre değişiklik göstermektedir (Shahid vd., 2017b). Cr bitki metabolizmasında hayati bir rol oynamadığı için alınımı ve taşınımı için özel bir mekanizma bulunmamaktadır (Ali vd., 2023). Bitki hücrelerine fosfat ve sülfat taşıyıcıları aracılığıyla alınmaktadır (Sharma vd., 2020). Cr toksisitesi kök ve gövde büyümesi, biyokütle, hücre döngüsü, enzim aktivitesi, su ve mineral dengesi, çimlenme, fotosentezin engellenmesi gibi bir takım metabolik süreçleri olumsuz etkilemektedir (Ugwu & Agunwamba, 2020; Prasad vd., 2021; Ali vd., 2023).

Ağır metallerle kontamine olmuş alanların iyileştirilmesinde sürdürülebilir ve çevreyle uyumlu metotların geliştirilmesi gıda güvenliği, yeraltı suyu kalitesi ve verimli toprakların korunmasında büyük önem taşımaktadır (Singh vd., 2021b). Kirlenmiş toprakların remediasyonuna yönelik geleneksel teknikler maliyetli, çevreye zarar verici ve zaman alıcıdır (Khalid vd., 2017). Bu nedenle metallerle kirli alanların temizlenmesinde bitkilerin kullanımı olarak bilinen fitoremediasyon in-situ kabiliyete sahip olması, toprak yapısını koruması ve ikincil kirlilik yaratmaması nedeniyle umut verici bir yaklaşımdır (Kumar Yadav vd., 2018).

Sistein (Cys) yan zincirinde tiyol (-SH) grubu bulunan yirmi biyojenik aminoasitten biridir (Genisel vd., 2015). Kükürt asimilasyonunun ilk ürünüdür ve fitoşelatinler, metiyonin, glukonizatlar, vitaminler, kofaktörler, metalotiyoninler gibi birçok önemli biyomolekül için fonksiyonel bir öncüdür (Perveen vd., 2019; Terzi & Yıldız, 2021).

Cys tiyolleri yüksek affiniteli metal bağlayıcı/redoks düzenleyici yapılar olarak da hareket etmektedir (Poole, 2015; Ulrich & Jakob, 2019). Redoks reaksiyonlarına girme kabiliyetinden dolayı güçlü bir antioksidandır ve bitki hücrelerindeki serbest radikalleri etkisiz hale getirerek oksitadif hasardan korumaktadır (Oshimura & Sakamoto, 2017). Bazı ağır metallerin neden olduğu fitotoksitenin giderilmesinde Cys'in önemli bir rol oynadığı bildirilmiştir (Yuan vd., 2015; Jia vd., 2016; Aysin vd., 2020; Terzi & Yıldız, 2021; Kim vd., 2022). Bununla birlikte As ve Cr stresinin Cys aracılığı ile hafifletilmesinde sınırlı sayıda araştırma bulunmaktadır.

Tıbbi ve aromatik özellikler açısından önemli bir şifalı bitki türü olan fesleğen (*Ocimum basilicum* L.) tek yıllık, otsu, Lamiaceae familyasına ait bir bitkidir (Bensaid vd., 2022). Asya, Afrika ve Amerika'nın subtropikal ve tropikal iklimlerine özgü dünya çapında kültürü yapılan bir bitkidir (Romano vd., 2022; da Silva vd., 2023). Türkiye florasında doğal olarak yayılış göstermemekte olup *O. basilicum* L. ve *O. minimum* L. türlerinin yetiştiriciliği yapılmaktadır (Baydar, 2022). Bitkinin yaprak, çiçek ve gövde kısımları fenolikler, terpenoidler, saponinler, tanenler, flavonoidler ve alkaloidler gibi metabolitler açısından zengindir (Kumar vd., 2017; Açıkgöz, 2020; Bensaid vd., 2022; Jakovljević vd., 2022). Zengin metabolit içeriği tıp, farmakoloji, kozmetik ve gıda endüstrisinde kullanılmakta (Bilal vd., 2012; Bravo vd., 2021) ve çevresel stres faktörlerine karşı koruyucu bir rol üstlenmektedir (Yadav vd., 2021). Bu nedenle fesleğen gerek farklı stres türlerine verdiği hızlı yanıtlar gerekse bir dizi biyotik ve abiyotik stres faktörüne şaşırtıcı uyumları nedeniyle stres çalışmalarında sıkça tercih edilmektedir.

Bu tez çalışması önemli tıbbi ve aromatik bir bitki türü olan mor yapraklı fesleğene (*Ocimum basilicum* L. cv. midnight) dıştan uygulanan Cys'in As ve Cr stresleri ile antioksidan sistem üzerine etkisinin morfolojik, fizyolojik ve biyokimyasal düzeyde araştırılması amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda As ve Cr toksik metallerinin fesleğen bitkisinin fizyolojik ve biyokimyasal süreçlerindeki olumsuz etkisinin Cys ile iyileştirilmesi, çeşitli büyüme parametreleri, fitoremediasyonda kullanılma potansiyeli, enzimatik (CAT, SOD, POX, APX, GR) ve enzimatik olmayan antioksidan bileşenler düzeyinde değerlendirilmiştir.

1.1. ABİYOTİK STRES

Bitkiler sürekli değişen çevre koşulları nedeniyle yaşam döngüleri boyunca bir ya da daha fazla biyotik ve abiyotik stres faktörleriyle karşı karşıya kalmaktadır (Torun, 2019; Rhaman vd., 2021). Bitkilerin hareketsiz doğası nedeniyle bu tür streslerden aktif olarak kaçmaları mümkün değildir ve ilgili çevresel faktörlerin optimal aralıktan sapması bitkilerde strese neden olmaktadır (Dong vd., 2022). Stres terimi bir bitkinin mevcut metabolik homeostazını değiştiren herhangi bir faktör olarak tanımlanmaktadır (Anzano vd., 2022). Stres faktörleri abiyotik ve biyotik stres olmak üzere iki ana kategoride sınıflandırılmaktadır (Çizelge 1.1). Biyotik stresler bakteri, böcek, nematod, mantar, yabancı ot ve virüs gibi canlı organizmalardan, abiyotik stresler ise kuraklık, tuzluluk, ağır metal, su baskını, yüksek ve düşük sıcaklık, yetersiz oksijen, radyasyon, kimyasal kirleticiler gibi cansız faktörlerden kaynaklanmaktadır (Gull vd., 2019; Mareri vd., 2019). Bu faktörlerin etkisi bitkilerin türüne, yetiştirme şartlarına, stresin çeşidine, şiddetine, maruz kalma süresine göre değişiklik göstermektedir (Jaishankar vd., 2014). Bu durum bitkilerin büyümesi ve gelişmesi ile doğrudan ilişkili olan morfolojik, fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler süreçleri olumsuz etkilemektedir (Mishra vd., 2021; Mareri vd., 2022) .

Çizelge 1.1. Stres faktörleri (Gull vd., 2019)

Biyotik Stres Faktörleri	Abiyotik Stres Faktörleri
Bakteriler	Ağır metaller
Virüsler	Tuzluluk
Böcekler	Kuraklık
Nematodlar	Su baskını
Mantarlar	Yüksek ve düşük sıcaklık
Yabancı otlar	Radyasyon
Herbivorlar	Kimyasal kirleticiler

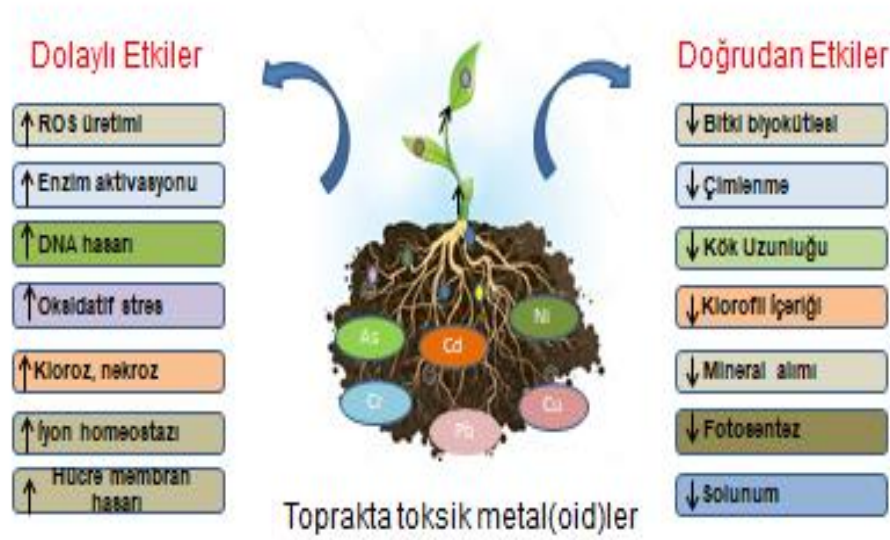
1.2. AĞIR METAL STRESİ

Ağır metal stresi, dünya çapında çeşitli karasal ekosistemlerde önemli bir endişe kaynağı haline gelmiştir (Tiwari & Lata, 2018). Ağır metaller doğal oluşan elementlerdir ve kontrolsüz sanayileşme, madencilik ve modern tarım uygulamaları gibi çeşitli insan kaynaklı faaliyetler çevrede uzun vadeli zararlı etkilere sahiptir (Shahid vd., 2017a). Tüm bu faktörler toprak, su ve havadaki ağır metal konsantrasyonunun

artmasına neden olmaktadır (Tiwari & Lata, 2018). Bu durum çeşitli çevresel sorunlarına neden olmakta ve bitkilerin yanı sıra hayvanlar ile insanlar üzerinde de toksik etki yaratmaktadır (Mitra vd., 2022). Ağır metallere maruz kalan bitkilerde ağır metal stresi oluşmaktadır ve bitkilerin büyümesi, gelişmesi, verimliliği bu durumdan olumsuz etkilenmektedir.

Ağır metal iyonlarının bitkiler üzerinde oluşturduğu toksisite esasen dört ana mekanizmadan oluşmaktadır. Bunlar: (1) proteinlerin tiyol, histidil ve karboksil grupları ve GSH gibi düşük moleküllü bileşiklerle reaksiyona girerek aktivite kaybına, yapının bozulmasına ve düzenleme ve sinyal yollarında değişikliklere neden olma, (2) temel metal katyonlarının yer değiştirmesi, özellikle çeşitli enzimlerin aktif bölgelerinde bulunan ve bu proteinlerin aktivite kaybına yol açması, (3) başta fosfat olmak üzere biyokimyasal fonksiyonel gruplara benzerlik gösterme, (4) otooksidasyon ve Haber-Weiss döngüsü yoluyla reaktif oksijen türlerinin (ROS) oluşumunu tetikleme şeklindedir (Sharma & Dietz, 2009; DalCorso, 2012).

Ağır metallerin bitkiler üzerindeki etkisi ağır metal çeşidine, bitki türüne, yetiştirme ortamına ve uygulama dozlarına göre farklılık göstermektedir. Ağır metal toksisitesi ile karşı karşıya kalan bitkilerde bodur büyüme, kloroz, kök esmerleşmesi, kök büyümesinde azalma gibi belirtiler görülmektedir (Öztürk vd., 2015). Yanı sıra ağır metallerin toksik seviyeleri DNA, protein, lipid, karbohidratlar gibi biyomoleküllerde anormallikler, stoma iletkenliğinde azalma, oksidatif stresin indüklenmesi, transpirasyon ve fotosentetik oranda azalma gibi pek çok fitotoksik hasara da neden olmaktadır (Singh vd., 2019; Giannakoula vd., 2021; Mondal vd., 2022; Guo vd., 2023). (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Bitkilerde ağır metal(oid)toksitesinin etkileri (Shahid vd., 2015'ten değiştirilerek)

1.2.1. Ağır Metal(oid) Stresine Neden Olan Etmenler

Ağır metal ve metaloidler mikrobiyal veya kimyasal bozunmaya uğramaz ve bu nedenle doğada uzun süre kalarak hem sucul hem karasal ekosistemler için önemli bir tehdit oluşturmaktadır (Bolan vd., 2014; Slaveykova & Cheloni, 2018). Çevredeki ağır metal kaynakları doğal ve antropojenik faaliyetlerden kaynaklanabilir. Başlıca antropojenik kaynaklar tarım, sanayi, madencilik, ulaşım, yakıt tüketimi, artık organik madde ve kanalizasyon suyudur (Gill, 2014; Edelstein & Ben-Hur, 2018). Ağır metallerin doğal kaynakları ise volkanik patlamalar, deniz tuzu serpintileri, orman yangınları, kaya ayrışması, biyojenik kaynaklar ve rüzgarla taşınan toprak partikülleridir (Masindi & Muedi, 2018).

Kirlenmiş topraklarda yaygın olarak Zn, Pb, Cr, As, Cd, Cu, Hg ve Ni bulunmaktadır (Wuana & Okieimen, 2011). Ağır metaller toprakta kompleks yapılar oluşturarak toprak mikroorganizmaları ve faunasının aktivitesini olumsuz etkilemektedir. Bu durum nitrifikasyon, enzim aktivitesi ve organik maddelerin mineralizasyonu üzerinde negatif etki yaparak toprağın verimsizleşmesine bitki gelişim ve veriminin düşmesine neden olmaktadır (Yerli vd., 2020).

Ağır metallerin biyoyararlanımı ve bitki tarafından alım kapasitesi aynı zamanda toprak çözeltisindeki besin maddelerinin konsantrasyonuna da bağlıdır. Toprağa uygulanan gübreler toprağın katyon değişim kapasitesine ve organik madde içeriğini etkileyerek

ağır metal toksisitesine neden olabilmektedir. Bunun yanında asit yağmurları sonucu toprak pH'ı düşmekte ve ağır metal iyonlarının hareketliliği artmaktadır. Toprağın iyon tutma kapasitesi azaldığı için topraktaki temel besin elementlerinin azalmasına ve bitkiler tarafından ağır metal alınımının artmasına neden olmaktadır (Seven vd., 2018).

Küresel su kıtlığı ile birlikte, çeşitli ürünlerin sulanması için atık suyun yeniden kullanılmasına büyük önem verilmektedir (Hajihashemi vd., 2020). Endüstriyel atık suların ve yer altı sularının sulamada uzun süreli kullanımı tarımsal topraklarda ve bitkilerde ağır metal birikimine yol açmakta ve bitki büyümesini engellemektedir (Hajjami vd., 2013). Örneğin, geri kazanılmış atık su ile sulanan *Lantana camara* bitkisinde yapraklarda bor, sodyum ve klorürün aşırı alınımına yol açmış ve bu da yaprak dökümü, yaprak yanığı, kloroz ve fotosentetik aparatta hasarla ilişkilendirilerek hem büyümeyi hem de estetik değerin azaldığı belirlenmiştir (Bañón vd., 2011).

1.2.2. Bitkilerde Ağır Metal(oid)lerin Alınımı ve Taşınımı

Bitkiler ağır metalleri ağırlıklı olarak kökler ve daha az oranda da yapraklar yoluyla almaktadır (Edelstein & Ben-Hur, 2018). Bitkiler tarafından topraktan toksik metal(oid) alımı iklim koşulları, toprak nemi, pH, organik madde, redoks potansiyeli, katyon değişim kapasitesi, metal antagonizması ve sinerjisine bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Gajić vd., 2018; Dinu vd., 2020). Ağır metaller toprakta çoğunlukla çözünmez halde bulunur ve bitkiler için biyolojik olarak kullanılabilir değildir (Yan vd., 2020). Bitkiler, rizosfer pH'ını değiştirebilen ve ağır metal çözünürlüğünü artırabilen çeşitli kök eksüdatları salgılayarak metal(oid) biyoyararlanımlarını artırabilmektedir (Dalvi & Bhalerao, 2013).

Biyolojik olarak kullanılabilir metal kök yüzeyinde emilir ve hücre zarı boyunca kök hücrelerine doğru hareket etmektedir (Yan vd., 2020). Metal(oid) iyonlarının köklere alınımı apoplastik (pasif difüzyon) ve simplastik yol (aktif taşıma) olmak üzere iki temel yol ile gerçekleşmektedir (Peer vd., 2005). Apoplastik yol yalnızca katyonik olmayan metal şelatları olarak mümkündür, çünkü hücre çeperleri katyonlar için nispeten yüksek bir değişim kapasitesine sahiptir (Raskin vd., 1997). Ayrıca, hücre çeperindeki süberin tabakaları da metallerin kök apoplastından kök ksilemine taşınmasını azaltmaktadır (Lasat, 2002).

Metal iyonlarının çoğu çözünmez olduğundan ve vasküler sistemde kendi başlarına hareket edemedikleri için kök hücrelerine giren ağır metal çeşitli şelatörlerle

kompleksler oluşturmaktadır (Yan vd., 2020). Karbonat, sülfat veya fosfat çökeltileri olarak oluşan bu kompleksler apoplastik ve simplastik kompartmanlarda immobilize olmaktadır (Raskin vd., 1997). Vakuollerin içinde tutulan metal iyonları stele taşınarak kök simplazması yoluyla ksileme aktarılmakta ve daha sonra ksilem yoluyla gövdeye aktarılmaktadır (Thakur vd., 2016). Gövde ya da yaprak dokularına giren metaller, türe ve metalin formuna bağlı olarak çeşitli hücre tiplerinde depolanabilmekte ya da kompleksleşme yoluyla daha az toksik formlara dönüştürülebilmektedir. Ayrıca bitki hücrelerindeki metal iyonları çeşitli hücre altı bölmelerde (hücre çeperi, sitozol, vakuol) tutularak sitozolde serbest metal iyonlarının birikmesi önlenmektedir (Peer vd., 2005).

1.2.3. Bazı Ağır Metal(oid)lerin Bitkiler Üzerine Etkisi

1.2.3.1. Arsenik

Arsenik toksisitesinin pek çok bitki türünün büyümesi, gelişmesi ve verimliliğini etkileyerek morfolojik, fizyolojik ve biyokimyasal faaliyetleri olumsuz etkilediği belirlenmiştir (Nahar vd., 2022). Geçmişte yapılan araştırmalar, eser miktardaki As'ın bitki büyümesi üzerinde uyarıcı bir etkisi olduğunu, ancak yüksek As konsantrasyonlarının zararlı olduğu kaydedilmiştir (Garg & Singla, 2011). Örneğin düşük dozlarda As pirinç, soğan, hanımeli ve mısır bitkilerinin büyümesini uyarmıştır (Evans vd., 2005; Sushant & Ghosh, 2010; Ren vd., 2014; Yuan vd., 2023).

Topraktaki As mevcudiyeti, bitki metabolizmasının normal işleyişini bozabilmekte ve sonuç olarak bodur büyümeye ve düşük mahsul verimliliğine yol açmaktadır (Abbas vd., 2018; Zulfiqar vd., 2023). Buna göre As stresinin *Cicer arietinum*, *Monarda citriodora* ve *Ocimum basilicum* fidelerinde kök ve gövde büyümesini engellediği bildirilmiştir (Malik vd., 2011; Rostami & Abbaspour, 2019; Luxmi vd., 2023). As maruziyetinin taze ve kuru ağırlıkta azalmaya (Biswas vd., 2015), hücre bölünmesinin engellenmesine (Abbas vd., 2018), besin alımının sınırlandırılmasına (Moreno-Jiménez vd., 2012), meyve veriminde düşüşe neden olduğu (Garg & Singla, 2011) kaydedilmiştir. Bununla birlikte, As stresine maruz kalma yaprak sayısını, yaprak alanını ve taze yaprak sayısını baskılamakta (Nath vd., 2014), yapraklarda solma, kıvrılma ve nekroz meydana getirmektedir (Nahar vd., 2022).

Kökler As stresine maruz kalan ilk organdır ve As kök çoğalması, uzaması, yan kök ve kök tüyü oluşumunu inhibe etmektedir (Kumar vd., 2020; Piršelová vd., 2022). Örneğin As maruziyetinin *Oryza sativa* bitkisinde yan kök yoğunluğunu azalttığı (Ronzan vd.,

2019), *Lycopersicum esculentum*'da kök membranlarını tahrip ettiği (Barrachina vd., 1995), *Robinia pseudoacacia* bitkisinde kök uzunluğu, kök yüzey alanı, kök hacmini azalttığı (Zhang vd., 2020) rapor edilmiştir.

As, enzim ve proteinlere bağlanarak hücrenin biyokimyasına zarar vermekte ve fotosentez, solunum, transpirasyon süreçlerini olumsuz etkilemektedir (Finnegan & Chen, 2012). Bitkiler tarafından As absorpsiyonundan sonra fotosentetik elektron akışını engelleyebileceği ve anten kompleksinin periferik kısmındaki proteinlerin azalmasına yol açacağı kaydedilirken, PSII aktivitesi, fotosentetik pigment içeriği, stoma iletkenliği, CO₂ fiksasyonu, transpirasyon oranı ve klorofil biyosentezinde de azalmaya neden olabileceği bildirilmiştir (Evangelou vd., 2007; Abbas vd., 2018; Vezza vd., 2018; Farouk & Al-Amri, 2019).

Arseniğin hücre içerisindeki en tehlikeli etkilerinden biri de çeşitli ROS'ların aşırı üretimine ve oksidatif strese neden olmasıdır (Mondal vd., 2022). ROS oluşumu RNA, DNA, karbonhidratlar, proteinler ve lipid gibi biyomoleküllerin onarılamaz hasarına yol açmaktadır (Kostecka-Gugała & Latowski, 2018). Mısır bitkisinde As maruziyetinin ROS birikimine neden olduğu bildirilmiştir (Hussain vd., 2021). Bununla birlikte aromatik pirinç ve *Gladiolus grandiflorus* bitkisinde As toksisitesi H₂O₂, elektrolit sızıntısı ve malondialdehit gibi oksidatif stres belirteçlerinde artışa neden olmuştur (Huang vd., 2023; Zulfiqar vd., 2023). Benzer şekilde, *Pisum sativum* bitkisinde de As uygulamasının H₂O₂ miktarını artırdığı ve lipid peroksidasyonunu indüklediği bildirilmiştir (Rafiq vd., 2017).

Toksik iz elementler bitkilerin sekonder metabolizmayı değiştirmeleri için uyaran stres ajanlarıdır (Anjitha vd., 2021). Yapılan çalışmalar metal stresinin bitkilerin sekonder metabolit içeriğinde artışa neden olduğunu göstermektedir (Korkmaz vd., 2018; Fattahi vd., 2019; Zoufan vd., 2020). Metale maruz kalma sırasında üretilen ikincil metabolitler metal şelasyonunda aktif olarak yer almakta ve sitoplazmadaki toksisiteyi azaltmaya yardımcı olmaktadır (Anjitha vd., 2021). Aynı zamanda metal kaynaklı oksidatif strese neden olan ROS'un temizlemesinde de bu özel metabolitler önemli rol oynamaktadır (Maleki vd., 2017). As toksisitesinde fenolik bileşenlerin (Ahmad vd., 2022; Popov vd., 2023), flavonoidlerin (Das vd., 2021) ve glukonizolatların (Pandey vd., 2017) önemli rol oynadığı bildirilmiştir. Aynı zamanda fenolikler, alkaloidler ve glukozinatlar gibi sekonder metabolizma bileşiklerinin As tarafından oluşan stres durumlarında nadiren çalışıldığı bildirilmiştir (Pandey vd., 2017; Martínez-Castillo vd., 2022).

1.2.3.2. Krom

Krom bitkiler için iyi bilinen toksik bir metaldir ve bitkilerin fizyolojik, morfolojik, biyokimyasal ve moleküler süreçleri üzerinde olumsuz etkilere neden olarak bitki büyümesini ve verimini engellemektedir (Ali vd., 2023). Cr köklerde hücre bölünmesini engellemekte ve kök uzunluğunu inhibe ederek su ve minerallerin alınımını sınırlandırıp gövde büyümesini kısıtlamaktadır (Ertani vd., 2017; Ali vd., 2023). Fang vd., (2016) yaptıkları çalışmada Cr toksisitesinin *Arabidopsis thaliana* bitkisinde kök uzamasını inhibe ettiğini bildirmiştir. *Ocimum basilicum* bitkisinde ise gövde ve kök biyokütlesi ile bitki boyunda azalmaya neden olmuştur (Soni vd., 2022).

Cr, bitkilerin diğer fizyolojik süreçlerini de etkilemektedir. Özellikle CO₂ fiksasyonu, elektronların taşınması, fotofosforilasyon, fotosentetik pigment içeriği ve fotosentetik enzim aktivitesi açısından fotosentez verimliliğini azaltmaktadır (Shanker vd., 2009; Ali vd., 2015; Saleem vd., 2022). Bu etkiler Cr'un neden olduğu kloroplast ultrastrüktüründeki değişikliklerle, özellikle de lamel sisteminin az gelişmesi ile ilişkilendirilmiştir (Schiavon vd., 2008). Ayrıca Cr transpirasyon, stoma iletkenliği ve CO₂ asimilasyonu seviyelerinde de azalmaya neden olmaktadır (Davies vd., 2002; Schiavon vd., 2008). Stoma iletkenliği seviyelerindeki değişimler, sünger parankimasının hücresel yapısının değişmesine ve stomaların boyutunun azalmasına bağlanabilmektedir (Ertani vd., 2017).

Cr, kök hücrelerindeki plazma membranının alım aktivitesini değiştirerek besin elementlerin emilimini ve birikimini sınırlandırabilmektedir (Gardea-Torresdey vd., 2005; Shanker vd., 2005). Cr'a maruz kalan fesleğende Ni, Mo, Cu, Zn ve C elementlerinin, *Oryza sativa*'da N, P, K, Mn, Cu, Zn, Fe alımının ve taşınımının kısıtlandığı bildirilmiştir (Sundaramoorthy vd., 2010; Bishehkolaei vd., 2011). Bununla birlikte Cr toksisitesi bitkilerde erken yaprak dökümü (Yan vd., 2023) ve çimlenmede inhibisyona (Sharma vd., 2016) neden olmuştur.

Cr toksik metali proteinlerin fonksiyonel gruplarını bağlayarak enzimlerin aktif bölgelerini devre dışı bırakır ve böylece enzimatik aktivitelerin değişmesine yol açmaktadır (Sharma vd., 2020). Kritik katyonların spesifik enzim bağlanma bölgelerinden ayrılması hücrelerde oksidatif hasara neden olan ROS dengesini bozmaktadır (Shahzad vd., 2016). Cr stresi altındaki bitkilerde artan ROS üretimi lipid peroksidasyonuna yol açarak membran yapısının bozulmasına, nükleik asitlerin

oksidasyonuna neden olarak hücrel bileşenlere zarar vermektedir (Wakeel vd., 2019). Bitkiler artan ROS miktarının üstesinden gelmek için CAT, POD, SOD, APX gibi antioksidan enzimlerin aktivitelerini artırarak oksidatif süreçlerin engellenmesini ya da azalmasını sağlamaktadır (Srivastava vd., 2021). Bununla birlikte antioksidan enzimlerin aktiviteleri herhangi bir stres koşulunun süresine, bitki türüne ve dokulara göre değişiklik gösterebilmektedir (Anjum vd., 2017; Sharma vd., 2020). Örneğin, mısır bitkisinde Cr stresi SOD ve CAT aktivitesini azaltırken, POD aktivitesini artırmıştır (Terzi & Yıldız, 2020). Farklı bir çalışmada Cr uygulanmış *Calotropis procera* türünde CAT ve SOD aktivitesinin arttığı ortaya konulmuştur (Usman vd., 2020). Enzimatik antioksidanların yanı sıra bitkiler ROS'un toksik etkisinden kaçınmak için enzimatik olmayan antioksidan savunma sistemini de kullanmaktadır. Bu antioksidan maddeler arasında glutatyon, fenolik bileşikler, karotenoidler, askorbik asit, flavonoidler yer almaktadır (Sharma vd., 2019, 2020).

1.3. AĞIR METALLERİN BİTKİLER ÜZERİNDEKİ İKİNCİL ETKİSİ: OKSİDATİF STRES

Moleküler oksijen (O_2) fotosentezin evrimi sayesinde yaklaşık 2,7 milyar yıl önce dünya atmosferinde önemli miktarlarda ortaya çıkmıştır (Halliwell, 2006; Das & Roychoudhury, 2014). Atmosfere O_2 'nin girmesi biyosentetik reaksiyonlar ve aerobik solunum için önemli avantajlar sağlasa da reaktif oksijen türlerinin (ROS) yaşamın ayrılmaz bir parçası haline gelmesine neden olmuştur (Thannickal, 2009; Zhou vd., 2016). ROS bitki hücrel metabolizmasının normal bir ürünü olarak üretilmektedir (Sharma vd., 2012a). Ancak neredeyse tüm çevresel ve biyotik stresler, hücre bileşenlerine zarar verebilen ve işlev bozukluklarına neden olabilen aşırı ROS üretimi ve birikimine yol açmaktadır (Demidchik, 2015). ROS miktarındaki aşırı artış proteinler, lipid ve DNA gibi hücrel makromoleküllere zarar verme potansiyeline sahiptir (Juan vd., 2021). Stresiz koşullar altında bitki metabolizmasında ROS moleküllerinin üretimi ve detoksifikasyonu arasında bir denge bulunmaktadır (Anjitha vd., 2021). Bununla birlikte metal toksisitesi gibi abiyotik stres koşulları altında ROS üretimi ve uzaklaştırılması arasındaki denge bozulmakta ve aşırı ROS birikimi oksidatif strese yol açmaktadır (Hasanuzzaman vd., 2020).

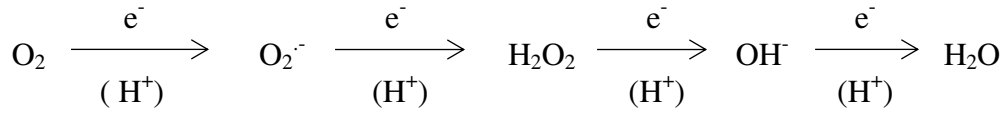
1.3.1. Reaktif Oksijen Türleri (ROS)

Yaşam için vazgeçilmez bir element olan O_2 metabolik olaylar sırasında serbest radikallerin üretilmesine neden olmaktadır (Pham-Huy vd., 2008). Dış atomik orbitalde veya moleküler orbitalde bir veya daha fazla eşleşmemiş elektron içeren ve bağımsız olarak var olabilen moleküler parçalar ‘‘serbest radikaller’’ olarak isimlendirilmektedir (Sen vd., 2010; Martemucci vd., 2022). ROS’lar oksijen içeren serbest radikallerdir ve mitokondri, peroksizom, kloroplast, plazma membranı ve apoplastlarda oluşmaktadır (Mignolet-Spruyt vd., 2016; Mittler, 2017; Torun vd., 2020) (Çizelge 1.2).

Çizelge 1.2. ROS’un reaktivitesi, oluşumu ve süpürülmesi (Mittler, 2017)

ROS	Reaktivitesi	Üretim Yeri	Süpürülmesi
Süperoksit radikali ($O_2^{\cdot-}$)	Fe-S proteinleriyle reaksiyona girer. H_2O_2 ’e dönüşür.	Apoplast (RBOHs), kloroplast, mitokondri, peroksizomlar, elektron taşıma zincirleri	SOD, flavonoidler, askorbat
Hidroksil radikali ($OH^{\cdot}$)	DNA, RNA, lipitler ve proteinler dahil tüm biyomoleküller ile son derece reaktiftir.	Fe ve H_2O_2 [Fenton reaksiyonu]	Flavonoidler, şekerler, prolin, askorbat
Hidrojen peroksit (H_2O_2)	Cys ve Met kalıntılarına saldırarak proteinlerle, hem proteinleriyle ve DNA ile reaksiyona girer.	Peroksizomlar, kloroplast, mitokondri, sitozol, apoplast.	APX, CAT, GPX, PER, PRX, Askorbat, Glutasyon
Singlet oksijen (1O_2)	Lipidleri, proteinleri (Trp, His, Tyr, Met ve Cys kalıntıları) ve DNA’nın guanin kalıntılarını okside eder.	Membranlar, kloroplast, çekirdek	Karotenoidler ve α - tokoferol

ROS ailesinin başlıca üyeleri süperoksit ($O_2^{\cdot-}$) ve hidroksil ($OH^{\cdot}$) gibi serbest radikaller ve hidrojen peroksit (H_2O_2), singlet oksijen (1O_2) gibi radikal olmayan ancak serbest radikal reaksiyonlarını kolayca tetikleyebilen türlerdir (Halliwell, 2006; Sen vd., 2010; Kumari vd., 2021; Martemucci vd., 2022). Moleküler oksijen dört elektron alıp indirgendiğinde su oluşurken, oksijenin bir elektron alarak indirgenmesi ile $O_2^{\cdot-}$, iki elektron alarak indirgenmesi ile H_2O_2 , üç elektron alarak indirgenmesi ile $OH^{\cdot}$ meydana gelmektedir (Gechev vd., 2006) (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Moleküler oksijenin suya indirgenmesi ve serbest oksijen radikallerinin oluşumu (Gechev vd., 2006)

Moleküler oksijenin enerji alarak kendi dönüş yönünün tersi yönünde farklı bir orbitale geçiş yapması sonucu $^1\text{O}_2$ oluşmaktadır (Akdoğan, 2019). Süperoksit radikali ise bir elektronun moleküler oksijene aktarılması sonucu oluşan en yaygın ROS'tur (Puget vd., 1977; Phaniendra vd., 2015; Checa & Aran, 2020). O_2^- radikal anyonu biyomoleküllerle düşük reaktivitesi nedeniyle direkt olarak zararlı etkisi olmamakta ancak H_2O_2 kaynağı olması ve geçiş metallerinin indirgeyicisi olması nedeniyle önemlidir (Aslankoç vd., 2019). H_2O_2 radikali, süperoksitin enzimatik veya enzimatik olmayan dismutasyon reaksiyonundan ya da oksijenin iki elektron ile indirgenmesi sonucu oluşmaktadır (Daithankar vd., 2012; Smirnoff & Arnaud, 2019; Fujii vd., 2022). H_2O_2 'nin Fe veya Cu gibi redoks metal iyonlarının varlığında (Fenton reaksiyonu) (Mahaseth & Kuzminov, 2017) ve O_2^- radikalinin H_2O_2 ile reaksiyonu (Haber-Weiss reaksiyonu) sonucunda ise OH^- radikali oluşmaktadır (Leitão vd., 2017) (1.1) (1.2). OH^- radikali hidroksil iyonunun nötral formudur (Phaniendra vd., 2015) ve bilinen en reaktif ve en toksik ROS türüdür (Das & Roychoudhury, 2014).



ROS'lar kararsız, kısa ömürlü, kimyasal olarak çok reaktif ve eşleşmemiş elektron içeren moleküllerdir (Abbas vd., 2018). Fizyolojik ROS seviyeleri hücrelerin normal işleyişine özgüdür ve hücre sinyali ile homeostazi işlevlerini yerine getirmektedir (Sies & Jones, 2020). Ancak aşırı üretildiklerinde karbonhidratların, lipidlerin, proteinlerin oksidasyonuna, enzim inaktivasyonuna ve DNA hasarına neden olmaktadır (Juan vd., 2021; Mansoor vd., 2022). Zararlı etkilerine ek olarak ROS hücre büyümesi ve gelişimi, hücre döngüsü, hormon sinyali, programlanmış hücre ölümü, tohum dormansisi, stoma hareketinin düzenlenmesi ve biyotik-abiyotik stres koşullarında sinyal molekülü olarak önemli bir rol oynamaktadır (Shahid vd., 2014; Mansoor vd., 2022, 2023).

1.4. FİTOREMEDİASYON

Fitoremediasyon, ağır metal(oid)lerin neden olduğu toksisiteyi azaltmak için kirlenmiş çevrede bitkilerin kullanılmasını içermektedir (Yaashikaa vd., 2022). Fitoremediasyon basit, uygulanabilir, çevre dostu, estetik açıdan hoş ve uygun maliyetli bir yöntemdir (Ullah vd., 2023). Fitoremediasyonun etkinliği, toprağın fiziko-kimyasal özellikleri, topraktaki metallerin biyoyararlanımı, mikrobiyal ve bitki eksüdatları ve canlı organizmaların metalleri alma, biriktirme, tutma, yer değiştirme ve detoksifiye etme kapasitesi gibi faktörlere bağlıdır (Khalid vd., 2017). Fitoremediasyon mekanizmasında fitoekstraksiyon, fitostabilizasyon, rizofiltrasyon, fitovolatilizasyon, fitodegradasyon yer almaktadır (DalCorso vd., 2019).

Fitoekstraksiyon, bitki köklerinin metal adsorpsiyonuna yardımcı olması, gövdeye taşınması ve son olarak bitki biyokütlesinin hasat edilmesi ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu yöntem için seçilen bitkinin hızlı büyüme oranına sahip olması, yüksek biyokütle üretmesi, hasat ve yetiştirilmesinin kolay olması, ağır metallere karşı yüksek toleranslı ve besin zincirine girmesini önlemek için yenilebilir olmayan özelliklere sahip olması gerekmektedir. Metal(oid) konsantrasyonu yüksek olan alanlarda bitki gelişimini sürdüremeyeceği için fitoekstraksiyon yöntemi düşük ve orta düzeyde metal(oid) ile kirlili alanlarda uygulanabilmektedir (Patra vd., 2019; Awa & Hadibarata, 2020).

Fitostabilizasyon, metallerin toprakta bulunabilirliğini veya hareketliliğini kökte biriktirilerek veya rizosfer içinde çökelterek ağır metal(oid) alınıminin azaltılması, böylece sahadaki kirliliğin en aza indirgenmesi sağlanmaktadır. Bu yöntem sadece toksik metallerin yeraltı sularına veya tarım arazilerine sızmasını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda metallerin ekosistemin besin zincirine girmesini de önlemektedir (Ali vd., 2013; Khalid vd., 2017).

Fitovolatilizasyon, bitki kökleri tarafından emilen metallerindaha az toksik ve uçucu formlara dönüştürülerek transpirasyon işlemi ile çevreye salınmasını içermektedir. Özellikle organik kirleticilerin ve Hg, Se gibi bazı metallerin kirlenmiş sahalardan uzaklaştırılmasında uygulanabilmektedir. Bu süreçte metaller tamamen uzaklaştırılmamakta ancak bir sistemden diğerine aktarılmaktadır (Khan vd., 2019; Awa & Hadibarata, 2020).

Rizofiltrasyon, ağır metaller karasal ve sucul sistemlerden adsorpsiyon işlemi ile elimine edilmektedir. Hem hidrofitler hem de mezofitler kullanılır ancak çoğunlukla

lifli bir kök sistemine sahip olduğu için mezofitler tercih edilmektedir. Bitkiler kirli suda yetiştirilir ve bu sırada bitki kökü suyu ve metalleri emer. Kökler doygunluğa ulaşıldıktan sonra bitki sistemi hasat edilmektedir (Aybar vd., 2015; Tiwari vd., 2019).

Fitodegradasyon, bitkiler tarafından üretilen dehalojenaz ve oksijenaz gibi enzimler yardımıyla organik kirleticilerin parçalanması işlemidir. Bitkiler tarafından alınan organik bileşikler metabolik süreçler ile daha küçük parçalara ayrılarak bitkiler tarafından kullanılabilir hale getirilmektedir. Bu yöntem ağır metallerin biyolojik olarak parçalanmamasından dolayı sadece organik kirleticilerin uzaklaştırılmasında kullanılmaktadır (Newman & Reynolds, 2004; Ali vd., 2013).

1.5. HİPERAKÜMÜLATÖR BİTKİLER

Hiperakümülatör bitkiler ağır metalleri toprakta bulunan miktarın çok daha yüksek seviyelerini gövde dokularında (görünür toksisite semptomları olmaksızın) biriktirebilen bitkilerdir (Ali vd., 2013; Khalid vd., 2017). Ağır metallerle kontamine alanlarda yetişen bitkiler metal dışlayıcıları, indikatörler ve akümülatörler olmak üzere üç kategoride sınıflandırılmaktadır (Baker, 1981). Metal dışlayıcılar, ağır metalleri köklerine biriktirmekte ancak taşınmalarını ve toprak üstü kısımlarına girmelerini kısıtlamaktadır. Bu bitkiler stabilizasyon amaçlı kullanılabilir (Lasat, 2002; Malik & Biswas, 2012). Metal indikatörler topraktan yüksek konsantrasyonda ağır metal alan ve bunları gövde ve yapraklarında biriktiren bitkilerdir. Böylece, gövde ve yapraklar topraktaki ağır metal konsantrasyonunu yansıtabilecek yüksek konsantrasyonda ağır metal alımına sahiptir. Metal hiperakümülatörleri, bitki yapraklarında yüksek konsantrasyonda ağır metal alabilen ve biriktirebilen bitkilerdir (Awa & Hadibarata, 2020).

Hiperakümülatör bitkiler ağır metalleri herhangi bir toksisite semptomu göstermeksizin diğer bitki türlerine göre 100 ile 1000 kat, topraktaki metal konsantrasyonundan 50 ile 500 kat daha fazla biriktirebilmektedir (Brooks, 1998; Clemens, 2006). Hiperakümülatörlerin gövdesindeki metal konsantrasyonu genellikle Hg için 10 mg/kg, Cd ve Se için 100 mg/kg, Co, Cu, Cr, Ni ve Pb için 1000 mg/kg ve Zn ve Mn için 10.000 mg/kg'dan yüksektir (Baker & Brooks, 1989). Bugüne kadar 721 hiperakümülatör tür tanımlanmıştır ve bunların çoğunu Ni (532 tür) hiperakümülatörleri oluştururken As (5 tür) ve Cr (1 tür) hiperakümülatörü bitkiler de bulunmaktadır

(Reeves vd., 2018). Bilinen tüm bitki türlerinin yaklaşık %0,2'si ağır metal akümülatörü olarak sınıflandırılmaktadır ve hiperakümülatör bitkilerin çoğunluğunun Brassicaceae, Fabaceae, Euphorbiaceae, Asteraceae, Cyperaceae, Poaceae, Violaceae, Lamiaceae ve Caryophyllaceae familyalarına ait olduğu tespit edilmiştir (Padmavathiamma & Li, 2007; Rascio & Navari-Izzo, 2011).

1.6. AĞIR METALLERE KARŞI KORUMA MEKANİZMALARI

Bitkiler, metallerin veya metaloidlerin toksik etkileriyle başa çıkmak için moleküler, biyokimyasal ve fizyolojik mekanizmalar ağı tarafından kontrol edilen çeşitli savunma stratejileri geliştirmiştir (Shahid vd., 2017a). Ağır metal stratejisi bitki türlerine göre farklılık göstermekle birlikte bir bitki türü için birden fazla tolerans mekanizması bulunabilmektedir (Hossain vd., 2012). Bitkiler, maruz kaldıkları yüksek seviyedeki ağır metal seviyelerine karşı adaptif ve yapısal mekanizmalar geliştirmiştir (Meharg, 2006). Ağır metal toksisitesine karşı bitkiler tarafından benimsenen başlıca savunma mekanizmaları kaçınma ve toleranstır (Yan vd., 2020; Kocaman, 2023). Bu mekanizmalar arasında metal alımın ve taşınımının kısıtlanması, vakoul detoksifikasyonu, spesifik ağır metal taşıyıcılarının sentezlenmesi, stres proteinlerinin indüksiyonu, ağır metallerin belirli ligandlar (organik asit, PC ve MT) tarafından şelasyonu, ROS temizleyici mekanizmanın (antioksidatif enzimler) uyarılması yer almaktadır (Shahid vd., 2017a).

1.6.1. Kaçınma Mekanizması

Kaçınma mekanizması, toksik metallerin alımının sınırlandırılabilirdiği ve bitki dokularına girişinin engellendiği, rizosfer pH'ının modifikasyonunu, hücre çeperi biyosorpsiyonu, mikorizal birliktelik tarafından immobilizasyon ve ağır metal bağlayıcı ligandların sentezini içeren esas olarak hücre dışı düzeyde ilk savunma hattıdır (Dalvi & Bhalerao, 2013). Ağır metal maruziyetinde bitkiler ilk olarak kök emilimi yoluyla ya da metal iyonlarını modifiye ederek toksik metalleri hareketsiz hale getirilmektedir (Yan vd., 2020). Ayrıca kökün endodermal hücrelerini çevreleyen süberinle kaplı kaspari şeritleri ağır metallerin kök sistemine girişini kısıtlayarak metal iyonlarının vasküler dokuya geçişini engellemektedir (Ejaz vd., 2023). Bunun yanı sıra kök eksüdatları rizosferin pH'ını değiştirerek ağır metallerin çökelmesine neden olmakta ve bu sayede toksik metallerin biyoyararlanımları sınırlandırılarak toksisitesi azaltılmaktadır (Dalvi & Bhalerao, 2013). Ağır metal taşıyıcı proteinler potansiyel olarak toksik ağır metal

iyonlarının simplastikten apoplastik alana taşınmasında ve apoplastta birikmesinde önemli rol oynamaktadır (Hossain vd., 2012). Bir başka mekanizması ise poligalakturonik asitten oluşan hücre çeperi pektinlerinin katyon değiştirici olarak görev yapmasıdır. Poligalakturonik asitlerin karboksilik grupları ağır metal iyonlarını bağlayarak toksik metallerin immobilizasyonuna neden olur ve sitozole girişini engellemektedir (Dalvi & Bhalerao, 2013). Ayrıca arbusküler mikorizalar, rizosferdeki ağır metallerin absorpsiyonu, emilimi veya şelasyonu yoluyla toksik metallerin köke girişini engelleyerek dışlama bariyeri olarak işlev yapabilmektedir (Hall, 2002). Metal dışlama mekanizması sayesinde, toksik metallerin kökten gövdeye taşınımı kısıtlanmaktadır (Yan vd., 2020).

1.6.2. Tolerans Mekanizması

Tolerans mekanizması, esas olarak hücre içi metal detoksifikasyonuna odaklanan bitkinin ikinci savunma hattıdır (Dalvi & Bhalerao, 2013). Toksik metal iyonlarının sitozole girmesi ve birikmesi sonucu oluşan toksisiteyle başa çıkmak için bitkiler tarafından geliştirilmiş bir stratejidir (Yan vd., 2020). Bu strateji ağır metal iyonlarının inaktivasyonu, şelasyonu ve kompartmanlara ayrılması gibi çeşitli mekanizmaları kapsamaktadır (Dalvi & Bhalerao, 2013). Böylece sitozol içerisindeki ağır metal iyonları hücresel metabolik süreçlerden uzaklaştırılarak vakuol gibi inaktif kompartmanlara taşınmakta ve hücre fonksiyonlarına zarar gelmesi önlenmektedir (Sheoran vd., 2011). Vakuollerin yanı sıra toksik metal iyonları trikomlar ve yaprak saplarında tutularak ve yaprak dökümü yoluyla bitki bünyesinden uzaklaştırılmaktadır (Eapen & D'Souza, 2005; Thakur vd., 2016). Ağır metal toleransında organik asitler, PC'ler ve MT'ler gibi metal iyonlarının şelasyonunda rol oynayan hücresel mekanizmalar yer almaktadır (Sharma & Dietz, 2006; Gupta vd., 2013; Ferrero vd., 2020). Bu mekanizmalar ağır metal hasarını kontrol altına almakta yetersiz kaldığında enzimatik ve enzimatik olmayan antioksidan bileşiklerin sentezi indüklenmektedir (DalCorso vd., 2019; Yan vd., 2020).

1.6.2.1. Ağır Metal(oid) Bağlayıcı Ligandlar

1.6.2.1.1. Fitoşelatinler

Bitkiler ağır metal stresi altında fitoşelatin adı verilen benzersiz metal bağlayıcı peptitler salgılamaktadır (Ejaz vd., 2023). PC'ler Cys-polipeptitler bakımından zengin bir protein ailesidir (Ghori vd., 2019). İlk olarak fisyon mayasında keşfedilmiştir sonrasında ise

bitkilerde, mantarlarda ve tüm alg gruplarında bulunmuştur (Gupta vd., 2013). Bitki sistemlerinde en iyi karakterize edilen şelatörlerdir (Singh vd., 2016). PC'ler, fitoşelatin sentaz enzimi tarafından GSH öncülüğünde sentezlenmektedir (Yaashikaa vd., 2022). Sitozolda sentezlenen PC'ler kompleksler halinde vakuole taşınmaktadır (Anjitha vd., 2021; Skuza vd., 2022). Sentezleri Ag, Hg, Cu, Cd, Pb, Zn ve As gibi toksik metallerin varlığında hızla aktive olmaktadır (Cobbett, 2000; Ejaz vd., 2023). PC'lerin ana işlevi metal kompleksleşmesidir (Salbitani vd., 2023). PC-metal kompleksleri vakuole taşınarak sitoplazmadaki metal konsantrasyonu azaltılabilmekte ve zararlı etkilere karşı bitkilerin korunması sağlanmaktadır (Yadav, 2010). Ağır metalleri detoksifiye etmenin yanı sıra, PC'ler metal iyonu homeostazında da önemli bir rol oynamakta ve böylece bitki hücrelerindeki metal iyonu mevcudiyetini düzenlemektedir (Guo vd., 2008).

1.6.2.1.2. Metalotiyoninler

Metalotiyoninler Cys bakımından zengin düşük molekül ağırlıklı proteinlerdir (Yaashikaa vd., 2022). Tiyol grubunun varlığı nedeniyle metal iyonlarını bağlama yeteneğine sahiptir (Ghori vd., 2019). Bitki MT proteinleri son derece çeşitli olup dizilerindeki Cys kalıntılarının düzenlenişine göre üç sınıfa ayrılmaktadır (Zhou vd., 2005, 2006). Sınıf I MT'ler, 20 adet Cys kalıntısı içermekte ve omurgalılarda yaygın olarak bulunmakta iken, Sınıf II MT'ler, peptit boyunca Cys dağılımları nedeniyle Sınıf I MT'lerden ayrılmakta ve bitki, mantar ve omurgasızlarda bulunmaktadır. Sınıf III MT'ler, glutatyondan enzimatik olarak sentezlenen PC'leri kapsamaktadır (Yıldız vd., 2012). Bitki MT'leri, amino ve karboksil bölgelerindeki Cys kalıntılarının dağılımına göre dört alt ailede sınıflandırılmaktadır (Zhang vd., 2014). MT1 alt aile genleri öncelikle köklerde, MT2 alt aile genleri yapraklarda, MT3 alt aile genleri olgunlaşan etli meyve ve yapraklarda ve MT4 alt aile genleri tohumlarda bulunmaktadır (Yang vd., 2015). Cys kalıntılarının organizasyonu veya dağılımı, farklı MT detoksifikasyon ve homeostazi için farklı ağır metal iyonlarını bağlama ve tutma yeteneklerine sahiptir (Hossain vd., 2012). MT'lerin kesin fizyolojik işlevi henüz tam olarak aydınlatılmamış olsa da, MT'lerin olası üç fizyolojik işlevinin; birinci olarak temel geçiş ağır metallerinin homeostazının korunması, ikinci olarak toksik ağır metallerin sekestrasyonu ve üçüncü olarak hücre içi oksidatif hasara karşı koruma sağlaması olduğu düşünülmektedir (Gasic & Korban, 2006). Bunun yanısıra MT'ler plazma membranının yenilenmesini de katalize edebilmektedir (Hamer, 1986).

1.6.2.1.3. *Organik Asitler*

Organik asitlerle metal iyonu detoksifikasyonu olgusunun temelinde sitrat, malat, oksalat, malonat ve tartarat gibi asitlerin metal şelatlama yoluyla ağır metal iyonlarıyla güçlü bağlar oluşturma yeteneği yatmaktadır (Anjum vd., 2015). Organik asitlerin karboksil grupları ağır metal iyonları için bağlanma bölgeleri sağlamaktadır (Thakur vd., 2022). Organik asitler dışlama ve içsel tolerans olmak üzere iki farklı yöntemle ağır metal toleransı ve detoksifikasyonunu sağlamaktadır (Anjum vd., 2015). Dışlama stratejisinde bitki köklerinden salgılanan organik asitler metal iyonu ile kararlı metal-ligand kompleksleri oluşturabilir ve toksik metallerin immobilizasyonu sağlanarak köklere girmesi ve toprak üstü kısımlara taşınımı engellenmektedir (Yaashikaa vd., 2022). İçsel toleransta ise organik asitler sitozolde metal ile şelat oluşturabilir ve burada iyonlar toksik olmayan veya daha az toksik bir forma dönüştürülebilmektedir (Hall, 2002; Osmolovskaya vd., 2018).

1.6.3. **Antioksidan Savunma Sistemi**

1.6.3.1. *Enzimatik Antioksidanlar*

Ağır metal stresi bitkinin redoks sisteminde dengesizliğe yol açan oksidatif stres olarak bilinen aşırı ROS üretimini tetikleyerek bitkinin normal metabolik süreçlerinin işleyişini bozmaktadır (Zulfiqar & Ashraf, 2022). Bitkiler bu oksidatif bozukluğa karşı koymak için CAT, SOD, APX ve GR gibi enzimatik antioksidanlara sahiptir (Nahar vd., 2022). Antioksidan enzim aktiviteleri, ROS'un doğrudan veya dolaylı olarak stres altındaki hücrelerden atılmasında kilit rol oynamaktadır (Khatun vd., 2020).

1.6.3.1.1. *Süperoksit Dismutaz (SOD) Enzimi*

Süperoksit dismutaz (SOD, EC 1.15.1.1) enzimi süperoksit radikalinin H_2O_2 ve O_2 'ye dönüşümünü katalize eden, hücreleri sitotoksik süperoksitlere karşı koruyan bir enzim ailesidir (Gill vd., 2015) (1.3). Bitkilerde bu enzimin aktif bölgelerinde bulunan metal içeriğine göre üç tip SOD rapor edilmiştir. Bunlar (1) kloroplastlarda Fe-SOD, (2) mitokondri ve peroksizomlarda Mn-SOD, (3) sitoplazma, kloroplast ve hücrelerarası boşluklarda Cu/Zn SOD olarak bilinmektedir (Alscher vd., 2002; Singh vd., 2016).

SOD



1.6.3.1.2. Katalaz (CAT) Enzimi

Katalaz (CAT, EC 1.11.1.6), H₂O₂'in H₂O ve O₂'ne dismutasyonunu katalize eden önemli bir oksidoredüktaz enzimidir ve peroksizomda lokalize olmaktadır (Singh vd., 2016) (1.4). CAT peroksizomlarda fotorespirasyon sırasında ve glioksizomlarda yağ asitlerinin β -oksidasyonu sırasında üretilen H₂O₂'nin detoksifiye edilmesinde rol oynayan anahtar bir enzimdir (Karuppanapandian vd., 2011; Tuzet vd., 2019).



1.6.3.1.3. Askorbat Peroksidaz (APX) Enzimi

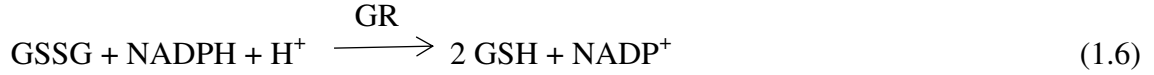
Askorbat peroksidaz (APX, EC 1.11.1.11), askorbat-glutatyon döngüsünün merkezi bir bileşenidir (Zandi & Schnug, 2022). APX, H₂O₂ detoksifikasyonunda önemli bir enzim olarak kabul edilmektedir (Rai vd., 2013) ve H₂O₂'i suya indirgemek için iki molekül askorbat (AsA) kullanarak iki molekül monodehidroaskorbat (MDHA) üretmektedir (Abbas vd., 2018) (1.5). APX enzimi bitki hücrelerinin sitozol, mitokondri, peroksizom ve kloroplastlarında (stroma ve tilakoid) bulunmaktadır (Dvořák vd., 2021). Kloroplastik APX izozimleri, O₂⁻ dismutasyonu tarafından üretilen H₂O₂'yi ayrıştıran su-su döngüsünde yer almaktadır (Huang vd., 2019). Bitki kloroplastları CAT içermediğinden, APX kloroplasttaki H₂O₂'i temizleyebilen tek enzimdir (Hasanuzzaman vd., 2020).



1.6.3.1.4. Glutatyon Redüktaz (GR) Enzimi

Flavoprotein oksidoredüktaz olan glutatyon redüktaz (GR, EC 1.6.4.2) ağırlıklı olarak kloroplastlarda, kısmen sitozol ve mitokondride bulunmaktadır (Das & Roychoudhury, 2014; Dvořák vd., 2021). GR embriyo gelişimi, tohum çimlenmesi, kök büyümesi ve apikal meristemlerin korunmasını içeren birçok metabolik süreci düzenlemektedir (Sumugat vd., 2010; Yu vd., 2013; Marty vd., 2019). GR elektron donörü olarak NADPH kullanarak oksitlenmiş glutatyonun (glutatyon disülfid-GSSG) GSH'ye dönüşümünü katalizlemektedir (Zandi & Schnug, 2022) (1.6). GR, glutatyon disülfid oluşumunu katalize ederek yüksek bir GSH/GSSH hücresel oranını koruma

potansiyeline sahiptir (Das & Roychoudhury, 2014), bu da dehidroaskorbat redüktaz (DHAR) reaksiyonu tarafından tüketilen GSH havuzunun GR tarafından yenilendiğini göstermektedir (Dvořák vd., 2021). Ayrıca artan GR aktivitesi $\text{NADP}^+/\text{NADPH}$ oranını artırır, böylece fotosentetik ışık reaksiyonlarında son elektron reseptörü olarak mevcut NADP^+ miktarını yükseltir ve sonuçta elektronların süperoksit radikal üretimi için O_2 'e aktarılma olasılığını azaltmaktadır (Sudhakar vd., 2001; Bandeoğlu vd., 2004; Wang & Li, 2006).



1.6.3.1.5. *Peroksidaz (POX) Enzimi*

Peroksidazlar (POX, EC 1.11.1.7) bitkilerde en fazla dayanıklılığa sahip bitkisel gıdalarda bol miktarda bulunan oksidoredüktaz grubu enzimlerdir (Yaman, 2023). Substrat olarak H_2O_2 kullanarak fenoller, flavonoidler, aromatik bileşikler gibi bir çok molekülün oksidasyonunu katalizlemektedir (1.7). Bitkilerde yaprak, hücre membranı, gövde, çiçek, hücre çeperi, ribozom ve çekirdekte bulunmaktadır (Yaman, 2023).



1.6.3.2. *Enzimatik Olmayan Antioksidanlar*

Enzimatik olmayan antioksidanlar arasında yer alan fenolik bileşikler ve fenolik asitler sadece hücreleri hasardan korumakla kalmayıp aynı zamanda hücre bölünmesi, büyümesi, yaşlanma ve hücre ölümü gibi hücresel süreçleri etkileyerek bitki büyüme ve gelişiminde hayati rol oynamaktadır (Sharma vd., 2012b; Nahar vd., 2022; Mansoor vd., 2023).

1.6.3.2.1. *Fenolik Bileşikler*

Fenolik bileşikler şikimat, pentoz fosfat ve fenilpropanoid yollarından sentezlenen sekonder metabolitlerdir (Sharma vd., 2012a; Lin vd., 2016). Bitkiler aleminde yaklaşık dokuz bin fenolik bileşik bulunmaktadır (Babenko vd., 2019). Fenolik bileşikler optimum koşullar altında hücrede doğal olarak sentezlenmektedir; ancak biyotik veya abiyotik stres olduğunda bu ürünlerin konsantrasyonu önemli ölçüde etkilenmektedir (Sharma vd., 2012a). Fenolikler hormonal düzenleme, hücre bölünmesi, fotosentetik aktivite, besin mineralizasyonu, üreme gibi işlevleri ile bitki gelişiminde önemli rol

oynamaktadır (Sharma vd., 2019).

Fenialalaninden türevlenen fenolikler, en az bir benzen halkasına bağlı bir ya da daha fazla hidroksil grubu içeren ve bu nedenle polifenoller olarak bilinen antioksidanlardır (Lin vd., 2016). Fenolik bileşikler (i) basit fenolikler [fenolik asitler (hidroksibenzoik ve hidroksisinnamik asitler) ve kumarinler], (ii) polifenoller (flavonoidler ve tanenler) ve (iii) diğer fenolik bileşikler (stilbenler, lignanlar ve ligninler) olarak sınıflandırılabilir (Mamari, 2021; Silva vd., 2023). Fenolik bileşiklerin çoğu doğal olarak bir veya daha fazla fenolik grupla birleşmiş mono ve polisakkaritlerle konjugatlar olarak bulabilmekte ve esterler ve metil esterler gibi fonksiyonel türevler olarak da oluşabilmektedir (Nacz & Shahidi, 2003). Polifenoller geçiş metal iyonlarını şelatlayabilme, aktif oksijenin moleküler türlerini doğrudan temizleyebilme ve lipid alkoksil radikalini yakalayarak lipid peroksidasyonunu inhibe edebilme potansiyeline sahiptir (Sharma vd., 2012a).

1.6.3.2.2. Fenolik Asitler

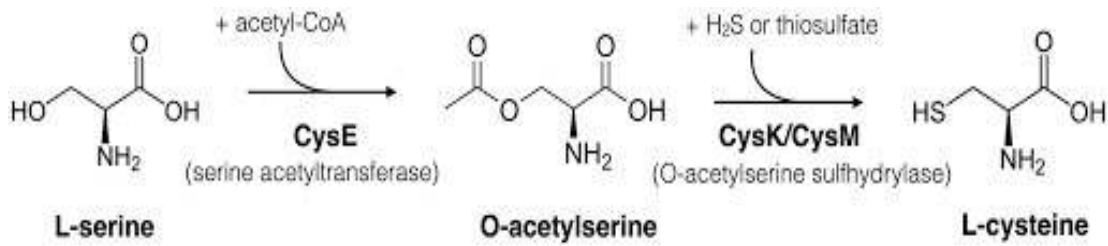
“Fenolik asit” terimi genellikle bir karboksilik asit grubuna sahip fenolik bileşiklerini tanımlamaktadır. Fenolik veya fenolkarboksilik asitler bitki fenolik bileşiklerinin bir alt sınıfını oluşturmaktadır. Bitkilerin tohum, meyve kabuğu ve yaprakları bunların en yüksek konsantrasyonunu içermektedir (Kumar & Goel, 2019). Tipik olarak, amidler, esterler veya glikozitler gibi bağlı formlarda ve nadiren serbest formda bulunmaktadır (Pereira vd., 2009).

Fenolik asitler, temel fenolik yapıya ek olarak bir karboksilik asit grubu içermektedir ve hidroksibenzoik ve hidroksisinnamik asitler olarak ikiye ayrılmaktadır. Hidroksibenzoik asitler C6-C1 iskeletine sahiptir ve genellikle küçük organik asitlere, glikozil gruplarına veya hücre yapısal bileşenlerine bağlı olarak bulunmaktadır. Gallik asit, *p*-hidroksibenzoik asit, salisilik asit, ellagik asit, gentisik asit, protokatekuik asit, siringik asit ve vanilik asit başlıca hidroksibenzoik asitlerdir (Rashmi & Negi, 2020). Hidroksisinnamik asitler C6-C3 iskeletine sahiptir ve sıklıkla glukoz gibi diğer moleküllere de bağlanmaktadır (Kisiriko vd., 2021). Hidroksisinnamik asit ve türevleri arasında *p*-kumarik asit, sinamik asit, kafeik asit, ferulik asit, sinapik asitler, izoferulik asit ve *p*-hidroksisinnamik asit en yaygın olanlarıdır (Rashmi & Negi, 2020). Fenolikler bitkilerde optimal ve suboptimal koşullarda üretilir ve hücre bölünmesi, hormonal düzenleme, fotosentetik aktivite, besin mineralizasyonu ve üreme gibi gelişimsel

süreçlerde kilit rol oynamaktadır (Sharma vd., 2019). Fenolik asitlerin antioksidan aktivitesi, moleküldeki hidroksil gruplarının sayısı ve konumu ile ilgilidir (Pereira vd., 2009). Bitkilerde biyotik ve abiyotik stres faktörlerine karşı metabolik plastisiteyi sağlamakta ve sinyal molekülü olarak işlev yapmaktadır (Mandal vd., 2010).

1.7. SİSTEİN

Sistein (2-amino-3-sülfanilpropanoik asit) yan zincirinde sülfidril (tiyol) grubu bulunan bir α -amino asittir (Azarakhsh vd., 2015; Al Ubeed vd., 2019). Cys biyosentezi bitkilerin plastid, mitokondri ve sitozolünde serin asetiltransferaz (SAT) ve *O*-asetilserin (tiyol) liyaz (OAS-TL) tarafından katalizlenen enzimlerin etkisiyle iki ardışık reaksiyonla gerçekleşmektedir (Wirtz vd., 2012) (Şekil 1.3.). İlk aşamada SAT enzimi asetil koenzim A'dan serine bir asetil parçası transfer eder ve *O*-asetilserin (OAS) oluşmaktadır (Hell & Wirtz, 2011; Wirtz vd., 2012). Daha sonra OAS (tiyol) liyaz enzimi OAS'in asetil grubunu sülfid ile değiştirerek Cys'i serbest bırakmaktadır (Heeg vd., 2008; Wirtz vd., 2012). Kükürt asimilasyonunun ilk ürünü olan Cys, bitki metabolizması için indirgenmiş kükürt kaynağıdır (Jobe vd., 2019; Terzi & Yıldız, 2021). Aynı zamanda Cys metiyonin, GSH, MT, PC, sekonder metabolit, glukonizat, vitamin, kofaktörler ve Fe-S kümeleri gibi birçok önemli molekül için işlevsel bir öncüdür (Álvarez vd., 2012; Perveen vd., 2019; Nakai & Maruyama-Nakashita, 2020; Terzi & Yıldız, 2021).



Şekil 1.3. Sistein biyosentez yolu (Fujishima vd., 2018)

Cys'in tiyol yan zinciri nükleofiliktir ve kolayca oksitlenebilmektedir (Genisel vd., 2015). Tiyoller tiyoredoksin ve glutaredoksinler gibi redoks proteinlerinin redoks durumlarının kontrolünde de önemli rol oynamaktadır (Zagorchev vd., 2013). Ayrıca Cys'deki tiyol grubu ağır metal iyonlarına yüksek affinite ile bağlanabilmektedir (Nakai & Maruyama-Nakashita, 2020). Nükleofilikliği, redox aktivitesi ve metal bağlama

potansiyeli Cys'i birçok proteinin temel yapı taşı ve enzim fonksiyonunun katalitik bileşeni haline getirmektedir (Giles vd., 2003; Ulrich & Jakob, 2019). Bu nedenle, Cys proteinleri "redoks anahtarları" olarak hareket edebilir, sitozoldeki oksidatif stres faktörlerini algılayabilir, metaloproteinlerin aktivitesini kontrol edebilir ve önemli sinyal yollarında yer alabilmektedir (Giles vd., 2003). Redoks reaksiyonlarına girme yeteneği nedeniyle Cys antioksidan özellik gösterir ve oksidatif stres koşullarında anahtar bir rol oynamaktadır (Otasevic & Korac, 2016; Fra vd., 2017).

Normal koşullar altında bitki hücrelerinde ortalama serbest Cys konsantrasyonu düşükken (10-30 μ M), stresli koşullar altında serbest Cys seviyelerinde artış olduğu bildirilmiştir (Wirtz & Hell, 2006). Çoğu çalışmada bu artış GSH içeriğindeki artış ile birlikte rapor edilmiştir; bu da Cys'in esas olarak GSH ve stresle ilgili proteinler gibi sülfür bakımından zengin bileşiklerin biyosentezi için gerekli olduğu sonucuna yol açmıştır (Zagorchev vd., 2013). Artan Cys biyosentezinin *Brassica napus* ve *Arabidopsis* bitkilerinde ağır metal toleransını etkilediği rapor edilmiştir (Jia vd., 2016; Rajab vd., 2020). Bununla birlikte dışsal Cys uygulamasının toksik metal stresi üzerine etkisi ile ilgili sınırlı rapor bulunmaktadır (Kim vd., 2022). Son zamanlarda yapılan çalışmalarda dıştan Cys uygulamasının Cr, Hg, Pb toksik metallerine karşı bitki toleransını artırdığı bildirilmiştir (Yuan vd., 2015; Aysin vd., 2020; Terzi & Yıldız, 2020; Kim vd., 2022). Ancak Cys'in ağır metal stresi altındaki *Ocimum basilicum* üzerine etkisi ile ilgili sınırlı çalışma bulunmaktadır.

1.8. FESLEĞEN (*Ocimum basilicum* L.)

Lamiaceae familyasının en büyük cinsi olarak kabul edilen *Ocimum*, 150'den fazla tür içermektedir (Pandey vd., 2014; Beltrán-Noboa vd., 2023). *Ocimum* türleri ilaç, gıda, parfümeri, kozmetik, pazarlama ve geleneksel amaçlı en çok kullanılan bitkilerden biridir (Mishra vd., 2014). *Ocimum* cinsinin en önemli üyeleri *Ocimum basilicum* L., *Ocimum americanum* L., *Ocimum sanctum* L., *Ocimum gratissimum* L., *Ocimum tenuiflorum* L.'dir (Shahrajabian vd., 2020). Bu türler arasında yer alan *Ocimum basilicum* (fesleğen) dünyanın bir çok yerinde kültür yapılan, tek yıllık, otsu, tıbbi ve aromatik bir bitkidir (Bensaid vd., 2022). Yaygın olarak fesleğen veya tatlı fesleğen olarak bilinmekte olup farklı dillerde basil, basilicum, albahaca, basilic, reihan ve rehan olarak isimlendirilmektedir (Bravo vd., 2021; Shahrajabian vd., 2020). Türkiye de

fesleğen ya da reyhan olarak bilinmektedir (Karaca vd., 2017). Fesleğen adı Yunanca ‘‘kraliyet’’ veya ‘‘kral’’ anlamına gelen ‘‘basileus’’ kelimesinden türetilmiştir ve zengin fitokimyasal içeriğinin tıp, eczacılık, gıda endüstrilerindeki farklı uygulamaları nedeniyle ‘‘Bitkilerin Kralı’’ olarak adlandırılmaktadır (Bilal vd., 2012; Bravo vd., 2021).

Asya, Afrika, Güney Amerika’nın tropikal ve subtropikal bölgelerine özgü bir bitki olan fesleğen 6-24 °C arasındaki sıcaklıklarda farklı iklim ve ekolojilerde yaşayabilmektedir (Altemimi vd., 2020; Dharsono vd., 2022). Fesleğen 20-80 cm boylarında tüsüz ve odunsu gövdeye sahiptir (Dharsono vd., 2022). Çiçekleri pembe, kırmızı ve beyaz renkli, terminal başak şeklinde dizilmiştir (Ghasemzadeh vd., 2016). Yeşil, mor ve beyaz renkli yaprakları oval, basit, bütün ve karşılıklı olup güçlü kokulu esansiyel yağ salgılayan yağ bezlerine sahiptir (Kumar vd., 2017; Açıkgöz, 2020). Darrah (1980) ve yakın zamanda Carović-Stanko vd. (2011) tarafından altı fesleğen morfotipi tanımlanmıştır. Bunlar; a) gerçek fesleğen, Ceneviz tipi ve tatlı fesleğen gibi yeşil yapraklı çeşitler (ticari fesleğen çeşitlerinin çoğunu kapsar) b) marul yapraklı veya geniş yapraklı fesleğen c) küçük yapraklı fesleğen d) mor çiçekli ve saplı, yeşil yapraklı mor fesleğen e) mor yapraklı mor fesleğen f) kabarmış yapraklı mor fesleğen’ dir. Fesleğen çeşitleri arasındaki farklılıklar çiçek rengi, yaprak büyüklüğü ve rengi, bitkilerin şekli, yüksekliği, çiçeklenme zamanı ve aroması gibi özellikleri kapsamaktadır (Morales vd., 1993).

Lamiaceae familyası 236 cins ve 7000’den fazla tür ile temsil edilmekte (Hamdi vd., 2021) ve Türkiye’de 45 cins, 565 tür ve 735 takson bulunmaktadır (Güner vd., 2000). Familyaya ait türler zengin sekonder metabolit içeriği nedeniyle tıbbi ve aromatik değeri yüksek türlerle karakterize edilmektedir (Assaf vd., 2022). Fesleğen bitkisi de geleneksel tıp, ilaç, kozmetik, ve gıda endüstrilerinde kullanılan 200’den fazla biyoaktif bileşene sahiptir (Bensaid vd., 2022). Bu bileşenler arasında fenolikler, terpenoidler, alkaloidler, saponinler, tanenler, flavonoidler yer almakta olup, bitkinin gövde, yaprak ve çiçek kısımlarında farklı oranlarda bulunmaktadır (Kumar vd., 2017; Açıkgöz, 2020; Bensaid vd., 2022; Jakovljević vd., 2022). Bitkinin fenolik bileşik içeriği rosmarinik asit, şikorik asit ve kafeik asit açısından (Bahcesular vd., 2020; Romano vd., 2022) esansiyel yağ içeriği ise methyl chavicol (estragole), linalool, 1,8-cineole, eugenol, methyl eugenol, (E)- methyl cinnamate, α -bergamotene (Z), geranial (cital A), neral (cital B) ile karakterize edilmektedir (Pandey vd., 2014; Keramati vd., 2016; Talebi

vd., 2018; Shahrajabian vd., 2020; Avasiloaiei vd., 2023). Ayrıca yüksek fitokimyasal içeriği fesleğene antimikrobiyal, antiviral, antikanser, antifungal, anti-enflamatuar, anti-ülser, antibakteriyel ve böcek kovucu özelliklere sahip olma potansiyeli (Kumar vd., 2017; Vanitha, 2021; Dharsono vd., 2022) ve çeşitli stres faktörlerine karşı da dayanıklılık kazandırmaktadır (Yadav vd., 2021).

Son zamanlarda tıbbi ve aromatik bitkilerin üretimi ve kullanımı yaygınlaşmakta olup tıp, eczacılık, tarım, ve kozmetik gibi bir çok alanda ham ve kuru olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, toprakların ağır metal(oid)ler ile kirlenmesi bitkilerin güvenliği ve toksisitesi konusunda endişe yaratmaktadır. Bu nedenle ağır metal(oid)ler ile kirlenmiş alanlarda gıda güvenliğinin sağlanması, ürün verim ve kaybının önüne geçilmesi önem arz etmektedir. Literatürde yer alan çalışmalarda Cys'in ağır metal(oid) birikimi ve toleransı üzerindeki etkisi ile ilgili nispeten az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda Cys'in bitkilerin agronomik özellikleri ve antioksidan enzim sistemi üzerindeki düzenleyici etkisi olduğu bilinmekte iken ağır metal(oid) zararında sekonder metabolit içeriğindeki değişikliklere etkisi kapsamlı bir şekilde incelenmemiştir. Bu nedenle, bu tez çalışmasında fesleğen bitkisinde Cys'in As ve Cr streslerine karşı iyileştirici etkisinin morfolojik, fizyolojik ve biyokimyasal süreçler açısından karşılaştırılmalı olarak araştırılması amaçlanmaktadır.

2. MATERİYAL VE YÖNTEM

2.1. BİTKİ MATERİYALİ ve YETİŞTİRME ORTAMI

Bu tez çalışmasında kullanılan mor yapraklı fesleğen (*Ocimum basilicum* L. cv. midnight) tohumları çeşitli tarım işletmelerinden temin edilmiştir. Ancak bu tohumlardan gelişen bitkilerde boy farklılıkları ve yapraklarda yırtılma gibi sorunlar gözlemlenmiştir. Bu nedenle alternatif olarak Vilmorin marka tohumlar kullanılmıştır. Vilmorin marka tohumlarla yapılan ekimlerde sağlıklı bitkiler elde edilmiş ve tez çalışmasında Vilmorin marka fesleğen tohumlarının kullanılmasına karar verilmiştir. Fenolik ve uçucu bileşen içeriği yönünden zengin olması, farklı endüstriyel alanlarda yaygın kullanımı, strese hızlı yanıtlar vermesi nedeniyle bu bitki türü tercih edilmiştir. Fitokimyasal kompozisyon açısından zenginliği ve göstermiş olduğu plastisiteden dolayı üzerinde en çok çalışma yapılan tıbbi ve aromatik bitki türleri arasında yer almakta ve sahip olduğu özellikler nedeniyle stres uygulanan ve uygulanmayan çalışmalarda sıklıkla tercih edilmektedir.

Çalışmada kullanılacak fesleğen tohumlarına uygulanacak sodyum arsenat ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) (Merck), potasyum kromat (K_2CrO_4) (Sigma) ve Cys (Sigma) konsantrasyonlarının belirlenmesi amacıyla farklı konsantrasyonlarda ön çalışma uygulamaları yapılmıştır. Tohumlar torf:perlit (1:1) içeren viyollere, her viyolde iki tohum olacak şekilde ekilmiş ve kontrollü sera şartlarında (25°C , %70 nem) yetiştirilmiştir. Çimlenme sonrası bitkiler bir hafta boyunca saf su ardından Hoagland çözeltisi (Hoagland & Arnon, 1950) ile iki günde bir sulanmıştır. Fideler dört gerçek yaprağa ulaştığında foliar olarak Cys ($300 \mu\text{M}$) uygulaması yaprakların her iki yüzünde tamamen ıslatacak şekilde dört gün boyunca günde bir kez yarım saat uygulanmıştır. Ardından As ve Cr (100 , 300 ve $500 \mu\text{M}$) uygulamaları Hoagland içerisine karıştırılarak topraktan verilmiştir. Bu uygulamalar devam ederken serada bulunan diğer bitkilerden fesleğenlere bulaşan bir mantar enfeksiyonu tespit edilmiş ve yapraklarda yanma gözlemlenmiştir. Bu sebeple bitkilerin daha steril bir ortam olan iklim dolabında yetiştirilmesine karar verilmiştir. Tohumlar önce %5'lik sodyum hipoklorit (NaClO) çözeltisinde 15 dk bekletilerek yüzey sterilizasyonu sağlanmış (Şekil 2.1) ve ardından

tohumlar 3 kez steril dd-H₂O ile yıkanmıştır. Steril edilen tohumlar vermikülit içeren karton bardaklara (90x65x135mm) her bardakta iki adet olacak şekilde ekilerek 5 gün boyunca karanlıkta çimlenmesi sağlanmıştır. Çimlenen tohumlar iklim dolabında (gündüz/gece 27/22 °C, % 70 nem, 300 µmol foton m⁻²s⁻¹, 16:8 fotoperiyot) yetiştirilmeye alınmıştır (Şekil 2.2). Bitkiler bir hafta boyunca saf su ile sulanmış ve ardından Hoagland çözeltisi ile saf su eşit oranda karıştırılarak bitkiye verilmiştir. Bitkiler gerçek yaprağını çıkarmaya başladığında ise sadece Hoagland çözeltisi ile sulama yapılmıştır. Dört gerçek yaprağa ulaşan bitkilere dört gün boyunca her gün yarım saat 300 µM Cys uygulaması foliar olarak yapraktan uygulanmıştır (Şekil 2.3). Beşinci günden itibaren farklı konsantrasyonlardaki As ve Cr (50, 100, 300 ve 500 µM) uygulamaları on gün boyunca Hoagland çözeltisine karıştırılarak gün aşırı sulama suyu olarak verilmiş ve bitkilerin toksisiteye hassasiyeti açısından farklılık gösteren grupları fide uzunluğu, yaprak çapı ve yaprak sayısından elde edilen ölçümler dikkate alınarak belirlenmiştir. Bununla birlikte 500 µM As ve Cr konsantrasyonlarında bitkinin gelişemediği tespit edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre 100 ve 300 µM As ve Cr konsantrasyonu ile 300 µM Cys uygulamalarının uygun dozlar olduğuna karar verilmiştir (Çizelge 2.1). Bitkiler 10 gün süren As ve Cr uygulamalarının ardından kök, gövde ve yaprakları ayrı ayrı hasat edilerek analizler için -80°C’de muhafaza edilmiştir. Kontrol ve uygulama sonrası bitkilerin genel görünümü Şekil 2.4’te verilmiştir.



Şekil 2.1. Tohumların %5’lik sodyum hipoklorit ile sterilizasyonu



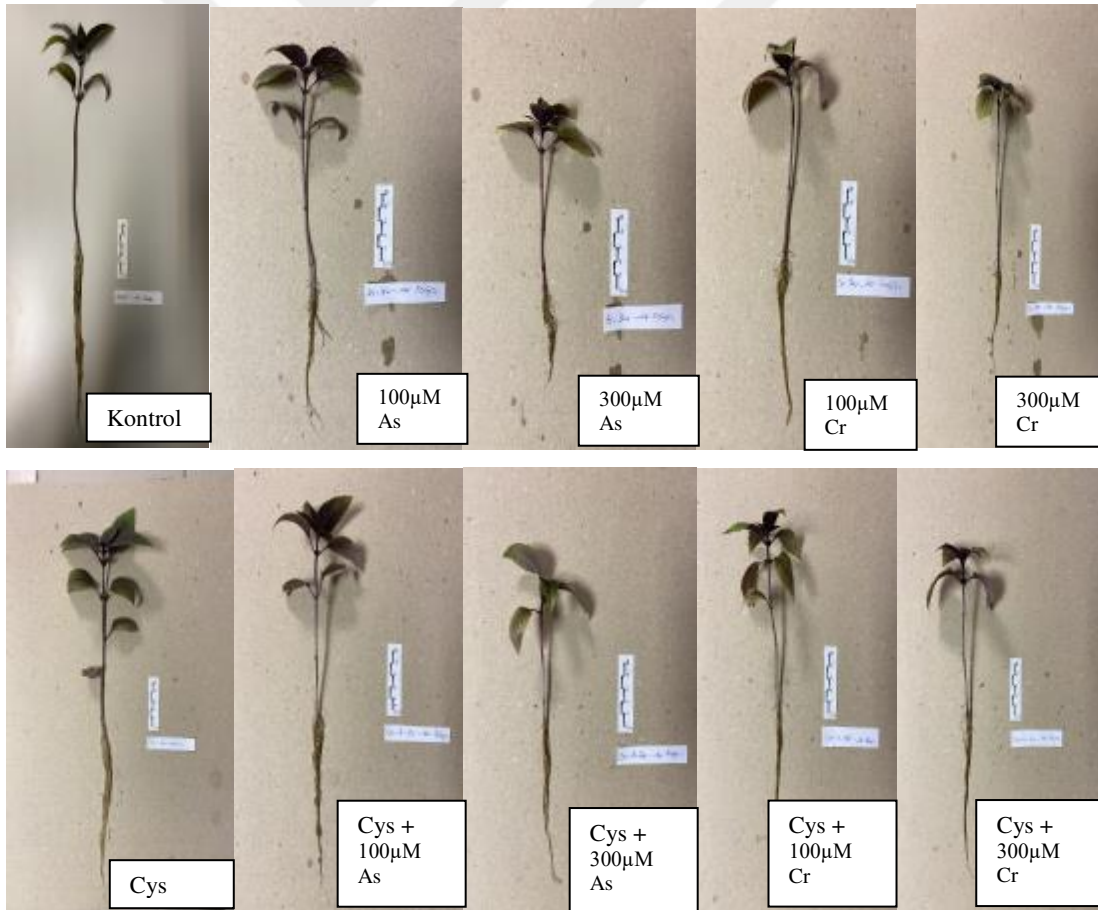
Şekil 2.2. İklim dolabında yetiştirilen bitkiler



Şekil 2.3. Foliar sistein uygulaması

Çizelge 2.1. Çalışmaya ilişkin uygulama grupları

Deney Grupları	Tanımlar
Kontrol	Hoagland ile düzenli sulama yapılan grup
As 100	100 µM As uygulaması
As 300	300 µM As uygulaması
Cr 100	100 µM Cr uygulaması
Cr 300	300 µM Cr uygulaması
Cys	300 µM Cys uygulaması
Cys+As 100	Cys + 100 µM As
Cys+As 300	Cys + 300 µM As
Cys+Cr 100	Cys + 100 µM Cr
Cys+Cr 300	Cys + 300 µM Cr



Şekil 2.4. Arsenik, krom ve sistein uygulanan fesleğen bitkilerinin genel görünümü

2.2. ARSENİK, KROM VE SİSTEİN UYGULAMALARININ FESLEĞEN BİTKİSİNDE MORFOLOJİK VE FİZYOLOJİK PARAMETRELERE ETKİSİ

2.2.1. Büyüme Parametrelerinin Belirlenmesi

Tüm uygulama gruplarında bitki boyu ile kök, gövde ve yaprak yaş ve kuru ağırlığına ait temel ölçümler yapılmıştır.

2.2.2. Bağlı Su İçeriğinin Belirlenmesi

Yaprak bağlı su içeriği (RWC) Smart & Bingham (1974) tarafından belirlenen yöntemle ölçülmüştür. Uygulamaların ardından hasat edilen bitkilerin tamamen gelişmiş orta kısımdaki eş boyutlardaki yapraklar alınarak yaş ağırlıkları belirlenmiştir. Ardından yapraklar deiyonize su içerisinde karanlıkta bekletilmiştir. Süre sonunda yapraklardaki fazla su alınarak turgor ağırlıkları ölçülmüştür. Ağırlıkları belirlenen yaprak örnekleri 70°C’de 72 saat kurutulduktan sonra kuru ağırlıkları kaydedilmiştir. Elde edilen yaş, turgor ve kuru ağırlıklar kullanılarak aşağıdaki formül yardımıyla yaprak bağlı su içeriği (%) hesaplanmıştır.

$$RWC (\%) = [(Yaş \text{ Ağırlık} - Kuru \text{ Ağırlık}) / (Turgor \text{ Ağırlığı} - Kuru \text{ Ağırlık})] \times 100$$

2.2.3. Klorofil Floresansının Belirlenmesi

Klorofil floresansı ölçümü için uygulama gruplarına ait bitki örneklerinin tamamen gelişmiş yaprakları kullanılmıştır. Ölçümlerden önce yaprak üst yüzeyindeki 1 cm²’lik alan 15 dk boyunca klips yardımıyla karanlığa alıştırılmıştır. Süre sonunda klorofil florometresi (Plant Efficiency Analyzer, Hansatech, UK) cihazı yardımıyla Fv/Fm (fotosistem II’nin maksimum kuantum etkinliği) değeri belirlenmiştir.

2.2.4. Fotosentetik Pigment İçeriğinin Belirlenmesi

Bitki örneklerinin klorofil a ve b konsantrasyonu Arnon (1949) ve toplam karotenoid içeriği Jaspars (1965) tarafından belirlenen yöntemle yapılmıştır. Her bir deney grubuna ait 0,1 g taze yaprak örneği %80 aseton içerisinde homojenize edilmiştir. Homojenat oda sıcaklığında 5000 rpm’de 5 dk santrifüjlenmiştir. Süpernatant örnekleri 663, 645 ve 450 nm absorbansta ölçülmüş ve aşağıda verilmiş olan formüller yardımıyla fotosentetik pigment içerikleri belirlenmiştir.

$$Kla = (\Delta A_{663} \times 12,7) - (\Delta A_{645} \times 2,69)$$

$$Klb = (\Delta A_{645} \times 22,9) - (\Delta A_{663} \times 4,68)$$

$$\text{Toplam karotenoid} = (\Delta A_{450} \times 4,07) - [(0,0435 \times K1-a) + (0,3367 \times K1-b)]$$

2.2.5. Elektrolit Sızıntısı Miktarının Belirlenmesi

Elektrolit sızıntı değerinin belirlenebilmesi için Lutts vd. (1996) metodu kullanılmıştır. Stres ve kontrol gruplarına ait bitkilerden alınan yaprak örnekleri 1 cm çapında disklerle ayrılmıştır. Yaprak numuneleri 10 mL'lik dd-H₂O içeren tüplere yerleştirilerek 25°C'de 24 saat bekletilmiştir. Sonrasında EC1 değerinin belirlenebilmesi için tüp içerisindeki sıvılar iletkenlik cihazı (Mettler Toledo, Seven Compact) ile ölçülmüştür. Aynı örnekler otoklavlanmış ve çözelti oda sıcaklığına geldiğinde EC2 değeri belirlenmiştir. Yaprak hücrelerindeki membran hasarı (%) aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\text{Elektrolit sızıntı (\%)} = [EC1/EC2] \times 100$$

2.2.6. Fotosentez Etkinliğinin Belirlenmesi

Fotosentez etkinliği LI-6800 taşınabilir fotosentez ölçüm cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Söz konusu cihazın kalibrasyonu üretici firmanın önerdiği prosedüre göre yapılmıştır. Sonrasında fotosentez foton akı yoğunluğu, hava akış hızı ve referans CO₂ sırasıyla 500 $\mu\text{mol s}^{-1}$, 500 $\mu\text{mol s}^{-1}$, 400 $\mu\text{mol mol}^{-1} \text{s}^{-1}$ 'de ayarlanmış ve otomatik olarak muhafaza edilmiştir. Her bir uygulama grubuna ait sağlıklı ve tam gelişmiş yapraklar kullanılarak net fotosentez (Anet, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$), stoma iletkenliği (SI, $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), transpirasyon oranı (E, $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ve hücreler arası CO₂'in ortamdaki CO₂'e oranı (HCO, $\mu\text{mol mol}^{-1}$) parametreleri ölçülmüştür.

2.2.7. Element İçeriğinin Belirlenmesi

0,1 g kurutulmuş yaprak, kök ve gövde örnekleri 40 mL %4 HNO₃ içinde ekstrakte edilmiştir (Wheal & Palmer, 2010). Örneklerdeki Ca, Mg, Fe, K, Cr ve As konsantrasyonları indüktif eşleşmiş plazma-optik emisyon spektrometresi (Avio 200 ICP-OES, PerkinElmer, Waltham, MA, USA) kullanılarak belirlenmiştir.

2.2.8. Taşıma Faktörü

Bitkilerin ağır metal(oid) ile kirli topraklardaki fitoremediasyon kapasitesinin değerlendirilmesi için taşıma faktörü (TF) değeri formül yardımıyla hesaplanmıştır (Meeinkuirt vd., 2016).

$$\text{Taşıma faktörü} = \frac{\text{Bitki gövdesindeki metal konsantrasyonu (mg/kg)}}{\text{Bitki kökündeki metal konsantrasyonu (mg/kg)}}$$

2.3. ARSENİK, KROM VE SİSTEİN UYGULAMALARININ FESLEĞEN BİTKİSİNDE BİYOKİMYASAL PARAMETRELERE ETKİSİ

2.3.1. Lipid Peroksidasyonu Miktarının Belirlenmesi

Lipid peroksidasyon seviyesi tiyobarbitürik asit reaktif maddelerinin (TBARS) ölçümü ile belirlenmiştir (Madhava Rao & Sresty, 2000). Bitki örneklerinden 0,5 g alınarak % 0,1 trikloroasetikasit (TCA) ile homojenize edilmiştir. Homojenat 3000 g'de 5 dk santrifüj edilmiş ve süpernatant % 0,5 tiyobarbitürik asit içeren %20 TCA ile karıştırılmıştır. Sonrasında karışım 90 °C'de 30 dakika inkübe edilmiş ve inkübasyon sonrası hızlıca buz banyosunda soğutulmuştur. Soğuyan örnekler spektrofotometre cihazı ile 532 ve 600 nm dalga boyunda absorbans değerleri kullanılarak TBARS miktarı belirlenmiştir.

2.3.2. Hidrojen Peroksit İçeriğinin Belirlenmesi

Liu vd. (2000)'nin metoduna göre yaprak, kök ve gövde hidrojen peroksit (H₂O₂) içeriği belirlenmiştir. Numunelerden 0,5 g alınarak %1 TCA içerisinde homojenize edildikten sonra santrifüjlenmiştir. Süpernatant kısmı 1,5 mL %0,1'lik titanyum klorür ile karıştırılmış ve absorbans değerleri 410 nm dalga boyunda ölçülmüştür.

2.3.3. Antioksidan Enzim Aktiviteleri

2.3.3.1. Enzim Ekstratlarının Hazırlanması ve Total Protein Miktarının Belirlenmesi

Antioksidan enzimlerin aktivitelerinin belirlenmesi için öncelikle deneme gruplarının protein ekstraksiyonu gerçekleştirilmiştir. Bunun için fesleğen numunelerinin yaprak, kök ve gövdelerinden 0,5 g alınarak sıvı azot yardımıyla toz haline getirilmiştir. Ardından 1 mM etilendiamintetraasetik asit (EDTA) ve %1 polivinilpirolidon içeren K-fosfat tamponu (50 mM; pH 7.0) ile homojenize edilmiştir. Elde edilen ekstrakt 4 °C'de 20000 rpm'de 20 dk santrifüj edilmiştir. Oluşan süpernatant enzim aktivitesinin tayini için kullanılmıştır. APX aktivitesini ölçmek için tampona diğer kimyasallara ek olarak 2 mM askorbat eklenmiştir.

Bitki ekstraktlarının protein içeriklerinin belirlenmesinde Bradford (1976) yöntemi uygulanmıştır. Bu amaçla süpernatanttan 10 µL alınarak 50 µL'ye saf su ile

tamamlandıktan sonra üzerine 1 mL Bradford boya çözeltisi eklenmiş ve vorteksle karıştırıldıktan sonra 5dk oda sıcaklığında bekletilmiştir. Standart grafiğin hazırlanmasında 1 mg/mL BSA (bovin serum albümin)'dan hazırlanan 0,1-1 mg/mL konsantrasyonları kullanılmıştır. Örnekler spektrofotometrede 595 nm dalga boyunda okunmasıyla elde edilen standart eğriye göre örneklerin protein konsantrasyonları hesaplanmıştır.

2.3.3.2. Katalaz (CAT) Aktivitesinin Belirlenmesi

Aebi (1984) tarafından önerilen metoda göre CAT enziminin aktivitesi belirlenmiştir. Reaksiyon, 50 mM potasyum fosfat tamponu (pH 7,0), 30 mM H₂O₂ ve enzim özütü içeren 1 mL'lik reaksiyon karışımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Örnekler 180 saniye boyunca 240 nm'deki absorbans değerleri spektrofotometre cihazıyla kaydedilmiştir. Dakikada tüketilen $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2$ miktarı, 1 enzim ünitesi olarak saptanmıştır.

2.3.3.3. Süperoksit Dismutaz (SOD) Aktivitesinin Belirlenmesi

SOD enzim aktivitesinin tayini Beauchamp & Fridovich (1971)' göre belirlenmiştir. Reaksiyon 50 mM potasyum fosfat tamponu (pH 7,8), 0,1 mM EDTA, 13 mM metiyonin, 75 μM nitro blue tetrazolyum ve 50 μL ekstrakt ihtiva eden 1 mL reaksiyon ortamına 2 μM riboflavin ilave edilerek gerçekleştirilmiştir. Örnekler, 10 dk süre ile 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ışık yoğunluğunda beyaz floresan ışık altında bekletildikten sonra 560 nm'de absorbans değerleri belirlenmiştir. SOD aktivitesinin bir birimi NBT'nin fotokimyasal redüksiyonunda %50 oranında inhibisyonu olarak tanımlanmıştır.

2.3.3.4. Askorbat Peroksidaz (APX) Aktivitesinin Belirlenmesi

APX aktivitesinin tayini için Nakano & Asada (1981)'nın belirlemiş olduğu yöntem kullanılmıştır. Reaksiyon 50 mM sodyum fosfat tamponu (pH 7,0), 250 μM askorbat, 5 mM H₂O₂ ve enzim özütü kullanılarak yapılmıştır. Örneklerin 290 nm'de 3 dakika boyunca absorbans değişimleri ölçülmüştür. 1 ünite APX aktivitesi 1 μM askorbatı oksidize etmek için gerekli enzim miktarı olarak ifade edilmiştir.

2.3.3.5. Glutatyon Redüktaz (GR) Aktivitesinin Belirlenmesi

GR aktivitesi spektrofotometrik olarak Foyer & Halliwell (1976) yöntemi uygulanarak belirlenmiştir. Aktivite tayini için 50 mM Tris-HCl tamponu (pH 7,8), 1 mM yükseltgenmiş glutatyon (GSSG), 0,25 mM NADPH, 0,5 mM EDTA ve enzim ekstraktı kullanılmıştır. NADPH'ın oksidasyonu 340 nm'de 3 dakika boyunca azalmanın

ölçülmesi sonucu belirlenmiştir. 1 enzim ünitesi, dakikada indirgenen glutatyon ($\mu\text{mol ml}^{-1}$) miktarı olarak ifade edilmiştir.

2.3.3.6. Peroksidaz (POX) Aktivitesinin Belirlenmesi

POX aktivitesi Mika & Lüthje (2003) metoduna göre belirlenmiştir. Reaksiyon, 25 mM sodyum asetat (pH 5,0) tamponu, 10 mM guaiakol ve 10 mM H_2O_2 kullanılarak yapılmıştır. 1 mL'lik reaksiyon karışımının 1 dk boyunca 460 nm'deki absorbans değişimleri ölçülmüştür. 1 ünite enzim, 1 μM H_2O_2 'yi oksidize etmek için gerekli enzim miktarı olarak ifade edilmiştir.

2.3.4. Fenolik Asit İçeriğinin Belirlenmesi

Her bir uygulama gruplarına ait 5 gr taze örnek, % 0,01 BHT (butilhidroksitoluen) içeren %80 metanol (h/h) içerisinde 5 dk kaynatıldıktan sonra porselen havan ve havaneli kullanılarak özütler elde edilmiştir. Homojenat 7.000 g'de santrifüjlendikten sonra elde edilen süpernatant 35 °C'de sabit basınç altında rotary evaporatör (Heidolph Laborota-4000, Germany) kullanılarak evapore edilmiştir. Kalan sulu örnek liyofilizasyon (Christ, Alpha 1-2LD plus, Germany) ile kurutulmuştur. Kuru örneklerin 50 mL saf içinde çözüldükten sonra örnekler 2 N NaOH (sodyum hidroksit) ve 2 N HCl (hidroklorik asit) kullanılarak örnek pH değerleri $2,0 \pm 0,1$ 'e ayarlanacak ve dietil eter (1:1, v/v) kullanılarak ekstre edilmiştir. Ekstreler F1 (serbest formdaki fenolik asitler), F2 (ester formdaki fenolik asitler) F3 (glikozit formdaki fenolik asitler) ve F4 (ester-bağlı formdaki fenolik asitler) olmak üzere fraksiyonlanmış ve fraksiyonlar HPLC-DAD analizinde kullanılmıştır. Fenolik asit ekstraksiyonu (Çolak vd., 2019)'ne göre yapılmıştır. Örnekler 0,22 μm (SF13-PTFE-22LP, ASC Corp., Taipei, Taiwan) por büyüklüğüne sahip filtreden geçirildikten sonra 1 mL amber vialler içerisinde analize hazırlanmıştır.

Analizler dörtlü bir HPLC pompası, mikrovakum degasır (MVD), bir adet termostatl kolon bölmesi (TCC), DAD dedektör, standard micro ve preparativ otosampler bağlı HPLC (Agilent 1100, Palo Alto, CA, USA) ile analiz edilmiştir. Kromatografik ayırmada Agilent Zorbax Eclipse XDB-C18 kolonu (4.6 mm $\times$ 250 mm, 5- μm partikül boyutu) kullanılmıştır. 214 nm dalga boyunda *p*-hidroksibenzoik asit (*p*-HBA), *m*-hidroksibenzoik asit (*m*-HBA) ve vanilik asit (VaA), 280 nm dalga boyunda gallik asit (GaA), protokateşik asit (PA), kafeik asit (CaA), siyiringik asit (SyA), 325 nm dalga boyunda gentisik asit (GA), *p*-kumarik asit (*p*-KuA), *o*-kumarik asit (*o*-KuA), *m*-

kumarik asit (*m*-KuA), ferulik asit (FeA), sinapik asit (SiA) ve salisilik asit (SaA) belirlenmiştir. Mobil faz olarak %0,02 HCOOH içeren saf su (mobil faz A) ve %50 MeOH (h/h) kullanılmıştır. Akış hızı 0,5 mL/dak. olarak belirlenmiştir. Gradyent programı 0-10 dak. (%15-35 B), 10-20 dak. (%35-55 B), 20-30 dak. (55-65 B), 30-40 dak. (%65-85 B), 40-45 dak. (%85-95 B), 45-50 dak. (%95-75 B) ve 50-60 dak. (75-35 B) olarak ayarlanmıştır. Enjeksiyon hacmi 5 µL'dir. Referans bileşiklerin ve örneklerin pik alanları HP ChemStation (Hewlett-Packard, Palo Alto, CA, USA) yazılımı kullanılarak ve karşılaştırma yapılarak belirlenmiştir.

2.3.5. Uçucu Yağ Bileşenlerinin Belirlenmesi

Kurutulmuş bitki numuneleri (kök, gövde, yaprak) blendır kullanılarak toz haline getirilmiştir. Sonrasında ağırlıkça 1:5 (m/m) oranında metanol ile döner karıştırıcı da karıştırılmıştır. Süre bitiminde metanol fazı süzölmüş ve direkt olarak GC-MS cihazına enjekte edilmiştir. Uçucu yağ bileşenlerinin analizi Agilent 7890A GC System coupled to an Agilent 5975C inert MSD with Triple Axis Detector marka gaz kromatografisi kütle spektroskopisi cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. GC kolonu olarak Agilent HP5-MS (30m x 0,25mm x 0,25µM) kullanılmıştır. GC kolonu fırın sıcaklık programı aşağıda belirtilmiştir.

	Rate °C/min	Value °C	Hold Time min
		40	5
Ramp 1	5	100	2
Ramp 2	20	225	10

Yüksek saflıkta helyum taşıyıcı gaz olarak kullanılmıştır. GC kolonu fırın sıcaklık programı 35,25 dk olarak belirlemiştir. Enjeksiyon portu sıcaklığı 200 °C olarak ayarlanmış ve splitless model inlet kullanılmıştır. Enjeksiyon hacmi 1 µL olarak belirlenmiştir. Wiley and NIST (Wiley Registry of Mass Spectral Data, 7 th Edition, NIST 98 Library) kütüphanesi referans olarak kullanılmıştır.

2.3.6. İstatiksel Analizler

Tüm deneyler 3 tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların değerlendirilmesi Statistic Package for Social Sciences (SPSS for Windows 22.0) paket programında yer alan tek yönlü varyans analizi (One Way Anova) ve Duncan Çoklu

Karşılaştırma Testi kullanılarak gruplar arasındaki farkın önem derecesi hesaplanmıştır. Gruplar arasında $p < 0,05$ olan değerler istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmiştir.

3. BULGULAR

3.1. ARSENİK, KROM VE SİSTEİN UYGULAMALARININ FESLEĞEN BİTKİSİNDE MORFOLOJİK VE FİZYOLOJİK PARAMETRELERE ETKİSİ

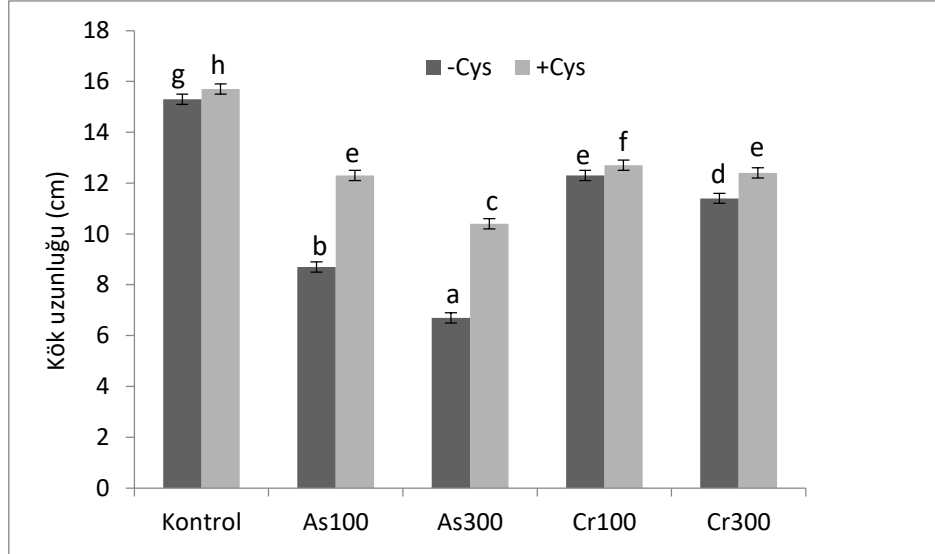
Mevcut tez çalışmasında As, Cr ve Cys uygulamalarının fesleğen bitkisinde büyüme parametreleri (kök, gövde, yaprak uzunlukları, yaş ve kuru ağırlıkları), yaprak bağıl su içeriği, klorofil floresansı, klorofil a, b ve toplam karotenoid miktarları, fotosentez etkinliği (transpirasyon oranı, stoma iletkenliği, net fotosentez oranı, hücreler arası karbondioksit konsantrasyonu), kök, gövde ve yapraklardaki Ca, Mg, Fe, K, Cr ve As içeriği, prolin miktarı, EL, TBARS, H₂O₂ ve fenolik asit içeriği, uçucu yağ bileşenleri ve antioksidan enzim aktivitelerine (CAT, SOD, POX, APX, GR) olan etkisi belirlenmiştir.

3.1.1. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Kök Uzunluğuna Etkisi

Kökler ağır metallerle karşılaşan ilk organdır ve bu nedenle bir stres faktörünün etkisini değerlendirmek için yaygın olarak incelenmektedir. Farklı konsantrasyonlarda (100 µM ve 300 µM) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 µM) uygulamasının kök uzunluğuna etkisine ilişkin sonuçlar Şekil 3.1’de verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının kök uzunluğuna etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Buna göre en yüksek kök uzunluğu Cys uygulanan gruplarda belirlenirken, en düşük kök uzunluğu 300 µM As konsantrasyonunda kaydedilmiştir. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 µM As konsantrasyonunda %43 ve 300 µM As konsantrasyonunda %56 oranında azalma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 µM Cr konsantrasyonunda %20 ve 300 µM Cr konsantrasyonunda %26 oranında azalma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin kök uzunluğu üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 µM As konsantrasyonunda %41 ve 300 µM As

konsantrasyonunda %55 oranında artma belirlenmiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda %3 ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %9 oranında artma kaydedilmiştir.



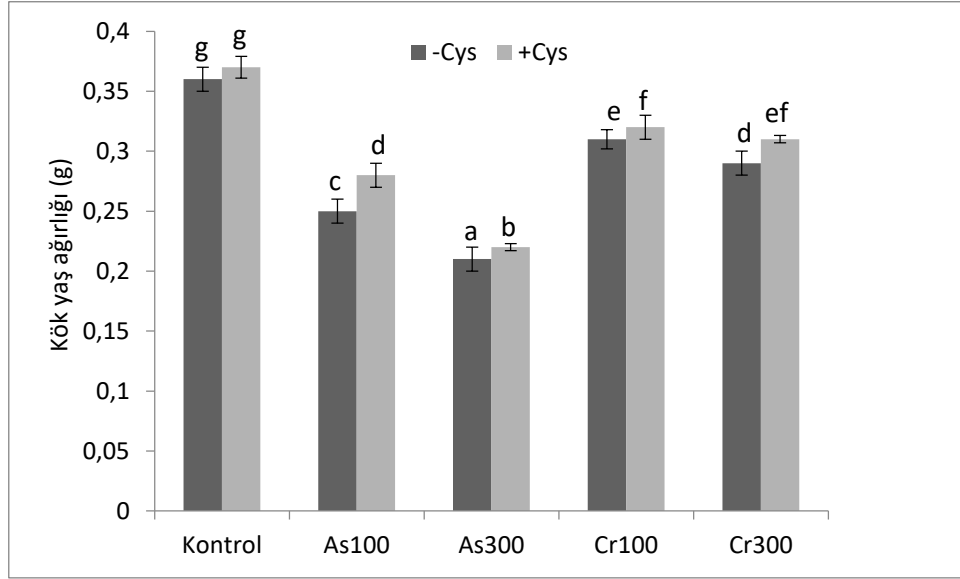
Şekil 3.1. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kök uzunluğuna etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).

3.1.2. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Kök Yaş Ağırlığına Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 μ M ve 300 μ M) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 μ M) uygulamasının kök yaş ağırlığına etkisine ilişkin sonuçlar Şekil 3.2’de verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının kök yaş ağırlığına etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Buna göre en yüksek kök yaş ağırlığı Cys uygulanan gruplarda belirlenirken, en düşük kök yaş ağırlığı 300 μ M As konsantrasyonunda kaydedilmiştir. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %31 ve 300 μ M As konsantrasyonunda %42 oranında azalma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M Cr konsantrasyonunda %14 ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %19 oranında azalma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin kök yaş ağırlığı üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %12 ve 300 μ M As konsantrasyonunda %5 oranında artma belirlenmiştir. Cys'in Cr uygulamaları

üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda %3 ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %7 oranında artma kaydedilmiştir.



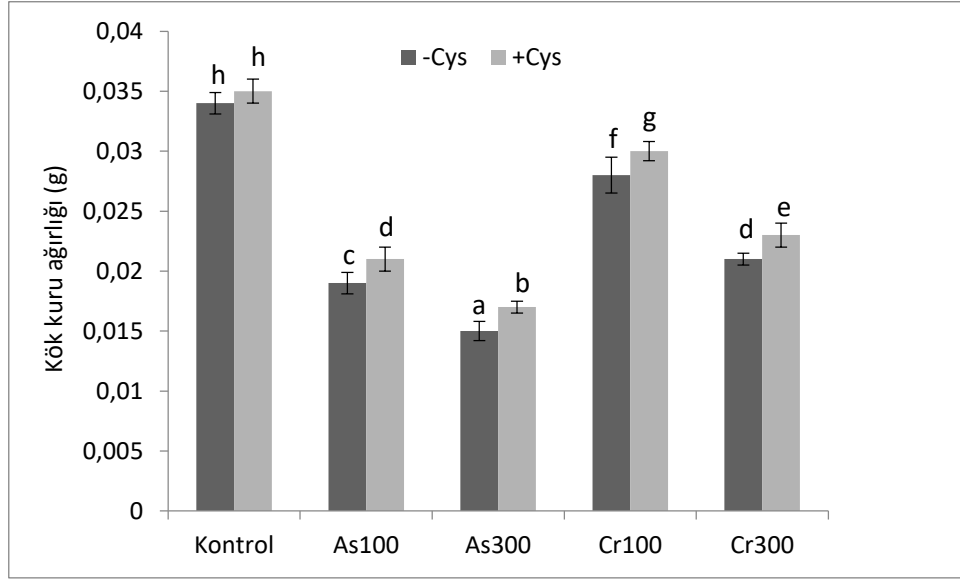
Şekil 3.2. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kök yaş ağırlığına etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).

3.1.3. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Kök Kuru Ağırlığına Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 μ M ve 300 μ M) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 μ M) uygulamasının kök kuru ağırlığına etkisine ilişkin sonuçlar Şekil 3.3'te verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının kök kuru ağırlığına etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Buna göre en yüksek kök kuru ağırlığı Cys uygulanan gruplarda belirlenirken, en düşük kök kuru ağırlığı 300 μ M As konsantrasyonunda kaydedilmiştir. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %44 ve 300 μ M As konsantrasyonunda %56 oranında azalma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M Cr konsantrasyonunda %18 ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %38 oranında azalma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin kök kuru ağırlığı üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %11 ve 300 μ M As konsantrasyonunda %13 oranında artma belirlenmiştir. Cys'in Cr uygulamaları

üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda %7 ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %10 oranında artma kaydedilmiştir.



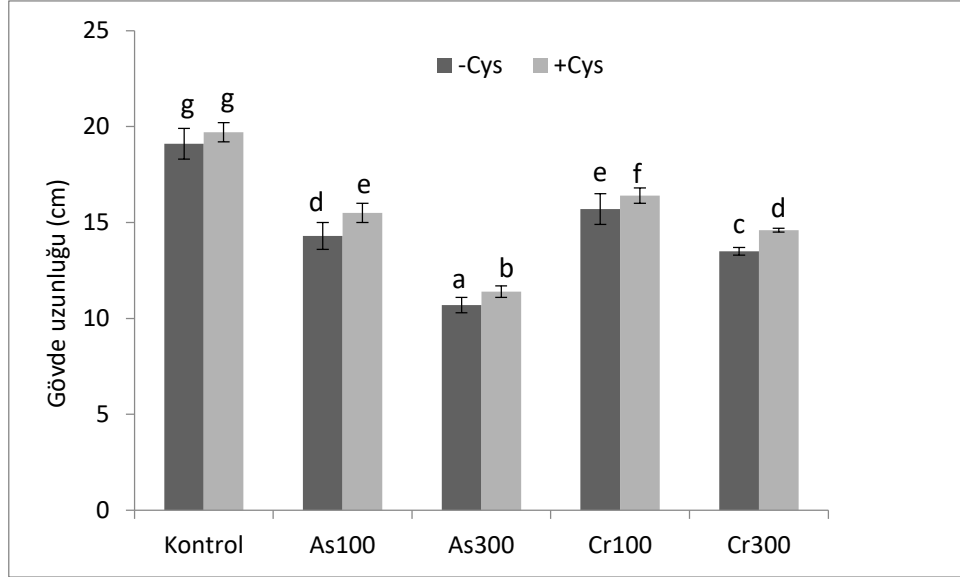
Şekil 3.3. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kök kuru ağırlığına etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).

3.1.4. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Gövde Uzunluğuna Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 μ M ve 300 μ M) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 μ M) uygulamasının gövde uzunluğuna etkisine ilişkin sonuçlar Şekil 3.4'te verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının gövde uzunluğuna etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Buna göre en yüksek gövde uzunluğu Cys uygulanan gruplarda belirlenirken, en düşük gövde uzunluğu 300 μ M As konsantrasyonunda kaydedilmiştir. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %25 ve 300 μ M As konsantrasyonunda %56 oranında azalma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M Cr konsantrasyonunda %18 ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %29 oranında azalma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin gövde uzunluğu üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %8 ve 300 μ M As konsantrasyonunda %7 oranında artma belirlenmiştir. Cys'in Cr uygulamaları

üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda %5 ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %8 oranında artma kaydedilmiştir.



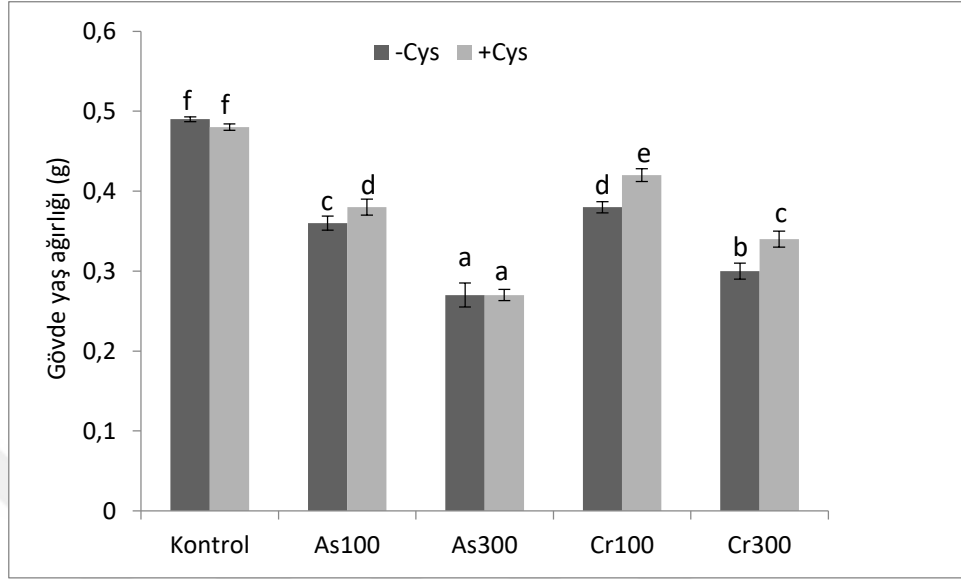
Şekil 3.4. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövde uzunluğuna etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

3.1.5. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Gövde Yaş Ağırlığına Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 μ M ve 300 μ M) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 μ M) uygulamasının gövde yaş ağırlığına etkisine ilişkin sonuçlar Şekil 3.5'te verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının gövde yaş ağırlığına etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,05$). Buna göre en yüksek gövde yaş ağırlığı kontrol grubunda belirlenirken, en düşük gövde yaş ağırlığı 300 μ M As konsantrasyonunda kaydedilmiştir. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %27 ve 300 μ M As konsantrasyonunda %45 oranında azalma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M Cr konsantrasyonunda %22 ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %39 oranında azalma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin gövde yaş ağırlığı üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %6 oranında artma kaydedilirken, 300 μ M As konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir.

Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda %11 ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %13 oranında artma kaydedilmiştir.



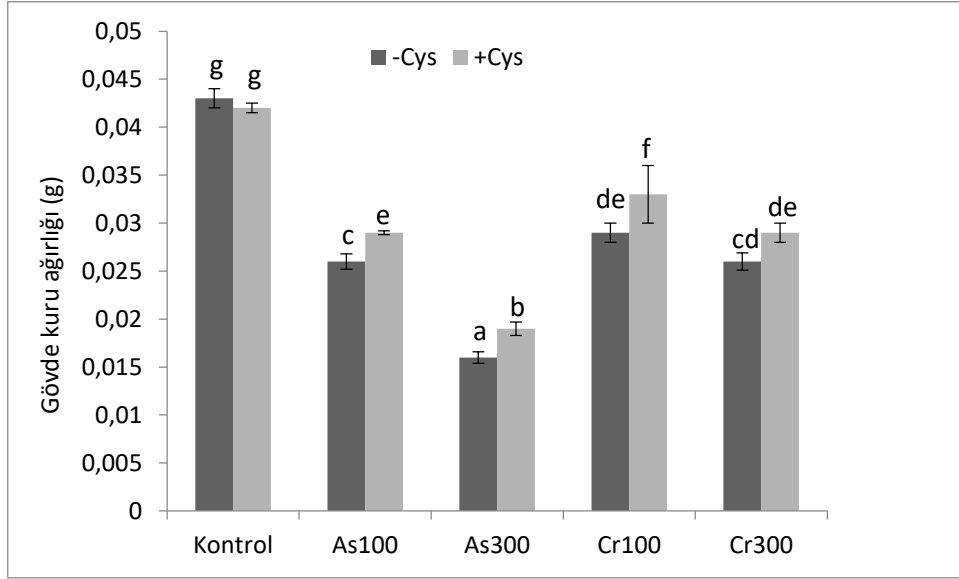
Şekil 3.5. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövde yaşı ağırlığına etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

3.1.6. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Gövde Kuru Ağırlığına Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 μ M ve 300 μ M) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 μ M) uygulamasının gövde kuru ağırlığına etkisine ilişkin sonuçlar Şekil 3.6'da verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının gövde kuru ağırlığına etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,05$). Buna göre en yüksek gövde kuru ağırlığı kontrol grubunda belirlenirken, en düşük gövde kuru ağırlığı 300 μ M As konsantrasyonunda kaydedilmiştir. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %40 ve 300 μ M As konsantrasyonunda %63 oranında azalma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M Cr konsantrasyonunda %33 ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %40 oranında azalma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresi altındaki fesleğenin gövde kuru ağırlığı üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %12 ve 300 μ M As konsantrasyonunda %19 oranında artma belirlenmiştir. Cys'in Cr uygulamaları

üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda %14 oranında artma belirlenirken, 300 μ M Cr konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark kaydedilmemiştir.



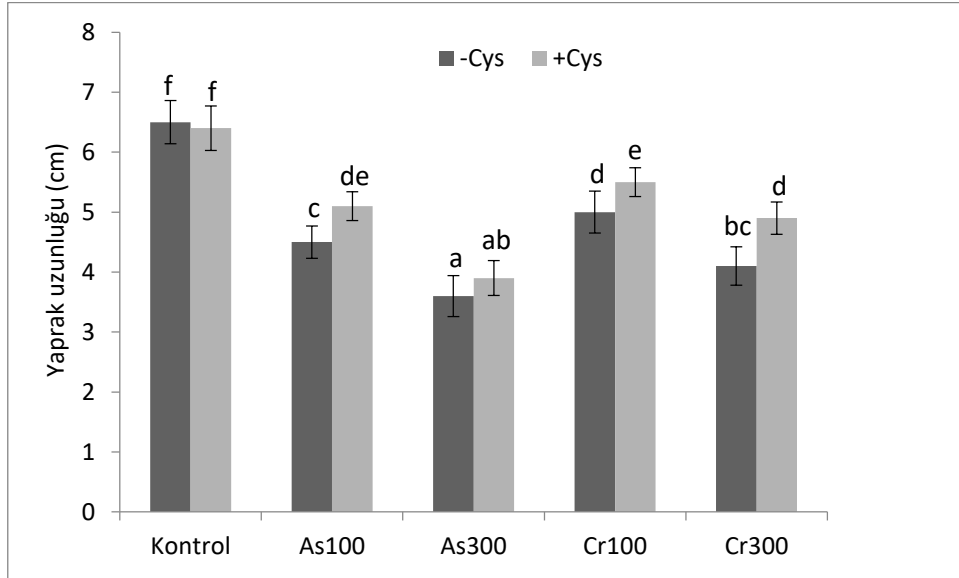
Şekil 3.6. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövde kuru ağırlığına etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

3.1.7. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Yaprak Uzunluğuna Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 μ M ve 300 μ M) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 μ M) uygulamasının yaprak uzunluğuna etkisine ilişkin sonuçlar Şekil 3.7’de verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının yaprak uzunluğuna etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,05$). Buna göre en yüksek yaprak uzunluğu kontrol gruplarında belirlenirken, en düşük yaprak uzunluğu 300 μ M As konsantrasyonunda kaydedilmiştir. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %31 ve 300 μ M As konsantrasyonunda %45 oranında azalma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M Cr konsantrasyonunda %23 ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %37 oranında azalma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin yaprak uzunluğu üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %13 oranında artma kaydedilirken, 300 μ M As konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir. Cys’in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr

uygulamalarına kıyasla 100 μM Cr konsantrasyonunda %10 ve 300 μM Cr konsantrasyonunda %20 oranında artma kaydedilmiştir.



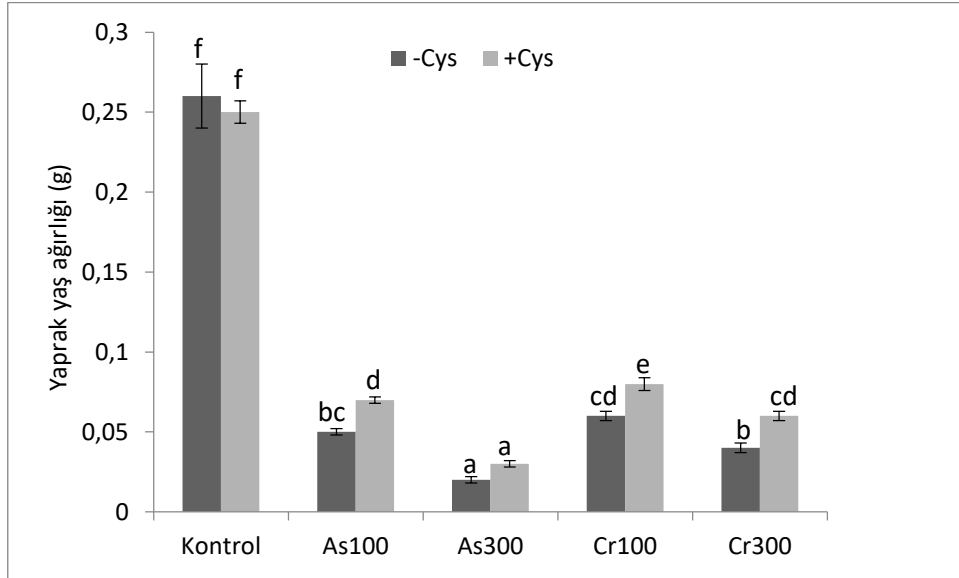
Şekil 3.7. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprak uzunluğuna etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

3.1.8. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Yaprak Yaş Ağırlığına Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 μM ve 300 μM) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 μM) uygulamasının yaprak yaş ağırlığına etkisine ilişkin sonuçlar Şekil 3.8’de verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının yaprak yaş ağırlığına etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,05$). Buna göre en yüksek yaprak yaş ağırlığı kontrol gruplarında belirlenirken, en düşük yaprak yaş ağırlığı 300 μM As konsantrasyonunda kaydedilmiştir. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda %81 ve 300 μM As konsantrasyonunda %92 oranında azalma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM Cr konsantrasyonunda %77 ve 300 μM Cr konsantrasyonunda %85 oranında azalma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin yaprak yaş ağırlığı üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda %40 oranında artma kaydedilirken 300 μM As konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir. Cys’in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr

uygulamalarına kıyasla 100 μM Cr konsantrasyonunda %33 ve 300 μM Cr konsantrasyonunda %50 oranında artma kaydedilmiştir.



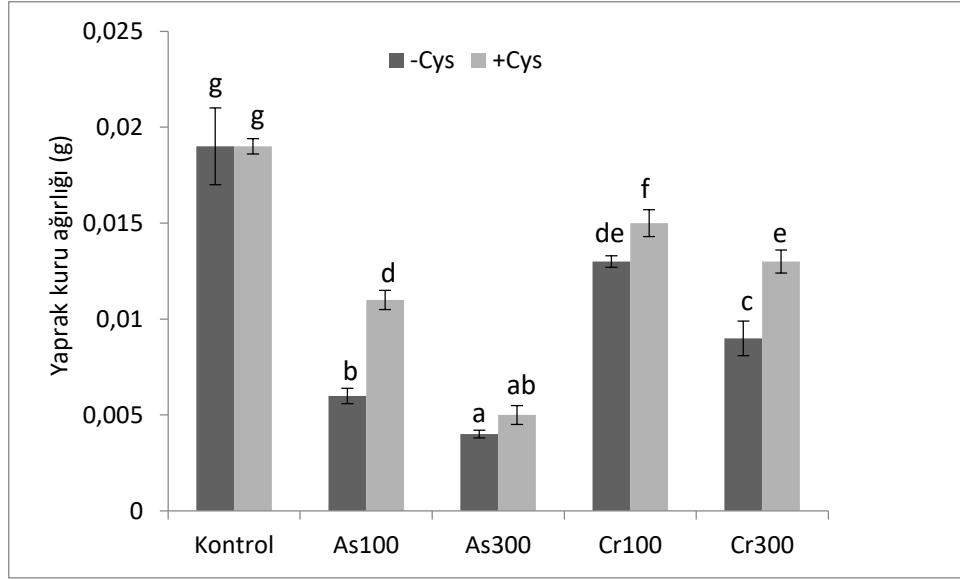
Şekil 3.8. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprak yaş ağırlığına etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).

3.1.9. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Yaprak Kuru Ağırlığına Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 μM ve 300 μM) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 μM) uygulamasının yaprak kuru ağırlığına etkisine ilişkin sonuçlar Şekil 3.9'da verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının yaprak kuru ağırlığına etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Buna göre en yüksek yaprak kuru ağırlığı kontrol ve Cys uygulanan gruplarda belirlenirken, en düşük yaprak kuru ağırlığı 300 μM As konsantrasyonunda kaydedilmiştir. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda %68 ve 300 μM As konsantrasyonunda %79 oranında azalma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM Cr konsantrasyonunda %32 ve 300 μM Cr konsantrasyonunda %53 oranında azalma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresi altındaki fesleğenin yaprak kuru ağırlığı üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda %83 oranında artma kaydedilirken, 300 μM As konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir.

Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda %15 ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %44 oranında artma kaydedilmiştir.



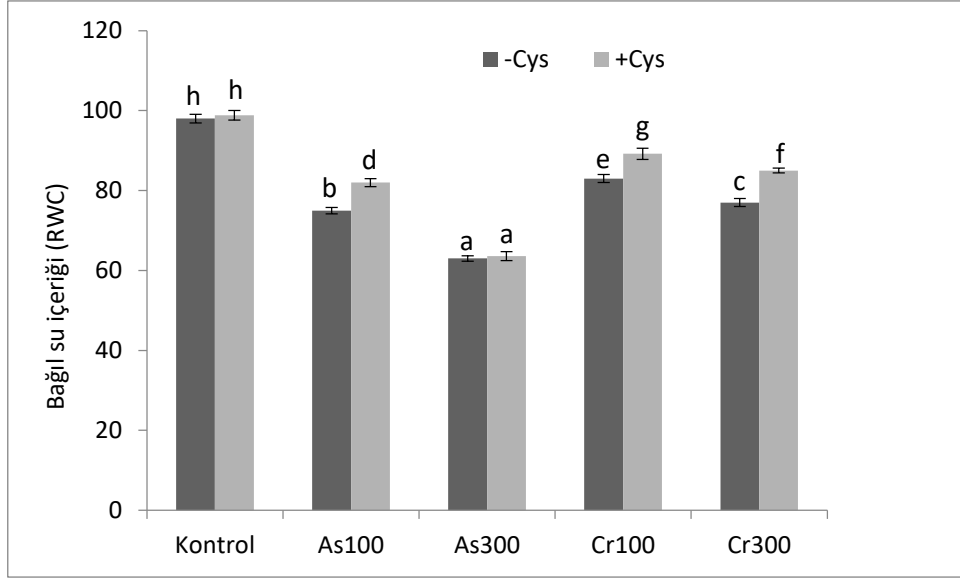
Şekil 3.9. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprak kuru ağırlığına etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).

3.1.10. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Yaprak Bağlı Su İçeriğine Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 μ M ve 300 μ M) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 μ M) uygulamasının yaprak bağlı su içeriğine etkisine ilişkin sonuçlar Şekil 3.10'da verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının yaprak bağlı su içeriğine etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Buna göre en yüksek yaprak bağlı su içeriği Cys uygulanan gruplarda belirlenirken, en düşük yaprak bağlı su içeriği 300 μ M As konsantrasyonunda kaydedilmiştir. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %24 oranında 300 μ M As konsantrasyonunda %36 oranında azalma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M Cr konsantrasyonunda %15 ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %21 oranında azalma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin yaprak bağlı su içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %9 oranında artma kaydedilirken,

300 μM As konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μM Cr konsantrasyonunda %8 ve 300 μM Cr konsantrasyonunda %10 oranında artma kaydedilmiştir.



Şekil 3.10. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprak bağıl su içeriğine etkisi.

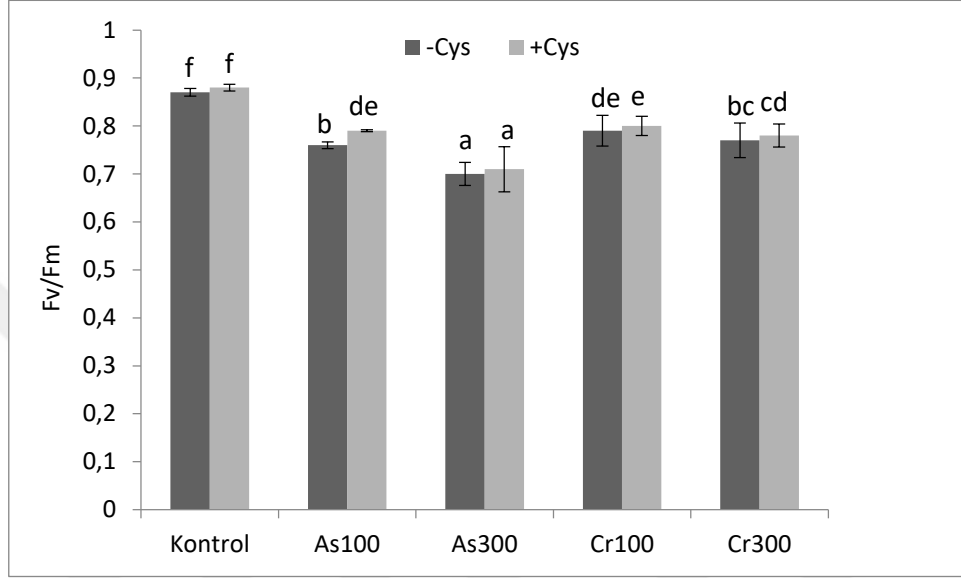
Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

3.1.11. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Klorofil Floresansına Etkisi

Klorofil floresansı (Fv/Fm) fotosentetik sistemin incelenmesinde kullanılan, stresin başlangıcını ve gelişimini izlemede etkili olan önemli bir parametredir. Farklı konsantrasyonlarda (100 μM ve 300 μM) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 μM) uygulamasının Fv/Fm oranına etkisine ilişkin sonuçlar Şekil 3.11'de verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının Fv/Fm oranına etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,05$). Buna göre en yüksek Fv/Fm oranı Cys uygulanan gruplarda belirlenirken, en düşük Fv/Fm oranı 300 μM As konsantrasyonunda kaydedilmiştir. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda %13 ve 300 μM As konsantrasyonunda %20 oranında azalma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM Cr konsantrasyonunda %9 ve 300 μM Cr konsantrasyonunda %12 oranında azalma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin Fv/Fm oranına etkisi

incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %4 oranında artma kaydedilirken, 300 μ M As konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M ve 300 μ M Cr olmak üzere her iki Cr konsantrasyonu için de istatistiksel açıdan fark tespit edilmemiştir.



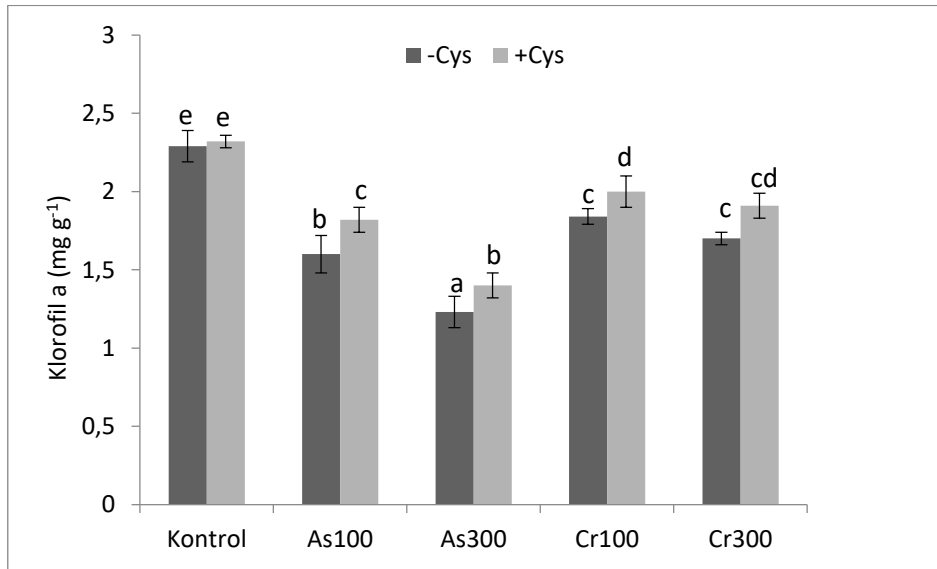
Şekil 3.11. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının klorofil floresansına etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

3.1.12. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Fotosentetik Pigment İçeriğine Etkisi

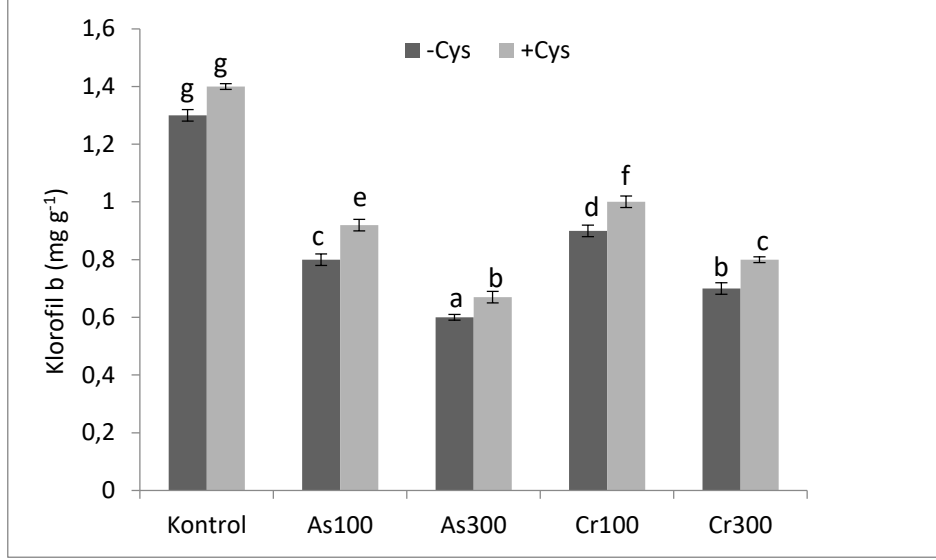
Farklı konsantrasyonlarda (100 μ M ve 300 μ M) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 μ M) uygulamasının klorofil a (Şekil 3.12) ve klorofil b (Şekil 3.13) etkisine ilişkin sonuçlar verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının klorofil a ve klorofil b içeriğine etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,05$). Buna göre en yüksek klorofil a ve klorofil b içeriği Cys uygulanan gruplarda belirlenirken, en düşük klorofil a ve klorofil b içeriği 300 μ M As konsantrasyonunda kaydedilmiştir. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında klorofil a ve klorofil b içeriği 100 μ M As konsantrasyonunda sırasıyla %30 ve %39 oranında ve 300 μ M As konsantrasyonunda %46 ve %54 oranında azalma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında klorofil a ve klorofil b içeriği 100 μ M Cr konsantrasyonunda

sırasıyla %20 ve %31 oranında ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %26 ve %46 oranında azalma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin klorofil a ve klorofil b içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında klorofil a ve klorofil b içeriği 100 μ M As konsantrasyonunda sırasıyla %14 ve %15 oranında ve 300 μ M As konsantrasyonunda %14 ve %12 oranında artma belirlenmiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla klorofil a ve klorofil b içeriği 100 μ M Cr konsantrasyonunda sırasıyla %9 ve %11 oranında artma kaydedilirken, 300 μ M Cr konsantrasyonunda klorofil a içeriğinde istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmezken, klorofil b içeriğinde %14 oranında artma kaydedilmiştir.



Şekil 3.12. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının klorofil a içeriğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

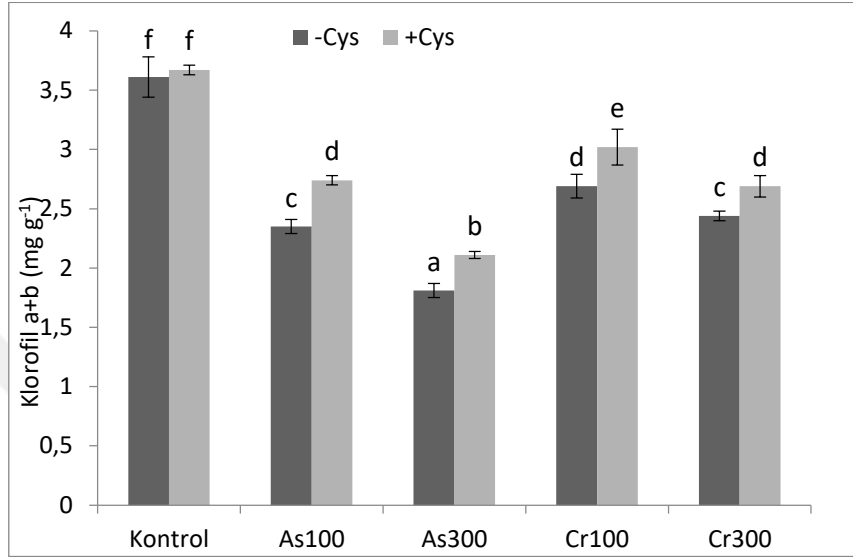


Şekil 3.13. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının klorofil b içeriğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

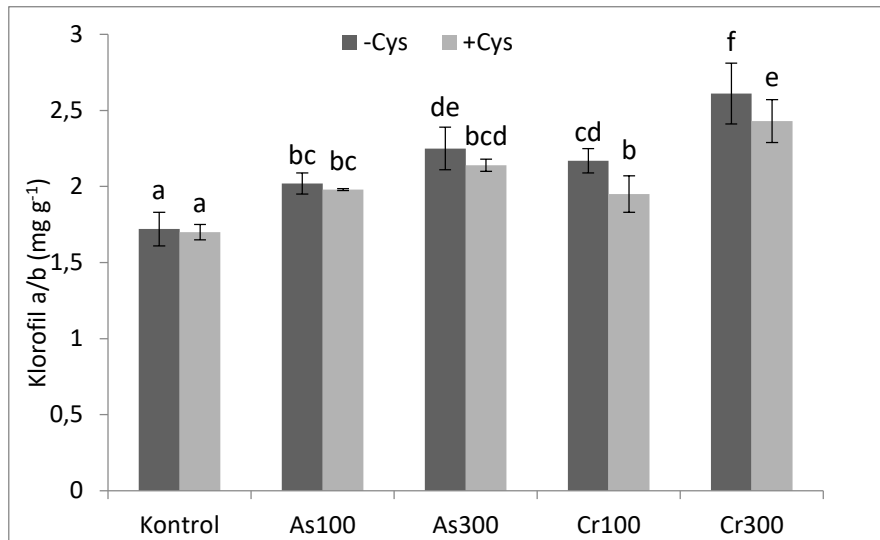
Farklı konsantrasyonlarda (100 μ M ve 300 μ M) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 μ M) uygulamasının klorofil a+b (Şekil 3.14) ve klorofil a/b (Şekil 3.15) etkisine ilişkin sonuçlar verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının klorofil a+b içeriği ve klorofil a/b oranına etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,05$). Buna göre en yüksek klorofil a+b içeriği Cys uygulanan gruplarda ve en yüksek klorofil a/b oranı 300 μ M Cr konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük klorofil a+b içeriği 300 μ M As konsantrasyonunda ve en düşük klorofil a/b oranı Cys uygulanan gruplarda kaydedilmiştir. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında klorofil a+b içeriği ve klorofil a/b oranı 100 μ M As konsantrasyonunda sırasıyla %35 oranında azalma ve %17 oranında artma, 300 μ M As konsantrasyonunda %50 oranında azalma ve %31 oranında artma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında klorofil a+b içeriği ve klorofil a/b oranı 100 μ M Cr konsantrasyonunda sırasıyla %25 oranında azalma ve %26 oranında artma, 300 μ M Cr konsantrasyonunda % 32 oranında azalma ve % 52 oranında artma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin klorofil a+b içeriği ve klorofil a/b oranına etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda klorofil a+b içeriğinde %17 oranında artma, klorofil a/b oranında istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmezken, 300 μ M As konsantrasyonunda klorofil a+b içeriğinde %17 oranında

artma ve klorofil a/b oranında istatistiksel olarak önemli bir fark kaydedilmemiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda klorofil a+b içeriğinde %12 oranında artma, klorofil a/b oranında %10 oranında azalma belirlenirken, 300 μ M Cr konsantrasyonunda klorofil a+b içeriğinde %10 oranında artma ve klorofil a/b oranında %7 oranında azalma kaydedilmiştir.



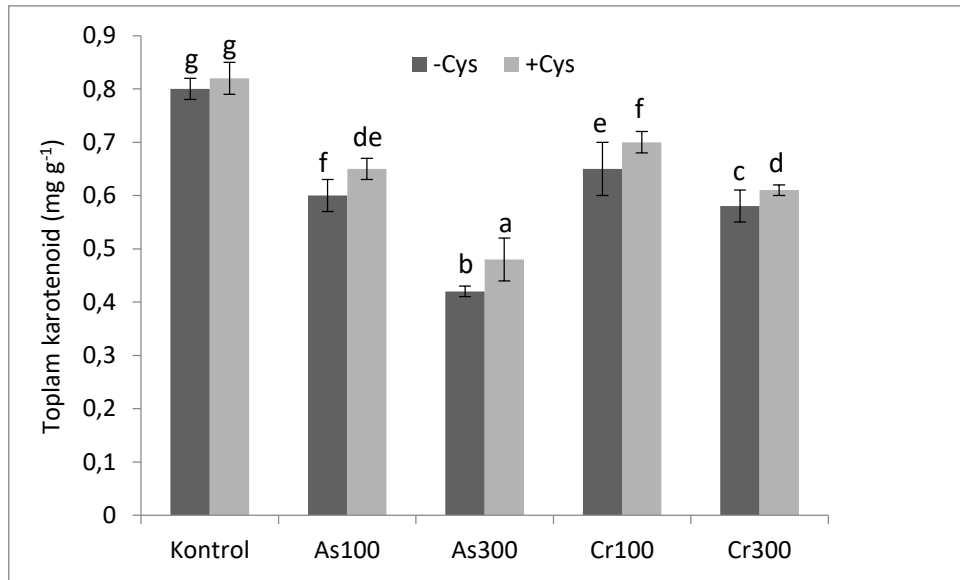
Şekil 3.14. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının klorofil a+b içeriğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).



Şekil 3.15. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının klorofil a/b oranına etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

Farklı konsantrasyonlarda (100 μM ve 300 μM) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğinde foliar Cys (300 μM) uygulamasının toplam karotenoid içeriğine etkisine ilişkin sonuçlar Şekil 3.16’da verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının toplam karotenoid içeriğine etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Buna göre en yüksek toplam karotenoid içeriği Cys uygulanan gruplarda belirlenirken, en düşük toplam karotenoid içeriği 300 μM As konsantrasyonunda kaydedilmiştir. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda %25 ve 300 μM As konsantrasyonunda %48 oranında azalma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM Cr konsantrasyonunda %19 ve 300 μM Cr konsantrasyonunda %28 oranında azalma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin toplam karotenoid içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda %8 ve 300 μM As konsantrasyonunda %14 oranında artma belirlenmiştir. Cys’in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μM Cr konsantrasyonunda %8 ve 300 μM Cr konsantrasyonunda %5 oranında artma kaydedilmiştir.



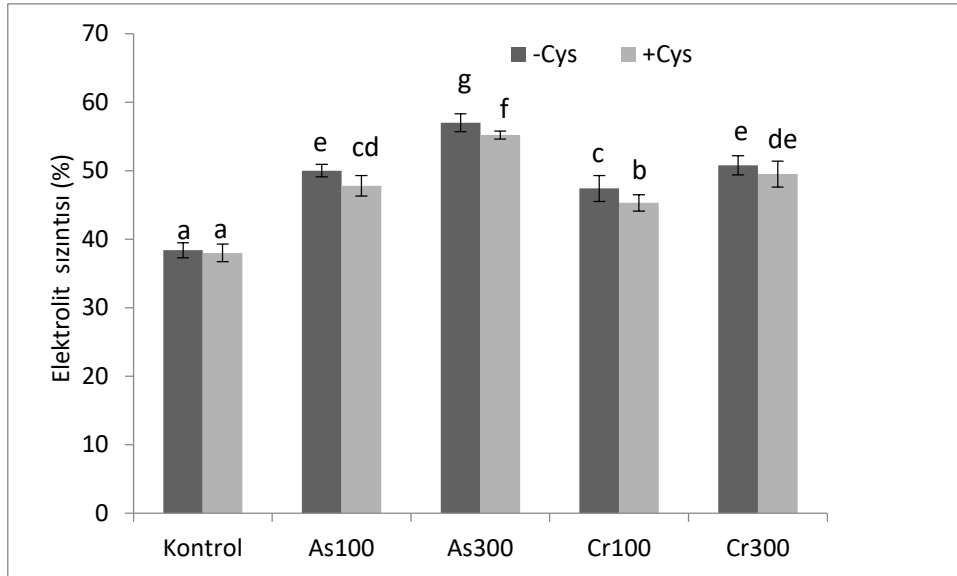
Şekil 3.16. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının toplam karotenoid içeriğine etkisi.

Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).

3.1.13. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Elektrolit Sızıntısına Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 μ M ve 300 μ M) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğinde foliar Cys (300 μ M) uygulamasının elektrolit sızıntısına etkisine ilişkin sonuçlar Şekil 3.17’de verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının elektrolit sızıntısına etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Buna göre en yüksek elektrolit sızıntısı 300 μ M As uygulana gruplarda belirlenirken, en düşük elektrolit sızıntısı Cys uygulanan gruplarda kaydedilmiştir. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %30 ve 300 μ M As konsantrasyonunda %48 oranında artma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M Cr konsantrasyonunda %23 ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %32 oranında artma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin elektrolit sızıntısı üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %4 ve 300 μ M As konsantrasyonunda %3 oranında azalma kaydedilmiştir. Cys’in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda %4 oranında azalma kaydedilirken 300 μ M Cr konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir.

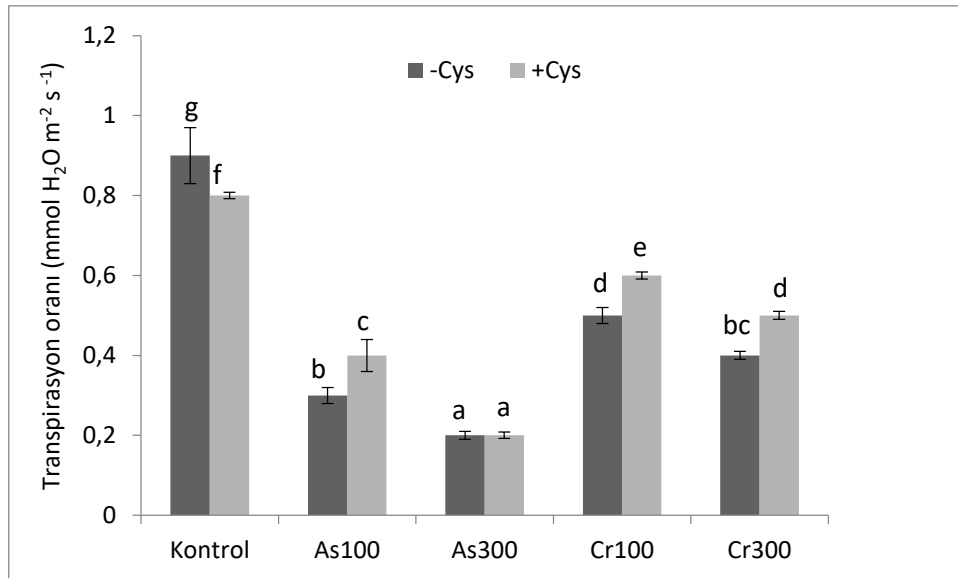


Şekil 3.17. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının elektrolit sızıntısına etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).

3.1.14. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Transpirasyon Oranına Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 μM ve 300 μM) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 μM) uygulamasının transpirasyon oranına etkisine ilişkin sonuçlar Şekil 3.18’de verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının transpirasyon oranına etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Buna göre en yüksek transpirasyon oranı kontrol grubunda belirlenirken, en düşük transpirasyon oranı 300 μM As konsantrasyonunda kaydedilmiştir. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda %67 ve 300 μM As konsantrasyonunda %78 oranında azalma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM Cr konsantrasyonunda %44 ve 300 μM Cr konsantrasyonunda %56 oranında azalma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin transpirasyon oranı üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda %33 oranında artma kaydedilirken, 300 μM As konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir. Cys’in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μM Cr konsantrasyonunda %20 ve 300 μM Cr konsantrasyonunda %25 oranında artma kaydedilmiştir.

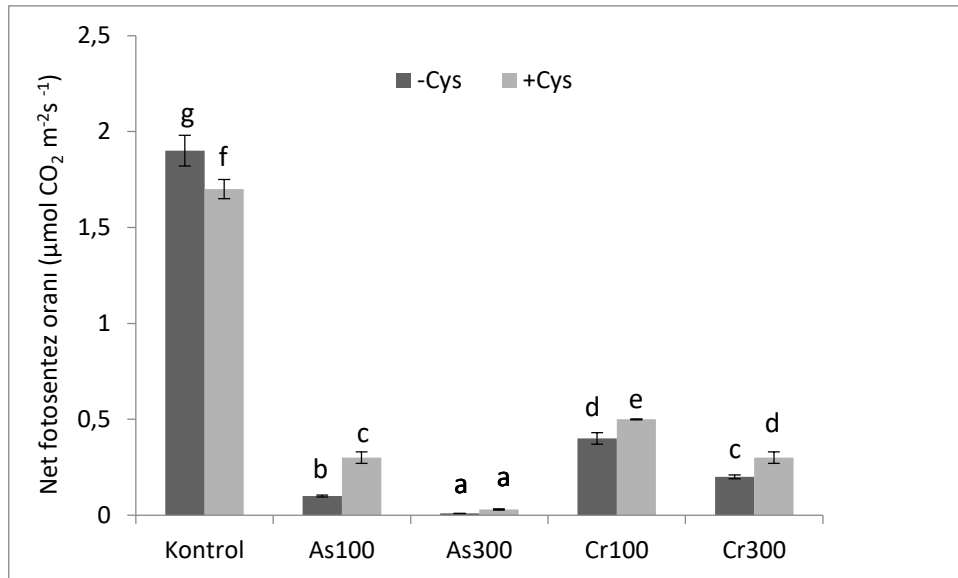


Şekil 3.18. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının transpirasyon oranına etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).

3.1.15. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Net Fotosentez Oranına Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 μM ve 300 μM) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 μM) uygulamasının net fotosentez oranına etkisine ilişkin sonuçlar Şekil 3.19’da verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının net fotosentez oranına etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Buna göre en yüksek net fotosentez oranı kontrol grubunda belirlenirken, en düşük net fotosentez oranı 300 μM As konsantrasyonunda kaydedilmiştir. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda %95 ve 300 μM As konsantrasyonunda %99 oranında azalma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM Cr konsantrasyonunda %79 ve 300 μM Cr konsantrasyonunda %90 oranında azalma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin net fotosentez oranı üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda 3 kat artma kaydedilirken, 300 μM As konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir. Cys’in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μM Cr konsantrasyonunda %25 ve 300 μM Cr konsantrasyonunda %50 oranında artma kaydedilmiştir.



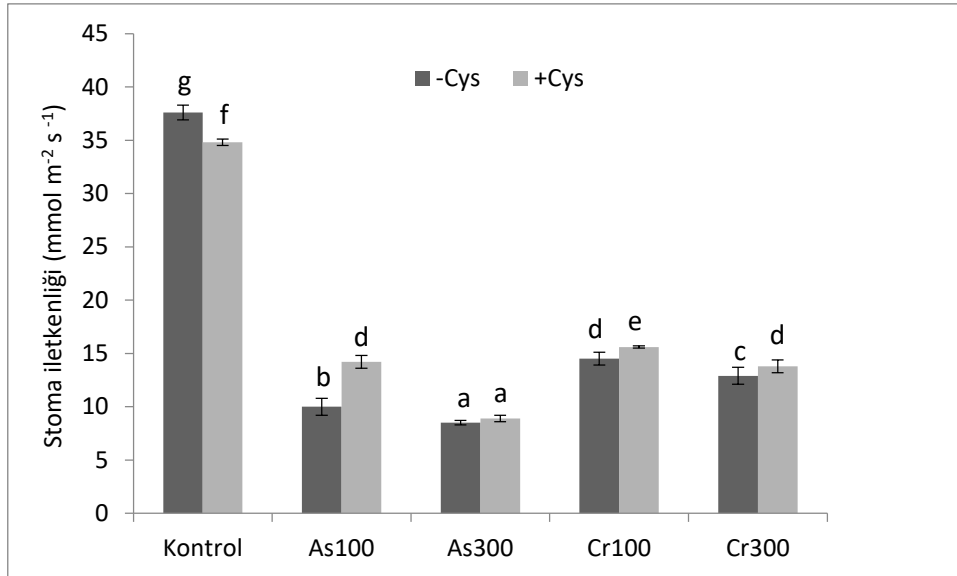
Şekil 3.19. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının net fotosentez oranına etkisi.

Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).

3.1.16. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Stoma İletkenliğine Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 μM ve 300 μM) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 μM) uygulamasının stoma iletkenliğine etkisine ilişkin sonuçlar Şekil 3.20’de verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının stoma iletkenliğine etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Buna göre en yüksek stoma iletkenliği kontrol grubunda belirlenirken, en düşük stoma iletkenliği 300 μM As konsantrasyonunda kaydedilmiştir. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda %73 ve 300 μM As konsantrasyonunda %77 oranında azalma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM Cr konsantrasyonunda %61 ve 300 μM Cr konsantrasyonunda %66 oranında azalma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin stoma iletkenliği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda %42 oranında artma kaydedilirken, 300 μM As konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir. Cys’in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μM Cr konsantrasyonunda %8 ve 300 μM Cr konsantrasyonunda %7 oranında artma kaydedilmiştir.

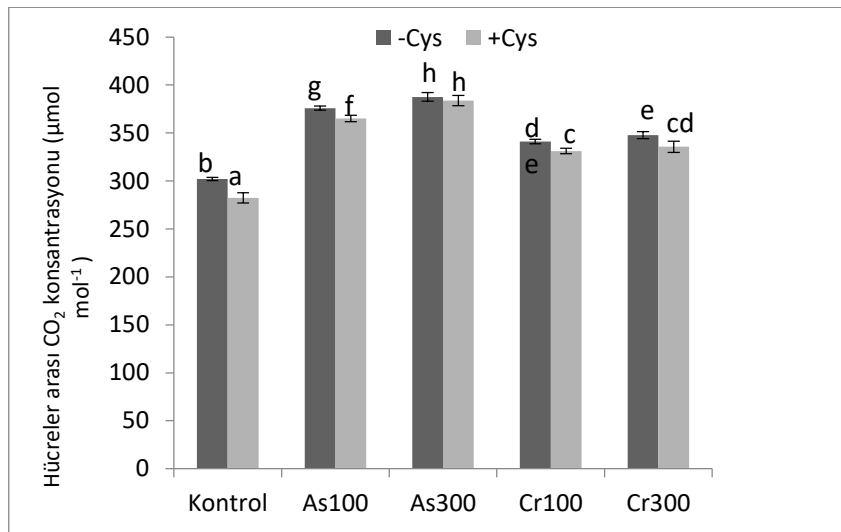


Şekil 3.20. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının stoma iletkenliğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).

3.1.17. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Hücreler Arası Karbondioksit Konsantrasyonuna Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 μM ve 300 μM) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğinde foliar Cys (300 μM) uygulamasının hücreler arası CO_2 konsantrasyonuna etkisine ilişkin sonuçlar Şekil 3.21’de verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının hücreler arası CO_2 konsantrasyonuna etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Buna göre en düşük hücreler arası CO_2 konsantrasyonu Cys uygulanan gruplarda belirlenirken, en yüksek hücreler arası CO_2 konsantrasyonu 300 μM As konsantrasyonunda kaydedilmiştir. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda %25 ve 300 μM As konsantrasyonunda %28 oranında artma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM Cr konsantrasyonunda %13 ve 300 μM Cr konsantrasyonunda %15 oranında artma belirlenmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin hücreler arası CO_2 konsantrasyonu üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda %4 oranında azalma kaydedilirken, 300 μM As konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir. Cys’ın Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μM Cr konsantrasyonunda %3 ve 300 μM Cr konsantrasyonunda %4 oranında azalma kaydedilmiştir.



Şekil 3.21. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının hücreler arası karbondioksit konsantrasyonuna etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).

3.1.18. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Kökte Element İçeriğine Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 μ M ve 300 μ M) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 μ M) uygulamasının kökte Ca, K, Fe, Mg içeriklerine etkisine ilişkin sonuçlar Çizelge 3.1’de verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının kökte element içeriğine etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$).

Kökte en yüksek Ca içeriği 300 μ M As konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük Ca içeriği 100 μ M Cr konsantrasyonunda kaydedilmiştir. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında her iki As (100-300 μ M) konsantrasyonunda da önemli miktarda artma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M Cr konsantrasyonunda azalma ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda ise önemli miktarda artma kaydedilmiştir. Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin kök Ca içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında her iki As (100-300 μ M) konsantrasyonunda da azalma belirlenmiştir. Cys’in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla her iki Cr (100-300 μ M) konsantrasyonunda da artma kaydedilmiştir.

Kökte en yüksek K içeriği Cys uygulanan gruplarda belirlenirken, en düşük K içeriği 100 μ M Cr konsantrasyonunda kaydedilmiştir. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda azalma ve 300 μ M As konsantrasyonunda artma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M Cr konsantrasyonunda azalma ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda ise önemli miktarda artma kaydedilmiştir. Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin kök K içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda artma ve 300 μ M As konsantrasyonunda azalma belirlenmiştir. Cys’in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda artma ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda azalma kaydedilmiştir.

Kökte en yüksek Mg içeriği 300 μ M As konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük Mg içeriği Cys+100 μ M Cr konsantrasyonunda kaydedilmiştir. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında her iki As (100-300 μ M) konsantrasyonunda da

önemli miktarda artma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 µM Cr konsantrasyonunda azalma ve 300 µM Cr konsantrasyonunda önemli miktarda artma kaydedilmiştir. Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin kök Mg içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As ve Cr uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında her iki As ve Cr (100-300 µM) konsantrasyonu içinde önemli miktarda azalma kaydedilmiştir.

Kökte en yüksek Fe içeriği 300 µM As konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük Fe içeriği kontrol grubunda kaydedilmiştir. As ve Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında her iki As ve Cr (100-300 µM) konsantrasyonu içinde önemli miktarda artma belirlenmiştir. Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin kök Fe içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As ve Cr uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında her iki As ve Cr (100-300 µM) konsantrasyonu içinde önemli miktarda azalma kaydedilmiştir.

Çizelge 3.1. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kökte Ca, K, Mg ve Fe içeriğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

Uygulamalar	Ca (mg/kg)	K (mg/kg)	Mg (mg/kg)	Fe (mg/kg)
Kontrol	5835,0 $\pm$ 5 ^b	47906,7 $\pm$ 2,9 ^f	4576,7 $\pm$ 5,8 ^g	64,1 $\pm$ 1,5 ^a
100 µM As	16316,7 $\pm$ 5,8 ⁱ	43977,6 $\pm$ 4,1 ^d	6483,6 $\pm$ 25,5 ^h	1639,4 $\pm$ 2 ^g
300 µM As	17671,6 $\pm$ 7,7 ^j	56077,4 $\pm$ 14 ⁱ	8640,5 $\pm$ 10 ^j	3151,4 $\pm$ 1,1 ⁱ
100 µM Cr	3814 $\pm$ 0,2 ^a	12432 $\pm$ 2,1 ^b	2164,7 $\pm$ 17,5 ^e	743,4 $\pm$ 0,2 ^f
300 µM Cr	13250,2 $\pm$ 3,1 ^d	52133,8 $\pm$ 1,7 ^h	6739,7 $\pm$ 20,5 ⁱ	2066,4 $\pm$ 0,2 ^h
Cys	11573,3 $\pm$ 11,5 ^c	64215 $\pm$ 18 ^f	1048,8 $\pm$ 3,8 ^c	245,7 $\pm$ 1,4 ^d
Cys+100 µM As	13328,1 $\pm$ 29,8 ^e	45169,8 $\pm$ 9,8 ^e	995 $\pm$ 30,9 ^b	65 $\pm$ 1,3 ^a
Cys+300 µM As	15846,4 $\pm$ 23,6 ^h	36946,3 $\pm$ 15,8 ^c	2306,5 $\pm$ 38 ^f	118,5 $\pm$ 0,9 ^b
Cys+100 µM Cr	14969,1 $\pm$ 3,7 ^g	50530,1 $\pm$ 0,2 ^g	593,4 $\pm$ 6,4 ^a	165,9 $\pm$ 2,5 ^c
Cys+300 µM Cr	14236,6 $\pm$ 19,7 ^f	2208,8 $\pm$ 0,6 ^a	1307,7 $\pm$ 10,8 ^d	349,8 $\pm$ 0,2 ^e

3.1.19. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Gövdede Element İçeriğine Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 µM ve 300 µM) As ve Cr streslerine maruz kalan

fesleğinde foliar Cys (300 μ M) uygulamasının gövde dokusunda Ca, K, Fe, Mg içeriklerine etkisine ilişkin sonuçlar Çizelge 3.2’de verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının gövdede element içeriğine etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$).

Gövdede en yüksek Ca içeriği Cys+300 μ M Cr konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük Ca içeriği 300 μ M As konsantrasyonunda kaydedilmiştir. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda artma ve 300 μ M As konsantrasyonunda azalma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında her iki Cr (100-300 μ M) konsantrasyonunda da artma kaydedilmiştir. Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin gövde Ca içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmezken, 300 μ M As konsantrasyonunda artma kaydedilmiştir. Cys’in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda azalma ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda artma kaydedilmiştir.

Gövdede en yüksek K içeriği Cys+300 μ M Cr konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük K içeriği Cys+300 μ M As konsantrasyonunda kaydedilmiştir. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda artma ve 300 μ M As konsantrasyonunda azalma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında her iki Cr (100-300 μ M) konsantrasyonunda da artma kaydedilmiştir. Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin gövde K içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında her iki As (100-300 μ M) konsantrasyonunda da azalma belirlenmiştir. Cys’in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda azalma ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda artma kaydedilmiştir.

Gövdede en yüksek Mg içeriği Cys+100 μ M As konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük Mg içeriği 300 μ M Cr konsantrasyonunda kaydedilmiştir. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında her iki As (100-300 μ M) konsantrasyonunda da önemli miktarda artma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M Cr konsantrasyonunda artma ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda azalma kaydedilmiştir. Cys uygulamasının As ve Cr stresleri

altındaki fesleğenin gövde Mg içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında As (100-300 µM) konsantrasyonunda da artma belirlenmiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 µM Cr konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmezken, 300 µM Cr konsantrasyonunda artma kaydedilmiştir.

Gövdede en yüksek Fe içeriği Cys uygulanan gruplarda belirlenirken, en düşük Fe içeriği kontrol grubunda kaydedilmiştir. As ve Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında her iki As ve Cr (100-300 µM) konsantrasyonu içinde önemli miktarda artma belirlenmiştir. Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin gövde Fe içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 µM As konsantrasyonunda artma ve 300 µM As konsantrasyonunda azalma belirlenmiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 µM Cr konsantrasyonunda azalma ve 300 µM Cr konsantrasyonunda artma kaydedilmiştir.

Çizelge 3.2. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövde Ca, K, Mg ve Fe içeriğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).

Uygulamalar	Ca (mg/kg)	K (mg/kg)	Mg (mg/kg)	Fe (mg/kg)
Kontrol	16981,7 $\pm$ 4,7 ^b	30426,7 $\pm$ 20,8 ^c	2116,7 $\pm$ 5,8 ^d	24,7 $\pm$ 1 ^a
100 µM As	24519,3 $\pm$ 1,2 ^g	47731,4 $\pm$ 12,1 ^h	2354,5 $\pm$ 22,3 ^f	91,1 $\pm$ 0,2 ^e
300 µM As	10807,6 $\pm$ 4,2 ^a	24728,8 $\pm$ 11,8 ^b	2517,9 $\pm$ 7,1 ^h	279,5 $\pm$ 0,5 ^g
100 µM Cr	25753,4 $\pm$ 0,6 ^h	55750,4 $\pm$ 2,1 ⁱ	2418,1 $\pm$ 7,3 ^g	58,3 $\pm$ 0,06 ^c
300 µM Cr	19546,4 $\pm$ 1,5 ^c	37034,2 $\pm$ 7,2 ^e	1590,9 $\pm$ 13,3 ^b	50,5 $\pm$ 0,3 ^b
Cys	22633,6 $\pm$ 6,3 ^e	46619,1 $\pm$ 8,6 ^g	2685,8 $\pm$ 5,2 ⁱ	728,9 $\pm$ 2,6 ^j
Cys+100 µM As	24732,7 $\pm$ 6,4 ^g	45724,7 $\pm$ 17,5 ^f	2790,3 $\pm$ 30,9 ^c	382 $\pm$ 1 ^h
Cys+300 µM As	20243,3 $\pm$ 11,2 ^d	1287 $\pm$ 6,1 ^a	2609,3 $\pm$ 9 ^a	161,8 $\pm$ 0,5 ^f
Cys+100 µM Cr	23570 $\pm$ 4,6 ^f	36688,5 $\pm$ 2,5 ^d	2430,8 $\pm$ 18 ^g	49 $\pm$ 1 ^b
Cys+300 µM Cr	41154,6 $\pm$ 1,2 ⁱ	86366,7 $\pm$ 15,3 ^j	2200 $\pm$ 36,1 ^e	73 $\pm$ 1,5 ^d

3.1.20. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Yaprakta Element İçeriğine Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 μ M ve 300 μ M) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğinde foliar Cys (300 μ M) uygulamasının yaprakta Ca, K, Fe, Mg içeriklerine etkisine ilişkin sonuçlar Çizelge 3.3'te verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının yaprakta element içeriğine etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$).

Yaprakta en yüksek Ca içeriği Cys+100 μ M Cr konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük Ca içeriği kontrol uygulamasında kaydedilmiştir. As ve Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında her iki As ve Cr (100-300 μ M) konsantrasyonu içinde önemli miktarda artma kaydedilmiştir. Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin yaprak Ca içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda artma ve 300 μ M As konsantrasyonunda azalma belirlenmiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda artma ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda azalma kaydedilmiştir.

Yaprakta en yüksek K içeriği Cys+100 μ M Cr uygulamasında belirlenirken, en düşük K içeriği 300 μ M Cr konsantrasyonunda kaydedilmiştir. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında her iki As (100-300 μ M) konsantrasyonunda da önemli miktarda artma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M Cr konsantrasyonunda artma, 300 μ M Cr konsantrasyonunda azalma kaydedilmiştir. Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin yaprak K içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As ve Cr uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında her iki As ve Cr (100-300 μ M) konsantrasyonu içinde önemli miktarda artma kaydedilmiştir.

Yaprakta en yüksek Mg içeriği 300 μ M As konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük Mg içeriği Cys uygulanan gruplarda kaydedilmiştir. As ve Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında her iki As ve Cr (100-300 μ M) konsantrasyonu içinde önemli miktarda artma kaydedilmiştir. Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin yaprak Mg içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As ve Cr uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında her iki As ve Cr

(100-300 μM) konsantrasyonu içinde önemli miktarda azalma kaydedilmiştir.

Yaprakta en yüksek Fe içeriği 100 μM As konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük Fe içeriği Cys+300 μM As konsantrasyonunda kaydedilmiştir. As ve Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında her iki As ve Cr (100-300 μM) konsantrasyonu içinde önemli miktarda artma kaydedilmiştir. Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin yaprak Fe içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında her iki As (100-300 μM) konsantrasyonunda da azalma belirlenmiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μM Cr konsantrasyonunda artma ve 300 μM konsantrasyonunda azalma kaydedilmiştir.

Çizelge 3.3. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprakta Ca, K, Mg ve Fe içeriğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).

Uygulamalar	Ca (mg/kg)	K (mg/kg)	Mg (mg/kg)	Fe (mg/kg)
Kontrol	18943,3 $\pm$ 5,8 ^a	35258,7 $\pm$ 56,3 ^c	1936,7 $\pm$ 5,8 ^e	81,6 $\pm$ 0,7 ^d
100 μM As	28127 $\pm$ 14,7 ^d	40231,2 $\pm$ 11,8 ^f	4380 $\pm$ 10 ^h	236,6 $\pm$ 5,2 ⁱ
300 μM As	31262,1 $\pm$ 886,8 ^e	36690,7 $\pm$ 1,2 ^d	4448,3 $\pm$ 7,6 ⁱ	224,8 $\pm$ 0,2 ^g
100 μM Cr	31488,3 $\pm$ 3 ^{ef}	43148,5 $\pm$ 2,5 ^g	2927,7 $\pm$ 29,2 ^f	110,3 $\pm$ 0,2 ^e
300 μM Cr	26175,4 $\pm$ 1,4 ^{cd}	26426,2 $\pm$ 6,5 ^a	2995,9 $\pm$ 16,5 ^g	231 $\pm$ 0,6 ^h
Cys	34033,4 $\pm$ 15,4 ^f	54953,5 $\pm$ 5,6 ⁱ	11,9 $\pm$ 7,3 ^a	109,3 $\pm$ 1 ^e
Cys+100 μM As	32196,4 $\pm$ 1020,4 ^{ef}	51355,7 $\pm$ 17 ^h	1211 $\pm$ 21,5 ^d	31,3 $\pm$ 1,1 ^c
Cys+300 μM As	24461,4 $\pm$ 12,1 ^{bc}	37116,4 $\pm$ 6,3 ^e	235,1 $\pm$ 28,1 ^b	16,9 $\pm$ 0,6 ^a
Cys+100 μM Cr	47432,6 $\pm$ 6,1 ^g	82190,7 $\pm$ 27,2 ^j	574,1 $\pm$ 12,2 ^c	160 $\pm$ 3,5 ^f
Cys+300 μM Cr	22629,3 $\pm$ 3,2 ^b	32748,1 $\pm$ 7,3 ^b	557,9 $\pm$ 23,2 ^c	25,2 $\pm$ 0,2 ^b

3.1.21. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Arsenik ve Krom Birikimine Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 μM ve 300 μM) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 μM) uygulamasının kök, gövde ve yaprak dokularındaki As birikimine etkisine ilişkin sonuçlar Çizelge 3.4'te verilmiştir. Sonuçlar

değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının As birikimine etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Buna göre en yüksek As birikimi 300 μM As konsantrasyonunda kökte belirlenirken, en düşük As içeriği kontrol grubunda gövdede ve Cys uygulanan gruplarda yaprakta kaydedilmiştir. Her iki As (100-300 μM) konsantrasyonu için As birikimi kök>gövde>yaprak olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte 100 μM ve 300 μM As uygulaması ile fesleğende As konsantrasyonu sırasıyla kökte 2,228 ve 4,724 mg/kg, gövdede 0,266 ve 0,676 mg/kg ve yaprakta 0,137 ve 0,298 mg/kg olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 100 μM ve 300 μM As konsantrasyonunda fesleğen kökünde akümülatör potansiyeli ve toprak üstü kısımlara sınırlı As taşınımı gözlenmiştir.

Cys uygulamasının As stresi altındaki fesleğenin kök As içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda %91 ve 300 μM As konsantrasyonunda %90 oranında azalma belirlenmiştir. Cys, As alımı ve birikimi üzerinde inhibe edici etki göstermiştir.

Cys uygulamasının As stresi altındaki fesleğenin gövde As içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda %177 oranında artma ve 300 μM As konsantrasyonunda %39 oranında azalma belirlenmiştir.

Cys uygulamasının As stresi altındaki fesleğenin yaprak As içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda %25 oranında artma ve 300 μM As konsantrasyonunda %31 oranında azalma kaydedilmiştir.

Bu sonuçlardan yola çıkarak fesleğenin As ile kirli topraklardaki fitoremediasyon kapasitesinin değerlendirilmesi için formül yardımıyla TF değeri hesaplanmıştır. Buna göre, TF değeri 100 μM ve 300 μM As konsantrasyonunda sırasıyla $\text{TF}=0,12$ mg/kg ve $\text{TF}=0,14$ mg/kg olarak belirlenmiştir. Dışsal Cys uygulamasının transfer faktörü etkisine bakıldığında ise 100 μM ve 300 μM As için sırasıyla $\text{TF}=3,5$ mg/kg ve $\text{TF}=0,9$ mg/kg olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 3.4. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kök, gövde ve yaprakta arsenik birikimine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).

Uygulamalar	As (mg/kg)		
	Kök	Gövde	Yaprak
Kontrol	0,049 $\pm$ 0,0006 ^a	0,004 $\pm$ 0,0006 ^a	0,011 $\pm$ 0,0006 ^a
100 μ M As	2,228 $\pm$ 0,0361 ^e	0,266 $\pm$ 0,0015 ^c	0,137 $\pm$ 0,0031 ^b
300 μ M As	4,724 $\pm$ 0,0015 ^f	0,676 $\pm$ 0,0157 ^e	0,298 $\pm$ 0,0015 ^e
Cys	0,155 $\pm$ 0,0006 ^b	0,136 $\pm$ 0,001 ^b	0,004 $\pm$ 0,0026 ^a
Cys+100 μ M As	0,212 $\pm$ 0,0026 ^c	0,737 $\pm$ 0,009 ^f	0,171 $\pm$ 0,0025 ^c
Cys+300 μ M As	0,471 $\pm$ 0,006 ^d	0,415 $\pm$ 0,011 ^d	0,207 $\pm$ 0,0142 ^d

Farklı konsantrasyonlarda (100 μ M ve 300 μ M) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 μ M) uygulamasının fesleğen fidelerinin kök, gövde ve yaprak dokularındaki Cr birikimine etkisine ilişkin sonuçlar Çizelge 3.5'te verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının Cr birikimine etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Buna göre en yüksek Cr birikimi 300 μ M Cr konsantrasyonunda kökte belirlenirken, en düşük Cr içeriği Cys uygulanan gruplarda kökte ve Cys+300 μ M Cr konsantrasyonunda yaprakta kaydedilmiştir. Her iki Cr (100-300 μ M) konsantrasyonu için Cr birikimi kök>gövde>yaprak olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte 100 μ M ve 300 μ M Cr uygulaması ile fesleğende Cr konsantrasyonu sırasıyla kökte 178,4 ve 1075,7 mg/kg, gövde de 37,1 ve 66,7 mg/kg ve yaprakta 24,3 ve 41 mg/kg olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 100 μ M ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda fesleğen kökünde akümülatör potansiyeli ve toprak üstü kısımlara sınırlı Cr taşınımı gözlenmiştir.

Cys uygulamasının Cr stresi altındaki fesleğenin kök Cr içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına Cr uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M Cr konsantrasyonunda %99 ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %96 oranında azalma belirlenmiştir. Cys, Cr alımı ve birikimi üzerinde inhibe edici etki göstermiştir.

Cys uygulamasının Cr stresi altındaki fesleğenin gövde Cr içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına Cr uygulanan bitkiler ile

karşılaştırıldığında 100 µM Cr konsantrasyonunda %99 oranında azalma ve 300 µM Cr konsantrasyonunda %2 oranında artma belirlenmiştir.

Cys uygulamasının Cr stresi altındaki fesleğenin yaprak Cr içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına Cr uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında her iki Cr (100-300 µM) konsantrasyonunda da %99 oranında azalma kaydedilmiştir.

Bu sonuçlardan yola çıkarak fesleğenin Cr ile kirli topraklardaki fitoremediasyon kapasitesinin değerlendirilmesi için TF değeri 100 µM ve 300 µM Cr konsantrasyonunda sırasıyla TF= 0,21 mg/kg ve TF=0,06 mg/kg olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte dışsal Cys uygulamasının transfer faktörü etkisine bakıldığında ise 100 µM ve 300 µM Cr için sırasıyla TF=1 mg/kg ve TF=1,6 mg/kg olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 3.5. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kök, gövde ve yaprakta krom birikimine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama ± standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).

Uygulamalar	Cr (mg/kg)		
	Kök	Gövde	Yaprak
Kontrol	0,082 ± 0,0012 ^a	0,15 ± 0,002 ^a	0,148 ± 0,0006 ^b
100 µM Cr	178,37 ± 0,23 ^c	37,088 ± 0,19 ^c	24,328 ± 0,026 ^c
300 µM Cr	1075,671 ± 0,96 ^d	66,666 ± 0,95 ^d	41,012 ± 0,022 ^d
Cys	0,002 ± 0,001 ^a	1,64 ± 0,006 ^b	0,003 ± 0,0015 ^a
Cys+100 µM Cr	0,0047 ± 0,0012 ^a	0,003 ± 0,001 ^a	0,0023 ± 0,0015 ^a
Cys+300 µM Cr	43,69 ± 0,69 ^b	68 ± 0,53 ^c	0,002 ± 0,001 ^a

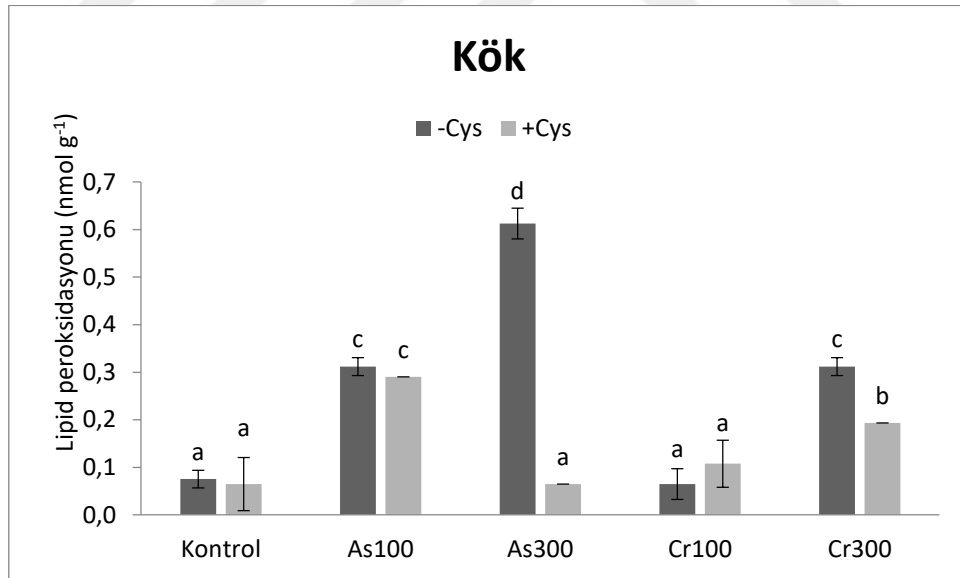
3.2. ARSENİK, KROM VE SİSTEİN UYGULAMALARININ FESLEĞEN BİTKİSİNDE BİYOKİMYASAL PARAMETRELERE ETKİSİ

3.2.1. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Lipid Peroksidasyonuna Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 µM ve 300 µM) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 µM) uygulamasının kök, gövde ve yaprakta TBARS içeriğine etkisine ilişkin sonuçlar Şekil 3.22, 3.23 ve 3.24'te verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının TBARS içeriğine etkisi istatistiksel

olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Buna göre kökte en yüksek TBARS içeriği 300 μM As konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük TBARS içeriği Cys uygulanan gruplarda kaydedilmiştir (Şekil 3.22). As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda %288 ve 300 μM As konsantrasyonunda %663 oranında artma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM Cr konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmezken, 300 μM Cr konsantrasyonunda %288 oranında artma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin kök TBARS içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmezken, 300 μM As konsantrasyonunda %90 oranında azalma belirlenmiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μM Cr konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmezken, 300 μM Cr konsantrasyonunda %39 oranında azalma kaydedilmiştir.

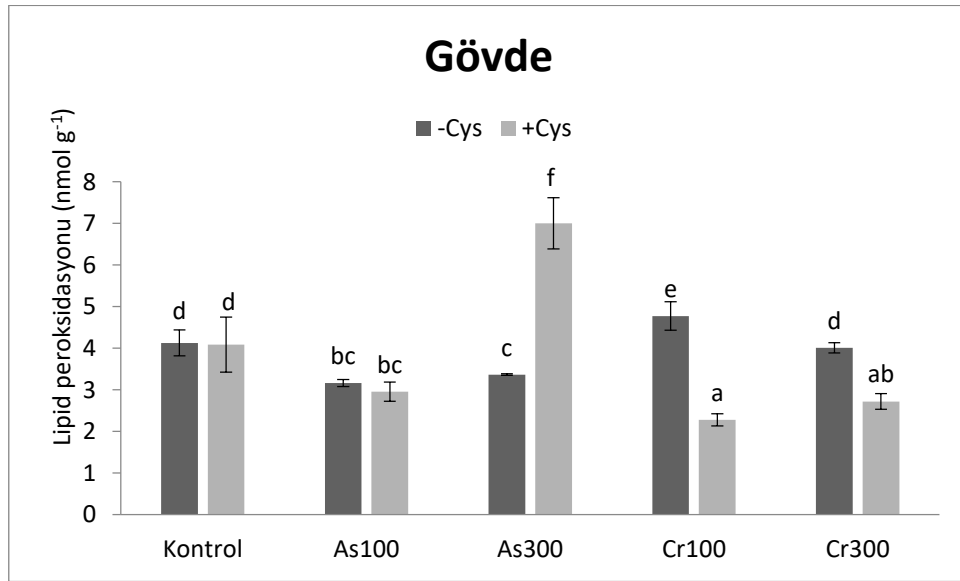


Şekil 3.22. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kökte lipid peroksidasyonuna etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).

Gövdede en yüksek TBARS içeriği Cys+300 μM As konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük TBARS içeriği Cys+100 μM Cr konsantrasyonunda kaydedilmiştir (Şekil 3.23). As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM As

konsantrasyonunda %23 ve 300 μM As konsantrasyonunda %18 oranında azalma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM Cr konsantrasyonunda %15 oranında artma kaydedilirken, 300 μM Cr konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir.

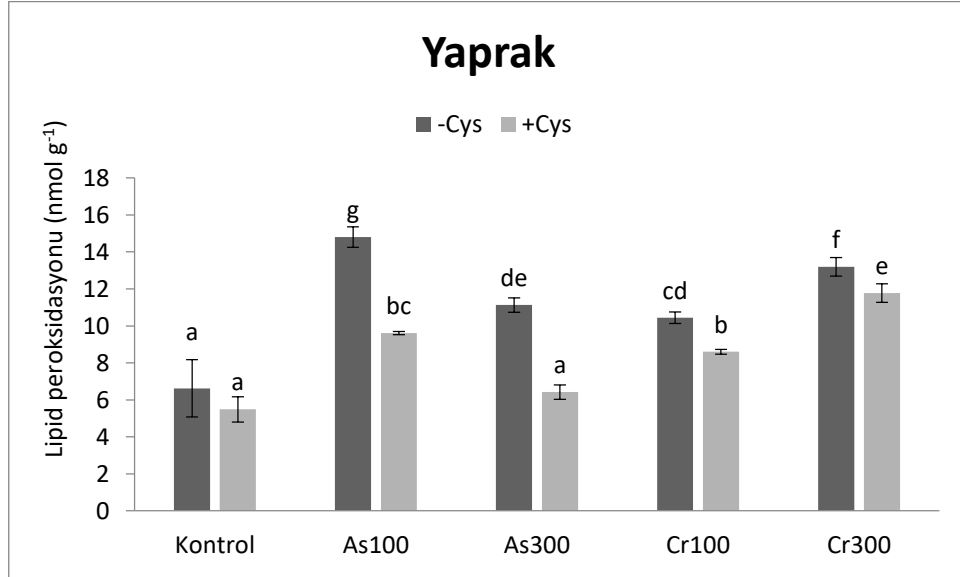
Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin gövde TBARS içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmezken, 300 μM As konsantrasyonunda %108 oranında artma kaydedilmiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μM Cr konsantrasyonunda %52 ve 300 μM Cr konsantrasyonunda %32 oranında azalma kaydedilmiştir.



Şekil 3.23. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövdede lipid peroksidasyonuna etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

Yaprakta en yüksek TBARS içeriği 100 μM As konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük TBARS içeriği Cys uygulanan gruplarda kaydedilmiştir (Şekil 3.24). As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda %124 ve 300 μM As konsantrasyonunda %68 oranında artma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM Cr konsantrasyonunda %58 ve 300 μM Cr konsantrasyonunda %99 oranında artma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin yaprak TBARS içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda %35 ve 300 μM As konsantrasyonunda %42 oranında azalma belirlenmiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μM Cr konsantrasyonunda %18 ve 300 μM Cr konsantrasyonunda %11 oranında azalma kaydedilmiştir.



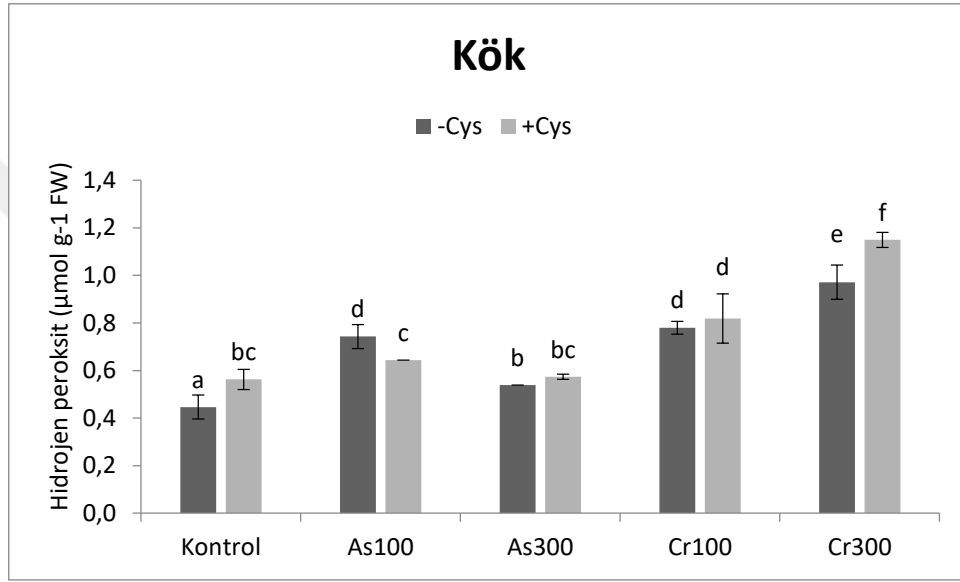
Şekil 3.24. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprakta lipid peroksidasyonuna etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

3.2.2. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Hidrojen Peroksit İçeriğine Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 μM ve 300 μM) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 μM) uygulamasının kök, gövde ve yaprakta H_2O_2 içeriğine etkisine ilişkin sonuçlar Şekil 3.25, 3.26 ve 3.27'de verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının H_2O_2 içeriğine etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,05$). Buna göre kökte en yüksek H_2O_2 içeriği Cys+300 μM Cr konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük H_2O_2 içeriği kontrol grubunda kaydedilmiştir (Şekil 3.25). As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda %75 ve 300 μM As konsantrasyonunda %25 oranında artma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM Cr konsantrasyonunda %100 ve 300 μM Cr

konsantrasyonunda %150 oranında artma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin kök H_2O_2 içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda %14 oranında azalma kaydedilirken, 300 μM As konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μM Cr konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmezken, 300 μM Cr konsantrasyonunda %10 oranında artma kaydedilmiştir.

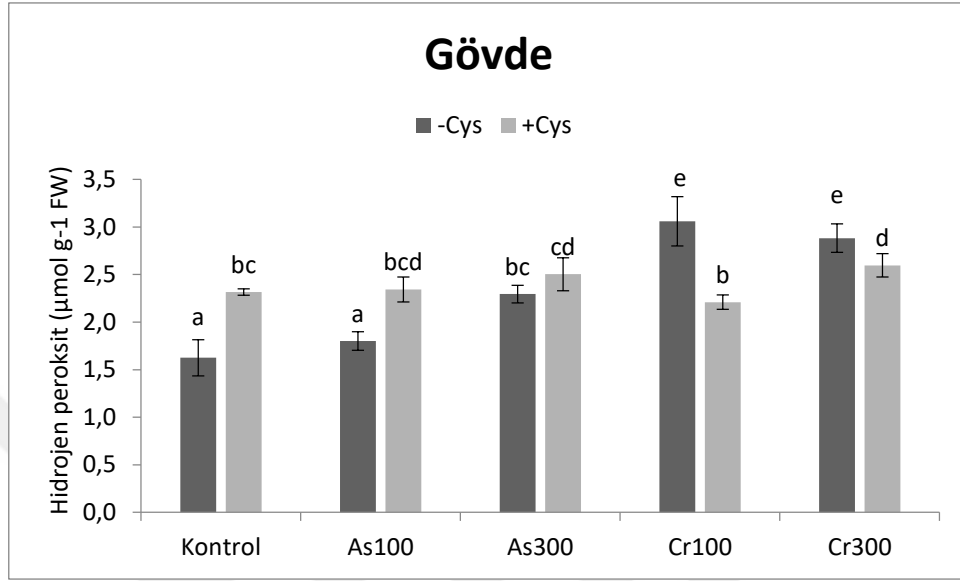


Şekil 3.25. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kökte hidrojen peroksit içeriğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

Gövdede en yüksek H_2O_2 içeriği 100 μM Cr konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük H_2O_2 içeriği kontrol grubunda kaydedilmiştir (Şekil 3.26). As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmezken, 300 μM As konsantrasyonunda %44 oranında artma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM Cr konsantrasyonunda %94 ve 300 μM Cr konsantrasyonunda %81 oranında artma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin gövde H_2O_2 içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda %28 oranında artma kaydedilirken,

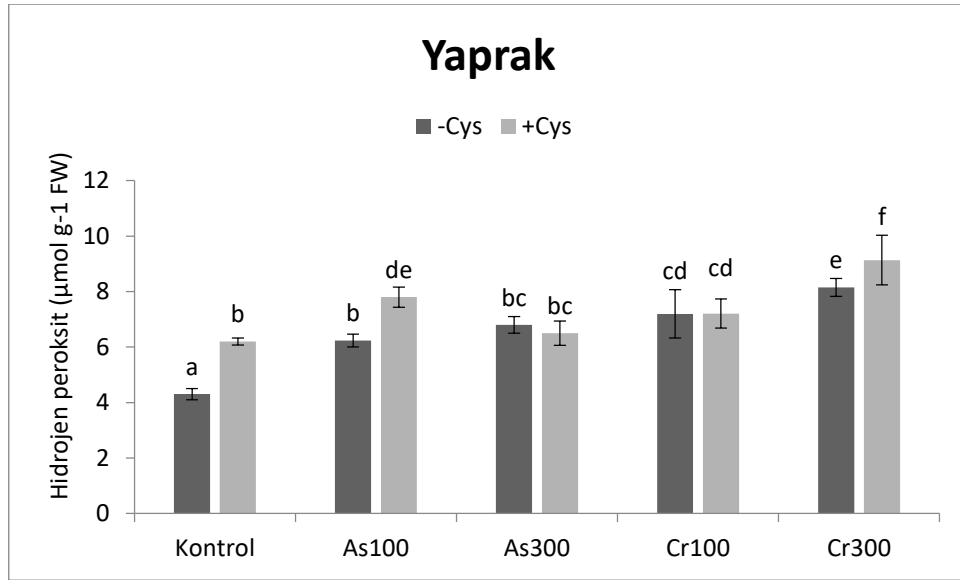
300 μM As konsantrasyonunda konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μM Cr konsantrasyonunda %29 ve 300 μM Cr konsantrasyonunda %10 oranında azalma kaydedilmiştir.



Şekil 3.26. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövdede hidrojen peroksit içeriğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

Yaprakta en yüksek H_2O_2 içeriği Cys+300 μM Cr konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük H_2O_2 içeriği kontrol grubunda kaydedilmiştir (Şekil 3.27). As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda %44 ve 300 μM As konsantrasyonunda %58 oranında artma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μM Cr konsantrasyonunda %67 ve 300 μM Cr konsantrasyonunda %88 oranında artma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin yaprak H_2O_2 içeriği üzerine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda %26 artma kaydedilirken, 300 μM As konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μM Cr konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmezken, 300 μM Cr konsantrasyonunda %12 oranında artma kaydedilmiştir.

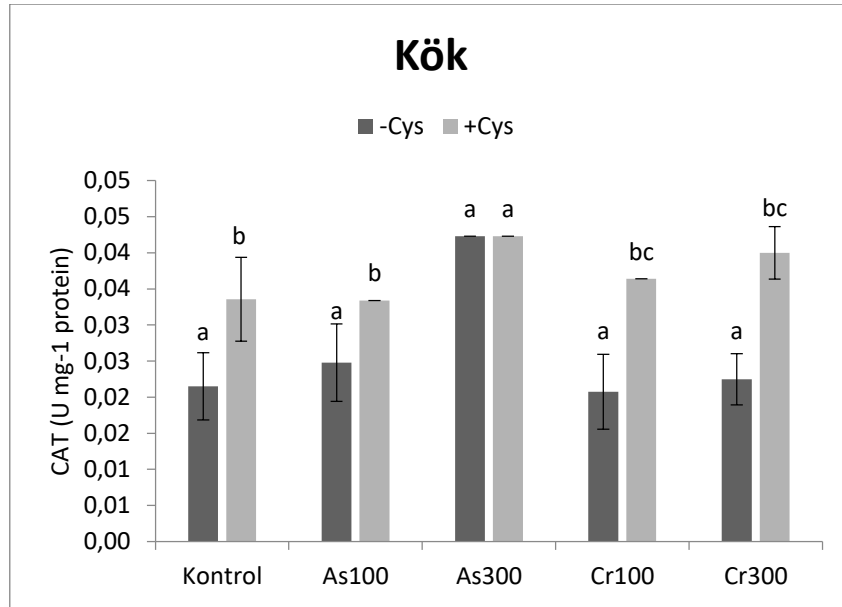


Şekil 3.27. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprakta hidrojen peroksit içeriğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

3.2.3. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Katalaz Aktivitesine Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 μM ve 300 μM) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 μM) uygulamasının kök, gövde ve yaprakta CAT aktivitesine etkisine ilişkin sonuçlar Şekil 3.28, 3.29 ve 3.30'da verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının CAT aktivitesine etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,05$). Buna göre kökte en yüksek CAT aktivitesi Cys+300 μM As konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük CAT aktivitesi kontrol grubunda kaydedilmiştir (Şekil 3.28). As ve Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında her iki As ve Cr (100-300 μM) konsantrasyonunda da istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin kök CAT aktivitesine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μM As konsantrasyonunda %32 oranında artma kaydedilirken, 300 μM As konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μM Cr konsantrasyonunda %71 ve 300 μM Cr konsantrasyonunda %82 oranında artma kaydedilmiştir.

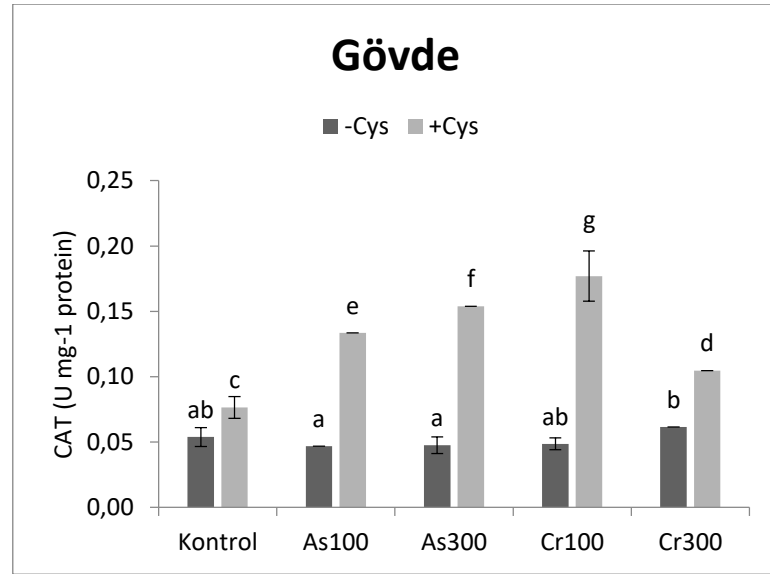


Şekil 3.28. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kökte katalaz aktivitesine etkisi.

Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

Gövdede en yüksek CAT aktivitesi Cys+100 μ M Cr konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük CAT aktivitesi 100 μ M As konsantrasyonunda kaydedilmiştir (Şekil 3.29). As ve Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında her iki As ve Cr (100-300 μ M) konsantrasyonunda da istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir.

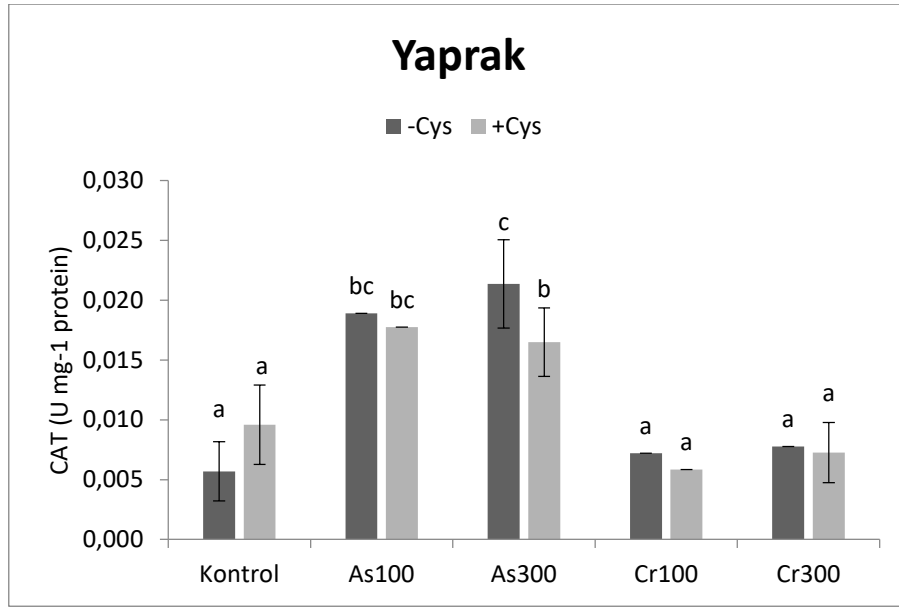
Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin gövde CAT aktivitesine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %185 ve 300 μ M As konsantrasyonunda %221 oranında artma belirlenmiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda %261 ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %69 oranında artma kaydedilmiştir.



Şekil 3.29. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövdede katalaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

Yaprakta en yüksek CAT aktivitesi 300 μ M As konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük CAT aktivitesi kontrol grubunda kaydedilmiştir (Şekil 3.30). As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %217 ve 300 μ M As konsantrasyonunda %250 oranında artma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında her iki Cr (100-300 μ M) konsantrasyonunda da istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin yaprak CAT aktivitesine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmezken, 300 μ M As konsantrasyonunda %24 oranında azalma belirlenmiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla her iki Cr (100-300 μ M) konsantrasyonunda da istatistiksel olarak önemli bir fark kaydedilmemiştir.



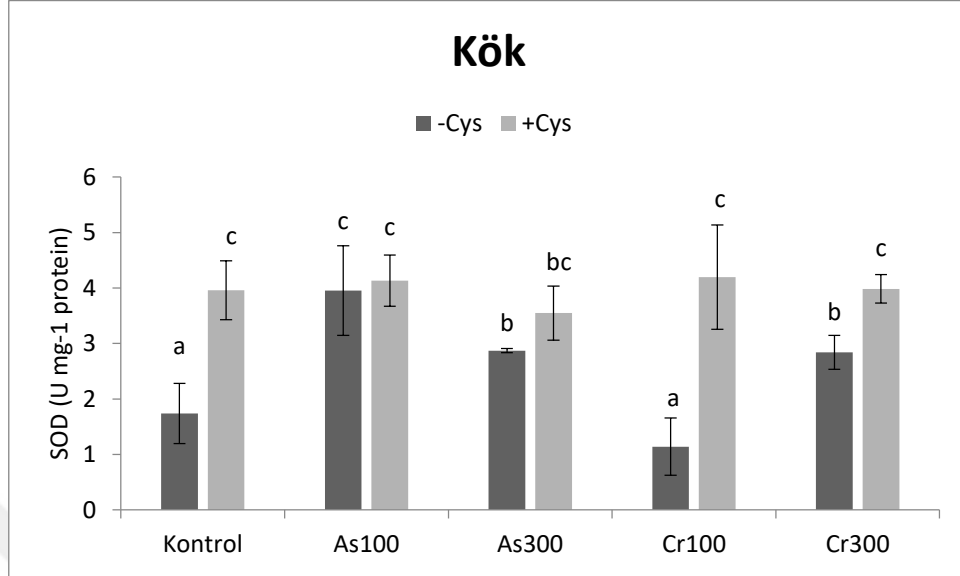
Şekil 3.30. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprakta katalaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

3.2.4. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Süperoksit Dismutaz Aktivitesine Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 μ M ve 300 μ M) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 μ M) uygulamasının kök, gövde ve yaprakta SOD aktivitesine etkisine ilişkin sonuçlar Şekil 3.31, 3.32 ve 3.33’de verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının SOD aktivitesine etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,05$). Buna göre kökte en yüksek SOD aktivitesi Cys+100 μ M Cr konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük SOD aktivitesi 100 μ M Cr konsantrasyonunda kaydedilmiştir (Şekil 3.31). As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %127 ve 300 μ M As konsantrasyonunda %65 oranında artma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M Cr konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark kaydedilmezken, 300 μ M Cr konsantrasyonunda %63 oranında artma belirlenmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin kök SOD aktivitesine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında her iki As (100-300 μ M) konsantrasyonunda da istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir. Cys’in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine

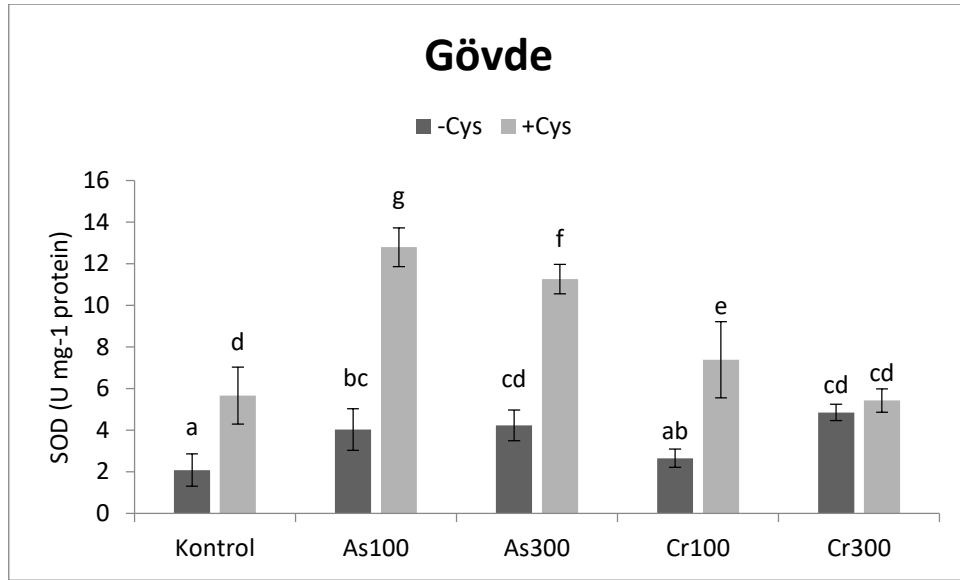
bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda %268 ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %40 oranında artma kaydedilmiştir.



Şekil 3.31. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kökte süperoksit dismutaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

Gövdede en yüksek SOD aktivitesi Cys+100 μ M As konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük SOD aktivitesi kontrol grubunda kaydedilmiştir (Şekil 3.32). As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %93 ve 300 μ M As konsantrasyonunda %102 oranında artma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M Cr konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmezken, 300 μ M Cr konsantrasyonunda %133 oranında artma belirlenmiştir.

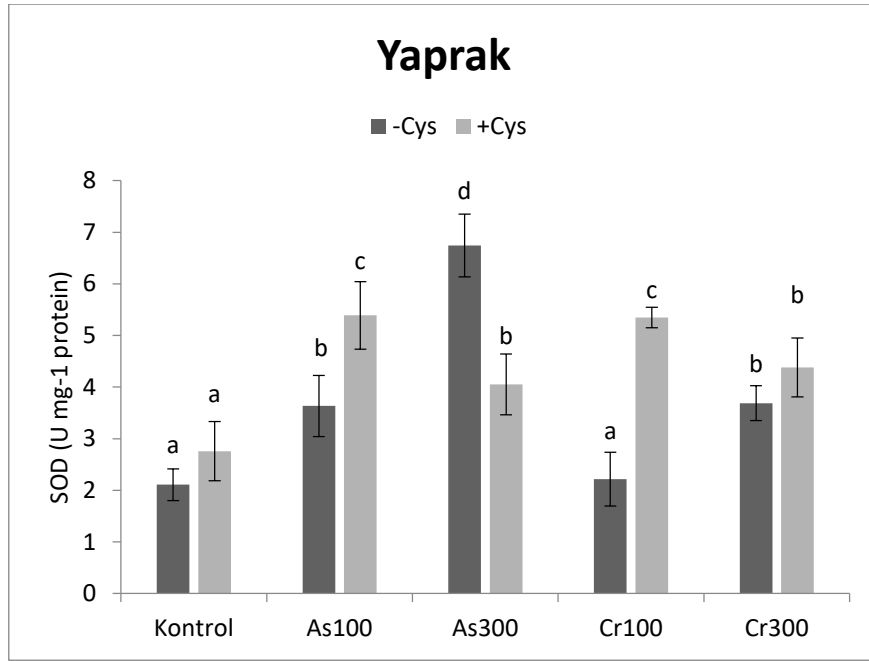
Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin gövde SOD aktivitesine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %217 ve 300 μ M As konsantrasyonunda %166 oranında artma belirlenmiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda %178 oranında artma kaydedilirken, 300 μ M Cr konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir.



Şekil 3.32. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövdede süperoksit dismutaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

Yaprakta en yüksek SOD aktivitesi 300 μ M As konsantrasyonunda elde edilirken, en düşük SOD aktivitesi kontrol grubunda kaydedilmiştir (Şekil 3.33). As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %72 ve 300 μ M As konsantrasyonunda %219 oranında artma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M Cr konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmezken, 300 μ M Cr konsantrasyonunda %75 oranında artma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin yaprak SOD aktivitesine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %48 oranında artma ve 300 μ M As konsantrasyonunda %40 azalma belirlenmiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda %142 oranında artma kaydedilirken, 300 μ M Cr konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir.



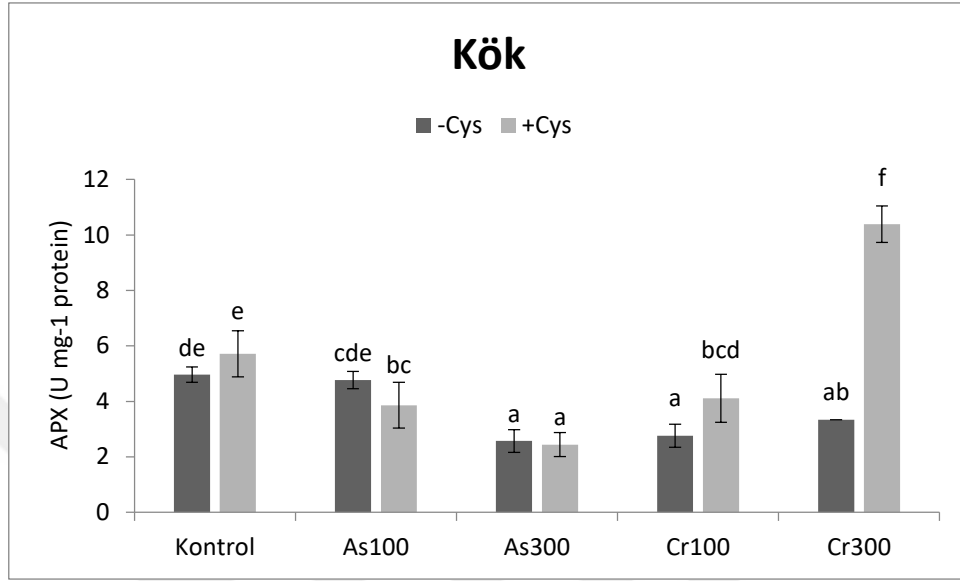
Şekil 3.33. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprakta süperoksit dismutaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

3.2.5. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Askorbat Peroksidaz Aktivitesine Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 μ M ve 300 μ M) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 μ M) uygulamasının kök, gövde ve yaprakta APX aktivitesine etkisine ilişkin sonuçlar Şekil 3.34, 3.35 ve 3.36'da verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının APX aktivitesine etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,05$). Buna göre kökte en yüksek APX aktivitesi Cys+300 μ M Cr konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük APX aktivitesi Cys+300 μ M As konsantrasyonunda kaydedilmiştir (Şekil 3.34). As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmezken, 300 μ M As konsantrasyonunda %48 oranında azalma belirlenmiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda %44 ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %33 oranında azalma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin kök APX aktivitesine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %19 oranında azalma kaydedilirken,

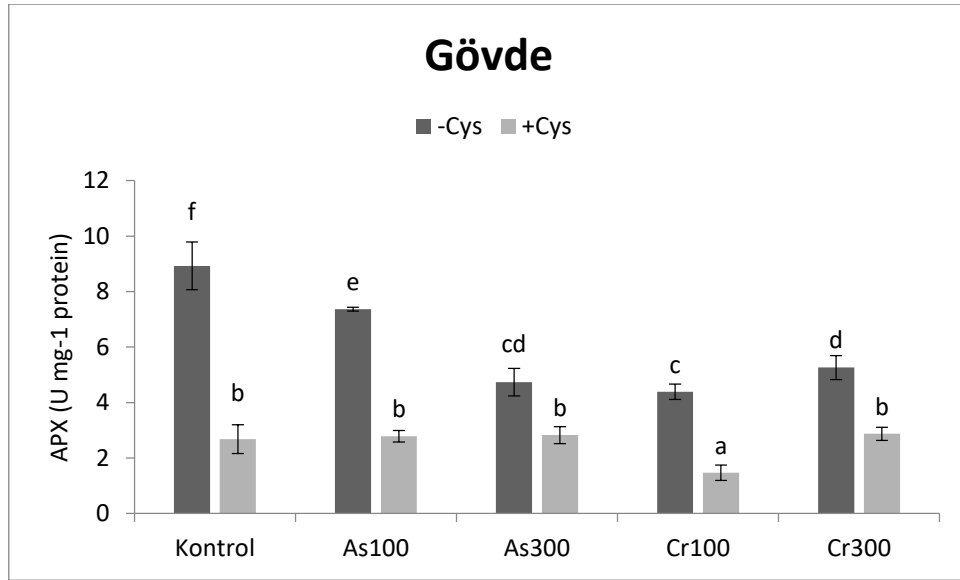
300 μ M As konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda %49 ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %211 oranında artma kaydedilmiştir.



Şekil 3.34. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kökte askorbat peroksidaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

Gövdede en yüksek APX aktivitesi kontrol grubunda belirlenirken, en düşük APX aktivitesi Cys+100 μ M Cr konsantrasyonunda kaydedilmiştir (Şekil 3.35). As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %17 ve 300 μ M As konsantrasyonunda %47 oranında azalma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M Cr konsantrasyonunda %51 ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %41 oranında azalma kaydedilmiştir.

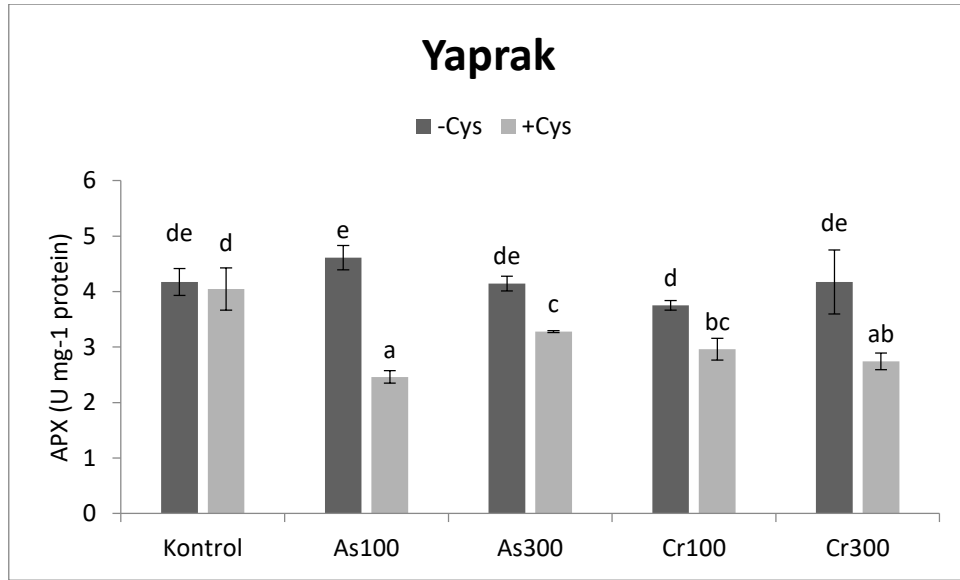
Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin gövde APX aktivitesine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %62 ve 300 μ M As konsantrasyonunda %40 oranında azalma belirlenmiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda %67 ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %45 oranında azalma kaydedilmiştir.



Şekil 3.35. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövdede askorbat peroksidaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

Yaprakta en yüksek APX aktivitesi 100 μ M As konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük APX aktivitesi Cys+100 μ M As konsantrasyonunda kaydedilmiştir (Şekil 3.36). As ve Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında her iki As ve Cr (100-300 μ M) konsantrasyonunda da istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin yaprak APX aktivitesine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %47 oranında ve 300 μ M As konsantrasyonunda %21 oranında azalma belirlenmiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda %21 ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %34 oranında azalma kaydedilmiştir.



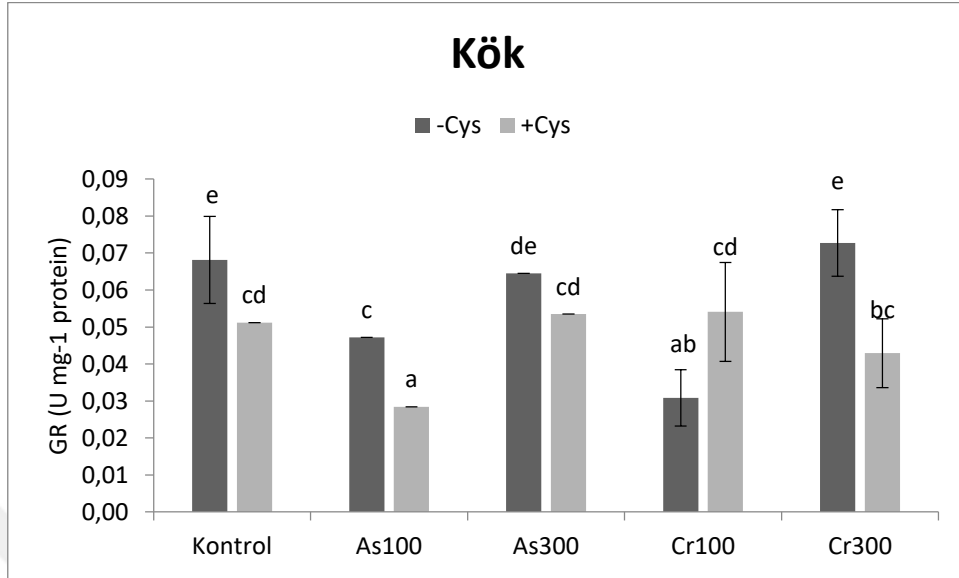
Şekil 3.36. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprakta askorbat peroksidaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

3.2.6. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Glutasyon Redüktaz Aktivitesine Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 μ M ve 300 μ M) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 μ M) uygulamasının kök, gövde ve yaprakta GR aktivitesine etkisine ilişkin sonuçlar Şekil 3.37, 3.38 ve 3.39’da verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının GR aktivitesine etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,05$). Buna göre kökte en yüksek GR aktivitesi 300 μ M Cr konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük GR aktivitesi Cys+100 μ M As konsantrasyonunda kaydedilmiştir (Şekil 3.37). As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %31 oranında azalma kaydedilirken, 300 μ M As konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M Cr konsantrasyonunda %54 oranında azalma kaydedilirken, 300 μ M Cr konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin kök GR aktivitesine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %40 oranında azalma kaydedilirken ve 300 μ M As konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir. Cys’in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr

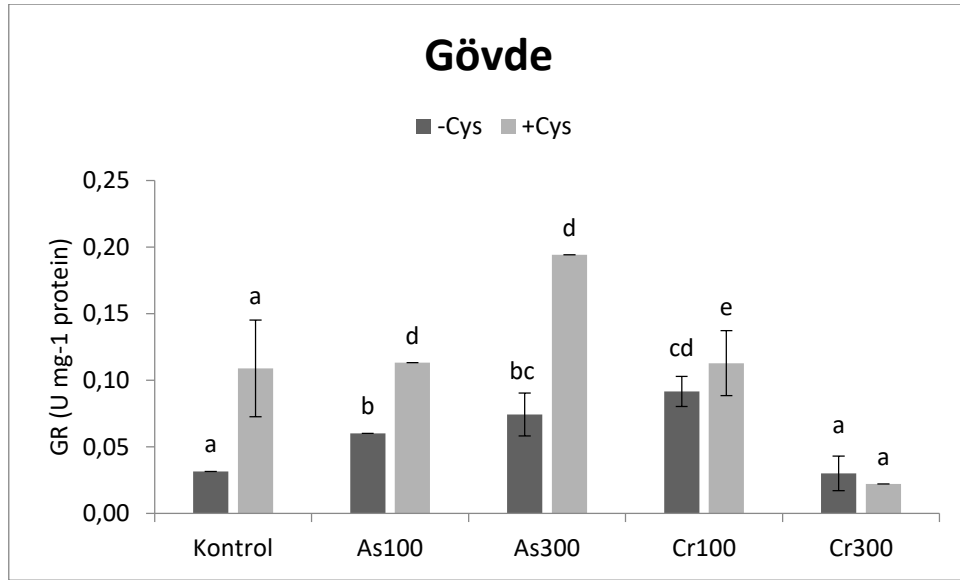
uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda %74 oranında artma ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %41 oranında azalma kaydedilmiştir.



Şekil 3.37. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kökte glutatyon redüktaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

Gövdede en yüksek GR aktivitesi Cys+300 μ M As konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük GR aktivitesi Cys+300 μ M Cr konsantrasyonunda kaydedilmiştir (Şekil 3.38). As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %88 ve 300 μ M As konsantrasyonunda %131 oranında artma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M Cr konsantrasyonunda %188 oranında artma belirlenirken, 300 μ M Cr konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark kaydedilmemiştir.

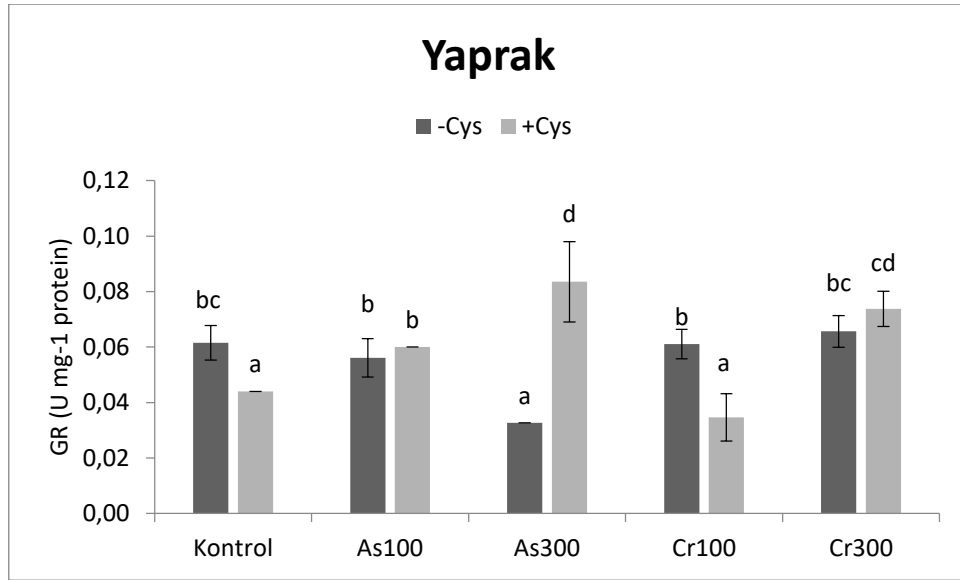
Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin gövde GR aktivitesine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %88 ve 300 μ M As konsantrasyonunda %162 oranında artma belirlenmiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda %23 oranında artma kaydedilirken, 300 μ M Cr konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark kaydedilmemiştir.



Şekil 3.38. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövdede glutatyon redüktaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

Yaprakta en yüksek GR aktivitesi Cys+300 μ M As konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük GR aktivitesi 300 μ M As konsantrasyonunda kaydedilmiştir (Şekil 3.39). As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmezken, 300 μ M As konsantrasyonunda %47 oranında azalma kaydedilmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında her iki Cr (100-300 μ M) konsantrasyonunda da istatistiksel olarak önemli bir fark kaydedilmemiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin yaprak GR aktivitesine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark kaydedilmezken, 300 μ M As konsantrasyonunda %155 oranında artma belirlenmiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda %43 oranında azalma kaydedilirken, 300 μ M Cr konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir.

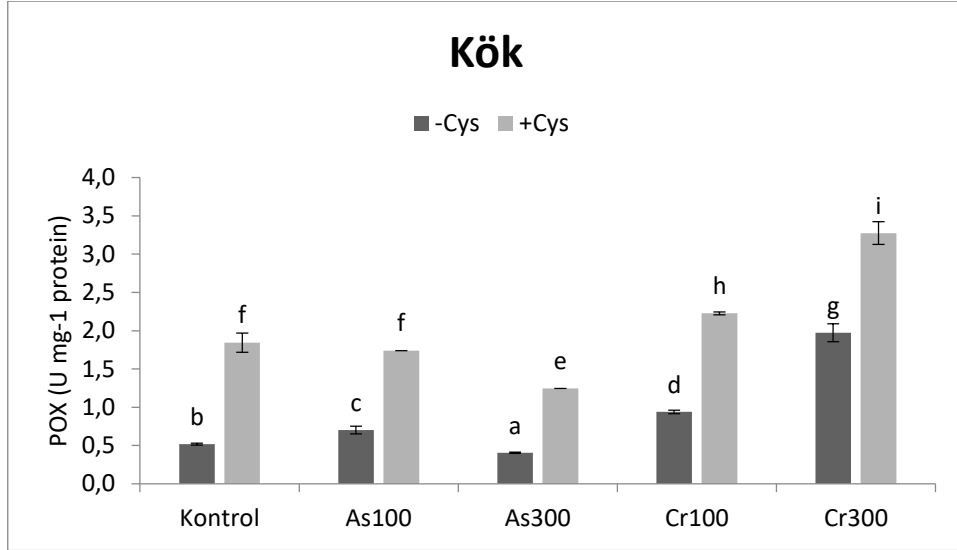


Şekil 3.39. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprakta glutatyon redüktaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

3.2.7. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Peroksidaz Aktivitesine Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 μ M ve 300 μ M) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 μ M) uygulamasının kök, gövde ve yaprakta POX aktivitesine etkisine ilişkin sonuçlar Şekil 3.40, 3.41 ve 3.42’de verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının POX aktivitesine etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0,05$). Buna göre kökte en yüksek POX aktivitesi Cys+300 μ M Cr konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük POX aktivitesi 300 μ M As konsantrasyonunda kaydedilmiştir (Şekil 3.40). As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %36 oranında artma ve 300 μ M As konsantrasyonunda %22 oranında azalma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M Cr konsantrasyonunda %81 ve 300 μ M Cr konsantrasyonlarında %281 oranında artma kaydedilmiştir.

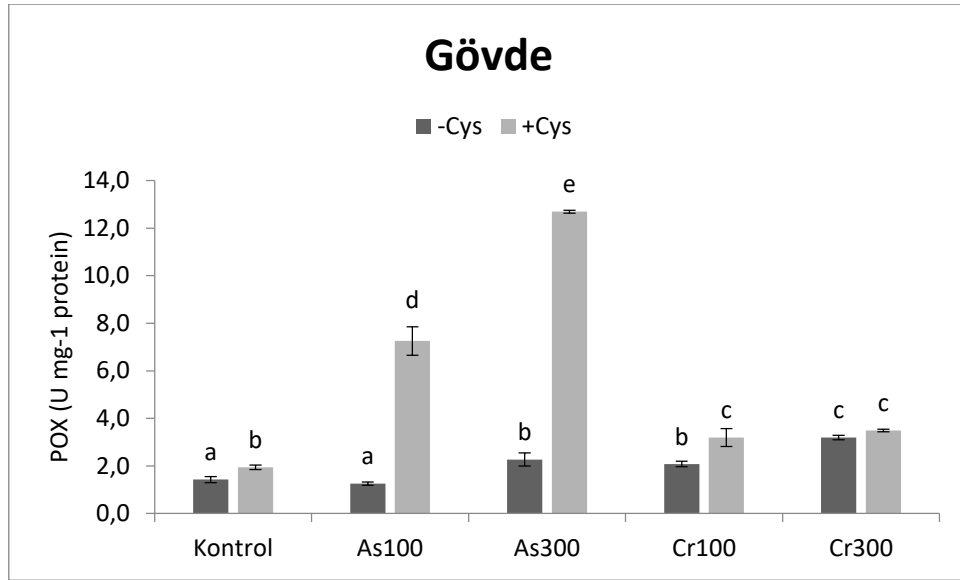
Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin kök POX aktivitesine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %148 ve 300 μ M As konsantrasyonunda %206 oranında artma belirlenmiştir. Cys’in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda %137 ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %66 oranında artma kaydedilmiştir.



Şekil 3.40. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kökte peroksidaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

Gövdede en yüksek POX aktivitesi Cys+300 μ M As konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük POX aktivitesi 100 μ M As konsantrasyonunda kaydedilmiştir (Şekil 3.41). As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda istatistiksel açıdan önemli bir fark belirlenmezken, 300 μ M As konsantrasyonunda %59 oranında artma kaydedilmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M Cr konsantrasyonunda %46 ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %123 oranında artma belirlenmiştir.

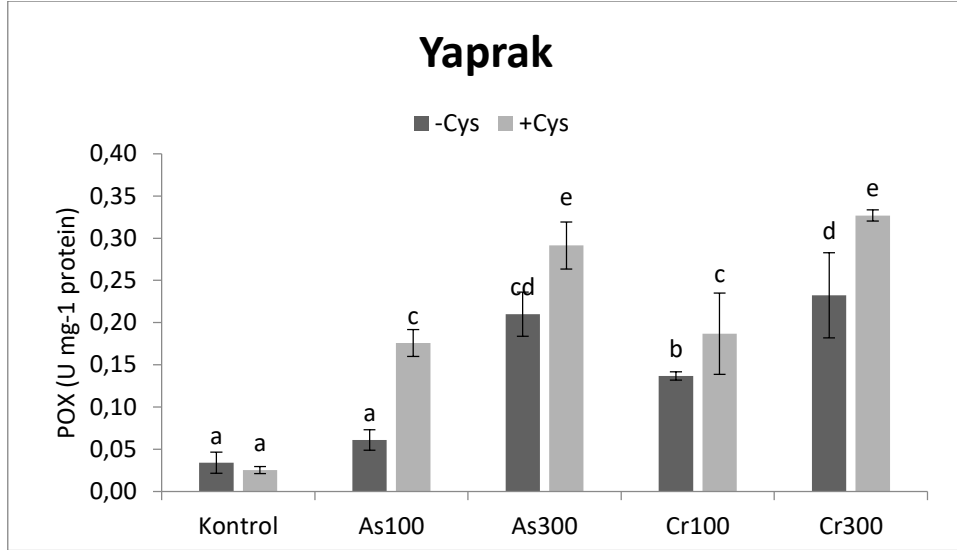
Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin gövde POX aktivitesine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %478 ve 300 μ M As konsantrasyonunda %460 oranında artma belirlenmiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda %53 oranında artma kaydedilirken ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark belirlenmemiştir.



Şekil 3.41. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövdede peroksidaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

Yaprakta en yüksek POX aktivitesi Cys+300 μ M Cr konsantrasyonunda belirlenirken, en düşük POX aktivitesi Cys uygulanan gruplarda kaydedilmiştir (Şekil 3.42). As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda istatistiksel olarak önemli bir fark kaydedilmezken, 300 μ M As konsantrasyonunda %518 oranında artma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M Cr konsantrasyonunda %303 ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %582 oranında artma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin yaprak POX aktivitesine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda %189 ve 300 μ M As konsantrasyonunda %39 oranında artma belirlenmiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda %36 ve 300 μ M Cr konsantrasyonunda %41 oranında artma kaydedilmiştir.



Şekil 3.42. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprakta peroksidaz aktivitesine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).

3.2.8. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Fenolik Asit İçeriğine Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 μ M ve 300 μ M) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğende foliar Cys (300 μ M) uygulamasının kök, gövde ve yaprak kısımlarına ait farklı formlardaki (serbest, glikozit, ester, hücre duvarı bağlı) bireysel fenolik asit (FA) içeriği Çizelge 3.6, 3.7 ve 3.8’de ve Σ HBA, Σ HSA, Σ FA içeriğine etkisine ilişkin sonuçlar Şekil 3.43, 3.44 ve 3.45’te verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının FA içeriğine etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Genel olarak farklı formlardaki FA, Σ HBA, Σ HSA ve Σ FA içeriği stres uygulanan gruplarda kontrol bitkilerine göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde dıştan Cys uygulaması da kontrol grubuna ve tek başına As ile Cr uygulamalarına kıyasla FA, Σ HBA, Σ HSA ve Σ FA içeriğinde (300 μ M Cr hariç) artışa neden olmuştur.

Fesleğen kökünde farklı formlardaki bireysel FA miktarı As ve Cr uygulanan gruplarda kontrol grubuna göre genel olarak daha yüksek bulunmuştur. Dışsal Cys uygulaması da tek başına As ile Cr uygulamalarına kıyasla 300 μ M Cr (ester, glikozit ve hücre duvarı bağlı form hariç) konsantrasyonunda FA miktarında artışa neden olmuştur. Fesleğen fidelerinin kökünde GaA, PCA, KaA, GA, VaA, SrA ve FeA belirlenmiş ve toplamda 7 adet serbest formda FA’nın varlığı saptanmıştır (Çizelge 3.6). En yüksek serbest form SrA miktarı (18,73 μ g g⁻¹) Cys+300 μ M As uygulamasında belirlenirken, en düşük

serbest form ise KaA olup ($0,12 \mu\text{g g}^{-1}$) kontrol grubunda belirlenmiştir. ΣHBA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında $18,75 (100 \mu\text{M As}) - 30,86 \mu\text{g g}^{-1} (100 \mu\text{M Cr})$, Cys uygulamalarında $27,71 (\text{Cys}+100 \mu\text{M As}) - 52,04 \mu\text{g g}^{-1} (\text{Cys}+300 \mu\text{M As})$ aralığında değişkenlik göstermiştir. ΣHSA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında $2,41 (100 \mu\text{M Cr}) - 2,86 \mu\text{g g}^{-1} (300 \mu\text{M As})$, Cys uygulamalarında $2,78 (\text{Cys}+300 \mu\text{M Cr}) - 18,28 \mu\text{g g}^{-1} (\text{Cys} + 300 \mu\text{M As})$ aralığında değişkenlik göstermiştir. ΣFA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında $21,31 (100 \mu\text{M As}) - 33,27 \mu\text{g g}^{-1} (100 \mu\text{M Cr})$, Cys uygulamalarında $32,32 (\text{Cys}+300 \mu\text{M Cr}) - 70,32 (\text{Cys}+300 \mu\text{M As})$ aralığında değiştiği belirlenmiştir.

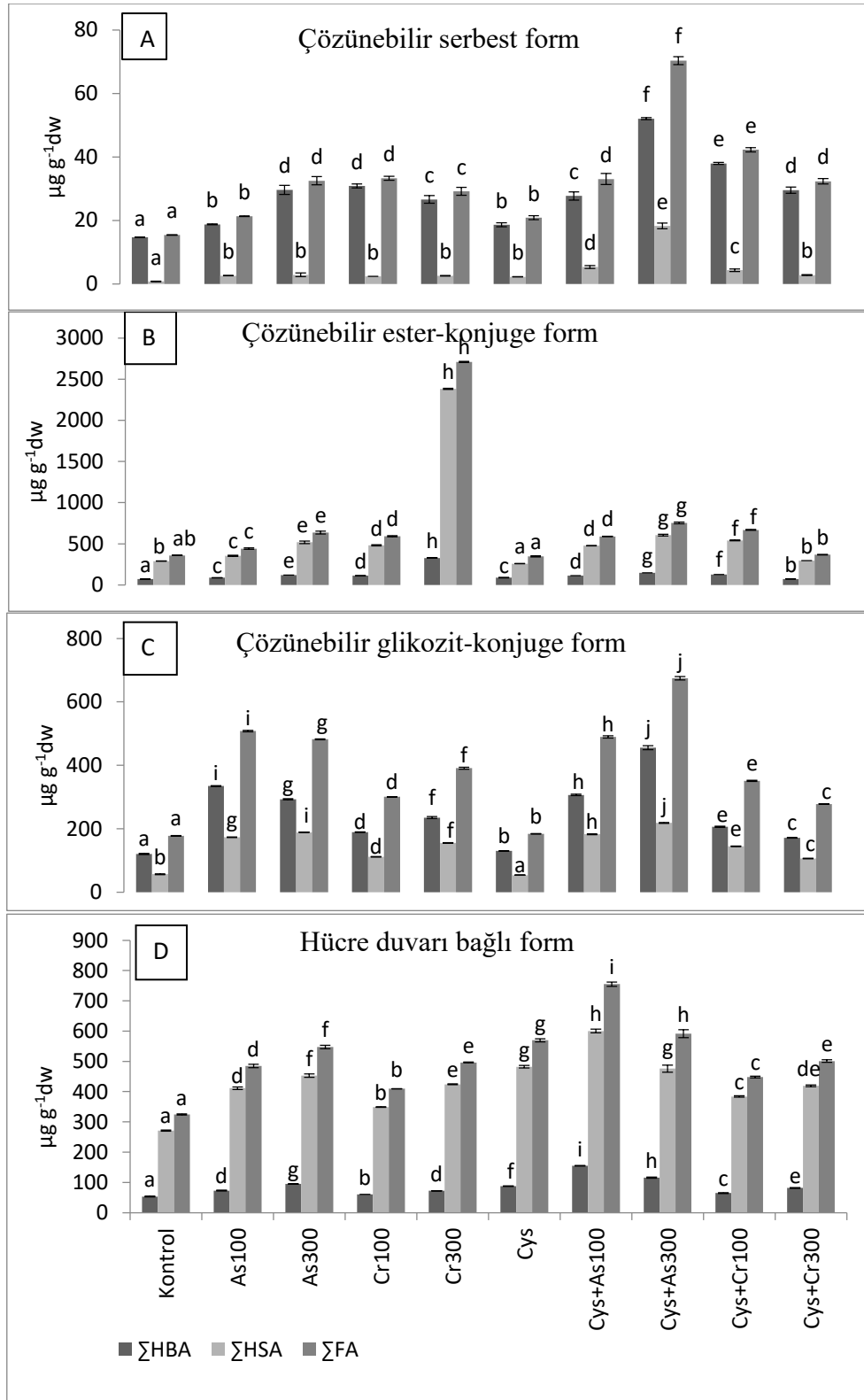
Fesleğen kökünde ester formda GaA, PCA, *p*-HBA, KaA, GA, VaA, SrA, *p*-KuA, FeA, SiA ve *o*-KuA belirlenmiş ve 11 farklı FA içeriğine rastlanmıştır (Çizelge 3.6). En yüksek ester form *p*-KuA miktarı ($1362,35 \mu\text{g g}^{-1}$) $300 \mu\text{M Cr}$ uygulamasında belirlenirken, en düşük ester form ise KaA olup ($0,51 \mu\text{g g}^{-1}$) kontrol grubunda kaydedilmiştir. ΣHBA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında $87,94 (100 \mu\text{M As}) - 326,90 \mu\text{g g}^{-1} (300 \mu\text{M Cr})$, Cys uygulamalarında $72,64 (\text{Cys}+300 \mu\text{M Cr}) - 146,94 \mu\text{g g}^{-1} (\text{Cys}+300 \mu\text{M As})$ aralığında değişkenlik göstermiştir. ΣHSA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında $352,54 (100 \mu\text{M As}) - 2382,98 \mu\text{g g}^{-1} (300 \mu\text{M Cr})$, Cys uygulamalarında $295,06 (\text{Cys}+300 \mu\text{M Cr}) - 606,64 \mu\text{g g}^{-1} (\text{Cys}+300 \mu\text{M As})$ aralığında değişkenlik göstermiştir. ΣFA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında $440,49 (100 \mu\text{M As}) - 2709,88 \mu\text{g g}^{-1} (300 \mu\text{M Cr})$, Cys uygulamalarında $367,70 (\text{Cys}+300 \mu\text{M Cr}) - 753,58 \mu\text{g g}^{-1} (\text{Cys}+300 \mu\text{M As})$ aralığında değiştiği belirlenmiştir.

Fesleğen bitkisinin kökünde GaA, PCA, *p*-HBA, GA, VaA, SrA, *p*-KuA, FeA, SiA ve *o*-KuA olmak üzere 10 adet glikozit formda FA içeriği saptanmıştır (Çizelge 3.6). En yüksek glikozit form GA miktarı ($196,92 \mu\text{g g}^{-1}$) $\text{Cys}+300 \mu\text{M As}$ uygulamasında belirlenirken, en düşük glikozit form ise GaA olup ($0,42 \mu\text{g g}^{-1}$) kontrol grubunda tespit edilmiştir. ΣHBA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında $189,32 (100 \mu\text{M Cr}) - 334,73 \mu\text{g g}^{-1} (100 \mu\text{M As})$, Cys uygulamalarında $171,61 (\text{Cys} + 300 \mu\text{M Cr}) - 455,88 \mu\text{g g}^{-1} (\text{Cys} + 300 \mu\text{M As})$ aralığında değişkenlik göstermiştir. ΣHSA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında $111,53 (100 \mu\text{M Cr}) - 188,94 \mu\text{g g}^{-1} (300 \mu\text{M As})$ Cys uygulamalarında $106,34 (\text{Cys}+300 \mu\text{M Cr}) - 218,66 \mu\text{g g}^{-1} (\text{Cys}+300 \mu\text{M As})$ aralığında değişkenlik göstermiştir. ΣFA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında $300,86 (100 \mu\text{M Cr}) - 508,27 \mu\text{g g}^{-1} (100 \mu\text{M As})$, Cys uygulamalarında $277,95 (\text{Cys}+300 \mu\text{M Cr}) - 674,54 \mu\text{g g}^{-1} (\text{Cys}+300 \mu\text{M Cr})$ aralığında değiştiği belirlenmiştir.

Fesleğen kökünde hücre duvarı bağlı formda PCA, VaA, SrA, *p*-KuA, FeA, SiA ve *o*-KuA olmak üzere 7 farklı FA varlığı tespit edilmiştir (Çizelge 3.6). En yüksek hücre duvarı bağlı form FeA miktarı ($342,15 \mu\text{g g}^{-1}$) Cys+100 μM As uygulamasında belirlenirken, en düşük hücre duvarı bağlı form ise SiA olup ($10,08 \mu\text{g g}^{-1}$) Cys+300 μM Cr uygulamasında belirlenmiştir. ΣHBA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında 60,65 (100 μM Cr) – 94,72 $\mu\text{g g}^{-1}$ (300 μM As), Cys uygulamalarında 64,76 (Cys+100 μM Cr) - 154,80 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Cys+100 μM As) aralığında değişkenlik göstermiştir. ΣHSA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında 348,89 (100 μM Cr) - 452,81 $\mu\text{g g}^{-1}$ (300 μM As) Cys uygulamalarında 383,75 (Cys+100 μM Cr) - 600,31 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Cys+100 μM As) aralığında değişkenlik göstermiştir. ΣFA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında 409,54 (100 μM Cr) - 547,52 $\mu\text{g g}^{-1}$ (300 μM As), Cys uygulamalarında 448,50 (Cys+100 μM Cr) - 755,11 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Cys+100 μM As) aralığında değiştiği belirlenmiştir.

Çizelge 3.6. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kökte fenolik asit (serbest, ester, glikozit, hücre duvarı bağlı form) içeriğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

Fenolik asitler ($\mu\text{g g}^{-1}$ dw)	Kontrol	100 μM As	300 μM As	100 μM Cr	300 μM Cr	Cys	Cys+100 μM As	Cys+300 μM As	Cys+100 μM Cr	Cys+300 μM Cr
Çözünabilir serbest form										
Gallik asit	0,87 $\pm$ 0,06 ^{ab}	2,12 $\pm$ 0,08 ^c	0,81 $\pm$ 0,01 ^a	0,93 $\pm$ 0,03 ^b	0,79 $\pm$ 0,03 ^a	1,28 $\pm$ 0,03 ^d	2,45 $\pm$ 0,02 ^f	3,62 $\pm$ 0,12 ^g	0,96 $\pm$ 0,03 ^b	1,13 $\pm$ 0,04 ^c
Protokatekik asit	3,19 $\pm$ 0,04 ^a	3,88 $\pm$ 0,03 ^{bc}	5,66 $\pm$ 0,34 ^e	3,65 $\pm$ 0,13 ^{ab}	5,86 $\pm$ 0,36 ^e	4,52 $\pm$ 0,52 ^d	6,12 $\pm$ 0,44 ^e	8,49 $\pm$ 0,52 ^f	4,42 $\pm$ 0,20 ^{cd}	3,87 $\pm$ 0,28 ^{bc}
Kafeik asit	0,12 $\pm$ 0,06 ^a	0,95 $\pm$ 0,03 ^{bc}	1,31 $\pm$ 0,52 ^{de}	1,01 $\pm$ 0,03 ^{bcd}	1,21 $\pm$ 0,07 ^{cde}	0,86 $\pm$ 0,02 ^b	1,13 $\pm$ 0,05 ^{bcd}	2,87 $\pm$ 0,05 ^f	1,41 $\pm$ 0,14 ^e	1,46 $\pm$ 0,09 ^e
Gentisik asit	5,93 $\pm$ 0,27 ^{bc}	5,29 $\pm$ 0,09 ^{ab}	6,94 $\pm$ 0,79 ^d	6,87 $\pm$ 0,35 ^d	6,91 $\pm$ 0,49 ^d	4,64 $\pm$ 0,47 ^a	6,61 $\pm$ 0,36 ^{cd}	8,90 $\pm$ 0,09 ^e	9,50 $\pm$ 0,09 ^e	12,80 $\pm$ 0,46 ^f
Vanillik asit	3,10 $\pm$ 0,04 ^a	0,59 $\pm$ 0,09 ^b	10,93 $\pm$ 0,73 ^d	14,37 $\pm$ 0,15 ^f	5,90 $\pm$ 0,24 ^b	5,30 $\pm$ 0,32 ^b	5,64 $\pm$ 0,13 ^b	12,30 $\pm$ 0,60 ^e	15,13 $\pm$ 0,63 ^g	7,25 $\pm$ 0,17 ^e
Siringik asit	1,57 $\pm$ 0,14 ^a	1,76 $\pm$ 0,04 ^a	5,31 $\pm$ 0,08 ^d	5,04 $\pm$ 0,46 ^{cd}	7,15 $\pm$ 0,93 ^e	2,86 $\pm$ 0,07 ^b	6,89 $\pm$ 0,51 ^e	18,73 $\pm$ 0,23 ^g	7,94 $\pm$ 0,22 ^f	4,49 $\pm$ 0,44 ^e
Ferulik asit	0,65 $\pm$ 0,01 ^a	1,61 $\pm$ 0,05 ^b	1,55 $\pm$ 0,12 ^b	1,40 $\pm$ 0,04 ^b	1,36 $\pm$ 0,03 ^b	1,39 $\pm$ 0,03 ^b	4,20 $\pm$ 0,50 ^d	15,40 $\pm$ 0,87 ^e	2,91 $\pm$ 0,24 ^c	1,32 $\pm$ 0,09 ^b
Çözünabilir ester konjuge form										
Gallik asit	0,87 $\pm$ 0,05 ^a	4,43 $\pm$ 0,26 ^c	6,40 $\pm$ 0,18 ^g	3,02 $\pm$ 0,20 ^c	3,62 $\pm$ 0,08 ^d	5,26 $\pm$ 0,16 ^f	1,75 $\pm$ 0,10 ^b	6,98 $\pm$ 0,12 ^h	4,47 $\pm$ 0,02 ^e	3,45 $\pm$ 0,26 ^d
Protokatekik asit	4,13 $\pm$ 0,32 ^b	5,62 $\pm$ 0,22 ^c	11,54 $\pm$ 0,72 ^{ef}	10,91 $\pm$ 0,34 ^c	186,66 $\pm$ 1,23 ⁱ	3,12 $\pm$ 0,24 ^a	12,11 $\pm$ 0,48 ^f	16,33 $\pm$ 0,18 ^h	14,27 $\pm$ 0,57 ^g	7,78 $\pm$ 0,24 ^d
<i>p</i> -Hidroksibenzoik asit	12,61 $\pm$ 0,26 ^b	12,22 $\pm$ 0,38 ^b	15,57 $\pm$ 0,56 ^{cd}	15,20 $\pm$ 0,10 ^{cd}	27,47 $\pm$ 0,34 ^f	9,90 $\pm$ 0,30 ^a	14,66 $\pm$ 1,68 ^e	19,99 $\pm$ 1,26 ^c	16,51 $\pm$ 0,20 ^d	9,49 $\pm$ 0,32 ^a
Kafeik asit	0,51 $\pm$ 0,04 ^a	1,23 $\pm$ 0,09 ^{ab}	3,33 $\pm$ 0,08 ^c	18,18 $\pm$ 0,28 ^e	22,50 $\pm$ 1,12 ^g	1,20 $\pm$ 0,06 ^{ab}	1,76 $\pm$ 0,02 ^b	11,70 $\pm$ 0,06 ^d	20,24 $\pm$ 0,57 ^f	0,81 $\pm$ 0,10 ^a
Gentisik asit	0,93 $\pm$ 0,01 ^a	1,51 $\pm$ 0,08 ^f	1,35 $\pm$ 0,04 ^{de}	1,18 $\pm$ 0,04 ^{bc}	1,51 $\pm$ 0,12 ^f	1,25 $\pm$ 0,04 ^{cd}	2,02 $\pm$ 0,10 ^h	1,46 $\pm$ 0,13 ^{ef}	1,77 $\pm$ 0,06 ^g	1,12 $\pm$ 0,02 ^b
Vanillik asit	16,94 $\pm$ 0,41 ^b	26,40 $\pm$ 0,42 ^c	30,73 $\pm$ 0,78 ^e	30,03 $\pm$ 0,39 ^{de}	32,59 $\pm$ 1,11 ^f	29,09 $\pm$ 01,58 ^d	32,99 $\pm$ 0,78 ^g	34,42 $\pm$ 0,26 ^h	34,29 $\pm$ 0,64 ^{gh}	15,01 $\pm$ 0,36 ^a
Siringik asit	34,48 $\pm$ 1,19 ^a	37,76 $\pm$ 1,06 ^{bc}	53,33 $\pm$ 2,10 ^e	50,76 $\pm$ 0,36 ^d	75,07 $\pm$ 0,88 ^h	39,44 $\pm$ 2,57 ^c	49,36 $\pm$ 1,07 ^d	67,77 $\pm$ 0,63 ^g	56,51 $\pm$ 1,12 ^f	35,80 $\pm$ 0,84 ^{ab}
<i>p</i> -Kumarik asit	141,11 $\pm$ 4,87 ^b	183,06 $\pm$ 4,52 ^d	256,27 $\pm$ 11,25 ^g	223,17 $\pm$ 5,59 ^e	1362,35 $\pm$ 4,02 ⁱ	125,32 $\pm$ 3,61 ^a	225,62 $\pm$ 3,77 ^c	306,93 $\pm$ 8,49 ^h	237,91 $\pm$ 1,43 ^f	151,73 $\pm$ 1,37 ^c
Ferulik asit	94,11 $\pm$ 4,15 ^c	114,62 $\pm$ 1,80 ^d	186,34 $\pm$ 4,30 ^f	171,61 $\pm$ 0,84 ^e	701,42 $\pm$ 2,21 ⁱ	81,14 $\pm$ 0,76 ^a	171,27 $\pm$ 3,16 ^c	201,85 $\pm$ 2,49 ^h	201,85 $\pm$ 2,49 ^h	89,09 $\pm$ 1,63 ^b
Sinamik asit	25,12 $\pm$ 0,99 ^b	24,61 $\pm$ 0,48 ^b	29,01 $\pm$ 1,12 ^c	40,71 $\pm$ 0,40 ^d	262,77 $\pm$ 2,04 ^g	17,29 $\pm$ 0,32 ^a	45,10 $\pm$ 0,93 ^c	45,61 $\pm$ 1,02 ^c	50,75 $\pm$ 1,94 ^f	23,90 $\pm$ 0,60 ^b
<i>o</i> -Kumarik asit	27,82 $\pm$ 0,29 ^{ab}	29,03 $\pm$ 0,60 ^{bc}	43,03 $\pm$ 0,28 ^c	26,27 $\pm$ 0,42 ^a	33,95 $\pm$ 0,58 ^d	33,98 $\pm$ 0,38 ^d	32,46 $\pm$ 0,32 ^d	47,62 $\pm$ 2,88 ^f	29,73 $\pm$ 0,42 ^c	29,53 $\pm$ 0,52 ^c
Çözünabilir glikozit konjuge form										
Gallik asit	0,42 $\pm$ 0,01 ^a	0,72 $\pm$ 0,04 ^b	0,81 $\pm$ 0,06 ^b	3,94 $\pm$ 0,17 ^c	4,66 $\pm$ 0,16 ^f	0,67 $\pm$ 0,05 ^b	2,88 $\pm$ 0,01 ^d	5,45 $\pm$ 0,12 ^g	2,60 $\pm$ 0,07 ^c	4,10 $\pm$ 0,15 ^e
Protokatekik asit	16,52 $\pm$ 0,45 ^b	26,29 $\pm$ 0,49 ^{ef}	27,18 $\pm$ 0,31 ^f	19,82 $\pm$ 0,27 ^c	28,37 $\pm$ 0,71 ^g	14,41 $\pm$ 0,20 ^a	28,78 $\pm$ 0,65 ^g	32,87 $\pm$ 1,34 ^h	25,51 $\pm$ 0,47 ^e	21,38 $\pm$ 0,62 ^d
<i>p</i> -Hidroksibenzoik asit	10,86 $\pm$ 0,18 ^b	11,25 $\pm$ 0,14 ^b	23,72 $\pm$ 0,55 ^f	19,40 $\pm$ 0,20 ^d	22,82 $\pm$ 0,52 ^c	13,04 $\pm$ 0,22 ^c	11,32 $\pm$ 0,26 ^b	24,10 $\pm$ 0,19 ^f	22,76 $\pm$ 0,20 ^e	7,83 $\pm$ 0,67 ^a
Gentisik asit	20,45 $\pm$ 0,18 ^a	181,23 $\pm$ 0,71 ^h	103,92 $\pm$ 1,10 ^f	67,88 $\pm$ 0,30 ^d	80,30 $\pm$ 3,24 ^e	24,16 $\pm$ 0,25 ^b	156,73 $\pm$ 0,89 ^g	196,92 $\pm$ 2,50 ⁱ	68,72 $\pm$ 0,96 ^d	62,20 $\pm$ 0,41 ^c
Vanillik asit	59,71 $\pm$ 1,03 ^a	90,87 $\pm$ 0,79 ^c	113,27 $\pm$ 1,28 ^g	62,69 $\pm$ 0,55 ^b	74,93 $\pm$ 0,47 ^d	64,77 $\pm$ 0,62 ^b	92,87 $\pm$ 1,10 ^f	168,70 $\pm$ 2,79 ^h	67,56 $\pm$ 0,47 ^c	63,43 $\pm$ 0,60 ^b
Siringik asit	13,01 $\pm$ 0,43 ^a	24,38 $\pm$ 0,50 ^e	24,26 $\pm$ 0,61 ^c	15,61 $\pm$ 0,41 ^c	24,41 $\pm$ 0,24 ^c	13,08 $\pm$ 0,22 ^a	14,13 $\pm$ 0,20 ^b	27,84 $\pm$ 0,61 ^f	19,13 $\pm$ 0,35 ^d	12,69 $\pm$ 0,47 ^a
<i>p</i> -Kumarik asit	24,44 $\pm$ 1,07 ^a	104,45 $\pm$ 1,55 ^f	123,45 $\pm$ 0,69 ^h	68,01 $\pm$ 0,69 ^c	84,27 $\pm$ 0,85 ^d	22,74 $\pm$ 0,17 ^a	106,65 $\pm$ 0,39 ^g	162,03 $\pm$ 1,59 ⁱ	95,23 $\pm$ 1,35 ^e	60,75 $\pm$ 1,37 ^b
Ferulik asit	15,49 $\pm$ 0,42 ^a	35,33 $\pm$ 0,61 ^f	35,72 $\pm$ 0,72 ^f	20,21 $\pm$ 1,19 ^b	36,20 $\pm$ 1,00 ^f	15,81 $\pm$ 0,30 ^a	36,21 $\pm$ 0,38 ^d	30,91 $\pm$ 0,49 ^c	22,34 $\pm$ 0,32 ^c	26,52 $\pm$ 0,47 ^d
Sinamik asit	5,32 $\pm$ 0,17 ^a	16,51 $\pm$ 0,66 ^f	11,99 $\pm$ 0,30 ^c	9,49 $\pm$ 0,32 ^c	18,32 $\pm$ 0,13 ^g	6,34 $\pm$ 0,22 ^b	20,29 $\pm$ 0,72 ^h	16,45 $\pm$ 0,32 ^f	11,88 $\pm$ 0,13 ^e	10,65 $\pm$ 0,10 ^d
<i>o</i> -Kumarik asit	12,02 $\pm$ 0,16 ^c	17,24 $\pm$ 0,69 ^g	17,79 $\pm$ 0,72 ^g	13,82 $\pm$ 0,40 ^d	16,84 $\pm$ 0,50 ^f	9,21 $\pm$ 0,35 ^b	19,82 $\pm$ 0,40 ^h	9,28 $\pm$ 0,20 ^b	15,32 $\pm$ 0,30 ^e	8,42 $\pm$ 0,47 ^a
Hücre duvarı bağlı form										
Protokatekik asit	28,21 $\pm$ 0,51 ^a	35,72 $\pm$ 1,20 ^d	48,32 $\pm$ 0,87 ^h	30,43 $\pm$ 0,28 ^b	37,65 $\pm$ 0,48 ^c	46,23 $\pm$ 0,99 ^g	88,77 $\pm$ 0,41 ^j	68,30 $\pm$ 1,03 ⁱ	32,78 $\pm$ 0,81 ^c	43,15 $\pm$ 0,57 ^f
Vanillik asit	10,15 $\pm$ 0,23 ^a	14,60 $\pm$ 0,24 ^d	16,20 $\pm$ 0,70 ^f	11,73 $\pm$ 0,18 ^b	13,24 $\pm$ 0,13 ^c	17,15 $\pm$ 0,43 ^f	24,20 $\pm$ 0,65 ^g	16,84 $\pm$ 0,43 ^{ef}	12,29 $\pm$ 0,17 ^b	16,99 $\pm$ 0,60 ^f
Siringik asit	13,13 $\pm$ 0,35 ^a	20,11 $\pm$ 0,37 ^e	26,05 $\pm$ 0,26 ^g	15,72 $\pm$ 0,27 ^b	18,43 $\pm$ 0,52 ^d	21,50 $\pm$ 0,25 ^f	38,91 $\pm$ 1,21 ^h	26,88 $\pm$ 1,03 ^g	16,83 $\pm$ 0,57 ^c	18,30 $\pm$ 0,83 ^d
<i>p</i> -Kumarik asit	84,03 $\pm$ 0,64 ^a	131,60 $\pm$ 1,14 ^e	137,33 $\pm$ 1,34 ^f	88,49 $\pm$ 0,82 ^b	123,49 $\pm$ 0,33 ^d	164,07 $\pm$ 0,67 ^h	203,82 $\pm$ 0,62 ^j	152,98 $\pm$ 4,88 ^g	108,06 $\pm$ 1,08 ^c	133,92 $\pm$ 1,50 ^e
Ferulik asit	152,01 $\pm$ 1,28 ^a	230,64 $\pm$ 3,94 ^c	250,57 $\pm$ 2,10 ^d	222,31 $\pm$ 0,92 ^b	257,73 $\pm$ 0,79 ^c	269,04 $\pm$ 3,70 ⁱ	342,15 $\pm$ 4,98 ^g	256,47 $\pm$ 5,06 ^c	232,75 $\pm$ 1,66 ^c	248,21 $\pm$ 2,03 ^d
Sinamik asit	13,05 $\pm$ 0,29 ^b	23,71 $\pm$ 0,46 ^f	24,71 $\pm$ 0,43 ^f	14,95 $\pm$ 0,85 ^c	15,44 $\pm$ 0,73 ^c	20,50 $\pm$ 0,54 ^e	16,84 $\pm$ 0,68 ^d	26,73 $\pm$ 1,05 ^g	17,95 $\pm$ 0,18 ^d	10,08 $\pm$ 0,94 ^a
<i>o</i> -Kumarik asit	22,17 $\pm$ 0,34 ^a	25,39 $\pm$ 0,69 ^b	40,19 $\pm$ 1,65 ^f	23,15 $\pm$ 0,59 ^a	27,39 $\pm$ 0,72 ^{cd}	28,55 $\pm$ 0,71 ^d	37,50 $\pm$ 0,34 ^e	39,61 $\pm$ 1,28 ^f	24,98 $\pm$ 0,77 ^b	26,99 $\pm$ 0,28 ^c



Şekil 3.43. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kökte toplam fenolik asit (bireysel fenolik asit toplamı) içeriğine etkisi a) çözünebilir serbest, b) ester konjuge, c) glikozit konjuge ve d) hücre duvarına bağlı formlar. Σ HBA: Toplam Hidroksibenzoik Asitler, Σ HSA: Toplam Hidroksisinnamik Asitler, Σ FA: Toplam Fenolik Asitler. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

Fesleğen gövdesinde farklı formlardaki FA miktarı As ve Cr uygulanan gruplarda kontrol grubuna göre daha yüksek bulunmuştur. Dışsal Cys uygulaması da tek başına As ile Cr uygulamalarına kıyasla 300 μM Cr ve As (glikozit-hücre duvarı bağlı form hariç) konsantrasyonlarında FA miktarında artışa neden olmuştur. Fesleğen fidelerinin gövdesinde GaA, PCA, VaA, GA, SrA ve FeA olmak üzere 6 farklı serbest formda FA varlığı belirlenmiştir (Çizelge 3.7). En yüksek serbest form SrA miktarı ($13,68 \mu\text{g g}^{-1}$) 300 μM As uygulamasında belirlenirken, en düşük serbest form ise GaA olup ($0,17 \mu\text{g g}^{-1}$) Cys + 300 μM Cr uygulamasında tespit edilmiştir. ΣHBA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında $18,61$ (100 μM As) - $33,13 \mu\text{g g}^{-1}$ (300 μM As), Cys uygulamalarında $25,13$ (Cys+100 μM As) - $34,80 \mu\text{g g}^{-1}$ (Cys+300 μM As) aralığında değişkenlik göstermiştir. ΣHSA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında $2,44$ (100 μM As) - $5,69 \mu\text{g g}^{-1}$ (300 μM Cr), Cys uygulamalarında $5,16$ (Cys+300 μM Cr) - $9,54 \mu\text{g g}^{-1}$ (Cys+100 μM As) aralığında değişkenlik göstermiştir. ΣFA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında $21,05$ (100 μM As) - $36,44 \mu\text{g g}^{-1}$ (300 μM As), Cys uygulamalarında $33,45$ (Cys+300 μM Cr) - $40,83 \mu\text{g g}^{-1}$ (Cys+300 μM As) aralığında değişkenlik göstermiştir.

Fesleğen gövdesinde ester formda GaA, PCA, *p*-HBA, KaA, GA, VaA, SrA, *p*-KuA, FeA, SiA ve *o*-KuA olmak üzere 11 adet FA varlığı saptanmıştır (Çizelge 3.7). En yüksek ester form *p*-KuA miktarı ($975,46 \mu\text{g g}^{-1}$) Cys+100 μM Cr uygulamasında belirlenirken, en düşük ester form ise GA olup ($0,71 \mu\text{g g}^{-1}$) kontrol grubunda kaydedilmiştir. ΣHBA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında $212,27$ (100 μM As) - $292,23 \mu\text{g g}^{-1}$ (300 μM Cr), Cys uygulamalarında $234,76$ (Cys+300 μM Cr) - $310,07 \mu\text{g g}^{-1}$ (Cys+100 μM Cr) aralığında değişkenlik göstermiştir. ΣHSA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında $1089,34$ (100 μM As) - $1406,65 \mu\text{g g}^{-1}$ (300 μM Cr), Cys uygulamalarında $1071,23$ (Cys+300 μM Cr) - $1555,70 \mu\text{g g}^{-1}$ (Cys+100 μM Cr) aralığında değişkenlik göstermiştir. ΣFA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında $1301,61$ (100 μM As) - $1698,87 \mu\text{g g}^{-1}$ (300 μM Cr), Cys uygulamalarında $1305,99$ (Cys+300 μM Cr) - $1865,78 \mu\text{g g}^{-1}$ (Cys+100 μM Cr) aralığında değişkenlik göstermiştir.

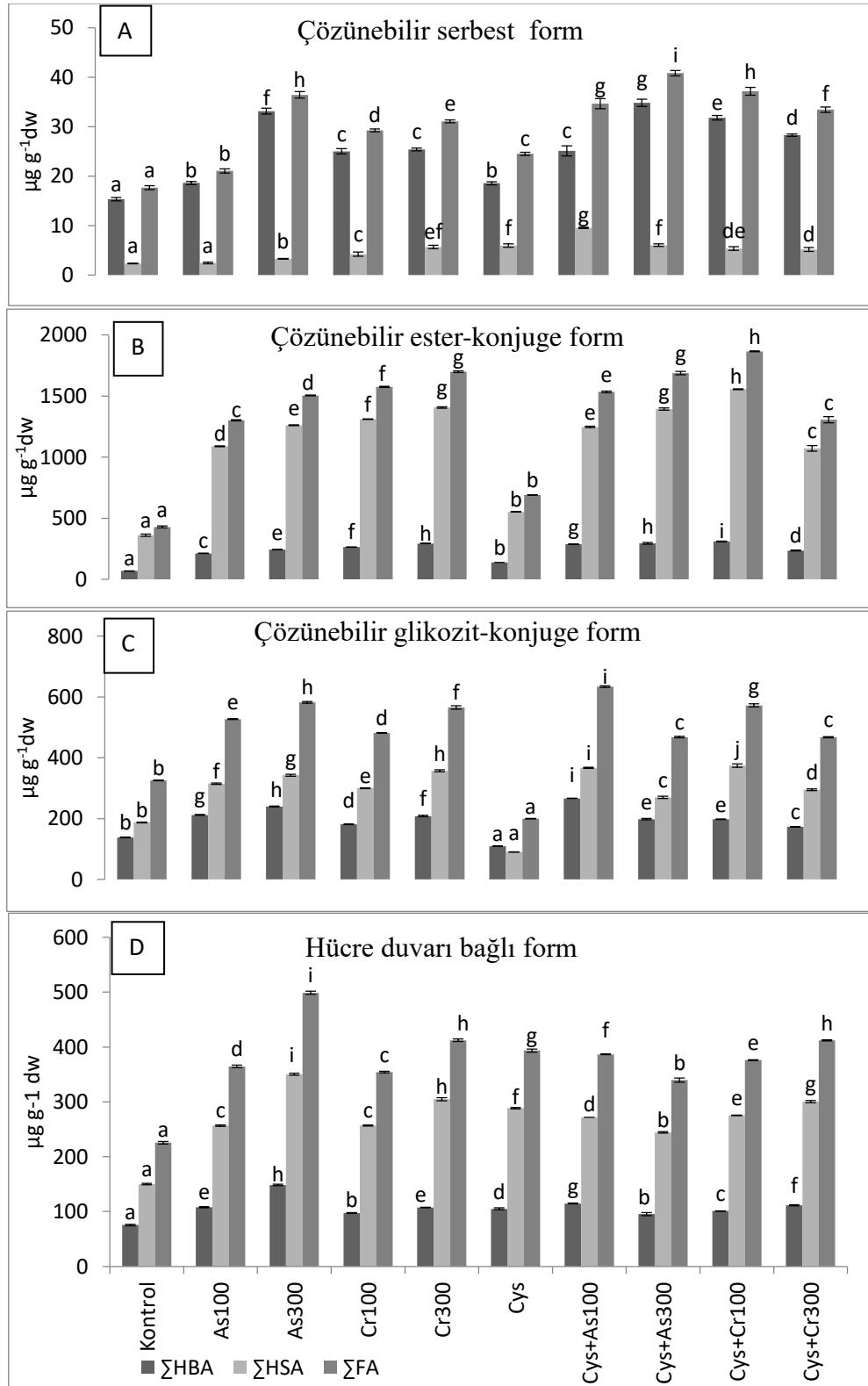
Fesleğen bitkisinin gövdesinde glikozit formda GaA, PCA, *p*-HBA, GA, VaA, SrA, *p*-KuA, FeA, SiA ve *o*-KuA olmak üzere 10 adet FA varlığı saptanmıştır (Çizelge 3.7). En yüksek glikozit form *p*-KuA miktarı ($286,44 \mu\text{g g}^{-1}$) Cys+100 μM Cr uygulamasında belirlenirken, en düşük glikozit form ise GaA olup ($0,54 \mu\text{g g}^{-1}$) kontrol grubunda kaydedilmiştir. HBA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında $181,45$ (100 μM Cr) - $239,68$

$\mu\text{g g}^{-1}$ (300 μM As), Cys uygulamalarında 173,09 (Cys+300 μM Cr) - 266,76 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Cys+100 μM As) aralığında değişkenlik göstermiştir. ΣHSA içeriğinin As ve Cys uygulamalarında 300,41 (100 μM Cr) - 357,26 $\mu\text{g g}^{-1}$ (300 μM Cr), Cys uygulamalarında 269,94 (Cys+300 μM As) - 374,57 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Cys+100 μM Cr) aralığında değişkenlik göstermiştir. ΣFA içeriğinin As ve Cys uygulamalarında 481,87 (100 μM Cr) - 582,44 $\mu\text{g g}^{-1}$ (300 μM As), Cys uygulamalarında 467,94 (Cys+300 μM As) - 633,81 (Cys+100 μM As) aralığında değiştii belirlenmiştir.

Fesleğen gövdesinde hücre duvarı bağlı formda PCA, VaA, SrA, *p*-KuA, FeA, SiA ve *o*-KuA olmak üzere 7 adet FA varlığı saptanmıştır (Çizelge 3.7). En yüksek hücre duvarı bağlı form *p*-KuA miktarı (200,51 $\mu\text{g g}^{-1}$) 300 μM As uygulamasında belirlenirken, en düşük hücre duvarı bağlı form ise VaA miktarı (3,37 $\mu\text{g g}^{-1}$) kontrol grubunda kaydedilmiştir. ΣHBA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında 97,33 (100 μM Cr) - 148,56 $\mu\text{g g}^{-1}$ (300 μM As), Cys uygulamalarında 95,41 (Cys+300 μM As) - 114,77 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Cys+100 μM As) aralığında değişkenlik göstermiştir. ΣHSA içeriğinin As ve Cys uygulamalarında 256,67 (100 μM As) - 350,29 $\mu\text{g g}^{-1}$ (300 μM As), Cys uygulamalarında 244,28 (Cys+300 μM As) - 300,43 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Cys+300 μM Cr) aralığında değişkenlik göstermiştir. ΣFA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında 354,33 (100 μM Cr) - 498,85 $\mu\text{g g}^{-1}$ (300 μM As), Cys uygulamalarında 339,69 (Cys+300 μM As) - 412,07 (Cys+300 μM Cr) aralığında değiştii belirlenmiştir.

Çizelge 3.7. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövdede fenolik asit (serbest, ester, glikozit, hücre duvarı bağlı form) içeriğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p<0,05$).

Fenolik asitler ($\mu\text{g g}^{-1}\text{ dw}$)	Kontrol	100 μM As	300 μM As	100 μM Cr	300 μM Cr	Cys	Cys+100 μM As	Cys+300 μM As	Cys+100 μM Cr	Cys+300 μM Cr
Çözünabilir serbest form										
Gallik asit	0,18 $\pm$ 0,01 ^a	0,24 $\pm$ 0,05 ^{bc}	2,26 $\pm$ 0,02 ^{cd}	0,25 $\pm$ 0,01 ^{cd}	0,26 $\pm$ 0,01 ^{cd}	0,21 $\pm$ 0,02 ^{ab}	0,29 $\pm$ 0,02 ^d	0,21 $\pm$ 0,01 ^a	0,37 $\pm$ 0,01 ^e	0,17 $\pm$ 0,01 ^a
Protokatekuik asit	1,46 $\pm$ 0,01 ^a	1,60 $\pm$ 0,07 ^a	6,28 $\pm$ 0,19 ^e	4,71 $\pm$ 0,34 ^e	4,35 $\pm$ 0,25 ^d	3,72 $\pm$ 0,30 ^{bc}	3,42 $\pm$ 0,05 ^b	5,63 $\pm$ 0,31 ^f	5,30 $\pm$ 0,07 ^f	4,01 $\pm$ 0,08 ^{cd}
Vanilik asit	1,09 $\pm$ 0,02 ^a	1,39 $\pm$ 0,04 ^b	2,61 $\pm$ 0,09 ^e	2,26 $\pm$ 0,07 ^d	2,26 $\pm$ 0,04 ^d	1,51 $\pm$ 0,17 ^{bc}	1,57 $\pm$ 0,03 ^c	3,18 $\pm$ 0,10 ^f	2,54 $\pm$ 0,05 ^e	3,04 $\pm$ 0,08 ^f
Gentisik asit	5,26 $\pm$ 0,21 ^a	6,41 $\pm$ 0,12 ^b	10,30 $\pm$ 0,46 ^f	8,14 $\pm$ 0,36 ^d	7,43 $\pm$ 0,11 ^c	7,20 $\pm$ 0,41 ^c	9,72 $\pm$ 0,20 ^e	13,32 $\pm$ 0,19 ^h	11,52 $\pm$ 0,09 ^g	11,78 $\pm$ 0,46 ^g
Siringik asit	7,36 $\pm$ 0,16 ^b	8,97 $\pm$ 0,34 ^c	13,68 $\pm$ 0,27 ^h	9,66 $\pm$ 0,20 ^{de}	11,08 $\pm$ 0,29 ^f	5,92 $\pm$ 0,17 ^a	10,13 $\pm$ 0,04 ^e	12,46 $\pm$ 0,39 ^g	12,06 $\pm$ 0,35 ^g	9,28 $\pm$ 0,42 ^{cd}
Ferulik asit	2,32 $\pm$ 0,06 ^a	2,44 $\pm$ 0,16 ^a	3,31 $\pm$ 0,04 ^b	4,23 $\pm$ 0,41 ^c	5,69 $\pm$ 0,33 ^{cf}	5,96 $\pm$ 0,1 ^f	9,54 $\pm$ 0,19 ^g	6,04 $\pm$ 0,26 ^f	5,36 $\pm$ 0,36 ^{de}	5,16 $\pm$ 0,39 ^d
Çözünabilir ester konjuge form										
Gallik asit	4,08 $\pm$ 0,38 ^a	5,94 $\pm$ 0,57 ^b	7,91 $\pm$ 0,64 ^d	6,88 $\pm$ 0,20 ^c	8,66 $\pm$ 0,23 ^c	4,20 $\pm$ 0,10 ^a	6,89 $\pm$ 0,54 ^c	6,60 $\pm$ 0,38 ^c	9,26 $\pm$ 0,12 ^{cf}	9,70 $\pm$ 0,24 ^f
Protokatekuik asit	9,57 $\pm$ 0,36 ^b	31,95 $\pm$ 0,68 ^c	44,21 $\pm$ 1,26 ^c	54,34 $\pm$ 0,40 ^f	57,59 $\pm$ 1,40 ^g	6,34 $\pm$ 0,08 ^a	75,30 $\pm$ 2,32 ⁱ	69,95 $\pm$ 1,55 ^h	69,22 $\pm$ 1,63 ^h	40,06 $\pm$ 1,63 ^d
p-Hidroksibenzoik asit	9,41 $\pm$ 0,40 ^a	15,77 $\pm$ 0,04 ^b	19,25 $\pm$ 0,38 ^d	17,24 $\pm$ 0,44 ^c	18,95 $\pm$ 0,44 ^d	9,17 $\pm$ 0,12 ^a	17,26 $\pm$ 0,36 ^c	21,60 $\pm$ 0,93 ^e	18,56 $\pm$ 0,72 ^d	15,36 $\pm$ 0,35 ^b
Kafeik asit	2,19 $\pm$ 0,34 ^{ab}	2,89 $\pm$ 0,28 ^{bc}	2,93 $\pm$ 2,02 ^{bc}	10,83 $\pm$ 0,44 ^d	11,80 $\pm$ 0,17 ^{de}	1,36 $\pm$ 0,58 ^a	4,15 $\pm$ 0,12 ^c	4,05 $\pm$ 0,08 ^c	12,64 $\pm$ 1,13 ^e	14,46 $\pm$ 0,87 ^f
Gentisik asit	0,71 $\pm$ 0,02 ^a	0,80 $\pm$ 0,03 ^{ab}	3,68 $\pm$ 0,34 ^g	0,86 $\pm$ 0,04 ^{ab}	1,39 $\pm$ 0,04 ^{de}	1,49 $\pm$ 0,08 ^c	1,00 $\pm$ 0,02 ^{bc}	1,00 $\pm$ 0,18 ^f	1,36 $\pm$ 0,04 ^{de}	1,22 $\pm$ 0,08 ^{cd}
Vanillik asit	20,63 $\pm$ 0,12 ^c	22,01 $\pm$ 0,30 ^d	25,76 $\pm$ 0,50 ^f	24,50 $\pm$ 0,31 ^e	27,84 $\pm$ 0,54 ^g	13,06 $\pm$ 0,17 ^a	25,66 $\pm$ 0,50 ^f	28,33 $\pm$ 1,48 ^g	28,81 $\pm$ 0,62 ^g	15,84 $\pm$ 0,22 ^b
Siringik asit	23,76 $\pm$ 0,28 ^a	135,81 $\pm$ 1,63 ^c	142,33 $\pm$ 1,15 ^d	159,98 $\pm$ 1,39 ^f	177,79 $\pm$ 0,18 ^h	103,54 $\pm$ 0,82 ^b	161,37 $\pm$ 1,51 ^f	161,37 $\pm$ 1,51 ^f	182,87 $\pm$ 1,33 ⁱ	152,59 $\pm$ 1,96 ^e
p-Kumarik asit	167,90 $\pm$ 8,00 ^a	706,39 $\pm$ 4,37 ^d	799,11 $\pm$ 1,97 ^f	815,01 $\pm$ 3,24 ^g	909,26 $\pm$ 4,83 ⁱ	356,08 $\pm$ 1,69 ^b	755,00 $\pm$ 4,12 ^e	831,07 $\pm$ 16,06 ^h	975,46 $\pm$ 2,41 ⁱ	666,40 $\pm$ 17,90 ^c
Ferulik asit	138,04 $\pm$ 0,22 ^a	260,79 $\pm$ 0,94 ^b	329,74 $\pm$ 0,61 ^d	348,49 $\pm$ 5,96 ^c	351,39 $\pm$ 2,04 ^e	136,62 $\pm$ 0,40 ^a	312,52 $\pm$ 3,45 ^c	376,11 $\pm$ 16,06 ^f	407,14 $\pm$ 3,76 ^g	253,52 $\pm$ 4,07 ^b
Sinamik asit	32,33 $\pm$ 0,91 ^a	97,98 $\pm$ 2,88 ^c	100,51 $\pm$ 0,49 ^c	118,16 $\pm$ 3,30 ^e	114,33 $\pm$ 2,40 ^{de}	49,01 $\pm$ 0,38 ^b	153,05 $\pm$ 2,92 ^g	153,57 $\pm$ 5,96 ^g	137,39 $\pm$ 2,97 ^f	112,26 $\pm$ 2,02 ^d
o-Kumarik asit	20,08 $\pm$ 0,36 ^c	21,28 $\pm$ 0,32 ^d	28,83 $\pm$ 1,31 ^e	18,50 $\pm$ 0,28 ^b	19,86 $\pm$ 0,39 ^c	9,68 $\pm$ 0,68 ^a	22,23 $\pm$ 1,01 ^{de}	29,06 $\pm$ 0,73 ^g	23,08 $\pm$ 0,69 ^e	24,60 $\pm$ 0,22 ^f
Çözünabilir glikozit konjuge form										
Gallik asit	0,54 $\pm$ 0,02 ^a	2,81 $\pm$ 0,02 ^c	3,70 $\pm$ 0,04 ^e	2,09 $\pm$ 0,09 ^b	2,90 $\pm$ 0,02 ^c	2,89 $\pm$ 0,06 ^c	3,25 $\pm$ 0,09 ^d	2,88 $\pm$ 0,10 ^c	4,02 $\pm$ 0,06 ^f	1,98 $\pm$ 0,06 ^b
Protokatekuik asit	31,74 $\pm$ 1,02 ^b	43,16 $\pm$ 0,73 ^f	53,20 $\pm$ 1,03 ^j	38,56 $\pm$ 0,35 ^d	45,42 $\pm$ 0,68 ^g	23,91 $\pm$ 0,40 ^a	51,40 $\pm$ 0,94 ⁱ	47,76 $\pm$ 0,60 ^h	41,35 $\pm$ 0,53 ^c	34,97 $\pm$ 0,59 ^c
p-Hidroksibenzoik asit	8,44 $\pm$ 0,29 ^c	15,47 $\pm$ 0,33 ^e	20,23 $\pm$ 0,83 ^g	12,06 $\pm$ 0,21 ^d	15,40 $\pm$ 0,26 ^e	6,92 $\pm$ 0,44 ^b	16,97 $\pm$ 0,23 ^f	3,81 $\pm$ 0,10 ^a	14,81 $\pm$ 0,36 ^c	12,50 $\pm$ 0,63 ^d
Gentisik asit	62,12 $\pm$ 1,03 ^b	95,13 $\pm$ 0,69 ^f	102,57 $\pm$ 0,80 ^h	86,08 $\pm$ 0,56 ^d	94,22 $\pm$ 1,05 ^f	44,97 $\pm$ 0,55 ^a	132,57 $\pm$ 0,74 ⁱ	98,69 $\pm$ 1,85 ^g	91,84 $\pm$ 0,53 ^c	78,17 $\pm$ 0,68 ^c
Vanilik asit	19,28 $\pm$ 0,25 ^b	30,63 $\pm$ 0,37 ^g	32,45 $\pm$ 0,31 ^h	24,71 $\pm$ 0,20 ^c	27,68 $\pm$ 0,38 ^e	12,40 $\pm$ 0,25 ^a	33,22 $\pm$ 0,41 ⁱ	28,82 $\pm$ 0,79 ^f	25,51 $\pm$ 0,36 ^d	24,35 $\pm$ 0,46 ^c
Siringik asit	15,77 $\pm$ 0,17 ^a	24,91 $\pm$ 0,78 ^e	27,54 $\pm$ 1,02 ^f	17,97 $\pm$ 0,52 ^b	22,68 $\pm$ 0,50 ^d	18,05 $\pm$ 0,42 ^b	29,34 $\pm$ 0,70 ^g	16,04 $\pm$ 0,26 ^a	20,20 $\pm$ 0,17 ^c	21,12 $\pm$ 0,63 ^c
p-Kumarik asit	129,91 $\pm$ 2,36 ^b	187,83 $\pm$ 1,19 ^c	197,22 $\pm$ 2,35 ^d	234,01 $\pm$ 1,11 ^f	249,02 $\pm$ 3,56 ^g	58,23 $\pm$ 1,28 ^a	195,86 $\pm$ 1,09 ^d	183,23 $\pm$ 4,28 ^c	286,44 $\pm$ 5,03 ^h	222,13 $\pm$ 1,54 ^e
Ferulik asit	33,60 $\pm$ 0,61 ^b	79,68 $\pm$ 1,82 ^f	89,62 $\pm$ 0,50 ^g	34,12 $\pm$ 0,75 ^b	50,02 $\pm$ 0,17 ^c	18,49 $\pm$ 0,75 ^a	96,75 $\pm$ 2,28 ^h	42,60 $\pm$ 0,73 ^d	36,96 $\pm$ 0,98 ^c	37,52 $\pm$ 0,72 ^c
Sinamik asit	19,51 $\pm$ 0,82 ^b	40,66 $\pm$ 0,48 ^g	45,24 $\pm$ 0,76 ^h	24,04 $\pm$ 0,32 ^c	45,57 $\pm$ 0,61 ^h	9,10 $\pm$ 0,37 ^a	58,96 $\pm$ 1,69 ^j	35,37 $\pm$ 0,62 ^f	32,27 $\pm$ 0,71 ^c	26,69 $\pm$ 0,24 ^d
o-Kumarik asit	4,51 $\pm$ 0,21 ^a	6,95 $\pm$ 0,62 ^b	10,68 $\pm$ 0,26 ^d	8,25 $\pm$ 0,14 ^c	12,65 $\pm$ 0,39 ^e	4,72 $\pm$ 0,12 ^a	15,48 $\pm$ 0,12 ^f	8,75 $\pm$ 0,40 ^c	18,91 $\pm$ 0,39 ^g	8,60 $\pm$ 0,12 ^c
Hücre duvarı bağlı form										
Protokatekuik asit	13,02 $\pm$ 0,49 ^a	22,39 $\pm$ 0,44 ^d	31,29 $\pm$ 0,37 ^g	17,06 $\pm$ 0,27 ^c	22,31 $\pm$ 0,18 ^d	21,75 $\pm$ 0,86 ^d	23,43 $\pm$ 0,35 ^f	26,90 $\pm$ 0,45 ^f	17,81 $\pm$ 0,36 ^c	15,88 $\pm$ 0,45 ^b
Vanilik asit	3,37 $\pm$ 0,15 ^a	5,82 $\pm$ 0,25 ^c	6,33 $\pm$ 0,16 ^{de}	5,16 $\pm$ 0,08 ^b	5,20 $\pm$ 0,13 ^b	8,55 $\pm$ 0,19 ^g	6,46 $\pm$ 0,16 ^c	6,26 $\pm$ 0,45 ^{de}	5,97 $\pm$ 0,08 ^{cd}	7,04 $\pm$ 0,27 ^f
Siringik asit	58,80 $\pm$ 1,20 ^a	78,72 $\pm$ 0,90 ^c	109,32 $\pm$ 0,83 ^h	74,11 $\pm$ 0,56 ^c	78,69 $\pm$ 0,75 ^e	74,37 $\pm$ 1,44 ^{cd}	84,13 $\pm$ 0,74 ^f	61,35 $\pm$ 1,78 ^b	76,03 $\pm$ 0,21 ^d	88,20 $\pm$ 1,13 ^g
p-Kumarik asit	90,92 $\pm$ 0,68 ^a	130,90 $\pm$ 0,48 ^b	200,51 $\pm$ 0,78 ⁱ	148,03 $\pm$ 0,45 ^e	170,71 $\pm$ 2,11 ^g	178,57 $\pm$ 0,45 ^h	138,49 $\pm$ 0,94 ^c	143,00 $\pm$ 1,30 ^d	150,70 $\pm$ 0,44 ^f	176,94 $\pm$ 0,74 ^h
Ferulik asit	39,31 $\pm$ 0,70 ^a	81,92 $\pm$ 0,87 ^c	101,67 $\pm$ 0,53 ^g	75,94 $\pm$ 0,36 ^b	92,49 $\pm$ 1,60 ^f	82,62 $\pm$ 0,88 ^c	85,96 $\pm$ 0,81 ^d	83,21 $\pm$ 1,43 ^c	88,34 $\pm$ 0,59 ^e	90,93 $\pm$ 0,88 ^f
Sinamik asit	9,50 $\pm$ 0,51 ^a	30,13 $\pm$ 0,80 ^g	31,80 $\pm$ 0,70 ^h	20,85 $\pm$ 0,22 ^d	28,39 $\pm$ 0,45 ^f	17,61 $\pm$ 0,65 ^c	31,61 $\pm$ 1,05 ^h	22,65 $\pm$ 0,30 ^c	22,65 $\pm$ 0,30 ^c	21,56 $\pm$ 0,71 ^{de}
o-Kumarik asit	10,35 $\pm$ 0,21 ^c	13,73 $\pm$ 0,16 ^f	16,30 $\pm$ 0,42 ^h	12,18 $\pm$ 0,24 ^e	13,22 $\pm$ 0,40 ^f	9,68 $\pm$ 0,42 ^b	15,81 $\pm$ 0,37 ^g	4,78 $\pm$ 0,26 ^a	13,44 $\pm$ 0,11 ^f	11,01 $\pm$ 0,14 ^d



Şekil 3.44. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövdede toplam fenolik asit (bireysel fenolik asit toplamı) içeriğine etkisi a) çözünebilir serbest, b) ester konjuge, c) glikozit konjuge ve d) hücre duvarına bağlı formlar. ΣHBA : Toplam Hidroksibenzoik Asitler, ΣHSA : Toplam Hidroksisinnamik Asitler, ΣFA : Toplam Fenolik Asitler. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

Fesleğen fidelerinin yaprağında gallik asit (GaA), protokatekuik asit (PCA), kafeik asit (KaA), gentisik asit (GA), vanilik asit (VaA), siringik asit (SrA) ve ferulik asit (FeA) olmak üzere 7 farklı serbest formda FA varlığı belirlenmiştir (Çizelge 3.8). En yüksek serbest form GA miktarı ($119,59 \mu\text{g g}^{-1}$) 300 μM Cr uygulamasında belirlenirken, en düşük serbest form ise GaA olup miktarı ($0,68 \mu\text{g g}^{-1}$) kontrol grubunda tespit edilmiştir. ΣHBA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında 39,12 (100 μM As) - 165,43 $\mu\text{g g}^{-1}$ (300 μM Cr), Cys uygulamalarında 53,57 (Cys+300 μM Cr) - 131,13 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Cys+100 μM Cr) arasında değiştiği kaydedilmiştir. ΣHSA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında 16,18 (100 μM As) - 39,49 $\mu\text{g g}^{-1}$ (300 μM Cr), Cys uygulamalarında 25,71 (Cys+100 μM As) - 37,08 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Cys+100 μM Cr) arasında değiştiği kaydedilmiştir. ΣFA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında 55,30 (100 μM As) - 204,92 $\mu\text{g g}^{-1}$ (300 μM Cr), Cys uygulamalarında 81,84 (Cys+300 μM Cr) - 168,21 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Cys+100 μM Cr) aralığında belirlenmiştir.

Fesleğen yaprağında ester formda GaA, PCA, KaA, GA, VaA, SrA, FeA, *p*-Hidroksibenzoik asit (*p*-HBA), *p*-kumarik asit (*p*-KuA), sinamik asit (SiA) ve *o*-kumarik asit (*o*-KuA) olmak üzere 11 tane FA varlığı tespit edilmiştir (Çizelge 3.8). En yüksek ester form *p*-KuA miktarı ($1616,01 \mu\text{g g}^{-1}$) 300 μM Cr uygulamasında belirlenirken, en düşük ester form ise GA miktarı ($1,17 \mu\text{g g}^{-1}$) kontrol grubunda tespit edilmiştir. ΣHBA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında 258,46 (100 μM As) - 534,55 $\mu\text{g g}^{-1}$ (300 μM Cr), Cys uygulamalarında 234,51 (Cys+300 μM Cr) - 451,37 (Cys+100 μM Cr) arasında değiştiği kaydedilmiştir. ΣHSA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında 1488,08 (100 μM As) - 2857,82 $\mu\text{g g}^{-1}$ (300 μM Cr), Cys uygulamalarında 1337,84 (Cys+300 μM Cr) - 2480,48 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Cys+100 μM Cr) arasında değiştiği kaydedilmiştir. ΣFA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında 1746,54 (100 μM As) - 3392,37 $\mu\text{g g}^{-1}$ (300 μM Cr), Cys uygulamalarında 1572,35 (Cys+300 μM Cr) - 2931,86 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Cys+100 μM Cr) aralığında belirlenmiştir.

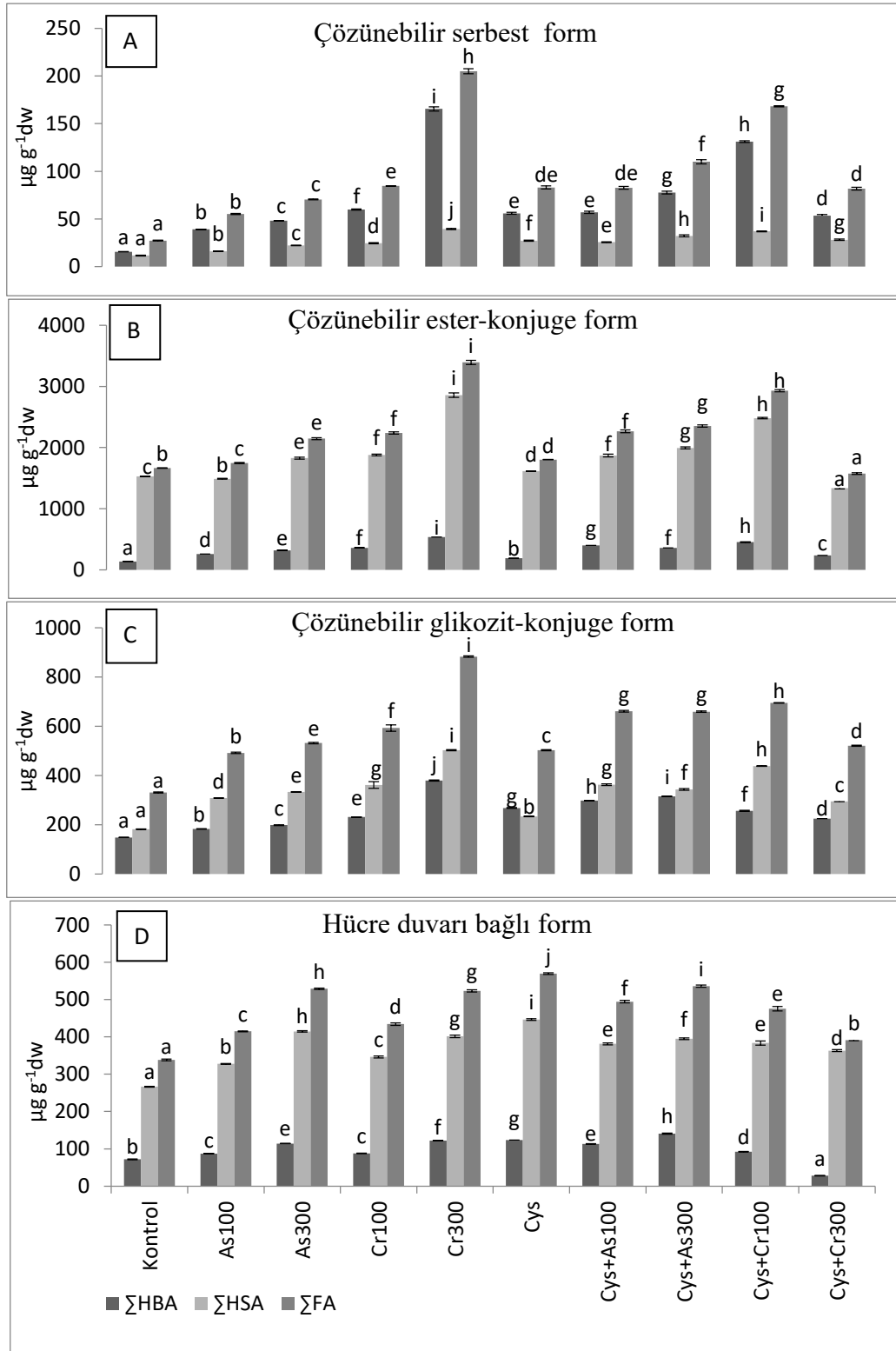
Fesleğen bitkisinin yaprağında glikozit formda GaA, PCA, GA, VaA, SrA, FeA, *p*-HBA, *p*-KuA, SiA, *p*-KuA olmak üzere 10 adet FA varlığı saptanmıştır (Çizelge 3.8). En yüksek glikozit form *p*-KuA miktarı ($322,02 \mu\text{g g}^{-1}$) Cys+100 μM Cr uygulamasında belirlenirken, en düşük glikozit form ise GaA miktarı ($0,51 \mu\text{g g}^{-1}$) kontrol grubunda kaydedilmiştir. ΣHBA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında 183,12 $\mu\text{g g}^{-1}$ (100 μM As) - 379,39 (300 μM Cr), Cys uygulamalarında 225,47 (Cys+300 μM Cr) - 315,58 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Cys+300 μM As) arasında değiştiği kaydedilmiştir. ΣHSA içeriğinin As ve Cr

uygulamalarında 308,57 (100 μM As) - 502,7 $\mu\text{g g}^{-1}$ (300 μM Cr), Cys uygulamalarında 295,47 (Cys+300 μM Cr) - 438,29 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Cys+100 μM Cr) aralığında belirlenmiştir. ΣFA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında 491,69 (100 μM As) - 882,09 $\mu\text{g g}^{-1}$ (300 μM Cr), Cys uygulamalarında 520,94 (Cys+300 μM Cr) - 695,07 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Cys+100 μM Cr) aralığında belirlenmiştir.

Fesleğen yaprağında hücre duvarı bağlı formda PCA, VaA, SrA, *p*-KuA, FeA, SiA ve *o*-KuA olmak üzere 7 adet FA miktarı saptanmıştır (Çizelge 3.8). En yüksek hücre duvarı bağlı form *p*-KuA miktarı (261,42 $\mu\text{g g}^{-1}$) Cys uygulamasında belirlenirken, en düşük hücre duvarı bağlı form *o*-KuA miktarı (1,64 $\mu\text{g g}^{-1}$) kontrol grubunda kaydedilmiştir. ΣHBA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında 87,16 (100 μM As) - 121,94 $\mu\text{g g}^{-1}$ (300 μM Cr), Cys uygulamalarında 28,31 (Cys+300 μM Cr) - 140,41 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Cys+300 μM As) aralığında değişkenlik göstermiştir. ΣHSA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında 327,64 (100 μM As) - 414,69 $\mu\text{g g}^{-1}$ (300 μM As), Cys uygulamalarında 363,26 (Cys+300 μM Cr) - 395,23 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Cys+300 μM As) aralığında değişkenlik göstermiştir. ΣFA içeriğinin As ve Cr uygulamalarında 414,81 (100 μM As) - 528,92 $\mu\text{g g}^{-1}$ (300 μM As), Cys uygulamalarında 391,58 (Cys+300 μM Cr) - 535,65 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Cys+300 μM As) aralığında değişkenlik göstermiştir.

Çizelge 3.8. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprakta fenolik asit (serbest, ester, glikozit, hücre duvarı bağlı) içeriğine etkisi. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

Fenolik Asitler ($\mu\text{g g}^{-1}$ dw)	Kontrol	100 μM As	300 μM As	100 μM Cr	300 μM Cr	Cys	Cys+100 μM As	Cys+300 μM As	Cys+100 μM Cr	Cys+300 μM Cr
Çözünabilir serbest form										
Gallik asit	0,68 $\pm$ 0,04 ^a	0,80 $\pm$ 0,04 ^{bc}	0,87 $\pm$ 0,03 ^c	0,87 $\pm$ 0,04 ^c	2,26 $\pm$ 0,06 ^g	1,16 $\pm$ 0,05 ^e	0,74 $\pm$ 0,04 ^{ab}	1,01 $\pm$ 0,06 ^d	1,12 $\pm$ 0,09 ^e	1,72 $\pm$ 0,06 ^f
Protokatekuik asit	5,66 $\pm$ 0,07 ^{bc}	5,92 $\pm$ 0,28 ^{cd}	6,16 $\pm$ 0,11 ^d	6,04 $\pm$ 0,08 ^{cd}	10,04 $\pm$ 0,43 ⁱ	6,84 $\pm$ 1,14 ^e	5,30 $\pm$ 0,18 ^{ab}	9,74 $\pm$ 0,44 ^f	6,91 $\pm$ 0,19 ^e	5,13 $\pm$ 0,04 ^a
Kafeik asit	6,85 $\pm$ 0,25 ^a	8,48 $\pm$ 0,15 ^b	13,98 $\pm$ 0,07 ^c	16,16 $\pm$ 0,11 ^d	22,59 $\pm$ 0,57 ^g	15,66 $\pm$ 0,40 ^d	15,78 $\pm$ 0,81 ^d	20,44 $\pm$ 1,03 ^f	24,23 $\pm$ 0,38 ^h	18,63 $\pm$ 0,75 ^e
Gentisik asit	3,15 $\pm$ 0,09 ^a	21,84 $\pm$ 0,33 ^b	28,48 $\pm$ 0,26 ^c	39,85 $\pm$ 0,30 ^f	119,59 $\pm$ 2,36 ⁱ	32,17 $\pm$ 0,81 ^d	35,94 $\pm$ 1,03 ^e	46,18 $\pm$ 0,97 ^g	104,23 $\pm$ 0,61 ^h	35,30 $\pm$ 0,36 ^e
Vanillik asit	1,79 $\pm$ 0,06 ^a	2,49 $\pm$ 0,16 ^b	4,10 $\pm$ 0,19 ^c	8,17 $\pm$ 0,06 ^e	14,65 $\pm$ 0,24 ^h	11,33 $\pm$ 0,37 ^g	6,84 $\pm$ 0,23 ^d	6,75 $\pm$ 0,4 ^d	10,63 $\pm$ 0,27 ^f	7,84 $\pm$ 0,35 ^e
Siringik asit	4,42 $\pm$ 0,21 ^b	8,06 $\pm$ 0,22 ^d	8,52 $\pm$ 0,46 ^d	5,05 $\pm$ 0,19 ^c	18,89 $\pm$ 0,42 ^f	4,45 $\pm$ 0,28 ^b	8,17 $\pm$ 0,24 ^d	13,96 $\pm$ 0,29 ^e	8,25 $\pm$ 0,20 ^d	3,58 $\pm$ 0,29 ^a
Ferulik asit	4,82 $\pm$ 0,25 ^a	7,70 $\pm$ 0,25 ^b	8,41 $\pm$ 0,23 ^c	8,47 $\pm$ 0,17 ^c	16,90 $\pm$ 0,20 ^g	11,52 $\pm$ 0,38 ^e	9,93 $\pm$ 0,34 ^d	11,93 $\pm$ 0,14 ^e	12,85 $\pm$ 0,59 ^f	9,64 $\pm$ 0,10 ^d
Çözünabilir ester konjuge form										
Gallik asit	7,57 $\pm$ 0,021 ^b	9,44 $\pm$ 0,38 ^d	8,20 $\pm$ 0,40 ^e	8,20 $\pm$ 0,40 ^{bc}	14,83 $\pm$ 0,99 ^g	8,55 $\pm$ 0,16 ^c	9,45 $\pm$ 0,18 ^d	11,85 $\pm$ 0,18 ^f	11,77 $\pm$ 0,16 ^f	6,13 $\pm$ 0,04 ^a
Protokatekuik asit	58,87 $\pm$ 0,77 ^a	173,48 $\pm$ 0,75 ^d	256,68 $\pm$ 2,20 ^e	256,68 $\pm$ 1,10 ^g	369,95 $\pm$ 0,18 ^j	80,57 $\pm$ 0,57 ^b	295,94 $\pm$ 2,02 ^h	230,13 $\pm$ 1,55 ^f	320,90 $\pm$ 6,00 ⁱ	158,11 $\pm$ 0,38 ^c
<i>p</i> -Hidroksibenzoik asit	16,61 $\pm$ 0,14 ^b	18,08 $\pm$ 0,11 ^c	20,20 $\pm$ 0,32 ^d	18,59 $\pm$ 0,08 ^c	29,31 $\pm$ 0,34 ^f	29,89 $\pm$ 0,06 ^f	18,59 $\pm$ 2,06 ^c	24,08 $\pm$ 0,22 ^e	24,69 $\pm$ 0,70 ^e	14,87 $\pm$ 0,08 ^a
Kafeik asit	1,67 $\pm$ 0,02 ^a	2,00 $\pm$ 0,06 ^{ab}	3,46 $\pm$ 0,12 ^c	7,52 $\pm$ 0,08 ^e	13,07 $\pm$ 0,40 ^g	3,74 $\pm$ 0,14 ^c	2,21 $\pm$ 0,12 ^b	5,86 $\pm$ 0,44 ^d	8,89 $\pm$ 0,40 ^f	7,12 $\pm$ 0,06 ^c
Gentisik asit	1,17 $\pm$ 0,04 ^a	1,25 $\pm$ 0,06 ^a	1,87 $\pm$ 0,08 ^b	2,38 $\pm$ 0,20 ^e	3,38 $\pm$ 0,30 ^d	1,45 $\pm$ 0,06 ^a	5,57 $\pm$ 0,38 ^f	2,49 $\pm$ 0,06 ^c	3,74 $\pm$ 0,22 ^e	2,04 $\pm$ 0,04 ^b
Vanillik asit	10,78 $\pm$ 0,24 ^a	13,73 $\pm$ 0,28 ^b	18,78 $\pm$ 0,23 ^f	18,78 $\pm$ 0,24 ^d	33,14 $\pm$ 0,88 ^h	19,33 $\pm$ 0,46 ^d	21,90 $\pm$ 0,20 ^e	30,04 $\pm$ 0,48 ^g	21,31 $\pm$ 0,49 ^e	17,64 $\pm$ 0,18 ^e
Siringik asit	42,39 $\pm$ 1,26 ^b	42,49 $\pm$ 0,72 ^b	46,53 $\pm$ 0,76 ^c	54,96 $\pm$ 1,17 ^e	83,96 $\pm$ 0,86 ^h	48,47 $\pm$ 0,42 ^d	47,41 $\pm$ 1,68 ^{cd}	59,91 $\pm$ 0,30 ^f	68,97 $\pm$ 0,48 ^g	35,73 $\pm$ 0,61 ^a
<i>p</i> -kumarik asit	839,50 $\pm$ 5,33 ^b	832,00 $\pm$ 1,63 ^b	974,86 $\pm$ 13,08 ^d	1044,59 $\pm$ 6,90 ^e	1616,01 $\pm$ 37,20 ^g	876,42 $\pm$ 1,98 ^c	1060,28 $\pm$ 20,84 ^e	1052,36 $\pm$ 3,12 ^e	1383,85 $\pm$ 5,59 ^f	802,03 $\pm$ 7,77 ^a
Ferulik asit	467,47 $\pm$ 7,63 ^c	428,04 $\pm$ 4,08 ^b	568,06 $\pm$ 2,71 ^f	568,96 $\pm$ 5,02 ^f	842,03 $\pm$ 3,09 ^j	489,42 $\pm$ 0,83 ^d	507,58 $\pm$ 2,16 ^e	621,09 $\pm$ 10,02 ^g	726,26 $\pm$ 7,34 ^h	351,13 $\pm$ 3,31 ^a
Sinamik asit	164,58 $\pm$ 0,63 ^c	156,70 $\pm$ 2,31 ^b	211,36 $\pm$ 3,20 ^f	206,03 $\pm$ 6,29 ^e	316,97 $\pm$ 1,57 ^j	190,75 $\pm$ 1,09 ^d	231,36 $\pm$ 2,90 ^g	234,54 $\pm$ 2,24 ^g	292,71 $\pm$ 0,72 ^h	137,37 $\pm$ 1,85 ^a
<i>o</i> -Kumarik asit	54,54 $\pm$ 2,33 ^c	69,35 $\pm$ 1,39 ^e	68,84 $\pm$ 0,46 ^c	50,56 $\pm$ 0,74 ^b	69,73 $\pm$ 0,66 ^e	52,75 $\pm$ 0,98 ^c	66,16 $\pm$ 1,38 ^d	80,40 $\pm$ 1,03 ^f	68,77 $\pm$ 0,21 ^e	40,20 $\pm$ 0,54 ^a
Çözünabilir glikozit konjuge form										
Gallik asit	0,51 $\pm$ 0,01 ^a	1,01 $\pm$ 0,02 ^b	1,40 $\pm$ 0,06 ^c	2,64 $\pm$ 0,02 ^g	4,59 $\pm$ 0,14 ⁱ	3,29 $\pm$ 0,02 ^h	2,02 $\pm$ 0,04 ^e	1,88 $\pm$ 0,07 ^d	2,45 $\pm$ 0,06 ^f	2,66 $\pm$ 0,04 ^g
Protokatekuik asit	42,31 $\pm$ 1,02 ^a	61,57 $\pm$ 1,02 ^d	64,75 $\pm$ 0,61 ^e	58,22 $\pm$ 1,83 ^{bc}	114,36 $\pm$ 0,92 ^h	59,52 $\pm$ 0,18 ^c	74,43 $\pm$ 0,61 ^g	72,93 $\pm$ 1,70 ^g	56,61 $\pm$ 0,62 ^b	67,24 $\pm$ 0,39 ^f
<i>p</i> -Hidroksibenzoik asit	8,82 $\pm$ 0,14 ^a	9,71 $\pm$ 0,22 ^b	11,33 $\pm$ 0,40 ^c	12,64 $\pm$ 0,36 ^d	25,71 $\pm$ 0,43 ^g	10,69 $\pm$ 0,39 ^c	36,46 $\pm$ 1,02 ^h	13,51 $\pm$ 0,08 ^e	13,15 $\pm$ 0,30 ^{de}	14,29 $\pm$ 0,08 ^f
Gentisik asit	74,81 $\pm$ 0,37 ^a	78,63 $\pm$ 0,41 ^b	85,25 $\pm$ 0,42 ^c	120,62 $\pm$ 0,29 ^e	182,03 $\pm$ 0,92 ⁱ	153,07 $\pm$ 0,75 ^h	148,90 $\pm$ 0,53 ^g	187,85 $\pm$ 0,36 ^j	131,75 $\pm$ 1,03 ^f	99,79 $\pm$ 0,06 ^d
Vanillik asit	10,49 $\pm$ 0,36 ^a	17,19 $\pm$ 0,40 ^b	19,49 $\pm$ 0,35 ^d	21,73 $\pm$ 0,53 ^c	25,39 $\pm$ 0,37 ^g	24,83 $\pm$ 0,57 ^{fg}	18,18 $\pm$ 0,58 ^c	21,68 $\pm$ 0,43 ^e	33,68 $\pm$ 0,85 ^h	24,07 $\pm$ 0,59 ^f
Siringik asit	11,76 $\pm$ 0,36 ^a	15,02 $\pm$ 0,40 ^b	16,48 $\pm$ 0,59 ^c	15,39 $\pm$ 0,45 ^b	27,30 $\pm$ 0,74 ^g	16,77 $\pm$ 0,57 ^{cd}	17,87 $\pm$ 0,40 ^e	17,72 $\pm$ 0,28 ^c	19,14 $\pm$ 0,29 ^f	17,43 $\pm$ 0,46 ^{de}
<i>p</i> -kumarik asit	112,04 $\pm$ 0,64 ^a	189,61 $\pm$ 1,25 ^d	201,98 $\pm$ 0,45 ^e	264,38 $\pm$ 12,84 ^g	280,56 $\pm$ 0,28 ^h	159,30 $\pm$ 0,73 ^b	217,95 $\pm$ 2,75 ^f	206,87 $\pm$ 1,60 ^e	322,02 $\pm$ 0,79 ^j	179,69 $\pm$ 0,61 ^c
Ferulik asit	44,55 $\pm$ 1,02 ^b	69,15 $\pm$ 0,65 ^d	70,83 $\pm$ 0,79 ^{de}	57,69 $\pm$ 0,84 ^c	128,34 $\pm$ 1,94 ^h	42,48 $\pm$ 0,99 ^d	83,14 $\pm$ 0,27 ^g	72,34 $\pm$ 0,64 ^{cd}	71,74 $\pm$ 0,25 ^e	73,76 $\pm$ 1,59 ^f
Sinamik asit	20,69 $\pm$ 0,51 ^a	42,17 $\pm$ 0,83 ^f	48,10 $\pm$ 0,34 ^g	28,68 $\pm$ 0,36 ^c	81,91 $\pm$ 0,97 ^j	25,85 $\pm$ 0,95 ^b	50,56 $\pm$ 0,08 ^h	52,23 $\pm$ 1,03 ⁱ	30,93 $\pm$ 0,29 ^d	35,75 $\pm$ 0,70 ^e
<i>o</i> -Kumarik asit	5,19 $\pm$ 0,17 ^a	7,64 $\pm$ 0,36 ^d	12,25 $\pm$ 0,43 ^f	10,75 $\pm$ 0,26 ^c	11,89 $\pm$ 0,36 ^g	6,83 $\pm$ 0,09 ^c	11,06 $\pm$ 0,33 ^c	11,93 $\pm$ 0,11 ^f	15,60 $\pm$ 0,31 ^g	6,27 $\pm$ 0,23 ^b
Hücre duvarı bağlı form										
Protokatekuik asit	47,84 $\pm$ 0,45 ^b	55,56 $\pm$ 0,11 ^c	79,13 $\pm$ 0,51 ⁱ	54,29 $\pm$ 0,31 ^d	76,46 $\pm$ 0,47 ^h	61,51 $\pm$ 0,05 ^f	63,76 $\pm$ 0,39 ^g	96,77 $\pm$ 0,37 ^j	52,87 $\pm$ 0,16 ^c	16,54 $\pm$ 0,43 ^a
Vanillik asit	6,10 $\pm$ 0,11 ^b	10,81 $\pm$ 0,16 ^c	13,33 $\pm$ 0,18 ^e	12,13 $\pm$ 0,06 ^d	15,99 $\pm$ 0,27 ^g	28,78 $\pm$ 0,09 ^f	13,21 $\pm$ 0,06 ^c	19,04 $\pm$ 0,77 ^h	14,44 $\pm$ 0,35 ^f	3,49 $\pm$ 0,23 ^a
Siringik asit	17,44 $\pm$ 0,39 ^b	19,71 $\pm$ 0,41 ^c	20,60 $\pm$ 0,44 ^d	20,53 $\pm$ 0,36 ^d	27,52 $\pm$ 0,21 ^f	32,09 $\pm$ 0,16 ^g	35,10 $\pm$ 0,69 ^h	23,41 $\pm$ 0,45 ^e	23,54 $\pm$ 0,16 ^c	7,68 $\pm$ 0,09 ^a
<i>p</i> -Kumarik asit	162,10 $\pm$ 0,20 ^a	193,94 $\pm$ 0,40 ^b	247,57 $\pm$ 2,17 ^g	193,20 $\pm$ 0,66 ^b	232,01 $\pm$ 2,14 ^f	261,42 $\pm$ 0,40 ^h	210,83 $\pm$ 1,99 ^e	222,77 $\pm$ 1,22 ^d	224,11 $\pm$ 2,92 ^{de}	226,62 $\pm$ 0,57 ^e
Ferulik asit	90,71 $\pm$ 0,90 ^a	113,26 $\pm$ 0,80 ^b	135,60 $\pm$ 0,93 ^g	117,87 $\pm$ 1,67 ^c	130,31 $\pm$ 1,39 ^e	153,71 $\pm$ 1,66 ^h	133,28 $\pm$ 1,67 ^{fg}	130,76 $\pm$ 0,70 ^{ef}	121,41 $\pm$ 1,66 ^d	113,34 $\pm$ 3,19 ^b
Sinamik asit	12,06 $\pm$ 0,40 ^a	18,67 $\pm$ 0,16 ^b	28,54 $\pm$ 0,63 ^e	31,38 $\pm$ 0,50 ^f	33,89 $\pm$ 0,57 ^g	26,03 $\pm$ 0,20 ^d	34,87 $\pm$ 0,28 ^h	36,69 $\pm$ 0,37 ⁱ	35,32 $\pm$ 0,88 ^h	20,58 $\pm$ 0,34 ^c
<i>o</i> -Kumarik asit	1,64 $\pm$ 0,10 ^a	1,78 $\pm$ 0,06 ^a	2,99 $\pm$ 0,30 ^c	3,84 $\pm$ 0,21 ^d	5,13 $\pm$ 0,19 ^e	5,20 $\pm$ 0,39 ^e	2,26 $\pm$ 0,31 ^b	5,01 $\pm$ 0,34 ^e	2,68 $\pm$ 0,09 ^c	2,71 $\pm$ 0,17 ^c



Şekil 3.45. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprakta toplam fenolik asit (bireysel fenolik asit toplamı) içeriğine etkisi a) çözünebilir serbest, b) ester konjuge, c) glikozit konjuge ve d) hücre duvarına bağlı formlar. ΣHBA : Toplam Hidroksibenzoik Asitler, ΣHSA : Toplam Hidroksisinnamik Asitler, ΣFA : Toplam Fenolik Asitler. Veriler üç biyolojik tekrardan elde edilmiştir ve her değer ortalama $\pm$ standart hata olarak belirtilmiştir. Farklı harflere ait değerler Duncan çoklu karşılaştırma testine göre önemli ölçüde farklılık göstermektedir ($p < 0,05$).

3.2.9. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Uçucu Yağ Bileşenlerine Etkisi

Farklı konsantrasyonlarda (100 μ M ve 300 μ M) As ve Cr streslerine maruz kalan fesleğinde foliar Cys (300 μ M) uygulamasının kök, gövde ve yaprak kısımlarına ait uçucu yağ bileşenlerine ilişkin sonuçlar Çizelge 3.9, 3.10 ve 3.11’de verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde tüm uygulama gruplarının uçucu yağ bileşenlerine etkisi farklılık göstermiştir. Buna göre uçucu yağın ana bileşeni yaprakta 1,8-cineole, gövdede tetradecane ve kökte dodecane olarak tespit edilmiştir. Uçucu yağın diğer bileşenleri ise eugenol, methyl eugenol, linalool, trans- α -bergamotene, phenyl acetate, palmitic acid, decane, dodecane, nonadecane ve tetradecane olarak belirlenmiştir.

Fesleğen bitkisinin kökünde palmitic acid, decane, dodecane, tetradecane ve nonadecane olmak üzere 5 adet uçucu yağ bileşeni belirlenmiştir (Çizelge 3.9). En yüksek bileşen tetradecane olup 300 μ M As uygulamasında elde edilirken, Cys+100 μ M Cr konsantrasyonunda uçucu yağ bileşenine rastlanmamıştır. As ve Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında her iki As ve Cr (100-300 μ M) konsantrasyonunda da nonadecane dışındaki uçucu yağ bileşenlerinde artma belirlenmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin uçucu yağ bileşen içeriğine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda dodecane ve palmitic acid içeriğinde artma, 300 μ M As konsantrasyonunda tüm uçucu yağ bileşenlerinde azalma belirlenmiştir. Cys’in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 μ M Cr konsantrasyonunda uçucu yağ bileşenine rastlanmazken, 300 μ M Cr konsantrasyonunda decane ve nonadecane içeriğinde artma kaydedilmiştir.

Fesleğen bitkisinin gövdesinde 1,8-cineole, trans- α -bergamotene, palmitic acid, decane, dodecane ve tetradecane olmak üzere 6 adet uçucu yağ bileşenine rastlanmıştır (Çizelge 3.10). En yüksek bileşen tetradecane olup Cys uygulamasında belirlenirken, Cys+100 μ M Cr konsantrasyonunda uçucu yağ bileşenine rastlanmamıştır. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M As konsantrasyonunda dodecane ve tetradecane içeriğinde, 300 μ M As uygulamasında ise dodecane, tetradecane ve palmitic acid içeriğinde artma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 μ M Cr konsantrasyonunda dodecane, tetradecane içeriğinde,

300µM Cr konsantrasyonunda dodecane, tetradecane ve palmitic acid içeriğinde artma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin uçucu yağ bileşen içeriğine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 µM As konsantrasyonunda palmitic acid, 300 µM As konsantrasyonunda dodecane içeriğinde artma belirlenmiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 µM Cr konsantrasyonunda uçucu yağ bileşenine rastlanmazken, 300 µM Cr konsantrasyonunda tüm uçucu yağ bileşenlerinde azalma kaydedilmiştir.

Fesleğen bitkisinin yaprağında 1,8-cineole, eugenol, methyl eugenol, linalool, trans- α -bergamotene, phenyl acetate, dodecane ve tetradecane olmak üzere 8 adet uçucu yağ bileşeni tespit edilmiştir (Çizelge 3.11). En yüksek bileşen eugenol olup Cys+300 µM Cr uygulamasında belirlenirken, 100 µM As konsantrasyonunda uçucu yağ bileşenine (1,8-cineole, methyl eugenol ve trans- α -bergamotene hariç) rastlanmamıştır. As uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında 100 µM As konsantrasyonunda sadece methyl eugenol içeriğinde, 300 µM As konsantrasyonunda ise tüm uçucu yağ bileşenlerinde artma belirlenmiştir. Cr uygulanan örnekler kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında her iki Cr (100-300 µM) konsantrasyonunda da eugenol ve methyl eugenol haricinde uçucu yağ bileşenlerinde azalma kaydedilmiştir.

Cys uygulamasının As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin uçucu yağ bileşen içeriğine etkisi incelendiğinde Cys uygulanan bitkiler tek başına As uygulanan bitkiler ile karşılaştırıldığında 100 µM As konsantrasyonunda methyl eugenol ve trans- α -bergamotene dışında artış kaydedilirken, 300 µM As konsantrasyonunda tüm bileşenlerde genel olarak azalma belirlenmiştir. Cys'in Cr uygulamaları üzerindeki etkisine bakıldığında ise tek başına Cr uygulamalarına kıyasla 100 µM Cr konsantrasyonunda tüm bileşenlerde, 300 µM Cr konsantrasyonunda eugenol ve 1,8-cineole haricinde uçucu yağ bileşenlerinde azalma kaydedilmiştir.

Çizelge 3.9. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının kökte uçucu yağ bileşenlerine etkisi

Kök Uçucu Yağ Bileşenleri											
Ablonma Zamanı (dk)	Bileşenler	Kontrol	100 µM As	300 µM As	100 µM Cr	300 µM Cr	Cys	Cys+100 µM As	Cys+300 µM As	Cys+100 µM Cr	Cys+300 µM Cr
12.66	Decane	0,00	2,63	1,68	2,90	0,00	0,00	2,19	1,10	0,00	2,62
19.62	Dodecane	0,00	7,02	12,46	12,19	12,04	9,54	8,74	6,49	0,00	10,15
22.74	Tetradecane	0,00	10,10	13,57	11,05	12,69	11,94	9,41	6,81	0,00	0,76
21.26	Nonadecane	3,62	1,44	1,99	1,27	0,74	1,97	1,06	0,00	0,00	2,70
26.27	Palmitic acid	0,00	3,95	4,79	3,40	4,52	2,44	4,38	2,41	0,00	4,18

Çizelge 3.10. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının gövdede uçucu yağ bileşenlerine etkisi

Gövde Uçucu Yağ Bileşenleri											
Ablonma Zamanı (dk)	Bileşenler	Kontrol	100 µM As	300 µM As	100 µM Cr	300 µM Cr	Cys	Cys+100 µM As	Cys+300 µM As	Cys+100 µM Cr	Cys+300 µM Cr
13.83	1,8-cineole	8,41	2,29	1,69	5,50	1,90	1,46	1,06	1,45	0,00	1,69
12.66	Decane	2,11	3,15	2,58	3,01	2,34	2,99	2,91	3,24	0,00	1,87
19.62	Dodecane	1,11	10,87	7,49	8,71	8,01	10,08	9,10	9,23	0,00	6,10
22.74	Tetradecane	1,97	11,29	9,72	9,97	9,10	11,78	9,32	1,59	0,00	6,72
23.14	trans-α-bergamotene	5,46	2,79	2,65	3,12	1,93	1,82	0,00	0,00	0,00	2,10
26.27	Palmitic acid	0,54	0,00	2,05	0,00	2,38	2,50	2,30	2,67	0,00	1,82

Çizelge 3.11. Arsenik, krom ve sistein uygulamalarının yaprakta uçucu yağ bileşenlerine etkisi

Yaprak Uçucu Yağ Bileşenleri											
Alıkonma Zamanı (dk)	Bileşenler	Kontrol	100 µM As	300 µM As	100 µM Cr	300 µM Cr	Cys	Cys+100 µM As	Cys+300 µM As	Cys+100 µM Cr	Cys+300 µM Cr
13.83	1,8-cineole	19,69	18,61	19,72	17,94	14,83	18,18	16,38	19,23	12,27	14,86
22.36	Eugenol	4,35	0,00	19,06	21,48	16,67	0,00	12,18	16,78	20,55	22,70
22.83	Methyl eugenol	2,69	12,95	7,51	6,23	5,49	5,36	5,77	6,60	5,87	4,62
16.25	Linalool	8,42	0,00	9,03	6,20	4,95	7,66	5,02	0,00	3,85	4,27
19.62	Dodecane	0,92	0,00	1,10	0,72	0,89	1,51	1,38	1,77	0,00	0,37
22.74	Tetradecane	1,42	0,00	1,65	1,34	0,47	2,42	2,33	1,56	1,58	0,86
23.14	trans- α -bergamotene	12,86	6,34	15,26	6,10	4,79	6,76	5,84	3,48	4,21	3,99
20.14	Phenyl acetate	1,33	0,00	1,42	1,71	1,52	1,42	1,13	1,46	1,15	1,15

4. TARTIŞMA

4.1. ARSENİK, KROM VE SİSTEİN UYGULAMALARININ FESLEĞEN BİTKİSİNDE MORFOLOJİK VE FİZYOLOJİK PARAMETRELERE ETKİSİ

Bitki büyümesi için gerekli olduğuna dair bir kanıt bulunmamasına rağmen As ve Cr, bitkiler tarafından temel besin elementlerinin alınmasından sorumlu taşıyıcılar yoluyla alınmaktadır (Zulfiqar & Ashraf, 2022; Ali vd., 2023). Toksik metallerin bitkiler üzerindeki etkisi uygulama dozlarına, yetiştirme ortamına, bitki türüne göre farklılık göstermektedir.

Toprakta ve sulama suyunda yüksek seviyelerde As stresine maruz kalan bitkilerde yaygın görülen semptomlar bodur büyüme ve düşük mahsul verimidir. As kök sisteminde birikme eğiliminde olduğundan kök büyümesini ve çoğalmasını inhibe etmektedir. As'ın gövdeye taşınımı biyokütle üretimini yavaşlatmakta ve üreme kapasitesini tehlikeye atmaktadır (Garg & Singla, 2011; Abbas vd., 2018).

Cr ile kontamine topraklarda yetişen bitkilerde tohum çimlenmesinde inhibisyon, kök gelişiminde azalma ve yapraklarda kloroz en yaygın görülen etkilerdir. Bunun yanında krom, CO₂ fiksasyonu, önemli elementlerin emilimi ve birikimi, yaprak alanı ve sayısı üzerinde de sınırlayıcı etki göstermektedir (Shanker vd., 2005; Ertani vd., 2017).

4.1.1. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Kök Uzunluğuna Etkisi

İki farklı konsantrasyonda As ve Cr uygulanan fesleğen bitkisinin kök uzunluğunun artan stres seviyeleri ile azaldığı belirlenmiştir. Literatürde sonuçlarımızı destekler nitelikte çalışmalar mevcuttur. As stresine maruz kalan fesleğen ve pirinç bitkilerinde kök uzunluğunun kontrol bitkilerine göre azaldığı belirlenmiştir (Zare Dehabadi vd., 2013; Saeid vd., 2014; Upadhyay vd., 2016). Basit vd. (2022) pirinç bitkisinde yaptıkları çalışmada Cr (100 µM) stresinin kök uzunluğunu azalttığını rapor etmiştir. Cys'in As ve Cr streslerine karşı kök uzunluğu üzerindeki yapıcı etkisi, Hg etkisi altındaki *Arabidopsis*'te dıştan Cys'in Hg'nin neden olduğu kök büyümesini inhibisyonunu büyük ölçüde hafiflettiği çalışma ile uyumluluk göstermektedir (Kim vd.,

2022).

4.1.2. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Kök Yaş Ağırlığına Etkisi

Kök yaş ağırlığı üzerine As ve Cr konsantrasyonlarının artan konsantrasyona paralel olarak azaldığı tespit edilmiştir. Konu ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde 50 ve 100 μM Cr uygulanan kanola çeşidinde ve 100 μM Cr uygulanan mısırdaki kök yaş ağırlığı açısından azalma kaydedilmiştir (Ayyaz vd., 2020; Terzi & Yıldız, 2021). Hidroponik ortamda yetiştirilen fesleğende 300 μM As konsantrasyonunun kök yaş ağırlığını önemli derecede azalttığı kaydedilmiştir (Saeid vd., 2014). Pirinç üzerinde yapılan çalışmada artan As stresi (100 μM ve 200 μM) ile kök yaş ağırlığında kontrole kıyasla önemli bir azalma olduğu rapor edilmiştir (Raza vd., 2016). Literatür bilgileri çalışmamızdan elde edilen sonuçları destekler niteliktedir. Cys'in kök yaş ağırlığı üzerindeki pozitif etkisi Cr stresli mısır fidelerinde de elde edilmiş ve çalışma sonuçlarımızla uyumlu bulunmuştur (Terzi & Yıldız, 2021)

4.1.3. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Kök Kuru Ağırlığına Etkisi

Farklı konsantrasyonlardaki As ve Cr uygulamaları fesleğenin kök kuru ağırlığında azalmaya neden olmuştur. Araştırma sonucumuza benzer olarak kontrol bitkileri ile kıyaslandığında As toksisitesinin kök kuru ağırlığı üzerindeki %25 oranındaki azaltıcı etkisi *Brassica juncea* bitkisinde de rapor edilmiştir (Ahmad vd., 2021). *Parthenium hysterophorus* bitkisinde yapılan bir çalışmada 0,5 mM Cr uygulamasının kök kuru ağırlığını önemli ölçüde azalttığı bildirilmiştir (UdDin vd., 2015). As ve Cr streslerine karşı kök kuru ağırlığı üzerinde Cys'in koruyucu etkisi Cr stresine maruz kalan mısır (Terzi & Yıldız, 2021) ve kanola (Ayyaz vd., 2020) bitkilerinde de kaydedilmiştir. Ayrıca 3,6 mM Cys uygulamasının tuz stresi altında yetiştirilen *Linum usitatissimum* bitkisinde kök kuru ağırlığını artırdığı rapor edilmiştir (Hussein & Alshammari, 2022).

4.1.4. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Gövde Uzunluğuna Etkisi

Bu çalışmada artan As ve Cr konsantrasyonlarının fesleğenin gövde uzunluğunu azalttığı belirlenmiştir. En düşük gövde uzunluğu 300 μM 'lık As konsantrasyonunda belirlenirken, Cys uygulaması yapılan grupta en yüksek olarak belirlenmiştir. Konu ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde Cr stresinin *Citrus aurantium* ve *Camellia sinensis* bitkilerinde gövde uzunluğunda azalmaya neden olduğu rapor edilmiştir (Tang, 2012; Shiyab, 2019). As stresinin de benzer şekilde *Gladiolus grandiflorus* ve

Phaseolus vulgaris bitkilerinde gövde uzunluğunu azalttığı belirlenmiştir (Shah vd., 2022; Zulfiqar vd., 2023). Elde ettiğimiz bulgular ile literatür sonuçları benzerlik göstermektedir. Gövde uzunluğundaki bu azalma As ve Cr'un kök büyümesi ve gelişimini azaltması ve bunun sonucunda toprak üstü bitki kısımlarına su ve besin maddesi taşınımının azalmasından kaynaklanıyor olabilir. Cys'in As ve Cr stresleri altındaki bitkilerin büyüme üzerindeki yararlı etkisi Cr toksisitesi altındaki mısır (Terzi & Yıldız, 2021) ve Hg toksisitesindeki mısır (Aysin vd., 2020) bitkilerinde de kaydedilmiştir.

4.1.5. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Gövde Yaş Ağırlığına Etkisi

Çalışmamızda artan As ve Cr konsantrasyonlarının fesleğenin gövde yaş ağırlığı üzerinde azaltıcı etki gösterdiği belirlenmiştir. Sonuçlarımıza paralel olarak farklı konsantrasyonlarda Cr (10, 15 ve 20 ppm) uygulanan mısır bitkisinin gövde yaş ağırlığının konsantrasyona bağlı olarak %33-50 oranında azalmaya yol açtığını göstermiştir (Ramzan vd., 2023). Benzer şekilde *Isatis cappadocica* bitkisinde As stresi (5, 25, 125 ve 625 μ M) seviyelerindeki artış ile birlikte gövde taze ağırlığında doğrusal bir azalma kaydedilmiştir (Karimi vd., 2024).

Cys'in yaş ağırlık üzerine etkisi düşük As konsantrasyonu ve her iki Cr konsantrasyonunda önemli bulunurken, 300 μ M As konsantrasyonunda istatistiki açıdan önemli bir etkisinin olmadığı saptanmıştır. Cys'in gövde yaş ağırlığı üzerindeki olumlu etkisi Pb stresine maruz bırakılan *Iris lactea* bitkisinde de kaydedilmiştir (Yuan vd., 2015). Bir başka çalışmada dıştan Cys takviyesinin, Cr stresi altındaki *Brassica napus* fidelerinin taze ağırlıklarındaki inhibisyonu etkili bir şekilde hafiflettiği bildirilmiştir (Yıldız & Terzi, 2021).

4.1.6. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Gövde Kuru Ağırlığına Etkisi

Gövde kuru ağırlığı artan As ve Cr konsantrasyonları ile doğru orantılı olarak azalmıştır. Konu ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde As (25, 50, 75 mg kg⁻¹) ile kontamine olmuş toprakta yetiştirilen *Brassica napus* ve *Brassica juncea* bitkilerinde gövde kuru ağırlığında düşüş gözlenmiştir (Niazi vd., 2017). Başka bir çalışmada 120 μ M Cr stresine maruz kalan *Vigna radiata* bitkisinde gövde kuru ağırlığının belirgin şekilde azaldığı kaydedilmiştir (Singh vd., 2021a). Cr toksisitesinin gövde kuru ağırlığı üzerinde azaltıcı etkisi As stresi altında da kaydedilmiştir. 10 μ M ve 20 μ M As stresine maruz kalan soya fasulyesi bitkisinde gövde kuru ağırlığındaki azalma sırasıyla %31,47

ve %58,16 olarak belirlenmiştir (Ahmad vd., 2020). As ve Cr stresine karşı uygulanan Cys gövde kuru ağırlığını artırmış olup, elde edilen sonuçlar, Cr stresi altındaki mısır fidelerinde gövde kuru ağırlığının artması ile benzerlik göstermektedir (Terzi & Yıldız, 2021).

4.1.7. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Yaprak Uzunluğuna Etkisi

Yaprak uzunluğu üzerinde As ve Cr konsantrasyonları negatif etki gösterirken, bu etkisi dıştan Cys uygulaması ile birlikte azalmıştır. Araştırmadan elde ettiğimiz bulgulara benzer sonuçlar 80 mg kg⁻¹ As içeren toprakta yetiştirilen fesleğen bitkisinde de belirlenmiştir (Fahmideh vd., 2020). Yapılan farklı bir çalışmada, *Brassica napus* ve *Brassica juncea* bitkisine farklı konsantrasyonlarda (25, 50, 75 mg kg⁻¹) As stresi uygulandığında, artan As konsantrasyonu ile yaprak alanı her iki bitki türü için de kontrole kıyasla önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir (Niazi vd., 2017). Farklı konsantrasyonlarda Cr (2.5, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200 mg/L) ile sulanan çeltikte yaprak alanının artan Cr konsantrasyonu ile kademeli olarak azaldığı bildirilmiştir (Sundaramoorthy vd., 2010). Çalışmamızda Cys'in As ve Cr streslerine karşı yaprak uzunluğunda pozitif etki gösterdiği belirlenmiştir. Benzer şekilde *Capsicum annuum* bitkisinde yaprak boyutunda As kaynaklı azalmanın, melatonin ve melatonin+ sodyum hidrojen sülfür ile muamelesi ile arttığı kaydedilmiştir (Kaya vd., 2022).

4.1.8. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Yaprak Yaş Ağırlığına Etkisi

Çalışmamızda, As ve Cr baskısı altında yetişen fesleğende yaprak yaş ağırlığında azalma kaydedilmiştir. Konu ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde As toksisitesine maruz kalan domates bitkisinde yaprak yaş ağırlığında %76,8 oranında azalma ile ciddi bir düşüşe neden olduğu belirlenmiştir (Barrachina vd., 1995). Farklı bir çalışmada, *Sorghum bicolor* bitkisine uygulanan 2 ve 4 ppm Cr konsantrasyonlarının yaprak yaş ağırlığını azalttığı belirlenmiştir (Kumar vd., 2019b). Literatür bilgileri ile çalışma sonuçlarımız uyumlu bulunmuştur. Bununla birlikte bu çalışmada Cys uygulaması ile fesleğenin yaprak yaş ağırlığında artış tespit edilmiştir. Paralel sonuçlar glisin betain uygulanan (50 ve 100 mM) sorgumda Cr stresine azalan yaprak yaş ağırlığını artırdığı tespit edilmiştir (Kumar vd., 2019b).

4.1.9. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Yaprak Kuru Ağırlığına Etkisi

Farklı konsantrasyonlardaki As ve Cr toksisitesine maruz kalan fesleğende yaprak kuru

ağırlığında azalma belirlenmiştir. Sonuçlarımıza benzer olarak çok yıllık *Lolium perenne* ve tek yıllık *Lolium multiflorum* bitkilerinde As denemelerinin her iki çeşidinde yaprak kuru ağırlığında azaltıcı etki gösterdiği kaydedilmiştir (Li vd., 2019). Farklı konsantrasyonlarda (2 ve 4 ppm) Cr stresi altındaki *Sorghum bicolor* da yaprak kuru ağırlığının stresten olumsuz etkilendiği ve artan krom konsantrasyonu ile azaldığı rapor edilmiştir (Kumar vd., 2019b). Çalışmamızda dıştan Cys uygulamasının yüksek As konsantrasyonunda yararlı etki göstermediği ancak düşük As konsantrasyonu ve her iki Cr konsantrasyonunda yaprak kuru ağırlığında artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Soya fasulyesinin tuzlu su ile sulanması sonucu oluşan yaprak kuru ağırlığındaki düşüşün 20 ve 40 mg/L Cys uygulaması ile ilgili kontrollere kıyasla yaprak kuru ağırlığını artırdığı bildirilmiştir (Sadak vd., 2020).

4.1.10. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Yaprak Bağlı Su İçeriğine Etkisi

Çalışma kapsamında fesleğen bitkisinde As ve Cr stresleri yapraklardaki su dengesinin bozulmasına neden olmuş ve yaprak bağlı su içeriği (RWC) artan konsantrasyonlarla kademeli bir şekilde azalmıştır. As ve Cr stresleri altındaki RWC'deki bu azalış önceki çalışmalarda da bildirilmiştir. Örneğin hidroponik ortamda yetiştirilen fesleğen on dört gün boyunca 300 µM As stresine maruz bırakılmış ve As muamelesinin RWC de büyük bir azaltıcı etki gösterdiği tespit edilmiştir (Saeid vd., 2014). Bir başka çalışmada üç farklı As konsantrasyonu (25, 50, 100 mg kg⁻¹) ve üç farklı toprak tekstüründe (killi, tınlı, kumlu tınlı) yetiştirilen mısırdaki tüm uygulamalarda RWC'nin azaldığı kaydedilmiştir (Hussain vd., 2021). Cr uygulaması yapılan mısır (Terzi & Yıldız, 2020) ve ekşi portakal (Shiyab, 2019) bitkilerinde RWC'nin azaldığı belirlenmiştir.

Bu çalışmada RWC içeriğinde Cys'in yüksek As konsantrasyonunda önemli bir etkisi görülmezken diğer uygulamalarda iyileştirici etki gösterdiği kaydedilmiştir. Benzer şekilde, su stresi koşullarında araştırılan iki farklı konsantrasyondaki (25/50 ppm) Cys'in yaprak uygulamalarının, buğdayda yaprak bağlı su içeriğinde iyileşmeye neden olduğu bildirilmiştir (Elkelish vd., 2021). Cr stresi altındaki mısır fidelerinde de Cys uygulaması RWC içeriğini arttırmıştır (Terzi & Yıldız, 2020).

4.1.11. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Klorofil Floresansına Etkisi

Farklı konsantrasyonlardaki As ve Cr toksisitesine maruz kalan fesleğende klorofil floresansında azalma belirlenmiştir. Sonuçlarımıza benzer şekilde As hiperakümülatörü olan *Pteris cretica* 'Albo-lineata' ve 'Parkerii' bitkisinde 100 ve 200 mg kg⁻¹ As

konsantrasyonlarının klorofil floresansını azalttığı bildirilmiştir (Zemanová vd., 2021a). Bir diğer çalışmada, kanola bitkisinde klorofil floresansının Cr stresi nedeniyle azaldığı rapor edilmiştir (Ayyaz vd., 2020). Çalışmamızda Cys'in sadece 100 μ M As uygulamasında klorofil floresansı üzerinde nispeten iyileştirici etki gösterdiği belirlenmiştir.

4.1.12. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Fotosentetik Pigment İçeriğine Etkisi

Fotosentetik pigment içeriği bitki metabolizması için hayati öneme sahiptir. Ağır metal stresi bitkilerde yaygın olarak kloroz, büyümede gerileme ve klorofil sentezinde azalmaya neden olmaktadır. Bu nedenle fotosentetik pigment içeriğinin belirlenmesi toksik metallerle karşı toleransın değerlendirilmesinde önemli bir parametredir. As ve Cr stresleri altındaki fesleğende klorofil a, klorofil b, klorofil a+b ve toplam karotenoid miktarları artan konsantrasyonlara paralel azalırken, klorofil a/b oranının arttığı tespit edilmiştir. Aynı dozlarda uygulanan As ve Cr konsantrasyonlarının As'in Cr'a göre fotosentetik aparata daha fazla zarar verdiği belirlenmiştir. Konu ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde altı ayçiçeği hibritinin tümünde artan Cr (5, 10, 20 mg kg⁻¹) konsantrasyonu ile klorofil a, klorofil b, klorofil a+b ve karotenoid içeriğinin önemli ölçüde azaldığı belirlenmiştir (Farid vd., 2017). Cr stresi ayrıca *Pisum sativum* bitkisinde klorofil a, klorofil b ve karotenoidlerde önemli bir azalmaya neden olmuş ve artan Cr konsantrasyonu ile doğrusal olarak azalmıştır (Faisal vd., 2022). Farklı bir çalışmada ise ekmeklik buğdayda Cr stresinin kl a/b oranını artırdığı tespit edilmiştir (Akçin, 2019). Hidroponik ortamda yetiştirilen *Capsicum annuum* bitkilerinde As maruziyetinin klorofil a'yı (%51,7) ve klorofil b'yi (%25,9) azalttığı bildirilmiştir (Kaya vd., 2022). Benzer şekilde uçucu kül yataklarına ekilen *Dactylis glomerata* yapraklarındaki As konsantrasyonlarının klorofil a, klorofil b ve klorofil a+b içeriğini kontrol grubuna göre azalttığı belirlenmiştir (Gajić vd., 2020). Fotosentetik pigmentlerdeki bu düşüş büyük olasılıkla ağır metallerin yüksek redoks potansiyeli göz önüne alındığında metallerin fotosentetik pigmentlerin biyosentetik yollarındaki indirgeyici adımların engellenmesinden kaynaklanmaktadır (Aggarwal vd., 2011). Ayrıca klorofil a/b oranındaki artış As ve Cr toksisitesine klorofil b'nin klorofil a'dan daha duyarlı olduğunu göstermektedir. Çalışmamızda dışsal Cys uygulamasının As ve Cr uygulamalarına karşı klorofil a (300 μ M Cr hariç), klorofil b ve klorofil a+b içeriğini artırırken, klorofil a/b oranını (As konsantrasyonları hariç) azalttığı tespit edilmiştir.

Benzer şekilde, mısır bitkisinde Cr stresi ile azalan fotosentetik pigment içeriğinin dışsal Cys uygulaması ile hafifletildiği bildirilmiştir (Terzi & Yıldız, 2020). Elde ettiğimiz bulgulara uyumlu olarak keten bitkisi üzerinde yapılan çalışmada foliar Cys (1,6 mM) uygulamasının klorofil a, b ve karotenoid içeriğini artırdığı rapor edilmiştir (Hussein & Alshammari, 2022).

4.1.13. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Elektrolit Sızıntısına Etkisi

Elektrolit sızıntısı, bitkinin strese verdiği tepkinin önemli bir parçasıdır ve stres koşulları altında membran bütünlüğünü ve hücre hasarının belirlenmesinde iyi bir göstergedir (Demidchik vd., 2014). Çalışmada kullanılan As ve Cr konsantrasyonu artışı ile elektrolit sızıntısında artış gözlenmiştir. Araştırma sonucunda elde ettiğimiz verilere paralel değerler As toksisitesine maruz kalan *Gladiolus grandiflorus*, *Spinacia oleracea* ve *Boehmeria nivea* bitkilerinde (Mubarak vd., 2016; Saleem vd., 2023; Zulfiqar vd., 2023) ve Cr toksisitesine maruz kalan *Oryza sativa* ile ıspanak (Basit vd., 2022; Sami vd., 2023) bitkilerinde elektrolit sızıntısının arttığı ve hücre membranında hasara neden olduğu bildirilmiştir. Cys uygulamaları sonucunda elektrolit sızıntısı değerini azaltarak bitkinin stres toleransını genişlettiği belirlenmiştir. Benzer olarak, Cys uygulaması sonucunda düşük elektrolit sızıntı miktarı *Polianthes tuberosa* (Nasibi vd., 2014) ve *Prunus domestica* (Banin Sogvar vd., 2020) bitkilerinde rapor edilmiştir.

4.1.14. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Fotosentez Etkinliğine Etkisi

Fotosentez, yapraklardaki ağır metal birikimi nedeniyle dolaylı olarak azalmakta, bu da stomaların işleyişini ve dolayısıyla fotosentez ve transpirasyon oranlarını etkilemektedir (Chandra & Kang, 2016). Net fotosentez oranı bitkilerin toplam fotosentez kabiliyetini doğrudan ortaya koyan önemli bir göstergedir ve bu oran stoma iletkenliği, transpirasyon oranı ve hücrelerarası CO₂ konsantrasyonundan etkilenmektedir. Stoma iletkenliği CO₂ transfer oranında önemli bir faktördür. Transpirasyon oranı, fotosentez sırasında yaprak su metabolizmasının verimliliğini yansıtmaktadır (Ding vd., 2020).

Çalışma kapsamında, As ve Cr stresi net fotosentez oranı, stoma iletkenliği ve transpirasyon oranını azaltırken hücreler arası CO₂ miktarında artışa neden olmuştur. Konu ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, 150 µM As toksisitesi uygulanan soya fasulyesi bitkisinde transpirasyon oranı (%40.4), net fotosentez (%42.6), hücrelerarası CO₂ konsantrasyonu (%43.5) ve stoma iletkenliğinin (%45.1) kontrole kıyasla azaldığı belirlenmiştir (Faizan vd., 2022). Benzer şekilde 50 µM ve 100 µM As konsantrasyonu

ile yapılan çalışmada *Spinacia oleracea* türünde net fotosentez, stoma iletkenliği ve transpirasyon oranında azalma gözlenmiştir (Saleem vd., 2023). Fotosentez etkinliği üzerinde Cr'un etkisinin belirlenebilmesi için yapılan başka bir çalışmada 5 ve 10 mg Cr konsantrasyonunun mısır bitkisinde net fotosentez, stoma iletkenliği ve transpirasyon oranının artan Cr konsantrasyonuna bağlı bir şekilde azaldığı rapor edilmiş ve maksimum azalma 10 mg kg^{-1} Cr konsantrasyonunda elde edilmiştir (Habiba vd., 2019). Anjum vd. (2016) mısır bitkisi ile yaptıkları çalışmada Cr toksisitesinin net fotosentez, transpirasyon oranı, hücreler arası CO_2 ve stoma iletkenliğini önemli ölçüde azalttığını rapor etmiştir. Sonuçlarımız literatür verileri ile kıyaslandığında net fotosentez, stoma iletkenliği ve transpirasyon oranında uyumluluk belirlenirken hücrelerarası CO_2 konsantrasyonu ile çeliştiği belirlenmiştir. Ancak bazı çalışmalarda As toksisitesinin hücrelerarası CO_2 konsantrasyonunu artırdığı belirlenmiş ve sonuçlarımız ile benzerlik göstermektedir. Örneğin Ding vd. (2020) As uygulamalarının yayla pirincinde ve Liu vd. (2015) Cd toksisitesinin bütün bitkisinde hücrelerarası CO_2 konsantrasyonunu kontrol bitkilerine göre önemli miktarda artırdığını bildirmiştir. Hücrelerarası CO_2 konsantrasyonundaki artış sonucu fotosentezdeki azalmanın ana nedenini stoma dışı faktörler oluşturmaktadır. Bu faktörler arasında fotosentetik pigmentin bozulması, kloroplast yapısının tahribatı, ribuloz bifosfat karboksilaz (Rubisco) gibi CO_2 fiksasyon enzimlerinin parçalanması, PSII'nin su oksitleyici kompleksinin (D1 ve D2 proteinleri) hızla bozulması ve PSII'yi inhibe ederek kloroplastta elektron taşıma sisteminin hasarı yer almaktadır (Solanki & Dhankhar, 2011; Zhang vd., 2019; Rai vd., 2021).

Cys, $300 \text{ }\mu\text{M}$ As konsantrasyonu dışındaki diğer uygulamalarda net fotosentez oranı, stoma iletkenliği ve transpirasyon oranını artırdığı ve hücrelerarası CO_2 konsantrasyonunu azalttığı belirlenmiştir. Çalışma sonuçlarımıza paralel şekilde soya fasulyesinde As maruziyeti sonucu azalan transpirasyon oranı, net fotosentez ve stoma iletkenliği magnezyum oksit nanopartiküllerinin foliar uygulaması ile arttığı tespit edilmiştir (Faizan vd., 2022). Yine benzer şekilde foliar selenyum uygulamasının As toksisitesi altındaki yayla pirincinde net fotosentez, transpirasyon oranı ve stoma iletkenliğini artırdığı ancak hücreler arası CO_2 konsantrasyonunu önemli ölçüde azalttığı bildirilmiştir (Ding vd., 2020). Cr stresi altındaki mısırdaki 5-aminolevulinik asit uygulamasının stoma iletkenliği, net fotosentez oranı ve transpirasyon oranını artırdığı rapor edilmiştir (Habiba vd., 2019).

Bitkilerin fotosentez performansı fotosentetik pigment içeriği ile yakından ilişkilidir. Bu çalışmada, fotosentetik pigment içeriği As ve Cr konsantrasyonunun artmasıyla azalmıştır. Ancak Cys'in yapraktan uygulaması ile fotosentetik pigment içeriği artmış ve fesleğende fotosentezi teşvik etmiştir. Bunun nedeni Cys'in yapraklardaki As ve Cr birikimini azaltması sonucu As ve Cr'un kloroplastlara verdiği zararı hafifletmesi ile ilişkilendirilebilir.

4.1.15. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Element İçeriğine Etkisi

Bitkiler, normal büyüme ve gelişim sürecinde metabolik aktivitelerini sürdürebilmek için hem makro hem de mikro besin elementlerine ihtiyaç duymaktadır. Bitkinin yetiştirme ortamında ağır metal içeriğinin yüksek olması, bitkiler tarafından besin alımını sınırlandırarak bitki büyümesinde azalmaya yol açmaktadır. Bu metal ve metaloidler temel minerallerle etkileşime girerek çözünmeyen bileşikler oluşturmakta ve topraktaki besin maddelerinin alımını kısıtlamaktadır (Chigonum, 2019).

K, bitkilerde ozmotik dengenin korunmasından, hücre zarı potansiyelinin düzenlenmesine, taşıma ve metabolik süreçlerin yönlendirilmesine kadar birçok kritik işlevi yerine getirir ve enzimatik bir kofaktör olarak hizmet etmektedir (Srivastava vd., 2020). Ca, hücre duvarı ve membran stabilizasyonu, besin alımı, enzimatik ve hormonal düzenlemelerle ilgili metabolik süreci düzenleyen ve buna ek olarak ikincil bir haberci görevi görmektedir (Ahmad vd., 2015). Mg, klorofil molekülünün merkezi atomudur ve 300'den fazla enzimin aktivatörü olarak, klorofil biyosentezi ve fotosentez dahil olmak üzere çeşitli fizyolojik ve biyokimyasal süreçlerde kilit rol oynamaktadır (Ye vd., 2019). Fe fotosentez, klorofil sentezi, kloroplast gelişimi, solunum ve DNA sentezi gibi çeşitli metabolik süreçleri kontrol altında tutarak bitkilerde önemli bir rol oynar ve bununla birlikte sitokromlar, hem proteini, Fe bağlama bölgeleri ve Fe-S kümeleri gibi birçok enzim ve proteini içeren hücre redoks sistemlerinin kritik bir bileşenini oluşturmaktadır (Rout vd., 2015; Tripathi vd., 2018).

Mevcut çalışmada fesleğen fidelerinde As ve Cr streslerinin Ca, K, Fe ve Mg alımı ile Cys'in bu besin elementleri üzerindeki etkisi kök, gövde ve yaprak olmak üzere üç vejetatif organda değerlendirilmiş ve genel olarak stres altındaki bitkilerin element içerikleri yüksek bulunmuştur. Kök dokusundaki element içeriği incelendiğinde kontrol bitkilerine kıyasla artan As ve Cr konsantrasyonları ile genel olarak Ca, K, Fe ve Mg içeriğinde artış belirlenmiş ve bu artış As konsantrasyonlarında daha yüksek

bulunmuştur. As ve Cr uygulamalarında kök besin elementi içeriği çoktan aza doğru sırasıyla K>Ca>Mg>Fe olarak belirlenmiştir.

Gövde dokusundaki element içeriği kök dokularındaki besin elementi içeriğine benzerlik göstermektedir. Gövde dokusundaki Ca, K, Fe ve Mg konsantrasyonları artan As ve Cr konsantrasyonları ile artmış ve bu artış Cr konsantrasyonlarında daha yüksek bulunmuştur. As ve Cr uygulamalarında gövde besin elementi içeriği çoktan aza doğru sırasıyla K>Ca>Mg>Fe olarak belirlenmiştir.

Yaprak dokusundaki besin element içeriği stresli bitkilerde daha yüksek bulunmuştur. Buna göre yaprak dokusundaki Ca, K, Fe ve Mg konsantrasyonları artan As ve Cr konsantrasyonları ile artmış ve bu artış As konsantrasyonlarında daha yüksek bulunmuştur. As ve Cr uygulamalarında yaprak besin elementi içeriği çoktan aza doğru sırasıyla K>Ca>Mg>Fe olarak belirlenmiştir.

Literatürde yer alan pek çok çalışmada As ve Cr toksisitelerinin bitki besin elementi alımını engellediği bildirilmiştir (UdDin vd., 2015; Chandrakar vd., 2018; Ulhassan vd., 2019; Sharma vd., 2020; Faizan vd., 2022). Araştırma sonuçlarımız literatürden farklı olarak stres altındaki bitkilerde Ca, K, Mg ve Fe içeriği yüksek bulunmuştur. Bu bulgulara paralel literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Örneğin As stresi altındaki soya fasulyesi bitkilerinde Mg içeriğinin kökte arttığı (Faizan vd., 2022), Cr (10 µM) maruziyetinin arpa genotipinin kökünde Fe ve K içeriğini arttığı (Ali vd., 2012), *Lolium perenne* türlerinde As toksisitesi P ve K içeriği en fazla yeni çıkan yapraklarda, Ca ve Mg içerikleri ise en fazla olgun yapraklarda belirlenirken (Li vd., 2019), As stresli *Brassica juncea* kökünde K ve Fe içeriğinde artış (Singh vd., 2018), As ve Cr ile kirlenmiş toprakta yetiştirilen *Ocimum basilicum* gövdesinde yüksek Ca içeri (Boechat vd., 2016), yüksek konsantrasyonda As içeren (100 mg/kg) toprakta yetiştirilen *Pteris cretica* gövdesinde de kontrole kıyasla daha yüksek Mg içeriği, düşük konsantrasyonda As (20 mg/kg) uygulamasında gövde Fe içeriğinde artış belirlenmiştir (Zemanová vd. 2021b). Bazı durumlarda Ca ve Mg gibi temel besin maddelerinin alımının metal(oid)lere maruz kalan bitkilerde arttığı tespit edilmiş ve bunun yaygın bir savunma tepkisi olduğu belirtilmiştir (Mondal vd., 2022). Ek olarak, toksik elementlerin çoğunun biriktirildiği apoplast ve vakuoldeki bir değişikliğin Ca, K ve Mg alımını indüklediği ve böylece toksik elementlerle çökelti oluşturabilecekleri varsayılmıştır (Mondal vd., 2022).

Cys'in As ve Cr stresleri altındaki fesleğenin kök, gövde ve yaprak dokularındaki Ca, K, Mg ve Fe içeriğine bakıldığında ise farklı etkiler belirlenmiştir. Sadece Cys uygulanan grupların kontrol grubuna kıyasla üç vejetatif organda da element içerikleri üzerinde olumlu etkisi saptanmıştır. Kök dokusundaki element içeriği incelendiğinde tek başına As ve Cr uygulamalarına kıyasla Cys'in genel olarak azalmaya neden olduğu belirlenmiştir. As ve Cr uygulamalarında Cys'in kök besin elementi içeriğine etkisi çoktan aza doğru sırasıyla K>Ca>Mg>Fe olarak belirlenmiştir.

Gövde dokusundaki element içeriği incelendiğinde tek başına As ve Cr uygulamalarına kıyasla Cys'in Mg içeriğinde artışa neden olurken diğer besin elementlerinde genel olarak azalmaya neden olduğu belirlenmiştir. As ve Cr uygulamalarında Cys'in gövde besin elementi içeriğine etkisi çoktan aza doğru sırasıyla K>Ca>Mg>Fe olarak belirlenmiştir.

Yaprak dokusundaki element içeriği incelendiğinde tek başına As ve Cr uygulamalarına kıyasla Cys'in Ca ve K içeriğinde artışa neden olurken Mg ve Fe içeriğinde azalmaya neden olduğu belirlenmiştir. As ve Cr uygulamalarında Cys'in yaprak besin elementi içeriğine etkisi çoktan aza doğru sırasıyla K>Ca>Mg>Fe olarak belirlenmiştir.

Mevcut çalışmada, Cys'nin As ve Cr stresi altındaki fesleğenin besin elementi içeriği üzerinde gövde Mg ve yaprak Ca, K içeriği dışında negatif etkisi söz konusudur. Bu durum kökte As ve Cr detoksifikasyonunda besin elementlerinin de görev alabileceğini göstermektedir. Literatür çalışmaları incelendiğinde, Cys uygulamalarının tuz stresi altındaki soya fasulyesinin yaprak dokusunda K içeriğini arttırdığı bildirilmiştir (Sadak vd., 2020). Farklı bir çalışmada Cd toksisitesinin hafifletilmesinde sodyum hidrosülfür uygulamasının pirinç yaprağında Ca, Mg, Fe ve kökünde Fe, Mg içeriğini artırdığı tespit edilmiştir (Mostofa vd., 2015). Cr stresi altındaki *Spinacia oleracea* bitkisinde sodyum hidrojen sülfür uygulamasının kök ve gövde Mg, K ve Ca içeriğini iyileştirdiği belirlenmiştir (Ma vd., 2022).

4.1.16. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Arsenik ve Krom Birikimine Etkisi

Bitkilerde metal(oid) alım seviyesi ve elementlerin hareketliliği tahmin edilirken bitki organlarının analizi önemlidir. Farklı bitki kısımlarındaki metal(oid) alımı ve birikimi, topraktaki metal(oid) konsantrasyonundan ve bitki dokularındaki metal(oid) dağılımından önemli ölçüde etkilenmekte ve kirlenmiş alanların iyileştirilmesinde

bitkilerin potansiyelinin değerlendirilmesi için bir gösterge niteliğindedir. Bu amaçla, fesleğenin fitoremediasyon kapasitesinin belirlenebilmesi için TF değeri kullanılmıştır. TF, bir bitki türünün ağır metali kökten gövdeye aktarma eğiliminin bir ölçüsüdür (Sricoth vd., 2018). $TF > 1$ olduğunda kökten gövdeye metal taşınımının etkili olduğu kabul edilirken (Seridou vd., 2023) $TF < 1$ olan bitkilerin fitostabilizasyon amaçlı kullanılabileceği belirtilmiştir (Yoon vd., 2006).

Araştırmamızda, As konsantrasyonunun yüksek miktarda kökünde akümüle edildiği ve akümülyasyon sırasıyla kök>gövde>yaprak olarak belirlenmiştir. Elde ettiğimiz bulgularla uyumlu sonuçlar As stresi altında yetiştirilmiş ıspanak bitkisinde rapor edilmiş ve artan As seviyesi ile kökte As içeriği artmıştır (Saleem vd., 2023). Benzer şekilde As ile kirli su ile sulama yapılan domates ve lahanada As akümülyasyonu sırasıyla kök>toprak üstü kısım>meyve olduğu bildirilmiştir (Sandil vd., 2021). Konu ile ilgili diğer çalışmalarda As'in kökte akümülyasyonu pirinç, fesleğen, hanımeli bitkilerinde de ortaya konulmuştur (Siddiqui vd., 2013; Pan vd., 2021; Wang vd., 2021; Yuan vd., 2023).

Bu çalışmada Cys uygulaması As metaloidinin alınımı ve birikimini farklı şekilde etkilemiştir. Kökteki As birikimi Cys uygulaması ile önemli miktarda azalmış ve bu azalış 100 μM ve 300 μM As konsantrasyonunda ardışık olarak %91 ve %90 olarak kaydedilmiştir. Sonuçlarımıza paralel olarak As ile kirli ortamda yetiştirilen mısırdaki *Funneliformis mosseae* isimli arbusküler mikorizal mantar ve Fe bileşiklerinin birlikte uygulamasının kökte As konsantrasyonunu önemli ölçüde azalttığı rapor edilmiştir (Zhou vd., 2023).

Yapraklardan Cys uygulaması düşük As (100 μM) stresi altında As'in gövde ve yapraklara taşınımını artırırken, yüksek As (300 μM) stresi altında As taşınımını azaltmıştır. Buna göre, Cys uygulaması tek başına 100 μM As uygulamasına kıyasla gövde ve yaprak dokularındaki As içeriğini sırasıyla %177 ve %25 artırdığı tespit edilmiştir. Çalışmamızın sonucuna paralel olarak dışsal Cys uygulamasının tekli Pb uygulamasına kıyasla *Iris lactea* türünde gövdede Pb birikimini artırdığı bildirilmiştir (Yuan vd., 2015).

Cys uygulamasının 300 μM As uygulamasına etkisine bakıldığında ise fesleğen gövde ve yaprak dokusundaki As içeriğini sırasıyla %39 ve %31 oranında azalttığı kaydedilmiştir. Sonuçlarımıza benzer olarak yapraktan çinko oksit nanopartiküllerinin

ve çinko tuzu uygulamasının pirinç gövdesindeki toplam As birikimini %28 ve %15 oranında azalttığı belirtilmiştir (Sharifan & Ma, 2021). Başka bir çalışmada hidroponik ortamda yetiştirilen pirinçte selenit uygulamasının gövde As birikimin azalttığı rapor edilmiş ve sonuçlarımız bu bulgularla uyumlu bulunmuştur (Wang vd., 2021). Ayrıca 300 µM As konsantrasyonunda Cys uygulamasının bitki fizyolojisini desteklediği ve metaloidin birikimini engellemede olumlu bir sonuç sergilediğini göstermiştir.

Bitkilerin fitoremediasyon kapasitesinin belirlenmesinde önemli bir belirteç olan transfer değeri 100-300 µM As ve Cys+300 µM As uygulamalarında $TF < 1$ olarak belirlenmiş ve fesleğenin fitostabilizasyon potansiyeline sahip olduğu tespit edilmiştir. Fesleğenin ağır metaller için fitostabilize edici bir kapasiteye sahip olduğu farklı çalışmalarda da bildirilmiştir (Dinu vd., 2020). Ek olarak Cys+100 µM As uygulamasında transfer değeri $TF > 1$ olarak belirlenmiş ve bitki, As metaloidini kökten toprak üstü kısımlara taşıyabilmiştir. Dolayısıyla bu sonuç, Cys uygulamasının 100 µM As ile kirli alanlarda fesleğenin fitoremediasyonunu etkili bir şekilde artırabileceğini göstermektedir.

Araştırmamızda, Cr konsantrasyonunun yüksek miktarda kökte akümüle edildiği ve akümüleşme sırasıyla kök>gövde>yaprak olarak belirlenmiş ve toprak üstü kısımlara sınırlı taşınım meydana geldiği belirlenmiştir. Bugüne kadar yapılan çeşitli çalışmalarda da, diğer bitki kısımlarına kıyasla en fazla Cr birikiminin kökte meydana geldiğini göstermiştir (Shahid vd., 2017b). Örneğin kirli toprakta yetiştirilen fesleğinde, bitkinin farklı kısımlarındaki metal birikimi sırasıyla kök>gövde>çiçek>yaprak olarak belirlenmiştir (Dinu vd., 2020). Başka bir çalışmada Cr ile muamele edilen *Vigna radiata* fidelerinde bitkinin yapraklarına kıyasla kökte daha yüksek Cr birikimi görülmüştür (Singh vd., 2023). *Lolium perenne*'de yapılan bir başka çalışmada, 0,50 mM Cr ile muamele edildiğinde yapraklara kıyasla kökte 10 kat daha fazla Cr birikimi görülmüştür (Vernay vd., 2007).

Bu tez çalışmasında, Cys uygulamasının tek başına Cr uygulanan bitkilerle kıyaslandığında kökte Cr birikimini 100 µM ve 300 µM Cr uygulamasında sırasıyla %99 ve %96 oranında azalttığı belirlenmiştir. Sonuçlarımıza paralel olarak Yıldız & Terzi (2021)'nin *Brassica napus* bitkisi ile yaptıkları çalışmada Cys ilavesinin gövde ve kökteki Cr birikimini büyük ölçüde azalttığını rapor etmiştir.

Çalışmamızda dıştan Cys uygulaması gövdedeki Cr birikimini farklı şekilde etkilediği

belirlenmiştir. Buna göre Cys uygulaması tek başına 100 μ M ve 300 μ M Cr uygulamasına kıyasla gövde dokusundaki krom içeriğini sırasıyla %99 oranında azaltmış ve %2 oranında artırmıştır. Konu ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde, bezelyede yapraktan uygulanan glisinbetainin gövdedeki Cr'ü önemli ölçüde azalttığı ve Cr toksisitesinin zararlı etkisinin hafifletildiği bildirilmiştir (Faisal vd., 2022). Farklı bir çalışmada EDTA'nın dıştan uygulamasının Cr alımını ve kökten bitkinin üst kısmına taşınımını artırdığı bildirilmiştir (Kabata-Pendias, 2010).

Bununla birlikte, Cr ile birlikte Cys takviyesi, tek başına 100 μ M ve 300 μ M Cr uygulamasına kıyasla yaprak dokusundaki Cr içeriğini her iki konsantrasyon için de %99 oranında azalttığı kaydedilmiştir. Benzer şekilde, hidroponik olarak yetiştirilen mısır fidelerinde dıştan melatonin uygulaması tek başına Cr (50, 100, 200 μ M) uygulamasına kıyasla yapraklardaki Cr konsantrasyonunda önemli bir azalmaya neden olduğu bildirilmiştir (Malik vd., 2022a).

Fesleğenin Cr ile kirli alanlarda fitoremediasyon amacıyla kullanılabilirliğinin belirlenmesi için TF değeri hesaplanmıştır. Hem 100 μ M hem de 300 μ M Cr stresinde transfer değeri $TF < 1$ olarak belirlenmiştir. Bu durum fesleğenin Cr ile kontamine alanlarda fitostabilizatör olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Cys uygulamasının transfer faktörü etkisine bakıldığında 100 μ M ve 300 μ M Cr konsantrasyonlarının her ikisinde de $TF > 1$ olarak belirlenmiş ve Cys, Cr metalini toprak üstü kısımlara taşımıştır. Böylece dıştan Cys uygulaması, Cr ile kirli topraklarda fesleğenin fitoremediasyon kapasitesini artırmıştır.

4.2. ARSENİK, KROM VE SİSTEİN UYGULAMALARININ FESLEĞEN BİTKİSİNDE BİYOKİMYASAL PARAMETRELERE ETKİSİ

4.2.1. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Lipid Peroksidasyonuna Etkisi

Lipid peroksidasyonu bitki hücrelerinin membranlarındaki doymamış yağ asitlerinin oksidatif bozunmasıdır (Aysin vd., 2020). Tiyobarbitürik asit reaktif ürünleri (TBARS) lipid peroksidasyonunun yan ürünü olarak oluşmaktadır ve oksidatif stresin biyolojik bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Mevcut çalışmada fesleğende TBARS içeriğinde artış belirlenmiş ve bu artışın As seviyelerinde daha yüksek olduğu kaydedilmiştir. Buna göre As ve Cr stresi altında yaprak TBARS içeriği artan konsantrasyonla artarken, kök TBARS içeriği 100 μ M Cr konsantrasyonu haricinde artmış ve gövde TBARS

içeriği Cr konsantrasyonlarında artış ve As konsantrasyonlarında azalış göstermiştir. 100 µM Cr uygulamasında kök TBARS içeriğinin neredeyse kontrole yakın seviyede olması, fesleğenin bu konsantrasyon seviyesini tolere edebildiğinin ve kökte oksidatif hasarın meydana gelmediğinin bir göstergesi olabilir. As ve Cr streslerinin TBARS içeriğine etkisi, literatürde yer alan pek çok çalışma ile benzerlik göstermektedir. Örneğin 0,05 mM As ve Cr varlığı TBARS'ı yaprakta ve kökte artırdığı ve *Pteris vittata* bitkilerinde oksidatif stresin açık bir göstergesi olduğu bildirilmiştir (de Oliveira vd., 2014).

Çalışmamızda foliar Cys uygulamasının kök, gövde ve yapraklardaki TBARS içeriğini gövde 300 µM As dışında önemli miktarda azalttığı kaydedilmiştir. Sonuçlarımıza benzer şekilde Cr stresine maruz kalan buğday bitkilerinde dışsal kükürt uygulamasının TBARS seviyesini azaltarak oksidatif stresi azalttığı rapor edilmiştir (Fatma vd., 2023).

4.2.2. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Hidrojen Peroksit İçeriğine Etkisi

Hidrojen peroksit (H_2O_2), hücre duvarlarının güçlendirilmesi (yani, odunlaşma ve hücreyle ilişkili yapısal proteinler arasında çapraz bağlanma), senesens, foto-solunum, stoma iletkenliği ve hücre döngüsü gibi birçok fizyolojik durumda önemli bir düzenleyicidir (Shu-Hsien, vd., 2005). Bunun yanı sıra H_2O_2 , yüksek konsantrasyonlarda yıkıcı bir molekül olarak hareket eden, ancak daha düşük miktarlarda, yaklaşan stresli bir duruma karşı savunma mekanizmalarını harekete geçirmek için sinyal işaretleri yayan ikili işlevselliği ile bilinmektedir (Mohammadi vd., 2018; Ahmadi vd., 2020). Mevcut tez çalışmasında, As ve Cr stresleri altındaki fesleğende kök, gövde ve yaprak H_2O_2 içeriği, artan konsantrasyonlarla birlikte artış göstermiştir. Sonuçlarımıza benzer şekilde hidroponik ortamda yetiştirilen Pusa Vishal (PV; Cr'ye toleranslı) ve Pusa Ratna (PR; Cr'ye hassas) maş fasulyesi (*Vigna radiata* L.) çeşitlerinde Cr uygulaması altında hem yaprak hemde kökteki H_2O_2 seviyesinde artış kaydedilmiştir (Singh vd., 2023). Cr teşvikli H_2O_2 içeriğindeki artış *Citrus aurantium* (Shiyab, 2019) ve buğday (Ashraf vd., 2022) bitkilerinde de kaydedilmiştir. Cr stresine benzer şekilde As stresi ile H_2O_2 içeriğindeki artış *Spinacia oleracea*'nın kök ve gövdesinde (Saleem vd., 2023), *Ricinus communis*'in kök ve yapraklarında (Singh vd., 2019) belirlenmiştir. As stresi nedeniyle sınırlı CO_2 asimilasyon oranı, CO_2 'nin Calvin döngüsü için kullanılabilirliğini sınırlar ve dolayısıyla $NADP^+$ 'nin azalmasına neden olabilir ve bu da daha yüksek H_2O_2

üretimine yol açabilmektedir (Singh vd., 2019).

Çalışmamızda, foliar Cys uygulaması sadece As ve Cr uygulanan gruplar ile karşılaştırıldığında genel olarak H₂O₂ içeriği üzerinde Cys'in anlamlı bir etkisinin olmadığı ya da artırdığı belirlenmiştir. Konu ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde Cys uygulamasının tuz stresi altındaki soya fasulyesi (Sadak vd., 2020), Hg stresindeki mısır fideleri (Aysin vd., 2020), Cd stresi etkisindeki *Arabidopsis* kökünde (Jia vd., 2016) H₂O₂ seviyesini azalttığı rapor edilmiştir. Konu ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar araştırma sonucumuz ile uyumsuzdur. Ancak Wen vd. (2022) yaptıkları çalışmada dıştan glutatyon biyosentez inhibitörü olan bütinyonin sülfoksimin uygulamasının Cr stresi altındaki soya fasulyesinin kök ve gövdesinde H₂O₂ içeriğinin artırdığını belirtmiştir. Bu durumun glutatyon tarafından Cr konsantrasyonunun artırılmasıyla ilgili olabileceği ve çözünebilir fenollerin, şekerlerin ve prolinin de metal stresi tarafından üretilen ROS'un giderilmesinde rol oynayabileceği belirtilmiştir (Chandrasekara & Shahidi, 2011; Li vd., 2017; Wen vd., 2022).

4.2.3. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Antioksidan Enzim Aktivitelerine Etkisi

As ve Cr toksisitesi bitkilerde büyüme ve verimde azalma, yapraklarda kloroz, pigment içeriğinde azalma, su ve mineral dengesizliği, fotosentez inhibisyonu gibi pek çok metabolik süreci olumsuz etkilemekte ve tüm bu toksik etkiler hücrelerin redoks dengesini bozan ROS'ların aşırı üretimine neden olmaktadır (Sharma vd., 2020; Mondal vd., 2022). ROS oluşumu RNA, DNA, karbonhidratlar, proteinler ve lipid gibi biyomoleküllerin onarılamaz hasarına yol açmaktadır (Kostecka-Gugała & Latowski, 2018; Saleem vd., 2022). Bu nedenle bitkiler ROS üretimi ve atılması arasında bir denge sağlamak için enzimatik antioksidanlar üretmektedir (Wu vd., 2017). Bitkilerde antioksidan sistemin bir parçası olarak çalışan bu enzimler CAT, POX, GR, SOD ve APX'ten oluşmakta ve aşırı ROS'un temizlenmesi sırasında sentezinin arttığı bilinmektedir (Rajput vd., 2021). Bununla birlikte antioksidan enzimlerin aktiviteleri herhangi bir stres koşulunun süresine, bitki türüne ve dokulara göre değişiklik gösterebilmektedir (Anjum vd., 2017; Sharma vd., 2020). SOD bir metaloenzimdir, bir bitki hücresinin ROS toksisitesine karşı ilk savunma hattını oluşturmaktadır ve O₂⁻ radikalinin O₂ ve H₂O₂'ye dönüşümünü katalize etmektedir (Mishra vd., 2023). APX, SOD tarafından üretilen H₂O₂'yi suya dönüştürmekte ve askorbatı spesifik elektron

donörü olarak kullanmaktadır. POX, hücre dışı alanlarda H_2O_2 'yi temizlemektedir. CAT, hem içeren bir enzimdir ve H_2O_2 'yi suya ve moleküler oksijene dönüştürmektedir. GR, oksitlenmiş glutasyonu (GSSG) indirgenmiş formuna (GSH) dönüştürerek indirgenmiş GSH seviyelerini düzenlemektedir (Rajput vd., 2021).

Mevcut tez çalışmasında, farklı konsantrasyonlarda (100 μM ve 300 μM) As ve Cr streslerine maruz bırakılan fesleğenin kök, gövde ve yaprağındaki CAT, POX, GR, APX ve SOD aktiviteleri incelenmiş olup sonuçlar metal(oid) stresinin bu antioksidan enzimlerin aktiviteleri üzerinde farklı etkileri olduğunu göstermektedir. Araştırmamızda SOD aktivitesi tüm uygulama gruplarında kök, gövde ve yaprakta kontrole göre artış göstermiş (100 μM Cr hariç) ve SOD aktivitesi As stresli bitkilerde Cr stresine göre daha yüksek bulunmuştur. SOD aktivitesindeki As kaynaklı artış, artan O_2^- seviyesinden veya As'in SOD üzerindeki doğrudan etkisinden kaynaklanabilmektedir (Abbas vd., 2018). Konu ile ilgili literatür çalışmalarında, Cr stresinden dolayı *Calotropis procera* kök ve gövde dokularında SOD enziminin aktivitesinin arttığı rapor edilmiştir (Usman vd., 2020). Benzer şekilde Cr toksisitesinin, kontrole göre mısır fidelerinin SOD aktivitesini önemli ölçüde (%32) artırdığı tespit edilmiştir (Terzi & Yıldız, 2021). Ahmad vd. (2020) yapmış oldukları çalışmada soya fasulyesinde 20 μM As stresinin, stres uygulanmayan bitkilere kıyasla SOD aktivitesinin %90,69 oranında arttığı bulunmuştur.

SOD aktivitesinin ürünü olan H_2O_2 , CAT, APX ve POX enzimleri sayesinde suya dönüştürülebilmektedir. Çalışmamızda CAT aktivitesi kontrol bitkileri ile kıyaslandığında sadece yaprak As konsantrasyonlarında artış gösterirken, Cr konsantrasyonlarında ise anlamlı bir değişiklik göstermemiştir. Bu sonuç As stresli fesleğen yapraklarında yüksek CAT aktivitesinin H_2O_2 'nin zararlı etkisini hafifletmede ve stres hasarının azaltılmasında etkili olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, Husna vd. (2021) soya fasulyesi yapraklarında CAT enzim seviyesinin, artan As konsantrasyonu ile kontrole kıyasla önemli ölçüde arttığını bildirmiştir. Fesleğende kök ve gövde CAT aktivitesine bakıldığında ise tüm As ve Cr konsantrasyonlarında kontrol bitkilerine göre anlamlı bir farklılık belirlenmemiştir. Konu ile ilgili mısır fidelerinde yapılan çalışmada da benzer şekilde, CAT aktivitesinin Cr stresi sırasında kontrole göre önemli ölçüde değişmediği rapor edilmiş (Terzi & Yıldız, 2021) ve As'e maruz kalan *Ocimum tenuiflorum* bitkisinde CAT aktivitesinde önemli bir artış belirlenmemiş (Siddiqui vd., 2015) ve bu sonuçlar araştırma bulgularımızla uyumlu bulunmuştur.

Tez çalışmamızda, APX aktivitesinde kontrol grubuna kıyasla yaprakta anlamlı fark belirlenmezken gövde ve kökte önemli miktarda azalma kaydedilmiştir ve bu azalma Cr konsantrasyonlarında daha fazla olmuştur. Benzer sonuçlar, artan Cr konsantrasyonu ile APX enzim aktivitesindeki azalma ile bezelye fidelerinde de kaydedilmiştir (Surekha & Duhan, 2012). Literatürde As stresi ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, As uygulamasının *Glycine max* türünde beş günlük radiküllerde APX aktivitesini %69 oranında azalttığı kaydedilmiştir (Chandrakar vd., 2018). APX enzim aktivitesindeki düşüşün nedeni, askorbik asit içeriğinin azalması ile ilgili olabileceği düşünülmektedir (Kohli vd., 2018).

POX aktivitesine bakıldığında ise yaprak ve gövde düşük As konsantrasyonlarında kontrol bitkilerine göre önemli fark belirlenmezken yüksek As konsantrasyonu ve her iki Cr konsantrasyonunda da üç vejetatif organda artış belirlenmiştir. POX aktivitesindeki artış Cr toksisitesinde mısır yapraklarında (Terzi & Yıldız, 2020), As ve Cr stresine maruz kalan soya fasulyesi fidelerinde (Husna vd., 2021), As toksisitesindeki soya fasulyesi yapraklarında (Faizan vd., 2022) da belirlenmiştir. Çalışmamızda H₂O₂ temizleyicileri olan CAT, POX ve APX enzimlerinden CAT ve APX enzim aktivitelerinin kontrol bitkilerine yakın değerlerde olması veya aktivitelerinin azalması H₂O₂'yi etkili bir şekilde yok etmede yetersiz kaldığını ve bununla birlikte POX içeriğindeki artışın H₂O₂ detoksifiye eden temel enzim olduğunu göstermektedir.

H₂O₂'nin süpürülme sürecinde askorbat-glutasyon döngüsünün önemli bir bileşeni de GR enzimidir. Bu çalışmada, GR aktivitesi yaprakta yüksek As konsantrasyonunda azalış gösterirken düşük As konsantrasyonu ve Cr konsantrasyonlarında kontrole göre anlamlı bir etkisi bulunmamıştır. Kök GR aktivitesi ise yüksek As ve Cr konsantrasyonlarında stres uygulanmayan bitkilere göre değişkenlik göstermezken düşük As ve Cr konsantrasyonlarında azalma göstermiştir. Paralel olarak Cr ile muamele edilmiş buğday fidelerinin gövde dokusunda düşük GR aktivitesi saptanmıştır (Subrahmanyam, 2008). Gövde GR aktivitesinin ise yüksek Cr konsantrasyonu dışındaki diğer uygulama gruplarında arttığı belirlenmiştir. Önceki çalışmalarda Cr stresine bağlı olarak *Calotropis procera* dokularında GR aktivitesinin arttığı ve Cr stresine karşı bitki tolerans mekanizmasında koruyucu rol oynadığı rapor edilmiştir (Usman vd., 2020). Benzer şekilde, 20 µM As stresi altındaki soya fasulyesi bitkisinde de kontrol grubundaki bitkilerle kıyaslandığında GR aktivitesinde artış kaydedilmiş ve

bu artış stresli durumlarda üretilen ROS'un temizlemesine yardımcı olduğu bildirilmiştir (Ahmad vd., 2020).

Dıştan Cys uygulamasıyla As ve Cr stresleri altındaki fesleğen fidelerinin kök, gövde ve yaprak antioksidan enzim içeriğini genel olarak önemli miktarda artırdığı belirlenmiştir. Cys'in aktivitesi belirlenen beş enzim arasında en yüksek etkisi POX aktivitesi üzerinde olup en yüksek etkisi gövdede belirlenmiştir. Cys'in POX aktivitesi üzerindeki etkisi sadece As ve Cr uygulanan gruplara kıyasla yaprak, kök ve gövdede (300 µM Cr hariç) tüm uygulamalarda artış gözlenmiştir. Benzer şekilde *Brassica napus* kökünde dışsal Cys uygulaması, Cr ile muamele edilmiş fidelere kıyasla POX aktivitesini artırdığı saptanmıştır (Yıldız & Terzi, 2021). Farklı bir çalışmada da Cr stresi altındaki mısırdaki Cys, POX aktivitesini tek başına Cr uygulamasına kıyasla yaklaşık 2,2 kat artırdığı saptanmıştır (Terzi & Yıldız, 2021). Çalışmamızda Cys uygulanan örnekler tek başına As ve Cr uygulanan gruplarla karşılaştırıldığında SOD aktivitesi, yaprakta (300 µM As hariç), gövdede (300 µM Cr dışında) ve kökte (sadece Cr konsantrasyonlarında) önemli miktarda artışa neden olmuştur. Bulgularımıza benzer şekilde, Hg maruziyetindeki mısır yapraklarında dıştan Cys uygulaması SOD, POX ve CAT aktivitesini artırmıştır (Aysin vd., 2020). Cys'in CAT aktivitesine etkisine bakıldığında sadece As ve Cr uygulamalarına kıyasla yaprakta yüksek As konsantrasyonu dışında önemli bir etkisi belirlenmezken, kökte yüksek As konsantrasyonu haricinde ve gövdede tüm konsantrasyonlarda önemli miktarda artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Önceki çalışmalarda, Jia vd. (2016) Cd stresi altında *Arabidopsis* kökünün CAT aktivitesinde Cys aracılı artışa neden olduğunu bildirmiştir. Banin Sogvar vd. (2020) araştırmasında hasat sonrası L-sistein ile muamele edilen erik meyveleri kontrol meyvelerine kıyasla daha yüksek SOD ve CAT aktivitelere sahip olduğunu kaydetmiştir. Dıştan yapılan Cys uygulamasının APX aktivitesi değerlendirildiğinde sadece As ve Cr konsantrasyonlarına kıyasla yaprakta ve gövdede önemli miktarda azalmaya neden olurken kökte Cr konsantrasyonlarında artışa ve düşük As konsantrasyonunda azalmaya neden olmuştur. Cys'in APX üzerindeki indirgeyici etkisi keten bitkisinin yapraklarında da kaydedilmiştir (Hussein & Alshammari, 2022). Kobalt stresi altındaki *Ocimum basilicum* L.'da tohum ve vejetatif dönem Cys uygulamalarının APX aktivitesinde azalmaya neden olduğu belirtilmiştir (Azarakhsh vd., 2015). Yine benzer bir çalışmada Cys uygulaması arpa kök ve koleoptillerinde APX aktivitesini artırmıştır (Genisel vd., 2015). GR aktivitesi üzerinde Cys'in etkisi sadece As ve Cr konsantrasyonlarına kıyasla

yaprakta yüksek As konsantrasyonunda artışa ve düşük Cr konsantrasyonunda azalışa neden olurken, kökte düşük Cr konsantrasyonunda artışa ancak diğer uygulamalarda azalışa, gövdede ise yüksek Cr konsantrasyonları haricinde artışa neden olduğu saptanmıştır. Arpa bitkisinde yapılan çalışmada da GR aktivitesi Cys uygulaması ile birlikte azalmıştır (Genisel vd., 2015). Mevcut çalışmanın sonucuna göre, daha yüksek SOD, CAT, POX ve GR aktivitesi Cys'in membran lipidlerinin peroksidasyonunu ve hücre membran bütünlüğünün kaybını önlediğini göstermektedir.

4.2.4. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Fenolik Asit İçeriğine Etkisi

Fenolik asitler bir karboksilik asit grubuna sahip fenolik bileşikler olarak tanımlanmakta ve bitki fenolik bileşiklerinin ana sınıflarından birini oluşturmaktadır (Kumar & Goel, 2019). Fenolik asitler hidroksibenzoik asit (HBA) ve hidroksisinnamik asit (HSA) olmak üzere başlıca iki gruba ayrılmaktadır (Shahidi & Yeo, 2018). HSA'lar ferulik asit (FeA), kafeik asit (KaA), sinamik asit (SiA), *p*-kumarik asit (*p*-KuA), rosmarinik asit (RA) ve sinapik asit (SA)'leri kapsamaktadır. HBA'lar *p*-hidroksibenzoik asit (*p*-HBA), vanilik asit (VaA), siringik asit (SrA), gallik asit (GaA) ve gentisik asit (GA)'leri kapsamaktadır. Antioksidan aktiviteleri, hidroksil ve karboksil grupları tarafından metalleri (özellikle Fe ve Cu) şelatlama yeteneklerinin yüksek olması ve böylece Fenton ve Haber-Weiss reaksiyonlarını baskılaması ve ROS oluşumunu engellemesinden kaynaklanmaktadır (Cervilla vd., 2012; Drzewiecka vd., 2018; Ghori vd., 2019). Ayrıca lipid peroksidasyonunu inhibe etmek için lipid alkoksil radikalının yakalanması ve oksidatif strese neden olan geçiş metallerinin doğrudan şelasyonunda da önemli rol oynamaktadır (Michalak, 2006). FeA, *p*-KuA ve KaA lignin öncüleridir ve hücre çeperi dayanıklılığında artış sağlayarak ağır metallerin zararlı etkilerine karşı bariyer oluşturmaktadır (Goleniowski vd., 2013). Bu sebeplerle fenolik biyosentezindeki artış ağır metal stresine karşı bitkiyi korumaktadır.

Bu tez çalışmasında farklı konsantrasyonlarda As ve Cr stresleri altında yetiştirilen fesleğen bitkisinin kök, gövde ve yapraklarında farklı formlardaki (serbest, ester, glikozit, hücre duvarı bağlı) bireysel FA içeriğinin kontrol gruplarına göre genel olarak arttığı kaydedilmiştir. Dıştan Cys uygulamasının ise kontrol ve tek başına As ve Cr uygulamalarında kıyasla FA içeriğini önemli miktarda artırdığı, yalnızca 300 µM Cr konsantrasyonunda azalmaya neden olduğu belirlenmiştir. Vejetatif organlar açısından yaprakta, kök ve gövdeye göre genel olarak daha yüksek seviyelerde FA içeriği

belirlenmiştir. Ayrıca FA içeriği uygulama konsantrasyonları, metal(oid) çeşidi ve bitki aksamına göre farklılık göstermekle birlikte genel olarak *p*-KuA içeriğinin yüksek seviyeleri tespit edilmiştir. Çalışma sonuçlarımıza benzer olarak Cu ve Zn stresi uygulanan mısır kök hücre duvarlarında en çok *p*-KuA ve FeA içeriğine rastlanırken (Vuletić vd., 2014) *Prosopis farcta* bitkisinde Pb maruziyetinin FeA içeriğinde artışa neden olduğu kaydedilmiştir (Zafari vd., 2016). Bu çalışmada FeA içeriği incelendiğinde vejetatif organlarda sadece stres ve Cys ile birlikte stres uygulanan gruplarda kontrol bitkilerine göre artış kaydedilmiştir. Cr stresli pirinç fidelerinde bitki özütlerinin PCA, *p*-HBA, VaA, KaA ve *p*-KuA dahil olmak üzere yüksek miktarda FA saptandığı bildirilmiştir (Dubey vd., 2018). Farklı bir çalışmada da hidroponik ortamda yetiştirilen *Ulmus laevis*'te As stresinin GA, *p*-HBA, GaA ve PCA miktarında önemli ölçüde artışa neden olduğu bildirilmiştir (Drzewiecka vd., 2018). *Vicia faba* bitkisine farklı konsantrasyonlarda As (100, 200 ve 400 µM) uygulamasının gövdede fenolik asitlerin içeriğini ve bileşen çeşitliliğini arttırdığı rapor edilmiştir (Mohamed vd., 2016). Aynı çalışmada *Vicia faba* gövdesinde SrA miktarının As+nitrik oksit denemelerinde arttığı ancak tek başına As uygulamasında azaldığı bildirilmiştir. Bu durum, SrA'nın bitki büyümesi ve hücre bölünmesini teşvik etmesi (Sampietro vd., 2006) ile ilgili olabilir. Çalışmamızda da SrA miktarının stresli koşullarda ve Cys uygulamalarında arttığı belirlenmiştir. Sonuç olarak fenolik bileşiklerin Cys uygulamalarında ve As ile Cr toksisitesine karşı içsel savunma potansiyeli oluşturarak fesleğenin stresli koşulları tolere edebilebilmesine katkıda bulunduğu belirlenmiştir.

4.2.5. Arsenik, Krom ve Sistein Uygulamalarının Uçucu Yağ Bileşenlerine Etkisi

Uçucu yağlar, bazı bitkilerin salgı tüyleri, reçine kanalları, salgı cepleri ve salgı hücreleri gibi özelleşmiş hücre ve dokuları tarafından üretilen sekonder metabolitlerdir (Butnariu, 2021). Bitkilerin kök, gövde, çiçek, yaprak, tohum, rizom ve kabuk gibi farklı kısımlarında değişen miktarlarda bulunmaktadır (Dhifi vd., 2016). Bu metabolitler bitkilerin kendilerini avcılardan ve zararlılardan korumak ve aynı zamanda polinatörleri çekmek için kullandıkları aromatik maddelerdir (Butnariu & Sarac, 2018). Uçucu yağlar, mono ve seskiterpen bileşenlerin baskın olduğu, aynı zamanda fenilpropanoid türevleri içeren ve nadiren diterpenlerden oluşan kimyasal bileşenlerdir (Butnariu & Sarac, 2018; Sadgrove vd., 2022). Değişen çevre koşulları bitkinin uçucu organik moleküllerinin verimini ve biyoaktif bileşenlerini etkilemektedir (Aqeel vd., 2023).

Bu çalışmada farklı As ve Cr konsantrasyonlarında yetiştirilen fesleğen fidelerinin kök, gövde ve yaprak uçucu yağ bileşenlerinin miktarı kontrol bitkilerine göre genel olarak artış göstermiştir. Ancak dışsal Cys uygulamasının kontrole göre gövde ve kökte uçucu yağ içeriğini artırırken tek başına As ve Cr uygulamalarına kıyasla (yaprak Cys+100 μ M As hariç) azalmaya neden olduğu belirlenmiştir. Vejetatif organlar açısından yaprakta, kök ve gövdeye kıyasla genel olarak daha yüksek miktarlarda uçucu yağ içeriği ve bileşen çeşitliliği belirlenmiştir. Ayrıca uçucu bileşenler uygulama konsantrasyonları, metal(oid) çeşidi ve bitki aksamına göre farklılık göstermekle birlikte yaprakta 1,8-cineole, gövdede tetradecane ve kökte dodecane ana bileşenler olarak tespit edilmiştir. Çalışma sonuçlarımıza benzer olarak As stresi altında yetiştirilen *O. basilicum* türünde eugenol ve methyl eugenol içeriği 25 μ M As konsantrasyonunda en yüksek seviyede belirlenmiştir (Siddiqui vd., 2013). Başka bir çalışmada, farklı konsantrasyonlarda (10, 20, 50 ve 100 μ M) Cr'a maruz kalan *Ocimum tenuiflorum* bitkisinin esansiyel yağındaki eugenol içeriğinin yüksek miktarda olduğu belirlenmiştir (Rai vd., 2004). Çalışmamızda her iki toksisite durumunun kontrole göre 1,8-cineole içeriğinde azalmaya neden olduğu kaydedilmiştir. Benzer olarak, As stresi altında yetiştirilen *O. basilicum* bitkisinde de kontrole kıyasla 1,8-cineole içeriğinde azalma belirlenmiştir (Biswas vd., 2015). Ayrıca bu tez çalışmasında, linalool içeriği (300 μ M As dışında) kontrol bitkilerinde As ve Cr uygulaması yapılan bitkilere göre daha yüksek seviyede belirlenmiştir. Paralel olarak, Cr stresi altında yetiştirilen *O. basilicum* bitkisinde kontrole kıyasla linalool içeriğinde azalma kaydedilmiştir (Prasad vd., 2011; Chand vd., 2015). Sonuçlar, fesleğenin As ve Cr stresi altında daha fazla esansiyel yağ üretebildiğini göstermektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ağır metaller, yer kabuğunda doğal olarak bulunmalarının yanı sıra endüstriyel faaliyetler, kontrolsüz sanayileşme, yoğun tarımsal uygulamalar sonucunda da önemli bir çevre sorunu haline gelmektedir. Biyolojik olarak parçalanmayan ve düşük konsantrasyonlarda bile toksik etki gösteren ağır metaller, bitki büyümesi ve verimini sınırlandırarak tarımsal alanlarda da üretimin kısıtlanmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte gıda zinciri yoluyla insan sağlığı üzerinde ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Bu nedenlerle ağır metallerle kontamine alanlardaki toksisiteyi azaltmaya yardımcı olabilecek ve kirliliğin yayılmasını önleyecek stratejiler geliştirilmesi, kirliliğe dayanıklı bitkilerin belirlenmesi ve toleransı artıracak yolların bulunması önem arz etmektedir. Bu amaç doğrultusunda farklı konsantrasyonlarda (100 ve 300 μM) As ve Cr içeren ortamlarda yetiştirilen fesleğen fidelerine dıştan Cys (300 μM) uygulamasının ekofizyolojik parametreler, enzimatik ve enzimatik olmayan antioksidan aktiviteler üzerindeki etkileri ile tarımsal uygulamalardaki potansiyel kullanımı bu çalışmada incelenmiştir.

Tez çalışması kapsamında As ve Cr uygulamaları fesleğen bitkisinin kök, gövde ve yaprak uzunlukları, yaş ve kuru ağırlıkları üzerinde azaltıcı etki göstermiştir. Ancak dıştan Cys uygulaması ağır metal(oid)in büyüme parametreleri üzerindeki olumsuz etkisini iyileştirmiştir. Araştırmada As ve Cr toksisitesinin yaprak su dengesini bozarak bağıl su içeriğini azalttığı, Cys uygulamasının ise bu azalışı tersine çevirdiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte klorofil floresansında stresten olumsuz etkilendiği belirlenirken, Cys uygulaması sadece düşük As konsantrasyonunda olumlu etki göstermiştir. Artan As ve Cr konsantrasyonlarına paralel olarak klorofil a, klorofil b, klorofil a+b ve toplam karotenoid miktarları azalırken, klorofil a/b oranı artmıştır. Cys uygulaması, klorofil a (300 μM Cr hariç), klorofil b ve klorofil a+b içeriklerini artırırken, klorofil a/b oranını (As konsantrasyonları hariç) azaltmıştır. Ayrıca stres şartlarında azalan net fotosentez oranı, stoma iletkenliği ve transpirasyon oranı Cys uygulaması ile artış (300 μM As hariç) göstermiştir. Bununla birlikte hücrelerarası CO_2 konsantrasyonu artan As ve Cr konsantrasyonlarına paralel artmış ve Cys uygulaması ile 300 μM As konsantrasyonu haricinde azalmıştır.

Çalışmamızda As ve Cr toksisitesi altındaki fesleğen bitkisinde kök TBARS içeriği 100 µM Cr konsantrasyonu haricinde artma, gövde TBARS içeriği Cr konsantrasyonlarında artma ve As konsantrasyonlarında azalma gösterirken yaprak TBARS içeriği ise tüm konsantrasyonlarda artış göstermiştir. Dıştan Cys uygulaması ise kök, gövde (300 µM As hariç) ve yaprak TBARS içeriğini önemli ölçüde azaltmıştır. Kök, gövde ve yaprak H₂O₂ içeriği artan As ve Cr konsantrasyonlarına paralel olarak artış göstermiştir. Cys ise tek başına As ve Cr uygulamalarına kıyasla kök 100 µM As ve gövde Cr konsantrasyonlarında H₂O₂ içeriği üzerinde azaltıcı etki göstermiştir. Ayrıca Cys uygulamasının As ve Cr toksisitesi ile artan elektrolit sızıntısını (300 µM Cr hariç) önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir.

Mevcut çalışmada As ve Cr uygulamalarının kök, gövde ve yaprak Ca, K, Fe ve Mg içeriğini genel olarak artırdığı tespit edilmiştir. Her üç vejetatif organda da besin elementi içeriği çoktan aza doğru K>Ca>Mg>Fe olarak belirlenmiştir. Dıştan Cys uygulaması ise gövde Mg ve yaprak Ca, K içeriği dışında besin elementi içeriğini olumsuz etkilemiştir. Ayrıca stres uygulanan bitkilerde özellikle kök bölgesinde yüksek As ve Cr birikimi belirlenmiştir. Her iki stres faktörünün birikimi kök>gövde>yaprak olarak tespit edilmiştir. Bitkiye dıştan Cys uygulaması As ve Cr birikimini önemli ölçüde azaltmıştır. Fesleğen, kökte yüksek As ve Cr biriktirerek toprak üstü kısımlarına sınırlı taşınımına neden olmuştur. Dolayısıyla, fesleğenin As ve Cr toksisitesine karşı orta derecede toleranslı bir bitki olabileceği düşünülmektedir. Bununla birlikte As ve Cr'un kök bölgesinde birikmesi fitostabilizasyon açısından fesleğenin uygun bir tür olabileceğini göstermektedir.

Araştırmada As ve Cr streslerinin antioksidan enzim içeriğini farklı şekilde etkilediği tespit edilmiştir. Buna göre, her iki toksisite açısından SOD aktivitesi yaprak, gövde ve kökte artış (100 µM Cr hariç) göstermiştir. POX aktivitesi yaprak, gövde ve kök Cr konsantrasyonlarında, CAT aktivitesi yaprak As konsantrasyonlarında, GR aktivitesi ise gövde As konsantrasyonlarında artmıştır. APX aktivitesi, her iki As ve Cr uygulamalarında da gövde ve kökte azalmıştır. Yapraktan Cys uygulaması her iki As ve Cr konsantrasyonunda da POX aktivitesini yaprak, gövde (300 µM Cr hariç) ve kökte artırmıştır. Bununla birlikte Cys, CAT aktivitesini gövde ve kökte (300 µM As hariç), SOD aktivitesini yaprak (300 µM As hariç), gövde, kökte (100 µM As hariç) ve GR aktivitesini gövdede (300 µM Cr hariç) artırmıştır. Ayrıca Cys uygulaması yaprak ve gövde APX içeriğini azaltmıştır.

Araştırmada fesleğen bitkisinin kök, gövde ve yapraklarında farklı formlardaki (serbest, ester, glikozit, hücre duvarı bağlı) bireysel FA içeriğinin As ve Cr toksisitesi altında genel olarak artış gösterdiği tespit edilmiştir. Stres koşullarında Cys'in kontrol grubu ile tek başına As ve Cr uygulamalarına kıyasla bireysel fenolik asit içeriğini (300 µ Cr hariç) pozitif etkilediği belirlenmiştir. Ayrıca As ve Cr stresi altında yetiştirilen fesleğende uçucu yağın ana bileşeni yaprakta 1,8-cineole, gövdede tetradecane ve kökte dodecane olarak belirlenmiştir. Stres koşulları altında uçucu yağ içeriği kontrole kıyasla artış gösterirken, Cys uygulaması ile (yaprak Cys+100 µM As hariç) uçucu yağ içeriğinde azalma kaydedilmiştir. Bu sonuçlar fesleğenin As ve Cr stresi altında esansiyel yağ içeriğini artırabildiğini göstermektedir.

Yukarıda belirtilen sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, fesleğen bitkisine dıştan Cys uygulamasının As ve Cr toksisitesine karşı büyüme, gelişme, sekonder metabolit üretimi ve antioksidan savunma sistemi üzerindeki etkisi bakımından başarılı sonuçlar verdiği ortaya konmuştur. Fesleğenin As ve Cr birikimini kök bölgesinde yoğunlaştırması fitostabilizasyon açısından uygun bir tür olabileceğini göstermektedir. Bu sonuçlar ayrıca fesleğenin As ve Cr stresine karşı orta derecede toleranslı olduğunu ve dıştan Cys uygulamasının bu toleransı artırarak fesleğenin fitoremediasyonda etkili şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

- Bu çalışmada fesleğenin As ve Cr toksisitesine karşı dayanıklılığı nedeniyle ağır metal(oid) stresli alanlarda yenilebilir bahçelerde kullanımı önerilmektedir.
- Ağır metal(oid) toksisitesine karşı toleranslı bitkilerin yetiştirilmesi ve fitoremediasyon etkinliğinin artırılması amacıyla farklı şelat ajanlar kullanılabilir.
- Cys'in As ve Cr üzerindeki farklı etkilerinden dolayı metal(oid) seçiciliği bulunmakta olup, farklı ağır metal(oid)ler üzerindeki etkileri tespit edilerek kontamine alanlarda kullanılabilirliği araştırılabilir.
- Antioksidan bir molekül Cys'in tuzluluk, kuraklık, yüksek sıcaklık ve radyasyon gibi farklı stres faktörlerinde stres toleransını düzenlemedeki etkinliği üzerine çalışmalar yapılabilir.
- Fesleğen bitkisinin As ve Cr toleransı ile ilişkili transkriptom ve proteom değişimleri incelenebilir ve bu bağlamda tıbbi ve aromatik bitkiler üzerinde moleküler mekanizmalar ile ilgili araştırmalar yapılabilir.

- Yapılan alışmada As ve Cr toksisitesi ile Cys'in bu toksisite üzerindeki rolü enzimatik olan ve olmayan antioksidan sistem aktivitesi açısından belirlenmiştir. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda ağır metal(oid) stresi ve Cys uygulamalarının fitohomonlara etkisi ve fitohormon ile antioksidan sistem arasındaki ilişkisi belirlenebilir.



6. KAYNAKLAR

- Abbas, G., Murtaza, B., Bibi, I., Shahid, M., Niazi, N. K., Khan, M. I., Amjad, M., Hussain, M., & Natasha. (2018). Arsenic uptake, toxicity, detoxification, and speciation in plants: physiological, biochemical, and molecular aspects. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(1), 59.
- Abedi, T., & Mojiri, A. (2020). Arsenic uptake and accumulation mechanisms in rice species. *Plants*, 9(2), 29.
- Açıkgöz, M. A. (2020). Establishment of cell suspension cultures of *Ocimum basilicum* L. and enhanced production of pharmaceutical active ingredients. *Industrial Crops and Products*, 148, 112278.
- Aebi, H. (1984). Catalase in vitro. *Methods in Enzymology*, 105, 121-126.
- Aggarwal, A., Sharma, I., Tripathi, B. N., Munjal, A. K., Baunthiyal, M., & Sharma, V. (2012). Metal toxicity and photosynthesis. *Photosynthesis: Overviews on Recent Progress and Future Perspectives*, (pp. 229-236) IK International Publishing House, New Delhi.
- Ahmad, P., Sarwat, M., Bhat, N. A., Wani, M. R., Kazi, A. G., & Tran, L. S. P. (2015). Alleviation of cadmium toxicity in *Brassica juncea* L. (Czern. & Coss.) by calcium application involves various physiological and biochemical strategies. *Plos One*, 10(1), e0114571.
- Ahmad, P., Alyemeni, M. N., Al-Huqail, A. A., Alqahtani, M. A., Wijaya, L., Ashraf, M., Kaya, C. & Bajguz, A. (2020). Zinc oxide nanoparticles application alleviates arsenic (As) toxicity in soybean plants by restricting the uptake of as and modulating key biochemical attributes, antioxidant enzymes, ascorbate-glutathione cycle and glyoxalase system. *Plants*, 9(7), 825
- Ahmad, A., Khan, W. U., Shah, A. A., Yasin, N. A., Naz, S., Ali, A., Tahir, A & Batool, A. I. (2021). Synergistic effects of nitric oxide and silicon on promoting plant growth, oxidative stress tolerance and reduction of arsenic uptake in *Brassica juncea*. *Chemosphere*, 262, 128384.
- Ahmad, B., Dar, T. A., Khan, M. M. A., Ahmad, A., Rinklebe, J., Chen, Y., & Ahmad, P. (2022). Oligochitosan fortifies antioxidative and photosynthetic metabolism and enhances secondary metabolite accumulation in arsenic-stressed peppermint. *Frontiers in Plant Science*, 13, 987746.
- Ahmad, B., Zaid, A., Zulfiqar, F., Bovand, F., & Dar, T. A. (2023). Nanotechnology: A novel and sustainable approach towards heavy metal stress alleviation in plants. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 8(1), 27-40.
- Ahmadi, H., Babalar, M., Sarcheshmeh, M. A. A., Morshedloo, M. R., & Shokrpour, M. (2020). Effects of exogenous application of citrulline on prolonged water stress damages in hyssop (*Hyssopus officinalis* L.): Antioxidant activity, biochemical indices, and essential oils profile. *Food Chemistry*, 333, 127433.

- Akçin, A. (2019). Bir ekmeklik buğday çeşidinde (*Triticum aestivum* L. cv. Ceyhan 99) krom stresine karşı fulvik asitin etkileri. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(2), 655-665.
- Akdoğan, D. (2019). ‘‘Farklı ekstraksiyon yöntemlerinin enginarın antioksidan aktivitesine etkileri’’, Yüksek Lisans Tezi, Kimya, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Al Ubeed, H. M. S., Wills, R. B. H., Bowyer, M. C., & Golding, J. B. (2019). Inhibition of postharvest senescence of green leafy vegetables by exogenous D-cysteine and L-cysteine as precursors of hydrogen sulphide. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 94(5), 620-626.
- Ali, S., Cai, S., Zeng, F., Qiu, B., & Zhang, G. (2012). Effect of salinity and hexavalent chromium stresses on uptake and accumulation of mineral elements in barley genotypes differing in salt tolerance. *Journal of Plant Nutrition*, 35(6), 827-839.
- Ali, H., Khan, E., & Anwar Sajad, M. (2013). Phytoremediation of heavy metals- concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869-881.
- Ali, S., Bharwana, S. A., Rizwan, M., Farid, M., Kanwal, S., Ali, Q., Ibrahim, M., Gill, R. A., & Khan, M. D. (2015). Fulvic acid mediates chromium (Cr) tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) through lowering of Cr uptake and improved antioxidant defense system. *Environmental Science and Pollution Research International*, 22(14), 10601-10609.
- Ali, S., Mir, R. A., Tyagi, A., Manzar, N., Kashyap, A. S., Mushtaq, M., Raina, A., Park, S., Sharma, S., Mir, Z. A., Lone, S. A., Bhat, A. A., Baba, U., Mahmoudi, H., & Bae, H. (2023). Chromium Toxicity in Plants: Signaling, Mitigation, and Future Perspectives. *Plants*, 12(7), 1502.
- Alscher, R. G., Erturk, N., & Heath, L. S. (2002). Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants. *Journal of Experimental Botany*, 53(372), 1331-1341.
- Altemimi, A. B., Mohammed, M. J., Yi-Chen, L., Watson, D. G., Lakhssassi, N., Cacciola, F., & Ibrahim, S. A. (2020). Optimization of ultrasonicated kaempferol extraction from *Ocimum basilicum* using a box-behnken design and its densitometric validation. *Foods*, 9(10), 1379.
- Álvarez, C., Ángeles Bermúdez, M., Romero, L. C., Gotor, C., & García, I. (2012). Cysteine homeostasis plays an essential role in plant immunity. *The New Phytologist*, 193(1), 165-177.
- Anjitha, K. S., Sameena, P. P., & Puthur, J. T. (2021). Functional aspects of plant secondary metabolites in metal stress tolerance and their importance in pharmacology. *Plant Stress*, 2, 100038.
- Anjum, N. A., Hasanuzzaman, M., Hossain, M. A., Thangavel, P., Roychoudhury, A., Gill, S. S., Rodrigo, M. A. M., Adam, V., Fujita, M., Kizek, R., Duarte, A. C., Pereira, E., & Ahmad, I. (2015). Jacks of metal/metalloid chelation trade in

- plants-An overview. *Frontiers in Plant Science*, 2(6), 192.
- Anjum, S. A., Ashraf, U., Khan, I., Saleem, M. F., & Wang, L. C. (2016). Chromium toxicity induced alterations in growth, photosynthesis, gas exchange attributes and yield formation in maize. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 53(4).
- Anjum, S. A., Ashraf, U., Tanveer, M., Khan, I., Hussain, S., Shahzad, B., Zohaib, A., Abbas, F., Saleem, M. F., Ali, I., & Wang, L. C. (2017). Drought induced changes in growth, osmolyte accumulation and antioxidant metabolism of three maize hybrids. *Frontiers in Plant Science*, 8, 69.
- Anzano, A., Bonanomi, G., Mazzoleni, S., & Lanzotti, V. (2022). Plant metabolomics in biotic and abiotic stress: A critical overview. *Phytochemistry Reviews*, 21(2), 503-524.
- Aqeel, U., Aftab, T., Khan, M. M. A., & Naeem, M. (2023). Regulation of essential oil in aromatic plants under changing environment. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*. 32, 100441.
- Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24(1), 1-15.
- Aslankoç, R., Demirci, D., İnan, Ü., Yıldız, M., Öztürk, A., Çetin, M., Savran, E. Ş., & Yılmaz, B. (2019). Oksidatif stres durumunda antioksidan enzimlerin rolü- Süperoksit dismutaz (SOD), katalaz (CAT) ve glutatyon peroksidaz (GPX). *SDÜ Tıp Fakültesi Dergisi*, 26(3), 362-369.
- Ashraf, M. A., Rasheed, R., Hussain, I., Iqbal, M., Farooq, M. U., Saleem, M. H., & Ali, S. (2022). Taurine modulates dynamics of oxidative defense, secondary metabolism, and nutrient relation to mitigate boron and chromium toxicity in *Triticum aestivum* L. plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(30), 45527-45548.
- Assaf, M., Korkmaz, A., Karaman, Ş., & Kulak, M. (2022). Effect of plant growth regulators and salt stress on secondary metabolite composition in Lamiaceae species. *South African Journal of Botany*, 144, 480-493.
- Avasiloaiei, D. I., Calara, M., Brezeanu, P. M., Murariu, O. C., & Brezeanu, C. (2023). On the future perspectives of some medicinal plants within lamiaceae botanic family regarding their comprehensive properties and resistance against biotic and abiotic stresses. *Genes*, 14(5), 955.
- Awa, S. H., & Hadibarata, T. (2020). Removal of heavy metals in contaminated soil by phytoremediation mechanism: a review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(2), 47.
- Aybar, M., Bilgin, A., & Sağlam, B. (2015). Fitoremediasyon yöntemi ile topraktaki ağır metallerin giderimi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 1(1-2), 59.
- Aysin, F., Karaman, A., Yılmaz, A., Aksakal, Ö., Gezgincioğlu, E., & Kohnehshahri, S. (2020). Exogenous cysteine alleviates mercury stress by promoting antioxidant defence in maize (*Zea mays* L.) seedlings. *Turkish Journal of Agriculture and*

- Ayyaz, A., Amir, M., Umer, S., Iqbal, M., Bano, H., Gul, H. S., Noor, Y., Kanwal, A., Khalid, A., 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.
- Azarakhsh, M. R., Asrar, Z., & Mansouri, H. (2015). Effects of seed and vegetative stage cysteine treatments on oxidative stress response molecules and enzymes in *Ocimum basilicum* L. under cobalt stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(3), 651-662.
- Babenko, L. M., Smirnov, O., Romanenko, K., Trunova, O., & Kosakivska, I. (2019). Phenolic compounds in plants: Biogenesis and functions. *The Ukrainian Biochemical Journal*, 91(3), 5-18.
- Bahcesular, B., Yildirim, E. D., Karaçocuk, M., Kulak, M., & Karaman, S. (2020). Seed priming with melatonin effects on growth, essential oil compounds and antioxidant activity of basil (*Ocimum basilicum* L.) under salinity stress. *Industrial Crops and Products*, 146, 112165.
- Baker, A. (1981). Accumulators and excluders strategies in response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition*, 3, 643-654.
- Baker, A., & Brooks, R. (1989). Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements, a review of their distribution, *Ecology and Phytochemistry. Biorecovery*, 1, 81-126.
- Bali, A. S., & Sidhu, G. P. S. (2021). Arsenic acquisition, toxicity and tolerance in plants - From physiology to remediation: A review. *Chemosphere*, 283, 131050.
- Bandeoğlu, E., Eyidoğan, F., Yücel, M., & Avni Öktem, H. (2004). Antioxidant responses of shoots and roots of lentil to NaCl-salinity stress. *Plant Growth Regulation*, 42(1), 69-77.
- Banin Sogvar, O., Razavi, F., Rabiei, V., & Gohari, G. (2020). Postharvest application of L-cysteine to prevent enzymatic browning of “Stanley” plum fruit during cold storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(10), e14788.
- Bañón, S., Miralles, J., Ochoa, J., Franco, J. A., & Sánchez-Blanco, M. J. (2011). Effects of diluted and undiluted treated wastewater on the growth, physiological aspects and visual quality of potted lantana and polygala plants. *Scientia Horticulturae*, 129(4), 869-876.
- Barrachina, A. C., Carbonell, F. B., & Beneyto, J. M. (1995). Arsenic uptake, distribution, and accumulation in tomato plants: Effect of arsenite on plant growth and yield. *Journal of Plant Nutrition*, 18(6), 1237-1250.
- Basit, F., Bhat, J. A., Han, J., Guan, Y., Jan, B. L., Shakoar, A., & Alansi, S. (2022). Screening of rice cultivars for Cr-stress response by using the parameters of seed germination, morpho-physiological and antioxidant analysis. *Saudi Journal of*

- Baydar, H. (2022). *Tıbbi ve Aromatik Bitkiler Bilimi ve Teknolojisi*. Nobel Akademik Yayıncılık.
- Beauchamp, C., & Fridovich, I. (1971). Superoxide dismutase: Improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry*, 44(1), 276-287.
- Beltrán-Noboa, A., Jordan-Álvarez, A., Guevara-Terán, M., Gallo, B., Berrueta, L. A., Giampieri, F., Battino, M., Álvarez-Suarez, J. M., & Tejera, E. (2023). Exploring the chemistry of *Ocimum* species under specific extractions and chromatographic methods: a systematic review. *ACS Omega*, 8(12), 10747-10756.
- Bensaid, A., Boudard, F., Servent, A., Morel, S., Portet, K., Guzman, C., Vitou, M., Bichon, F., & Poucheret, P. (2022). Differential nutrition-health properties of *Ocimum basilicum* leaf and stem extracts. *Foods*, 11(12), 1699.
- Bhunja, A., Lahiri, D., Nag, M., Upadhye, V., & Pandit, S. (2022). Bacterial biofilm mediated bioremediation of hexavalent chromium: A review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 43, 102397.
- Bilal, A., Jahan, N., Makbul, S., Bilal, S. N., Habib, S., & Hajra, S. (2012). Phytochemical and pharmacological studies on *Ocimum basilicum*. *International Journal of Current Research and Review*, 4, 73-83.
- Bishekolaei, R., Fahimi, H., Saadatmand, S., Nejadstari, T., Lahouti, M., & Yazdi, F. (2011). Ultrastructural localisation of chromium in *Ocimum basilicum*. *Turkish Journal of Botany*, 35(3), 261-268.
- Biswas, S., Koul, M., & Bhatnagar, A. K. (2015). Effect of arsenic on trichome ultrastructure, essential oil yield and quality of *Ocimum basilicum* L. *Medicinal Plant Research*, 5(6).
- Bolan, N., Kunhikrishnan, A., Thangarajan, R., Kumpiene, J., Park, J., Makino, T., Kirkham, M. B., & Scheckel, K. (2014). Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils – To mobilize or to immobilize? *Journal of Hazardous Materials*, 266, 141-166.
- Boechat, C. L., Carlos, F. S., Gianello, C., & de Oliveira Camargo, F. A. (2016). Heavy metals and nutrients uptake by medicinal plants cultivated on multi-metal contaminated soil samples from an abandoned gold ore processing site. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227, 1-11.
- Butnariu, M. & Sarac, I. (2018). Essential oils from plants. *Journal of Biotechnology and Biomedical Science*, 1(4), 35-43.
- Butnariu, M. (2021). Plants as source of essential oils and perfumery applications. *Bioprospecting of Plant Biodiversity for Industrial Molecules*, 261–292.
- 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*

- Brammer, H., & Ravenscroft, P. (2009). Arsenic in groundwater: A threat to sustainable agriculture in South and South-east Asia. *Environment International*, 35(3), 647-654.
- Bravo, H. C., Vera Céspedes, N., Zura-Bravo, L., & Muñoz, L. A. (2021). Basil seeds as a novel food, source of nutrients and functional ingredients with beneficial properties: A review. *Foods*, 10(7), 1467.
- Brooks, R. R. (Ed). (1998). Plants that hyperaccumulate heavy metals: Their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration and phytomining. CAB International. New York, pp. 380.
- Carović-Stanko, K., Ribić, A., Grdiša, M., Liber, Z., Kolak, I., & Šatović, Z. (2011). Identification and discrimination of *Ocimum basilicum* L. morphotypes. *46th Croatian and 6th International Symposium on Agriculture, Opatija, Croatia, 14-18 February 2011. Proceedings*, 481-484.
- Cervantes, C., Campos-García, J., Devars, S., Gutiérrez-Corona, F., Loza-Tavera, H., Torres-Guzmán, J. C., & Moreno-Sánchez, R. (2001). Interactions of chromium with microorganisms and plants. *FEMS Microbiology Reviews*, 25(3), 335-347.
- Cervilla, L. M., Blasco, B., Rios, J. J., Rosales, M. A., Sánchez-Rodríguez, E., Rubio-Wilhelmi, M. M., Romeo, L. & Ruiz, J. M. (2012). Parameters symptomatic for boron toxicity in leaves of tomato plants. *Journal of Botany*, 2012.
- Chand, S., Singh, S., Singh, V. K., Patra, D. D. (2015). Utilization of heavy metal-rich tannery sludge for sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) cultivation. *Environmental Science and Pollution Research*, 22 (10), 7470-7475.
- Chandra, R., & Kang, H. (2016). Mixed heavy metal stress on photosynthesis, transpiration rate, and chlorophyll content in poplar hybrids. *Forest Science and Technology*, 12(2), 55-61.
- Chandrakar, V., Dubey, A., & Keshavkant, S. (2018). Modulation of arsenic-induced oxidative stress and protein metabolism by diphenyleneiodonium, 24-epibrassinolide and proline in *Glycine max* L. *Acta Botanica Croatica*, 77(1), 51-61.
- Chandrasekara, A., & Shahidi, F. (2011). Inhibitory activities of soluble and bound millet seed phenolics on free radicals and reactive oxygen species. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(1), 428-436.
- Checa, J., & Aran, J. M. (2020). Reactive Oxygen Species: Drivers of Physiological and Pathological Processes. *Journal of Inflammation Research*, 13, 1057-1073.
- Chigonum, W. J., Ikenna, O. C., & John, C. U. (2019). Dynamic impact of chromium on nutrient uptake from soil by fluted pumpkin (*Telfairia occidentalis*). *American Journal of Bioscience and Bioengineering*, 7, 1-9.
- Clemens, S. (2006). Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms

- of tolerance in plants. *Biochimie*, 88(11), 1707-1719.
- Clemens, S., & Ma, J. F. (2016). Toxic heavy metal and metalloid accumulation in crop plants and foods. *Annual Review of Plant Biology*, 67(1), 489-512.
- Cobbett, C. S. (2000). Phytochelatins and their roles in heavy metal detoxification. *Plant Physiology*, 123(3), 825-832.
- Çolak, N., Torun, H., Gruz, J., Strnad, M., & Ayaz, F. (2019). Exogenous N-Acetylcysteine alleviates heavy metal stress by promoting phenolic acids to support antioxidant defence systems in wheat roots. *Ecotoxicology And Environmental Safety*, 181, 49-59.
- da Silva, T. I., Lopes, A. S., da Silva Ribeiro, J. E., Nóbrega, J. S., de Melo Gonçalves, A. C., de Melo Filho, J. S., Sales, G. N. B., Blank, A. F., da Costa, F. B., & Dias, T. J. (2023). Salicylic acid decreases salt stress damage on photosynthetic processes and increases essential oil content in Basil 'Cinnamon'. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(3), 4318-4327.
- Daithankar, V. N., Wang, W., Trujillo, J. R., & Thorpe, C. (2012). Flavin-linked erv-family sulfhydryl oxidases release superoxide anion during catalytic turnover. *Biochemistry*, 51(1), 265-272.
- DalCorso, G. (2012). Heavy Metal Toxicity in Plants, *Plants and Heavy Metals*, 1-25.
- DalCorso, G., Fasani, E., Manara, A., Visioli, G., & Furini, A. (2019). Heavy metal pollutions: state of the art and innovation in phytoremediation. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(14), 3412.
- Dalvi, A. A., & Bhalerao, S. A. (2013). Response of plants towards heavy metal toxicity: an overview of avoidance, tolerance and uptake mechanism. *Annals of Plant Sciences*, 2(09).
- Darrah, H. H. (1980). *The Cultivated Basils* (USA). Buckeye Printing Company, MO.
- 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, 53.
- Das, P., Khare, P., Singh, R. P., Yadav, V., Tripathi, P., Kumar, A., Pandey, V., Gaur, P., Singh, A., Das, R., Hiremath, C., Verma, A. K., Shukla, A. K., & Shanker, K. (2021). Arsenic-induced differential expression of oxidative stress and secondary metabolite content in two genotypes of *Andrographis paniculata*. *Journal of Hazardous Materials*, 406, 124302.
- da Silva, A. P. G., Sganzerla, W. G., John, O. D., & Marchiosi, R. (2023). A comprehensive review of the classification, sources, biosynthesis, and biological properties of hydroxybenzoic and hydroxycinnamic acids. *Phytochemistry Reviews*. 1-30.
- Davies, F. T., Puryear, J. D., Newton, R. J., Egilla, J. N., & Saraiva Grossi, J. A. (2002). Mycorrhizal fungi increase chromium uptake by sunflower plants: influence on

- tissue mineral concentration, growth, and gas exchange. *Journal of Plant Nutrition*, 25(11), 2389-2407.
- Demidchik, V., Straltsova, D., Medvedev, S. S., Pozhvanov, G. A., Sokolik, A., & Yurin, V. (2014). Stress-induced electrolyte leakage: the role of K⁺-permeable channels and involvement in programmed cell death and metabolic adjustment. *Journal of Experimental Botany*, 65(5), 1259-1270.
- Demidchik, V. (2015). Mechanisms of oxidative stress in plants: From classical chemistry to cell biology. *Environmental and Experimental Botany*, 109, 212-228.
- de Oliveira, L. M., Ma, L. Q., Santos, J. A., Guilherme, L. R., & Lessl, J. T. (2014). Effects of arsenate, chromate, and sulfate on arsenic and chromium uptake and translocation by arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. *Environmental Pollution*, 184, 187-192.
- Dharsono, H. D. A., Putri, S. A., Kurnia, D., Dudi, D., & Satari, M. H. (2022). *Ocimum* species: a review on chemical constituents and antibacterial activity. *Molecules*, 27(19), 6350.
- Dhifi, W., Bellili, S., Jazi, S., Bahloul, N., & Mnif, W. (2016). Essential oils' chemical characterization and investigation of some biological activities: a critical review, *Medicines*, 3(4), 25.
- Ding, Y., Di, X., Norton, G. J., Beesley, L., Yin, X., Zhang, Z., & Zhi, S. (2020). Selenite foliar application alleviates arsenic uptake, accumulation, migration and increases photosynthesis of different upland rice varieties. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(10), 3621.
- Dinu, C., Vasile, G.-G., Buleandra, M., Popa, D. E., Gheorghe, S., & Ungureanu, E.-M. (2020). Translocation and accumulation of heavy metals in *Ocimum basilicum* L. plants grown in a mining-contaminated soil. *Journal of Soils and Sediments*, 20(4), 2141-2154.
- Do, H., Kim, I.-S., Jeon, B. W., Lee, C. W., Park, A. K., Wi, A. R., Shin, S. C., Park, H., Kim, Y.-S., Yoon, H.-S., Kim, H.-W., & Lee, J. H. (2016). Structural understanding of the recycling of oxidized ascorbate by dehydroascorbate reductase (OsDHAR) from *Oryza sativa* L. *japonica*. *Scientific Reports*, 6(1), 19498.
- Dong, Q., Wallrad, L., Almutairi, B. O., & Kudla, J. (2022). Ca²⁺ signaling in plant responses to abiotic stresses. *Journal of Integrative Plant Biology*, 64(2), 287-300.
- Drzewiecka, K., Gąsecka, M., Rutkowski, P., Magdziak, Z., Goliński, P., & Mleczek, M. (2018). Arsenic forms and their combinations induce differences in phenolic accumulation in *Ulmus laevis* Pall. *Journal of Plant Physiology*, 220, 34-42.
- Dubey, S., Gupta, A., Khare, A., Jain, G., Bose, S., & Rani, V. (2018). Long-and short-term protective responses of rice seedling to combat Cr (VI)

- toxicity. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 36163-36172
- Dutta, S., Mitra, M., Agarwal, P., Mahapatra, K., De, S., Sett, U., & Roy, S. (2018). Oxidative and genotoxic damages in plants in response to heavy metal stress and maintenance of genome stability. *Plant Signaling & Behavior*, 13(8), e1460048.
- Dvořák, P., Krasylenko, Y., Zeiner, A., Šamaj, J., & Takáč, T. (2021). Signaling toward reactive oxygen species-scavenging enzymes in plants. *Frontiers in Plant Science*, 11.
- Eapen, S., & D'Souza, S. F. (2005). Prospects of genetic engineering of plants for phytoremediation of toxic metals. *Biotechnology Advances*, 23(2), 97-114.
- Edelstein, M., & Ben-Hur, M. (2018). Heavy metals and metalloids: Sources, risks and strategies to reduce their accumulation in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, 234, 431-444.
- Ejaz, U., Khan, S. M., Khalid, N., Ahmad, Z., Jehangir, S., Fatima Rizvi, Z., Lho, L. H., Han, H., & Raposo, A. (2023). Detoxifying the heavy metals: A multipronged study of tolerance strategies against heavy metals toxicity in plants. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1154571.
- Elkelish, A., El-Mogy, M. M., Niedbała, G., Piekutowska, M., Atia, M. A., Hamada, M. M., Shahin, M., Mukherjee, S., El-Yazied, A. A., Shebl, M., Jahan, M. S., Osman, A., El-Gawad, H. G. A., Ashour, H., Farag, R., Selim, S & Ibrahim, M. F. (2021). Roles of exogenous α -lipoic acid and cysteine in mitigation of drought stress and restoration of grain quality in wheat. *Plants*, 10(11), 2318.
- Ertani, A., Mietto, A., Borin, M., & Nardi, S. (2017). Chromium in agricultural soils and crops: A review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 228(5), 190.
- Evangelou, M. W. H., Ebel, M., & Schaeffer, A. (2007). Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soil. Effect, mechanism, toxicity, and fate of chelating agents. *Chemosphere*, 68(6), 989-1003.
- Evans, G., Evans, J., Redman, A., Johnson, N., & Foust, R. D. (2005). Unexpected beneficial effects of arsenic on corn roots grown in culture. *Environmental Chemistry*, 2(3), 167-170.
- Fahmideh, L., Ghaderi, A. A., Mazaraie, A., & Rajabi, A. (2020). The effect of salicylic acid on some morphological characteristics, photosynthetic pigments and antioxidant system activity of basil (*Ocimum basilicum* L.) under arsenic toxicity. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 13(1), 297-312.
- Faisal, M., Imran, K., Muhammad, B. C., Rizwan, M., Athar, M., Rashid, W. K., Arbab, J., Haifa, A. S. A., Sabry, H., Sajid, U., Muhammad, U. H. & Sameer, H. Q. (2022). Exogenously applied glycinebetaine alleviates chromium toxicity in pea by reducing Cr uptake and improving antioxidant defense system. *Applied Ecology & Environmental Research*, 20(5).
- Faizan, M., Bhat, J. A., El-Serehy, H. A., Moustakas, M., & Ahmad, P. (2022). Magnesium oxide nanoparticles (MgO-NPs) alleviate arsenic toxicity in soybean

- by modulating photosynthetic function, nutrient uptake and antioxidant potential. *Metals*, 12(12), 2030.
- Fang, H., Liu, Z., Jin, Z., Zhang, L., Liu, D., & Pei, Y. (2016). An emphasis of hydrogen sulfide-cysteine cycle on enhancing the tolerance to chromium stress in *Arabidopsis*. *Environmental Pollution*, 213, 870-877.
- Farid, M., Ali, S., Akram, N. A., Rizwan, M., Abbas, F., Bukhari, S. A. H., & Saeed, R. (2017). Phyto-management of Cr-contaminated soils by sunflower hybrids: physiological and biochemical response and metal extractability under Cr stress. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 16845-16859.
- 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. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 180, 333-347.
- Fatma, M., Sehar, Z., Iqbal, N., Alvi, A. F., Abdi, G., Proestos, C., & Khan, N. A. (2023). Sulfur supplementation enhances nitric oxide efficacy in reversal of chromium-inhibited Calvin cycle enzymes, photosynthetic activity, and carbohydrate metabolism in wheat. *Scientific Reports*, 13(1), 6858.
- Fattahi, B., Arzani, K., Souri, M. K., & Barzegar, M. (2019). Effects of cadmium and lead on seed germination, morphological traits, and essential oil composition of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Industrial Crops and Products*, 138, 111584.
- Ferreira, L. M. R., Cunha-Oliveira, T., Sobral, M. C., Abreu, P. L., Alpoim, M. C., & Urbano, A. M. (2019). Impact of carcinogenic chromium on the cellular response to proteotoxic stress. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(19), 4901.
- Ferrero, A. L., Walsh, P. R., & Rajakaruna, N. (2020). The ecophysiology, genetics, adaptive significance, and biotechnology of nickel hyperaccumulation in plants. In *Physiological and Biotechnological Aspects of Extremophiles*, pp. 327-347.
- Finnegan, P., & Chen, W. (2012). Arsenic Toxicity: The Effects on Plant Metabolism. *Frontiers in Physiology*, 3, 182.
- Foyer, C. H., & Halliwell, B. (1976). The presence of glutathione and glutathione reductase in chloroplasts: A proposed role in ascorbic acid metabolism. *Planta*, 133(1), 21-25.
- Fra, A., Yoboue, E. D., & Sitia, R. (2017). Cysteines as Redox Molecular Switches and Targets of Disease. *Frontiers in Molecular Neuroscience*, 10, 167.
- Fujii, J., Homma, T., & Osaki, T. (2022). Superoxide radicals in the execution of cell death. *Antioxidants*, 11(3), 501.
- Fujishima, K., Wang, K., Palmer, J., Abe, N., Nakahigashi, K., Endy, D., & Rothschild, L. (2018). Reconstruction of cysteine biosynthesis using engineered cysteine-free enzymes. *Scientific Reports*, 8(1), 1776.

- Gajić, G., Djurdjević, L., Kostic, O., Jarić, S., Mitrović, M., & Pavlovic, P. (2018). Ecological potential of plants for phytoremediation and ecorestoration of fly ash deposits and mine wastes. *Frontiers in Environmental Science*, 6, 124.
- Gajić, G., Djurdjević, L., Kostić, O., Jarić, S., Stevanović, B., Mitrović, M., & Pavlović, P. (2020). Phytoremediation potential, photosynthetic and antioxidant response to arsenic-induced stress of *Dactylis glomerata* L. sown on fly ash deposits. *Plants*, 9(5), 657.
- Gardea-Torresdey, J. L., de la Rosa, G., Peralta-Videa, J. R., Montes, M., Cruz-Jimenez, G., & Cano-Aguilera, I. (2005). Differential uptake and transport of trivalent and hexavalent chromium by tumbleweed (*Salsola kali*). *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 48(2), 225-232.
- Garg, N., & Singla, P. (2011). Arsenic toxicity in crop plants: Physiological effects and tolerance mechanisms. *Environmental Chemistry Letters*, 9(3), 303-321.
- Gasic, K., & Korban, S. S. (2006). Heavy metal stress. In *Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plants*, pp. 219-254.
- Gechev, T., Van Breusegem, F., Stone, J., Denev, I., & Laloi, C. (2006). Reactive oxygen species as signals that modulate plant stress responses and programmed cell death. *BioEssays: News And Reviews In Molecular, Cellular and Developmental Biology*, 28, 1091-1101.
- Genisel, M., Erdal, S., & Kizilkaya, M. (2015). The mitigating effect of cysteine on growth inhibition in salt-stressed barley seeds is related to its own reducing capacity rather than its effects on antioxidant system. *Plant Growth Regulation*, 75(1), 187-197.
- Ghasemzadeh, A., Ashkani, S., Baghdadi, A., Pazoki, A., Jaafar, H. Z. E., & Rahmat, A. (2016). Improvement in flavonoids and phenolic acids production and pharmaceutical quality of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) by Ultraviolet-B Irradiation. *Molecules*, 21(9), 1203.
- 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 and Technology*, 16, 1807-1828.
- Giannakoula, A., Therios, I., & Chatzissavvidis, C. (2021). Effect of lead and copper on photosynthetic apparatus in *Citrus* (*Citrus aurantium* L.) plants. The Role of Antioxidants in Oxidative Damage as a Response to Heavy Metal Stress. *Plants*, 10(1), 155.
- Giles, N. M., Watts, A. B., Giles, G. I., Fry, F. H., Littlechild, J. A., & Jacob, C. (2003). Metal and Redox modulation of cysteine protein function. *Chemistry & Biology*, 10(8), 677-693.
- Gill, M. (2014). Heavy metal stress in plants: A review. *International Journal of Advanced Research*, 2(6), 1043-1055.

- Gill, S. S., Anjum, N. A., Gill, R., Yadav, S., Hasanuzzaman, M., Fujita, M., Mishra, P., Sabat, S. C., & Tuteja, N. (2015). Superoxide dismutase—Mentor of abiotic stress tolerance in crop plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(14), 10375-10394.
- Goleniowski, M., Bonfill, M., Cusido, R., & Palazon, J. (2013). Phenolic acids. *Natural products*, 1951-1973.
- Gull, A., Lone, A. A., Wani, N. U. I., Gull, A., Lone, A. A., & Wani, N. U. I. (2019). Biotic and Abiotic Stresses in Plants. In *Abiotic and Biotic Stress in Plants*. 1-19.
- Guo, W.-J., Meetam, M., & Goldsbrough, P. B. (2008). Examining the specific contributions of individual arabidopsis metallothioneins to copper distribution and metal tolerance. *Plant Physiology*, 146(4), 1697-1706.
- Guo, Z., Gao, Y., Yuan, X., Yuan, M., Huang, L., Wang, S., Liu, C., & Duan, C. (2023). Effects of heavy metals on stomata in plants: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(11), 9302.
- Gupta, D. K., Vandenhove, H., & Inouhe, M. (2013). Role of Phytochelatins in Heavy Metal Stress and Detoxification Mechanisms in Plants. In D. K. Gupta, F. J. Corpas, & J. M. Palma (Ed.), *Heavy Metal Stress in Plants*, pp. 73-94.
- Gupta, K., Mishra, K., Srivastava, S., & Kumar, A. (2018). Cytotoxic assessment of chromium and arsenic using chromosomal behavior of root meristem in *Allium cepa* L. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 100(6), 803-808.
- Güner, A., Özhatay, N., Ekim, T., & Baser, K. H. S. (2000). *Flora of Turkey and the East Aegean Islands*. Supplement II. Edinburgh Univ Press.11, pp. 618-619.
- Habiba, U., Ali, S., Rizwan, M., Hussain, M. B., Hussain, A., Alam, P., Alqarawi, A. A., Hashem, A & AbdAllah, E. F. (2019). The ameliorative role of 5-aminolevulinic acid (ALA) under Cr stress in two maize cultivars showing differential sensitivity to Cr stress tolerance. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38, 788-798.
- Haider, F. U., Liqun, C., Coulter, J. A., Cheema, S. A., Wu, J., Zhang, R., Wenjun, M., & Farooq, M. (2021). Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 211, 111887.
- Hajhashemi, S., Mbarki, S., Skalicky, M., Noedoost, F., Raeisi, M., & Brestic, M. (2020). Effect of wastewater irrigation on photosynthesis, growth, and anatomical features of two wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.). *Water*, 12(2),607.
- Hajjami, K., Ennaji, M. M., Fouad, S., Oubrim, N., & Cohen, N. (2013). Wastewater reuse for irrigation in morocco: Helminth eggs contamination s level of irrigated crops and sanitary risk (A Case Study of Settat and Soualem Regions). *Journal of Bacteriology & Parasitology*, 4, 1-5.

- Hall, J. L. (2002). Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 53(366), 1-11.
- Halliwell, B. (2006). Reactive species and antioxidants. Redox biology is a fundamental theme of aerobic life. *Plant Physiology*, 141(2), 312-322.
- Hamdi, B., Ben Miri, Y., Souilah, N., Amina, B., & Mohamed Djamel, M. (2021). *Phytochemical constituents of Lamiaceae family*, RHAZES: Green and Applied Chemistry, 11(2), 71-88.
- Hamer, D. H. (1986). Metallothionein. *Annual Review of Biochemistry*, 55, 913-951.
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. H. M. B., Zulfiqar, F., Raza, A., Mohsin, S. M., Mahmud, J. A., Fujita, M., & Fotopoulos, V. (2020). Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: revisiting the crucial role of a universal defense regulator. *Antioxidants*, 9(8), 681.
- Heeg, C., Kruse, C., Jost, R., Gutensohn, M., Ruppert, T., Wirtz, M., & Hell, R. (2008). Analysis of the *Arabidopsis* O-Acetylserine(thiol)lyase gene family demonstrates compartment-specific differences in the regulation of cysteine synthesis. *The Plant Cell*, 20(1), 168-185.
- Hell, R., & Wirtz, M. (2011). Molecular Biology, Biochemistry and Cellular Physiology of Cysteine Metabolism in *Arabidopsis thaliana*. *The Arabidopsis Book / American Society of Plant Biologists*, 9, e0154.
- Hoagland, D. R., & Arnon, D. I. (1950). *The water-culture method for growing plants without soil* (Rev. ed.). College of Agriculture, University of California.
- Hossain, M. A., Piyatida, P., da Silva, J. A. T., & Fujita, M. (2012). Molecular Mechanism of Heavy Metal Toxicity and Tolerance in Plants: Central Role of Glutathione in Detoxification of Reactive Oxygen Species and Methylglyoxal and in Heavy Metal Chelation. *Journal of Botany*, 2012, e872875.
- Huang, S., Yang, X., Chen, G., & Wang, X. (2023). Application of glutamic acid improved As tolerance in aromatic rice at early growth stage. *Chemosphere*, 322, 138173.
- Huang, W., Yang, Y.-J., & Zhang, S.-B. (2019). The role of water-water cycle in regulating the redox state of photosystem I under fluctuating light. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*, 1860(5), 383-390.
- Husna, Hussain, A., Shah, M., Hamayun, M., Iqbal, A., Murad, W., Irshad, M., Qadir, M. & Kim, H. Y. (2021). Pseudocitrobacter anthropi reduces heavy metal uptake and improves phytohormones and antioxidant system in *Glycine max* L. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 37, 1-19.
- Hussain, B., Sanaullah, M., Iqbal, M., Mahmood, F., Azeem, F., Shahid, M., Shahzad, T., & Hussain, S. (2021). Effect of arsenic (As) on growth and physiology of maize (*Zea mays*) in varying soils. *Journal of Animal and Plant Sciences-Japs*, 31(5), 1366-1376.

- Hussein, H. A. A., & Alshammari, S. O. (2022). Cysteine mitigates the effect of NaCl salt toxicity in flax (*Linum usitatissimum* L) plants by modulating antioxidant systems. *Scientific Reports*, 12(1), 11359.
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 7(2), 60-72.
- Jakovljević, D., Stanković, M., Warcho, M., & Skrzypek, E. (2022). Basil (*Ocimum* L.) cell and organ culture for the secondary metabolites production: A review. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 149, 61-79.
- Jaspars, E. M. J. (1965). Pigmentation of tobacco crown-gall tissues cultured in vitro in dependence of the composition of the medium. *Physiologia Plantarum*, 18(4), 933-940.
- Jia, H., Wang, X., Dou, Y., Liu, D., Si, W., Fang, H., Zhao, C., Chen, S., Xi, J., & Li, J. (2016). Hydrogen sulfide-Cysteine cycle system enhances cadmium tolerance through alleviating cadmium-induced oxidative stress and ion toxicity in *Arabidopsis* roots. *Scientific Reports*, 6(1), 39702.
- Jobe, T. O., Zenzen, I., Rahimzadeh Karvansara, P., & Kopriva, S. (2019). Integration of sulfate assimilation with carbon and nitrogen metabolism in transition from C3 to C4 photosynthesis. *Journal of Experimental Botany*, 70(16), 4211-4221.
- Juan, C. A., Pérez de la Lastra, J. M., Plou, F. J., & Pérez-Lebeña, E. (2021). The chemistry of reactive oxygen species (ROS) revisited: Outlining their role in biological macromolecules (DNA, lipids and proteins) and induced pathologies. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(9), 4642.
- Kabata-Pendias, A. (2000). Trace Elements in Soils and Plants. CRC press.
- Kapoor, R. T., Bani Mfarrej, M. F., Alam, P., Rinklebe, J., & Ahmad, P. (2022). Accumulation of chromium in plants and its repercussion in animals and humans. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 301, 119044.
- Kar, D., Sur, P., Mandai, S. K., Saha, T., & Kole, R. K. (2008). Assessment of heavy metal pollution in surface water. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 5(1), 119-124.
- Karaca, M., Kara, Ş. M., & Özcan, M. M. (2017). Bazı fesleğen (*Ocimum basilicum* L.) popülasyonlarının herba verimi ve uçucu yağ oranının belirlenmesi. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(2), 160-169.
- Karimi, N., Mortezaazadeh, A., Souri, Z., & Farooq, M. (2024). Silicon application alleviates arsenic toxicity in isatis (*Isatis cappadocica* Desv.) by modulating key biochemical attributes and antioxidant defense systems. *Journal of Plant Growth Regulation*, 43(1), 219-230.
- Karuppanapandian, T., Moon, J.-C., Kim, C., Manoharan, K., & Kim, W. (2011). Reactive oxygen species in plants: Their generation, signal transduction, and scavenging mechanisms. *Australian Journal of Crop Science*, 5, 709-725.

- Kaya, C., Ugurlar, F., Ashraf, M., Alyemeni, M. N., Bajguz, A., & Ahmad, P. (2022). The involvement of hydrogen sulphide in melatonin-induced tolerance to arsenic toxicity in pepper (*Capsicum annuum* L.) plants by regulating sequestration and subcellular distribution of arsenic, and antioxidant defense system. *Chemosphere*, 309, 136678.
- Keramati, S., Pirdashti, H., Babaeizad, V., & Dehestani, A. (2016). Essential oil composition of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) in symbiotic relationship with *Piriformospora indica* and paclobutrazol application under salt stress. *Acta Biologica Hungarica*, 67(4), 412-423.
- Khalid, M., Hassani, S., & Abdollahi, M. (2020). Metal-induced oxidative stress: An evidence-based update of advantages and disadvantages. *Current Opinion in Toxicology*, 20-21, 55-68.
- Khalid, S., Shahid, M., Niazi, N. K., Murtaza, B., Bibi, I., & Dumat, C. (2017). A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. *Journal of Geochemical Exploration*, 182, 247-268.
- Khan, I., Ali, M., Aftab, M., Shakir, S., Qayyum, S., Haleem, K. S., & Tauseef, I. (2019). Mycoremediation: A treatment for heavy metal-polluted soil using indigenous metallotolerant fungi. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(10), 622.
- Khatun, M., Matsushima, D., Rhaman, M. S., Okuma, E., Nakamura, T., Nakamura, Y., Munemasa, S., & Murata, Y. (2020). Exogenous proline enhances antioxidant enzyme activities but does not mitigate growth inhibition by selenate stress in tobacco BY-2 cells. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 84(11), 2281-2292.
- Kim, Y.-O., Gwon, Y., & Kim, J. (2022). Exogenous cysteine improves mercury uptake and tolerance in *Arabidopsis* by regulating the expression of heavy metal chelators and antioxidative enzymes. *Frontiers in Plant Science*, 13, 898247.
- Kisiriko, M., Anastasiadi, M., Terry, L. A., Yasri, A., Beale, M. H., & Ward, J. L. (2021). Phenolics from medicinal and aromatic plants: Characterisation and potential as biostimulants and bioprotectants. *Molecules*, 26(21), 6343.
- Kocaman, A. (2023). Combined interactions of amino acids and organic acids in heavy metal binding in plants. *Plant Signaling & Behavior*, 18(1), 2064072.
- Kohli, S. K., Handa, N., Sharma, A., Gautam, V., Arora, S., Bhardwaj, R., Wijaya, L., Alyemeni, M. N. & Ahmad, P. (2018). Interaction of 24-epibrassinolide and salicylic acid regulates pigment contents, antioxidative defense responses, and gene expression in *Brassica juncea* L. seedlings under Pb stress. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 15159-15173.
- Korkmaz, K., Ertürk, Ö., Ayvaz, M. Ç., Özcan, M. M., Akgün, M., Kirli, A., & Alver, D. O. (2018). Effect of cadmium application on antimicrobial, antioxidant and total phenolic content of basil genotypes. *Indian Journal of Pharmaceutical Education and Research*, 52(4), S108-S114.

- Kostecka-Gugała, A., & Latowski, D. (2018). Arsenic-Induced Oxidative Stress in Plants. In M. Hasanuzzaman, K. Nahar, & M. Fujita (Ed.), *Mechanisms of Arsenic Toxicity and Tolerance in Plants*, pp. 79-104.
- Kumar, N., & Goel, N. (2019). Phenolic acids: Natural versatile molecules with promising therapeutic applications. *Biotechnology Reports*, 24, e00370.
- Kumar, R., Shukla, S. K., Qidwai, A., Pandey, A., & Dikshit, A. (2017). Pharmacological studies of *Ocimum basilicum* L. *Indo American Journal of Pharmaceutical Sciences*, 4(10), 3576-3582.
- Kumar, V., Singh, J., & Kumar, P. (2019a). Heavy metals accumulation in crop plants: Sources, response mechanisms, stress tolerance and their effects. In *Contaminants in Agriculture and Environment: Health Risks and Remediation* (ss. 38-57). Agro Environ Media - Agriculture and Environmental Science Academy, Haridwar, India.
- Kumar, P., Tokas, J., & Singal, H. R. (2019b). Amelioration of chromium VI toxicity in Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) using glycine betaine. *Scientific Reports*, 9(1), 16020.
- Kumar, V., Vogelsang, L., Schmidt, R. R., Sharma, S. S., Seidel, T., & Dietz, K.-J. (2020). Remodeling of Root Growth Under Combined Arsenic and Hypoxia Stress Is Linked to Nutrient Deprivation. *Frontiers in Plant Science*, 11, 569687.
- Kumar Yadav, K., Gupta, N., Kumar, A., Reece, L. M., Singh, N., Rezania, S., & Ahmad Khan, S. (2018). Mechanistic understanding and holistic approach of phytoremediation: A review on application and future prospects. *Ecological Engineering*, 120, 274-298.
- Kumari, A., Bhinda, M. S., Sharma, S., Chitara, M. K., Debnath, A., Maharana, C., Parihar, M., Sharma, B., Kumari, A., Bhinda, M. S., Sharma, S., Chitara, M. K., Debnath, A., Maharana, C., Parihar, M., & Sharma, B. (2021). ROS Regulation Mechanism for Mitigation of Abiotic Stress in Plants. In *Reactive Oxygen Species*. 18, 197-238.
- Lasat, M. M. (2002). Phytoextraction of Toxic Metals. *Journal of Environmental Quality*, 31(1), 109-120.
- Leitão, E. F. V., Ventura, E., de Souza, M. A. F., Riveros, J. M., & do Monte, S. A. (2017). Spin-Forbidden Branching in the Mechanism of the Intrinsic Haber–Weiss Reaction. *ChemistryOpen*, 6(3), 360-363.
- Li, F., Vallabhaneni, R., Yu, J., Rocheford, T., & Wurtzel, E. T. (2008). The maize phytoene synthase gene family: overlapping roles for carotenogenesis in endosperm, photomorphogenesis, and thermal stress tolerance. *Plant Physiology*, 147(3), 1334-1346.
- Li, X., Li, M., Han, C., Jin, P., & Zheng, Y. (2017). Increased temperature elicits higher phenolic accumulation in fresh-cut pitaya fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 129, 90-96.

- Li, J., Zhao, Q., Xue, B., Wu, H., Song, G., & Zhang, X. (2019). Arsenic and nutrient absorption characteristics and antioxidant response in different leaves of two ryegrass (*Lolium perenne*) species under arsenic stress. *Plos One*, 14(11), e0225373.
- Lin, D., Xiao, M., Zhao, J., Li, Z., Xing, B., Li, X., Kong, M., Li, L., Zhang, Q., Liu, Y., Chen, H., Qin, W., Wu, H., & Chen, S. (2016). An overview of plant phenolic compounds and their importance in human nutrition and management of type 2 Diabetes. *Molecules*, 21(10), 1374.
- Liu, J., Lu, B., & Xu, L. (2000). An improved method for the determination of hydrogen peroxide in leaves, *Progress in Biochemistry and Biophysics*, 27, 548– 51.
- Liu, W., Shang, S., Feng, X., Zhang, G., & Wu, F. (2015). Modulation of exogenous selenium in cadmium-induced changes in antioxidative metabolism, cadmium uptake, and photosynthetic performance in the 2 tobacco genotypes differing in cadmium tolerance. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 34(1), 92-99.
- Liu, L., Li, W., Song, W., & Guo, M. (2018). Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. *Science of The Total Environment*, 633, 206-219.
- Lutts, S., Kinet, J. M., & Bouharmont, J. (1996). NaCl-induced senescence in leaves of rice (*Oryza sativa* L.) Cultivars differing in salinity resistance. *Annals of Botany*, 78(3), 389-398.
- Luxmi, S., Singh, R., Ahmed, S., Gandhi, S. G., & Bhanwaria, R. (2023). *Glomus fasciculatum* an arbuscular mycorrhizal fungus alleviate the adverse effects of lead, arsenic, nickel, and improves growth parameters of *Monarda citriodora* Cerv.ex Lag (lemon beebalm). *Rhizosphere*, 27, 100753.
- Ma, J., Saleem, M. H., Yasin, G., Mumtaz, S., Qureshi, F. F., Ali, B., Ercisli, S., Alhag, S. K., Ahmed, A., E., Vodnar, D. C., Hussain, I., Marc, R., A & Chen, F. (2022). Individual and combinatorial effects of SNP and NaHS on morpho-physio-biochemical attributes and phytoextraction of chromium through Cr-stressed spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Frontiers in Plant Science*, 13, 973740.
- Madhava Rao, K. V., & Sresty, T. V. S. (2000). Antioxidative parameters in the seedlings of pigeonpea (*Cajanus cajan* (L.) Millspaugh) in response to Zn and Ni stresses. *Plant Science*, 157(1), 113-128.
- Mahaseth, T., & Kuzminov, A. (2017). Potentiation of hydrogen peroxide toxicity: From catalase inhibition to stable DNA-iron complexes. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 773, 274-281.
- Maleki, M., Ghorbanpour, M., & Kariman, K. (2017). Physiological and antioxidative responses of medicinal plants exposed to heavy metals stress. *Plant Gene*, 11, 247-254.
- Malik, Z., Afzal, S., Dawood, M., Abbasi, G. H., Khan, M. I., Kamran, M., Zhuran, M., Hayat, M. T., Aslam, M. N & Rafay, M. (2022a). Exogenous melatonin

- mitigates chromium toxicity in maize seedlings by modulating antioxidant system and suppresses chromium uptake and oxidative stress. *Environmental Geochemistry and Health*, 44(5), 1-19.
- Malik, A., Yadav, P., & Singh, S. (2022b). Role of polyamines in heavy metal stressed plants. *Plant Physiology Reports*, 27(4), 680-694.
- Malik, B., & Kaur Sandhu, K. (2023). Occurrence and impact of heavy metals on environment. *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.317> (basimda)
- Malik, J. A., Goel, S., Sandhir, R., & Nayyar, H. (2011). Uptake and distribution of arsenic in chickpea: effects on seed yield and seed composition. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42(14), 1728-1738.
- Mamari, H. H. A. (2021). Phenolic Compounds: Classification, Chemistry, and Updated Techniques of Analysis and Synthesis. In *Phenolic Compounds—Chemistry, Synthesis, Diversity, Non-Conventional Industrial, Pharmaceutical and Therapeutic Applications*. 73-94.
- Mandal, S. M., Chakraborty, D., & Dey, S. (2010). Phenolic acids act as signaling molecules in plant-microbe symbioses. *Plant Signaling & Behavior*, 5(4), 359-368.
- Mansoor, S., Kour, N., Manhas, S., Zahid, S., Wani, O. A., Sharma, V., Wijaya, L., Alyemeni, M. N., Alsahli, A. A., El-Serehy, H. A., Paray, B. A., & Ahmad, P. (2021). Biochar as a tool for effective management of drought and heavy metal toxicity. *Chemosphere*, 271, 129458.
- Mansoor, S., Ali Wani, O., Lone, J. K., Manhas, S., Kour, N., Alam, P., Ahmad, A., & Ahmad, P. (2022). Reactive oxygen species in plants: from source to sink. *Antioxidants*, 11(2), 225.
- Mansoor, S., Ali, A., Kour, N., Bornhorst, J., AlHarbi, K., Rinklebe, J., Abd El Moneim, D., Ahmad, P., & Chung, Y. S. (2023). Heavy Metal induced oxidative stress mitigation and ROS scavenging in plants. *Plants*, 12(16), 3003.
- Mareri, L., Parrotta, L., & Cai, G. (2022). Environmental Stress and Plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(10), 5416.
- Mareri, L., Romi, M., & Cai, G. (2019). Arabinogalactan proteins: Actors or spectators during abiotic and biotic stress in plants? *Plant Biosystems*, 153(1), 173-185.
- Martemucci, G., Costagliola, C., Mariano, M., D'andrea, L., Napolitano, P., & D'Alessandro, A. G. (2022). Free radical properties, source and targets, antioxidant consumption and health. *Oxygen*, 2(2), 48-78.
- Martínez-Castillo, J. I., Saldaña-Robles, A., & Ozuna, C. (2022). Arsenic stress in plants: A metabolomic perspective. *Plant Stress*, 3, 100055.
- Marty, L., Bausewein, D., Müller, C., Bangash, S. A. K., Moseler, A., Schwarzländer, M., Müller-Schüssele, S. J., Zechmann, B., Riondet, C., Balk, J., Wirtz, M.,

- Hell, R., Reichheld, J.-P., & Meyer, A. J. (2019). Arabidopsis glutathione reductase 2 is indispensable in plastids, while mitochondrial glutathione is safeguarded by additional reduction and transport systems. *New Phytologist*, 224(4), 1569-1584.
- Masindi, V., & Muedi, K. L. (2018). Environmental Contamination by Heavy Metals. In H. E.-D. M. Saleh & R. F. Aglan (Ed.), *Heavy Metals*, 10, pp. 115-133.
- Meeinkuirt, W., Kruatrachue, M., Pichtel, J., Phusantisampan, T., & Saengwilai, P. (2016). Influence of organic amendments on phytostabilization of Cd-contaminated soil by *Eucalyptus camaldulensis*. *ScienceAsia*, 42, 83.
- Meharg, A. (2006). Integrated tolerance mechanisms: Constitutive and adaptive plant responses to elevated metal concentrations in the environment. *Plant, Cell & Environment*, 17, 989-993.
- Michalak, A. (2006). Phenolic compounds and their antioxidant activity in plants growing under heavy metal stress. *Polish Journal of Environmental Studies*, 15(4).
- Mignolet-Spruyt, L., Xu, E., Idänheimo, N., Hoeberichts, F. A., Mühlenbock, P., Brosché, M., Van Breusegem, F., & Kangasjärvi, J. (2016). Spreading the news: Subcellular and organellar reactive oxygen species production and signalling. *Journal of Experimental Botany*, 67(13), 3831-3844.
- Mika, A., & Luthje, S. (2003). Properties of Guaiacol Peroxidase Activities Isolated from Corn Root Plasma Membranes. *Plant Physiology*, 132(3), 1489-1498.
- Mishra, D., Awasthi, A., & Mishra, P. (2014). Phylogenetic Evolution studies on different varieties of genus *Ocimum* with special reference to Rewa District of Madhya Pradesh. *Science Secure Journal of Biotechnology*, 3(2), 188-197.
- Mishra, D., Kumar, S., & Mishra, B. N. (2021). An Overview of Morpho-Physiological, Biochemical, and Molecular Responses of Sorghum Towards Heavy Metal Stress. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 256, 155-177.
- Mishra, N., Jiang, C., Chen, L., Paul, A., Chatterjee, A., & Shen, G. (2023). Achieving abiotic stress tolerance in plants through antioxidative defense mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1110622.
- Mitra, S., Chakraborty, A. J., Tareq, A. M., Emran, T. B., Nainu, F., Khusro, A., Idris, A. M., Khandaker, M. U., Osman, H., Alhumaydhi, F. A., & Simal-Gandara, J. (2022). Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity. *Journal of King Saud University - Science*, 34(3), 101865.
- Mittler, R. (2017). ROS Are Good. *Trends in Plant Science*, 22(1), 11-19.
- Mohamed, H. I., Latif, H. H., & Hanafy, R. S. (2016). Influence of nitric oxide application on some biochemical aspects, endogenous hormones, minerals and phenolic compounds of *Vicia faba* plant grown under arsenic stress. *Gesunde*

- Mohammadi, H., Ghorbanpour, M., & Brestic, M. (2018). Exogenous putrescine changes redox regulations and essential oil constituents in field-grown *Thymus vulgaris* L. under well-watered and drought stress conditions. *Industrial Crops and Products*, 122, 119-132
- Mondal, S., Pramanik, K., Ghosh, S. K., Pal, P., Ghosh, P. K., Ghosh, A., & Maiti, T. K. (2022). Molecular insight into arsenic uptake, transport, phytotoxicity, and defense responses in plants: A critical review. *Planta*, 255(4), 87.
- Morales, M. R., Charles, D. J., & Simon, J. E. (1993). New aromatic lemon basil germplasm. J. J. & S. J.E. (Ed.), In *New crops* (pp. 632-635). New York: Wiley.
- Moreno-Jiménez, E., Esteban, E., & Peñalosa, J. M. (2012). The fate of arsenic in soil-plant systems. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 215, 1-37.
- Mostofa, M. G., Rahman, A., Ansary, M. M. U., Watanabe, A., Fujita, M., & Tran, L. S. P. (2015). Hydrogen sulfide modulates cadmium-induced physiological and biochemical responses to alleviate cadmium toxicity in rice. *Scientific reports*, 5(1), 14078.
- Mubarak, H., Mirza, N., Chai, L. Y., Yang, Z. H., Yong, W., Tang, C. J., Mahmood, Q., Pervez, A., Farooq, U., Fahad, S., Nasim, W & Siddique, K. H. (2016). Biochemical and metabolic changes in arsenic contaminated *Boehmeria nivea* L. *BioMed Research International*, 2016.
- Mushtaq, Z., Liaquat, M., Nazir, A., Liaquat, R., Iftikhar, H., Anwar, W., & Itrat, N. (2022). Potential of plant growth promoting rhizobacteria to mitigate chromium contamination. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102826.
- Naczki, M., & Shahidi, F. (2003). Phenolic compounds in plant foods: chemistry and health benefits. *Preventive Nutrition and Food Science*, 8(2), 200-218.
- Nahar, K., Rhaman, M. S., Parvin, K., Bardhan, K., Marques, D. N., García-Caparrós, P., & Hasanuzzaman, M. (2022). Arsenic-induced oxidative stress and antioxidant defense in plants. *Stresses*, 2(2), 179-209.
- Nakai, Y., & Maruyama-Nakashita, A. (2020). Biosynthesis of sulfur-containing small biomolecules in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(10), 3470.
- Nakano, Y., & Asada, K. (1981). Hydrogen Peroxide is Scavenged by Ascorbate-specific Peroxidase in Spinach Chloroplasts. *Plant and Cell Physiology*, 22(5), 867-880.
- Nath, S., Panda, P., Mishra, S., Dey, M., Choudhury, S., Sahoo, L., & Panda, S. K. (2014). Arsenic stress in rice: Redox consequences and regulation by iron. *Plant Physiology and Biochemistry*: 80, 203-210.
- Nasibi, F., Farahmand, H., Kamyab, A., & Alipour, S. (2014). Effects of arginine,

- cysteine and 5-sulfosalicylic acid on of vase life of tuberose cut flowers. *Agricultural Communications*, 2(2), 35-41.
- Newman, L. A., & Reynolds, C. M. (2004). Phytodegradation of organic compounds. *Current Opinion in Biotechnology*, 15(3), 225-230.
- Niazi, N. K., Bibi, I., Fatimah, A., Shahid, M., Javed, M. T., Wang, H., Ok, Y. S., Bashir, S., Murtaza, B., Saqid, Z. A. & Shakoor, M. B. (2017). Phosphate-assisted phytoremediation of arsenic by *Brassica napus* and *Brassica juncea*: morphological and physiological response. *International Journal of Phytoremediation*, 19(7), 670-678.
- Noctor, G., & Foyer, C. H. (1998). Ascorbate And Glutathione: Keeping Active Oxygen Under Control. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 49(1), 249-279.
- Nowicka, B. (2022). Heavy metal-induced stress in eukaryotic algae-mechanisms of heavy metal toxicity and tolerance with particular emphasis on oxidative stress in exposed cells and the role of antioxidant response. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29(12), 16860-16911.
- Ogundiran, O. O., & Afolabi, T. A. (2008). Assessment of the physicochemical parameters and heavy metals toxicity of leachates from municipal solid waste open dumpsite. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 5(2), 243-250.
- Oshimura, E., & Sakamoto, K. (2017). Chapter 19—Amino Acids, Peptides, and Proteins. K. Sakamoto, R. Y. Lochhead, H. I. Maibach, & Y. Yamashita (Ed.), In *Cosmetic Science and Technology* (pp. 285-303).
- Osmolovskaya, N., Dung, V. V., & Kuchaeva, L. (2018). The role of organic acids in heavy metal tolerance in plants. *Biological Communications*, 63(1), 9-16.
- Otasevic, V., & Korac, B. (2016). Amino Acids: Metabolism. In *Encyclopedia of Food and Health* (pp. 149-155).
- Öztürk, M., Ashraf, M., Aksoy, A., Ahmad, M. S. A., & Hakeem, K. R. (Ed.). (2015). *Plants, Pollutants and Remediation*. Springer Netherlands.
- Upadhyay, A. K., Singh, N. K., Singh, R., & Rai, U. N. (2016). Amelioration of arsenic toxicity in rice: comparative effect of inoculation of *Chlorella vulgaris* and *Nannochloropsis* sp. on growth, biochemical changes and arsenic uptake. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 124, 68-73.
- Padmavathiamma, P., & Li, L. (2007). Phytoremediation Technology: Hyper-Accumulation Metals in Plants. *Water, Air, and Soil Pollution*, 184, 105-126.
- Paithankar, J. G., Saini, S., Dwivedi, S., Sharma, A., & Chowdhuri, D. K. (2021). Heavy metal associated health hazards: An interplay of oxidative stress and signal transduction. *Chemosphere*, 262, 128350.
- Pan, D., Liu, C., Yi, J., Li, X., & Li, F. (2021). Different effects of foliar application of

- silica sol on arsenic translocation in rice under low and high arsenite stress. *Journal of Environmental Sciences*, 105, 22-32.
- Pandey, A. K., Singh, P., & Tripathi, N. N. (2014). Chemistry and bioactivities of essential oils of some *Ocimum* species: An overview. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 4(9), 682-694.
- Pandey, C., Augustine, R., Panthri, M., Zia, I., Bisht, N. C., & Gupta, M. (2017). Arsenic affects the production of glucosinolate, thiol and phytochemical compounds: A comparison of two Brassica cultivars. *Plant Physiology and Biochemistry*, 111, 144-154.
- Patra, D. K., Pradhan, C., & Patra, H. K. (2019). Chromium bioaccumulation, oxidative stress metabolism and oil content in lemon grass *Cymbopogon flexuosus* (Nees ex Steud.) W. Watson grown in chromium rich over burden soil of Sukinda chromite mine, India. *Chemosphere*, 218, 1082-1088.
- Peer, W., Baxter, I., Richards, E., Freeman, J., & Murphy, A. (2005). Phytoremediation and hyperaccumulator plants. In *Topics in Current Genetics*, 14, pp. 84-84.
- Pereira, D. M., Valentão, P., Pereira, J. A., & Andrade, P. B. (2009). Phenolics: From chemistry to biology. *Molecules*, 14(6), 2202-2211.
- Perveen, S., Iqbal, M., Saeed, M., Iqbal, N., Zafar, S., & Mumtaz, T. (2019). Cysteine-induced alterations in physicochemical parameters of oat (*Avena sativa* L. var. Scott and F-411) under drought stress. *Biologia Futura*, 70(1), 16-24.
- Pham-Huy, L. A., He, H., & Pham-Huy, C. (2008). Free Radicals, Antioxidants in Disease and Health. *International Journal of Biomedical Science : IJBS*, 4(2), 89-96.
- Phaniendra, A., Jestadi, D. B., & Periyasamy, L. (2015). Free Radicals: Properties, Sources, Targets, and Their Implication in Various Diseases. *Indian Journal of Clinical Biochemistry*, 30(1), 11-26.
- Piršelová, B., Galuščáková, Ľ., Lengyelová, L., Kubová, V., Jandová, V., & Hegrová, J. (2022). Assessment of the hormetic effect of arsenic on growth and physiology of two cultivars of maize (*Zea mays* L.). *Plants*, 11(24), 3433.
- Poole, L. B. (2015). The basics of thiols and cysteines in redox biology and chemistry. *Free Radical Biology & Medicine*, 80, 148-157.
- Popov, M., Kubes, J., Vachova, P., Hnilicka, F., Zemanova, V., Ceska, J., Praus, L., Lhotska, M., Kudrna, J., Tunklova, B., Stengl, K., Krucky, J., & Turnovec, T. (2023). Effect of arsenic soil contamination on stress response metabolites, 5-methylcytosine level and CDC25 expression in spinach. *Toxics*, 11(7), 568.
- Puget, K., Lavelle, F., & Michelson, A. M. (1977). Superoxide and Superoxide Dismutase. Michelson A. M., McCord J. M., Fridovich I. (Eds.), Academic Press, New York, pp. 130-150.
- Prasad, A., Kumar, S., Khaliq, A. & Pandey, A. (2011). Heavy metals and arbuscular

- mycorrhizal (AM) fungi can alter the yield and chemical composition of volatile oil of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Biology Fertility Soils*, 47, 853-861.
- Prasad, S., Yadav, K. K., Kumar, S., Gupta, N., Cabral-Pinto, M. M. S., Rezaia, S., Radwan, N., & Alam, J. (2021). Chromium contamination and effect on environmental health and its remediation: A sustainable approaches. *Journal of Environmental Management*, 285, 112174.
- Qin, L., & Wang, X. (2017). Chromium Isotope Geochemistry. In *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 82, pp. 379-414.
- Rafiq, M., Shahid, M., Abbas, G., Shamshad, S., Khalid, S., Niazi, N. K., & Dumat, C. (2017). Comparative effect of calcium and EDTA on arsenic uptake and physiological attributes of *Pisum sativum*. *International Journal of Phytoremediation*, 19(7), 662-669.
- Rahman, Z., & Singh, V. P. (2019). The relative impact of toxic heavy metals (THMs) (arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr)(VI), mercury (Hg), and lead (Pb)) on the total environment: An overview. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(7), 419.
- Rai, V., Vajpayee, P., Sing, S. N. & Mehrotra, S. (2004). Effect of chromium accumulation on photosynthetic pigments, oxidative stress defense system, nitrate reduction, proline level and eugenol content of *Ocimum tenuiflorum* L., *Plant Science*, 167(5), 1159-1169.
- Rai, U. N., Singh, N. K., Upadhyay, A. K., & Verma, S. (2013). Chromate tolerance and accumulation in *Chlorella vulgaris* L.: Role of antioxidant enzymes and biochemical changes in detoxification of metals. *Bioresource Technology*, 136, 604-609.
- Rai, K. K., Pandey, N., Meena, R. P., & Rai, S. P. (2021). Biotechnological strategies for enhancing heavy metal tolerance in neglected and underutilized legume crops: A comprehensive review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208, 111750.
- Rajab, H., Khan, M. S., Wirtz, M., Malagoli, M., Qahar, F., & Hell, R. (2020). Sulfur metabolic engineering enhances cadmium stress tolerance and root to shoot iron translocation in *Brassica napus* L. *Plant Physiology and Biochemistry*, 152, 32-43.
- Rajput, V. D., Harish, Singh, R. K., Verma, K. K., Sharma, L., Quiroz-Figueroa, F. R., Meena, M., Gour, V. S., Minkina, T., Sushkova, S & Mandzhieva, S. (2021). Recent developments in enzymatic antioxidant defence mechanism in plants with special reference to abiotic stress. *Biology*, 10(4), 267
- Ramzan, M., Naz, G., Parveen, M., Jamil, M., Gill, S., & Sharif, H. M. A. (2023). Synthesis of phytostabilized zinc oxide nanoparticles and their effects on physiological and anti-oxidative responses of *Zea mays* (L.) under chromium stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 196, 130-138.
- Rascio, N., & Navari-Izzo, F. (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: How and

why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Science*, 180(2), 169-181.

- Rashmi, H. B., & Negi, P. S. (2020). Phenolic acids from vegetables: A review on processing stability and health benefits. *Food Research International*, 136, 109298.
- Raskin, I., Smith, R. D., & Salt, D. E. (1997). Phytoremediation of metals: Using plants to remove pollutants from the environment. *Current Opinion in Biotechnology*, 8(2), 221-226.
- Raza, M. M., Ullah, S., Ahmad, Z., Saqib, S., Ahmad, S., Bilal, H. M., & Wali, F. (2016). Silicon mediated arsenic reduction in rice by limiting its uptake. *Agricultural Sciences*, 7(01), 1.
- Reeves, R. D., Baker, A. J. M., Jaffré, T., Erskine, P. D., Echevarria, G., & van der Ent, A. (2018). A global database for plants that hyperaccumulate metal and metalloid trace elements. *New Phytologist*, 218(2), 407-411.
- Rehman, M. U., Khan, R., Khan, A., Qamar, W., Arafah, A., Ahmad, A., Ahmad, A., Akhter, R., Rinklebe, J., & Ahmad, P. (2021). Fate of arsenic in living systems: Implications for sustainable and safe food chains. *Journal of Hazardous Materials*, 417, 126050.
- Ren, J.-H., Sun, H.-J., Wang, S.-F., Luo, J., & Ma, L. Q. (2014). Interactive effects of mercury and arsenic on their uptake, speciation and toxicity in rice seedling. *Chemosphere*, 117, 737-744.
- Rhaman, M. S., Imran, S., Karim, M. M., Chakraborty, J., Mahamud, M. A., Sarker, P., Tahjib-Ul-Arif, M., Robin, A. H. K., Ye, W., Murata, Y., & Hasanuzzaman, M. (2021). 5-aminolevulinic acid-mediated plant adaptive responses to abiotic stress. *Plant Cell Reports*, 40(8), 1451-1469.
- Romano, R., De Luca, L., Aiello, A., Pagano, R., Di Pierro, P., Pizzolongo, F., & Masi, P. (2022). Basil (*Ocimum basilicum* L.) Leaves as a Source of bioactive compounds. *Foods*, 11(20), 3212.
- Ronzan, M., Piacentini, D., Fattorini, L., Federica, D. R., Caboni, E., Eiche, E., Ziegler, J., Hause, B., Riemann, M., Betti, C., Altamura, M. M., & Falasca, G. (2019). Auxin-jasmonate crosstalk in *Oryza sativa* L. root system formation after cadmium and/or arsenic exposure. *Environmental and Experimental Botany*, 165, 59-69.
- Rostami, M., & Abbaspour, H. (2019). Effect of selenium on growth and physiological traits of basil plant (*Ocimum basilicum* L.) under arsenic stress conditions. *Revista De Agricultura Neotropical*, 6(3), 30-37.
- Rout, J. R., Behera, S., Keshari, N., Ram, S. S., Bhar, S., Chakraborty, A., Sudarshan, M & Sahoo, S. L. (2015). Effect of iron stress on *Withania somnifera* L.: antioxidant enzyme response and nutrient elemental uptake of in vitro grown plants. *Ecotoxicology*, 24, 401-413.

- Sadak, M. S., Abd El-Hameid, A. R., Zaki, F. S., Dawood, M. G., & El-Awadi, M. E. (2020). Physiological and biochemical responses of soybean (*Glycine max* L.) to cysteine application under sea salt stress. *Bulletin of the National Research Centre*, 44, 1-10.
- Sadgrove, N. J., Padilla-Gonzalez, G. F. & Phumthum, M. (2022). Fundamental chemistry of essential oils and volatile organic compounds, methods of analysis and authentication. *Plants*, 11(6), 789.
- Saeid, Z. D., Zahra, A., & Abdolhamid, N. S. (2014). Investigation of synergistic action between coronatine and nitric oxide in alleviating arsenic-induced toxicity in sweet basil seedlings. *Plant Growth Regulation*, 74(2), 119-130.
- Salbitani, G., Maresca, V., Cianciullo, P., Bossa, R., Carfagna, S., & Basile, A. (2023). Non-protein thiol compounds and antioxidant responses involved in bryophyte heavy-metal tolerance. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(6), 5302.
- Saleem, M. H., Afzal, J., Rizwan, M., Shah, Z.-U.-H., Depar, N., & Usman, K. (2022). Chromium toxicity in plants: Consequences on growth, chromosomal behavior and mineral nutrient status. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 46(3), 371-389.
- Saleem, M. H., Mfarrej, M. F. B., Alatawi, A., Mumtaz, S., Imran, M., Ashraf, M. A., Rizwan, M., Usman, K., Ahmad, P & Ali, S. (2023). Silicon enhances morpho-physio-biochemical responses in arsenic stressed spinach (*Spinacia oleracea* L.) by minimizing its uptake. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42(3), 2053-2072.
- Sami, H., Ashraf, K., Sultan, K., Alamri, S., Abbas, M., Javied, S., & uz Zaman, Q. (2023). Remediation potential of biochar and selenium for mitigating chromium-induced stress in spinach to minimize human health risk. *South African Journal of Botany*, 163, 237-249.
- Sampietro, D. A., Vattuone, M. A., & Isla, M. I. (2006). Plant growth inhibitors isolated from sugarcane (*Saccharum officinarum*) straw. *Journal of Plant Physiology*, 163(8), 837-846.
- Sandil, S., Óvári, M., Dobosy, P., Vetési, V., Endrédi, A., Takács, A., Füzy, A & Záray, G. (2021). Effect of arsenic-contaminated irrigation water on growth and elemental composition of tomato and cabbage cultivated in three different soils, and related health risk assessment. *Environmental Research*, 197, 111098.
- Schiavon, M., Pilon-Smits, E. A. H., Wirtz, M., Hell, R., & Malagoli, M. (2008). Interactions between chromium and sulfur metabolism in *Brassica juncea*. *Journal of Environmental Quality*, 37(4), 1536-1545.
- Sen, S., Chakraborty, R., Sridhar, C., Reddy, Y., & De, B. (2010). Free radicals, antioxidants, Diseases and phytomedicines: Current status and Future prospect. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*, 3, 91-100.

- Seridou, P., Fyntrilakis, K., Syranidou, E., & Kalogerakis, N. (2023). Hydroponic phytoremediation of antimony by *Tamarix smyrnensis* and *Nerium oleander*. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 98(9), 2214-2223.
- Seven, T., Can, B., Darende, B. N., & Ocak, S. (2018). Hava ve Toprakta Ağır Metal Kirliliği. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 1(2), 91-103.
- Shah, A. A., Riaz, L., Siddiqui, M. H., Nazar, R., Ahmed, S., Yasin, N. A., Ali, A., Mukherjee, S., Hussaan, M., Javad, S., & Chaudhry, O. (2022). Spermine-mediated polyamine metabolism enhances arsenic-stress tolerance in *Phaseolus vulgaris* by expression of zinc-finger proteins related genes and modulation of mineral nutrient homeostasis and antioxidative system. *Environmental Pollution*, 1(300), 118941.
- Shahid, M., Pourrut, B., Dumat, C., Nadeem, M., Aslam, M., & Pinelli, E. (2014). Heavy-Metal-Induced Reactive Oxygen Species: Phytotoxicity and Physicochemical Changes in Plants. İçinde D. M. Whitacre (Ed.), In *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 232, pp. 1-44. Springer International Publishing.
- Shahid M., Khalid S., Abbas, G., Shahid N., Nadeem M., Sabir M., Aslam, M. & Dumat, C. (2015). "Heavy Metal Stress and Crop Productivity," in *Crop Production and Global Environmental Issues* ed. Hakeem K. R., Springer International Publishing, pp. 1-25.
- Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Schreck, E., Xiong, T., & Niazi, N. K. (2017a). Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *Journal of Hazardous Materials*, 325, 36-58.
- Shahid, M., Shamshad, S., Rafiq, M., Khalid, S., Bibi, I., Niazi, N. K., Dumat, C., & Rashid, M. I. (2017b). Chromium speciation, bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system: A review. *Chemosphere*, 178, 513-533.
- Shahidi, F., & Yeo, J. (2018). Bioactivities of phenolics by focusing on suppression of chronic diseases: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(6), 1573.
- Shahrajabian, M. H., Sun, W., & Cheng, Q. (2020). Chemical components and pharmacological benefits of Basil (*Ocimum basilicum*): A review. *International Journal of Food Properties*, 23(1), 1961-1970.
- Shahzad, B., Tanveer, M., Hassan, W., Shah, A. N., Anjum, S. A., Cheema, S. A., & Ali, I. (2016). Lithium toxicity in plants: Reasons, mechanisms and remediation possibilities-A review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 107, 104-115.
- Shaji, E., Santosh, M., Sarath, K. V., Prakash, P., Deepchand, V., & Divya, B. V. (2021). Arsenic contamination of groundwater: A global synopsis with focus on the Indian Peninsula. *Geoscience Frontiers*, 12(3), 101079.
- Shanker, A. K., Cervantes, C., Loza-Tavera, H., & Avudainayagam, S. (2005). Chromium toxicity in plants. *Environment International*, 31(5), 739-753.

- Shanker, A. K., Djanaguiraman, M., & Venkateswarlu, B. (2009). Chromium interactions in plants: Current status and future strategies. *Metallomics*, 1(5), 375-383.
- Sharifan, H., & Ma, X. (2021). Foliar application of Zn agrichemicals affects the bioavailability of arsenic, cadmium and micronutrients to rice (*Oryza sativa* L.) in flooded paddy soil. *Agriculture*, 11(6), 505.
- Sharma, A., Kapoor, D., Wang, J., Shahzad, B., Kumar, V., Bali, A. S., Jasrotia, S., Zheng, B., Yuan, H., & Yan, D. (2020). Chromium bioaccumulation and its impacts on plants: An Overview. *Plants*, 9(1), 100.
- Sharma, A., Shahzad, B., Rehman, A., Bhardwaj, R., Landi, M., & Zheng, B. (2019). Response of phenylpropanoid pathway and the role of polyphenols in plants under abiotic stress. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 24(13), 2452.
- Sharma, P., Jha, A. B., Dubey, R. S., & Pessarakli, M. (2012a). Reactive Oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. *Journal of Botany*, 2012, e217037.
- Sharma, P., Jha, A. B., Dubey, R. S., & Pessarakli, M. (2012b). Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. *Journal of Botany*, 2012, e217037.
- Sharma, P., Kumar, A., & Bhardwaj, R. (2016). Plant steroidal hormone epibrassinolide regulate- heavy metal stress tolerance in *Oryza sativa* L. by modulating antioxidant defense expression. *Environmental and Experimental Botany*, 122(1-9).
- Sharma, S. S., & Dietz, K.-J. (2006). The significance of amino acids and amino acid-derived molecules in plant responses and adaptation to heavy metal stress. *Journal of Experimental Botany*, 57(4), 711-726.
- Sharma, S. S., & Dietz, K.-J. (2009). The relationship between metal toxicity and cellular redox imbalance. *Trends in Plant Science*, 14(1), 43-50.
- Sheoran, V., Sheoran, A. S., & Poonia, P. (2011). Role of hyperaccumulators in phytoextraction of metals from contaminated mining sites: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 41(2), 168-214.
- Shiyab, S. (2019). Morphophysiological effects of chromium in sour orange (*Citrus aurantium* L.). *HortScience*, 54(5), 829-834.
- Shu-Hsien, H., Chih-Wen, Y. U., & Lin, C. H. (2005). Hydrogen peroxide functions as a stress signal in plants. *Botanical Bulletin of Academia Sinica*, 46.
- Siddiqui, F., Krishna, S. K., Tandon, P. K., & Srivastava, S. (2013). Arsenic accumulation in *Ocimum* spp. and its effect on growth and oil constituents. *Acta Physiologiae Plantarum*, 35, 1071-1079.
- Siddiqui, F., Tandon, P. K., & Srivastava, S. (2015). Arsenite and arsenate impact the

- oxidative status and antioxidant responses in *Ocimum tenuiflorum* L. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 21, 453-458.
- Sies, H., & Jones, D. P. (2020). Reactive oxygen species (ROS) as pleiotropic physiological signalling agents. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 21(7), 363-383.
- Singh, S., Parihar, P., Singh, R., Singh, V. P., & Prasad, S. M. (2016). Heavy metal tolerance in plants: role of transcriptomics, proteomics, metabolomics, and ionomics. *Frontiers in Plant Science*, 6, 1143.
- Singh, R., Parihar, P., & Prasad, S. M. (2018). Simultaneous exposure of sulphur and calcium hinder As toxicity: Up-regulation of growth, mineral nutrients uptake and antioxidants system. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 161, 318-331.
- Singh, R., Jha, A. B., Misra, A. N., & Sharma, P. (2019). Differential responses of growth, photosynthesis, oxidative stress, metals accumulation and NRAMP genes in contrasting *Ricinus communis* genotypes under arsenic stress. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(30), 31166-31177.
- Singh, D., Sharma, N. L., Singh, C. K., Yerramilli, V., Narayan, R., Sarkar, S. K., & Singh, I. (2021a). Chromium (VI)-induced alterations in physio-chemical parameters, yield, and yield characteristics in two cultivars of mungbean (*Vigna radiata* L.). *Frontiers in Plant Science*, 12, 735129.
- Singh, S., Mishra, H., & Suprasanna, P. (2021b). Evaluation of arsenic remediation, morphological and biochemical response by *Vetiveria zizanoides* L. plants grown on artificially arsenic contaminated soil: A field study. *Ecological Engineering*, 168, 106267.
- Singh, D., Sharma, N. L., Singh, D., Siddiqui, M. H., Taunk, J., Sarkar, S. K., Rathore, A., Singh, C. K., Al-amri, A. A., Alansi, S., Ali, H. M. & Rahman, M. A. (2023). Exogenous hydrogen sulfide alleviates chromium toxicity by modulating chromium, nutrients and reactive oxygen species accumulation, and antioxidant defence system in mungbean (*Vigna radiata* L.) seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 200, 107767.
- Skuzza, L., Szućko-Kociuba, I., Filip, E., & Božek, I. (2022). Natural molecular mechanisms of plant hyperaccumulation and hypertolerance towards heavy metals. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(16), 9335.
- Slaveykova, V. I., & Cheloni, G. (2018). Preface: Special Issue on Environmental Toxicology of Trace Metals. *Environments*, 5(12), 138.
- Smart, R. E., & Bingham, G. E. (1974). Rapid estimates of relative water content. *Plant Physiology*, 53(2), 258-260.
- Smirnoff, N., & Arnaud, D. (2019). Hydrogen peroxide metabolism and functions in plants. *New Phytologist*, 221(3), 1197-1214.
- Solanki, R., & Dhankhar, R. (2011). Biochemical changes and adaptive strategies of

- plants under heavy metal stress. *Biologia*, 66(2), 195-204.
- Soni, S. K., Singh, R., & Tiwari, S. (2022). Management of chromium(VI)-contaminated soils through synergistic application of vermicompost, chromate reducing rhizobacteria and Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) reduced plant toxicity and improved yield attributes in *Ocimum basilicum* L. *Archives of Microbiology*, 204(10), 614.
- Sperdouli, I. (2022). Heavy metal toxicity effects on plants. *Toxics*, 10(12), 715.
- Sricoth, T., Meeinkuirt, W., Saengwilai, P., Pichtel, J., & Taeprayoon, P. (2018). Aquatic plants for phytostabilization of cadmium and zinc in hydroponic experiments. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(15), 14964-14976.
- Srivastava, A. K., Shankar, A., Nalini Chandran, A. K., Sharma, M., Jung, K. H., Suprasanna, P., & Pandey, G. K. (2020). Emerging concepts of potassium homeostasis in plants. *Journal of Experimental Botany*, 71(2), 608-619.
- Srivastava, D., Tiwari, M., Dutta, P., Singh, P., Chawda, K., Kumari, M., & Chakrabarty, D. (2021). Chromium stress in plants: toxicity, tolerance and phytoremediation. *Sustainability*, 13(9), 4629.
- Sudhakar, C., Lakshmi, A., & Giridarakumar, S. (2001). Changes in the antioxidant enzyme efficacy in two high yielding genotypes of mulberry (*Morus alba* L.) under NaCl salinity. *Plant Science*, 161(3), 613-619.
- Subrahmanyam, D. (2008). Effects of chromium toxicity on leaf photosynthetic characteristics and oxidative changes in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Photosynthetica*, 46(3), 339-345.
- Suman, J., Uhlik, O., Viktorova, J., & Macek, T. (2018). Phytoextraction of heavy metals: a promising tool for clean-up of polluted environment? *Frontiers in Plant Science*, 9, 1476.
- Sumugat, M. R., Donahue, J. L., Cortes, D. F., Stromberg, V. K., Grene, R., Shulaev, V., & Welbaum, G. E. (2010). Seed development and germination in an *Arabidopsis thaliana* line antisense to glutathione reductase 2. *Journal of New Seeds*, 11(2), 104-126.
- Sundaramoorthy, P., Chidambaram, A., Ganesh, K. S., Unnikannan, P., & Baskaran, L. (2010). Chromium stress in paddy: (i) Nutrient status of paddy under chromium stress; (ii) Phytoremediation of chromium by aquatic and terrestrial weeds. *Comptes Rendus Biologies*, 333(8), 597-607.
- Surekha, S., & Duhan, J. S. (2012). Chromium stress on peroxidase, ascorbate peroxidase and acid invertase in pea (*Pisum sativum* L.) seedling. *International Journal for Biotechnology and Molecular Biology Research*, 3(2), 15-21.
- Sushant, K. S., & Ghosh, A. K. (2010). Effect of arsenic on photosynthesis, growth and its accumulation in the tissues of *Allium cepa* (Onion). *International Journal of Environmental Engineering and Management*, 1(1), 39-50.

- Talebi, M., Moghaddam, M., & Pirbalouti, A. G. (2018). Methyl jasmonate effects on volatile oil compounds and antioxidant activity of leaf extract of two basil cultivars under salinity stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 40(2), 34.
- Tang JianMin, T. J., Xu JingYi, X. J., Wu YongSheng, W. Y., Li YanSheng, L. Y., & Tang Qian, T. Q. (2012). Effects of high concentration of chromium stress on physiological and biochemical characters and accumulation of chromium in tea plant (*Camellia sinensis* L.). *African Journal of Biotechnology*, 11(9).
- Terzi, H., & Yıldız, M. (2020). Krom stresine maruz kalan mısırdaki dışsal sistein uygulamasının etkileri. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 20(3), 374-381.
- Terzi, H., & Yıldız, M. (2021). Proteomic analysis reveals the role of exogenous cysteine in alleviating chromium stress in maize seedlings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 209, 111784.
- Thakur, S., Singh, L., Wahid, Z. A., Siddiqui, M. F., Atnaw, S. M., & Din, M. F. M. (2016). Plant-driven removal of heavy metals from soil: Uptake, translocation, tolerance mechanism, challenges, and future perspectives. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(4), 206.
- Thakur, M., Praveen, S., Divte, P. R., Mitra, R., Kumar, M., Gupta, C. K., Kalidindi, U., Bansal, R., Roy, S., Anand, A., & Singh, B. (2022). Metal tolerance in plants: Molecular and physicochemical interface determines the “not so heavy effect” of heavy metals. *Chemosphere*, 287, 131957.
- Thannickal, V. J. (2009). Oxygen in the evolution of complex life and the price we pay. *American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology*, 40(5), 507-510.
- Tiwari, J., . A., Sweta, Kumar, S., Korstad, J., & Bauddh, K. (2019). Ecorestoration of Polluted Aquatic Ecosystems Through Rhizofiltration, In *Phytomanagement of pollutes sites*, (pp. 179-201).
- Tiwari, S., & Lata, C. (2018). Heavy metal stress, signaling, and tolerance due to plant-associated microbes: An overview. *Frontiers in Plant Science*, 9, 452.
- Tripathi, D. K., Singh, S., Gaur, S., Singh, S., Yadav, V., Liu, S., Singh, V. P., Sharma, S., Srivastava, P., Prasad, S. M., Dubey, N. K., Chauhan, D. K & Sahi, S. (2018). Acquisition and homeostasis of iron in higher plants and their probable role in abiotic stress tolerance. *Frontiers in Environmental Science*, 5, 86.
- Torun, H. (2019). Time-course analysis of salicylic acid effects on ROS regulation and antioxidant defense in roots of hulled and hullless barley under combined stress of drought, heat and salinity. *Physiologia Plantarum*, 165(2), 169-182.
- Torun, H., Novák, O., Mikulík, J., Pěňčík, A., Strnad, M., & Ayaz, F. A. (2020). Timing-dependent effects of salicylic acid treatment on phytohormonal changes, ROS regulation, and antioxidant defense in salinized barley (*Hordeum vulgare* L.), *Scientific Reports*, 10(1), 13886.

- Tuzet, A., Rahantaniaina, M.-S., & Noctor, G. (2019). Analyzing the function of catalase and the ascorbate–glutathione pathway in H₂O₂ processing: Insights from an experimentally constrained kinetic model. *Antioxidants & Redox Signaling*, 30(9), 1238-1268.
- UdDin, I., Bano, A., & Masood, S. (2015). Chromium toxicity tolerance of *Solanum nigrum* L. and *Parthenium hysterophorus* L. plants with reference to ion pattern, antioxidation activity and root exudation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 113, 271–27
- Ugwu, E. I., & Agunwamba, J. C. (2020). A review on the applicability of activated carbon derived from plant biomass in adsorption of chromium, copper, and zinc from industrial wastewater. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(4), 240.
- Ullah, S., Liu, Q., Wang, S., Jan, A. U., Sharif, H. M. A., Ditta, A., Wang, G., & Cheng, H. (2023). Sources, impacts, factors affecting Cr uptake in plants, and mechanisms behind phytoremediation of Cr-contaminated soils. *Science of The Total Environment*, 899, 165726.
- Ulhassan, Z., Gill, R. A., Huang, H., Ali, S., Mwamba, T. M., Ali, B., Huang, Q., Hamid, Y., Khan, A. R., Wang, J & Zhou, W. (2019). Selenium mitigates the chromium toxicity in *Brassica napus* L. by ameliorating nutrients uptake, amino acids metabolism and antioxidant defense system. *Plant Physiology and Biochemistry*, 145, 142-152.
- Ulrich, K., & Jakob, U. (2019). The role of thiols in antioxidant systems. *Free Radical Biology & Medicine*, 140, 14-27.
- Usman, K., Al Jabri, H., Abu-Dieyeh, M. H., & Alsafran, M. H. S. A. (2020). Comparative assessment of toxic metals bioaccumulation and the mechanisms of Chromium (Cr) tolerance and uptake in *Calotropis procera*. *Frontiers in Plant Science*, 11, 883.
- Vaculík, M., Lukačová, Z., Bokor, B., Martinka, M., Tripathi, D. K., & Lux, A. (2020). Alleviation mechanisms of metal(loid) stress in plants by silicon: A review. *Journal of Experimental Botany*, 71(21), 6744-6757.
- Vanitha, G. (2021). Eco-friendly synthesis of some novel metal nanoparticles mediated by *Ocimum basilicum*-Lamiaceae (Thiru Neetru Pathilai) leaves extract. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 9, 548-561.
- Vernay, P., Gauthier-Moussard, C., & Hitmi, A. (2007). Interaction of bioaccumulation of heavy metal chromium with water relation, mineral nutrition and photosynthesis in developed leaves of *Lolium perenne* L. *Chemosphere*, 68(8), 1563-1575.
- Veza, M. E., Llanes, A., Travaglia, C., Agostini, E., & Talano, M. A. (2018). Arsenic stress effects on root water absorption in soybean plants: Physiological and morphological aspects. *Plant Physiology and Biochemistry*, 123, 8-17.

- Viehweger, K. (2014). How plants cope with heavy metals. *Botanical Studies*, 55, 1-12.
- Vuletić, M., Hadži-Tašković Šukalović, V., Marković, K., Kravić, N., Vučinić, Ž., & Maksimović, V. (2014). Differential response of antioxidative systems of maize (*Zea mays* L.) roots cell walls to osmotic and heavy metal stress. *Plant Biology*, 16(1), 88-96.
- Wakeel, A., Ali, I., Wu, M., Raza Kkan, A., Jan, M., Ali, A., Liu, Y., Ge, S., Wu, J., liu, B., & Gan, Y. (2019). Ethylene mediates dichromate-induced oxidative stress and regulation of the enzymatic antioxidant system-related transcriptome in *Arabidopsis thaliana*. *Environmental and Experimental Botany*, 161, 166-179.
- Wang, L.-J., & Li, S.-H. (2006). Salicylic acid-induced heat or cold tolerance in relation to Ca^{2+} homeostasis and antioxidant systems in young grape plants. *Plant Science*, 170(4), 685-694.
- Wang, K., Wang, Y., Wan, Y., Mi, Z., Wang, Q., Wang, Q., & Li, H. (2021). The fate of arsenic in rice plants (*Oryza sativa* L.): Influence of different forms of selenium. *Chemosphere*, 264, 128417.
- Wen, K., Li, X., Huang, R., & Nian, H. (2022). Application of exogenous glutathione decreases chromium translocation and alleviates its toxicity in soybean (*Glycine max* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 234, 113405.
- Wheal, M. S., & Palmer, L. T. (2010). Chloride analysis of botanical samples by ICP-OES. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 25(12), 1946-1952.
- Wirtz, M., Beard, K. F. M., Lee, C. P., Boltz, A., Schwarzländer, M., Fuchs, C., Meyer, A. J., Heeg, C., Sweetlove, L. J., Ratcliffe, R. G., & Hell, R. (2012). Mitochondrial cysteine synthase complex regulates O-Acetylserine biosynthesis in plants. *The Journal of Biological Chemistry*, 287(33), 27941-27947.
- Wirtz, M., & Hell, R. (2006). Functional analysis of the cysteine synthase protein complex from plants: Structural, biochemical and regulatory properties. *Journal of Plant Physiology*, 163(3), 273-286.
- Wu, H., Tito, N., & Giraldo, J. P. (2017). Anionic cerium oxide nanoparticles protect plant photosynthesis from abiotic stress by scavenging reactive oxygen species. *ACS Nano*, 11(11), 11283-11297.
- Wuana, R. A., & Okieimen, F. E. (2011). Heavy metals in contaminated soils: A review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *International Scholarly Research Notices*, 2011, e402647.
- Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., Jeevanantham, S., & Saravanan, R. (2022). A review on bioremediation approach for heavy metal detoxification and accumulation in plants. *Environmental Pollution*, 301, 119035.
- Yadav, B., Jogawat, A., Rahman, M. S., & Narayan, O. P. (2021). Secondary metabolites in the drought stress tolerance of crop plants: A review. *Gene Reports*, 23, 101040.

- Yadav, S. K. (2010). Heavy metals toxicity in plants: An overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants. *South African journal of botany*, 76(2), 167-179.
- Yaman, D. (2023). ‘‘*Galium aparine* L. bitkisinden peroksidaz ve katalaz enzimlerinin karakterizasyonu’’, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye.
- Yan, A., Wang, Y., Tan, S. N., Mohd Yusof, M. L., Ghosh, S., & Chen, Z. (2020). Phytoremediation: A promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land. *Frontiers in Plant Science*, 11, 359.
- Yan, G., Gao, Y., Xue, K., Qi, Y., Fan, Y., Tian, X., Wang, J., Zhao, R., Zhang, P., Liu, Y., & Liu, J. (2023). Toxicity mechanisms and remediation strategies for chromium exposure in the environment. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 161.
- Yang, M., Zhang, F., Wang, F., Dong, Z., Cao, Q., & Chen, M. (2015). Characterization of a Type 1 metallothionein gene from the stresses-tolerant plant *Ziziphus jujuba*. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(8), 16750-16762.
- Ye, X., Chen, X. F., Deng, C. L., Yang, L. T., Lai, N. W., Guo, J. X., & Chen, L. S. (2019). Magnesium-deficiency effects on pigments, photosynthesis and photosynthetic electron transport of leaves, and nutrients of leaf blades and veins in *Citrus sinensis* seedlings. *Plants*, 8(10), 389.
- Yerli, C., Çakmakci, T., Sahin, U., & Tüfenkçi, Ş. (2020). Ağır Metallerin Toprak, Bitki, Su ve İnsan Sağlığına Etkileri. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 9, 103-114.
- Yıldız, M., Cenkci, S., & Terzi, H. (2012). Fitoşelatinler ve Metalotiyoneinler: Moleküler Yaklaşımlar (1-16). *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(1), 1-16.
- Yıldız, M., & Terzi, H. (2021). Exogenous cysteine alleviates chromium stress via reducing its uptake and regulating proteome in roots of *Brassica napus* L. seedlings. *South African Journal of Botany*, 139, 114-121.
- Yoon, J., Cao, X., Zhou, Q., & Ma, L. Q. (2006). Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of The Total Environment*, 368(2-3), 456-464.
- Yu, X., Pasternak, T., Eiblmeier, M., Ditengou, F., Kochersperger, P., Sun, J., Wang, H., Rennenberg, H., Teale, W., Paponov, I., Zhou, W., Li, C., Li, X., & Palme, K. (2013). Plastid-localized glutathione reductase2-regulated glutathione redox status is essential for *Arabidopsis* Root Apical Meristem Maintenance. *The Plant Cell*, 25(11), 4451-4468.
- Yuan, H., Zhang, Y., Huang, S., Yang, Y., & Gu, C. (2015). Effects of exogenous glutathione and cysteine on growth, lead accumulation, and tolerance of *Iris lactea* var. *chinensis*. *Environmental Science and Pollution Research International*, 22(4), 2808-2816.

- Yuan, X., Zhou, J., Peng, C., Qiao, J., Xia, S., Fan, Y., Yao, L., Qi, K., Chen, D., Guo, Z., Gan, X., Sun, Y., Dai, X., Lv, L., Ji, Y., & Huo, Q. (2023). Effects of varied forms of arsenic stress on seedling growth and arsenic distribution in honeysuckle plants. *Processes*, 11(7), 1980.
- Zafari, S., Sharifi, M., Chashmi, N. A., & Mur, L. A. (2016). Modulation of Pb-induced stress in *Prosopis* shoots through an interconnected network of signaling molecules, phenolic compounds and amino acids. *Plant Physiology and Biochemistry*, 99, 11-20.
- Zagorchev, L., Seal, C. E., Kranner, I., & Odjakova, M. (2013). A central role for thiols in plant tolerance to abiotic stress. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(4), 7405-7432.
- Zandi, P., & Schnug, E. (2022). Reactive oxygen species, antioxidant responses and implications from a microbial modulation perspective. *Biology*, 11(2), 155.
- Zare Dehabadi, S., Shoushtari, A., & Asrar, Z. (2013). Modulation of arsenic toxicity-induced oxidative damage by coronatine pretreatment in sweet basil (*Ocimum basilicum*) seedlings. *Botany*, 91(7), 442-448.
- Zemanová, V., Pavlíková, D., Hnilička, F., Pavlík, M., Zámečnicková, H., & Hlavsa, T. (2021a). A comparison of the photosynthesis response to arsenic stress in two *Pteris cretica* ferns. *Photosynthetica*, 59(1), 228-236.
- Zemanová, V., Pavlíková, D., Hnilička, F., & Pavlík, M. (2021b). Arsenic toxicity-induced physiological and metabolic changes in the shoots of *Pteris cretica* and *Spinacia oleracea*. *Plants*, 10(10), 2009.
- Zhang, J., Zhang, M., Tian, S., Lu, L., Shohag, M. J. I., & Yang, X. (2014). Metallothionein 2 (SaMT2) from *Sedum alfredii* hance confers increased Cd tolerance and accumulation in yeast and tobacco. *Plos One*, 9(7), e102750.
- Zhang, M. M., Fan, D. Y., Murakami, K., Badger, M. R., Sun, G. Y., & Chow, W. S. (2019). Partially dissecting electron fluxes in both photosystems in spinach leaf disks during photosynthetic induction. *Plant and Cell Physiology*, 60(10), 2206-2219.
- Zhang, Q., Gong, M., Liu, K., Chen, Y., Yuan, J., & Chang, Q. (2020). *Rhizoglossus intraradices* improves plant growth, root morphology and phytohormone balance of *Robinia pseudoacacia* in arsenic-contaminated soils. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1428.
- Zhou, G. K., Xu, Y. F., & Liu, J. Y. (2005). Characterization of a rice class II metallothionein gene: Tissue expression patterns and induction in response to abiotic factors. *Journal of Plant Physiology*, 162(6), 686-696.
- Zhou, G., Xu, Y., Li, J., Yang, L., & Liu, J.-Y. (2006). Molecular analyses of the metallothionein gene family in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Biochemistry and Molecular Biology*, 39(5), 595-606.
- Zhou, Z., Song, J., Nie, L., & Chen, X. (2016). Reactive oxygen species generating

systems meeting challenges of photodynamic cancer therapy. *Chemical Society reviews*, 45(23), 6597-6626.

- Zhou, H. Y., Nian, F. Z., Chen, B. D., Zhu, Y. G., Yue, X. R., Zhang, N. M., & Xia, Y. S. (2023). Synergistic reduction of arsenic uptake and alleviation of leaf arsenic toxicity in maize (*Zea mays* L.) by arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and exogenous iron through antioxidant activity. *Journal of Fungi*, 9(6), 677.
- Zoufan, P., Azad, Z., Rahnama Ghahfarokhie, A., & Kolahi, M. (2020). Modification of oxidative stress through changes in some indicators related to phenolic metabolism in *Malva parviflora* exposed to cadmium. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 187, 109811.
- Zulfiqar, F., & Ashraf, M. (2021). Bioregulators: Unlocking their potential role in regulation of the plant oxidative defense system. *Plant Molecular Biology*, 105(1), 11-41.
- Zulfiqar, F., & Ashraf, M. (2022). Antioxidants as modulators of arsenic-induced oxidative stress tolerance in plants: An overview. *Journal of Hazardous Materials*, 427, 127891.
- Zulfiqar, F., Moosa, A., Ferrante, A., Nafees, M., Darras, A., Nazir, M. M., AlShaqhaa, M. A., & Elsaid, F. G. (2023). Melatonin and salicylic acid synergistically improve arsenic induced oxidative stress tolerance in ornamental sword lily. *Scientia Horticulturae*, 322, 112389.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Vesile YALÇIN

Yabancı Dili :İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Biyoloji	Düzce Üniversitesi	2024
Y. Lisans	Biyoloji	Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi	2014
Lisans	Biyoloji	Atatürk Üniversitesi	2008
Lise		Dr. Şerafettin Tombuloğlu Lisesi	2006

TEZDEN ÇIKAN YAYINLAR

Yalcin, V., and Torun, H. (2023). The Effect Of Arsenic Toxicity On The Growth And Physiology Of Basil (*Ocimum basilicum* L.), M. İlkim and N.H. Hoang (Eds). *1.International Selçuk Scientific Research Congress*, pp. 163-171.

Yalcin, V., and Torun, H. (2023). The Effect Of Chromium Stress On MorphoPhysiological Processes In Basil (*Ocimum basilicum* L.), M. İlkim and N.H. Hoang (Eds). *1.International Selçuk Scientific Research Congress*, pp. 172-180.

DİĞER YAYINLAR

Leblebici, Z., Kar, M. and Yalcin, V. (2018), Comparative Study of Cd, Pb, and Ni removal potential by *Salvinia natans* (L.) All. and *Lemna minor* L.:Interactions with Growth Parameters, *Romanian Biotechnological Letters*, 23(1),13235-13248.

Torun, H., Eroğlu, E., Yalcin, V. and Usta, E. Ü. (2021), Physicochemical and Antioxidant Responses of St. John's Wort (*Hypericum perforatum* L.) under Drought Stress, *Düzce University Journal of Science & Technology*, 9(1), 40-50.

Yalcin, V., Torun, H., Eroğlu, E. ve Usta, E. Ü. (2022), Şeker Otu (*Stevia rebaudiana* Bertoni) Bitkisinde Kuraklık Stresinin Fizyolojik ve Biyokimyasal Etkileri, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(3), 1165-1176.

Yalcin, V., and Torun, H. (2022). The protective effect of indole-3-acetic acid against cadmium stress in redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus* L.), P. Dolashka and K. Adilbekova (Eds.) *8th International Black Sea Coastline Countries Scientific Research Conference*, pp. 502-514.

Yalcin, V., and Torun, H. (2022). The effects of exogenous melatonin on drought tolerance in sunflower (*Helianthus annuus* L.), P. Dolashka and K. Adilbekova (Eds.) *8th International Black Sea Coastline Countries Scientific Research Conference*, pp. 515-526.

Yalcin, V., and Torun, H. (2023). In PHENOLIC METABOLISM IN PLANTS UNDER HEAVY METAL STRESS. Kökten K. And Özdemir S. (Eds). In RESEARCH TOPICS IN AGRICULTURE, pp. 101-123. IKSAD Publications.