

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Burcu UYSAL**

**İSPANAKTA KADMIYUM TOKSİSİTESİNE BAĞLI OKSİDATİF STRES  
ÜZERİNE POTASYUM BESLENMESİNİN ETKİSİ**

**TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME ANABİLİM DALI**

**ADANA, 2012**

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İSPANAKTA KADMIYUM TOKSİSİTESİNE BAĞLI OKSİDATİF STRES  
ÜZERİNE POTASYUM BESLENMESİNİN ETKİSİ**

**Burcu UYSAL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME ANABİLİM DALI**

Bu Tez 23/01/2012 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Oy Birliği/Oy Çokluğu İle Kabul Edilmiştir.

Doç. Dr. Selim EKER  
DANIŞMAN

Prof. Dr. Zülküf KAYA  
ÜYE

Yrd. Doç. Dr. Sema KARANLIK  
ÜYE

Bu Tez Enstitümüz Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalında Hazırlanmıştır.

**Kod No:**

**Prof. Dr. İlhami YEĞİNGİL  
Enstitü Müdürü**

Bu Çalışma Ç.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Tarafından Desteklenmiştir.  
**Proje No : ZF2010YL63**

**Not:** Bu tezde kullanılan ve başka kaynakta yapılan bildirimlerin, Çizelge, Şekil ve Fotoğrafların kaynak olarak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı fikir ve sanat eserleri kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İSPANAKTA KADMIYUM TOKSİSİTESİNE BAĞLI OKSİDATİF STRES  
ÜZERİNE POTASYUM BESLENMESİNİN ETKİSİ

Burcu UYSAL

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME ANABİLİM DALI

Danışman: Doç. Dr. Selim EKER

Yıl: 2012, Sayfa. 77

Jüri : Doç. Dr. Selim EKER

: Prof. Dr. Zülküf KAYA

: Yrd. Doç. Dr. Sema KARANLIK

Bu çalışmada, ıspanakta kadmiyum toksisitesine bağlı oksidatif stres üzerine potasyumun etkisi su kültüründe test edilmiştir. Bitkiler kontrollü iklim koşullarında değişik potasyum (50, 250 ve 2000  $\mu\text{M}$ ) ve kadmiyum (0 ve 20  $\mu\text{M}$ ) dozları altında yetiştirilmiştir. Kadmiyum uygulaması yeşil aksam ve kök kuru madde üretimini önemli oranda azaltmıştır. Potasyum uygulaması hem yeşil aksam hem de köklerde kadmiyum konsantrasyonunu azaltmıştır. Kadmiyum uygulaması hem yeşil aksam hem de köklerde lipid peroksidasyonu arttırmıştır. Potasyumun yeterli düzeyde uygulanması lipid peroksidasyonu üzerinde azaltıcı etkide bulunmuştur. Kadmiyum uygulaması altında artan potasyum beslenmesi hem askorbik asit hem de SH-bileşiklerinin azalmasına neden olmuştur. Potasyum ve kadmiyum uygulamaları altında süperoksit dismutaz (SOD) ve katalaz (CAT) aktivitelerindeki değişim benzer olmuştur. İlgili enzimlerin aktivitelerinde 2000  $\mu\text{M}$  potasyum uygulaması altında, 20  $\mu\text{M}$  kadmiyum uygulamasıyla belirgin bir yükselmeye yol açmıştır. Askorbik peroksidaz (APX) aktivitesi kadmiyum uygulaması altında artan potasyum beslenmesiyle birlikte önemli ölçüde yükselmiştir. Artan potasyum beslenmesi glutatyon redüktaz (GR) aktivitesinin kadmiyum uygulaması altında hafif düzeyde yükselmesine neden olmuştur. Kadmiyum uygulaması tüm potasyum dozlarında guaiakol peroksidaz (GPX) aktivitesinin artmasına neden olmuştur. GPX aktivitesi, hem kadmiyum uygulamasının olmadığı hem de 20  $\mu\text{M}$  kadmiyum uygulandığı koşullarda artan potasyum beslenmesiyle birlikte azalmalar göstermiştir.

Sonuçlar, potasyum beslenmesinin iyileştirilmesinin, ıspanak bitkisini kadmiyum toksisitesine bağlı oksidatif strese karşı korumada, özellikle de hidrojen peroksit ve lipid peroksidasyonunun azaltılmasında kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Potasyum, Kadmiyum, Ispanak, Antioksidatif enzimler, Lipid peroksidasyonu.

## ABSTRACT

### MSc THESIS

# EFFECT OF POTASSIUM NUTRITION ON THE CADMIUM TOXICITY-INDUCED OXIDATIVE STRESS IN SPINACH

**Burcu UYSAL**

**CUKUROVA UNIVERSITY  
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES  
DEPARTMENT OF SOIL SCIENCE AND PLANT NUTRITION**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Selim EKER

Year: 2012, Pages: 77

Jury : Assoc. Prof. Dr. Selim EKER

: Prof. Dr. Zülküf KAYA

: Asst. Prof. Dr. Sema KARANLIK

In this study, the effect of potassium on the cadmium-induced oxidative stress in spinach was tested under hydroponic culture. Plants were grown under controlled climatic conditions at various potassium (50, 250 and 2000  $\mu\text{M}$ ) and cadmium (0 and 20  $\mu\text{M}$  Cd) supplies. Cadmium treatment significantly reduced shoots and root dry matter production. Potassium application decreased cadmium concentration both in shoot and root. Cadmium application increased lipid peroxidation both in shoot and root. Sufficient amount of potassium application has a reducing effect on lipid peroxidation. The increased potassium nutrition at cadmium treatment decreased both ascorbic acid and SH-compounds. Superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) activities have a similar change at potassium and cadmium treatments. The 20  $\mu\text{M}$  cadmium application revealed a significant increase on related enzyme activities in 2000  $\mu\text{M}$  potassium treatment. The ascorbate peroxidase (APX) activity in cadmium treatment markedly increased with increasing potassium nutrition. The increasing potassium nutrition slightly increased glutathione reductase (GR) activity at cadmium treatment. Cadmium application caused increases in guaiacol peroxidase (GPX) activity at all potassium doses. The GPX activity showed decreases at treatment without cadmium and 20  $\mu\text{M}$  application coupled with increasing potassium nutrition

Results revealed that, enhancing potassium nutrition has a crucial role in protection of spinach against cadmium toxicity-induced oxidative stress, particularly by decreasing of hydrogen peroxide and lipid peroxidation.

**Key words:** Potassium, Cadmium, Spinach, Antioxidative enzymes, Lipid peroxidation

## **TEŞEKKÜR**

Bu tez çalıőmasının gerçekleőtirilmesinde en önemli paya sahip olan danışman hocam Doç. Dr. Selim EKER'e, tezimin tüm aőamalarındaki önemli katkılarından dolayı, öncelikle arkadaşlarım Arő. Gör. Hesna PAMİRALAN, Gizem YAZICI, Safiye SEZGİN ve Pınar DÖLEK olmak üzere, Canan BAĞ, Aslı BAĞ, Nalan TURUS, Gülümsen ONARLI ve Sinan SARIOĞLAN'a çok teşekkür ederim. Ayrıca maddi, manevi desteklerini hiç esirgemeyen eőim Sami Yasin UYSAL'a ve değerli aileme ve özellikle babam Fikret ŐENTÜRK'e çok teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

## SAYFA

ÖZ.....	I
ABSTRACT .....	II
TEŞEKKÜR .....	III
İÇİNDEKİLER.....	IV
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VIII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	X
1.GİRİŞ .....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
2.1. Toprakta ve Bitkide Kadmiyum .....	5
2.2. Bitkilerde Reaktif Oksijen Türevlerinin Oluşumu ve Detoksifikasyonu.....	10
2.3. Kamiyuma Bağlı Oksidatif Zararlanma ve Bitkilerin Potasyum Beslenmesi ..	16
3. MATERYAL VE METOD .....	19
3.1. Materyal.....	19
3.1.1. Bitki Materyali .....	19
3.2. Metod .....	19
3.2.1. Tohum Çimlendirme ve Su Kültürü Denemesinin Yürütülmesi .....	19
3.2.2. Laboratuvar Çalışmalarının Yürütülmesi .....	20
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	23
4.1. Araştırma Bulguları.....	23
4.1.1.Yeşil Aksam ve Kök Kuru Madde Üretimi .....	23
4.1.2. Yeşil Aksam ve Kök Kadmiyum ve Potasyum Konsantrasyonu.....	24
4.1.3. Klorofil Konsantrasyonu .....	25
4.1.4. Lipid Peroksidasyonu .....	26
4.1.5. Askorbik Asit Konsantrasyonu .....	27
4.1.6. SH-Bileşikleri Konsantrasyonu.....	28
4.1.7. Çözünür Protein Konsantrasyonu .....	29
4.1.8. Süperoksit Dismutaz Aktivitesi .....	30
4.1.9. Askorbat Peroksidaz Aktivitesi.....	31

4.1.10. Glutasyon Redüktaz Aktivitesi.....	32
4.1.11. Katalaz Aktivitesi.....	33
4.1.12. Guaiakol Peroksidaz Aktivitesi.....	34
4.2. Tartışma.....	35
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	49
KAYNAKLAR.....	51
ÖZGEÇMİŞ .....	77

## ÇİZELGELER DİZİNİ

## SAYFA

Çizelge 2.1. Bitki veriminde % 25 azalmayla ilişkili toprak ve bitki dokusundaki Cd düzeyleri .....	7
Çizelge 4.1. Değişik potasyum (50, 250 ve 2000 $\mu\text{M}$ ) ve kadmiyum (0 ve 20 $\mu\text{M}$ ) uygulamalarının su kültürü koşullarında 24 günlük ıspanak bitkisinin yeşil aksam ve kök Cd konsantrasyonu üzerine etkisi .....	24
Çizelge 4.2. Değişik potasyum (50, 250 ve 2000 $\mu\text{M}$ ) ve kadmiyum (0 ve 20 $\mu\text{M}$ ) uygulamalarının su kültürü koşullarında 24 günlük ıspanak bitkisinin yeşil aksam ve kök K konsantrasyonu üzerine etkisi.....	25





## ŞEKİLLER DİZİNİ

## SAYFA

Şekil 2.1. Askorbat-glutatiyon döngüsü .....	15
Şekil 4.1. Değişik potasyum (50, 250 2000 µM) ve kadmiyum (0 ve 20 µM) uygulamalarının su kültürü koşullarında 24 günlük ıspanak bitkisinin yeşil aksam ve kök kuru madde üretimine etkisi .....	23
Şekil 4.2. Değişik potasyum (50, 250 2000 µM) ve kadmiyum (0 ve 20 µM) uygulamalarının su kültürü koşullarında 24 günlük ıspanak bitkisinin klorofil konsantrasyonu üzerine etkisi.....	26
Şekil 4.3. Değişik potasyum (50, 250 2000 µM) ve kadmiyum (0 ve 20 µM) uygulamalarının su kültürü koşullarında 24 günlük ıspanak bitkisinin yeşil aksam ve kök lipid peroksidasyonu üzerine etkisi .....	27
Şekil 4.4. Değişik potasyum (50, 250 2000 µM) ve kadmiyum (0 ve 20 µM) uygulamalarının su kültürü koşullarında 24 günlük ıspanak bitkisinin yeşil aksam askorbik asit konsantrasyonu üzerine etkisi.....	28
Şekil 4.5. Değişik potasyum (50, 250 2000 µM) ve kadmiyum (0 ve 20 µM) uygulamalarının su kültürü koşullarında 24 günlük ıspanak bitkisinin yeşil aksam SH-bileşikleri konsantrasyonu üzerine etkisi.....	29
Şekil 4.6. Değişik potasyum (50, 250 2000 µM) ve kadmiyum (0 ve 20 µM) uygulamalarının su kültürü koşullarında 24 günlük ıspanak bitkisinin yeşil aksam çözümlü protein konsantrasyonu üzerine etkisi .....	30
Şekil 4.7. Değişik potasyum (50, 250 2000 µM) ve kadmiyum (0 ve 20 µM) uygulamalarının su kültürü koşullarında 24 günlük ıspanak bitkisinin yeşil aksam süperoksit dismutaz aktivitesi üzerine etkisi.....	31
Şekil 4.8. Değişik potasyum (50, 250 2000 µM) ve kadmiyum (0 ve 20 µM) uygulamalarının su kültürü koşullarında 24 günlük ıspanak bitkisinin yeşil aksam askorbat peroksidaz aktivitesi üzerine etkisi.....	32
Şekil 4.9. Değişik potasyum (50, 250 2000 µM) ve kadmiyum (0 ve 20 µM) uygulamalarının su kültürü koşullarında 24 günlük ıspanak bitkisinin yeşil aksam glutatiyon redüktaz aktivitesi üzerine etkisi.....	33

Şekil 4.10. Değişik potasyum (50, 250 2000 $\mu\text{M}$ ) ve kadmiyum (0 ve 20 $\mu\text{M}$ ) uygulamalarının su kültürü koşullarında 24 günlük ıspanak bitkisinin yeşil aksam katalaz aktivitesi üzerine etkisi.....	34
Şekil 4.11. Değişik potasyum (50, 250 2000 $\mu\text{M}$ ) ve kadmiyum (0 ve 20 $\mu\text{M}$ ) uygulamalarının su kültürü koşullarında 24 günlük ıspanak bitkisinin yeşil aksam guaiacol peroksidaz aktivitesi üzerine etkisi.....	35

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SOD	: Süperoksit dismutaz
APX	: Askorbat peroksidaz
GR	: Glutasyon redüktaz
CAT	: Katalaz
GPX	: Guaiakol peoksidaz
Cd	: Kadmiyum
K	: Potasyum
Ca	: Kalsiyum
P	: Fosfor
Cl	: Klor
Mg	: Magnezyum
Fe	: Demir
Zn	: Çinko
Cu	: Bakır
Mn	: Mangan
$\mu$ M	: Mikro molar
mM	: Mili molar
ha	: Hektar



## 1. GİRİŞ

Son yıllarda, endüstriyel ve tarımsal faaliyetler sonucu ortaya çıkan ağır metallere bağlı çevre kirliliği önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle de, bakır (Cu), kadmiyum (Cd), kurşun (Pb) ve civa (Hg) gibi metallerin üretiminin yüksekliğinin önemli boyutlarda olduğu bildirilmiştir (Pinto ve ark., 2004). İlgili ağır metallere Cd, son yıllarda artan bir şekilde araştırmalara konu olmuştur. Kadmiyum içeren fosforlu gübrelerin yoğun ve sürekli bir şekilde kullanımı topraklarda kadmiyum birikimine yol açmaktadır. Kadmiyumun topraklardaki yüksek konsantrasyonlarına bağlı olarak bitkilerde de kadmiyum birikimi olabilmektedir. Bitkilerdeki söz konusu kadmiyum birikimi besin zinciri yoluyla insan sağlığını olumsuz şekilde etkileyebilmektedir (Wagner, 1993). Kadmiyum hayvanlar üzerinde de olumsuz etkide bulunmaktadır (Degreave, 1981; Bhattacharya ve Chaudhuri, 1995).

Toksik bir ağır metal olan Cd bitki kökleri tarafından kolayca alınabilmekte ve yeşil aksamına taşınabilmektedir (Marschner, 1983; Sanita di Toppi ve Gabbrielli, 1999). Bitkilerde kadmiyum birikimi biyokimyasal ve fizyolojik işlemlerde sorunlara yol açmakta ve bunun sonucunda bitki büyümesi ve morfolojisi olumsuz şekilde etkilenmektedir (Sgherri ve ark., 2002). Araştırmalar kadmiyumun, tohum çimlenmesini (Thamayanthi ve ark., 2011) ve bitki büyümesini engellediğini (Greger ve ark., 1991; Sandalio ve ark., 2001; Öztürk ve ark., 2003; Köleli ve ark., 2004) ortaya koymuştur. Bitkilerde kadmiyum birikimine bağlı olarak, fotosentezde (Stobart ve ark., 1985; Ciscato ve ark., 1999; Dunand ve ark., 2002; Chen ve ark., 2011) besin dağılımında (Wang, 1987; Yang ve ark., 1996; Jiang ve ark., 2004; Abu-Muriefah, 2008) ve bitki-su ilişkilerinde (Barcelo ve Poschenrieder, 1990) problemler ortaya çıktığı ve bu durumun gözle görülebilir zararlanma belirtilerine, örneğin sararma, büyümede gerileme, kök uçlarında kahverengileşme ve ölümlere neden olduğu bildirilmiştir (Drazkiewicz ve ark., 2003; Hsu ve Kao, 2007; Anjum ve ark., 2008). Bitkilerde kadmiyum toksisitesinin özellikle de Calvin döngüsüne ve klorofil biyosentezine katılan fotosentetik enzimlerin aktivitesini engelleyerek fotosentetik proseslerin olumsuz şekilde etkilenmesine yol açtığı bildirilmiştir (Van

Assche ve Clijsters, 1990). Aynı zamanda, kadmiyumun bitkilerde azot (Boussama ve ark., 1999; Kumar ve Dubey, 1999) ve kükürt metabolizmasıyla (Lee ve Leustek, 1999) ilgili enzimlerin aktivitelerini de etkilediği bildirilmiştir. Kadmiyuma bağlı olarak aktive edilen nitrat ve sülfat asimilasyon yollarının fito-şelatin üretiminin artışında önemli bir rol oynadığı belirtilmiştir (Astolfi ve ark., 2004).

Araştırmalar kadmiyumun, bitkilerde aktif oksijen türevlerinin üretimine de yol açtığını göstermiştir (Hendry ve ark., 1992; Foyer ve ark., 1997). Bununla birlikte, kadmiyum bitkilerde fizyolojik olaylarda sorunlara yol açarak toksik oksijen radikallerini artırma ve lipid peroksidasyona yol açma gibi dolaylı mekanizmalarla oksidatif strese neden olmaktadır (Shaw, 1995; Gallego ve ark., 1996; Chaoui ve ark., 1997; Sanita di Toppi ve Gabrielli, 1999; Montillet ve ark., 2004; Tiryakioğlu ve ark., 2006; Sharma ve Dietz, 2009). Bitkiler oksidatif strese karşı savunmada, glutasyon ve askorbik asit gibi antioksidant moleküller ile katalaz, askorbat peroksidaz, glutasyon redüktaz, glutasyon S-transferaz ve guaiakol peroksidaz gibi çok sayıda enzimler sentezlerler.

Kadmiyum birikiminin yumru köke sahip ve yaprağı yenen sebzelerde diğer bitki türlerine göre daha yüksek olduğu bilinmektedir. Buna göre, salatalık, ıspanak, kereviz ve lahananın yüksek düzeyde; mısır, fasulye ve bezelyenin ise düşük düzeyde Cd biriktirme yeteneğine sahip olduğu bildirilmiştir (Davis ve Calton-Smith, 1980). Bitkilerde en yüksek kadmiyum birikiminin marul, ıspanak ve kırmızı turpta olduğu bulunurken (Giordano ve Mays, 1977), başka bir çalışmada ise birikimin marul, kırmızı turp, pancar ve ıspanak şeklinde olduğu bildirilmiştir (Shariat ve Farshi, 1997).

ıspanak, iki yıllık, kazayaklılar (Chenopodiaceae) familyasına ait bir bitkidir. Kökeninin Asya olduğu, Kafkasya yoluyla Batıya geçtiği ve Türkiye'ye Afrika'dan geldiği bildirilmektedir. ıspanak, kışı yumuşak geçen yerlerde iyi yetişir. Gevşek bünyeli, tınlı-killi topraklar ıspanak tarımı için uygundur. ıspanak toprak asitliğine karşı hassastır ve pH'nın 6.0-7.0 düzeyinde bulunmasını ister (Kütevin ve Türkeş, 1994).

Bitkilerdeki kadmiyum birikimi ile bitkilerin beslenme düzeyleri arasında önemli ilişkiler olduğu bulunmuştur (Turner, 1973; Haghiri, 1974; Jarvis ve ark.,

1976; Wallace, 1982; Cataldo ve ark., 1983; Thys ve ark., 1991; Pankovic ve ark., 2000; Tlustos ve ark., 2006; Matusik ve ark., 2008; Liu ve ark., 2008). Araştırmalar, bitkilerin potasyum beslenme düzeyi ile değişik çevresel stress faktörlerden etkilenme derecesi arasında ilişkiler olduğunu ortaya koymuştur. Bu bağlamda, tuzluluğa bağlı oksidatif stresin azaltılmasında potasyum beslenmesinin önemli olduğu bulunmuştur (Shen ve ark., 2000). Çeltikte demir toksisitesinin azaltılmasında potasyum uygulamalarının olumlu etkide bulunduğu bildirilmiştir (Li ve ark., 2001). Potasyum uygulamasıyla patatesin soğuk stresinden daha az etkilendiği tespit edilmiştir (Grewal ve Singh, 1980). Kuraklığa bağlı verim kayıplarının azaltılmasında da potasyum beslenmesi kritik bir role sahip olmuştur (Abd El-Hadi ve ark., 1997). Potasyum beslenmesinin iyileşmesiyle yüksek ışık intensitesine bağlı fotooksidatif zararlanmanın azaldığı bildirilmiştir (Marschner ve Çakmak, 1989). Son yıllarda yapılan çalışmalarla, bitkilerin potasyum beslenmesi ile kadmiyum birikimi / toksisitesi arasında ilişkiler olduğu ve potasyum beslenmesinin iyileştirilmesi – arttırılması ile kadmiyuma bağlı zararlanmanın, özellikle de oksidatif zararlanmanın azaltılabildiği bildirilmiştir (Umar ve ark., 2008).

Bu tez çalışmasıyla, literatürde çok az incelenmiş olan, Cd toksisitesi x K beslenmesi ilişkileri su kültürü koşullarında oksidatif stres açısından yaprağı tüketilen bir sebze, ıspanakta (*Spinacia oleracea* L.) araştırılmıştır.





## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

### 2.1. Toprakta ve Bitkide Kadmiyum

Ağır metallere bağlı çevre kirlenmesi 19. yüzyılın sonları ile 20. yüzyılın başlarında madencilik ve endüstriyel aktivitelerle birlikte artmaya başlamış ve problemin boyutu günümüzde daha da önemli bir noktaya gelmiştir. Bakır (Cu), Kadmiyum (Cd), Kurşun (Pb) ve Civa (Hg) gibi metallerin üretimi önemli boyutlardadır (Pinto ve ark., 2004). Söz konusu ağır metallere Cd, son yıllarda giderek artan bir şekilde araştırmalara konu olmuştur. Özellikle de toprak ve bitkilerde kadmiyumun birikimi ve kadmiyumun insan sağlığına olan olumsuz etkileri öncelikli araştırma konuları içerisinde yer almaktadır. Kadmiyumun yüksek konsantrasyonları bitki, hayvan ve insanlara toksik etki göstermektedir (Marschner, 1995). Topraklardaki Cd düzeyi doğal koşullarda çok düşük düzeydedir. Ancak, çeşitli antropojenik kaynaklar yoluyla toprağa Cd girişi olabilmektedir. Endüstriyel emisyonlar, belirli düzeyde Cd içeren sulama sularının kullanımı, kanalizasyon atıklarının tarım arazilerine uygulanması ve gübre kullanımı, toprakların Cd içeriğinde artışa yol açmaktadır. Toprağa ulaşan kadmiyumun % 54-58'i fosforlu gübrelere, % 39-41'i atmosferik depolanmadan, % 2-5'i ise atık çamur ve çiftlik gübresi uygulamalarından kaynaklanmaktadır (Yost ve Miles, 1979). Arıtma çamurunun toprağa karıştırılabilmesi için Cd sınır değerinin 10 ppm'in altına indirilmesi gerekmektedir (Özbek ve ark., 1995). Toprakların gübreleme yoluyla Cd konsantrasyonunun yükselmesinde özellikle fosforlu gübreler etkili olmaktadır. Fosforlu gübre üretiminde kullanılan ham fosfat kayalarında bulunan Cd'un % 70-80'i gübre yapımında kullanılan ürünlere geçmektedir (Gorecki, 2004). Çeşitli ülkelerde çıkartılan kaya fosfatların Cd konsantrasyonları 0.3-84 mg kg<sup>-1</sup> arasında dağılım göstermektedir (Mengel ve Kirkby, 1987). Yoğun ve sürekli olarak Cd içeren fosforlu gübrelere kullanılması zamanla topraklarda Cd'un birikimine neden olmaktadır. Söz konusu alanlarda yetiştirilen ürünlerde de Cd konsantrasyonları yüksek çıkabilmektedir. Nitekim, uzun yıllar buğday üretimi yapılan alanlardaki

buğdayların tane Cd düzeylerinin 1910 yılında 5-25 ppb iken 1970 yılında bu değer 56-76 ppb düzeyine ulaştığı bildirilmiştir (Anderson ve Bingefors, 1985).

Tarım toprakları için müsaade edilebilir Cd konsantrasyonu  $3 \text{ mg kg}^{-1}$  olup, normalde  $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$  düzeyindedir (Alloway, 1995). Yapılan tarama çalışmalarıyla, dünya tarım topraklarının ortalama Cd konsantrasyonunun  $0,53 \text{ mg kg}^{-1}$  olduğu ve söz konusu Cd konsantrasyonunun  $0,01-2,7 \text{ mg kg}^{-1}$  arasında değiştiği ortaya konmuştur (Kabata-Pendias ve Pendias, 1992). Çin'deki tarım topraklarının % 20'sinin ( $2,48 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ) ağır metallerce kirlenmiş olduğu ve bunun  $1,3 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 'sinden fazlasının da Cd'la ilişkili olduğu bildirilmiştir (Gu ve Zhou, 2002; Du, 2005).

Topraktaki yüksek miktardaki kadmiyum varlığı, bitkilerde büyümede, özellikle de kök büyümesinde gerilemelere (Weigel ve Jager, 1980) ve de mineral beslenmede ve karbonhidrat metabolizmasında düzensizliklere (Moya ve ark., 1993) yol açmaktadır. Kadmiyuma bağlı büyümedeki gerileme, fotosentez olayı ve klorofil içeriğindeki azalmadan dolayı karbon fiksasyonunun engellenmesine bağlı olarak açıklanabilir (Hassan ve ark., 2005).

Bitkilerde kadmiyum birikimiyle ilgili çoğu önemli çalışmalar özellikle de tahıllar üzerine, örneğin; çeltik, buğday ve mısır üzerine yoğunlaşırken (Yu ve ark., 2006; Amar ve ark., 2007; Wang ve ark., 2007); sebzelerde Cd birikimiyle ilgili daha az çalışma yapıldığı bildirilmiştir. Ancak son yıllarda, yaprağı tüketilen sebzelerde Cd birikimi konusuna özel bir önem vermeye başlanmıştır. Kadmiyum birikiminin yumru köke sahip ve yaprağı yenen sebzelerde diğer bitki türlerine göre daha yüksek olduğu bilinmektedir. Davis ve Calton-Smith (1980) tarafından bildirildiğine göre, salatalık, ıspanak, kereviz ve lahana yüksek düzeyde; mısır, fasulye ve bezelye ise düşük düzeyde Cd biriktirme yeteneğine sahiptir. Alloway (1995)'e göre, dokularında 3 ppm'den fazla Cd içeren bitkilerin düzenli olarak tüketilmesi sonucu, insanlarda Cd'un zararlı etkileri görülmektedir. İnsanlara kadmiyum alımının-geçişinin % 70'ten fazlasının sebzeler yoluyla olduğu bildirilmiştir (Ryan ve ark., 1982). Kadmiyuma bağlı olarak insanlarda yoğun bir şekilde görülen sağlık problemlerinin başında akciğer, karaciğer, böbrek rahatsızlıkları, görme bozukluğu, kansızlık ve yüksek tansiyon gelmektedir. Dünya

sağlık örgütü ve FAO, tahıl kökenli gıdalar için izin verilebilir maksimum Cd konsantrasyonunu 100 ppb olarak tartışırken, Avustralya, birçok üründe Cd konsantrasyonu için sınır değerler vermiştir. Örneğin, patates için taze ağırlıkta olmak üzere 50 ppb'yi; tahıl kökenli gıdalarda ise kuru ağırlıkta 50 ppb'yi maksimum kabul edilebilir sınır olarak açıklamıştır (Grant ve ark., 1998).

Ispanak ve marul gibi yaprağı tüketilen sebzelerdeki ağır metal birikimini konu alan çeşitli araştırmalar bulunmaktadır (Zurera ve ark., 1987; Michalska ve Asp, 2001; Chunilall ve ark., 2004; Farooq ve ark., 2008; Sidhu ve Khurama, 2010; Sani ve ark., 2011). Çoğu bitkinin yeşil aksamındaki 5-10 µg Cd g<sup>-1</sup> KA'tan daha fazla fazlasının, bazı Cd biriktiren bitkiler dışında, toksik olduğu bildirilmiştir (Reeves ve Baker, 2000; Broadley ve ark., 2001; Verbruggen ve ark., 2009). Ispanak, topraktaki Cd konsantrasyonundan olumsuz şekilde etkilenen birçok bitki içinde en hassas bitki olarak görülmektedir (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1. Bitki veriminde % 25 azalmayla ilişkili toprak ve bitki dokusundaki Cd düzeyleri (Bingham, 1979).

Bitki Türü	% 25'lik verim azalmasına neden olan, topraktaki Cd konsantrasyonu (µg g <sup>-1</sup> )	% 25 verim azalması durumunda bitki dokusundaki Cd konsantrasyonu (µg g <sup>-1</sup> )	
		Yaprak	Yenebilir doku
Ispanak	4	75	75 (yaprak)
Soya fasulyesi	5	7	7.0 (tohum)
Kıvırcık tere	8	80	80 (yaprak)
Marul	13	48	70 (üst aksam)
Mısır	18	35	19 (tane)
Havuç	20	32	19 (yumru)
Şalgam	28	120	15 (yumru)
Bakla	40	15	1.7 (tohum)
Buğday	50	33	12 (tane)
Kırmızı turp	96	75	21 (yumru)
Domates	160	125	7.0 (meyve)
Sakız kabağı	160	68	10 (meyve)
Lahana	170	160	11 (üst aksam)
İsviçre pazısı	250	150	150 (yaprak)
Çeltik	>640	3.0*	2.0 (tane)

\*Bitkiler için maksimum değerler (640 µg Cd g<sup>-1</sup> toprak); verim azalması görülmemiştir.

Giordano ve Mays (1977), en yüksek kadmiyum birikiminin sırasıyla marul, ıspanak ve kırmızı turpta olduğunu bildirmiştir. Başka bir çalışmada ise birikimin marul, kırmızı turp, pancar ve ıspanak şeklinde olduğu bildirilmiştir (Shariat ve Farshi, 1997). Kadmiyuma hassas bitkilerden örneğin ıspanak, soya, kıvırcık tere ve marulun topraktaki 4-13 ppm kadmiyum düzeyinden etkilenip zararlandığı bulunurken, domates ve lahananın 170 ppm Cd'u tolere edebildiği bildirilmiştir (Bingham ve ark., 1975).

Bitki türleri topraktan ağır metalleri kaldırma ve biriktirme açısından farklı kapasitelerde olup araştırmalar göstermiştir ki, bazı türler, tüketildiğinde insan sağlığına önemli ölçüde zarar verebilecek düzeyde belirli ağır metalleri biriktirebilmektedirler (Wenzel ve Jackwer, 1999). Topraktan önemli oranda Cd alabilen ıspanağın, kadmiyumla kirlenmiş toprakların biyolojik yolla temizlenmesinde kullanılabilecek bir bitki olduğu bildirilmiştir (Salaskar, 2011). Metallerin bitkiler tarafından alımı, metalin topraktaki çözünürlüğü, toprak pH'sı, bitki büyüme dönemi, bitki türlerine, gübrelere ve toprağa göre değişebilmektedir (Ismail ve ark., 2005; Sharma ve ark., 2006). Bitkilerde Cd birikiminde toprak pH'sının en önemli faktör olduğu (Kirkham, 2006) ve de marulda yapılan bir çalışmada topraktan kadmiyum alımında ve bitkilerde biriktirilmesinde toprak pH'sının karar verici olduğu ve düşük toprak pH'sında yetişen bitkinin kadmiyum alımının daha yüksek olduğu (Lehoczky ve ark., 1998) bildirilmiştir.

Bitkilerde Cd birikiminin fotosentez, bitki-su ilişkileri, besin elementlerinin alımı ve taşınmasında olumsuzluklara yol açtığı ve bu durumun gözle görülebilir zararlanma belirtilerinin ortaya çıkmasıyla ve/veya ölümlerle sonuçlandığı bildirilmiştir (Sanita di Toppi ve Gabbrielli, 1999; Drazkiewicz ve ark., 2003; Hsu ve Kao, 2007; Anjum ve ark., 2008). Bitkilerde Cd toksitesinin, özellikle de Calvin döngüsüne ve klorofil biyosentezine katılan fotosentetik enzimlerin etkinliklerini engelleyerek fotosentez üzerinde olumsuz etkilere neden olduğu gösterilmiştir (Van Assche ve Clijsters, 1990; Krupa ve ark., 1993; Chugh ve Sawhney, 1999). Aynı zamanda, Cd birikiminin oksidatif strese neden olduğu (Qadir ve ark., 2004; Tiryakioğlu ve ark., 2006; Anjum ve ark., 2008a, b) tespit edilmiştir.

Kadmiyum uygulamasının makarnalık buğdayın yeşil aksam ve kökünde K, Zn ve Mn konsantrasyonlarını azalttığı, buna karşın Fe ve Cu konsantrasyonlarının bu uygulamadan etkilenmediği bildirilmiştir (Jalil ve ark., 1994). Türkiye’de, 2000-2001 yıllarında yapılan sörvey çalışmasında buğday, patates, turunçgil, turp ve marulda Cd birikimi araştırılmıştır. Bu araştırma sonunda Hatay ilindeki marul örneklerinin % 20’sinde çeşitli gıda ürünleri için kritik sınır Kabul edilen 50 ppb’den yüksek Cd değerleri bulunmuştur. 2001 yılı verilerine göre ise Adana ve Mersin illerinden alınan marul örneklerinde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Misli Ovasında yetiştirilen patateslerde de Cd birikiminin olduğu, bu birikimin iki yılın ortalaması olarak % 50 düzeyinde olduğu anlaşılmıştır. Yapılan çalışmalar yaprağı yenen sebzelerde Cd birikiminin daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur.

Moustakas ve ark. (2001), artan kadmiyum uygulamasının verime ve bitkinin yenilebilir kısımlarındaki Cd konsantrasyonuna etkisini araştırmak için sera koşulları altında marul, turp ve salatalık üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalarda bitkiler 0,1, 5, 10 ve 20 mg kg<sup>-1</sup> Cd uygulamalarında yetiştirilmiştir. Hiçbir bitkide toksik etki belirlenememesine rağmen deneme materyali bitkilerinin yenilebilir kısımlarının Cd konsantrasyonu Cd uygulamaları ile artmıştır. Cd birikimi marul ve salatalığın yenilebilir kısımlarında ortaya çıkmıştır ve dış yapraklar iç yapraklara göre % 5-43 daha fazla Cd biriktirmiştir.

Topraktaki yüksek tuzluluk veya klor da bitkilerde Cd birikimini arttırabilmektedir (Bingham ve ark., 1984; Li ve ark., 1994; McLaughlin ve ark., 1994, 1997; Smolders ve McLaughlin, 1996; Grant ve ark., 1998; Weggler-Beaton, 2000; Özkutlu, 2004).

Türler arasında kadmiyum alımı açısından genetik çeşitlilik olduğu soya fasulyesinde (Bogess ve ark., 1978), mısırdaki (Hinesly ve ark., 1982), marulda (Thomas ve Harrison, 1991) bulunurken; aynı türün çeşitleri arasında da farklılık olduğu makarnalık buğdayda (Tahvonen ve Kumpulainen, 1993) ve arpada (Wu ve Zhang, 2002) ortaya konmuştur. Makarnalık buğdaylar ekmeclik buğdaylara göre tanesinde daha fazla Cd biriktirebilmektedirler (Köleli, 1998).

Kadmiyum uygulamasına bağlı olarak Cd konsantrasyonunun bezelyenin yeşil aksam ve kökünde arttığı bildirilmiştir (Sandalio ve ark., 2001). Aynı

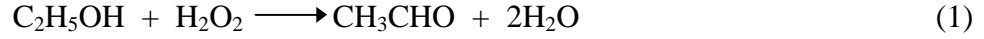
çalışmada, kadmiyum uygulamasına bağlı olarak yeşil aksamda, yüksek dozlarda da kökte K konsantrasyonu azalmıştır. Kadmiyuma bağlı olarak ATPaz aktivitesindeki azalma, birçok elementin alımında veya dışlanması belirleyici bir faktör olabilir. Kadmiyumun ATPaz'dan başka, membran proteinleriyle, örneğin K-kanallarıyla ve fosfolipidlerdeki fosfatlarla reaksiyona girebildiği ve plazma membran komponentleriyle Cd arasındaki bu reaksiyonların bitki köklerinde kadmiyum toksisitesinin oluşmasında rol oynadığı bildirilmiştir (Obata ve Umebayashi, 1997). Bitkiler, kadmiyum toksisitesine karşı hücre düzeyinde; immobilizasyon, kabul etmeme (dışlama), fitoşelatin sentezi, belli bölgelerde tutma, metalloproteinlerin sentezi, stres proteinlerinin sentezi ve etilen üretimi gibi değişik savunma sistemleriyle reaksiyon gösterebilirler (Sanita di Toppi ve Gabbrielli, 1999).

## 2.2. Bitkilerde Reaktif Oksijen Türevlerinin Oluşumu ve Detoksifikasyonu

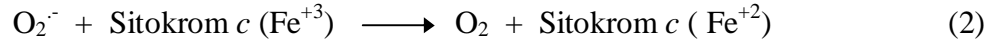
Abiyotik stres faktörlerinde bitkilerde karbon metabolizması ve elektron transport aktivitesi sınırlanmakta ve bozulmaktadır (GuetaDahan ve ark., 1997; Sreenivasulu ve ark., 2000). Fotosentez sırasında absorbe edilen ışık enerjisi ve açığa çıkan elektronlar herhangi bir stres sonucu CO<sub>2</sub> indirgenmesinde kullanılamamasına bağlı olarak kloroplastlarda birikmektedir. Fotosentetik kaynaklı bu elektronlar ve pigmentlerce absorbe edilen bu enerji, CO<sub>2</sub> yerine moleküler O<sub>2</sub>'e aktarılarak toksik etkinlikleri çok yüksek olan O<sub>2</sub> radikal ve türevlerinin (O<sub>2</sub><sup>-</sup>, süperoksit radikal; H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, hidrojen peroksit; OH<sup>-</sup>, hidroksil radikal ve <sup>1</sup>O<sub>2</sub>, singlet oksijen oluşmasına yol açmaktadır (Asada, 1994; 2000; Foyer ve ark., 1994; Cakmak, 2000). Hücrede özellikle membran lipid ve proteinleri ile klorofil ve DNA gibi önemli hücre komponentlerinin oksidatif olarak parçalanması, doğrudan serbest O<sub>2</sub> radikallerince katalize edilmektedir. Toksik oksijen radikallerinin oluşumu ile ilgili detaylı bilgiler aşağıda sunulmuştur.

Süperoksit Radikal (O<sub>2</sub><sup>-</sup>) Üretimi: Moleküler oksijenin ışığa bağlı indirgenmesi ilk olarak 1951'de Mehler tarafından ortaya konmuştur. Bu çalışmada, kloroplastlar, katalaz ve etanolün varlığında aydınlatıldığında, reaksiyon ürünü olarak

asetaldehitin oluşmuştur (Reaksiyon 1). Bu reaksiyonda katalazın peroksidatif aktivitesi etanolü asetaldehite oksitlemektedir. Bu noktadan hareketle, kloroplastlardaki moleküler oksijenin ışığa bağlı indirgenmesi ile hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ )' in üretildiği tespit edilmiştir.



Bitkilerde oksijenin indirgenmesine bağlı olarak ortaya çıkan ilk ürünün, süperoksit radikal üretiminin 1970'li yıllarda keşfine kadar, hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ) olduğu düşünülmekteydi. Süperoksit dismutaz enzimi vasıtasıyla, süperoksit radikalinin ( $O_2^-$ ), tilakoidlerdeki oksijen fotoredüksiyonunun ilk ürünü olduğu ortaya konmuştur. Bu bağlamda, sitokrom c'nin süperoksit dismutaz-hassas fotoredüksiyonu süperoksit radikal üretimine kanıt oluşturmuştur (Asada ve ark., 1974) (Reaksiyon 2).



Tilakoidlerdeki süperoksit üretimini belirlenebilmesiyle ilgili yapılan çalışmalarda, askorbat, sülfid,  $Mn^{+2}$ , epinephrin, hidroksilamin ve tiron gibi bileşiklerden faydalanılmıştır. Ayrıca, elektron spin rezonans (ESR) teknikleri aracılığıyla süperoksitle bileşik yapan moleküller (örneğin, Tiron) yardımıyla süperoksit üretimi saptanmıştır (Asada ve Takahashi, 1987; Hodgson ve Raison, 1991). Asada ve ark. (1977)'na göre, normal koşullar altında (stresin olmadığı durumda) fotosentetik elektron taşınması sırasında açığa çıkan elektronların yaklaşık % 10'unun  $O_2$  redüksiyonu, yani  $O_2^-$  üretimi için kullanılmaktadır.

Hidrojen Peroksit ( $H_2O_2$ ) Üretimi: Hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ), süperoksit radikalinin yok edilmesiyle, kendiliğinden veya süperoksit dismutazın katalitik etkisiyle oluşmaktadır (Reaksiyon 3).





Süperoksit radikalinin detoksifikasyonundan sorumlu enzim süperoksit dismutazdır. Ayrıca, süperoksit radikalinin askorbat, tiyol, ferredoksin ve  $Mn^{+2}$  iyonları tarafından redüksiyonu sırasında da, reaksiyon 4'te görüldüğü gibi, hidrojen peroksit oluşmaktadır.

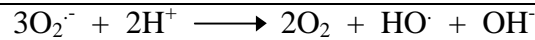
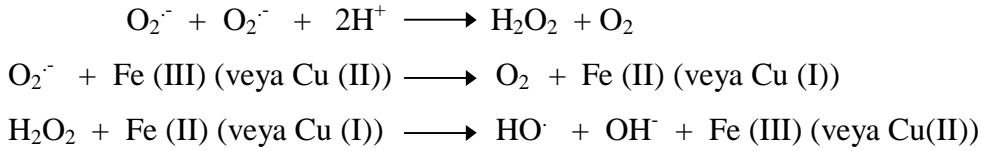


Bitki hücrelerinde oluşan  $H_2O_2$ 'in büyük bir kısmının süperoksit radikalinin dismutasyonu ile üretildiği bildirilmiştir. Fotorespirasyon sırasında da yüksek miktarda  $H_2O_2$  oluştuğu açıklanmıştır (Asada ve ark., 1977).

Hidroksil Radikal ( $HO^{\cdot}$ ) Üretimi: Reaksiyon 5 ve 6'ya göre, su, iyonize edici radyasyon veya ultraviyole ışıkla aydınlatıldığında, başlıca iyonizasyon ürünlerinden biri olarak  $OH^{\cdot}$  üretilmektedir.



Diğer organellerde olduğu gibi, kloroplastlarda da hidroksil radikalinin doğrudan üretimi tespit edilmemiştir. Aşağıda gösterildiği gibi, hücredeki  $OH^{\cdot}$  en önemli sentez kaynağı, metallerce katalizlenen Haber-Weiss reaksiyonudur.



Haber-Weiss reaksiyonuna göre, süperoksit radikali  $H_2O_2$ 'in kaynağı ve aynı zamanda Fe(III) ve Cu(II)'nin indirgeyicisi olmakta ve  $OH^{\cdot}$  radikalinin sentezinde belirleyici rol üstlenmektedir (Baker ve Gebicki, 1984).

Yukarıdaki reaksiyonlara ek olarak, hidroksil radikalleri Fenton reaksiyonu ile de oluşabilmektedir.



Özet olarak,  $\text{OH}\cdot$ , hidrojen peroksit ve süperoksit radikali arasındaki reaksiyon sonucu oluşmakta ve ilgili bu reaksiyon indirgenmiş metallere hızlandırılmaktadır.

Singlet Oksijen ( $^1\text{O}_2$ ) Üretimi : Singlet  $\text{O}_2$ , ışık enerjisinin klorofilce absorbe edilmesiyle meydana gelen aktif triplet klorofil ( $^3\text{Klo}^*$ ) molekülünün, absorbe ettiği enerjiyi moleküler  $\text{O}_2$ 'e aktarmasıyla oluşmaktadır. Bununla birlikte, ışık altındaki kloroplastlarda singlet  $\text{O}_2$ 'e doğrudan rastlanmadığı bildirilmiştir. Asada ve Takahashi (1987)'e göre bu durum, kloroplastlarda singlet oksijen oluşumunun sıkı bir şekilde kontrol edilmesinden kaynaklanmaktadır. Singlet oksijen üretilse bile saptanmasının zor olduğu ve bunun nedenlerinin ise, sulu ortamdaki çok kısa ömrü, çevresindeki moleküllerle yüksek reaktivitesi ve üretildiği yerdeki tilakoid membranlarındaki yok edicilerin (karotenoidlerin) varlığı olduğu bildirilmiştir. Bununla birlikte, tilakoid membranlarında yüksek konsantrasyonlarda karotenoidlerin varlığı tilakoidlerde singlet  $\text{O}_2$  üretimi olduğunu gösteren ikincil bir kanıt olarak kabul edilmektedir (Asada ve Takahashi, 1987).

Bitkiler, enzimatik ve enzimatik olmayan çeşitli savunma mekanizmaları yoluyla stres koşullarında ortaya çıkan serbest  $\text{O}_2$  radikallerini detoksifike etmeye çalışmaktadırlar. Söz konusu enzimatik mekanizmalardan süperoksit dismutaz (SOD) süperoksit radikali ( $\text{O}_2^-$ )'nin  $\text{H}_2\text{O}_2$  ve  $\text{O}_2$ 'ye dismutasyonunu katalizleyerek (Bowler ve ark., 1992; Scandalious, 1993; Cakmak ve ark., 1993; Cakmak, 1994), süperoksit konsantrasyonunun düşük ve sabit konsantrasyonlarda kalmasını sağlamaktadır. Askorbat peroksidaz (APX) ve glutatyon redüktaz (GR) ise birlikte  $\text{H}_2\text{O}_2$ 'nin detoksifikasyonunda belirleyici rol üstlenmektedir (Halliwell, 1982; Polle, 1996; Cakmak ve ark., 1993; Cakmak, 1994).

Hidrojen peroksit ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), katalaz ve peroksidaz enzimleri tarafından yok edilmektedir (Asada, 1992; Scandalious, 1994). Buna karşın, kendi substratına karşı

çok zayıf bir afiniteye sahip olmasından, ışığa bağlı inaktivasyona karşı duyarlı olmasından ve de yalnızca peroksizomlarda bulunmasından dolayı katalazın koruyucu etkisi sınırlanır (Eltner, 1987; Foyer ve ark., 1994). Bu nedenle,  $H_2O_2$ 'in birikimini ve zararlı etkilerini azaltmak için daha etkin olan enzimatik mekanizmalara gereksinim vardır. Hidrojen peroksit doğrudan Calvin döngüsünün tiyol içeren enzimlerinin oksidasyonunda ve böylelikle fotosentezin engellenmesinde etkili olmaktadır (Tanaka ve ark., 1982). Yukarıda ifade edildiği gibi,  $H_2O_2$ , güçlü bir oksidant olan  $OH^\cdot$ 'in üretiminden sorumludur. Bitki hücrelerinde hidrojen peroksite karşı hem kloroplastlarda hem de sitosolde çalışan ve “askorbat-glutasyon” döngüsü olarak ifade edilen etkin bir detoksifikasyon sistemi bulunmaktadır (Şekil 2.1). Bu sistemde,  $H_2O_2$  askorbat peroksidaz (APX) tarafından suya ( $H_2O$ ) indirgenmektedir (Asada ve Takahashi, 1987). Bu indirgeme olayında askorbat peroksidaz askorbik asiti kullanır ve monodehidro askorbat (MDA) oluşur. Askorbat peroksidazın izoenzimlerinin kloroplastlarda, sitosolde, peroksizomlarda ve mitokondride bulunduğu bildirilmiştir (Mittler ve Zilinskas 1991; Asada 1992; Jimenez ve ark. 1997).

Bu reaksiyonlar sisteminde (Şekil 2.1), monodehidroaskorbat veya dehidroaskorbattan indirgenmiş askorbatın regenerasyonu ya NADH bağımlı monodehidroaskorbat redüktaz, ya da GSH'a bağımlı dehidroaskorbat redüktaz tarafından katalize olabilmektedir (Smirnoff, 1993). Dehidroaskorbat redüktaz (DHA) yardımıyla askorbik asidin regenerasyonunda okside olan glutasyon (GSSG) glutasyon redüktaz (GR) enzimiyle yeniden indirgenmiş olan forma (GSH) dönüştürülür. Söz konusu reaksiyonda elektron kaynağı olarak NADPH kullanılır. Sonuç olarak, fotosentez sırasında önce  $O_2^\cdot$  ve daha sonra  $H_2O_2$ , APX, DHA (veya MDHA) ve GR enzimlerinin birlikteki aktiviteleriyle detoksifike edilmektedir.



redüktazın substratı olarak askorbik asitin dehidroaskorbattan rejenerasyonuna da katıldığı bildirilmiştir.

### **2.3. Kadmiyuma Bağlı Oksidatif Zararlanma ve Bitkilerin Potasyum Beslenmesi**

Bu çalışmaya konu ağır metallere kadmiyumun da bitkilerde aktif oksijen türevlerinin üretimine neden olduğu bildirilmiştir (Hendry ve ark., 1992; Foyer ve ark., 1997; Milano ve ark., 2003). Ancak, kadmiyum redoks aktif metallere (Cu, Fe vb) farklı olarak genellikle tek oksidasyon durumunda bulunan divalent bir metaldir. Bu yüzden, Fenton benzeri reaksiyonlarla toksik oksijen türevlerinin üretimini indükleyemez (Salin, 1988). Bunun yerine, kadmiyum bitkilerde fizyolojik olaylarda sorunlara yol açarak toksik oksijen radikallerini artırma ve lipid peroksidasyona yol açma gibi (Shaw, 1995; Gallego ve ark., 1996; Chaoui ve ark., 1997; Lozano-Rodriguez ve ark., 1997; Sanita di Toppi ve Gabrielli, 1999; Montillet ve ark., 2004; Tiryakioğlu ve ark., 2006; Sharma ve Dietz, 2009) dolaylı mekanizmalarla oksidatif strese neden olmaktadır.

Bitkiler, Cd'a bağlı olarak oluşan oksidatif strese karşı savunmada, yukarıda belirtildiği gibi enzimatik ve enzimatik olmayan savunma sistemlerini aktive edebilmektedirler. Antioksidatif enzimler ve belirli metabolitler stres periyodu boyunca bitkilerin yaşamlarını devam ettirebilmesinde ve adaptasyonunda önemli bir rol oynamaktadır (Dinakar ve ark., 2008). Kadmiyum uygulamaları antioksidatif enzimlerin aktivitelerini farklı şekilde etkileyebilmektedir. Örneğin, ayçiçeği yapraklarında kadmiyuma bağlı olarak lipid peroksidasyon düzeyi artarken, antioksidatif enzimlerden süperoksit dismutaz, katalaz, askorbat peroksidaz, glutatyon redüktaz ve dehidroaskorbat redüktaz aktivitelerinin azaldığı bildirilmiştir (Gallego ve ark., 1996). Başka bir çalışmada ise kadmiyum uygulamasına bağlı olarak süperoksit dismutaz aktivitesinin mısır ve ekmeklik buğdayda azaldığı bildirilmiştir (Zhao, 2011). Kadmiyum uygulamasına bağlı olarak, makarnalık buğdaylarda hem yeşil aksamda hem de köklerde kontrol bitkilerine göre SH-bileşikler düzeyinin arttığı bulunmuştur (Öztürk ve ark.,

2003). Kadmiyum toksisitesine hassas olan arpa çeşidinde artan Cd uygulamasına bağlı olarak yeşil aksamda SH-bileşikleri düzeyinin önemli oranda arttığı bulunmuştur (Tiryakioğlu ve ark., 2006). Antioksidatif enzimlerin aktivasyonu ya da engellenmesinde stresin yoğunluğu ve süresi ile birlikte bitki türü ve yaşı da etkili olmaktadır (Sgherri ve ark., 2001; Tiryakioğlu ve ark., 2006).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, besin elementlerinin bitkilerin ağır metalleri de içine alan değişik çevresel stres faktörlerinden korunmasında önemli bir role sahip olduğunu ortaya koymuştur (Çakmak ve Romheld, 1997; Çakmak, 2005; Anjana ve ark., 2006). Bu elementlerden biri de potasyumdur. Nitekim, hardal bitkisi ile yapılan bir çalışmada kadmiyuma bağlı oksidatif stresin azaltılmasında potasyum beslenmesinin önemli olduğu bulunmuştur (Umar ve ark., 2008). Ayrıca, potasyum beslenmesinin, tuzluluğa bağlı oksidatif stresin azaltılmasında (Shen ve ark., 2000), çeltikte demir toksisitesinin azaltılmasında (Li ve ark., 20001), patatesin soğuk stresinden daha az etkilenmesinde (Grewal ve Singh, 1980), kuraklığa bağlı verim kayıplarının azaltılmasında (Abd El-Hadi ve ark., 1997), yüksek ışık intensitesine bağlı fotooksidatif zararlanmanın azaltılmasında (Marschner ve Çakmak, 1989) etkili olduğu bildirilmiştir.

Potasyum, bitkilerde metabolik, fizyolojik ve biyokimyasal işlevlere sahiptir: Potasyum, 60'dan fazla enzimi aktive eder, fotosentezi artırır, nişasta sentezini ve danede nişasta miktarını artırır, suyun ve besin elementlerinin taşınmasına yardım eder, fotosentez ürünlerinin taşınmasına ve depo edilmesine katkıda bulunur, bitkilerin protein düzeylerini artırır, turgor üzerinde düzenleyici rol oynar ve su yitmesi ve solmayı önler (Marschner, 1995). Bu özelliklere bağlı olarak bitki gelişmesi ve ürün kalitesi üzerinde potasyumun çok önemli görevler üstlendiğini söyleyebiliriz. Nitekim, potasyumun hem fotosentetik karbondioksit fiksasyon olaylarını hem de fotoasimilatların kullanımını güçlü bir şekilde kontrol altında tuttuğu kabul edilmektedir (Çakmak, 1994).

İki yıllık bir sorvey çalışması sonucunda, Çukurova bölgesinde Adana, Mersin ve Hatay illerinde yetiştirilen turuncgillerin K'ca beslenme düzeylerinin yetersiz ve bu oranın illerin ortalaması bazında % 72.3 olduğu bulunmuştur (Torun ve ark., 2005). Söz konusu iller bazında ise K'ca yetersiz beslenme açısından ciddi

farklılıklar olduğu bildirilmiştir. Bitki çeşitlerine göre gübre kullanımının araştırıldığı bir çalışmada, K'lu gübre kullanımının N ve P'lu gübrelere göre çok düşük düzeyde olduğu bulunmuştur. Aynı çalışmada sebzeler için yıllık N kullanımının 62000 ton, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> kullanımının 25000 ton ve K<sub>2</sub>O kullanımının da 9000 ton olduğu bildirilmiştir (Kacar ve Katkat, 1999).

Gerek gübre gereksinimleri belirlenmeden yapılan gübrelemeler sonucu ve gerekse yıllar önce yapılan çalışmaların kaynak gösterilmesinden dolayı, ülkemiz topraklarının genellikle potasyumca zengin olduğuna inanılmakta ve bu durum günümüzde de devam etmektedir. Ancak, yapılan çalışmalar, birim tarım arazisi miktarına göre tüketilen K<sub>2</sub>O miktarının toplam azotlu ve fosforlu gübrelerin % 5'inden daha düşük olduğunu göstermiştir (Kacar, 2005). Bu dengesizlikler, bir yandan fosforlu gübre tüketimiyle Cd'un toprağa girişine yol açabilirken, diğer yandan bu alanlarda yetersiz potasyum beslenmesi sonucu bitkilerde Cd birikiminin teşvik edilmesi riskini doğurmaktadır.

Bu çalışmada, ıspanak bitkisinde kadmiyum toksisitesine bağlı oksidatif zararlanmanın azaltılmasında potasyumun rolü araştırılmıştır. Bu kapsamda, potasyum beslenmesinin yeşil aksam ve kökte kadmiyum birikimine olan etkileri de ortaya konulmuştur.

### 3. MATERYAL VE METOD

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Bitki Materyali

Bu tez çalışması Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü kontrollü bitki yetiştirme odaları ve bitki besleme laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Su kültürü denemelerinde, Bahçe Bitkileri Bölümü'nden sağlanan Matador isimli ıspanak çeşidi kullanılmıştır.

#### 3.2. Metod

##### 3.2.1. Tohum Çimlendirme ve Su Kültürü Denemesinin Yürütülmesi

İspanak tohumları, içerisinde perlit bulunan 40x25x5 cm boyutlarındaki küvetlere ekilmiş ve 26 °C'de 4-5 gün boyunca çimlenmeye bırakılmıştır. Çimlenmeden sonra elde edilen bitkiler daha sonra perlit ortamından çıkarılarak su kültürü saksılarına her saksıda 6 bitki olacak şekilde aktarılmıştır. İlerleyen dönemde saksıdaki bitki sayısı 2'ye indirilmiştir. Bitkiler su kültürü ortamında yetiştirilirken konsantrasyonları; 2.0 mM Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>; 0.88 mM K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 1.0 mM MgSO<sub>4</sub>; 0.2 mM KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>; 1.0 µM H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>; 0.5 µM MnSO<sub>4</sub>; 0.2 µM CuSO<sub>4</sub>; 0.02 µM (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>; 1.0 µM ZnSO<sub>4</sub>, 100 µM M Fe-EDTA olan besin çözeltisi kullanılmıştır.

Bitkilerin hava ihtiyacı ise elektrikli hava motoru ve silikon hortum aracılığıyla tüm saksılara 24 saat hava verecek şekilde sağlanmıştır. Bitkilerin bulunduğu ortamın sıcaklığı gündüz (16 saat) 24°C'de, gece (8 saat) 22 °C'de ve oransal nem düzeyi ise % 65-75'de tutulmuştur. Gündüz koşullarında iklim odasının ışık intensitesi 350 µmolm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> düzeyine ayarlanmıştır. Kadmiyum uygulamasına, bitkiler su kültürü ortamına transferden itibaren 16. günden sonra başlamıştır. Sekiz gün süreyle 20 µM Cd (3CdSO<sub>4</sub>.8H<sub>2</sub>O formunda) uygulamasına maruz bırakılmıştır. Bu sürenin bitiminde bitkiler içinde 0.5 mmol L<sup>-1</sup> CaSO<sub>4</sub> içeren ve havalandırılan



saksılara aktarılmış ve 15 dk bekletilmiştir. Ardından bitkilerden amaca yönelik örneklemeler yapılmıştır. İki grup şeklinde yürütülen denemede, birinci gruptaki bitkiler kuru madde üretiminin ve de Cd ile K konsantrasyonlarının araştırılması için; ikinci gruptaki bitkiler ise klorofil konsantrasyonu, lipid peroksidasyonu, çözünür protein konsantrasyonu, antioksidantlar ve antioksidatif enzim testlerinde kullanılmıştır.

### 3.2.2. Laboratuvar Çalışmalarının Yürütülmesi

**Yeşil Aksam ve Kök Kuru Ağırlıkları:** Kadmiyum uygulamasının ardından beklenen simptomlar ortaya çıktıktan sonra bitkilerin yeşil ve kök aksamaları hasat edilerek ilgili örnekler kuru ağırlıklarının belirlenmesi için etüvde 70 °C'de 48 saat kurutulmuştur.

**İyon Analizleri :** Etüvde 48 saat süresince kurutulmuş bitki örnekleri agat değirmende öğütülmüş ve öğütülen bu örneklerden 0.2 g alınarak mikrodalga yağ yakma setinde yakılmış ve elde edilen süzükte potasyum ve kadmiyum konsantrasyonları ICP cihazında ölçülmüştür.

**Klorofil Analizi :** Taze yaprak örneklerinden yaklaşık 0.1 g alınarak, seramik havan içerisinde 10 ml % 80'lik aseton içerisinde homogenize edilmiştir. Bu işlemin ardından örnekler kaba filtre kağıdı ile süzülmüş, elde edilen süzüklerin spektrofotometrede 652 nm dalga boyunda absorbanları belirlenmiştir (Wellburn, 1994).

**Lipid Peroksidasyonu :** Lipid peroksidasyonu ölçümü Hodges ve Ark. (1999)'na göre yapılmıştır. Bu amaçla yaklaşık 1 gram taze yaprak / kök örneği % 80'lik etil alkol içinde ekstrakte edilmiştir ve ardından ekstrakt santrifüj (3000 g'de) edilmiştir. Santrifüjden sonra analiz iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, santrifügattan alınan 1 birimin üzerine 1 birim % 20'lik (ağırlık / hacim) TCA (Trichloroacetic acid) ve 1 birim de % 0.01'lik BHT (Butylated Hydroxytoluene) ilave edilmiştir. İkinci aşamada, santrifügattan alınan 1 birim üzerine 1 birim, içinde % 0.65 TBA (2-Thiobarbituric acid) içeren % 20'lik TCA ve bunun da üzerine 1 birim % 0.01'lik BHT ilave edilmiştir. Daha sonra karıştırıcıda karıştırılan bu

örnekler 95 C'de su banyosunda 25 dakika bekletilip ve ardından şok soğutma yapılmıştır. Soğutulan örnekler tekrar 3000 g'de santrifüj edilmiştir. Birinci aşama örneklerinde 532 ve 600 nm'de, ikinci aşama örnekleri ise 532, 600 ve 440 nm'de spektrofotometre aletinde okuması yapılmıştır. Sonuçlar aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır (ABS : Absorbans).

- 1)  $[(ABS\ 532_{+TBA})-(ABS\ 600_{+TBA})-(ABS\ 532_{-TBA})-(ABS\ 600_{-TBA})] = A$
- 2)  $[(ABS\ 440_{+TBA}-ABS\ 600_{+TBA}) \times 0.0571] = B$
- 3)  $nmol\ MDA / ml = (A-B / 157\ 000) \times 10^6$

**Askorbik Asit:** Askorbik asit analizleri Çakmak ve Marschner (1992) tarafından bildirildiği gibi yapılmıştır. Yöntemin esası, ortama katılan  $Fe^{+3}$  'ün askorbik asit ile  $Fe^{+2}$  'nin bipyridin ile komplekslenerek 525 nm'de ölçümüne dayanmaktadır. Askorbik asit ekstraksiyonu % 5'lik meta-fosforik asit ile hazırlanmıştır.

**SH-Grupları (Glutatiyon):** SH-grubu analizleri, % 5'lik meta-fosforik ekstraksiyonunda DTNB (5-5'-ditiyobis-Z-benzoik asit) reagenti kullanılarak Çakmak ve Marschner (1992)'de belirtildiği gibi yapılmıştır.

**Çözünür Protein:** Çözünür protein analizi Bradford (1976)'a göre yapılmıştır. Buna göre, 100 mg coomasie brilliant blu (G 250) 50 ml etil alkol (%99.5) içerisinde çözündürülüp ve üzerine 100 ml %85'lik ortofosforikasit ilave edilerek, bu karışım saf su ile 600 ml'ye tamamlanarak kaba filtre kağıdıyla filtre edilmiştir. Daha sonra bu çözeltinin üzerine 100 ml gliserol (%87) eklenerek karışım saf su ile 1000 ml'ye tamamlanmıştır. Analiz aşamasında, 100 µl enzim santrifüjü üzerine 5 ml protein analiz çözeltisi ilave edildi ve ardından vortekslendi. Oluşan rengin absorbansı spektrofotometrede 595 nm'de ölçülmüştür. Protein analizinde standart olarak inek serum albumini kullanılmıştır.

**Antioksidatif Enzim Analizleri:** Yaklaşık 1 gram taze yaprak / kök örneği 1 mM EDTA içeren 50 mM fosfat tamponu içinde homogenize edilmiş ve ardından 15 000 g'de santrifüj edilmiştir. Santrifüjden sonra Çakmak ve ark. (1993) ve Çakmak (1994)'de verilen yöntemler kullanılarak superoksit dismutaz, askorbat peroksidaz,

glutasyon redüktaz, guaiakol peroksidaz ve katalaz aktiviteleri ölçülmüştür. Superoksit dismutaz aktivitesi, mavi tetrasolyum kloridin ışık altında  $O_2^-$  tarafından indirgenmesi yöntemine göre ölçülmüştür. Askorbat peroksidaz, 290 nm'de askorbatın oksidasyonu; glutasyon redüktaz 340 nm'de NADPH'nin oksidasyonu; guaiakol peroksidaz guaiakolün 470 nm'de oksidasyonu ve katalaz,  $H_2O_2$ 'nin 240 nm'de degradasyonu esas alınarak ölçülmüştür. Yöntemlerin ayrıntısı, Cakmak ve ark. (1993) ve Cakmak ve Horst (1991)'de verilmektedir.

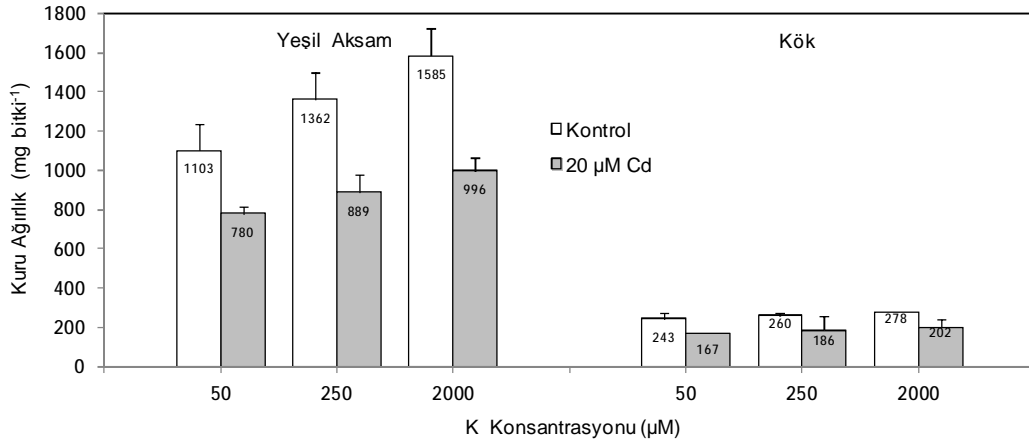
Denemeler tasadüf parselleri deneme desenine göre kurulmuştur. Dört paralelli olarak kurulan denemenin sonuçları ise ortalamalar ve standart sapmalar üzerinden değerlendirilmiştir.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 4.1. Araştırma Bulguları

#### 4.1.1. Yeşil Aksam ve Kök Kuru Madde Üretimi

İspanakta kadmiyum toksisitesine bağlı oksidatif stres üzerine potasyum beslenmesinin etkisinin araştırıldığı bu çalışmada 20  $\mu\text{M}$  kadmiyum uygulamasının yeşil aksam ve kök kuru madde üretiminde önemli düzeyde azalmalara neden olduğu görülmüştür. En düşük potasyum uygulaması altında (50  $\mu\text{M}$ ) yeşil aksam kuru madde üretiminin 1103 mg'dan 780 mg'a düştüğü bulunurken, 250  $\mu\text{M}$  potasyum uygulamasında 1362 mg'dan 889 mg'a ve yeterli (2000  $\mu\text{M}$ ) potasyum uygulamasında ise 1585 mg'dan 996 mg'a düştüğü bulunmuştur (Şekil 4.1). Kök kuru madde üretiminde ise 20  $\mu\text{M}$  kadmiyum uygulamasına bağlı olarak azalmaların potasyum beslenmesinin iyileşmesine bağlı olarak gerilediği görülmektedir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Değişik potasyum (50, 250 ve 2000  $\mu\text{M}$ ) ve kadmiyum (0 ve 20  $\mu\text{M}$ ) uygulamalarının su kültürü koşullarında 24 günlük ıspanak bitkisinin yeşil aksam ve kök kuru ağırlığı üzerine etkisi

#### 4.1.2. Yeşil Aksam ve Kök Kadmiyum ve Potasyum Konsantrasyonu

Kadmiyum uygulaması tüm potasyum dozlarında hem yeşil aksamda hem de köklerde, beklenildiği gibi, Cd konsantrasyonunun artmasına neden olmuştur (Çizelge 4.1). Köklerdeki Cd birikiminin yeşil aksama göre çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Yeşil aksamın Cd konsantrasyonu 50  $\mu\text{M}$  K dozunda 128  $\text{mg kg}^{-1}$  KA, 250  $\mu\text{M}$  K dozunda 120  $\text{mg kg}^{-1}$  KA ve 2000  $\mu\text{M}$  K dozunda ise 102  $\text{mg kg}^{-1}$  KA olmuştur. Bitkilerin K beslenmesinin iyileşmesi 20  $\mu\text{M}$  Cd uygulaması altında yeşil aksamın Cd konsantrasyonunu belirgin ölçüde düşürmüştür. Köklerin Cd konsantrasyonunda 50  $\mu\text{M}$  K dozuna göre diğer K dozlarında azalma eğilimi olduğu bulunmuştur (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Değişik potasyum (50, 250 ve 2000  $\mu\text{M}$ ) ve kadmiyum (0 ve 20  $\mu\text{M}$ ) uygulamalarının su kültürü koşullarında 24 günlük ıspanak bitkisinin yeşil aksam ve kök Cd konsantrasyonu üzerine etkisi

Potasyum Uygulaması	Kadmiyum Uygulaması	Cd Konsantrasyonu	
		Yeşil Aksam	Kök
(μM)		$\text{mg kg}^{-1}$ KA	
K <sub>50</sub>	Cd <sub>0</sub>	1.04 ± 0.01	2.16 ± 0.02
	Cd <sub>20</sub>	128 ± 9	995 ± 41
K <sub>250</sub>	Cd <sub>0</sub>	1.22 ± 0.00	1.73 ± 0.01
	Cd <sub>20</sub>	120 ± 8	917 ± 27
K <sub>2000</sub>	Cd <sub>0</sub>	0.75 ± 0.01	1.76 ± 0.13
	Cd <sub>20</sub>	102 ± 10	916 ± 23

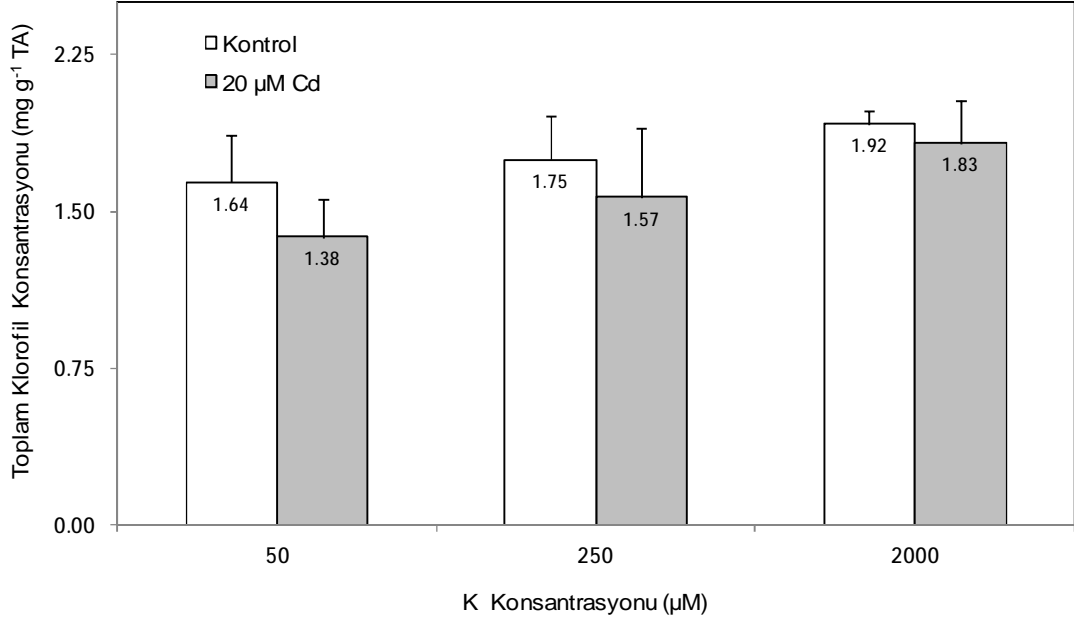
Artan K beslenmesinin hem yeşil aksam hem de köklerin K konsantrasyonunu arttırdığı bulunmuştur (Çizelge 4.1). Bu artış oranlarının Cd'un uygulanmadığı koşullarda 20  $\mu\text{M}$  Cd uygulamasına göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Tüm K dozlarında hem yeşil aksamda hem de köklerde Cd uygulaması K konsantrasyonunun önemli ölçüde azalmasına neden olmuştur (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2. Değişik potasyum (50, 250 ve 2000  $\mu\text{M}$ ) ve kadmiyum (0 ve 20  $\mu\text{M}$ ) uygulamalarının su kültürü koşullarında 24 günlük ıspanak bitkisinin yeşil aksam ve kök K konsantrasyonu üzerine etkisi

Potasyum Uygulaması	Kadmiyum Uygulaması	K Konsantrasyonu	
		Yeşil Aksam	Kök
(μM)		%	
K <sub>50</sub>	Cd <sub>0</sub>	2.92 ± 0.04	1.42 ± 0.07
	Cd <sub>20</sub>	2.09 ± 0.22	1.09 ± 0.17
K <sub>250</sub>	Cd <sub>0</sub>	5.79 ± 0.05	2.28 ± 0.29
	Cd <sub>20</sub>	4.02 ± 0.12	2.05 ± 0.07
K <sub>2000</sub>	Cd <sub>0</sub>	8.72 ± 0.21	7.25 ± 0.26
	Cd <sub>20</sub>	5.56 ± 0.27	3.69 ± 0.46

#### 4.1.3. Klorofil Konsantrasyonu

Yetersiz potasyum beslenmesi yaprakların klorofil konsantrasyonunda düşüşe neden olmuştur. Kontrol (0  $\mu\text{M}$  Cd) uygulamasına göre kadmiyumun 20  $\mu\text{M}$  uygulandığı durumda da yaprakların klorofil konsantrasyonlarında azalmalar meydana gelmiştir (Şekil 4. 2). Kadmiyum uygulamasına bağlı olarak klorofil düzeyinde meydana gelen azalmaların potasyum beslenmesinin iyileşmesine bağlı olarak gerilediği tespit edilmiştir. Buna göre yetersiz potasyum uygulaması altında (50  $\mu\text{M}$ ) kadmiyum uygulamasına bağlı olarak klorofil konsantrasyonunda meydana gelen azalma % 16 olurken, potasyumun 250  $\mu\text{M}$  uygulamasında söz konusu azalma % 10 ve potasyumun yeterli düzeyde uygulandığı (2000  $\mu\text{M}$ ) dozdaki azalma ise % 5 olarak gerçekleşmiştir (Şekil 4.2).

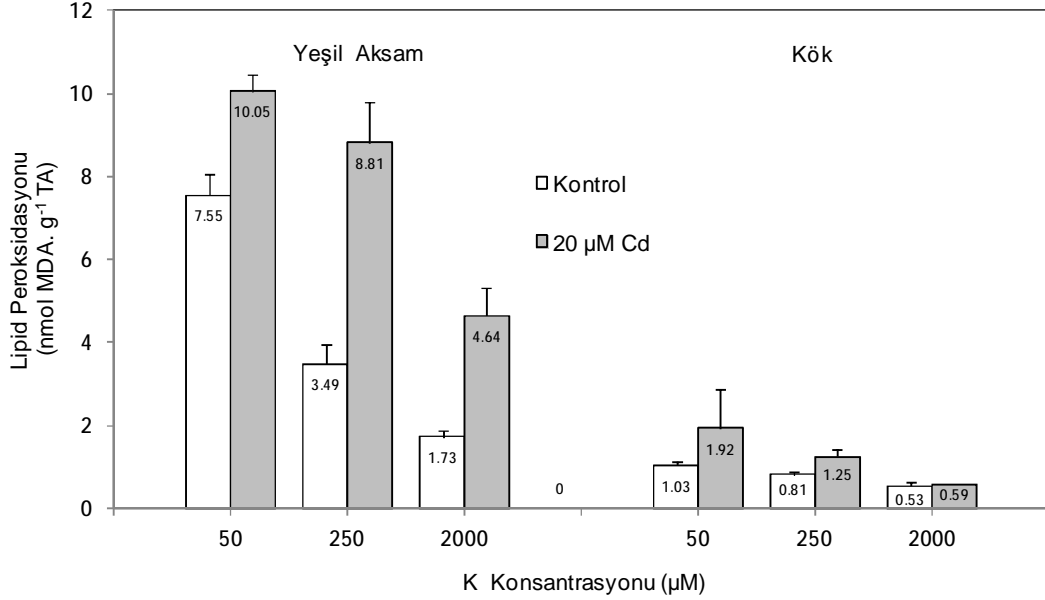


Şekil 4.2. Değişik potasyum (50, 250 2000 µM) ve kadmiyum (0 ve 20 µM) uygulamalarının su kültürü koşullarında 24 günlük ıspanak bitkisinin klorofil konsantrasyonu üzerine etkisi

#### 4.1.4. Lipid Peroksidasyonu

Hücre membranlarındaki zararlanmanın bir göstergesi olan lipid peroksidasyonunun bitkilerin yeşil aksamında köklere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Lipid peroksidasyonun hem yeşil aksam hem de köklerde bitkilerin potasyum beslenmesinin iyileşmesine bağlı olarak belirgin şekilde azaldığı bulunmuştur (Şekil 4.3). Kadmiyumun uygulanmadığı durumda bitkilerin yeşil aksam lipid peroksidasyonu potasyumun 50 µM olarak uygulandığı zaman 7.55 nmol MDA g<sup>-1</sup> TA iken, potasyumun 250 ve 2000 µM uygulandığı zaman sırayla 3.49 ve 1.73 nmol MDA g<sup>-1</sup> TA'a düştüğü görülmektedir. Aynı koşullarda, köklerde de lipid peroksidasyonun potasyum beslenmesinin iyileşmesiyle birlikte azaldığı bulunmuştur. Buna karşın, kadmiyum uygulaması hem yeşil aksam hem de köklerin lipid peroksidasyonu düzeylerinde ciddi artışlara neden olmuştur. Kadmiyumun 20 µM uygulandığı koşullarda, yeşil aksam lipid peroksidasyonunun artan potasyum beslenmesine (50, 250ve 2000 µM) bağlı olarak sırayla 10.05, 8.81 ve 4.64 nmol MDA g<sup>-1</sup> TA değerlerine sahip olduğu bulunmuştur. Aynı koşullarda köklerin lipid

peroksidasyonunda da potasyum beslenmesine bağlı olarak azaldığı ve sırasıyla 1.92, 1.25 ve 0.59 nmol MDA g<sup>-1</sup> TA değerlerini aldığı tespit edilmiştir (Şekil 4.3).

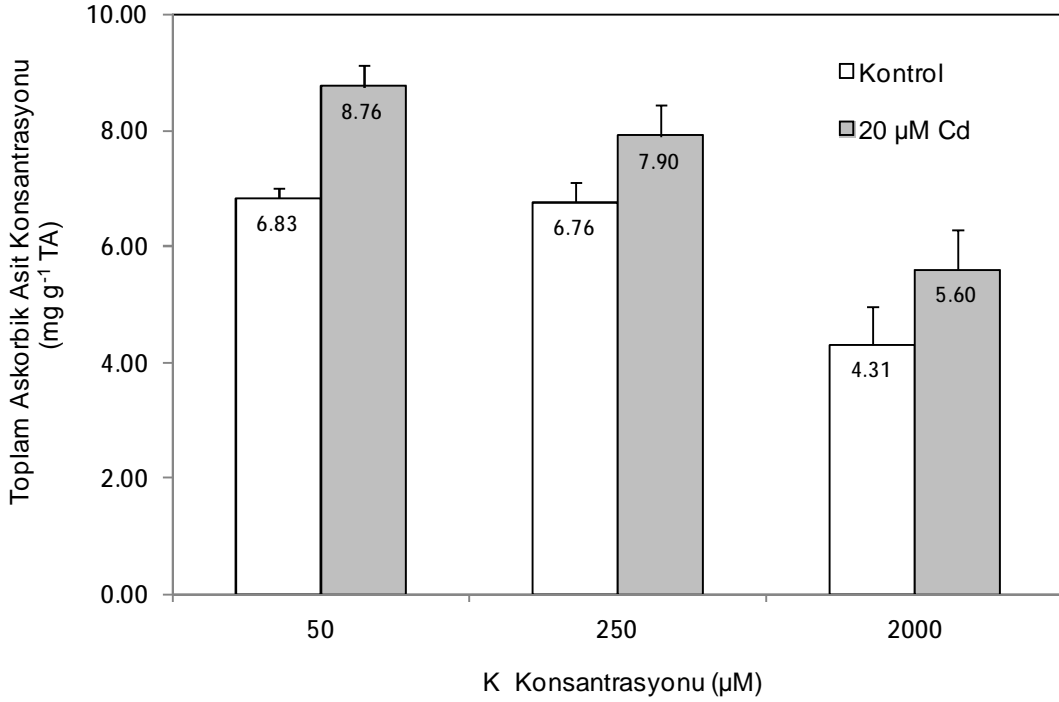


Şekil 4.3. Değişik potasyum (50, 250 2000 µM) ve kadmiyum (0 ve 20 µM) uygulamalarının su kültürü koşullarında 24 günlük ıspanak bitkisinin yeşil aksam ve kök lipid peroksidasyonu üzerine etkisi

#### 4.1.5. Askorbik Asit Konsantrasyonu

Kadmiyumun uygulanmadığı koşullarda potasyum beslenmesinin artmasına bağlı olarak yeşil aksamın toplam askorbik asit konsantrasyonunun belirgin ölçüde azaldığı bulunmuştur (Şekil 4.4). Kadmiyum uygulamasına (20 µM) bağlı olarak bitkilerin yeşil aksam toplam askorbik asit düzeylerinin artan potasyum beslenmesine (50, 250 ve 2000 µM) bağlı olarak sırasıyla % 28, % 17 ve % 14 oranında arttığı hesaplanmıştır (Şekil 4.4).

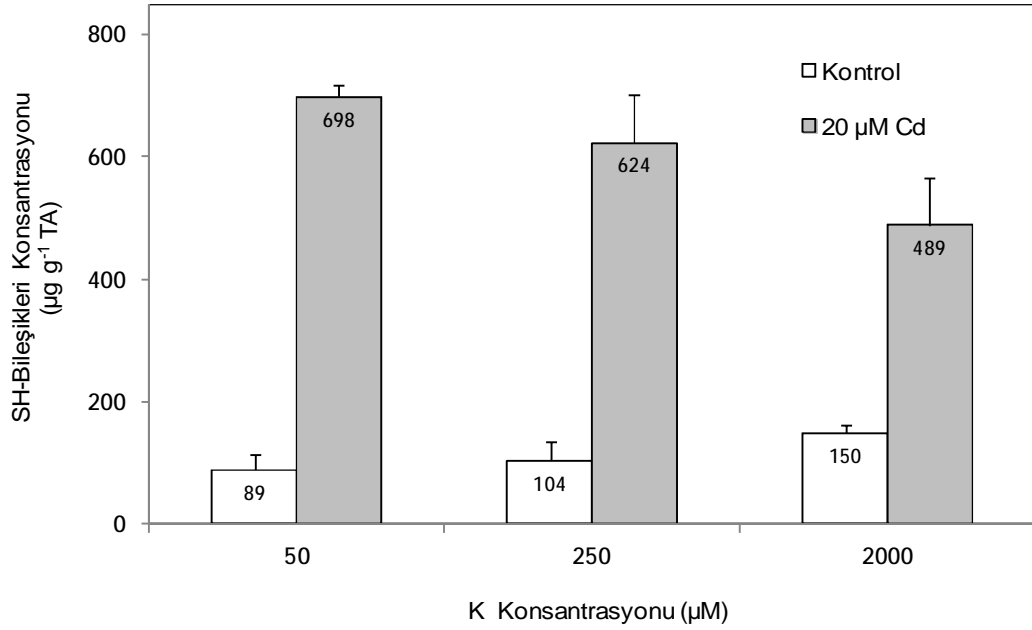




Şekil 4.4. Değişik potasyum (50, 250 2000 µM) ve kadmiyum (0 ve 20 µM) uygulamalarının su kültürü koşullarında 24 günlük ıspanak bitkisinin yeşil aksam askorbik asit konsantrasyonu üzerine etkisi

#### 4.1.6. SH-Bileşikleri Konsantrasyonu

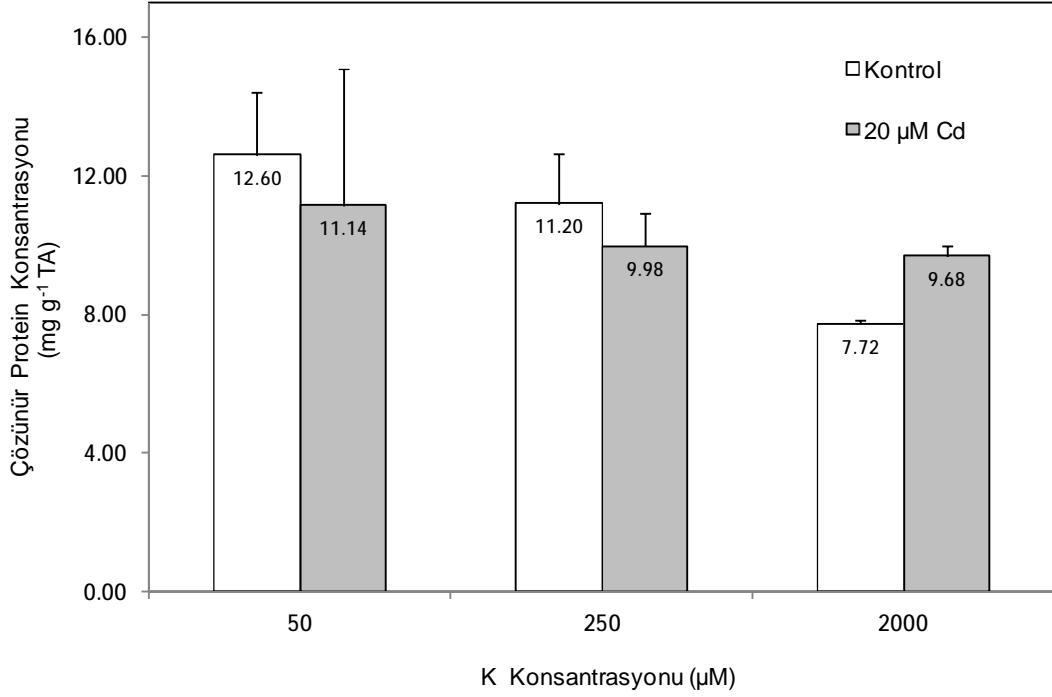
Artan potasyum beslenmesine bağlı olarak kadmiyumun uygulanmadığı koşullarda SH-bileşikleri düzeyinin yeşil aksamda yükseldiği ve 50 µM potasyum dozunda 89 µg g<sup>-1</sup> TA iken 2000 µM potasyum dozunda 150 µg g<sup>-1</sup> TA düzeyine ulaştığı bulunmuştur. Kadmiyumun 20 µM uygulandığı koşullarda ise artan potasyum beslenmesine bağlı olarak yeşil aksamda SH-bileşikleri düzeyinin 698 µg g<sup>-1</sup> TA'tan 489 µg g<sup>-1</sup> TA'a gerilediği görülmüştür. Yeşil aksamda kadmiyum uygulamasına bağlı olarak meydana gelen artışın bitkilerin potasyum beslenmesinin iyileşmesiyle birlikte belirgin düzeyde azaldığı dikkat çekicidir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Değişik potasyum (50, 250 2000 µM) ve kadmiyum (0 ve 20 µM) uygulamalarının su kültürü koşullarında 24 günlük ıspanak bitkisinin yeşil aksam SH-bileşikleri konsantrasyonu üzerine etkisi

#### 4.1.7. Çözünür Protein Konsantrasyonu

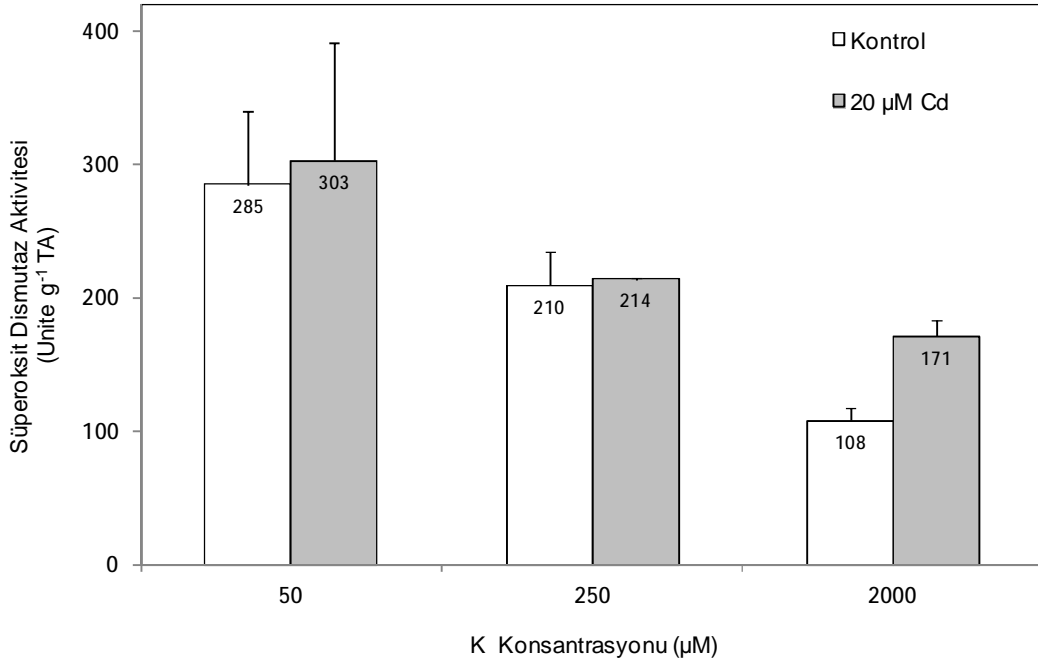
Hem kadmiyumun uygulanmadığı koşullarda hem de 20 µM Cd uygulaması altında bitkilerin potasyum beslenmesinin iyileşmesine bağlı olarak çözünür protein konsantrasyonunun azaldığı bulunmuştur (Şekil 4.6). Kadmiyum uygulamasının 2000 µM K uygulaması altında yeşil aksamın çözünür protein konsantrasyonunu belirgin şekilde yükselttiği tespit edilmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Değişik potasyum (50, 250 2000 µM) ve kadmiyum (0 ve 20 µM) uygulamalarının su kültürü koşullarında 24 günlük ıspanak bitkisinin yeşil aksam çözünür protein konsantrasyonu üzerine etkisi

#### 4.1.8. Süperoksit Dismutaz (SOD) Aktivitesi

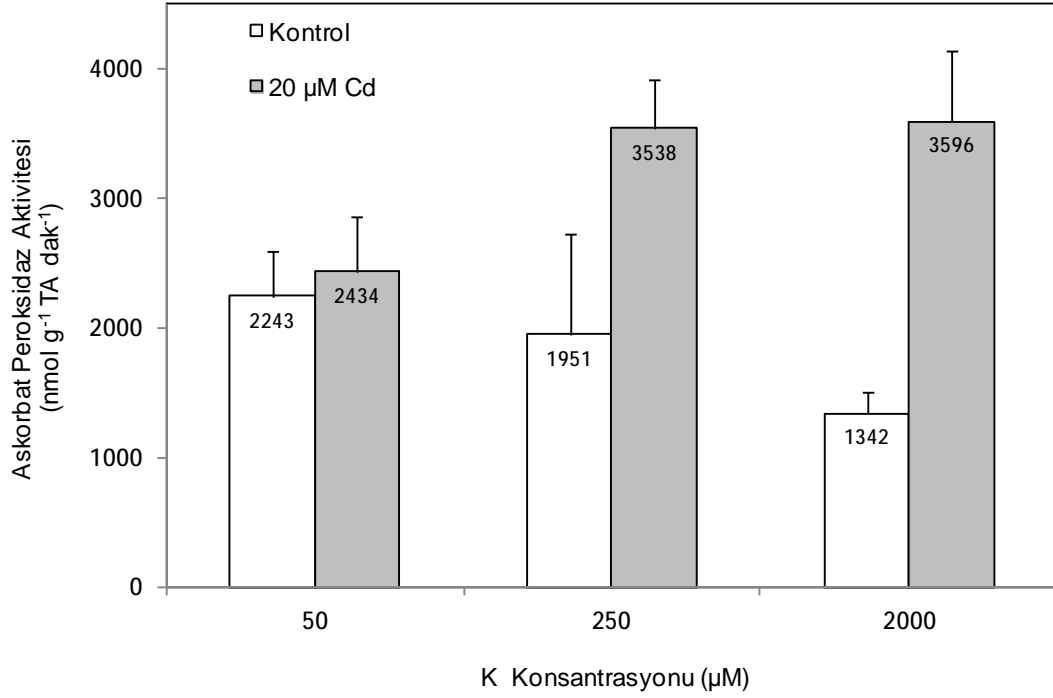
Yeşil aksamda ölçülen süperoksit dismutaz aktivitesinin, hem Cd'un uygulanmadığı hem de 20 µM uygulandığı durumda potasyum beslenmesinin iyileşmesiyle birlikte azaldığı bulunmuştur (Şekil 4.7). Kadmiyum uygulamasıyla 50 ve 250 µM potasyum dozlarında artma eğiliminde olan SOD aktivitesinin 2000 µM potasyum dozunda belirgin ölçüde yükseldiği görülmektedir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Değişik potasyum (50, 250 2000 µM) ve kadmiyum (0 ve 20 µM) uygulamalarının su kültürü koşullarında 24 günlük ıspanak bitkisinin yeşil aksam süperoksit dismutaz aktivitesi üzerine etkisi

#### 4.1.9. Askorbat Peroksidaz (APX) Aktivitesi

Kadmiyumun uygulanmadığı koşullarda artan potasyum beslenmesine bağlı olarak yeşil aksam askorbat peroksidaz aktivitelerinin önemli oranda azaldığı ve 50 µM potasyum dozundaki 2243 nmol g<sup>-1</sup> TA dak<sup>-1</sup> değerinin 2000 µM potasyum uygulamasına bağlı olarak 1342 nmol g<sup>-1</sup> TA dak<sup>-1</sup> değerine gerilediği görülmüştür. Buna karşın, kadmiyum uygulamasına bağlı olarak yeşil aksam askorbat peroksidaz aktivitelerinin artan potasyum beslenmesiyle birlikte önemli oranda yükseldiği belirlenmiştir. Buna göre, potasyumun 50 µM dozunda 2434 nmol g<sup>-1</sup> TA dak<sup>-1</sup> olan yeşil aksam enzim aktivitesinin potasyumun 2000 µM dozunda 3596 nmol g<sup>-1</sup> TA dak<sup>-1</sup> değerine yükseldiği görülmektedir (Şekil 4.8).

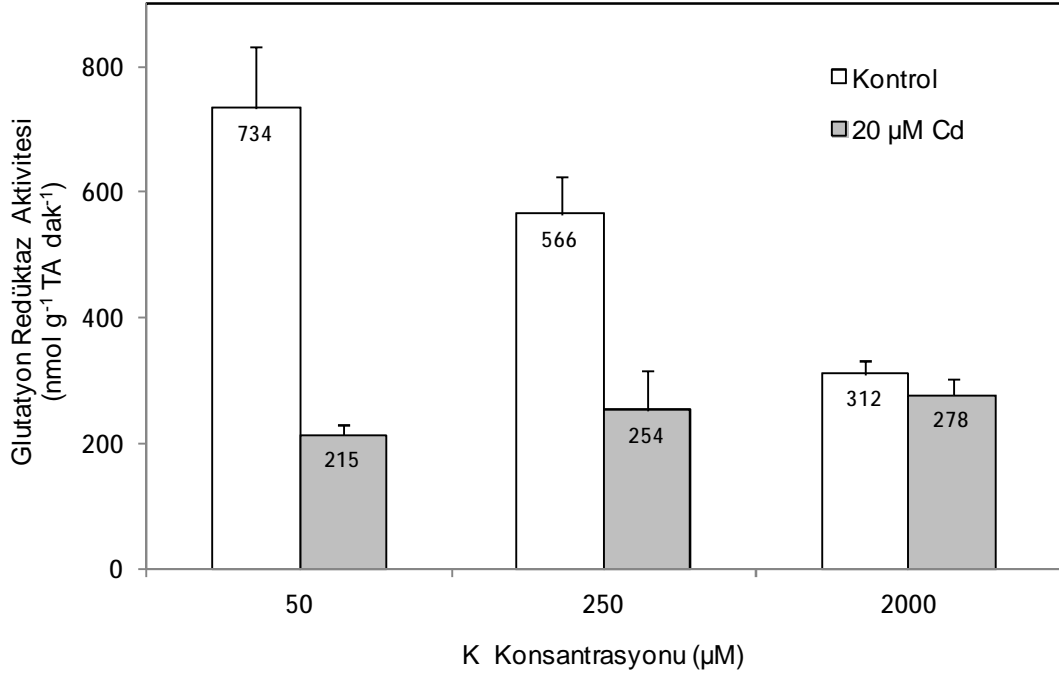


Şekil 4.8. Değişik potasyum (50, 250 2000 µM) ve kadmiyum (0 ve 20 µM) uygulamalarının su kültürü koşullarında 24 günlük ıspanak bitkisinin yeşil aksam askorbat peroksidaz aktivitesi üzerine etkisi

#### 4.1.10. Glutasyon Redüktaz (GR) Aktivitesi

Kadmiyum uygulamasının olmadığı kontrol koşullarındaki enzim aktivitesinin 20 µM Cd uygulaması altındaki enzim aktivitesinden tüm potasyum dozlarında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kadmiyum uygulamasının yapılmadığı koşullarda artan potasyum beslenmesine bağlı olarak yeşil aksamın glutasyon redüktaz aktivitesinin önemli oranda azaldığı bulunmuştur (Şekil 4.9). Buna göre, 50 µM potasyum dozunda 734 nmol g<sup>-1</sup> TA dak<sup>-1</sup> olan enzim aktivitesinin 250 µM potasyum dozunda 566 nmol g<sup>-1</sup> TA dak<sup>-1</sup>,ya ve 2000 µM potasyum dozunda ise 312 nmol g<sup>-1</sup> TA dak<sup>-1</sup>,ya gerilediği görülmektedir. Kadmiyumun 20 µM dozunda ise artan potasyum beslenmesine bağlı olarak enzim aktivitesinin belirgin ölçüde yükseldiği ve sırasıyla 215, 254 ve 278 nmol g<sup>-1</sup> TA dak<sup>-1</sup> olduğu tespit edilmiştir. Kadmiyum uygulamasına bağlı olarak yeşil aksamın enzim aktivitesinde

meydana gelen azalışların artan potasyum beslenmesiyle gerilediği açıkça görülmektedir (Şekil 4.9).

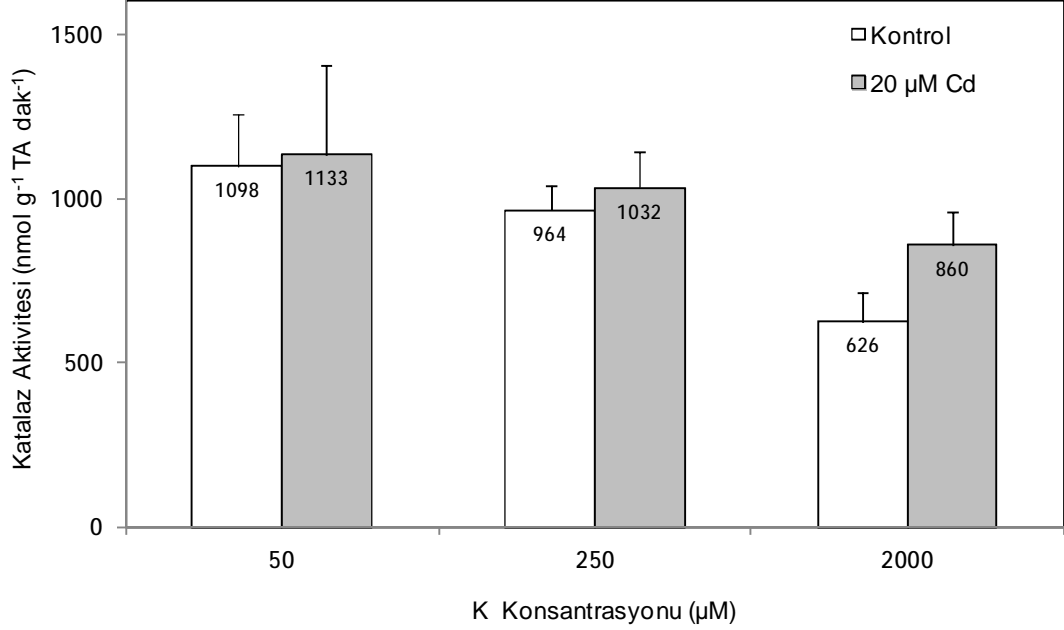


Şekil 4.9. Değişik potasyum (50, 250 2000 µM) ve kadmiyum (0 ve 20 µM) uygulamalarının su kültürü koşullarında 24 günlük ıspanak bitkisinin yeşil aksam glutatyon redüktaz aktivitesi üzerine etkisi

#### 4.1.11. Katalaz (CAT) Aktivitesi

Hem kontrol (Cd<sub>0</sub>) hem de 20 µM kadmiyum uygulaması altında artan potasyum beslenmesine bağlı olarak yeşil aksamda katalaz enzim aktivitesinin belirgin ölçüde azaldığı görülmüştür. Buna göre, kadmiyumun uygulanmadığı koşullarda, potasyumun 50 µM dozunda 1098 nmol g<sup>-1</sup> TA dak<sup>-1</sup> olan enzim aktivitesinin potasyumun 2000 µM uygulandığı koşullarda % 43'lük bir azalma ile 626 nmol g<sup>-1</sup> TA dak<sup>-1</sup> düzeyine indiği belirlenmiştir. Kadmiyumun 20 µM uygulandığı koşullarda ise 50 µM potasyum dozuna göre değerlendirildiğinde, 250 µM potasyum dozunda enzim aktivitesinin % 9 oranında, 2000 µM potasyum dozunda ise % 24 oranında azaldığı bulunmuştur. Kadmiyum uygulaması yeşil

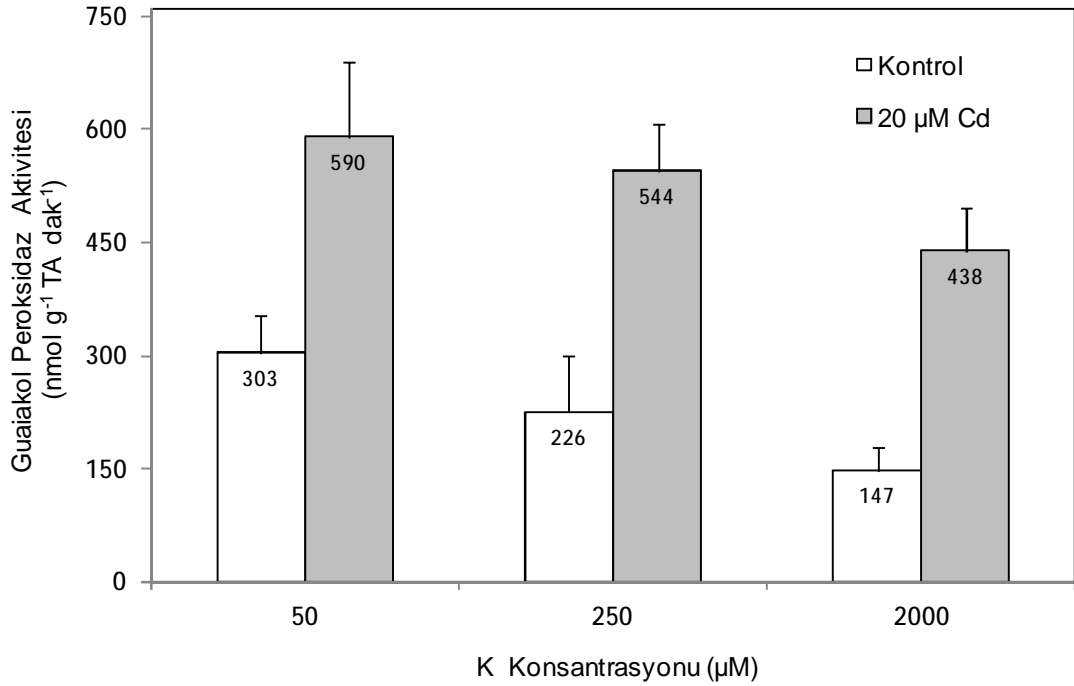
aksamda katalaz aktivitesini 50  $\mu\text{M}$  potasyum dozunda % 3, 250  $\mu\text{M}$  potasyum dozunda % 7 ve 2000  $\mu\text{M}$  potasyum dozunda ise % 37 arttırmıştır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Değişik potasyum (50, 250 2000  $\mu\text{M}$ ) ve kadmiyum (0 ve 20  $\mu\text{M}$ ) uygulamalarının su kültürü koşullarında 24 günlük ıspanak bitkisinin yeşil aksam katalaz aktivitesi üzerine etkisi

#### 4.1.12. Guaiakol Peroksidaz (GPX) Aktivitesi

Bitkilerin potasyum beslenmelerinin iyileşmesine bağlı olarak hem kadmiyumun uygulanmadığı kontrol koşullarında hem de 20  $\mu\text{M}$  kadmiyum uygulaması altında guaiakol peroksidaz aktivitesinin azaldığı bulunmuştur (Şekil 4.11). Kontrol bitkilerine göre, kadmiyum uygulamasına bağlı olarak yeşil aksamda enzim aktivitesinin 50  $\mu\text{M}$  potasyum dozunda yaklaşık 2 kat, 250  $\mu\text{M}$  potasyum dozunda 2.5 kat ve 2000  $\mu\text{M}$  potasyum dozunda ise yaklaşık 3 katlık bir artış olmuştur (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. Değişik potasyum (50, 250 2000 µM) ve kadmiyum (0 ve 20 µM) uygulamalarının su kültürü koşullarında 24 günlük ıspanak bitkisinin yeşil aksam guaiakol peroksidaz aktivitesi üzerine etkisi

## 4.2. Tartışma

Kadmiyum (Cd) toksisitesine bağlı oksidatif zararlanmanın potasyum (K) beslenmesinden ne düzeyde etkilendiğinin belirlendiği bu çalışmada, kadmiyum uygulamasına bağlı olarak bitki büyümesinde meydana gelen gerilemeler, Cd toksisitesi ve K eksikliği belirtileri gözle görülebilir ilk belirtiler olmuştur. Kadmiyum uygulamasının köklerde kahverengileşmelere yol açtığı görülmüştür. Kadmiyum uygulamasının bir sonucu olarak, nekrotik lekeler içeren hafif sarımsı yaprakların kontrol bitkilerinin yapraklarına göre daha dar olduğu görülmüştür. Kadmiyum uygulaması hem yeşil aksamda hem de köklerde kuru madde üretiminin azalmasına yol açmıştır (Şekil 4.1). Benzer sonuçlar, makarnalık buğdayda (Öztürk ve ark., 2003), ayçiçeğinde (Azevedo ve ark., 2005), arpada (Tiryakioğlu ve ark., 2006), hiyarda (Abu-Muriefah, 2008), çin lahanası ve hardalda (Chen ve ark., 2011), ekmeklik buğday ve mısırdada (Zhao, 2011) bulunmuştur. Kadmiyum uygulamasına bağlı olarak büyümede meydana gelen gerileme, bitkilerde kadmiyumun fotosentez,



fotosentetik ürünlerin taşınması ve gerekli besinler gibi önemli metabolik faktörlerle etkileşime girmesinin bir sonucu olabilir (Stobart ve ark., 1985; Vassilev ve ark., 1993; Mobin ve Khan, 2007; Iqbal ve ark., 2010). Kadmiyum ayrıca, bitkilerde fizyolojik olaylarda sorunlara yol açarak toksik oksijen türevlerinin oluşumunu artırma ve lipid peroksidasyona neden olma gibi (Shaw, 1995; Sanita di Toppi ve Gabrielli, 1999; Montillet ve ark., 2004; Chaovi ve ark., 1997) dolaylı mekanizmalarla oksidatif strese neden olmaktadır.

Artan potasyum beslenmesi, hem kontrol ( $Cd_0$ ) hem de  $20 \mu M$  Cd uygulaması altında hem yeşil aksamın hem de köklerin kuru madde miktarlarının artmasına neden olmuştur (Şekil 4.1). Potasyumun  $50 \mu M$  uygulandığı koşullarda  $20 \mu M$  Cd uygulaması altında  $780 \text{ mg bitki}^{-1}$  olan yeşil aksam kuru madde miktarının,  $250 \mu M$  K dozunda  $889 \text{ mg bitki}^{-1}$ 'a ve  $2000 \mu M$  yeterli K dozunda ise  $996 \text{ mg bitki}^{-1}$ 'a yükseldiği bulunmuştur. Benzer şekilde, artan potasyum beslenmesinin ( $50$ ,  $250$  ve  $2000 \mu M$ )  $20 \mu M$  Cd uygulaması altında kök kuru ağırlıklarının sırasıyla  $167$ ,  $186$  ve  $202 \text{ mg bitki}^{-1}$  şeklinde artmasını sağladığı belirlenmiştir (Şekil 4.1). Bu çalışmada, Cd uygulamasına bağlı olarak, belirtilen K dozları altında, yeşil aksam kuru madde üretimlerinde meydana gelen azalmaların kök kuru madde üretimlerinde meydana gelen azalışlardan biraz daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bu durum, kadmiyumun uygulanmadığı koşullarda artan potasyum beslenmesine bağlı olarak yeşil aksam kuru madde üretiminde meydana gelen artışın köklere göre daha yüksek olmasıyla ilgili bir durumdur.

Yetersiz K beslenmesinde bitki kuru madde üretiminde meydana gelen gerileme değişik bitki türlerinde; örneğin pamukta (Zhao ve ark., 2001), çeltikte (Sabir ve ark., 2003; Jia ve ark., 2008), buğdayda (Guoping ve ark., 1999) görülmüştür. Bitkilerin K beslenmesinin arttırılması, kök büyümesinin teşvik edilmesi, yaprak alanının, klorofil içeriğinin ve net asimilasyon oranının artmasında etkili olmaktadır. Bitki su içeriğinin de K beslenmesiyle yakından ilişkili olduğu iyi bilinmektedir. Birçok abiyotik stresin zararlı etkilerine karşı potasyumun koruyucu etkisi olduğu bildirilmiştir (Çakmak, 2005). Örneğin, yüksek ışıktaki (Marschner ve Çakmak, 1989; Marschner ve ark., 1996), kuraklıkta (Çakmak ve Engels, 1999; Sangakkaro ve ark., 2000), düşük sıcaklıkta (Kafkafi, 1990; Hakerlerler ve ark.,

1997), tuz stresinde (Deal ve ark., 1999; Kaya ve ark., 2001), demir toksisitesinin azaltılmasında (Li ve ark., 2001; Neue ve ark., 1998). Potasyumun Cd toksisitesine bağlı zararlanmanın azaltılmasında da önemli bir rol üstlendiği soya fasulyesinde (Shamsi ve ark., 2010), ekmeklik buğdayda (Zhao ve ark., 2003) ve hardalda (Umar ve ark., 2008) ortaya konmuştur. Bitkilerin potasyum beslenmesinin iyileşmesiyle aktif oksijen türevlerin oluşumunun engellenebildiği bildirilmiştir (Çakmak, 2005).

Tüm potasyum dozlarında Cd uygulaması hem yeşil aksamda hem de köklerde, Cd konsantrasyonunun artmasına yol açmıştır (Çizelge 4.1). Köklerdeki Cd konsantrasyonunun yeşil aksama göre çok daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Benzer sonuçlar değişik araştırmacılar tarafından da bulunmuştur (Salt ve ark., 1997; Öztürk ve ark., 2003; Hatata ve Abdel-Aal, 2008; Uruguchi ve ark., 2009). Artan K beslenmesine bağlı olarak, 20  $\mu\text{M}$  Cd uygulaması altında yeşil aksamın Cd konsantrasyonu sırasıyla 128, 120 ve 102  $\text{mg kg}^{-1}$  KA olmuştur. Köklerde belirlenen Cd konsantrasyonu 50  $\mu\text{M}$  K dozuna göre diğer K dozlarında azalma eğiliminde olmuştur (Çizelge 4.1). Potasyum uygulamasına bağlı olarak bitkilerde Cd içeriğinin azaldığı hardalda (Umar ve ark., 2008) ve Cd'a tolerant soya fasulyesinde (Shamsi ve ark., 2010) bulunmuştur. Bitkilerin K beslenmesinin iyileşmesiyle hem köklerin Cd konsantrasyonunda azalma eğilimi, hem de yeşil aksamın Cd konsantrasyonunda belirgin azalmalar "büyümeye bağlı seyrelme" şeklinde açıklanabilir.

Bitkilerin K beslenmesinin artmasına bağlı olarak hem yeşil aksam hem de köklerin K konsantrasyonu artmıştır (Çizelge 4.2). Bu artış oranlarının Cd'un uygulanmadığı kontrol koşullarında, 20  $\mu\text{M}$  Cd uygulamasına göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Kadmiyum uygulaması tüm K dozlarında hem yeşil aksamın hem de köklerin K konsantrasyonunu önemli ölçüde azaltmıştır. Kadmiyum uygulamasına bağlı olarak K konsantrasyonundaki azalış yüksek Cd dozunda (1 mM) ekmeklik buğdayda (Ouzounidou ve ark., 1997), marulda (Michalska ve Asp, 2001), makarnalık buğdayda (Veslov ve ark., 2003) ve hıyarda (Abu-Muriefah, 2008) bulunmuştur. Kadmiyuma bağlı olarak bitkilerin K konsantrasyonlarındaki azalma, Cd'un kök hücrelerinin plazma membranlarına olan olumsuz etkilerinden dolayı su ve besin alımının engellenmesi veya kök hücrelerinden dışarı K sızıntısına neden olmasından dolayı olabilir (Obata ve Umebayashi, 1997). Kadmiyum

uygulaması ile plazma membranlarındaki H<sup>+</sup>-ATPaz aktivitesinin Cd'a hassas baklagil köklerinde Cd'a tolerant kabakgillere göre önemli ölçüde azaldığı bildirilmiştir (Obata ve ark., 1996). H<sup>+</sup>-ATPaz aktivitesinin birçok çözünen maddenin taşınımı için proton itici güç olarak gerekli olduğu bildirilmiştir (Serrano, 1989). Böylelikle, Cd'a bağlı olarak ATPaz aktivitesindeki azalma birçok besin elementinin alım veya dışlanması için belirleyici bir faktör olabilir (Obata ve Umabayashi, 1997).

Ciecko ve ark. (2004)'nın çalışmalarına göre, artan Cd'a bağlı olarak yulaf tanesinde K konsantrasyonu azalırken, yulafın saman ve özellikle köklerinde, benzer şekilde mısırın toprak üstü aksamında ve de belirgin şekilde köklerinde K konsantrasyonunun arttığı bildirilmiştir.

Potasyum beslenmesinin 2000 µM olduğu koşullarda 20 µM Cd uygulamasına rağmen yeşil aksamın K konsantrasyonunun % 5.56 olduğu görülmektedir. Bu durum, 20 µM Cd'un oluşturduğu stres altında bile bitkilerin halen K'a bağlı yaşamsal fonksiyonlarını devam ettirebildiğinin bir göstergesi olarak kabul edilebilir. Potasyumun bitki dokularında kuru maddede % 1-10 arasında olduğu bildirilmiştir (Epstein ve Bloom, 2005). Nitekim, Cd'un uygulanmadığı koşullarda ıspanağın yeşil aksam K konsantrasyonunun % 6 düzeyinde olduğu görülmektedir (Smolen ve Sady, 2010).

Kadmiyum toksisitesinin bitkilerde birçok morfolojik, fizyolojik ve biyokimyasal değişikliklere neden olduğu iyi bilinmektedir. Bu çalışmada, Cd uygulamasına bağlı olarak yaprakların klorofil konsantrasyonlarında azalmalar olduğu bulunmuştur (Şekil 4.2). Potasyumun yetersiz uygulandığı koşullarda da klorofil konsantrasyonlarında meydana gelen düşüşler dikkat çekicidir. Kadmiyuma bağlı klorofil konsantrasyonundaki azalış, arpada (Stobart ve ark., 1985), fasulyede (Padmaja ve ark., 1990), hıyarda (Chugh ve Sawhney, 1999) ve mısır ve buğdayda (Zhao, 2011) gösterilmiştir. Klorofil konsantrasyonunda Cd uygulamasına bağlı olarak meydana gelen azalışın klorofil biyosentezinin engellenmesi ile ilgili olduğu bildirilmiştir (Malik ve ark., 1992; Vassilev ve Yordanov, 1997; Maria ve Tadeusz, 2005). Bununla birlikte, Cd uygulamasına bağlı olarak klorofil konsantrasyonundaki düşüklük magnezyum (Mg) ve demir (Fe) eksikliğiyle ilişkilendirilmiştir (Greger ve

Ogren, 1991). Bu çalışmada, Cd uygulamasına bağlı olarak klorofil konsantrasyonunda meydana gelen azalışlar K uygulamasına bağlı olarak gerilemiştir. Potasyumun Cd'a bağlı klorofil konsantrasyonunda meydana gelen azalışı geriletmedeki olumlu etkisi, hardalda (Umar ve ark., 2008) ve soya fasulyesinde (Shamsi ve ark., 2010) bildirilmiştir. Potasyum eksikliğine bağlı olarak toplam klorofil konsantrasyonundaki düşüşler fasulyede (Çakmak, 1994), pamukta (Zhao ve ark., 2001) ve mısırdaki (Tewari ve ark., 2004) bulunmuştur.

Bitkilerde meydana gelen oksidatif stresin bir göstergesi olarak lipid peroksidasyonu, sıklıkla kullanılan bir parametredir. Bu çalışmada, Cd uygulamasına bağlı olarak hem yeşil aksamda hem de köklerde lipid peroksidasyonu düzeyi yükselmiştir (Şekil 4.3). Bitkilerin yeşil aksamlarında ölçülen lipid peroksidasyonu düzeyinin köklere göre daha yüksek olduğu bulunmuştur. En yüksek lipid peroksidasyonunun 10.05 nmol MDA g<sup>-1</sup> TA değeri ile 50 µM K ve 20 µM Cd uygulaması altında, stresin en yoğun olduğu koşullarda, yeşil aksamda ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Potasyumun 2000 µM olarak uygulandığı koşullarda 20 µM Cd uygulaması altında söz konusu lipid peroksidasyonu değerinin 4.64 nmol MDA g<sup>-1</sup> TA'a gerilediği bulunmuştur. Kadmiyum uygulaması altında ölçülen lipid peroksidasyonu değerlerinin bitkilerin K beslenmesinin iyileşmesiyle önemli oranda azaldığı ve bu durumun yalnızca yeşil aksamda değil, aynı zamanda köklerde de meydana geldiği görülmüştür (Şekil 4.3). Kadmiyum uygulamasına bağlı olarak lipid peroksidasyonunda meydana gelen artış değişik bitki türlerinde, örneğin; bezelyede (Dixit ve ark., 2001), hıyarda (Zhang ve ark., 2003) ve mısır ve buğdayda (Zhao, 2011) ortaya konurken, Cd uygulamasına bağlı lipid peroksidasyonundaki artışın bitkilerin potasyum beslenmesinin arttırılması-iyileştirilmesine bağlı olarak azaltılabildiği bildirilmiştir (Shamsi ve ark., 2010). Bitkilerin K beslenmesinin arttırılmasına bağlı olarak lipid peroksidasyonunda meydana gelen azalışlar değişik sulama rejimlerinde ayçiçeğinde (Soleimanzadeh ve ark., 2010) ve yabani arpa (*Hordeum maritimum* L.)'da (Hafsi ve ark., 2011) ortaya konmuştur. Potasyum eksikliğinin bitki dokularında oksidatif zararlanmaya neden olduğu bildirilmiştir (Tewari ve ark., 2004; 2007). Potasyum eksikliği koşullarında artan lipid peroksidasyonu kloroplastlarda, iyi bilinen bir lipid peroksidasyonu indükleyici olan

singlet oksijen üretiminin olduğunu göstermektedir (Screenivasulu ve ark., 1999; Halliwell ve Gutteridge, 2000).

Askorbik asit (askorbat), vitamin E ( $\alpha$ -tokoferol), glutatyon,  $\beta$ -karotin ve zeaxanthin karotenoidi gibi bileşikler, bitkilerin stres koşullarında toksik radikallere karşı kendilerini korumak için kullandığı enzimatik olmayan en önemli savunma mekanizmalarıdır (Cakmak ve Marschner, 1992; Demming-Adams ve Adams, 1996; Noctor ve Foyer, 1998). Bunlardan, askorbat ve glutatyon toksik oksijen türevlerine karşı etkili antioksidantlardır ve kloroplast stromasında sırasıyla 50 ve 3 mM gibi yüksek konsantrasyonlarda bulunurlar (Halliwell, 1982). Bu çalışmada, ıspanak bitkisinin kadmiyum toksisitesine tepkisi ve bunun K beslenmesinden ne düzeyde etkilendiğini ortaya koymak için enzimatik olmayan antioksidantlardan askorbik asit ve glutatyon (protein olmayan SH-bileşikleri) düzeyleri belirlenmiştir. Askorbik asit, askorbat peroksidaz için substrat olması yanında, doğrudan singlet oksijen, süperoksit ve hidroksil radikalleri yok edebilmektedir (Noctor, 2006). Tüm potasyum dozlarında, Cd uygulaması yeşil aksamın askorbik asit konsantrasyonunda artışa neden olmuştur (Şekil 4.4). Kadmiyum uygulamasına bağlı olarak yeşil aksamın toplam askorbik asit konsantrasyonu, ayçiçeğinde (Hatata ve Abdel-Aal, 2008), ıspanakta (Pandey ve ark., 2009) ve bir tür kamış bitkisi olan *Spartina densiflora*'da, özellikle de yüksek Cd dozlarında (Martinez-Dominguez ve ark., 2010) artarken; makarnalık buğdayda ve (Öztürk ve ark., 2003) maş fasulyesinde (*Vigna radiata* (L.) Wilczek) (Anjum ve ark., 2011) azalmıştır. Hem kontrol ( $Cd_0$ ) hem de 20  $\mu$ M Cd uygulaması altında, artan K beslenmesiyle birlikte, özellikle de 2000  $\mu$ M K uygulaması altında, yeşil aksamın askorbik asit konsantrasyonu belirgin ölçüde düşmüştür. Kadmiyum uygulamasına bağlı olarak yeşil aksamın artan toplam askorbik asit konsantrasyonu, artan toksik oksijen radikallerine karşı bir savunma reaksiyonunun olduğunu göstermektedir. Bu çalışma sonuçlarıyla uyumlu olarak, K eksikliği koşullarında yüksek toplam askorbik asit konsantrasyonu yabancı arpada (*Hordeum maritimum* L.) bulunmuştur (Hafsi ve ark., 2011). Potasyum beslenmesinin iyileşmesine bağlı olarak toplam askorbik asit düzeylerinde meydana gelen düşüş, potasyumun bitkilerin kadmiyum zararına karşı korunmasında rol aldığını gösterebilir.

Glutasyon (SH-bileşikleri) askorbatın rejenerasyonunda merkezi bir role sahiptir. Aynı zamanda indirgenmiş glutasyon (GSH) bir antioksidant olarak aktif oksijen türevlerinin yok edilmesinde ve metal dengesinin kontrol altında tutulmasında etkin rol oynar (Xiang ve Oliver, 1998; Noctor ve ark., 2002). Genel bir kural olmamakla birlikte, oksidatif stres faktörleri bitki dokularındaki SH-bileşikleri düzeyinin artmasına neden olmaktadır. Proteine bağlı olmayan SH- bileşiklerinin, glutatyonun çok büyük bir bölümünü oluşturduğu bildirilmiştir (Grill ve ark., 1979; Maas ve ark., 1987). Bitkilerin yeşil aksamında ölçülen SH-bileşikleri konsantrasyonunun kontrole ( $Cd_0$ ) göre  $20 \mu M$  Cd uygulamasına bağlı olarak tüm potasyum dozlarında arttığı bulunmuştur (Şekil 4.5). En düşük SH-bileşikleri düzeyinin  $50 \mu M$  K ve kadmiyum uygulanmadığı koşullarda, en yüksek SH-bileşikleri düzeyinin de aynı K dozunda ve  $20 \mu M$  Cd uygulaması altında olduğu görülmektedir (Şekil 4.5). Kadmiyum uygulanmadığı koşullarda artan K beslenmesi yeşil aksamın SH-bileşikleri konsantrasyonunun artmasına yol açmıştır. Kadmiyum uygulaması altında ise artan K beslenmesi SH-bileşikleri düzeyinin azalmasına neden olmuştur. Kadmiyum uygulamasına bağlı olarak SH-bileşikleri (Glutasyon) düzeyi, kamışta (*Phragmites australis* Trin. (Cav.) ex Steudel) (Pietrini ve ark., 2003), fasulyede (Smeets ve ark., 2005) ayçiçeğinde (Hatata ve Abdel-Aal, 2008) ve ekmeklik buğdayda (Ahmad ve ark., 2009) artarken; arpada (Patra ve Panda, 1998) ve hıyarda (Zhang ve ark., 2003) azalmıştır. Bitkilerin glutasyon sentez yeteneklerinin kadmiyum zararından korunmada çok önemli olduğu ve artan toleransın yüksek glutasyonla, azalan toleransın da glutasyon düşüşüyle uyumlu olduğu bildirilmiştir (Howden ve ark., 1995; Zhu ve ark., 1999 a;b). Bu çalışmada, Cd uygulamasına bağlı olarak SH-bileşikleri düzeyindeki en yüksek artışın, K'un en düşük dozunda ( $50 \mu M$ ) meydana geldiği görülmüştür. Bu durum, Cd'a bağlı olarak artan toksik oksijen türevleri düzeyinin K eksikliği ile birlikte daha da yükseldiğini göstermektedir. Aynı koşullarda, toplam askorbik asit konsantrasyonunun da yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 4.4). Alscher ve ark. (1997) tarafından, stres altında askorbat-glutasyon döngüsünün aktivasyonunun oksidatif zararlanma ile mücadele için gerekli olduğu bildirilmiştir. Kadmiyumun  $20 \mu M$  uygulandığı koşullarda, artan K beslenmesiyle birlikte SH-bileşikleri düzeyinin azalması (Şekil 4.5) köklerdeki

fitoşelatinlerin sentesi için gerekli glutatyon ihtiyacını karşılamak için yapraklardan köklere gönderilmesine bağlanabilir (Rennenberg, 1982). Ağır metallere korunmada fitoşelatinlerin önemi iyi bilinmektedir (Rausser, 1995; Zenk, 1996; Mehra ve Tripathi, 1999). Bununla birlikte, GSH hücre membranlarını lipid peroksidasyonuna karşı korumada kullanılmış olabilir. Nitekim, soğuk stresine bağlı fotooksidatif zararlanma boyunca GSH düzeyinin azaldığı bildirilmiştir (Wise ve Naylor, 1987). Bu çalışmada artan K beslenmesiyle SH-bileşikleri düzeyindeki (Şekil 4.5) ve lipid peroksidasyonundaki (Şekil 4.3) azalma uyum içindedir. Potasyumun yeterli oranda uyulduğu durumda, SH-bileşikleri düzeyinde ortaya çıkan azalış potasyumun oksidatif strese karşı savunmada önemli rol oynadığının göstergesi olabilir. Halliwell (1982)'e göre, glutatyon, özellikle kloplastlarda hidrojen peroksidin detoksifikasyonuna ve SH içeren enzimlerin oksidasyona karşı korunmasına katılmaktadır. Artan SH-bileşikleri düzeyi, aynı zamanda dokularda serbest oksijen radikallerinden hidrojen peroksid düzeyinin yüksekliğini göstermektedir.

Yeşil aksamın çözümlü protein konsantrasyonu 50 ve 250  $\mu\text{M}$  K dozlarında, kontrol bitkilerine göre 20  $\mu\text{M}$  Cd uygulamasıyla birlikte azalırken, 2000  $\mu\text{M}$  K dozunda Cd uygulamasıyla belirgin şekilde artmıştır (Şekil 4.6). Benzer artış hıyarda da bulunmuştur (Gonçalves ve ark., 2007). Bu durum, Cd ağır metale bağlı olarak yeterli K koşullarında stres proteinlerinin sentezlendiğini gösterebilir. Bitkilerin K beslenmesinin iyileşmesiyle hem kontrol ( $\text{Cd}_0$ ) hem de 20  $\mu\text{M}$  Cd uygulaması altında çözümlü protein konsantrasyonunda önemli oranda azalma meydana gelmiştir (Şekil 4.6). Kadmiyum uygulamasına bağlı olarak çözümlü proteinde azalma olduğu, arpada (Stiborova ve ark., 1986; Vassilev ve ark., 1997) ve güvercin bezelyesinde (Sheoran ve ark., 1990) bulunmuştur. Kadmiyum uygulamasına bağlı olarak fasulye köklerinin çözümlü protein konsantrasyonu önemli oranda azalırken, bitki üst kısmında çözümlü protein konsantrasyonunun etkilenmediği bildirilmiştir (Chaoui ve ark., 1997). Söz konusu azalma, protein sentezinin engellenmesine öncülük eden metabolik rahatsızlıklara bağlı olabilir (Ewais, 1997). Abiyotik streslerin bazı proteinlerin sentezini engelleyebilirken, diğerlerinin sentezini de teşvik edebildiği bildirilmiştir (Ericson ve Alfinito, 1984). Ağır metal kaynaklı reaktif oksijen

türevleri, protein içeriğinde azalmalara neden olabilen lipid peroksidasyonunu ve protein parçalanmasını indükleyebilir (Davis ve ark., 1987). Potasyum eksikliği koşullarında çözümlü protein düzeyinin yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 4.6). Bitkilerde K eksikliğinin, azot metabolizmasında sorunlara yol açtığı iyi bilinmektedir (Richards, 1956; Arnon, 1966). Potasyum eksikliği bitkileri, yeterli potasyum verilen bitkilere göre daha fazla çözümlü azotlu bileşikler, serbest aminoasitler ve amidler içermektedir (Wall, 1939; Steinberg, 1951; Smith ve Richards, 1962). Çözümlü protein konsantrasyonunun K eksikliği koşullarında yükseldiği Lavon ve ark. (1999) tarafından da bildirilmiştir.

Bitkiler stres koşullarında enzimatik savunma sistemlerini (SOD, APX, GR, CAT, GPX vd) aktif hale getirirler. Oksidatif stres tarafından antioksidatif enzimlerin aktivitelerinin indüklenmesi, stresle baş etmede gerekli olan genel bir stratejiyi yansıtmaktadır (Foyer ve ark., 1994). Süperoksit dismutaz (SOD), süperoksit radikali ( $O_2^{\cdot-}$ )'nin  $H_2O_2$  ve  $O_2$ 'ye dismutasyonunu katalizleyerek (Bowler ve ark., 1992; Scandalious, 1993; Cakmak ve ark., 1993; Cakmak, 1994), süperoksit konsantrasyonunun düşük ve sabit bir durumda kalmasını sağlamakta ve bu nedenle Haber-Weiss reaksiyonu üzerinden hidroksil radikal oluşumunu minimize etmektedir (Elstner, 1982). Enzimatik mekanizlardan APX ve GR ise birlikte  $H_2O_2$ 'in detoksifikasyonunda belirleyici rol oynamaktadır (Halliwell, 1982; Polle, 1996; Çakmak ve ark., 1993; Çakmak, 1994). Süperoksit dismutaz ve başka reaksiyonlar tarafından üretilen  $H_2O_2$ , peroksidazlar ve katalaz tarafından yıkıma uğratılmaktadır (Foyer ve ark., 1994). Katalaz, bitki dokularında bol miktarda bulunmasına karşın, kloroplastlarda bulunmaz (Whitehouse ve ark., 1971; Van Ginkel ve Brown, 1978) ve çoğu katalaz aktivitesi peroksizom ile sınırlıdır (Halliwell, 1982). Guaiakol peroksidaz (GPX) ise askorbik asit için daha az spesifik olup, kloroplastik olmayan ve başlıca hücre duvarlarında ve sitoplazmada lokalize olan bir enzimdir (Asada, 1992).

Süperoksit dismutaz aktivitesinin kadmiyuma bağlı olarak, bezelyede (Dalhurzo ve ark., 1997), yüksek konsantrasyonda ıspanakta (Pandey ve ark., 2009), kamışta (*Spartina densiflora*) (Martinez Dominguez ve ark., 2010) ve maş fasulyesinde (*Vigna radiata* (L.) Wilczek) (Anjum ve ark., 2011) arttığı;



ayçiçeğinde (Gallego ve ark., 1996) ve de ekmeklik buğdayda (Ahmad ve ark., 2009) azaldığı bildirilmiştir. Bu çalışmada, 20 µM Cd uygulamasına bağlı olarak SOD aktivitesinde artış olduğu ve bu durumun 50 ve 250 µM K dozlarında düşük düzeyde olurken, 2000 µM K dozunda önemli düzeyde olduğu görülmektedir (Şekil 4.7). Potasyumun 2000 µM dozunda SOD aktivitesinde 20 µM Cd uygulaması ile ortaya çıkan artış aynı koşullarda protein düzeyindeki artışla uyumlu görünmektedir. Potasyum uygulamasına bağlı olarak SOD aktivitesinde meydana gelen düşüşler soya fasulyesinde (Shamsi ve ark., 2010) ve farklı sulama rejimlerinde ayçiçeğinde de (Soleimanzadeh ve ark., 2010) bulunmuştur. Bu sonuçla uyumlu şekilde, K eksikliği koşullarında SOD aktivitesindeki artış, mısırdaki (Tewari ve ark., 2004), dutta (Tewari ve ark., 2007) ve yabancı arpada (*Hordeum maritimum* L.) (Hafsi ve ark., 2011) bulunmuştur. Farklı biyotik ve abiyotik stresler tarafından oksidatif stresin indüklenmesi sonucu SOD aktivitesinde artış olduğu iyi bilinmektedir (Fodor ve ark., 1997; Van Breusegem ve ark., 1999). Stres koşulları altında elektron transfer sistemindeki elektron sızıntısından dolayı süperoksit radikal ( $O_2^{\cdot-}$ ) oluşumu üzerinde durulmaktadır (Foyer ve Noctor, 2000). Söz konusu SOD aktivitesindeki artış K eksikliği altında  $O_2^{\cdot-}$  düzeyinin yüksek olduğunu işaret etmektedir. Bitkilerin K beslenmesinin iyileştirilmesi, NAD(P)H oksidazların aktivitesinin azaltılması ve fotosentetik elektron taşınımının devam ettirilmesi yoluyla reaktif oksijen radikalleri üretimini önemli ölçüde engelleyebilir (Çakmak, 2005). Süperoksit dismutaz enzim aktivitesinin potasyumun yeterli oranda uygulandığı dozda azalması, süperoksit dismutazın süperoksit radikalının hidrojen peroksit ve oksijene dismutasyonunu katalizlediğini göstermektedir.

Abiyotik stres koşulları altında  $H_2O_2$ 'in detoksifike edilmesinde APX önemli bir rol oynamaktadır (Gratao ve ark., 2005). Askorbat peroksidaz askorbat-glutasyon döngüsünde anahtar bir enzimdir ve askorbik asitin dehidro askorbata döndürülmesiyle peroksitleri yok eder (Asada, 1992; Foyer ve Noctor, 2005). Kadmiyum uygulamasına bağlı olarak APX'daki artış, fasulyede (Chaoui ve ark., 1997; Smeets ve ark., 2005), Cd'a hassas arpada (Tiryakioğlu ve ark., 2006), ekmeklik buğdayda (Khan ve ark., 2007), mısır köklerinde (Malekzadeh ve ark., 2007), ıspanakta (Pandey ve ark., 2009), kamışta (*Spartina densiflora*) (Martinez

Dominguez ve ark., 2010), maş fasulyesinde (*Vigna radiata* (L.) Wilczek) (Anjum ve ark., 2011); azalış ise hıyar bitkisinin kloroplastlarında (Zhang ve ark., 2003), yüksek CdCl<sub>2</sub> dozunda kahve hücrelerinde (Gomes-Junior ve ark., 2006) ve hıyar fidelerinde (Gonçalves ve ark., 2007) bulunmuştur.

Bu çalışmada, tüm potasyum dozlarında Cd uygulamasına bağlı olarak APX aktivitesinin arttığı bulunmuştur. Kadmiyum uygulaması (20 µM) altında, potasyumun 250 ve 2000 µM dozlarında APX aktivitesinin 50 µM K dozuna göre daha yüksek olduğu bulunmuştur (Şekil 4.8). Bu sonuçlarla uyumlu olarak, ilgili koşullarda bitkilerin toplam askorbik asit ve SH-bileşikleri düzeyinin düşük olduğu görülmektedir (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5). Bununla birlikte, aynı koşullarda SOD aktivitesinin azalması (Şekil 4.7) ve APX aktivitesinin artması (Şekil 4.8) etkin şekilde hidrojen peroksite detoksifikasyonunu indükleyebilir. Askorbat peroksidaz aktivitesinin Cd<sub>0</sub> ve K eksikliği koşullarında yüksek olması, söz konusu koşullarda çözünür protein düzeyindeki (Şekil 4.6) yükseklikle uyumlu görünmektedir.

Potasyum ve magnezyum eksikliği koşullarında hidrojen peroksite karşı koruyucu enzimlerin düzeyinin artmasının yapraklarda karbonhidratların özellikle sukrozun birikimiyle ilgili olduğu bildirilmiştir (Çakmak ve ark., 1994 a:b). Bu durum, ilgili elementlerin eksikliği koşullarında fotoredüktantların karbondioksit fiksasyonunda kullanılmasının sınırlandırılmasıyla toksik oksijen türevlerinin oluşumuna önderlik etmesiyle ilgilidir (Çakmak, 1994). Aktif oksijen türevlerinin oluşumu ve detoksifikasyonu arasındaki dengenin, stres süresince hücrenin canlılığını devam ettirebilmesinde önemli olduğu bildirilmiştir (Shewfelt ve Erickson, 1991). Bu denge aktif oksijen türevlerinden hidrojen peroksit lehine bozulursa, sonuçta ağır metal stresine bağlı oksidatif zararlanma oluşabilir. Buradan hareketle, askorbat peroksidaz enzim aktivitesinde kadmiyum uygulamasıyla meydana gelen artışın bitkinin savunma sisteminin aktive edilmesiyle ilgili olduğu söylenebilir.

Hidrojen peroksite kloroplastlarda etkin bir şekilde yıkımı için askorbat-glutatiyon döngüsü yoluyla APX'in indüklenmesine ihtiyaç vardır ki bu durumda APX elektron verici olarak askorbatı kullanır ve GR okside glutatiyonun (GSSG) NADPH'a bağımlı indirgenmesini ve redükte formda (GSH) kalmasını katalize eder

ve yüksek bir GSH/GSSG oranını ve karbondioksit fikse eden enzimlerin aktivasyonunun sürekliliğini sağlar (Noctor ve Foyer, 1998). Toplam yaprak GR aktivitesinin büyük çoğunluğunun kloroplastlarla ilişkili olduğu bildirilmiştir (Alscher ve Hess, 1993). Kadmiyum uygulamasına bağlı olarak GR aktivitesindeki artış; fasulyede (Smeets ve ark., 2005), ekmeklik buğdayda (Khan ve ark., 2007), ayçiçeğinde (Hatata ve Abdel-Aal, 2008), ıspanakta (Pandey ve ark., 2009) ve kamışta (*Spartina densiflora*) (Martinez Dominguez ve ark., 2010) bulunmuştur. Bu artışlar, hücrelerdeki  $H_2O_2$ 'in toksik düzeylerinin kısmen azaltılmasında yardımcı olmaktadır. Bu çalışmada, yetersiz potasyum dozlarında daha fazla olmak üzere, Cd uygulaması GR aktivitesinin azalmasına yol açmıştır (Şekil 4.9). Kadmiyum uygulamasına bağlı GR aktivitesindeki azalış, hıyarda (Zhang ve ark., 2003) kamış (*Phragmites australis* Trin. (Cav.) ex Steudel) kloroplastlarında (Pietrini ve ark., 2003) ve buğdayda (Ahmad ve ark., 2009) bulunmuştur. Söz konusu azalış oranlarının yetersiz K beslenmesinde yüksek olması, aynı koşullarda Cd uygulanmadığı zamanki GR aktivitesinin yüksekliği ile daha yakından ilgilidir. Yine de, tüm K dozlarında kontrol bitkilerine göre, Cd uygulamasıyla enzim aktivitesinde görülen azalma, Cd'un tiyol gruplarına bağlanması ve bir tiyol içeren enzim olan GR'ın inaktif hale getirilmesiyle de ilgili olabilir (Creissen ve Mullineaux, 1995). Potasyum eksikliği koşullarında GR aktivitesindeki artış dutta (Tewari ve ark., 2007) ve düşük düzeyde de olsa fasulyede (Çakmak, 1994) bulunmuştur.

Güçlü bir oksidant olan  $H_2O_2$ 'in hücrelerde birikimi ya CAT ya da askorbat-glutatiyon döngüsünde APX tarafından  $H_2O$ 'ya indirgenerek önlenir. Katalaz, peroksizomlarda lokalize olmuştur ve  $H_2O_2$ 'in  $H_2O$  ve  $O_2$ 'e dismutasyonunu sağlamaktadır (Corpas ve ark., 1999). Katalazın süperoksit radikale ( $O_2^{\cdot-}$ ) karşı hassas olduğu  $O_2^{\cdot-}$ 'in artan düzeyleri tarafından inaktif hale geldiği bildirilmiştir (Fridovich, 1986).

Kadmiyum uygulamasına bağlı olarak CAT aktivitesinin, ekmeklik buğdayda (Khan ve ark., 2007), Cd'a hassas hıyar çeşidinde (Gzyl ve ark., 2009), 25 ppm'e kadar kırmızı turpta (El-Beltagi ve ark., 2010) ve mısır ve buğdayda (Zhao, 2011) arttığı bulunmuştur. Katalaz aktivitesindeki artış, oksidatif stresin dolaylı bir göstergesi olarak düşünülmektedir (Smirnoff, 1995). Nitekim, Cd'un oksidatif strese

neden olduğu (Hendry ve ark., 1992; Somashekaraiah ve ark., 1992), fakat diğer ağır metallerin örneğin Cu'ın tersine, reaktif oksijen türevlerinin üretimine doğrudan neden olmadığı (Salin, 1988) bildirilmiştir. Katalaz aktivitesinin kadmiyum uygulamasından, kamışta (*Phragmites australis* Trin. (Cav.) ex Steudel) (Pietrini ve ark., 2003) ve mısırdaki (Malekzadeh ve ark., 2007) etkilenmediği bulunurken; fasulyede (Somashekaraiah ve ark., 1992; Chaoui ve ark., 1997), maş fasulyesinde (*Phaseolus aureus* Roxb.) (Shaw, 1995), ayçiçeğinde (Gallego ve ark., 1996) ve ekmeklik buğdayda (Ahmad ve ark., 2009) azaldığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada, Cd uygulamasına bağlı olarak CAT aktivitesinin tüm potasyum dozlarında, özellikle de 2000  $\mu\text{M}$  K dozunda daha belirgin olmak üzere artış gösterdiği bulunmuştur (Şekil 4.10). Potasyum beslenmesinin iyileşmesiyle enzim aktivitesinde meydana gelen düşüş, hem Cd<sub>0</sub> hem de 20  $\mu\text{M}$  Cd uygulaması altında ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlarla uyumlu olarak, ayçiçeğinde yapılan bir çalışmada farklı sulama rejimlerinde artan K beslenmesine bağlı olarak CAT aktivitesinin önemli oranda düştüğü bulunmuştur (Soleimanzadeh ve ark., 2010). Yabani arpada (*Hordeum maritimum* L.) ise K beslenmesiyle CAT aktivitesinin değişmediği bulunmuştur (Hafsi ve ark., 2011). Katalaz aktivitesinin 20  $\mu\text{M}$  Cd uygulaması altında artan K beslenmesiyle azalması (Şekil 4.10), aynı koşullarda önemli düzeyde artış gösteren APX aktivitesine (Şekil 4.8) bağlı olabilir. Nitekim, CAT aktivitesindeki söz konusu azalışın, peroksizomal proteazların indüklemesine bağlı degradasyon veya enzimin ışığa bağlı inaktivasyonu ile ilgili olduğu bildirilmiştir (Sandalio ve ark., 2001). Bu çalışmada, CAT aktivitesindeki azalma ile APX aktivitesindeki artış ilişkili bulunmuştur. Tüm K dozlarında, SOD (Şekil 4.7) ve CAT (Şekil 4.10) aktivitelerindeki değişimin paralellik göstermesi, hücre metabolizmasındaki rollerinin tamamlayıcı olmasından dolayı kadmiyuma bağlı oksidatif stresin etkisini hafifletmede ilgili enzimlerin birlikte kritik bir rol oynadığını göstermektedir (Benavides ve ark., 2005). Katalaz aktivitesinin kadmiyum uygulamasıyla birlikte artış göstermesi, hidrojen peroksite karşı koruyucu mekanizmanın efektif olduğu anlamına gelmektedir. Özellikle de bu durumun, potasyumun yeterli düzeyde uygulandığı dozda daha etkili olduğu söylenebilir.

Guaiakol peroksidazlar yaygın bir şekilde stres enzimleri olarak kabul edilirler ve Cd'u da içeren stres koşullarında aktive olurlar (Radotic ve ark., 2000; Sobkowiak ve ark., 2004). Guaiakol peroksidaz (GPX), askorbik asit için daha az spesifik olup, kloroplastik olmayan ve daha çok hücre duvarlarında ve sitoplazmada lokalize olan bir enzimdir (Asada, 1992). Bu çalışmada, tüm potasyum dozlarında Cd uygulamasına bağlı olarak GPX aktivitesinin önemli ölçüde yükseldiği görülmüştür (Şekil 4.11). Yüksek GPX aktivitesi bu enzimin lokalize olduğu hücre duvarları ve / veya sitoplazmada yüksek düzeyde hidrojen peroksit üretiminin olduğuna işaret etmektedir (Gaspar ve ark., 1985). Söz konusu K eksikliği koşullarındaki yüksek enzim aktivitesi, hidrojen peroksin oksidatif olaylarda kullanıldığını göstermektedir. Kadmiyuma bağlı GPX aktivitesindeki artış fasulyede bulunmuştur (Smeets ve ark., 2005). Yine, fasulyede yapılan bir çalışmada Cd'a bağlı GPX aktivitesindeki en belirgin artışın gövdede olduğu bulunurken (Chaoui ve ark., 1997); bezelyenin GPX aktivitesinde azalma olduğu (Sandalio ve ark., 2001) bulunmuştur. Bu çalışmada, K beslenmesinin iyileşmesine bağlı olarak hem Cd<sub>0</sub> hem de 20 µM Cd dozlarında hem GPX aktivitesinin (Şekil 4.11) hem de lipid peroksidasyonunun (Şekil 4.3) belirgin ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, K beslenmesinin iyileşmesine bağlı olarak hidrojen peroksit düzeyinin azaldığını, potasyumun detoksifikasyon mekanizmasına yardımcı olduğunu göstermektedir. Bu sonuçla uyumlu şekilde, yeterli K beslenmesinde düşük GPX aktiviteleri, fasulyede (Çakmak, 2005) ve yabani arpada (*Hordeum maritimumda* L.) (Hafsi ve ark., 2011) tespit edilmiştir. Benzer şekilde, farklı su rejimlerinde artan K beslenmesine bağlı olarak GPX aktivitesinin de önemli oranda azaldığı bulunmuştur (Soleimanzadeh ve ark., 2010).

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kadmiyum uygulaması altında bitkilerin potasyum beslenmesinin iyileştirilmesi hem yeşil aksamın hem de köklerin kuru madde üretiminin artmasını sağlamıştır.

Bitkilerin yeterli düzeyde K'la beslenmesi hem yeşil aksam hem de köklerde Cd konsantrasyonunun azalmasına neden olmuştur.

Kadmiyum uygulamasına bağlı olarak klorofil konsantrasyonunda meydana gelen azalma, bitkilerin K beslenmesinin iyileşmesine bağlı olarak azalmıştır.

Kadmiyum uygulaması altında bitkilerin K beslenmesinin iyileştirilmesi hem yeşil aksamın hem de köklerin lipid peroksidasyonunu azaltmıştır. Bu durum, K'un Cd'a bağlı hücre membranlarının tahribatının azaltılmasındaki rolünü ortaya koymaktadır.

Bitkilerin K beslenmesinin yeterli olduğu koşullarda, hem kontrol hem de Cd uygulaması altında, askorbik asit düzeylerinin azalması askorbik asitin oksidatif strese karşı korunmada kullanıldığına işaret etmektedir. Benzer durum SH-bileşikleri için de geçerlidir. Yeterli K beslenmesi koşullarında etkin bir askorbat-glutatiyon döngüsünün varlığı oksidatif stresle mücadelede önemlidir.

Kadmiyum uygulamasıyla düşme eğilimi gösteren çözüner protein konsantrasyonu 2000  $\mu$ M K dozunda yükselmiştir. Bu durum, yeterli potasyum uygulamasına bağlı olarak Cd stresine karşı stres proteinlerinin sentezlenmiş olabileceğine işaret etmektedir.

Potasyum eksikliği koşullarında yüksek SOD aktivitesi süperoksit radikal düzeyinin yüksek olduğunu gösterirken, K beslenmesinin iyileşmesiyle birlikte enzim aktivitesinin azaldığı bulunmuştur. Potasyumun en yüksek dozunda Cd uygulamasıyla SOD aktivitesinde belirgin bir artış olmuştur. Bu durum, ilgili koşullarda K'un Cd'a bağlı oksidatif strese karşı savunmada etkin rol oynadığını gösterebilir.

Kadmiyum uygulamasına bağlı olarak, APX aktivitesinin bitkilerin K beslenmesiyle önemli oranda arttığı bulunmuştur. Bu durum, K'un, hidrojen peroksidin detoksifikasyonunda etkili olduğunu göstermektedir. Enzim aktivitesinin,

Cd uygulaması olmayan koşullarda K beslenmesinin iyileşmesiyle birlikte azalması, dokularda hidrojen peroksit düzeyinin düştüğünü göstermektedir.

Potasyumun düşük düzeyde uygulandığı koşullarda Cd uygulamasıyla inaktif hale gelen GR enziminin, yeterli K beslenmesi altında daha yüksek aktivite göstermiş olması, K'un Cd kaynaklı oksidatif zararlanmayı azaltmadaki rolünü göstermektedir.

Katalaz aktivitesi Cd kaynaklı oksidatif stresin bir göstergesi olarak tüm potasyum dozlarında, özellikle de en yüksek K dozunda artış göstermiştir. Bu durum, hidrojen peroksite karşı koruyucu mekanizmanın aktif olduğunu göstermektedir. Kem kontrol hem de Cd uygulaması altında K beslenmesinin artmasıyla enzim aktivitesinin azalmış olması, ilgili koşullarda APX aktivitesindeki artışla ilişkili bulunmuştur. Tüm K dozlarında SOD ve katalaz aktivitelerindeki değişimin paralellik göstermesi, hücre membranlarındaki rollerinin tamamlayıcı olmasından dolayı kadmiyuma bağlı oksidatif stresin etkisinin hafifletilmesinde ilgili enzimler birlikte kritik bir rol oynamaktadır.

GPX aktivitesinin Cd uygulamasıyla tüm K dozlarında artması, hidrojen peroksite karşı savunma sisteminin aktif hale geldiğini göstermektedir. Bitkilerin K beslenmesinin iyileşmesine bağlı olarak hem kontrol hem de Cd uygulaması altında GPX aktivitesinin azalması dokularda hidrojen peroksit düzeyinin azaldığını, K'un detoksifikasyon mekanizmasına yardımcı olduğunu göstermektedir.

Özet olarak, bitkilerin potasyum beslenmesinin iyileştirilmesi, bitki dokularında Cd konsantrasyonunun seyrelmesine, lipid peroksidasyonunun azalmasına ve özellikle de yeterli potasyum uygulamasında antioksidatif enzimlerin aktivitelerinin artmasına yol açmıştır. Buradan hareketle, ıspanakta Cd toksisitesine bağlı oksidatif zararlanmanın etkisinin azaltılmasında K beslenmesinin kritik bir rol oynayabileceğini söyleyebiliriz. Bu nedenle, Cd'ca kirlenmiş ya da kirlenme riski olan alanlarda yetiştiricilik yapılırken, özellikle de yaprağı tüketilen sebzeler yetiştirilirken bitkilerin K beslenmesinin yeterli düzeylerin altına düşmesinin önlenmesinde yarar vardır.

## KAYNAKLAR

- ABD EL-HADİ, A. H., ISMAİL, K. M., EL-AKAHAWY, M. A. (1997): Effect of potassium on the drought resistance of crops in Egyptian conditions, in Johnston, A. E.: Food Security in the WANA Region, the Essential Need for Balanced Fertilization. International Potash Institute, Basel, pp. 328–336.
- AHMAD, I., NAEEM, M., KAHN, N.A. ve SAMIULLAH 2009. Effects of cadmium stress upon activities of antioxidative enzymes, photosynthetic rate, and production of phytochelatin in leaves and chloroplasts of wheat cultivars differing in yield potential. *Photosynthetica* 47(1): 146-151.
- ALLOWAY, B. J. 1995. Cadmium. pp. 122-152. In Alloway, B. J. (2.ed.) Heavy metals in soils. Blackie, London.
- ALSCHER, R. G., ve HESS, J.L. 1993: Antioxidants in higher plants. CRC Press, Boca Raton, FL.
- ALSCHER, R.G., DONAHUE, J.L., ve CRAMER, C.L. 1997. Reactive oxygen species and antioxidants: relationships in green cells. *Physiologia Plantarum* 100, 224-233.
- AMAR, C.; STEVE, M.; PAUL, G.; BRIAN, C.; COLIN, C. S.; ANDREW, G.; JEFFREY, B.; COLIN, C.; MARK, A. 2007. Cadmium availability to wheat grain in soils treated with sewage sludge or metal salts *Chemosphere* 66 1415-142
- ANDERSSON, A. ve BINGEFORS, S. 1985. Trends and annual variations in Cd concentrations in grain of winter wheat. *Acta. Agric. Scand.*
- ANJANA, UMAR, S., AND M. IQBAL. 2006. Functional and structural changes associated with cadmium in mustard plant: Effect of applied sulphur. *Commun Soil Sci Plant Anal* 32: 1205-1217
- ANJUM, N.A., S. UMAR, A. AHMAD, AND M. IQBAL. 2008a. Responses of components of antioxidant system in mungbean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] genotypes to cadmium stress. *Commun Soil Sci Plant Anal*, In Press.



- ANJUM, N.A., S. UMAR, A. AHMAD, M. IQBAL, AND N.A. KHAN. 2008b. Ontogenic variation in response of *Brassica campestris* L. to cadmium toxicity. *Journal of Plant Interact* DOI: 10.1080/17429140701823164.
- ANJUM, N.A., UMAR, S., IQBAL, M. ve KHAN, N.A. 2011 Cadmium causes oxidative stress in mung bean by affecting the antioxidant enzyme system and ascorbate-glutathione cycle metabolism. *Russian Journal of Plant Physiology* Volume 58, Number 1, 92-99,
- ANU-MURIEFAH, S.S. 2008. Growth parameters and elemental status of cucumber (*Cucumis sativus*) seedlings in response to cadmium accumulation. *Int. J. Agri. Biol.* 10: 261-6.
- ARNON, I. 1966. Quality criteria of agricultural produce and the influence of mineral fertilizers on quality. Potassium symposium, Internat, Potash Inst. Brussels, 339-400.
- ASADA, K. 1992. Ascorbate peroxidase- a hydrogen peroxide-scavenging enzyme in plants. *Physiol. Plant.*, 85: 235-241
- ASADA, K. 1992. Production and scavenging of active oxygen in chloroplasts, in: J. G. Scandalios (ed.), *Current Communications* 5, In *Cell and molecular Biology, Molecular Biology of Free Radical Scavenging Systems*. Cold Spring Harbor Laboratory Press, New York , pp.173-192.
- ASADA, K. 1994. Mechanisms for scavenging reactive molecules generated in chloroplasts under light stress. In: Baker, N.R., Bowyer, J.R. (editörler); *Photoinhibition of Photosynthesis-from Molecular Mechanisms to the Field*. BIOS Scientific Publishers, Oxford, sayfa 129-142.
- ASADA, K. ve TAKAHASHI, M.1987. Production and scavenging of active oxygen in photosynthesis. In *Photoinhibition: Topics in Photosynthesis*(eds KYLE, D.J., OSMOND, C.B ve ARNTZEN C.J.), 227-287
- ASADA, K., 2000. The water-water cycle as alternative photon and electron sinks. *Philosophical Transactions of the Royal Society, B.* 355, 1419-1430.

- ASADA, K., TAKAHASHI, M., TANAKA, K. ve NAKANO, Y. 1977. Formation of active oxygen and its fate in chloroplasts. *In* O Hayaishi, K. Asada, eds, Biochemical and Medical Aspects of Active Oxygen, Japan Scientific Societies Press, Tokyo, pp. 45-63.
- ASTOLFI S, ZUCHI S, PASSERA C. 2004 Role of sulphur availability on cadmium-induced changes of nitrogen and sulphur metabolism in maize (*Zea mays* L.) leaves. *J. Plant Physiol.* Jul;161(7):795-802
- AZEVEDO, H., FERNANDES, J., LOUREIRO, S. ve SANTOS, C. 2005. Cadmium effects on sunflower growth and photosynthesis. *Journal of Plant Nutrition*, 28:2211-2220.
- BADIANI. M., D'ANNIBALE, A., PAOLACCI, AR AND FUSARI, A. (1996) Modifying the expression of antioxidant systems in transgenic plants. *Agro-Food Industry Hi-Tech March / April.* 21-26
- BAKER, M.S. ve GEBICKI, J.M. 1984. *Arch. Biochem. Biophys.* 234: 258-264.
- BARCELO, J. ve POSCHENRIEDER, C. 1990. Plant water relations as affected by heavy metal stress: A review. *Journal of Plant Nutrition* 13: 1-37.
- BENAVIDES, M. P., GALLEGO, S. M. ve TOMARO, M. L. 2005. Cadmium toxicity in plants. *Braz. J. Physiol.*, 17(1):21-34.
- BHATTACHARYA, M. AND CHAUDHURI, M.A. 1995. Heavy metal (Pb<sup>2+</sup> & Cd<sup>2+</sup>) stress-induced damages in *Vigna* seedlings and possible involvement of phytochelaton-like substances in mitigation of heavy metal stress. *Indian J. Env. Bull.* 33, 236–238.
- BINGHAM, F.T. 1979. Bioavailability of Cd to food crops in relation to heavy metal content of sludge-amended soil. *Environmental Health Perspectives* Vol.28.pp 39-43.
- BINGHAM, F.T., PAGE, A.L., MAHLER, R.J. ve GAMJE, T. J. 1975. Growth and cadmium accumulation of plants grown on a soil treated with a cadmium-enriched sewage sludge. Published in *J environ qual* 4:207-211.
- BINGHAM, F.T., SPOSITO, G. ve STRONG, E. 1984. The effect of chloride on the availability of cadmium. *J. Environ. Qual* 13:71-74.

- BODONNES, R.S. ve CHAN, P.C. 1979. Ascorbic acid as a scavenger of singlet oxygen. *FEBS Lett.*, 105: 195-196.
- BOUSSAMA, N., OUARITI, O., SUZUKI, A. AND GHORBAL, M. H. 1999. Cd-Stress on Nitrogen Assimilation. *J. Plant Physiol.*, 155: 310–317.
- BOWLER, C., VAN MONTAGU, M. ve INZE, D. 1992. Superoxide dismutase and stress tolerance. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 43: 83-116.
- BRADFORD, M.M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the protein-dye binding. *Anal. Biochem.*, 72: 248-254.
- BROADLEY MR, WILLEY NJ, WILKINS JC, BAKER AJM, MEAD A, WHITE PJ., 2001 Phylogenetic variation in heavy metal accumulation in angiosperms. *New Phytol.*;152:9–27.
- C. TH YS, P. VANTHOMME, E. SCHREVEENS, M. DE PROFT . 1991. Interactions of Cd with Zn, Cu, Mn and Fe for lettuce (*Lactuca sativa* L.) in hydroponic culture *Plant, Cell & Environment* Volume 14, Issue 7, pages 713–717
- CAKMAK, I. 1994. Activity of ascorbate-dependent H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-scavenging enzymes and leaf chlorosis are enhanced in magnesium- and potassium-deficient leaves, but not in phosphorus-deficient leaves. *Journal of Experimental Botany* 45: 1259-1266.
- CAKMAK, İ. 2000. Role of zinc in protecting plant cells from reactive oxygen species. *New Phytologist* 146: 185-205.
- CAKMAK, I. 2005 The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. *Plant Nutr. Soil Sci.* 168,521-530.
- CAKMAK, İ. ve HORST W.J. 1991. Effect of aluminium on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, peroxidase activities in root tips of soybean (*Glycine max* L.). *Physiol. Plant.* 83: 463 -468.
- CAKMAK, I. ve MARSCHNER, H. 1992a. Magnesium deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, and glutathione reductase in bean leaves. *Plant Physiol.*, 98: 1222-1227.

- CAKMAK, I. ve MARSCHNER, H. 1992b. Magnesium deficiency enhances resistance to paraquat toxicity in bean leaves. *Plant, Cell and Environ.*, 15: 955-960.
- CAKMAK, I., ENGELS, C., 1999. Role of mineral nutrients in photosynthesis and yield formation. In: *Mineral nutrition of crops: mechanisms and implications*. Z. Rengel (Ed.). The Haworth Press, New York. pp. 141-168.
- CAKMAK, I., HENGELER, C. ve MARSCHNER, H. 1994. Changes in phloem export of sucrose in leaves, in response to phosphorus, potassium and magnesium deficiency in bean plants. *Journal of Experimental Botany* 45, 1251-1257.
- CAKMAK, I., HENGELER, C. ve MARSCHNER, H. 1994. Partitioning of shoot and root dry matter production and carbohydrates in bean plants suffering from phosphorus, potassium and magnesium deficiency. *Journal of Experimental Botany* 45, 1245-1250.
- CAKMAK, I., ROMHELD, V., 1997. Boron deficiency-induced impairments of cellular functions in plants. *Plant and Soil* 193, 71-83.
- CATALDO, D.A., T.R. GALAND ve R.E. WILDUNG. 1983. Cadmium uptake kinetics in intact soybean plants. *Plant Physiol.* 73:844-848.
- CHAOUI, A., MAZHOUDI, S., GHORBAL, M.H. ve FERJANI E.E. 1997. Cadmium and zinc induction of lipid peroxidation and effects on antioxidant enzyme activities in bean. *Plant Science* 127 ,139-147.
- CHEN, X., WANG, J., SHI, Y., ZHAO, M.Q. and CHI, G.Y. 2011. Effects of cadmium on growth and photosynthetic activities in pakchoi and mustard *Botanical Studies* 52: 41-46.
- CHUGH, L. K. AND SAWHNEY, S. K. 1999. Effect of Cadmium on Activities of Some Enzymes of Glycolysis and Pentose Phosphate Pathway in Pea. *Biol. Plant.*, 42: 401–407.

- CHUNILALL, V., KIDNESS, A. ve JONNALAGADDA, S. B. 2004. Heavy metal uptake by Spinach leaves grown on contaminated soils with lead, mercury, cadmium, and nickel. *Journal of Environmental Science and Health. Part B- Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes* Vol. B39, No. 3, pp. 473-481.
- CIECKO, Z., KALEMBASA, S., WYSZKOWSKI, E. ve ROLKA, E. 2004. Effect of soil contamination by cadmium on potassium uptake by plants. *Polish Journal of Environmental Studies*. Vol. 13. No. 3 (2004): 333-337.
- CISCATO, M., VANGRONSVELD, J. ve VALCKE, R. 1999. Effects of heavy metals on the fast chlorophyll fluorescence induction kinetics of photosystem II: a comparative study, *Z. Naturforsch.* 54 ,735- 739.
- CORPAS, F., PALMA, J.M., SANDALIO, L.M. ve BARROSO, J.B. 1999. Purification of catalase from pea leaf peroxisomes: identification of five different isoforms. *Free Rad REs* 31:235-241.
- CREÏSSEN GP, MULLINEAUX PM (1995) Cloning and characterization of glutathione reductase cDNAs and identification of two genes encoding the tobacco enzyme. *Planta* 197: 422–425
- DALHURZO, H.C., SANDALIO, L.M. ve GORNEZ, M. 1997. Cadmium infiltration of detached pea leaves: Effects on its activated oxygen metabolism. *Phyton-Ann Rei Botanicae* 37: 59-64.
- DAVIES, C.S., NIELSEN, S.S. ve NIELSEN N.C. 1987. Flower improvement of soybean preparations by genetic removal of lipoxygenase. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 64: 1428-1433.
- DAVIS, R.D., ve CALTON-SMITH, C. 1980. *Crops as Indicators of the Significance of Contamination of Soil by Heavy Metals*, WRC, Stevenage TR140.
- DEAL, K. R., GOYAL, S., DVORAK, J. (1999): Arm location of *Lophopyrum elongatum* genes affecting K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> selectivity under salt stress. *Euphytica* 108, 193–198.
- DEGREAVE N (1981) Carcinogenesis, teratogenic and mutagenic effects of cadmium. *Mutation Res* 86, 115-122.

- DEMMING-ADAMS, B., ADAMS, W.W., III., 1992. Photoprotection and other responses of plants to high light stress. *Annual Review of Plant Physiology Plant Molecular Biology* 43,599-626.
- DINAKAR, N., NAGAJYOTHI, P.C., SURESH, S. UDATKIRAN, Y. ve DAMODHARAM, T. 2008. Phytotoxicity of cadmium on protein, proline and antioxidant enzyme activities in growing *Arachis hypogaea* L. seedling. *J. Environ. Sci.* 20: 199-206.
- DIXIT, V., PANDEY, V. ve SHYAM, R.Ç. 2001. Differential antioxidative responses to cadmium in roots and leaves of pea. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 52, No. 358, pp. 1101-1109.
- DIXIT, V., PANDEY, V. AND R. SHYAM. 2001. Differential oxidative responses to cadmium in roots and leaves of pea (*Pisum sativum* L cv. Azad). *J Exp Bot* 52:1101-1109.
- DRAZKIEWICZ, M., E. SKORZYNSKA-POLIT, AND Z. KRUPA. 2003. Response of the ascorbate-glutathione cycle to excess copper in *Arabidopsis thaliana* (L.). *Plant Sci* 164:195-202.
- DU T.P. 2005. Food safety and strategy in China. *Productivity Res.* 6: 139-141. (in Chinese with English abstract).
- DUNAND, F.V., D. EPRON, B.A.SOSSÉ, AND P.M. BADOT. 2002. Effects of copper on growth and on photosynthesis of mature and expanding leaves in cucumber plants. *Plant Sci.* 163: 53-58
- EL-BALTAGI, H.S., MOHAMED, A.A. ve RASHED, M.M. 2010. Response of antioxidative enzymes to cadmium stress in leaves and roots of radish (*Raphanus sativus* L.). *Not. Sci. Biol.* 2 (4): 76-82.
- ELSTNER E F. 1982. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 33: 73-96.
- ELSTNER, E.F. 1987. Metabolism of activated oxygen species. In *The Biochemistry of Plants*. Vol. 11. Pp. 253-315. Academic Press, London.
- EPSTEIN, E. ve BLOOM A.J. 2005. *Mineral Nutrition of Plants: Principles and perspectives*, 2nd Edn. Sinauer Associates Inc., Sunderland MA.
- ERICSON, M.C. ve ALFINITO, A.E. 1984. Proteins produced during salt stress in tobacco cell cultures. *Plant Physiol.*, 74: 506-509.

- EWAS, E.A. 1997. Effect of cadmium, nickel and lead on growth, chlorophyll content and proteins of weeds. *Biologia Plantarum* 36 (3): 403-410.
- F. VAN BREUSEGEM, L. SLOOTEN, J.-M. STASSART, J. BOTTERMAN, T. MOENS, M.V. MONTAGU, D. INZÉ, (1999) Effects of overproduction of tobacco MnSOD in maize chloroplast on foliar tolerance to cold and oxidative stress, *J. Exp. Bot.* 50 71–78.
- FAROOQ, M., ANWAR, F. ve RASHID U. 2008. Appraisal of heavy metal contents in different vegetables grown in the vicinity of industrial area. *Pak. J. Bot.*, 40 (5): 2099-2106.
- FODOR, J., GULLNER, G., ADAM, A.L., BARNA, B., KÖMIVES, T. ve KIRALY, Z. 1997. Local and systemic responses of antioxidants to tobacco mosaic virus infection and salicylic acid in tobacco: role in systemic acquired resistance, *Plant Physiol.* 114 1443-1451.
- Foyer, C. H., Lopez-Delgado, H., Dat, J. F. and Scott, I. M. 1997. Hydrogen Peroxide- and Glutathione-Associated Mechanism of Acclimatory Stress Tolerance and Signalling. *Physiol. Plant.*, 100: 241–254.
- FOYER, C.H. 1993. Ascorbic acid. In *Antioxidants in Higher Plants* (R.G.Alscher and J.L.Hess.eds) pp. 31 58.CRC Press.Boca Raton, F.L. ISBN 0-8493-6328-4
- FOYER, C.H., DESCOURVIERS, P. ve KUNERT, K.J. 1994. Protection against oxygen radicals: An important defense mechanism studied in transgenic plants. *Plant, Cell Environ.* 17:507-523.
- FOYER, C.H., LOPEZ-DELGADO, H., DAT, J.E., SCOT, I.M., 1997. Hydrogen peroxide- and glutathione-associated mechanisms of acclimatory stress tolerance and signalling. *Plant Physiology* 100, 241-254.
- FOYER, C.H., NOCTOR, G., 2005. Oxidant and antioxidant signalling in plants: a reevaluation of the concept of oxidative stress in a physiological context. *Plant Cell and Environment* 28, 1056-1071.
- FOYER, H.H. ve NOCTOR, G. 2000. Oxygen processing in photosynthesis: regulation and signalling, *New Phytol.* 146 359-388.

- FRIDOVICH, I. 1986. Biological effect of the superoxide radical. *Arc. Biochem. Biophys*, 247, p.1.
- G IORDANO, P. M. AND D. A. MAYS.1977. "Yield and Heavy Metal Content of Several Vegetable Species Grown in Soil Amended with Sewage Sludge." In *Biological Implications of Heavy Metals in the Environment*. ERDA Rep. Conf. 750929, Oak Ridge, Tennessee.
- GALLEGO, SM, BENAVIDES, M.P. ve TOMARO ML. 1996. Effect of heavy metal ion excess on sunflower leaves: evidence for involvement of oxidative stres. *Plant Science* 121, 151-159.
- GASPAR, T., PENEL C. CASTILLO, J.F. ve GREPPIN, H. 1985. A two-step control of basic and acidic peroxidases and its significance for growth and development. *Physiol. Plant.* 64: 418-423.
- GOMES-JUNIOR RA, MOLDES CA, DELITE FS, POMPEU GB, GRATAO PL, MAZZAFERA P, LEA PJ, AZEVEDO RA (2006) Antioxidant metabolism of coffee cell suspension cultures in response to cadmium. *Chemosphere* 65: 1330–1337
- GONCALVES, J.F., BECKER, A.G., CARGNELUTTI, DENISE., PEREIRA, L.B., BATTISTI, V., SPANEVELLO, R.M., MORSCH, V.M. ve SCHETINGER, M. 2007. Cadmium toxicity causes axidative stres and induces response of the antioxidant system in cucumber seedlings. *Braz. J. Plant Physiol.*, 19(3): 223-232.
- GRANT, C.A., BUCKLEY, W.T., BAILEY, L.D. ve SELLES, F. 1998. Cadmium accumulation in crops. *Can. J. Plant Sci.* 78: 1-17.
- GRATAO, P.L., POLLE, A., LEA, P.J. ve AZEVEDO, R.A. 2005. Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. *Funct. Plant Biol.* 32, 481-494.
- GREGER, M. and OGREN, E. 1991. Direct and indirect effects of Cd<sup>2+</sup> on photosynthesis in sugar beet (*Beta vulgaris*). *Physiologia Plantarum*, 83: 129–135.
- GREGER, M. ve OGREN, E., 1991. Direct and indirect effects of Cd on photosynthesis in sugar beet. *Physiologia Plantarum* 83:129-135.



- GREWAL, J.S., SINGH, S.N., 1980. Effect of potassium nutrition on frost damage and yield of potato plants on alluvial soils of the Punjab (India). *Plant and Soil* 57,105-110.
- Grill, D., Esterbauer, H. ve Klosch, U. 1979. Effect of sulfur dioxide on glutathione in leaves of plants. *Environ. Pollut.* 17: 187-194.
- GU JG, ZHOU QX. 2002. Cleaning up through phytoremediation: a review of Cd contaminated soils. *Ecological Science (in Chinese)*, 21(4): 352-356
- GUETA-DAHAN Y., YANIV Z., ZILINSKAS B. A. AND BEN-HAYYIM G. 1997 Salt and oxidative stress: similar and specific responses and their relation to salt tolerance in citrus. *Planta* 203, 460–469.
- GUOPING, Z., JINGXING, C. ve TIRORE, E.A. 1999. Genotypic variation for potassium uptake and utilization efficiency in wheat. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 54: 41-48.
- GZYL, J., RYMER, K. ve GWOZDZ, E.A. 2009 Differential response of antioxidant enzymes to cadmium to stress in tolerant and sensitive cell line of cucumber. Vol. 56 No. 4/2009, 723-727.
- HAFSI, C., ROMERO, M. C., ABDELLY, C. ve SANDALİO, L. M. 2011. Antioxidative response of *Hordeum maritimum* L. To potassium deficiency. *Acta Physiol Plant* (2011) 33:193-202.
- HAGHIRI, F.: 1974, 'Plant uptake of cadmium as influenced by cation exchange capacity, organic matter, zinc, and soil temperature', *J. Environ. Qual.* 3, 180–183.
- HAKERLERLER, H., OKTAY, M., ERYÜCE, N., YAGMUR, B. (1997): Effect of potassium sources on the chilling tolerance of some vegetable seedlings grown in hotbeds, in Johnston, A. E.: *Food Security in the WANA Region, the Essential Need for Balanced Fertilization*. International Potash Institute, Basel, pp. 317–327.
- HALLIWELL, B. 1982. The toxic effects of oxygen on plant tissues. –In *Superoxide Dismutase* (L. L. Oberley, ed.), 90-123. CRC Press, Boca Raton, FL. ISBN 0-8493-6240-7.

- HALLIWELL, B. ve GUTTERIDGE JMC 2000. Free radicals in biology and medicine, 3rd edn. Clarendon Pres, Oxford.
- HASSAN, M.J., WANG, F., ALI, S. Ve ZHANG, G. 2005. Toxic effects of cadmium on rice as affected by nitrogen fertilizer form. *Plant Soil* 277:845-856.
- HATATA, M.M. ve ABDEL-AAL, E.A. 2008. Oxidative stress and antioxidative defence mechanisms in response to cadmium treatments. *J. Agric. And Environ. Sci.* 4 (6): 655-669.
- HENDRY, G.A. F., BAKER, A. J. M. ve EWART, C.F. 1992: Cadmium tolerance and toxicity, oxygen radical processes and molecular damage in cadmium-tolerant and cadmium sensitive clones of *holcus lanatus* L. *Acta Bot. Neerl.* 41, 271-281.
- HINESLY T D, ALEXSANDER D E, REDBORG K E, ZIEGIE E L. 1982. Differential accumulations of cadmium and zinc by corn hybrids grown on soil amended with sewage sludge. *Agronomy Journal*, 74,469- 474.
- HODGES, D.M., DeLONG, J.M., FORNEY C.F. ve PRANGE, R.K., 1999. Improving the thiobarbituric acid-reactive substances assay for estimating lipid peroxidation in plant tissues containing anthocyanin and other interfering compounds. *Planta*, 207: 604-611.
- HODGESON, R. A. J. ve RAISON, J. K. 1991. Superoxide production by thylakoids during chilling and its implication in the susceptibility of plants to chilling-induced photoinhibition. *Planta*, 183: 222-228.
- HOWDEN, R., ANDERSEN, C., GOLDSBROUGH, P.B. ve COBETT, C.S. 1995. A cadmium-sensitive, glutathione-deficient mutant of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiology*, 107: 1067-1073.
- HSU, Y.T., AND C.H. KAO., 2007. Cadmium-induced oxidative damage in rice leaves is reduced by polyamines. *Plant and Soil* 291:27-37.
- IQBAL N, MASOOD A, NAZAR R, SYEED S, KHAN NA., 2010 Photosynthesis, growth and antioxidant metabolism in mustard (*Brassica juncea* L.) cultivars differing in cadmium tolerance. *Agric Sci China.*;9:519–527

- ISMAİL, B.S., K. FARİHAH AND J. KHAİRİAH. 2005. Bioaccumulation of heavy metals in vegetables from selected agricultural areas. *B. Environ. Contam. Tox.*, 74: 320-327.
- JALIL,A., SELLES, F. ve CLARKE, J.M. 1994. Effect of cadmium on growth and the uptake of cadmium and other elements by durum wheat. *J Plant Nut* 17:1839-1858 .
- JARVIS, S.C., L.H.P. JONES ve M.C. HOPPER 1976. Cadmium uptake from solution by plants and its transport from root to shoots. *Plant Soil*. 44:179-191.
- JIA, Y., YANG, X., FENG, Y. ve JILANI, G. 2008. Differential response of root morphology to potassium deficient stres among rice genotypes varying in potassium efficiency. *J Zhejiang Univ Sci B* 9(5):427-434.
- JIANG, X.J., LUO, Y.M., LIU, Q., LIU, S.L. ve ZHAO, Q.G. 2004. Effect of cadmium on nutrient uptake and translocation by indian mustard. *Environmental Geochemistry and Health* 26: 319-324.
- JIMENEZ, A., HERNANDEZ, J.A., DEL-RIO, L.A. ve SEVILLA, F. 1997. Evidence for the presence of the ascorbate-glutathione cycle in mitochondria and peroxisomes of pea leaves. *Plant Physiol.*, 114: 275-284.
- KABATA-PENDÍAS A, PENDÍAS H (1992) Trace elements in soils and plants. 2nd edition. CRC press, Florida
- KACAR, B. 2005. Tarımda Potasyumun Yeri ve Önemi, s: 20-30, Eskişehir.
- KACAR, B. ve KATKAT, V. 1998. Bitki Besleme, Uludağ Üniversitesi Geliştirme Vakfı Yayın No. 127, Vipaş yayınları 3. Özhan Matbaası, Bursa s:595.
- KAFKAFİ, U. (1990): Impact of potassium in relieving plants from climatic and soil-induced stresses, in Johnston, A. E.: Food Security in the WANA Region, the Essential Need for Balanced Fertilization. International Potash Institute, Basel, pp. 317–327.
- KAFKAFI, U. 1990. Impact of potassium in relieving plants from climatic and soil-induced stresses in Johnston, A.E.: Food Security in the WANA Region, the Essential Need for Balanced Fertilization. International Potash Institute,i Basel, pp. 317-327.

- KAYA, C., KIRNAK, H., HIGGS, D. (2001): Effects of supplementary potassium and phosphorus on physiological development and mineral nutrition of cucumber and pepper cultivars grown at high salinity (NaCl). *J. Plant Nutr.* 24, 1457–1471.
- KHAN, N.A., SAMIULLAH, SINGH, S. ve NAZAR, R. 2007. Activities of antioxidative enzymes, sulphur assimilation, photosynthetic activity and growth of wheat cultivars differing in yield potential under cadmium stress. *Agronomy & Crop Science* 193, 435-444.
- KIRKHAM, M.B. 2006. Cadmium in plants on polluted soils: Effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments. *Geoderma* 137:19-32.
- KIYOSHI TANAKA, K., OTSUBO, T. VE KONDO, N. 1982. Participation of Hydrogen Peroxide in the Inactivation of Calvin-Cycle SH Enzymes in SO<sub>2</sub>-Fumigated Spinach Leaves Plant and Cell Physiology Volume23, Issue6 Pp. 1009-1018.
- KOLELI, N., EKER, S. ve CAKMAK, I. 2004. Effect of zinc fertilization on cadmium toxicity in durum and bread grown in zinc-deficient soil. *Environmental Pollution* 131 453-459.
- KOLELI, N. 1998. Değişik tahıl türlerinin ve buğday çeşitlerinin kadmiyum toksisitesine duyarlılığı ve buna çinko eksikliğinin etkisi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Adana.
- KUMAR, R. G. AND DUBEY, R. S. 1999. Glutamine Synthetase Isoforms from Rice Seedlings: Effects of Stress on Enzyme Activity and the Protective Roles of Osmolytes. *J. Plant Physiol.*, 155: 118–121.
- KÜTEVİN, Z. ve TÜRKEŞ, T. 1994. Sezecilik. S: 180-183.
- LAVON, R., SALOMON, R. VE GOLDSCHMIDT, E.E. 1999. Effect of potassium, magnesium, and calcium deficiencies on nitrogen constituents and chloroplast components in citrus leaves. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 124 (2): 158-162.
- LEE, S. M. AND LEUSTEK, T. 1999. The Effect of Cadmium on Sulphate Assimilation Enzymes in *Brassica juncea*. *Plant Sci.*, 141: 201–207.
- LEHOCZKY, E., SZABO, L. ve HORVATH, SZ. 1998. Cadmium uptake by lettuce in different soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 29(11-4), 1903-1912

- LI, H., YANG, X. ve LUO, A.C. 2001. Ameliorating effect of potassium on iron toxicity in hybrid rice. *J. Plant Nutr.* 24, 1849-1860.
- Lİ, H., YANG, X., LUO, A. C. (2001): Ameliorating effect of potassium on iron toxicity in hybrid rice. *J. Plant Nutr.* 24, 1849–1860.
- LI, Y., CHANEY, R.L. ve SCHNEITER, A.A. 1994. Effect of soil chloride level on cadmium concentration in sunflower kernels. *Plant Soil* 167:275-288.
- LIU H, ZHANG J, CHRISTIE P ve ZHANG F. 2008. Influence of iron plaque on uptake and accumulation of Cd by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings grown in soil. *Sci Total Environ* 394: 361–368
- LOZANO-RODRIGUEZ E, HERNANDEZ LE, BONAY P, CARPENA-RUIZ RO.,(1997) *Distribution of cadmium in shoot and root tissues of maize and pea plants: physiological disturbances. J Exp Bot* 306:123–128.
- MAAS FM, DE KOK LJ, PETERS JL, KUIPER PJC (1987) A comparative study on the effects of H<sub>2</sub>S and SO<sub>2</sub> fumigation on the growth and accumulation of sulphate and sulphhydryl compounds in *Trifolium pratense* L., *Glycine max* Merr. And *Phaseolus vulgaris* L. *J Exp Bot* 38:1459–1469
- MALEKZADEH, P., KHARA, J., FARSHIAN, S. ve RAHMATZADEH, S. 2007. Cadmium toxicity in maize seedlings: Changes in antioxidant enzyme activities and root growth. *Pakistan Journal of biological Sciences* 10(1): 127-131.
- MALİK, D.; SHEORAN, J.S.; SINGH, R. , 1992 Carbon metabolism in leaves of cadmium treated wheat seedlings. *Plant Physiol. Biochem.*, 30, 223–229.
- MARIA, D. ve TADEUSZ, B. 2005. Growth parameters and photosynthetic pigments in leaf segments of *Zea mays* exposed to cadmium, as related to protection mechanisms. *Plant. Physiol.*, 162: 1013-1021.
- MARSCHNER, H., 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*, 2 nd Edition. Academic Press, San Diego. 889 pp.
- MARSCHNER, H., CAKMAK, I., 1989. High light intensity enhances chlorosis and necrosis in leaves of zinc-, potassium- and magnesium-deficient bean (*Phaseolus vulgaris*) plants. *Journal of Plant Physiology* 134,308-315.

- MARSCHNER, H., KIRKBY, E. A., CAKMAK, I. (1996): Effect of mineral nutritional status on shoot-root partitioning of photo assimilates and cycling of mineral nutrients. *J. Exp. Bot.* 47, 1255–1263.
- MARSCHNER, H.; 1983: General introduction to the mineral nutrition of plants. In: A. LÄUCHLI, R. L. BIELESKI (Eds.): *Encyclopedia of Plant Physiology*, New Series, Vol. 15A, 5-60. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York.
- MARTINEZ DOMINGUEZ, D. , CORDOBA GARCIA, FRANCISCO., CANALEJO RAYA, A. ve TORONTERAS SANTIAGO, R. 2010. Cadmium-induced oxidative stress and the response of the antioxidative defense system in *spartina densiflora*. *Physiologia plantarum*. 139: 289-302.
- MATUSIK, J., BAJDA, T. ve MANECKI, M. 2008. Immobilization of aqueous cadmium by addition of phosphates. *J Hazard Mater* 152:1332-1339.
- McLAUGHLIN M. J., PALMER L. T., TILLER K. G., BEECH T. A., ve SMART M. K. 1994. Increased soil salinity causes elevated cadmium concentrations in field-grown potato tubers., *Journal of environmental quality*. Sept/Oct 1994. v. 23 (5) p. 1013-1018.
- McLAUGHLIN M., TILLER K., ve SMART M. 1997. Speciation of cadmium in soil solutions of saline/sodic soils and relationship with cadmium concentrations in potato tubers (*Solanum tuberosum* L.), *Australian journal of soil research*, 1997-01, 35 (1), ISSN 00049573, p183-198
- MEHRA, R.K. ve TRIPATHI, R.D. 1999. Phytochelatins and metal tolerance. In: Agrawal SB, Agrawal M, eds. *Environmental pollution and plant responses*. Boca Raton, FL: CRC Press, Lewis Publisher, 367-382.
- MENGEL, K. AND E.A. KIRKBY. 1987. *Principles of Plant Nutrition*. 4 th Edition. International Potash Institute, IPI, Bern, Switzerland. 685 p.
- METWALLY A, FINKEMEIER I, GEORGI M, DIETZ KJ (2003) Salicylic acid alleviates the cadmium toxicity in barley seedlings. *Plant Physiol* 132:272–281

- MICHALSKA, M. ve ASP, H. 2001. Influence of lead and cadmium on growth, heavy metal uptake, and nutrient concentration of three lettuce cultivars grown in hydroponic culture. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 32(3&4), 571-583.
- MITTLER, R. ve ZILINSKAS, B.A. 1991. Purification and characterization of pea cytosolic ascorbate peroxidase. *Plant Physiol.*, 97: 962-968.
- MOBİN, M., AND N. A. KHAN, 2007: Photosynthetic activity, pigment composition and antioxidative response of two mustard (*Brassica juncea*) cultivars differing in photosynthetic capacity subjected to cadmium stress. *J. Plant Physiol.* 164, 601-610.
- MONTILLET J-L, CACAS J-L, GARNIER L, MONTANÉ M-H, DOUKI T, BESSOULE J-J, POLKOWSKA-KOWALCZYK L, MACIEJEWSKA U, AGNEL J-P, VIAL A, TRIANTAPHYLIDÈS C (2004) The upstream oxylipin profile of *Arabidopsis thaliana*: a tool to scan for oxidative stress. *Plant J* 40:439–451
- MOUSTAKAS N.K. 2001. Cadmium accumulation and its effect on yield of lettuce, radish and cucumber.
- MOYA, J.L., ROS, R. ve PICAZO, I. 1993. Influence of cadmium and nickel on growth, net photosynthesis and carbohydrate distribution in rice plants. *Photosynthesis Res.*, 36:75-80.
- NEUE, H. U., SENADHIRA, C. D., SETTER, T. (1998): Strategies for dealing with micronutrient disorders and salinity in lowland rice systems. *Field Crops Res.* 56, 139–155.
- NEUE, H.U., SENADHIRA, C.D. ve SETTER, T. 1998. Strategies for dealing with micronutrient disorders and salinity in lowland rice systems. *Field Crops Res.* 56, 139-155.
- NOCTOR G, GOMEZ L, VANACKER H, FOYER CH.2002. Interactions between biosynthesis, compartmentation and transport in the control of glutathione homeostasis and signalling. *Journal of Experimental Botany*53,1283–1304

- NOCTOR, G. 2006. Metabolic signalling in defence and stress: the central roles of soluble redox couples *Plant, Cell & Environment* Volume 29, Issue 3, pages 409-425
- NOCTOR, G. ve C. H. FOYER, 1998: Ascorbate and glutathione: keeping active oxygen under control. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Bio.* 49,249-279.
- OBATA, H. ve UMEBAYASHI, M. 1997. Effects of cadmium on mineral nutrient concentrations in plants differing in tolerance for cadmium *Journal of Plant Nutrition* Volume 20, Issue 1, pages 97-105
- OBATA, H., N. INOUE, and M. UMEBAYSHI. 1996. Effect of Cd on plasma membrane ATPase from plant roots differing in tolerance to Cd. *Soil Sci. Plant Nutr.* 42:361-366.
- OUZOUNIDOU, G., MOUSTAKAS, M. AND ELEFThERIOU, E. P. 1996. Physiological and ultrastructural effects of cadmium on wheat leaves. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 32, 154-160.
- ÖZBEK, H., KAYA, Z., GÖK, M. ve KAPTAN, H. 1995. *Toprak Bilimi. Çukurova Üniversitesi Ziraat Fak. Genel yayın no: 73, Ders kitapları yayın no: 16, ADANA.*
- ÖZKUTLU, F. 2004. Makarnalık buğdayda kadmiyum alımı ve birikimi üzerine tuzluluğun ve çinko beslenmesine etkisi *Çukurova Üniversitesi, TEZ5008, s. 95. Adana*
- OZTURK, L., EKER S. ve OZKUTLU F. 2003. Effect of cadmium on growth and concentrations of cadmium, ascorbic acid and sulphhydryl groups in durum wheat cultivars. *Turk J Agric For* 27 161-168 TÜBİTAK
- PADMAJA K, PRASAD DDK, PRASAD ARK .,1990. Inhibition of chlorophyll synthesis in *Phaseolus vulgaris* L. seedlings by cadmium acetate. *Photosynth.* 24: 399-405
- PANDEY, N., PATHAK, G. C., PANDEY, D. K. ve PANDEY R. 2009. Heavy metals, Co, Ni, Cu, Zn and Cd, produce oxidative damage and evoke differential antioxidant responses in Spinach. *Braz. J Physiol.*, 21(2):103-111.



- PANKOVIC D, PLESNICAR M, MAKSIMOVIC IA, PETROVIC N, SAKAC Z and KASTORI R. 2000. Effect of nitrogen nutrition on photosynthesis in Cd-treated sunflower plants. *Ann Bot* 86: 841–847
- PATRA J., PANDA B.B. 1998. A comparison of biochemical responses to oxidative and metal stress in seedlings of barley, *Hordeum vulgare* L. *Environ. Pollut.* 101: 99–105.
- PIETRINI, F., LANNELLI, M.A. ve MASSACCI, A. 2003. Interaction of cadmium with glutathione and photosynthesis in developing leaves and chloroplasts of phragmites australis. *Plant Physiology* Vol.133, pp. 829-837.
- PINTO AP, MOTA AM, DE VARENNES A, PINTO FC (2004) Influence of organic matter on the uptake of cadmium, zinc, copper and iron by sorghum plants. *Sci Total Environ* 326: 239–274
- POLLE, A., 1996. Mehler reaction: friend or foe in photosynthesis? *Botanica Acta* 109,84-89.
- QADIR, S., M.I. QURESHI, S. JAVED, AND M.Z. ABDIN. 2004. Genotypic variation in phytoremediation potential of Brassica juncea cultivars exposed to Cd stress. *Plant Sci* 167: 1171-1181.
- RADOTIC, K., DUCIC, T. ve MUTAVDZIC, D. 2000. Changes in peroxidase activity and isoenzymes in spruce needles after exposure to different concentrations of cadmium. *Environ Exp Bot* 44: 105-113.
- RAUSER, W.E. 1995. Phytochelatins and related peptides, Structure, biosynthesis, and function. *Plant physiology*, 109: 1141-1149.
- REEVES RD, BAKER AJM.. 2000 Metal-accumulating plants. In: Raskin I, Ensley BD, editors. *Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment*. New York: John Wiley & Sons Inc.;. pp. 193–229.
- RENNENBERG, H., 1982. Glutathione metabolism and possible biological roles in higher plants. *Phytochemistry* 21, 2771-2781.
- RICHARDS, F.J. 1956. Some aspects of potassium deficiency in plants. Potash Symposium, Potash Inst. London, 59-73.

- RYAN, J. A., PAHREN, H. R. ve LUCAS, J. B., Controlling cadmium in the human chain: review and rationale based on health effects. *Environ. Res.*, 1982, 28(2), 251–302.
- SABIR, M., GILL, M.A. ve RAHMATULLAH, 2003. Differences among rice cultivars in potassium uptake and its utilization. *Pak. J. Agri. Sci.*, Vol. 40 (3-4)
- SALASKAR, D., SHRIVASTAVA, M. ve KALE, S.P. 2011. Bioremediation potential of spinach (*Spinacia oleracea* L.) for decontamination of cadmium in soil. *Current science*, vol. 101. No. 10.
- SALIN, M.L. 1998. Toxic oxygen species and protective systems of the chloplasts. *Physio.Plant.*, 72:681-89.
- SALT, D.E., PICKERING, I.J., PRINCE, R.C., GLEBA, D., DUSHENKOV, S., SMITH, R.D. ve RASKIN, I., 1997. Metal accumulation by aquacultured seedlings of Indian Mustard. *Environ Sci Technol* 31, 1636-1644
- SANDALLO, L.M., DALURZO, H. C., GOMEZ, M., ROMERO-PUERTAS, M.C. ve DEL RIO, L.A. 2001. Cadmium-induced changes in the growth and axidative metabolism of pea plants. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 52, No. 364, pp. 2115-2126.
- SANGAKKARA, U. R., FREHNER, M., NOSBERGER, J. (2000): Effect of soil moisture and potassium fertilizer on shoot water potential, photosynthesis and partitioning of carbon in mungbean and cowpea. *J. Agron. Crop Sci.* 185, 201–207.
- SANI, H.A., TSAFE, A.I., BAGUDO, B.U. ve ITODO, A.U. 2011. Toxic metal uptake by spinach (*Spinacia oleracea* L.) and (lettuce (*Lactuca sativa*) cultivated in sokoto: A comparative study. *Pakistan journal of nutrition.* 10 (6): 572-576.
- SANITA DI TOPPI, L. ve GABBRIELLI, R., 1999. Response to cadmium in higher plants. *Environ. Exp. Bot.*41: 105-130.
- SCANDALIOS, J.G. 1993. Oxygen stress and superoxide dismutase. *Plant Physiol.*, 101:7-12

- SCREENIVASULU, N., RAMANJULU, S., RAMACHANDRA, K.K., PRAKASH, H.S., SHETTY, H.S. ve SAVITHRI, H.S. 1999 Peroxidase activity and peroxidase isoforms as modified by salt stress in two cultivars of foxtail millet. *Plant Sci* 141:1-9.
- SERRANO, R. 1989. Structure and function of plasma membrane ATPase. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 40:61-94.
- SGHERRI CLM, MILONE AMT, CLIJSTERS H, NAVARI-IZZO F (2001) Antioxidative enzymes in two wheat cultivars, differently sensitive to drought and subjected to sub-symptomatic copper doses. *J. Plant Physiol.* 158:1439-1447
- SGHERRI, C., QUARTACCI, M.F., IZZO, R. ve NAVARI-IZZO, F. 2002. Relation between lipoic acid and cell redox status in wheat grown in excess copper. *Plant Physiol. Biochem.* 40:591-597.
- SHAMSI, I.H., JIANG, L., WEI, K., JILANI, G., HUA, S. ve ZHANG, G.P. 2010. Alleviation of cadmium toxicity in soybean by potassium supplementation. *Journal of Plant Nutrition*, 33:1926-1938.
- SHARĪATĪ, M. AND S. FARSHĪ, 1997, Heavy metal accumulation in south Tehran vegetable crops. *J. Soil and Water*, 5: 3 (In Persian)
- SHARMA SS, DIETZ K-J (2009) The relationship between metal toxicity and cellular redox imbalance. *Trends Plant Sci* 14:43–50.
- SHARMA, R.K., M. AGRAWAL AND F. MARSHALL. 2006. Heavy metals contamination in vegetables grown in wastewater irrigated areas of Varanasi, India *B. Environ. Contam. Tox.*, 77: 312-318.
- SHAW BP. 1995. Effect of mercury and cadmium on the activities of antioxidative enzymes in the seedling of *Phaseolus aureus*. *Biology of Plants* 37, 587-596.
- SHEN, W., NADA, K., TACHĪBANA, S., 2000. Involvement of polyamines in the chilling tolerance of cucumber cultivars. *Plant Physiology* 124, 431-439.
- SHEORAN, I.S., SINGAL, H.R. ve SINGH, R. 1990. Effect of cadmium and nickel on photosynthesis and the enzymes of the photosynthetic carbon reduction cycle in pigeon-pea (*Cajanus cajan* L.) *Photosynth. Res.* 23: 345-351.

- SHEWFELT, R. L., & ERICKSON, M. E. (1991). Role of lipid peroxidation in the mechanism of membrane-associated disorders in edible plant tissue. *Trends in Food Science and Technology*, 2, 152–154.
- SIDHU, V.P.S. ve KHURANA, M.P.S. 2010. Effect of cadmium-contaminated soils on dry matter yield and mineral composition of raya (*Brassica juncea*) and spinach (*Spinacia oleracea*). *Acta Agronomica Hungarica*, 58 (4): 407-417.
- SMEETS, K., CUYPERS, A., LAMBRECHTS, A., SEMANE, B., HOET, P., LAERE, A.V. ve VANGRONSVELD, J. 2005 Induction of oxidative stress and antioxidative mechanisms in *Phaseolus vulgaris* after Cd application. *Plant Physiology and Biochemistry* 43 437-444.
- SMIRNOFF, N. (ed.) 1995: Antioxidant systems and plant response to the environment . In: *Environment and Plant Metabolism: Flexibility and Acclimation*, pp. 217-243. BIOS Scientific Pres, Oxford.
- SMIRNORF, N. 1993. The role of active oxygen in the response of plants to water deficit and desiccation.-*New Phytol.*, 125:27-58
- SMITH, T.A. ve RICHARDS, F.J. 1962. Biosynthesis of putrescine in higher plants and its relation to potassium nutrition. *Biochem. J.* 84: 292-294.
- SMOLDERS, E. ve MCLAUGHLIN, M.J. 1996 Chloride increases cadmium uptake in swiss chard in aresin-buffered nutrient solution. *Soil Sci. Soc Am. J.* 60:1443-1447.
- SMOLEN, S. Ve SADY, W. 2010. Effect of plant biostimulation with pentakeep V fertilizer and nitrogen fertilization on the content of macro- and micronutrients in spinach. *J. Elementol.* 15 (2): 343-353.
- Sobkowiak R, Rymer K, Rucińska R, Deckert J (2004) Cadmium-induced changes in antioxidant enzymes in suspension culture of soybean cells. *Acta Biochim Pol* 51:219–222
- SOLEIMANZADEH, H., HABIBI, D., ARDAKANI, M.R., PAKNEJAD, F. ve REJALI, F. 2010. Effect of Potassium Levels on Antioxidant Enzymes and Malondialdehyde Content under Drought Stress in Sunflower (*Helianthus annuus* L.), *American Journal of Agricultural and Biological Sciences* Volume 5, Issue 1 : Pages 56-61

- SOMASHEKARĀĪAH, B.V., PADMAJA, K. ve PRASAD, A.R.K. 1992. Phytotoxicity of cadmium ions on germinating seedling of mung bean involvement of lipid peroxides in chlorophyll degradation. *Physio. Plant*, 85:85-89.
- SREENĪVASULU, N., B. GRĪMM, U. WOBUS, AND W. WESCHKE, 2000: Differential response of antioxidant compounds to salinity stress in salt-tolerant and salt-sensitive seedlings of foxtail millet (*Setaria italica*). *Physiol. Plant* 109, 435–442.
- STEINBERG, R.A. 1951. Correlations between protein-carbohydrate metabolism and mineral deficiencies in plants. In *Mineral Nutrition of Plants*, pp. 359-386. Ed. by Truog, E., Univ. Wisconsin Press.
- STIBOROVA, M., DOUBRAVOVA, M., BREZINOVA, A. ve FRIEDRICH, A. 1986. Effect of heavy metal ions on growth and biochemical characteristics of photosynthesis of barley (*Hordeum vulgare* L.) *Photosynthetica*, 20: 418-425.
- STOBART, A.K., GRIFFTHS, W.T., AMEEN-BUKHARI, A. ve SHERWOOD, R.P. 1985 The effect of Cd on the biosynthesis of chlorophyll in leaves of barley. *Physiol. Plant*. 63, 291-293.
- TAHVONEN, R. VE KUMPULAINEN, J. 1993. Lead and cadmium in some cereal products of the Finished market 1990-91. *Food Addit. Contam.* 10:245-255
- TEWARI RK, KUMAR P, SHARMA PN (2007) Oxidative stress and antioxidant responses in young leaves of mulberry plants under nitrogen, phosphorus or potassium deficiency. *J Integr Plant Biol* 49(3):313–322
- TEWARI, R.K., KUMAR, P., TEWARI, N., SRIVASTAVA, S. ve SHARMA, P.N. 2004. Macronutrient deficiencies and differential antioxidant responses influence on the activity and expression of superoxide dismutase in maize. *Plant Sci* 166:687-694.
- THAMAYANTHI, D., SHARAVANAN, P.S. ve VIJAYARAGAVAN, M. 2011. Effect of cadmium on seed germination, growth and pigments content of zinnia plant. *Current Botany* 2(8): 08-13.
- THOMAS, G.M. ve HARRISON, H.C. 1991. Genetic line effects on parameters influencing cadmium concentration in lettuce. *J Plant Nut* 14: 953-962.

- TIRYAKIOGLU, M., EKER, S., OZKUTLU, F. ve HUSTED S CAKMAK, I., 2006. Antioxidant defense system and cadmium uptake in barley genotypes differing in cadmium tolerance. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* 20 ,181-189.
- TLUSTOS, P., SZAKOVA, J., KORINEK, K., PAVLIKOVA, D., HANC, A. ve BALIK, J., 2006. The effect of liming on cadmium, lead and zinc uptake reduction by spring wheat grown in contaminated soil. *Plant Soil Environ* 52:16-24.
- TORUN, B., CAKMAK, I., EKER, S., YAZICI, A., ÖZKUTLU, F., ERDEM, H., TOLAY, İ., TORUN, A., ÖZTÜRK, L., KARANLIK, D., S. ve TEK A. 2005. Çukurova bölgesi'ndeki turunçgil bahçelerinin potasyum ve diğer mineral elementler bakımından beslenme durumu.
- TURNER, M. A. 1973. Effect of cadmium treatment on cadmium and zinc uptake by selected vegetable species. *Journal of Environmental Quality* 2:118-119.
- UMAR S., I. DÍVA, N.A. ANJUM AND M.IQBAL., 2008 Potassium nutrition reduces cadmium accumulation and oxidative burst in mustard (*Brassica campestris* L.) Research Findings: *e-ifc* No. 16, June
- URAGUCHI, S., KIYONO, M., SAKAMOTO, T., WATANABE, I. ve KUNO, K. 2009. Contributions of apoplasmic cadmium accumulation, antioxidative enzymes and induction of phytochelatins in cadmium tolerance of the cadmium-accumulating cultivar of black oat. *Planta* 230:267-276.
- VAN ASSCHE F. ve CLIJSTERS, H. 1990. Effects of Metals on Enzyme Activity in Plants. *Plant Cell Environ.*, 13: 195–206
- VAN GINKEL G, JS BROWN 1978 Endogenous catalase and superoxide dismutase activities in photosynthetic membranes. *FEBS Lett* 94: 284-286
- VASSILEV, A. ve LIDON, F. 2011. Cd-induced membrane damages and changes in soluble protein and free amino acid contents in young barley plants *Emir. J. Food Agric.* 23 (2): 130-136
- VASSILEV, A. Ve LIDON, F. 2011. Cd-induced membrane damages and changes in soluble protein and free amino acid contents in young barley plants. *Emir. J. Food Agric.* 23 (2): 130-136.

- VASSILEV, A. ve YORDANOV, I. 1997. Reductive analysis of factors limiting growth of cadmium- treated plants: a review. *Bulgarian Journal of Plant Physiology* 23: 114-133.
- VASSILEV, A., V.KERIN, I.YORDANOV, 1993. The effect of Cd<sup>2+</sup> stress on the growth and photosynthesis of young barley plants (*H. vulgare* L.). *Bulg. J. Plant Physiol.*, 19(1-4), 22-29.
- VASSILEV, A., YORDANOV, I. ve TSONEV, T. 1997. Effect of Cd<sup>2+</sup> on the physiological state and photosynthetic activity of young barley plants, *Photosynthetica*, 34 (2): 293-302.
- VERBRUGGEN N, HERMANS C, SCHAT H., 2009 Mechanisms to cope with arsenic or cadmium excess in plants. *Curr Opin Plant Biol.*;12:364-372
- VESELOV, D., KUDOYAROVA, G., SYMONYAN, M. ve VESELOV, St. 2003. Effect of cadmium on ion uptake, transpiration and cytokinin content in wheat seedlings. *Bulg. J. Plant Physiol.*, Special Issue 353-359.
- WAGNER G J 1993 Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health. *Adv. Agron.* 51, 173-205.
- WAGNER, G. 1993. Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health. *Adv Agron* 51:173-211
- WALL, M.E. 1939. The role of potassium in plants, I. Effect of varying amounts of potassium on nitrogenous, carbohydrate and mineral metabolism in the tomato plant. *Soil Sci.* 47: 143-161.
- WALLACE, A. (1982): Additive, protective and synergistic effects on plants with excess trace elements. *Soil Sci.* 133, 319-323.
- WANG, M., ZOU, J. H., DUAN, X. C., JIANG, W. S. AND LIU, D. H. 2007. Cadmium accumulation and its effect on metal uptake in maize (*Zea mays* L.) *Biores. Technol.* 98: 82-88.
- WANG, W. 1987. Root elongation method for toxicity testing of organ and inorganic pollutants. *Environ Toxicol Chem* 6, 409-414.
- WEGGLER-BEATON, K., McLAUGHLIN M., GRAHAM R. (2000). Salinity increases cadmium uptake by wheat and Swiss chard from soil amended with biosolids, *Australian Journal of Soil Research*, 2000, 38 (1), p37- 45

- WEIGEL H J AND JÄGER H J 1980 Subcellular distribution and chemical form of Cd in bean plants. *Plant Physiol.* 65, 480–482.
- WEIGEL, H.J. ve JAGER, H.J. 1980. Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in bean plants. *Plant Physiol.*, 65:480-482 .
- Wellburn, A.R. 1994: The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *Journal of Plant Physiology* 144: 307-313.
- WENZEL, W. AND F. JACKWER. 1999. Accumulation of heavy metals in plants grown on mineralized solids of the Austrian Alps. *Environ. Poll.*, 104: 145-155.
- WHITEHOUSE, D. G., LUDWIG, L. J. ve WALKER, D. A. 1971. Participation of the Mehler reaction and catalase in the oxygen exchange of chloroplast preparations. *J. Exp. Bot.* 22: 772-791.
- WISE, R.R. ve NAYLOR, A.W. 1987. Chilling-enhanced photooxidation. Evidence for the role of singlet oxygen and superoxide in the breakdown of pigment and endogenous antioxidants. *Plant. Physiol.*, 83: 278-282.
- WU F B, ve ZHANG G P. 2002. Genotypic differences in effect of Cd on growth and mineral concentrations in barley seedling. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 69, 2 19-227.
- XIANG C, OLIVER DJ (1998) Glutathione metabolic genes coordinately respond to heavy metals and jasmonic acid in *Arabidopsis*. *Plant Cell* 10: 1539–1550
- YANG, X., BALIGAR, V.C., MARTINS, D.C. ve CLARK, R.B. 1996. Cadmium effects on influx and transport of mineral nutrients in plant species. *J Plant Nutri* 19, 643-656.
- YOST, K.J. ve MILES, L.J. 1979. Environmental Health Assessment for Cadmium: a Systems Approach. *Journal of Environmental Science and Health A.* 14: 285-311.
- YU, H., WANG, J. L., FANG, W., YUAN, J. G. AND YANG, Z. Y. 2006. Cadmium accumulation in different rice cultivars and screening for pollution safe cultivars of rice. *Sci. Total Environ.* 370: 302-309.



- ZENK, M.H. 1996. Heavy metal detoxification in higher plants-a review. *Gene*, 179: 21-30.
- ZHANG, F., SHI, W., JIN, Z. ve SHEN, Z. 2003. Response of antioxidative enzymes in cucumber chloroplasts to cadmium toxicity. Vol.26, No. 9, pp. 1779-1788.
- ZHANG, Y., SONG, Q., YAN, J., TANG, J., ZHAO, R., ZHANG, Y., HE, Z. ve ZOU, C. 2010 Mineral element concentrations in grains of chinese wheat cultivars. *Euphytica* 174:303-313.
- ZHAO, D., OOSTERHUIS, D. M. ve BEDNARZ, C.W. 2001. Influence of potassium deficiency on photosynthesis, chlorophyll content, and chloroplast ultrastructure of cotton plants. *Photosynthetica* 39(1): 103-109.
- ZHAO, Y. 2011. Cadmium accumulation and antioxidative defenses in leaves of *Triticum aestivum* L. And *Zea mays* L. *African Journal of Biotechnology* Vol. 10 (15), pp. 2936-2943.
- ZHAO, ZHONG. Q., ZHU, YONG G. ve SMITH, A. F. 2003. Effects of forms and rates of potassium fertilizers on cadmium uptake by two cultivars of spring wheat. *Environment international* 29 973-978.
- ZHU, Y.L., PILON-SMITS, E., JOUANIN, L. ve TERRY, N. 1999a. Over expression of glutathione synthetase in Indian mustard enhances cadmium accumulation and tolerance. *Plant physiology*, 119: 73-79.
- ZHU, Y.L., PILON-SMITS, E., TARUN, A.S., WEBER, S., JOUANIN, L. ve TERRY, N. 1999b. Cadmium tolerance and accumulation in Indian mustard is enhanced by overexpressing gamma-glutamylcysteine synthetase. *Plant physiology*, 121: 1169-1177.
- ZURERA, G., ESTRADA, B., RINCON, F. ve POZO, R. 1987. Lead and cadmium contamination levels in edible vegetables. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 38:805-812.

(<http://www.ipipotash.org/en/eifc/2008/16/3>)

## **ÖZGEÇMİŞ**

1984 yılında Adana'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Adana'da tamamladı. 2004 yılında başladığım Osmangazi Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü'nden 2008 yılında mezun oldu ve 2009 yılı bahar dönemi Çukurova Üniversitesi Toprak ve Bitki Besleme Anabilim Dalında yüksek lisansa başladı ve halen devam etmekte.

## **ÖZGEÇMİŞ**

1984 yılında Adana'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Adana'da tamamladı. 2004 yılında başladığım Osmangazi Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü'nden 2008 yılında mezun oldu ve 2009 yılı bahar dönemi Çukurova Üniversitesi Toprak ve Bitki Besleme Anabilim Dalında yüksek lisansa başladı ve halen devam etmekte.