



MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİYOLOJİ ANABİLİM DALI

**KADMIYUM VE ÇİNKO ETKİLEŞİMLERİNİN MISIR (*Zea mays* L.)
FİDELERİNDE BÜYÜME PARAMETRELERİ İLE KATALAZ VE
ASKORBAT PEROKSİDAZ AKTİVİTELERİ ÜZERİNE ETKİSİ**

ELİF TELKIRAN DİKKAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Antakya/HATAY
Şubat-2010



MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİYOLOJİ ANABİLİM DALI

KADMIYUM VE ÇİNKO ETKİLEŞİMLERİNİN MISIR (*Zea mays* L.)
FİDELERİNDE BÜYÜME PARAMETRELERİ İLE KATALAZ VE
ASKORBAT PEROKSİDAZ AKTİVİTELERİ ÜZERİNE ETKİSİ

ELİF TELKIRAN DİKKAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Antakya/HATAY
Şubat-2010

I

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	III
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	6
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	7
3.1 Materyal.....	9
3.1.1 Araştırmada Kullanılan Kimyasallar.....	9
3.2 Yöntem.....	10
3.2.1 Bitki Yetiştirme Koşulları.....	10
3.2.2 Bitki Büyüme Ölçümleri.....	11
3.2.3 Askorbat Peroksidaz Analizi	11
3.2.4 Katalaz Analizi.....	12
3.2.5 İstatistiksel Analizler.....	12
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	13
4.1 Kök Gelişimine Etkisi.....	13
4.2 Sürgün Gelişimine Etkisi.....	16
4.3 Askorbat Peroksidaz Aktivitesi.....	18
4.4 Katalaz Aktivitesi.....	21
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	23
KAYNAKLAR.....	25
TEŞEKKÜR.....	32
ÖZGEÇMİŞ.....	33
EKLER.....	34
Ek 1.....	35

Ek 2.....	36
Ek 3.....	37
Ek 4.....	38
Ek 5.....	39
Ek 6.....	40
Ek 7.....	41
Ek 8.....	42
Ek 9.....	43
Ek 10.....	44
Ek 11.....	45
Ek 12.....	46
Ek 13.....	47
Ek 14.....	48
Ek 15.....	49
Ek 16.....	50
Ek 17.....	51
Ek 18.....	52

II

ÖZET

KADMIYUM VE ÇİNKO ETKİLEŞİMLERİNİN MISIR (*Zea mays* L.) FİDELERİNDE BÜYÜME PARAMETRELERİ İLE KATALAZ VE ASKORBAT PEROKSİDAZ AKTİVİTELERİ ÜZERİNE ETKİSİ

Bu araştırmanın amacı, mısır (*Zea mays* L. cv. Mat 97) fidelerinde çinko (Zn) ve kadmiyum (Cd) ağır metallerinin ve bunlar arasındaki etkileşimlerin kök, sürgün ve kök ve sürgün kuru ağırlığı, kök/sürgün kuru ağırlık oranı, kök ve sürgün % su içeriğine ve askorbat peroksidaz (AP) ve katalaz (KAT) enzim aktiviteleri üzerine etkilerini araştırmaktır.

Cd'un yüksek konsantrasyonları ile bu ağır metalle birlikte uygulanan Zn' un fidelerin kök ve sürgün boyu uzamasına istatistiksel olarak önemli bir etkisi olmuştur. Zn uygulaması, kök boyunun uzamasını olumlu yönde etkilerken; Cd uygulaması, sürgün boyunun uzamasını olumsuz yönde etkilemiştir. Fakat Cd'la birlikte uygulanan Zn, sürgün boyunun uzamasını olumlu yönde etkilemiştir. 10 ve 15 µM Cd uygulaması yapılan fidelerin kök ve sürgün kuru ağırlıkları kontrole göre önemli düzeyde azalmış, 5 µM Zn uygulaması ya da Cd +Zn uygulamalarının beraber yapıldığı fidelerde ise kök ve sürgün kuru ağırlıkları bakımından kontrole göre istatistiksel olarak bir fark saptanmamıştır. Kök ve sürgün % su oranlarındaki ve kök/sürgün oranındaki fark tüm dozlarda istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur. 10 ve 15 µM Cd, 5 µM Zn ve Cd+Zn uygulaması yapılan mısır fidelerinde askorbat peroksidaz (APX) ve katalaz (CAT) aktivitesindeki artış kontrole göre önemli düzeyde bulunmuştur.

2010, 52 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Ağır metal, antioksidan enzimler, çinko, kadmiyum, mısır

III

ABSTRACT

EFFECTS OF CADMIYUM AND ZINC INTERACTIONS ON GROWTH PARAMETERS AND ACTIVITIES OF ASCORBATE PEROXIDASE AND CATALASE ON MAIZE (*Zea mays* L.)

The aim of this research was to investigate the effects of zinc and cadmium heavy metals and the interaction of these heavy metals on maize's (*Zea mays* L. cv. MAT 97) root and shoot elongation, dry weight, water percentage, root/shoot dry weight ratio and ascorbate peroxidase (APX), catalase (CAT) enzymes activities.

Cd's high concentration and treatment of this heavy metal with zinc had significant statistical effect on maize root and shoot elongation. While zinc treatment had a positive effect on root elongation, Cd treatment had a negative effect on shoot elongation. But the treatment of Zn with Cd had positively effected shoot elongation. 10 and 15 μM Cd treated maize's root and shoot dry weights had significantly decreased according to control and there has no significant statistical difference between 5 μM Zn or Cd+Zn treated maize regarding shoot dry weight. The differences in root and shoot water% ratio and root/shoot ratio are found to be insignificant. The increase of ascorbate peroxidase and catalase activity in 10 μM , 15 μM Cd and 5 μM Zn and Zn+Cd treated maize is found to be in significant levels according to control.

2010, 52 Page

Keywords: Heavy metal, antioxidant enzymes, zinc, cadmium, maize

IV

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

1O_2	Singlet oksijen
AP	Askorbat peroksidaz
As	Arsenik
ASA	Askorbik Asit
KAT	Katalaz
Cd	Kadmiyum
CdCl₂	Kadmiyum Klorür
Co	Kobalt
Cr	Krom
Cu	Bakır
DHA	Dihidroaskorbat
DHAR	Dihidroaskorbat redüktaz
EDTA	Etilen diamin tetra asetik asit
GP	Guiakol peroksidaz
GSH	Glutasyon (İndirgenmiş)
GSSG	Glutasyon (Yükseltgenmiş)
H₂O₂	Hidrojen peroksit
MDA	Malondealdehit
MDHA	Monodehidroaskorbat
MDHAR	Monodehidroaskorbat redüktaz
Ni	Nikel
O₂⁻	Süperoksit radikali
OH⁻	Hidroksil radikali
Pb	Kurşun
POD	Peroksidaz
ROT	Reaktif Oksijen Türleri
Se	Selenyum
Si	Silikon
SOD	Süperoksit dismutaz
TBARS	Thiobarbuturikasitin reaktif maddesine
V	Vanadyum
Zn	Çinko
ZnCl₂	Çinko Klorür

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1. Arnon Hoagland Besin Çözeltisi (1940, 1 litre için).....9

VI

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Cd, Zn ve Cd+Zn uygulamalarının mısır (<i>Zea mays L.</i>) fidelerinde ortalama kök boyuna (cm/bitki) etkisi (n=3).....	13
Şekil 2 Cd, Zn ve Cd+Zn uygulamalarının mısır (<i>Zea mays L.</i>) fidelerinde ortalama kök kuru madde miktarına (g/bitki) etkisi (n=3).....	14
Şekil 3. Cd, Zn ve Cd+Zn uygulamalarının mısır (<i>Zea mays L.</i>) fidelerinde kök su içeriğine (%) etkisi (n=3).	15
Şekil 4. Cd, Zn ve Cd+Zn uygulamalarının mısır (<i>Zea mays L.</i>) fidelerinde ortalama sürgün boyuna (cm/bitki) etkisi (n=3).....	16
Şekil 5 Cd, Zn ve Cd+Zn uygulamalarının mısır (<i>Zea mays L.</i>) fidelerinde ortalama sürgün kuru ağırlığına (g/bitki) etkisi (n=3).....	16
Şekil 6. Cd, Zn ve Cd+Zn uygulamalarının mısır (<i>Zea mays L.</i>) fidelerinde sürgün su içeriğine (%) etkisi (n=3).....	17
Şekil 7. Cd, Zn ve Cd+Zn uygulamalarının mısır (<i>Zea mays L.</i>) fidelerinde kök/sürgün oranına etkisi (n=3).....	17
Şekil 8. Cd, Zn ve Cd+Zn uygulamalarının mısır (<i>Zea mays L.</i>) fidelerinde Askorbat Peroksidaz Enzim aktivitesine etkisi (n=3).....	20
Şekil 9. Cd, Zn ve Cd+Zn uygulamalarının mısır (<i>Zea mays L.</i>) fidelerinde Katalaz aktivitesine etkisi. (n=3).....	22

1. GİRİŞ:

Dünyanın en önemli sorunlarından biri çevre kirliliğidir. Bu sorunun ortaya çıkmasındaki neden, son 40–50 yıl içinde yaşadığımız teknolojik gelişim ve bununla bağlı olarak ortaya çıkan ekonomik değişimdir (Çepel, 2003).

Artan tarımsal ve endüstriyel faaliyetlerin yanı sıra hızlı kentleşme de önemli bir çevre kirlitici unsur haline gelmiştir. Pestisit ve diğer tarımsal amaçlı kimyasal maddelerin bilinçsizce kullanımı, hava, su ve toprak kirliliğini tehlikeli boyutlara çıkarmıştır (Topbaş ve ark., 1998).

Tarımda en çok kullanılan kimyasal gübrelerden biri olan süperfosfat gübresi içinde arsenik (As), vanadyum (V), krom (Cr), kobalt (Co), bakır (Cu), kurşun (Pb), nikel (Ni), selenyum (Se), çinko (Zn) ve kadmiyum (Cd) gibi çok miktarda ağır metal bulunmaktadır (Akman ve ark., 2000).

Cd kirliliği küresel bir çevre problemidir ve neredeyse yıllık olarak 30×10^3 ton Cd fosil yakıtlarının yanması, madencilik, maden eritimi, endüstriyel atıkların salınımı gibi endüstriyel aktiviteler (Sun ve ark., 2008) ve insan kaynaklı pek çok yoldan doğaya girmektedir (Sanita di Toppi ve Gabrielli 1999). Cd çoğunlukla durağan olarak kalmakta ve toprağı kirlletmektedir.

Cd, bitki ve insanlar için temel olmayan bir metaldir; bitkilere köklerinden girerek, bünyede birikir (Wagner, 1993; Metwally ve ark., 2005). Genellikle büyüme inhibisyonuna, enzim aktivitesinin (Schutzendubel ve ark., 2001), fotosentezin (Clijters ve Van Assche, 1985), su ve besin alınımının azalmasına neden olmakta, transpirasyonu (Bazzaz ve ark., 1974), karbonhidrat metabolizmasını (Moya ve ark., 1993) ve diğer metabolik aktiviteleri (Huang ve ark., 1974; Van Assche ve ark., 1988) inhibe etmekte ve hatta bitkinin ölümüne neden olmaktadır (Sanita di Toppi ve Gabrielli, 1999). *Triticum aestivum* (Neelima ve ark., 1991; Loggini ve ark.,1999), *Beta vulgaris* (Greger ve Ogren, 1991), *Vigna Radiata* (Keshan ve Mukherji, 1992) *Spinacea oleracea* (Sersen ve Kralova, 2001), *Zea mays* (Prasad, 1995a) ve *Phaseolus vulgaris* (Padmaja ve Prasad, 1990) gibi pek çok bitkisel sistemde Cd^{2+} iyonlarının kloroplast işleyişine ve yapısına etki ettiği bilinmektedir. Cd'un *Pennisetum*

typhoideum (Prasad ve Prasad, 1987) ve *T. aestivum*'da (Malik ve ark., 1992) klorofil biyosentezini ve kloroplast yapısının tam gelişimini inhibe ettiği gözlenmiştir.

Bitkilerde kadmiyum iyonlarına bağlı olarak oluşan zehirlenmelerde genellikle büyüme azalması gözlenir. Bu toksik kirleticilerin çok az bir miktarı bile bitki hücrelerinde pek çok değişimin oluşmasına neden olur (Schützendübel ve Polle, 2002; Fernandes ve Henriques, 1991; Van Assche ve Clijters, 1990; Woolhouse, 1983). Ancak stresin fizyolojisi hakkında genel bir mekanizma tablosu çizmek çok zordur, metal toksisitesi esnasında metal iyonları ile çeşitli metabolik yollar arasında kompleks etkileşimler meydana gelmektedir. Bitkilerin Cd ve Cu' a maruz kalmasıyla birlikte dokularında meydana gelen hasarların altında yatan nedenlerden biride reaktif oksijen türlerinin (ROT) birikimindeki artışın oksidatif strese neden olmasıdır (Schützendübel ve ark., 2002; Sandalio ve ark., 2001; Cuypers ve ark., 2000; Clijters, 1996).

ROT ($^1\text{O}_2$, O_2^- , OH^\cdot ve H_2O_2) çeşitli çevresel stres durumları, oksidatif stresin artması sonucu oluşan ve membran, DNA, protein, fotosentetik pigmentlerin ve lipidlerin hasar görmesine neden olan, yüksek derecede reaktif olan toksik moleküllerdir (Apel ve Hirt, 2004; Smirnoff, 1998).

ROT potansiyel olarak hücrelere zararlıdır; artışıyla birlikte oksidatif zarara neden olarak hücre yapısının ve fonksiyonlarının bozulmasına neden olabilir (Lee ve ark., 2007). ROT veya süperoksit radikalleri (O_2^-) çeşitli hücresel bölümlerde lipitlerin peroksidasyonuna, enzim inaktivasyonuna, proteinlerin sentezine, denatürasyonuna ve DNA mutasyonunun da dahil olduğu oksidatif hasara neden olarak metabolizma üzerinde etki yaratır (Regoli ve Winston, 1999). Bu molekül türlerinin ve ürünlerinin hücredeki en önemli hasar verici etkisi membran lipidlerinin peroksidasyonudur (Weckx ve Clijters, 1996; De Vos ve ark., 1989; Kappus, 1985; Tappel, 1973). Bunların bazıları ya da ürünleri biyolojik membranların bütünlüğü üzerinde fonksiyonel maddelerin ve yapısal pek çok etkiye neden olabilir. Bu etki potasyum ve diğer çözümlerin sızmasına bağlı olarak plazma zarı geçirgenliğindeki artıştan kaynaklanır (Devos ve ark., 1989) ve bu sonuçta hücreyi öldürebilir (Kappus, 1985; Tappel, 1973).

Hücrede ROT'nin oluşmasına neden olan Cd'un besin zincirine girmesiyle birlikte insan sağlığı olumsuz şekilde etkilenmiş ve bu durum dünya çapında bir sorun haline gelmiştir (Nellesen ve Fletcher, 1993; Guo ve Marschner, 1995). Cd'un bitkiler, hayvanlar ve insanlar için toksik olduğunu gösteren sitotoksik, mutajenik ve

karsonojenik etkilerine dair bulgular vardır. (WHO, 1993; Das ve ark., 1997; Waisberg ve ark., 2003; Flipic ve ark., 2006) Bu yüzden Cd, Kanser Araştırma Ajansı tarafından grup 1 insan kanserojenik ajanı sınıfına konmuştur. (IARC, 1993; Goering ve ark., 1994; Waalkes, 2000).

Bitkiler Cd toksisitesini engelleyebilmek için fitokelatları ve Cd bağlamayı, antioksidan mekanizmalarını, stres proteinlerini, etilen üretimini ve peroksidazların yeniden düzenlenmesini içeren farklı savunma stratejileri geliştirmişlerdir (Sanita di Toppi ve Gabrielli, 1999).

Cd ve Zn IIB geçiş sınıfına ait elementler olduğundan ve benzer kimyasal, jeokimyasal ve çevresel özellikler gösterdiğinden metal-metal interaksyonunu araştırmak için en iyi element eşleştirmesi olmuşlardır (Aravind ve Parasad, 2005). Zn bitki sistemleri için en önemli temel mikrobesein elementlerinden biridir. Zn protein metabolizması, gen ekspresyonu, kromatin yapısı, fotosentetik karbon metabolizması ve indol asetik asit metabolizması gibi pek çok kiritik hücrenel fonksiyonda önemli role sahiptir (Vallee ve Falchuk, 1993; Marschner, 1995; Prasad, 1995b; Cakmak ve Braun, 2001).

Zn ayrıca pek çok hayati enzimin katalitik, co-katalitik ve sabitleyici role sahip önemli bir bileşeni olduğu gibi aynı zamanda protein, membran ve DNA bağlayıcı proteinlerde yapısal sabitleyicidir (Vallee ve Falchuk, 1993) ancak yüksek dozlarda toksik etki gösterebilir.

Cd ve Zn'un benzer bir elektron dizilimi ve valans değeri vardır. Ayrıca sülfür nitrojen ve oksijen ligandları ile eşit afiniteye sahiplerdir (Nieboer ve Richardson, 1980). Cd ve Zn gibi benzer fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olan elementler birbirlerine biyolojik olarak antagonistik etki gösterebilirler (Das ve ark., 1997). Buna dayanarak Zn ve Cd ile yapılan çalışmalarda Zn'un Cd üzerinde antagonistik bir etkisi olduğu (Zhao ve ark., 2005), Zn'un bitkide Cd alınımını ve birikimini inhibe ettiğini ve Cd toksisitesini engellediği bulunmuştur (Honma ve Hirata, 1978; McLaughlin ve ark., 1994; Oliver ve ark., 1997; Zhao ve ark., 2005).

Bitkiye alım sırasında plazma membranındaki ortak bir geçiş sistemi varlığında Cd ile Zn arasında bir yarışma etkileşimi olduğunu düşünülmektedir (Hart ve ark. 2002). Buna dayanarak, Gomes ve ark., (2002) maya hücresinin plazma membranında Zn taşıyıcı protein aracılığıyla Cd alınımının yapıldığını göstermiştir.

Ayrıca durum buğdayında Cd'un floem vasıtasıyla taşınmasının Zn tarafından önlendiği belirlenmiştir. Kalburlu boru hücrelerinin plazma membranlarında bulunan taşıyıcı bir proteine bağlanmak için Zn'un Cd'la yarışarak Cd'un alınımını engellediği gözlenmiştir (Çakmak ve ark., 2000).

Wu ve Zhang (2002), arpa bitkisinde Zn uygulamasındaki artışın Cd toksisite stresini azalttığını, büyümeyi desteklediğini ve membran hasarını azalttığını bulmuşlardır.

Bitkilerde Cd toksisitesinden kaynaklanan ROT'nin oksidatif hücre hasarlarına sebep olduğuna dair çok sayıda kanıt bulunmaktadır. Bu yüzden Cd toksisitesi altında bitkilerin ROT'ni ortadan kaldırabilme yeteneği Cd toksisitesine karşı önemli bir tolerans mekanizmasıdır (Shah ve ark., 2001; Olmos ve ark., 2003).

Çevresel stres koşulları altında oluşan ROT tarafından hücreye verilen hasarların engellenmesinde Zn'un etkisi büyüktür. Bu nedenle kuraklık, düşük sıcaklık stresi, yüksek ışık, tuzluluk ve Fe toksisitesi gibi stres koşullarına karşı bitkinin tolerans sağlama mekanizmalarında Zn'un rolü önemlidir (Çakmak, 2000). Muhtemelen Zn, Zn-içeren bir enzim olan süperoksit dismutaz gibi antioksidan enzim aktivitelerini artırarak ve enzimlerin -SH gruplarına ve membran proteinlerine bağlanmak için Cd'la yarışarak, bitkiyi Cd toksisitesine karşı korumaktadır (Wu ve Zhang, 2002).

ROT'den olan hidrojen peroksit (H_2O_2), süperoksit ($O_2^{\cdot-}$) ve hidroksil (OH) radikalleri oluşumuna karşı savunma mekanizmalarından biri de antioksidan enzimlerdir (Dixit ve ark., 2001; Schützendübel ve ark., 2001; Olmos ve ark., 2003; Smeets ve ark., 2005; Rodriguez – Serrano ve ark., 2006). Tüm antioksidan enzimler içerisinde askorbat peroksidaz (AP) hücredeki ROT'nin detoksifikasyonunda önemli bir rol oynar. AP, askorbik asidi spesifik bir elektron vericisi gibi kullanarak H_2O_2 'i suya indirger (Asada, 1999; Asada, 1992; Foyer ve ark., 1994). H_2O_2 'nin diğer bir detoksifikasyon mekanizması ise en çok peroksizomlarda yerleşmiş olan Katalaz (KAT) enzimi tarafından gerçekleştirilir. Buna rağmen katalaz, H_2O_2 için çok düşük bir affiniteye sahiptir ve aktivitesi de sitozolde, mitokondride ve kloroplastta ya aşırı düşüktür ya da ölçülemez (Halliwell, 1981).

Ağır metaller doğaya verdikleri zarar kadar tarımsal üretime de ciddi bir zarar vermektedir. Özellikle tarımsal alanların Cd gibi toksik bir ağır metalle kontamine olması, besin zincirimizde önemli bir yeri olan buğday, arpa ve mısır gibi tarım

bitkilerinde önemli ürün kayıplarına yol açmakta ve insan sağlığını tehdit etmektedir. Ülkemizde buğday ve arpadan sonra en çok ekimi yapılan tarla bitkisi mısırdır

Tez kapsamında, mısır bitkisinin seçilmesinde; mısırın önemli bir besin kaynağı olması, Ülkemizde ve Akdeniz bölgesinde mısır yetiştiriciliğinin fazla olması, Cd+Zn etkileşiminin mısır ve AP ve KAT enzim aktivitelerine etkisini araştıran çalışmaların az olması etkili olmuştur.

Literatürde Cd stresi koşullarına maruz kalan mısır fidelerinde Zn uygulaması ile ilgili çalışma sayısının sınırlı olduğu göz önüne alınarak; bu tez çalışmasında, kadmiyuma maruz kalmış mısır fidelerinde Zn'nun kök ve sürgün boyu, kuru ağırlığı, yüzde su miktarı ve kök/sürgün oranı, gibi fizyolojik parametreler ve askorbat peroksidaz ve katalaz enzim aktivitesi üzerine olan etkilerini incelemek amaçlanmıştır. Biri metal diğeri besin olan bu iki elementin etkileşiminin metabolik yollarını daha iyi anlayabilmek amacıyla ilgili metallerin belirli parametreler açısından birbirleriyle etkileşimleri incelenmeye çalışılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR:

Chau ve ark. (1997) Zn ve Cd'un fasulye üzerindeki fitotoksik ve oksidatif etkilerini incelemişler; hem Cd hem de Zn'un bitkinin tüm organlarındaki lipid peroksidasyonunda artışa neden olduğunu ve KAT aktivitesinin gövde hariç, yapraklarda ve köklerde azaldığı bulmuşlardır.

Schikler ve Caspi (1999) hiperakümülatör bir cins olan *Alyssum argenteum* ve *Alyssum maritimum*'un Ni ve Cd stresine karşı verdiği antioksidan enzim cevabı hakkında yaptıkları araştırmada; her iki türde de yüksek Cd konsantrasyonlarında AP aktivitesinin değişmeden kaldığı, SOD aktivitesinin arttığı ve GR aktivitesinin azaldığını gözlemişlerdir.

Angela ve ark. (2001) Cd uygulaması yapılan *Raphanus sativus* L. fidelerinde Cd'un büyük bir kısmının köklerde biriktiğini fakat özellikle yüksek konsantrasyonlarda Cd uygulamalarında Cd'un bir kısmının yapraklara taşındığını ve orada biriktiğini gözlemişlerdir. KAT ve GR aktivitesinin köklerde önemli derecede arttığı ve yapraklarda 24 saatlik metal uygulamasından sonra Cd birikimi ile KAT ve GR aktivitesi arasında direk bir korelasyon olduğu görülmüştür. Antioksidan sistemlerin aktivasyon hızı bitkinin ağır metal stresine gösterdiği toleransa bağlı olarak artmaktadır (Bittsanazy ve ark., 2005). Bu antioksidan sistemler, özellikle de suyu emmede ve besin almada aktif olarak rol oynayan kök tüylerinde (uzunluğu 2 mm'e kadar olan tüm kökler) önemli rol oynamaktadır. Diğer taraftan kök tüyleri ağır metallerin girişi için bir kapı gibi görev yapmaktadır. Bu yüzden, bunlar bitki organları içerisinde en tehlikede olan organlardır. Kök tüyleri toprak toksisitesine karşı olan savunmanın ilk basamağını oluştururlar (Stobrawa ve Lorenc-Plucinska, 2008).

Kırbağ-Zengin (2002) Hg, Cd, Cu ve Pb uygulamalarının *Phaseolus vulgaris* fidelerinde gövde büyümesinde inhibisyona neden olduğu bulunmuştur. Moya ve ark. (1993) Cd ve Ni *Oryza sativa* fidelerinde gövde uzamasını inhibe etmiştir. Wu ve Zhang (2002) farklı genotiplere sahip arpa bitkileri üzerinde yaptıkları çalışmada Cd toksisitesinin kök uzamasını önemli derecede engellediğini, genotipler arasında bitki boyu bakımından farklılıklar olduğunu. sürgün ve kök kuru ağırlığının Cd

uygulamasından etkilendiğini fakat sürgün kuru ağırlığının daha fazla etkilendiğini bulmuşlardır.

Köleli ve ark., (2004) durum buğdayının ekmek buğdayla kıyaslandığında Zn yoksunluğunda ve Cd toksisitesinde daha yüksek hassasiyet gösterdiğini bulmuşlardır. Cd toksisitesinin Zn yokluğunda bitkilerde daha şiddetli etki gösterdiğini ve bu etkinin artan Cd konsantrasyonuna bağlı olmadığını gözlemlemişlerdir. Yapılan çalışmanın sonuçlarının Zn kritik hücre birleşenlerine (membran lipidleri enzimleri ve proteinler gibi) bağlanmada Cd'la yarışarak bitkileri koruduğunu ve Zn'un antioksidan savunmayı artırarak bitkilerde ki Cd kaynaklı oksidatif stresi önlediği hipotezini desteklemektedir.

Wang ve ark. (2005) iki farklı mısır çeşidi (Nongda No. 108 ve Liyu No. 6) üzerinde yaptıkları çalışmada 10^{-4} , 10^{-5} ve 10^{-6} M Cd dozlarını 5, 10 ve 15 günlük peryotlarda uygulamışlardır. Alınan sonuçlara göre Nongda No. 108'e uygulanan 10^{-5} ve 10^{-6} M Cd uygulamalarının ilk 5 gün sonunda kök uzamasını engellediğini, Cd uygulama miktarının ve gün sayısının artmasıyla beraber kök boyunun kısaldığını, 10^{-4} M Cd uygulanan bitkilerde ise büyümenin engellendiği ve hatta kök boyu uzamasının durduğunu gözlemişlerdir. Liyu No. 6'da ise Nongda No. 108'den farklı bir tablo gözlenmiştir. Liyu No. 6 çeşidinde kontrole kıyaslandığında 10^{-5} ve 10^{-6} M Cd uygulamalarının tüm deney boyunca büyümeyi teşvik ettiğini ve 10^{-4} M Cd uygulamasının 10. günden sonra kök büyümesini durduğunu gözlenmiştir.

Singh ve ark. (2005) *Bacopa monnieri* L. üzerinde yaptıkları çalışmada bitkiye 10, 50, 100 ve 200 μ M Cd uygulamışlardır. Cd'un bitkideki metal birikimine, çeşitli enzimatik ve enzimatik olmayan antioksidanlara, thiobarbuturikasitin reaktif maddesine (TBARS), fotosentetik pigmentlere ve protein içerilerine etkileri araştırılmıştır. Cd uygulaması yapılan *B. monnieri*'nin hem kökünde hem de yapraklarında tüm Cd konsantrasyonlarında ve uygulama peryotlarında AP ve guiakol peroksidaz (GP) aktivitelerinin kontrole göre arttığı gözlenmiştir. AP ve GP aktivitelerindeki artışa karşılık 48 saatlik 50 μ M Cd uygulamasında ve 96 ile 144 saatlik tüm Cd uygulamalarında, konsantrasyon ve zamana bağlı olarak, yapraklarda ve kökte KAT aktivitesi kontrole göre azaldığı bulunmuştur.

Ayhan (2006), Cd ve Pb uygulanan mısır çeşitlerinde (Vero, Luce, Doge, DK626, DK743, 31G98, 3223 ve 32D99) erken fide ve büyüme evresinde kök uzunluklarındaki inhibisyonlar karşılaştırıldığında Cd'un Pb'agöre çok daha toksik

olduğu tespit edilmiştir. Erken fide evresinde tüm mısır çeşitlerinin kök uzunluklarının kontrole göre Cd için 0,2-0,4 mM, Pb içinse 1-4 mM konsantrasyonlarında %50 ve üzeri inhibisyona uğradığı tespit edilmiştir.

nalın (2006)'ın farklı mısır çeşitleri (31G98, 3223 ve DK626) zerinde yaptığı araştırmaya göre yüksek Cu toksisitesinde mısır çeşitlerinden 31G98'de AP ve POD'ların seviyesindeki artışın diğer mısır çeşidi olan 3223'e göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. En yüksek Cu konsantrasyonu uygulmasında ise kontrolüne göre 3223'n AP aktivitesinde belirgin bir artış gözlenirken DK626'nın AP aktivitesinin 5 mM'lık Zn uygulamasına kadar çok da belirgin olmayan bir seviyede arttığı; en yüksek Zn konsantrasyonunda ise belirgin bir şekilde azaldığı grlmştir.

Ekmekçi ve ark. (2007) iki farklı mısır türüne (3223 ve 32D99) uygulanan Cd'un fotosentetik ve antioksidan aktiviteler üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sonuç olarak SOD, GR ve AP aktivitesinin Cd uygulamalarının tüm dozlarında arttığını, POD aktiviteleri ise en yüksek Cd uygulamasında önemli derecede arttığını gözlemlenmişlerdir. Artan Cd dozlarının mısır fidesinin büyümesini önemli derecede engellediğini, yaprakta ve kökte kuru ağırlık kaybına ve kontrole kıyaslandığında tüm Cd uygulamalarında biyomasta önemli bir azalmaya neden olduğunu saptamışlardır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM:

3.1. Materyal

Araştırmamızda bitki materyali olarak alternatif gelişme tabiatlı, soğuğa, kışa ve kurağa dayanımının iyi olduğu belirlenmiş olan mısır tohumları (*Zea mays* L. cv. Mat 97) fideleri kullanılmıştır. Mısır tohumları Batı Akdeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü'nden (Antalya) temin edilmiştir.

3.1.1 Araştırmada Kullanılan Kimyasallar

Makroelementler	(g/L)
1) Potasyum Nitrat (KNO ₃)	1,020
2) Kalsiyum DiNitrat (Ca(NO ₃) ₂)	0,492
3) Amonyum Fosfat (NH ₄ H ₂ PO ₄)	0,230
4) Magnezyum Sülfat (MgSO ₄ 7H ₂ O)	0,490
Mikroelementler	(mg/L)
1) Borik Asit (H ₃ BO ₄)	2,860
2) Molibdik Asit (H ₂ MoO ₄ H ₂ O)	0,09
3) Mangan Klorür (MnCl ₂ 4H ₂ O)	1,810
4) Bakır Sülfat (CuSO ₄ 5H ₂ O)	0,080
5) Çinko Sülfat (ZnSO ₄)	0,220
Ek olarak haftada 3 kez % 0,5'lik Demir Sülfat (FeSO ₄ 7H ₂ O) ve % 0,4'lük Tartarik asit uygulaması yapıldı.	

Çizelge 1. Arnon Hoagland Besin Çözeltisi(Arnon ve Hoagland,1940; 1 litre için)

3.2 Yöntem



3.2.1. Bitki Yetiştirme Koşulları

Çalışmamızda materyal olarak kullanılan fidelerin yetiştirilmesi sürecinde mısır tohumları 20 dakika % 2'lik sodyum hipoklorid çözeltisi ile (Rubio ve ark., 1994) steril edildikten sonra, distile su ile yıkanıp, petrielerde distile su ile nemlendirilmiş filtre kağıdı arasında 25 ± 2 °C'lik inkübatörde 48 saat süre ile çimlendirilmeye bırakılmıştır. Çimlendirilen tohumlar kum-perlit karışımı (1:1, v:v) (kum çapı ortalama olarak 0,7 mm, perlit çapı ortalama 2,8 mm) bulunan kavatalarda sera koşullarında 7 gün distile su ile sulanarak büyütülmüştür. 7. günün sonunda fideler kum-perlit karışımından çıkarılmış ve kökleri distile su ile iyice yıkanmıştır. Fidelerin su kültürü tekniği ile yetiştirilmesinde iki litrelik, dışı ışık geçirmeyecek şekilde alüminyum folyo ile sarılmış (Salisbury ve Ross 1992) plastik kaplar kullanılmıştır. Plastik kapların ağız kısmına fideleri yerleştirmek üzere 6 adet delik bulunan özel kapaklar hazırlanmış ve kapakların üzeri yine alüminyum folyo ile kaplanmıştır. Her kaba iki litre besin çözeltisi konulmuştur. Besin çözeltisi olarak pH'ı 6'ya ayarlanmış tam güçlü Arnon ve Hoagland (1940) çözeltisi kullanılmıştır. Daha sonra fidelerin kök-sürgün ayırımı bir parça sünger ile sarılmış ve fideler kapak üzerindeki 5 adet deliğe ayrı ayrı yerleştirilmiştir. Deliklerden biri ise çözeltiyi havalandırmak amacıyla kullanılmıştır. Kaplarda bu

şekilde hazırlandıktan sonra iklim odasına yerleştirilmişlerdir. Fideler, gün boyu havalandırılmak suretiyle 7 gün büyütülmüşlerdir. 8. gün kaplardaki çözeltiler dökülüp yeni besin çözeltileri ile doldurulmuştur. Ağır metal (çinko ve kadmiyum) uygulamaları (fideler 8 günlük iken) besin çözeltilerine karıştırılmak suretiyle yapılmıştır. Ağır metallerin kimyasal saflıktaki çinkoklorür ($ZnCl_2$) ve kadmiyumklorür ($CdCl_2$) tuzları kullanılmıştır. Bu tuzlar kontrol 0 Cd 10, 15 μM ve Zn 5 μM olacak şekilde ilave edilmiştir. Deneme 3 paralel olarak yürütülmüştür. Bitkiler iklim odasında ortalama 24 ± 2 °C sıcaklıkta, nisbi nemin % 66 ve ışık koşullarının ortalama 1198 lüks olduğu koşullarında yetiştirilmiştir. Ağır metal uygulamasından sonraki 5. (fideler 12 günlük iken) günde fideler hasat edilmiştir.

Hasat sonrasında bitki büyüme ölçümleri taze materyalden gerçekleştirilmiştir. Biyokimyasal analizler için ayrılan fidelerin kökleri kök-sürgün ayırım bölgesinden kesilmiş ve sürgünler enzim analizleri için küçük parçalar halinde derin dondurucuda, -80 derecede saklanmıştır.

3.2.2 Bitki Büyüme Ölçümleri

Hasat sonra Cd, Zn ve Cd+Zn uygulamaları yapılan fideler arasından tesadüfi bloklar deneme desenine göre seçilen 3 fidede kök ve sürgün boyları cm olarak ölçülmüştür. Daha sonra fideler kök-sürgün ayırım bölgesinden kesilerek kök ve sürgün taze ağırlıkları ayrı ayrı belirlenmiştir. Aynı bitki örnekleri 110 °C'lik etüvde 24 saat kurutulmuştur. Bu süre sonunda kök ve sürgün kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Kök ve sürgün kuru ağırlıklarından yararlanılarak kök/sürgün oranı hesaplanmıştır. Kök, sürgün ile kök-sürgün yüzde su miktarı ve kuru ağırlık ölçümleri 3 tekrarlı olarak yapılmıştır. Fidelerde kuru madde hasattan sonra alınan yaş ağırlıkları ile 65 °C'de kurutulduktan sonra alınan kuru ağırlıkları arasındaki farktan yararlanılarak hesaplanmıştır. (Johnson ve Ulrich, 1959)

3.2.3 Askorbat Peroksidaz (AP, E.C. 1.11.1.11)

AP aktivitesi, Cakmak ve Marschner (1992) ve Cakmak (1994)'e göre 290 nm'de askorbat oksidasyon oranı ölçülerek saptanmıştır. Reaksiyon karışımı (1ml), 50

mM fosfor tamponu (pH 7.6), 0,1 mM EDTA, 12 mM H₂O₂, 0,25 mM L(+) askorbik asit (ASA) ve enzim ekstraktından oluşmaktadır. (Cakmak ve Marschner 1992).

3.2.4 Katalaz (KAT, E.C. 1.11.6.1)

KAT aktivitesi, spektrofotometrede 240 nm'de H₂O₂'in parçalanma oranına bağlı olarak ölçülmüştür. Reaksiyon karışımı (1ml), 50 mM fosfor tamponu (pH 7.6), 0,1 mM EDTA, 100 mM H₂O₂ ve enzim ekstratından oluşmaktadır. (Cakmak ve Marschner 1992).

3.2.5 İstatistiksel Analizler

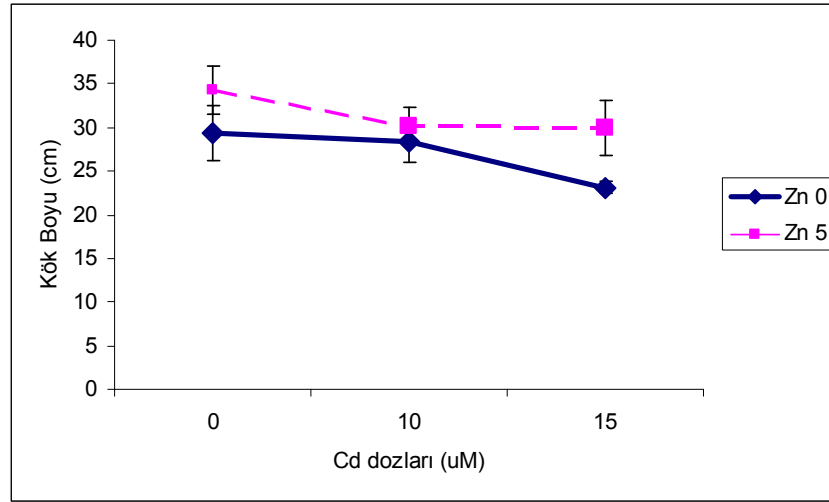
Sonuçlar, aritmetik ortalamaların (\bar{x}) ve standart hataların (SE) hesaplaması ile değerlendirilmiştir (Apaydın ve ark., 2002). Deneme sonucunda elde edilen değerlerin karşılaştırılmasında faktöriyel varyans analiz tekniğinden yararlanılmıştır. Faktöriyel varyans analiz tekniğinde karşılaştırılan gruplar arasında istatistiksel olarak fark bulunmuş ise farklı olan grupların belirlenmesinde çoklu karşılaştırma yöntemlerinden Tukey testi kullanılmıştır. Verilerin değerlendirilmesinde SPSS 9.05 paket programından yararlanılmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, kontrol grubu mısır fideleri ile 10 ve 15 μM konsantrasyonlarında Cd uygulamalarına maruz kalan fideler arasındaki farkları ve ayrıca Cd ile birlikte uygulanan 5 μM Zn uygulamalarının Cd uygulamaları üzerine etkilerini ortaya koyacak şekilde ele alınmıştır. Denemelerde kullanılan fidelerin kök ve sürgün boyu, kök ve sürgün kuru ağırlığı, yüzde su miktarı, askorbat peroksidaz ve katalaz enzim aktivitelerindeki değişiklikler değerlendirilmiştir.

4.1 Kök Gelişimine Etkisi

Araştırmada Kontrol, 10 ve 15 μM Cd uygulanan fidelerin kök boyu farkı istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır (Şekil 1., Ek 1). Ancak gerek 5 μM Zn gerekse de 10 μM ve 15 μM Cd ile birlikte uygulanan Zn konsantrasyonlarında kök büyümesi $p < 0,05$ oranında teşvik edilmiştir.



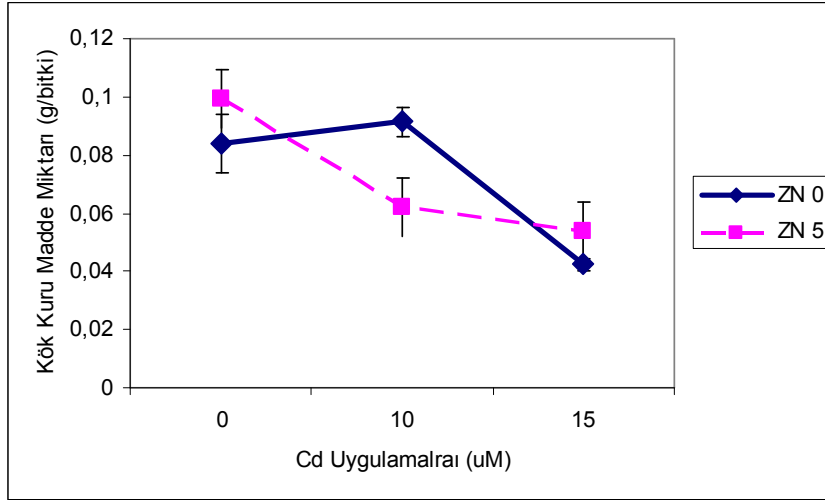
Şekil 1. Cd, Zn ve Cd+Zn uygulamalarının mısır (*Zea mays L.*) fidelerinde ortalama kök boyuna etkisi (n=3).

Ayhan (2006) Cd ve Pb uygulanan mısır çeşitlerinde (Vero, Luce, Doge, DK626, DK743, 31G98, 3223 ve 32D99) erken fide ve büyüme evresinde kök uzunluklarındaki inhibisyonlar karşılaştırıldığında Cd'un Pb'a göre çok daha toksik olduğunu etmiştir. Erken fide evresinde tüm mısır çeşitlerinin kök uzunluklarının kontrole göre Cd için 0,2-0,4 mM, Pb içinse 1-4 mM konsantrasyonlarında % 50 ve üzeri inhibisyona uğradığı tespit edilmiştir. *Triticum aestivum* ve *Cucumis sativus*

bitkilerine ait çeşitleri erken fide evresinde Hg, Cd, Co, Cu, Pb ve Zn'un farklı konsantrasyonları uygulanmış ve her iki bitkide de Cd'un Pb'a oranla kök büyümesini daha fazla inhibe ettiği belirlenmiştir (Munzuroğlu ve Geçkil, 2002).

Bu durumun bitkiler için bir besin elementi olan Zn'un yaşam için gerekli pek çok enzimin önemli bir bileşeni olması; proteinler, membran ve DNA bağlayıcı proteinlerin yapılarına katılması ile ilişkili olduğu düşünülmektedir (Vallee ve Auld, 1990). Diğer taraftan Cd son derece toksik herhangi bir metabolik önemi bulunmayan, insan ve biyosfer sağlığı için çok zararlı olan bir metaldir (Aravind ve Parasad, 2005).

Araştırmamızda kök kuru ağırlığı 15 µM Cd uygulamasında kontrole göre önemli ölçüde azalırken ($p<0,01$), 10 µM Cd ile 15 µM Cd konsantrasyonları arasında da $p<0,05$ oranında azalma ortaya çıkmıştır (Şekil 2., Ek 2). Zn'un ve Cd+Zn uygulamalarının kök kuru ağırlığı üzerindeki etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

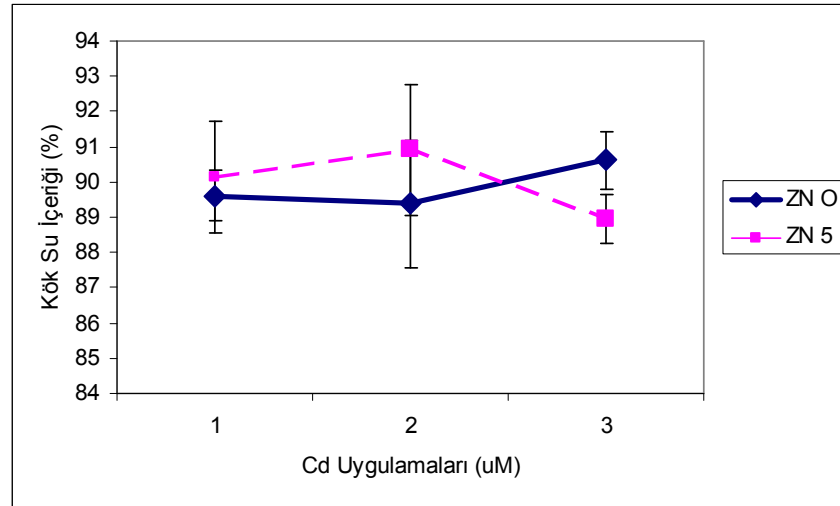


Şekil 2 Cd, Zn ve Cd+Zn uygulamalarının mısır (*Zea mays L.*) fidelerinde ortalama kök kuru madde miktarına (g/bitki) etkisi (n=3).

Cd, bütün ekin ürünleri ve insan sağlığı üzerinde toksik etkiye sahip tehlikeli bir ağır metallerdir (Grant ve ark., 1998; Wagner 1993). Cd mineral bir besin olmamasına rağmen bitki kökleri tarafından kolayca alınmakta ve besin zincirinde risk doğuracak ölçüde bitkide depolanmaktadır. Cd hücresel düzeyde de toksik olabilir ve bitki dokularında depolanması büyümeyi ve gelişimi sınırlayabilmektedir. Bu nedenle bitki köklerinden Cd alınmasını engellenmesi Cd biyolojik etkilerini en aza indirmek için çok önemli olabileceği ifade edilmiştir. (McLaughlin ve ark., 1999).

Pb, Cr, Al, Cu ve de Cd gibi metallerin uzun süreli etkisine maruz kalan bitkilerde kök büyümesi gövdeye oranla önemli derecede etkilenmektedir. Ancak bu durumun bitkinin gelişim evresi, yetiştirme koşulları bitki türlerine ve göre değiştiği belirtilmiştir (Greger ve ark., 1991). Kırbağ-Zengin (2002) *Phaseolus vulgaris* L. fidelerinde Hg, Cd, Cu'un ve Pb uygulamalarının kök, gövde ve yaprak büyümesini engellediğini tespit etmiştir. Cd'un köklerde hasara neden olmaktadır (Sanitá di Toppi ve Gabrielli, 1999). Ergün ve Öncel (2009) Pb, Cd, ve Zn uyguladıkları buğday fidelerinde kök büyümesinin Zn uygulanan fidelerde artarken Cd uygulanan fidelerde konsantrasyon artışına bağlı olarak azaldığını tespit etmişlerdir.

Kontrol ile 10 ve 15 μ M Cd uygulamalarına ve ayrıca Cd ile birlikte 5 μ M Zn uygulamalarına maruz kalan fidelerde kök su içeriği farkı istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır (Şekil 3., Ek 3).

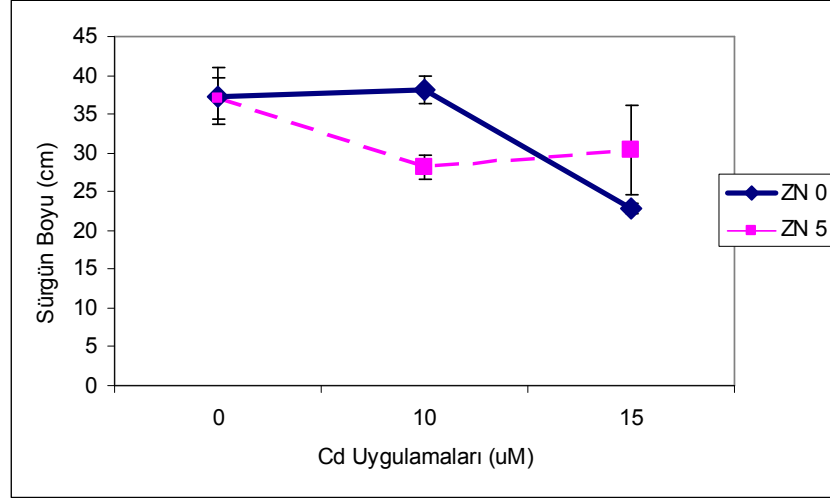


Şekil 3. Cd, Zn ve Cd+Zn uygulamalarının mısır (*Zea mays* L.) fidelerinde kök su içeriğine etkisi (n=3).

Cd'a maruz kalan mısır fidelerinde kök büyümesinde meydana gelen inhibisyonlar bakımından bulgularımız Greger ve ark. (1991), Kırbağ-Zengin (2002), Sanitá di Toppi ve Gabrielli (1999) ve Ergün ve Öncel (2009)'in bulgularına benzetilebilir.

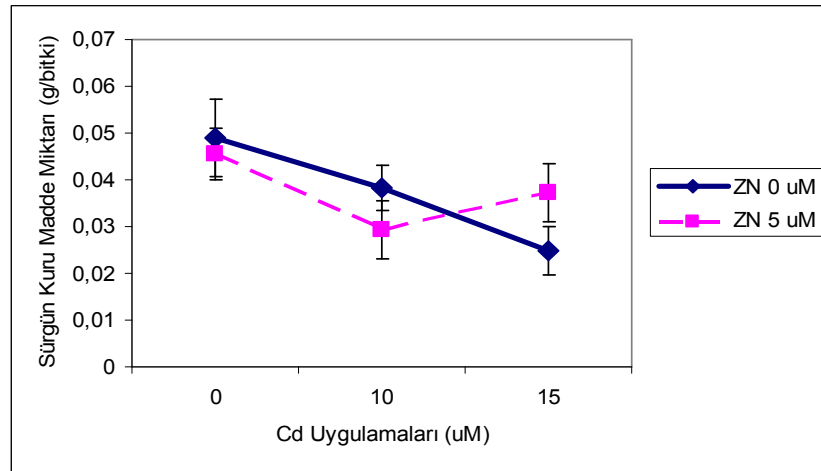
4.2. Sürgün Gelişimine Etkisi

Sürgün boyu 15 μM Cd uygulanan fidelerde kontrole göre azalmıştır. ($p < 0,05$). Cd ile birlikte Zn uygulamalarının sürgün boyuna etkisi $p < 0,05$ düzeyinde önemli bulunmuştur. 10 μM Cd uygulanan fidelerde sürgün farkı boyu kontrole ve 15 μM Cd uygulamasına göre istatistik olarak önemli bulunmamıştır (Şekil 4., Ek 4).



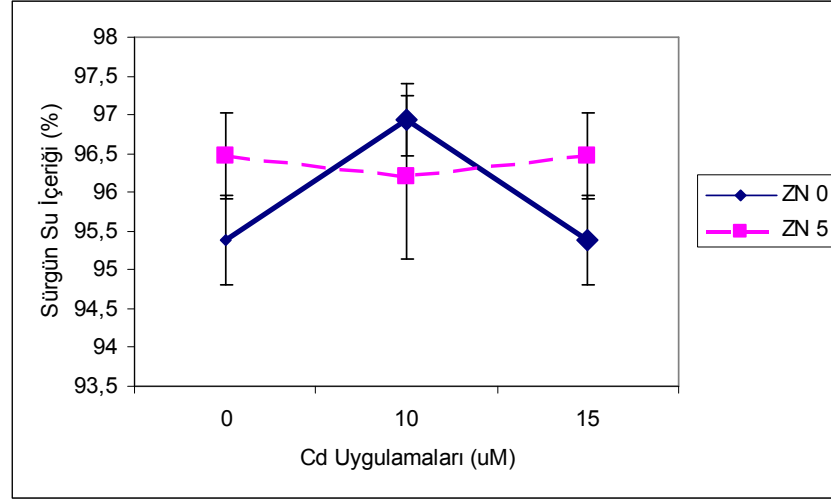
Şekil 4. Cd, Zn ve Cd+Zn uygulamalarının mısır (*Zea mays L.*) fidelerinde ortalama sürgün boyuna etkisi ($n=3$).

Çalışmamızda Cd uygulamasında sürgün kuru ağırlığının kontrol fidelerine göre önemli ölçüde azaldığı bulunmuştur ($p < 0,05$) (Şekil 5., Ek5) fakat uygulanan Cd dozları arasında istatistiksel olarak bir fark bulunmamaktadır. Zn ve Cd+Zn uygulamaları arasındaki etkileşim istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.



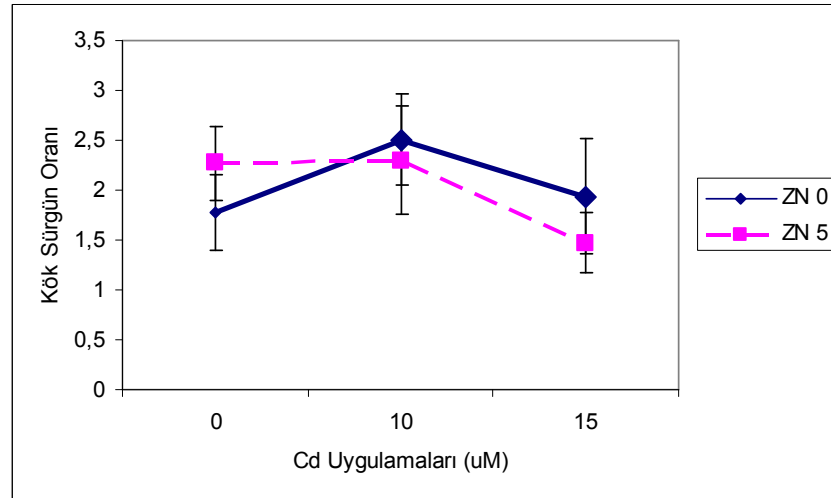
Şekil 5 Cd, Zn ve Cd+Zn uygulamalarının mısır (*Zea mays L.*) fidelerinde ortalama sürgün kuru madde miktarına etkisi ($n=3$).

Araştırmamızda kontrol ile 10 ve 15 μM Cd uygulamalarına ve ayrıca Cd ile birlikte 5 μM Zn uygulamalarına maruz kalan fidelerde sürgün su içeriği farkı istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır (şekil 6., Ek 6) .



şekil 6. Cd, Zn ve Cd+Zn uygulamalarının mısır (*Zea mays L.*) fidelerinde sürgün su içeriğine etkisi (n=3).

Kontrol ile 10 ve 15 μM Cd uygulamalarına ve ayrıca Cd ile birlikte 5 μM Zn uygulamalarına maruz kalan fidelerde kök/sürgün oranının kontrole göre farkı istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır (şekil 7, Ek 7) .



şekil 7. Cd, Zn ve Cd+Zn uygulamalarının mısır (*Zea mays L.*) fidelerinde kök/sürgün oranına etkisi (n=3).

Cd ve Pb uygulanan mısır çeşitlerinde (Vero, Luce, Doge, DK626,DK743, 31G98, 3223 ve 32D99) Cd (0,9 mM) ve Pb (8 mM) konsantrasyonlarında, dayanıklı

çeşitler olan 32D99 ve Ver o'nun gövde uzunluklarında sırası ile % 31 ve % 27 oranına, daha az dayanıklı 3223 çeşidinde ise sırası ile % 25 ve % 18 oranında inhibisyona belirlenmiştir. Mısır çeşitlerinin gövde büyümesinin Cd stresine maruz kalan fidelerde en az kök uzunlukları kadar inhibisyona uğradığı ifade edilmiştir (Ayhan, 2006). Ergün ve Öncel (2009) Pb, Cd ve Zn uygulanan buğday fidelerinde sürgün büyümesinin Zn uygulanan fidelerde artarken Cd uygulanan fidelerde konsantrasyon artışına bağlı olarak azaldığını tespit etmişlerdir.

0,1 ve 0,5 mM Cd ve Ni uygulanan *Oryza sativa* fidelerinde, bu ağır metallerin bitki bünyesinde önemli derecede biriktirildiği ve gövde boyunda azalma tespit edilmiştir (Rubio ve ark., 1994). *Phaseolus vulgaris* L. cv. contender fidelerinin yapraklarına uygulanan 3 µM Cd'un büyümeyi azaldığı ifade edilmiştir (Poschenrieder ve ark., 1989). Kırbağ-Zengin (2002) Hg, Cd, Cu ve Pb uygulamalarının *Phaseolus vulgaris* fidelerinde gövde büyümesinde inhibisyona neden olduğu bulunmuştur. Cd ve Ni uygulamaları *Oryza sativa* fidelerinde gövde uzamasını inhibe etmiştir (Moya ve ark., 1993).

Çalışmamızda, Cd konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak sürgün boyunda meydana gelen azalma ile ilgili bulgularımız Poschenrieder ve ark. (1989), Rubio ve ark. (1994), Moya ve ark. (1993), Kırbağ-Zengin (2002), Ayhan (2006) ve Ergün ve Öncel (2009)'in bulgularıyla uyumludur.

4.3 Askorbat Peroksidaz Aktivitesi

Çalışmamızda 10 ve 15 µM Cd uygulamalarına ve ayrıca Cd ile birlikte yapılan 5 µM Zn uygulamaları AP enzim aktivitesini önemli derecede etkilemiştir ($p < 0,01$) (Şekil 8., Ek 8). AP aktivitesi çinkosuz uygulamalarda 10 µM Cd uygulamasının yaklaşık olarak üç katına, 15 µM Cd uygulamasında ise yaklaşık olarak 6 katına çıkmıştır. 5 µM Zn uygulamalarında ise Askorbat peroksidaz aktivitesi azalırken, 10 µM Cd+Zn uygulamasında ise yaklaşık olarak dört katlık önemli bir artış gözlenmiştir. Bununla beraber 15 µM Cd uygulamasında ise enzim aktivitesinin önemli düzeyde azaldığı belirlenmiştir ($p < 0,01$).

Genellikle Zn uygulamaları bitkilerde Cd alımını ve birikimini azaltmaktadır. (Honma ve Hidrata, 1978; McLaughlin ve ark., 1994; Oliver ve ark., 1997). Zn'nun besininin bitkinin Cd almasındaki ve biriktirmesindeki etkisi sürekli değildir. Cd ile Zn'un sinerjistik etkilerini gösteren raporlar da bulunmaktadır. Nan ve ark (2002)., buğday fidelerinde Cd uygulamasının artması durumunda Zn konsantrasyonunun arttığını veya aksi durumun gerçekleşerek Zn konsantrasyonunun azaldığını belirtmiştir. Aynı gözlemler Smilde ve ark., (1992) ve Dudka ve ark., (1994) tarafından da yapılmıştır. Wu ve Zhang (2002) arpa bitkisinde Zn uygulamasındaki artışın Cd toksisitesini azalttığını ve büyümeyi desteklediğini ve membran hasarını azalttığını bulmuşlardır.

Bitkilerde kaynaklanan ROT türlerinin sebep olduğu oksidatif hücre hasarlarına Cd toksisitesinin sebep olduğu ifade edilmektedir. Bu sebeple Cd toksisitesi altında bitkilerin ROT'ni ortadan kaldırabilme yeteneği Cd toksisitesine karşı önemli bir tolerans mekanizmasıdır (Shah ve ark., 2001; Olmos ve ark., 2003). Zn'un çevresel stres koşulları altında oluşan ROT tarafından hücreye verilen hasarlarını azaltmasında pek çok koruyucu rolü vardır. Bu nedenle kuraklık, düşük sıcaklık stresi, yüksek ışık, tuzluluk ve Fe toksitesi gibi stres koşullarına karşı bitkinin tolerans sağlama mekanizmalarında Zn'un rolü belirlenmiştir (Cakmak, 2000). Muhtemelen, Zn bitkiyi, Zn-içeren bir enzim olan süperoksit dismutaz gibi antioksidan enzim aktivitelerini artırmak ve enzimlerin -SH gruplarına ve membran proteinlerine bağlanmak için Cd'la yarışarak, bitkiyi Cd toksisitesine karşı korumaktadır. Wu ve Zhang (2002) Cd toksisitesinin neden olduğu kök kuru madde miktarının azalmasını ve membran hasarlarının artmasını Zn uygulamasının azaltabileceğini göstermişlerdir. Durum buğdayının ekmek buğdayına göre Cd toksisitesine karşı olan yüksek duyarlılığının sebebi Cd'un Cd bağlayan proteinler tarafından veya vakuol bölümlerinde etkisiz hale getirilmesinde durum buğdayının hücresele seviyede daha zayıf bir detoksifikasyon mekanizması göstermesi olabileceği ifade edilmiştir (Grant ve ark., 1998; Cobbet, 2000).

Askorbat–Glutatyon döngüsünde AP, H₂O₂'in ortadan kaldırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Song ve ark. (2009) Cd toleransında silikon (Si)'un rolünü *Brassica chinensis* L.'nin Cd a toleranslı ve duyarlı iki çeşidinde yaptıkları çalışmada

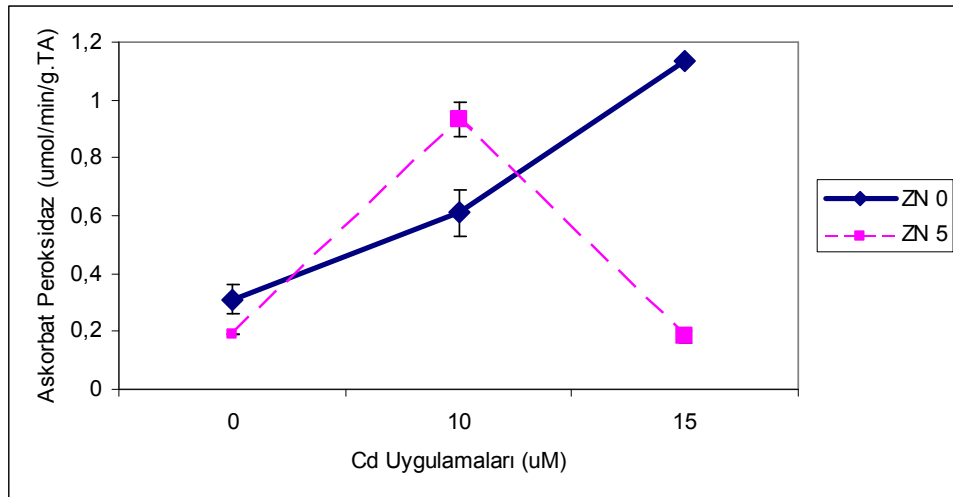
düşük Cd uygulamalarının bitkilerde AP aktivitesini arttırırken Cd uygulamala dozlarının yükselmesiyle AP aktivitesinin azaldığı gözlenmiştir.

Aravind ve Prasad (2005) *Ceratophyllum demersum* L. (Coontail) makrofitinde Zn ve Cd'un antogonistik etkilerini incelemiş ve Zn uygulamasının bitkide Cd alımını baskıladığını belirlemişlerdir. Araştırmacılar Cd+Zn uygulaması yapılan bitkilerde SOD, KAT, GP ve AP aktivitelerinin sadece Zn veya sadece Cd uygulanan bitkilere göre daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Aravind ve Prasad (2005) *C. demersum* L. 10 µM Cd'un APX aktivitesini çok az bir şekilde etkilediğini ancak Cd+Zn uygulamalarının askorbat-glutasyon siklusunu enzimlerin (AP de dahil) aktivitesini arttırdığını ifade etmişlerdir.

Ayhan (2006) Pb ve Cd stresinde mısır çeşitlerinin yapraklarında, ağır metal konsantrasyon artışına paralel olarak AP, GR ve POD enzim aktivitelerinde kontrole oranla önemli düzeyde artış olduğunu tespit etmiş ve bu durumu ilgili üç enzimin, SOD aktivitesi sonucu ortaya çıkan H₂O₂'i etkisizleştirmede önemli olduğunu ifade etmiştir. Ancak araştırmacı çok yüksek Cd konsantrasyonunda enzimlerin aktivitelerinin kontrole göre önemli bir oranda artsa dahi 5 mM Cd uygulaması ile karşılaştırıldığında azalma meydana geldiğini ifade etmiştir.

Bu çalışmada bizim Cd konsantrasyonlarındaki artışa bağlı olarak AP enzim aktivitesinde ki artış ile ilgili verilerimiz Song ve ark. (2009), Ayhan (2006) ve Aravind ve Prasad (2005) verileri ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 8. Cd, Zn ve Cd+Zn uygulamalarının mısır (*Zea mays* L.) fidelerinde Askorbat Peroksidaz Enzim aktivitesine etkisi (n=3).

Cd iyonları oksidatif stres, peroksidasyon ve disorganizasyona sebep olarak tilakoid membran yapısına direk olarak etki eder (Stoyano ve Tchakalova, 1999) ve tilakoid membrandaki yağ bileşimini değiştirir (Mohanty ve Mohanty, 1988) Aynı zamanda Zn'nun oksidatif ve peroksidatif hasara, membran bütünlüğünün azalmasına (Aravind ve Parasad 2005; Cakmak, 2000; Powell, 2000) ve hatta membran geçirgenliğinin değişmesine (Bettger ve O'Dell, 1981) karşı biyomembranı koruyucu ve sabitleyici bir etkisi olduğu bilinmektedir.

Bu durumda 10 µM Cd+Zn uygulamasında ise yaklaşık olarak dört katlık önemli bir artış ile ilgili verilerimizin Cd toksisitesi durumunda yapılan Zn uygulamasının oksidatif ve peroksidatif hasara karşı bitkiyi korumasıyla ilişkili olabileceğini düşünmekteyiz. Genellikle Zn uygulamaları bitkilerde Cd alımını ve birikimini azaltmaktadır (Honma ve Hirata, 1978; McLaughlin ve ark., 1994; Oliver ve ark., 1997). Ancak çalışmamızda 15 µM Cd+Zn uygulamasında ise enzim aktivitesinin önemli düzeyde azaldığı belirlenmiştir ($p<0,01$). Bu durumda 15 µM Cd ile birlikte uygulama yaptığımız Zn konsantrasyonunda Cd ile Zn'un sinerjistik etki göstermek suretiyle AP enzim aktivitesinde azalmaya neden olabileceğini düşünmekteyiz.

Ayrıca, Zn uygulamalarının bitkideki Cd konsantrasyonu üzerine etkileri bitki türüne, büyüme şartlarına ve kullanılan Cd konsantrasyonlarına bağlı olabileceği ifade edilmektedir (Honma ve Hirata, 1978; Oliver ve ark., 1997; Welch ve ark., 1999; Hart ve ark., 2002).

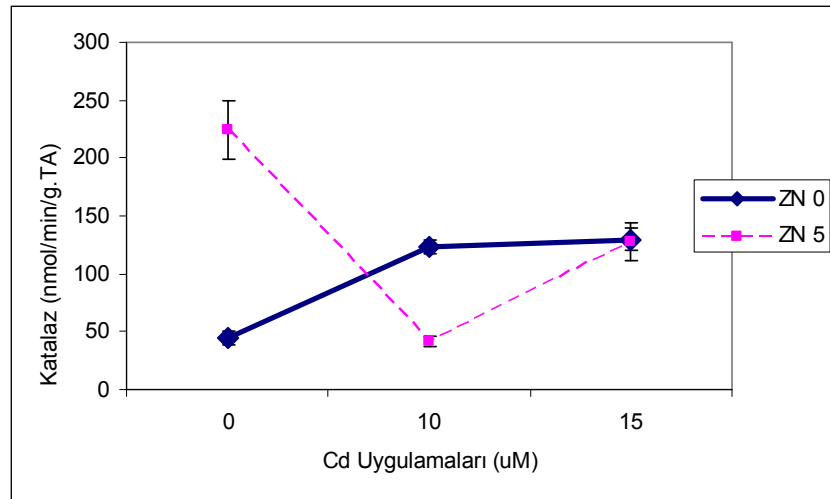
4.4 Katalaz Aktivitesi

Çalışmamızda katalaz aktivitesi 10 ve 15 µM Cd uygulanan fidelerde kontrole önemli fark bulunmuştur ($p<0,01$). (Şekil 9, Ek 9). Çinko'nun KAT aktivitesi üzerindeki etkisi kontrole göre önemli bulunmuştur ($p<0,05$). 10 µM Cd uygulamasıyla kontrol arasında katalaz aktivitesi bakımında önemli fark varken($p<0,01$) 15 µM Cd uygulaması ile kontrol arasında KAT aktivitesine göre istatistiksel olarak fark bulunmamaktadır. 10 µM Cd uygulamasıyla 15 µM Cd uygulaması arasındaki fark $p<0,05$ düzeyinde önemli bulunmuştur. Zn-Cd etkileşimi ise $p<0,01$ düzeyinde önemli bulunmuştur.

Song ve ark. (2009) Cd toleransında silikon (Si)'un rolünü *Brassica chinensis* L'nin Cd a toleranslı ve duyarlı iki çeşidinde yaptıkları çalışmada tüm çeşitlerde yapraktaki SOD ve KAT aktivitesi Cd stresi altında önemli seviyede azaldığını tespit etmişlerdir.

Aravind ve Parasad (2005) *Ceratophyllum demersum* L.(Coontail) makrofitinde Zn ve Cd'un antagonistik etkilerini incelemiş ve Zn uygulamasının bitkide Cd alımını baskıladığını belirlemişlerdir. Araştırmacılar Cd+Zn uygulaması yapılan bitkilerde SOD, KAT, GP ve AP aktivitelerinin sadece Zn veya sadece Cd uygulanan bitkilere göre daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Hasan ve ark. (2008) *Cicer arietinum* L. cv. Uday fidelerini Cd ve 28-homobrassinolide (HBL) ile muamele etmişler ve artan Cd konsantrasyonuna bağlı olarak KAT ve SOD aktivitelerinin arttığını belirlemişlerdir.



Şekil 9. Cd, Zn ve Cd+Zn uygulamalarının mısır (*Zea mays* L.) fidelerinde KAT aktivitesine etkisi. (n=3).

Yüksek Cd konsantrasyonlarında meydana gelen enzim aktivitelerindeki azalmanın enzim yapısındaki disülfid bağlarında oluşan kopmalar sonucu enzimin inaktif hale geçmesinden kaynaklanabilir (Lee ve ark., 1998).

Bu durumda bizim Cd konsantrasyonlarındaki artışa bağlı olarak KAT enzim aktivitesindeki artış ile ilgili verilerimiz Hasan ve ark. (2008) ile uyumlu ancak Song ve ark. (2009)'un verileri ile uyumlu değildir. Aravind ve Prasad (2005)'ın Zn uygulamalarının KAT aktivitesinde artışa neden olduğuna dair verileri ile 15 µM Cd+Zn uygulamasında KAT aktivitesinde artış ile ilgili verilerimiz uyumludur

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Cd uygulaması yapılan mısır fidelerinin kök boy uzaması etkilenmemiş ancak sadece Zn uygulanan ve Cd ile birlikte Zn uygulanan fidelerde kök büyümesi önemli oranında teşvik edilmiştir. En yüksek Cd konsantrasyonunda kök ve sürgün kuru ağırlığında ve sürgün boyunda önemli ölçüde azalma saptanmıştır. Cd ile birlikte Zn uygulamalarının ise sürgün boyuna olumlu yönde etki ederken sürgün ve kök kuru ağırlığına herhangi bir etkisi olmamıştır. Fidelerde Cd ve Zn uygulamalarının kök ve sürgün su içeriği (%), kök sürgün oranına etkisi olmamıştır. Sonuç olarak Cd sürgün boy uzamasını olumsuz yönde etkilerken Zn Cd'un toksik etkilerini boy uzaması bakımından ortadan kaldırılabirirken kuru ağırlık artışında Cd'un etkilerinin giderilmesinde yeterli olmamıştır.

Tüm Cd uygulamalarında ve ayrıca Cd ile birlikte uygulanan Zn'un AP enzim aktivitesini önemli derecede etkilediği gözlenmiştir. Çinkosuz uygulamalarda AP aktivitesi artarken Zn'un tek başına uygulandığında AP aktivitesi azalmış, 10 µM Cd+Zn uygulamasında ise yaklaşık olarak dört katlık önemli bir artış gözlenmiştir. Bununla beraber 15 µM Cd uygulamasında ise enzim aktivitesinin önemli düzeyde azaldığı belirlenmiştir. Cd'un toksik etkilerinin giderilmesi için AP aktivitesinde artış olduğu

KAT aktivitesi 10 ve 15 µM Cd uygulanan fidelerde kontrole önemli fark bulunmuştur. Çinko'nun katalaz aktivitesi üzerindeki etkisi kontrole göre önemli bulunmuştur. 10 µM Cd uygulamasıyla kontrol arasında katalaz aktivitesi bakımında önemli fark varken 15 µM Cd uygulaması ile kontrol arasında katalaz aktivitesine göre istatistiksel olarak fark bulunmamaktadır. 10 µM Cd uygulamasıyla 15 µM Cd uygulaması arasındaki fark ve Cd+Zn etkileşimi istatistiksel olarak önemli düzeyde bulunmuştur.

Ağır metaller doğaya verdikleri zarar kadar tarımsal üretime de ciddi bir zarar vermektedir. Ağır metallerin dünya yüzeyinde yarattığı tahribat birçok tarım alanında ürün verimini düşürmekte ya da tamamen önlemektedir.

Ağır metaller etkilerini hücre içerisinde meydana getirdikleri serbest radikaller yoluyla ortaya koymaktadır, hayvanlarda ve bitkilerde; doku hasarı, norodejeneratif hastalıklar, kanser ve yaşlanmayı içine alan pek çok hastalıkta önemli rol oynamaktadır

(Griffits ve ark. 1998). Tüm radikallere karşı, organizmada enzimatik ve enzimatik olmayan savunma sistemleri bulunmaktadır. Serbest radikalleri uzaklaştırıcı etkisi olan bu antioksidan bileşikler bu nedenle günümüzde son derece önem kazanmıştır. Antioksidanlar, fazlaca oluşan reaktif oksijen radikallerine karşı enzimatik savunma sisteminin yetersiz kalması durumunda organizmayı koruyucu olarak rol oynamaktadırlar (Gençaslan ve Çoban, 2007).

Sonuçlarımıza göre, Cd ile birlikte Zn uygulaması gerek kök ve gerekse de gövde boyu üzerinde stimülatör etkiye sahip olduğu ve AP ve KAT aktivitesi üzerindeki etkisinin önemli olduğu belirlenmiştir.

Bu yüzden bitkilerde ağır metal stresine karşı yürütülen savunmayı daha iyi anlayabilmek için antioksidan savunma sisteminin daha iyi araştırılması kadar Zn gibi temel besin elementi olan bir diğer mineralinde Cd toksisitesini engellemedeki rolünü anlamak için daha çok çalışma yapmak gerekmektedir. Bu alanda yapılacak çalışmalar sonucu Cd gibi bitkiler ve hayvanlar için yüksek derecede toksik olan ağır metallere direncin moleküler temellerinin daha iyi bilinmesiyle, tarım bitkilerinin ağır metallere dayanıklı varyetelerinin seçilmesi, Cd'un bitkiye alınmasının engellenmesi ve alındıktan sonra ortaya çıkan hasarın en aza indirilmesi mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

- Akman Y., Ketenoğlu O., Evren H., Kurt L., Düzenli S., 2000. **Çevre Kirliliği-Çevre Biyolojisi**. Palme Yayıncılık. Ankara.
- Angela P. V., Peter J.L., Ricardo A.A., 2001. Antioxidant enzymes responses to cadmium in radish tissues, *Phytochemistry* 57 (5): 701-710.
- Apaydın A., Kutsal A. Ve Atakan C., 2002. Uygulamalı İstatistik. Klavuz Kitabevi. Ankara.
- Apel, K., Hirt, H., 2004. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. **Ann. Rev. Plant Biol.** 55: 373–399.
- Aravind P, Parasad M.N.V., 2005, Cadmium-Zinc interactions in a hydroponic system using *Ceratophyllum demersum* L.: adaptive ecophysiology, biochemistry and molecular toxicology. **Braz. J. Plant Physiol.** 17(1): 3-20.s
- Arnon D.I., Hoagland D.R. 1940. Crop production in artificial solutions and in soils with special reference to factors influencing yields and absorption of inorganic nutrients. In: F.C. Steward. *Plant Physiol. A Treatise*. 3, Academic Press, 1963, London.
- Asada K., 1992. Ascorbate peroxidase – a hydrogen peroxide scavenging enzyme in plants. **Physiol. Plant.** 85: 235–41.
- Asada, K., 1999. The water-water cycle in chloroplasts: scavenging of active oxygens and dissipation of excess photons, *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 85: 235-241.
- Ayhan B., 2006. Mısır (*Zea mays* L.)'ın bazı çeşitlerinde ağır metal (Cd ve Pb) stresinin etkilerinin belirlenmesi. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyoloji Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi.
- Bazzaz, F.A., Rolfe, G.L., Carlson, R.W., 1974. Effect of Cd on photosynthesis and transpiration of excised leaves of corn and sunflower. **Physiol. Plant.** 32: 373-376.
- Bettger W.J., O'Dell B.L., 1981. A critical physiological role of Zn in the structure and function of biomembranes, **Life Sci.** 28: 1425-1438.
- Bittsánszky A, Kömives T, Gullner G, Gyulai G, Kiss J, Heszky L, Radimszky L, Rennenberg H., 2005. Ability of transgenic poplars with elevated glutathione content to tolerate zinc (Zn^{2+}) stress. **Environ. Int.**; 31:251– 4.
- Chaui A., Mazhoudi S., Ghorbal H.M., Ferjani E., 1997. Cadmium ve zinc induction of lipid peroxidation and effects on antioxidant enzyme activities in bean (*Phaseolus vulgaris* L) **Plant Sci.** 127: 139-147.
- Clijsters H., Van Assche F., 1985. Inhibition of photosynthesis by metals, **Photosynth. Res.** 7: 31–40.
- Clijsters H., 1996. Oxidative damage and defense mechanisms in primary leaves of *Phaseolus vulgaris* as a result of root assimilation of toxic amounts of copper, **Physiol. Plant.** 96: 506–512.
- Cobbett, C.S., 2000. Phytochelatins and their roles in heavy metal detoxification. **Plant Physiol.** 123, 825-832.
- Cuypers A., Vangronsveld J., Clijsters H., 2000. Biphasic effect of copper on the ascorbate- glutathione pathway in primary leaves of *Phaseolus vulgaris* L. Seedlings during the early stages of metal assimilation, **Physiol. Plant.** 110: 512–517.
- Çakmak I., Marschner H., 1992. Magnesium deficiency and high-light intensity

- enhance activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase and glutathione reductase in bean leaves. **Plant Physiol.**, 98: 1222-1227.
- Çakmak I., 1994. Activity of ascorbate-dependent H_2O_2 scavenging enzymes and leaf chlorosis are enhanced in magnesium- and potassium- deficient leaves, but not in phosphorus-deficient leaves. **J. Exp. Bot.**, 45: 1259-1266.
- Çakmak, I., 2000. Role of zinc in protecting plant cells from reactive oxygen species. **New Phytologist** 146: 185-205.
- Çakmak, I., Welch, R.M., Erenoglu, B., Romheld, V., Norvell, W.A., Kochian, L.V., 2000. Influence of varied zinc supply on retranslocation of cadmium (^{109}Cd) and rubidium (^{86}Rb) applied on mature leaf of durum wheat seedlings. **Plant Soil.** 219: 279-284.
- Çakmak I., Braun H.J. 2001. Genotypic variation for zinc efficiency: Reynolds MP, Ortiz Monasterio JI., McNab A (eds); Application of physiologynin wheat breeding, pp. 183-199, D.F. CIMMYT, Mexico.
- Çepel N., 2003 Ekolojik sorunlar ve çözümleri, TÜBİTAK Popüler Bilim Kitapları, 23.
- Das, P., Samantaray, S., Rout, G.R., 1997. Studies on cadmium toxicity in plants: a review. **Environ. Pollut.** 98: 29–36.
- De Vos C.H.R., Schat H., Voojjs R., Ernst W.H.O., 1989. Copper induced damage to the permeability barrier of *Silene cucubalus*, **J. Plant Physiol**, 135: 164-169
- Dixit, V., Pandey, V., Shymar, R., 2001. Differential antioxidative responses to cadmium in roots and leaves of pea (*Pisum sativum* L. cv. Azad). **J. Exp. Bot.** 52:1101–1109.
- Dudka, S., Piotrowska, M., Chlopecka, A., 1994. Effect of elevated concentrations of Cd and Zn in Soil on spring wheat yield and the metal contents of the plants. **Water Air Soil Pollut.** 76: 333-341.
- Ekmekçi Y., Tanyolaç D., Ayhan B., 2007. Effects of cadmium on antioxidant enzyme and photosynthetic activities in leaves of two maize cultivars. **J. Plant Physiol**, 165: 600-611.
- Ergün N., Öncel I., 2009. Ekmeklik buğdayda (*triticum aestivum* l.) ilk gelişme döneminde kök ve gövde büyümesi üzerine bazı ağır metal ve ağır metal-hormon uygulamalarının etkileri. **YYÜ Tar. Bil. Derg.** 19(1):11-17.
- Fernandes, J.C., Henriques, F.S., 1991. Biochemical, physiological and structural effects of excess copper in plants. **Bot. Rev.** 57: 246–273
- Filipic , M., Fatur, T., Vudrag, M., 2006. Molecular mechanisms of cadmium induced mutagenicity. **Hum. Exp. Toxicol.** 25: 67–77.
- Foyer C.H., Descourviere P., Kunert K.J., 1994. Protection against oxygen radicals: an important defense mechanism studied in transgenic plants. **Plant Cell Environ**;17: 507–23.
- Gençaslan G., Çoban T., 2007. Türkiye’de tıbbi amaçlı kullanılan bazı bitkilerin antioksidan etkilerinin taranması. Ankara Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü.
- Goering P.L., Waalkes M.P., Klaausen C.D., 1994. Toxicology of metals, biochemicals, In: **Handbook of experimental pharmacology**, 115: pp. 189-214 Springer, New York.
- Gomes, D.S., Fragoso, L.C., Riger, C.J., Panek, A.D., Eleutherio, E.C.A., 2002. Regulation of cadmium uptake by *Saccharomyces cerevisiae*. **Biochim. Biophys. Acta** 1573, 21-25.
- Grant, C.A., Buckley, W.T., Bailey, L.D., Selles, F., 1998. Cadmium accumulation in

- crops. **Can. J. Plant Sci.** 78: 1-17.
- Greger M., Ogren E., 1991. Direct and indirect effects of Cd²⁺ on photosynthesis in sugarbeet (*Beta vulgaris*), **Physiol. Plant.** 83: 129-135.
- Greger, M. Brammer E., Linberg S., Larsson C., Idestam-Almgist J., 1991. Uptake and physiological effects of cadmium in sugar beet (*Beta vulgaris*) related to mineral provision. **J. Exp.Bot.** 42 (239): 729-737.
- Griffits, H.R., Lunec, J., In Arouma, O.I., Halliwell, B., 1998. (Eds.) **Molecular Biology of Free Radicals in Human Diseases**. Oica International, s.; 327-366 London.
- Guo Y., Marschner H., 1995. Uptake, distribution, and binding of cadmium and nickel in different plant species. **J Plant Nut** 18: 2691–2706.
- Gupta U.C., Gupta S.C., 1998 Trace element toxicity relationships to crop production and livestock and human health: implications for management, **Commun. Soil Sci. Plant Anual.** 29: 1491–1522.
- Halliwell, B., 1981. Free radicals, oxygen toxicity and aging, In: Sohal RS, ed. **Age Pigments**, Elsevier, 1-62.
- Hart, J.J., Welch, R.M., Norvell, W.A., Kochian, L.V., 2002. Transport interactions between cadmium and zinc in roots of bread and durum wheat seedlings. **Physiol. Plant** 116, 73e78.
- Hasan S.A., Hayat S., Ali B., Ahmad A., 2008. 28-Homobrassinolide protects (*Cicer arietinum*) from cadmium toxicity by stimulating antioxidants. **Environmental Pollution** 151 60-66.
- Honma, Y., Hirata, H., 1978. A noticeable increase in Cd absorption by Zn deficient rice plants. **Soil Sci. Plant Nutr.** 24: 295-297.
- Huang, C.Y., Bazzaz, F.A., Vanderhoet, L.N., 1974. The inhibition of soybean metabolism by cadmium and lead. **Plant Physiol.** 54: 122-124.
- International Agency for Research on Cancer (IARC), 1993. Beryllium, cadmium, mercury, and exposures in glass manufacturing industry. In: **IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans**, pp-41-117; 58: Lyon.
- Johnson C.M., Ulrich A., 1959. **Analytical methods for use in plant analysis**. California Agricultural Experiment Station, Bulletin 766, USA.
- Kappus H., 1985. Lipid peroxidation: mechanisms, analysis, enzymology and biological relevance, in : H. Sies (Ed.) **Oxidative Stres**, Academic pres, pp, 270-310 London.
- Keshan U., Mukherji S., 1992. Effect of cadmium toxicity on chlorophyll content, Hill activity and chlorophyllase activity in *Vigan radiata* L. leaves, **Indian J. Plant Physiol.** 35(3): 225-230.
- Kırbağ-Zengin F., 2002. Bazı ağır metallerin (Hg⁺⁺, Cd⁺⁺, Cu⁺⁺ ve Pb⁺⁺) fasulye fidelerinin (*Phaseolus vulgaris* L.) gelişmesi üzerindeki etkilerinin biyokimyasal yönden araştırılması. Doktora tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Köleli N., Eker S., Cakmak I., 2004. Effect of zinc fertilization on cadmium toxicity in durum and bread wheat grown in zinc deficient soil. **Environ. Pol.** 131: 453-459.
- Lee S.H., Ahsan N., Lee K.W., Kim D.H., Lee D.G., Kwak S.S., Kwon S.Y., Kim T.H., Lee B.H., 2007. Simultaneous overexpression of both CuZn superoxide dismutase and ascorbate peroxidase in transgenic tall fescue plants confers increased tolerance to a wide range of abiotic stresses, **J. Plant Physiol.** 164: 1626-1638
- Loggini B., Scartazza A., Beugnoli E., Navari-Izzo F., 1999. Antioxidative defense

- system, pigment composition, and photosynthetic efficiency in two wheat cultivars subjected to drought, **Plant Physiol.** 119: 1091-1099.
- Malik D., Sheoran I.S., Singh R., 1992. Carbon metabolism in leaves of Cadmium treated wheat seedlings, **Plant physiol. Biochem.** 30: 223-229.
- Marschner, H., 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, London, UK.
- McLaughlin, M.J., Palmer, L.T., Tiller, K.G., Beech, T.A., Smart, C.M.K., 1994. Increased soil salinity causes elevated cadmium concentrations in field-grown potato tubers. **J. Environ. Qual.** 23: 1013-1018.
- McLaughlin, M.J., Parker, D.R., Clarke, J.M., 1999. Metals and micronutrients in food safety issues. **Field Crops Res.** 60: 143-163.
- Metwally, A., Safronova, V.I., Belimov, A.A., Dietz, K.J., 2005. Genotypic variation of the response to cadmium toxicity in *Pisum sativum* L. **J. Exp. Bot.** 56: 167-178.
- Mohanty N., Mohanty P., 1988. Cation effects on primary processes of photosynthesis, in: R. Singh, S.K. Sawhney (Eds.), **Advances in Frontier Areas of Plant Biochemistry**, Prentice-Hall, pp1-18 New Delhi, India.
- Moya, J.L., Ros, R., Picazo, I., 1993. Influence of cadmium and nickel on growth, net photosynthesis and carbohydrate distribution in rice plants. **Photosynthesis Res.** 36: 75-80.
- Munzuroglu, O. and Geckil, H., 2002. Effects of metals on seed germination, root elongation, and coleoptile and hypocotyl growth in *Triticum aestivum* and *Cucumis sativus*. **Environ. Cont. and Toxi.**, 43: 203-213.
- Nan, Z.R., Li, J.J., Zhang, J.M., Cheng, G.D., 2002. Cadmium and zinc interactions and their transfer in soil-crop system under actual field. **Sci. Total Environ.** 285: 187-195.
- Neelima A., Pardhasaradhi P., Mohanty P., 1991. Inhibition of chloroplast photochemical reactions by treatment of wheat seedlings with low concentrations of cadmium; analysis of electron transport activities and changes in fluorescence yield, **Plant Cell Physiol.** 32(7): 943-951.
- Nellessen J.E., Fletcher J.S., 1993. Assessment of published literature on the uptake, accumulation, and translocation of heavy metals by vascular plants. **Chemosphere** 9: 1669-1680
- Niober E., Richardson D.H.S., 1980. The replacement of the non-descriptive term "heavy metals" by a biologically and chemically significant classification of metal ions. **Environ. Pollut. Ser. B.** 1: 3-26.
- Oliver, D.P., Wilhelm, N.S., McFarlane, J.D., Tiller, K.G., Cozens, G.D., 1997. Effect of soil and foliar applications of zinc on cadmium concentration in wheat grain. **Aust. J. Exp. Agricult.** 37: 677-681.
- Olmos E., Martinez-Solano J.R., Piqueras A., Hellin E., 2003. Early steps in the oxidative burst induced by cadmium in cultured tobacco cells (BY-2 line). **J. Exp. Bot.** 54: 291-301.
- Padjama K., Prasad D.D.K., Prasad A.R.K., 1990. Inhibition of chlorophyll synthesis in *Phaseolus vulgaris* L. seedlings by cadmium acetate, **Photosynthetica.** 24: 399-405.
- Poschenrieder C., Gunse B., and Barcelo J., 1989. Influence of cadmium on water relations, stomatal resistance and abscisic acid content in expanding bean leaves. **Plant Physiol.** 90: 1365-1371.
- Powell S.R., 2000. The antioxidant properties of zinc, **J. Nutr.** 130: 1447-1454.
- Prasad D.D.K., Prasad A.R.K., 1987. Altered SIGMA-aminolevulinic acid metabolism

- by lead and mercury in germinating seedlings of bajra (*Pennisetum typhoideum*), **J. Plant.** 127: 241-249.
- Prasad M.N.V., 1995a. Inhibition of maize leaf chlorophylls, carotenoids and gas exchange functions by Cadmium, **Photosynthetica.** 31: 635-640.
- Parasad M.N.V., 1995b. Zinc: an overview. **Nutrition** 11: 93-99.
- Regoli F., Winston G.W., 1999. Quantification of total oxidant scavenging capacity of antioxidants for peroxynitrite, peroxy radicals and hydroxyl radicals, **Toxicol. Appl. Pharmacol.** 156: 96–105.
- Rodriguez-Serrano, M., Romero-Puertas, M.C., Zabalza, A., Corpas, F.J., Gómez, M., del Rio, L.A., Sandalio, L.M., 2006. Cadmium effect on oxidative metabolism of pea (*Pisum sativum* L.) roots. Imaging of reactive oxygen species and nitric oxide accumulation *in vivo*. **Plant Cell Environ.** 29: 1532–1544.
- Rubio M.I., Escring I., Martiner-Cortina C., Lopez-Benet F.J., Sanz A., 1994. Cadmium and nickel accumulation in rice plants. Effects on mineral nutrition and possible interactions of abscisic and gibberellic acids. **Plant Growth Regul.** 14: 151-157.
- Salisbury B.F., Ross W.C., 1992. **Plant Physiology.** Wadsworth Publishing Company, California.
- Sandalio LM, Dalurzo HC, Gómez M, Romero-Puertas MC, del Rio LA., 2001. Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plant. **J. Exp Bot.** 52:2115– 2126.
- Sanita di Toppi, L., Gabbrielli, R., 1999. Response to cadmium in higher plants. **Environ. Exp. Bot.** 41: 105–130.
- Schikler H., Caspi H., 1999. Response of antioxidative enzymes to nickel and cadmium stress in hyperaccumulator plants of the genus *Alyssum*, **Physiol. Plant.** 105: 39-44.
- Schützendübel A., Schawnz P., Teichman T., Gross K., 2001. Cd-induced changes in antioxidative systems, hydrogen peroxide content and differentiation in Scots Pine roots, **Plant Physiol.** 127: 887– 898.
- Schützendübel A, Polle A., 2002. Plant response to abiotic stress: heavy metal-induced oxidative stress and protection by mycorrhization. **J Exp Bot.** 53:1351 –1365.
- Schützendübel A., Nikolova P., Rudolf C., Polle A., 2002. Cadmium and H₂O₂-induced oxidative stress in *Populus canescens* roots, **Plant Physiol. Biochem.** 40: 577–584.
- Sersen F., Kralova K., 2001. New facts about CdCl₂ action, photosynthetic apparatus of spinach chloroplast and its comparison with HgCl₂ action, **Photosynthetica** 39(4): 575-580.
- Shah, K., Kumar, R.G., Verma, S., Dubey, R.S., 2001. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings. **Plant Sci.** 161: 1135-1144.
- Sing S., Eapen S., D'Souza S.F., 2005. Cadmium accumulation and its influence on lipid peroxidation and antioxidative system in an aquatic plant, *Bacopa monnieri* L. **Chemosphere.** 62: 233-246.
- Smeets, K., Cuypers, A., Lambrechts, A., Semane, B., Hoet, P., Van Laere, A., Vangronsveld, J., 2005. Induction of oxidative stress and antioxidative mechanisms in *Phaseolus vulgaris* after Cd application. **Plant Physiol. Biochem.** 43: 437–444.
- Smilde, K.W., Luit, B.V., Driel, W.V., 1992. The extraction by soil and absorption by plants of applied zinc and cadmium. **Plant Soil** 143: 233-238.

- Smirnoff, N., 1998. Plant resistance to environmental stress. **Curr. Opin. Biotechnol.** 9: 214-219.
- Song A., Li Z., Zhanga J., Xueb G., Fan F., Lianga Y., 2009. Silicon-enhanced resistance to cadmium toxicity in *Brassica chinensis* L. is attributed to Si-suppressed cadmium uptake and transport and Si-enhanced antioxidant defense capacity. **J. of Hazardous Materials** 172: 74–83.
- Stobrawa K., Lorenc-Plucińska G., 2008. Thresholds of heavy-metal toxicity in cuttings of European black poplar (*Populus nigra* L.) determined according to antioxidant status of fine roots and morphometrical disorders **Sci. of the Total Environ.** 390: 86-96.
- Stoyanova D., Tchakalova, 1999. Cadmium induced ultrastructural changes in shoot apical meristem of *Elodea canadensis* Rich, **Photosynthetica** 37: 47-52.
- Sun Y.H., Li Z.J., Guo B., Chu G.X., Wei C.Z., Liang Y.C., 2008. Arsenic mitigates cadmium toxicity in rice seedlings, **Environ. Exp. Bot.** 64: 264–270.
- Tappel A.L., 1973. Lipid peroxidation damage to cell components, **Fed. Proc.** 32: 1870-1874
- Topbaş MT, Brohi RA, Karaman RM, 1998 **Çevre Kirliliği**, Çevre Bakanlığı Çevre Eğitimi Yayın Dairesi, 1-3.
- Ünalın Ş., 2006. Ağır metal stresi altındaki mısır bitkisinde antioksidant enzim savunma sisteminin davranışı ve mısırın ağır metal kirliliğinin giderilmesinde kullanılabilirliğinin araştırılması, Hacettepe Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, 6-8.
- Vallee B.L., Auld D.S., 1990. Zinc coordination, function and structure of zinc enzymes and other proteins, **Biochemistry** 29: 5647–5659.
- Vallee B.L., Falchuk K.H., 1993. The biochemical basis of zinc physiology. **Phys. Rev.** 73: 79-118.
- Van Assche F., Clijsters H., 1990. Effects of metals on enzyme activity in plants, **Plant Cell Environ.** 13: 195–206.
- Van Assche, F., Cardinaels, C., Clijsters, H., 1988. Induction of enzyme capacity in plants as a result of heavy metal toxicity: dose response relation in *Phaseolus vulgaris* L. treated with zinc and cadmium. **Environmental Pollution** 52: 103-115.
- Waalkes M. 2000. Cadmium carcinogenesis in review. **J. Inorg. Biochem.** 79: 214-244
- Wagner, G.J., 1993. Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health. **Adv. Agron.** 51: 173–212.
- Waisberg, M., Joseph, P., Hale, B., Beyersmann, D., 2003. Molecular and cellular mechanisms of cadmium carcinogenesis. **Toxicology** 192: 95–117.
- Wang M., Zou J., Xunchuan D., Wusheng J., Donghua L., 2005. Cadmium and its effect on metal uptake in maize (*Zea mays* L.). **Bioresource Tech.** 98: 82-88.
- Weckx, J.E.J. and Clijsters, H.M.M., 1996. Oxidative damage and defence mechanisms in primary leaves of *Phaseolus vulgaris* as a result of root assimilation of toxic amounts of copper, **Physiol. Plant**, 96: 506-512.
- Welch, R.M., Hart, J.J., Norvell, W., Sullivan, L.A., Kochian, L.V., 1999. Effects of nutrient solution zinc activity on net uptake, translocation, and root export of cadmium and zinc by separated sections of intact durum wheat (*Triticum turgidum* L.-var durum) seedling roots. **Plant Soil** 208, 243-250.
- WHO, 1993. Guidelines for Drinking-Water Quality. Vol. 1. Recommendations. 2nd ed. **WHO**, pp. 30–44, Geneva.
- Woolhouse H.W., Toxicity and tolerance in the responses of plants to metals, in: Lange

- O.L., Nobel P.S., Osmond C.B., Ziegler H. (Eds.) 1983., **Encyclopaedia of Plant Physiology**, New Series 12C, Springer-Verlag, pp. 245–300, Berlin.
- Wu, F.B., Zhang, G.P., 2002. Alleviation of cadmium-toxicity by application of zinc and ascorbic acid in barley. **J. Plant Nutr.** 25: 2745-2761.
- Zhao, Z.-Q., Zhu, Y.-G., Kneer, R., Smith, R.E., 2005. Effect of zinc on cadmium toxicity-induced oxidative stress in winter wheat seedlings. **J. Plant Nutr.** 28:1947–1959.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans öğrenimim boyunca bana yol gösteren, tez konumun belirlenmesinde ve çalışmalarında maddi-manevi yardımlarını ve bilgilerini esirgemeyen danışman hocam, Sayın Yrd.Doç.Dr. Nuray ERGÜN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Bitki tohumu temini konusunda bana yardımcı olan Batı Akdeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü'nden Sayın Mehmet PAMUKÇU'ya, istatistiksel analizlerim ve deneylerim sırasında yardımlarını ve bilgilerini esirgemeyen Ziraat Fakültesi Öğretim Üyesi Sayın Doç.Dr. Suat ŞAHİNLER'e, ve Sayın Yrd.Doç.Dr. Sema KARANLIK'a, Fen Edebiyat Fakültesi Öğretim Üyesi Doç.Dr. Deniz YILDIZ'a, laboratuvar çalışmalarına yardımcı olan değerli arkadaşım yüksek lisans öğrencisi Ahmet MUŞLU'ya ve yüksek lisans öğrenimim boyunca desteklerini esirgemeyen iş arkadaşlarıma ve Üniversitemiz Rektörü Prof.Dr. M. Şerefettin CANDAY'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tez çalışmalarım süresince bana destek olan sevgili eşim Serkan DİKKAYA'ya ve tüm hayatım ve öğrenimim boyunca maddi manevi olarak her zaman yanımda olan çok değerli babam **Ahmet TELKIRAN**'a ve eşsiz annem **Hatice TELKIRAN**'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Adana'da doğdum. İlköğrenimimi Cebesoy ilköğretim okulunda, orta ve lise öğrenimimi ÇEAŞ Seyhan Anadolu Lisesinde tamamladım. 1999 yılında girdiğim Çukurova Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi'nden, 2003 yılında, Biyolog ünvanıyla mezun oldum. Aynı yıl, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Biyoloji Branş Öğretmenliği dalında tezsiz yüksek lisansa başladım. 2004 güz yarıyılında eğitimimi tamamladım. 2004 – 2005 yılları arasında Adana'da özel bir tıp merkezinde Laboratuvar Sorumlusu olarak çalıştım. 2006 yılı sonunda Mustafa Kemal Üniversitesine memur olarak atandım. Halen bu görevde çalışmaktayım, evliyim.

EKLER

Ek 1. Farklı Cd (0, 10 ve 15 µM) ve Zn (0 ve 5 µM) konsantrasyonlarında yetiştirilen mısır fidelerinin (*Zea mays* L. Mat 97) kök uzamasına ilişkin ortalamalarının Tukey testi ile karşılaştırmaları.

Kök Boyu (cm)			
Cd Uygulamaları (µM)	Zn Uygulamaları (µM)		Ortalama p<0.05
0	0	29,33 ± 3,12	31,85 ± 2,17 A
	5	34,36 ± 2,77	
10	0	28,43 ± 2,52	29,31 ± 1,50 A
	5	30,2 ± 2,05	
15	0	23,13 ± 0,62	26,53 ± 2,09 A
	5	29,93 ± 3,15	
Ortalama p<0.05	0	26,96 ± 1,51 A	
	5	31,5 ± 1,52 B	

Not: Cd ve Zn ortalamaları kendi içlerinde harflendirilmiştir ve harflendirmeler sadece kendi ortalama farklarını ifade etmek için kullanılmıştır. A en büyük değer, B ortanca değer ve C en küçük değer simgelemektedir.

Ek 2. Farklı Cd (0, 10 ve 15 µM) ve Zn (0 ve 5 µM) konsantrasyonlarında yetiştirilen mısır fidelerinin (*Zea mays* L. Mat 97) kök kuru madde miktarına ilişkin ortalamalarının Tukey testi ile karşılaştırmaları

Kök Kuru Madde Miktarı (gbitki⁻¹)			
Cd Uygulamaları (µM)	Zn Uygulamaları (µM)		Ortalama p<0.01
0	0	0,083 ± 0,01	0,091±0,0074 A
	5	0,099 ± 0,01	
10	0	0,091 ± 0,003	0,076±0,0089 A
	5	0,062 ± 0,01	
15	0	0,042 ± 0,002	0,047 ± 0,0070 B
	5	0,053 ± 0,01	
Ortalama	0	0,072 ± 0,00869 A	
	5	0,071 ± 0,00914 A	

Not: Cd ve Zn ortalamaları kendi içlerinde harflendirilmiştir ve harflendirmeler sadece kendi ortalama farklarını ifade etmek için kullanılmıştır. A en büyük değer, B ortanca değer ve C en küçük değer simgelemektedir

Ek 3. Farklı Cd (0, 10 ve 15 µM) ve Zn (0 ve 5 µM) konsantrasyonlarında yetiştirilen mısır fidelerinin (*Zea mays* L. Mat 97) kök su içeriğine (%) ilişkin ortalamalarının Tukey testi ile karşılaştırmaları

Kök Su İçeriği (%)			
Cd Uygulamaları (µM)	Zn Uygulamaları (µM)		Ortalama p<0.01
0	0	89,61 ± 0,72	89,86 ± 0,78 A
	5	90,12 ± 1,58	
10	0	89,37 ± 1,83	90,14 ± 1,21 A
	5	90,92 ± 1,85	
15	0	90,61 ± 0,82	89,77 ± 0,61 A
	5	88,94 ± 0,70	
Ortalama	0	89,86 ± 0,64 A	
	5	89,99 ± 0,78 A	

Not: Cd ve Zn ortalamaları kendi içlerinde harflendirilmiştir ve harflendirmeler sadece kendi ortalama farklarını ifade etmek için kullanılmıştır. A en büyük değer, B ortanca değeri ve C en küçük değeri simgelemektedir.

Ek 4. Farklı Cd konsantrasyonlarında (0, 10 ve 15 µM) yetiştirilen ve 0 ve 5 µM Zn uygulaması yapılmış mısır fidelerinin (*Zea mays* L. Mat 97) sürgün boy uzamasına ilişkin ortalamalarının Tukey testi ile karşılaştırmaları.

Sürgün Boyu (cm)			
Cd Uygulamaları (µM)	Zn Uygulamaları (µM)		Ortalama p<0.01
0	0	37,26 ± 3,64	37,13 ± 1,99 A
	5	37 ± 2,57	
10	0	38,13 ± 1,73	33,1 ± 2,47 AB
	5	28,06 ± 1,54	
15	0	22,9 ± 0,65	26,61 ± 3,07 B
	5	30,33 ± 5,74	
Ortalama	0	32,76 ± 2,73 A	
	5	31,8 ± 2,29 A	

Not: Cd ve Zn ortalamaları kendi içlerinde harflendirilmiştir ve harflendirmeler sadece kendi ortalama farklarını ifade etmek için kullanılmıştır. A en büyük değer, B ortanca değer ve C en küçük değer simgelemektedir.

Ek 5. Farklı Cd konsantrasyonlarında (0, 10 ve 15 µM) yetiştirilen ve 0 ve 5 µM Zn uygulaması yapılmış mısır fidelerinin (*Zea mays* L. Mat 97) sürgün kuru madde miktarına ilişkin ortalamalarının Tukey testi ile karşılaştırmaları.

Sürgün Kuru Madde Miktarı (gbitki⁻¹)			
Cd Uygulamaları (µM)	Zn Uygulamaları (µM)		Ortalama p<0.05
0	0	0,049 ± 0,0083	0,047 ± 0,0045 A
	5	0,045 ± 0,0056	
10	0	0,038 ± 0,0047	0,033 ± 0,0040 A
	5	0,029 ± 0,0062	
15	0	0,024 ± 0,0051	0,031 ± 0,0045 A
	5	0,037 ± 0,0063	
Ortalama	0	0,0374 ± 0,00469	
	5	0,037378 ± 0,00381	

Not: Cd ve Zn ortalamaları kendi içlerinde harflendirilmiştir ve harflendirmeler sadece kendi ortalama farklarını ifade etmek için kullanılmıştır. A en büyük değeri, B ortanca değeri ve C en küçük değeri simgelemektedir.

Ek 6. Farklı Cd konsantrasyonlarında (0, 10 ve 15 µM) yetiştirilen ve 0 ve 5 µM Zn uygulaması yapılmış mısır fidelerinin (*Zea mays* L. Mat 97) sürgün % su miktarına ilişkin ortalamalarının Tukey testi ile karşılaştırmaları.

Sürgün Su İçeriği (%)			
Cd Uygulamaları (µM)	Zn Uygulamaları (µM)		Ortalama
0	0	95,38 ± 0,57	95,93 ± 0,43 A
	5	96,47 ± 0,55	
10	0	96,93 ± 0,46	96,56 ± 0,54 A
	5	96,19 ± 1,05	
15	0	95,46 ± 1,03	95,76 ± 0,50 A
	5	96,06 ± 0,37	
Ortalama	0	95,92 ± 0,44 A	
	5	96,24 ± 0,36 A	

Not: Cd ve Zn ortalamaları kendi içlerinde harflendirilmiştir ve harflendirmeler sadece kendi ortalama farklarını ifade etmek için kullanılmıştır. A en büyük değeri, B ortanca değeri ve C en küçük değeri simgelemektedir.

Ek 7. Farklı Cd konsantrasyonlarında (0, 10 ve 15 µM) yetiştirilen ve 0 ve 5 µM Zn uygulaması yapılmış mısır fidelerinin (*Zea mays* L. Mat 97) kök/sürgün oranına ilişkin ortalamalarının Tukey testi ile karşılaştırmaları.

Kök Sürgün Oranı			
Cd Uygulamaları (µM)	Zn Uygulamaları (µM)		Ortalama
0	0	1,77 ± 0,38	2,02 ± 0,26 A
	5	2,27 ± 0,37	
10	0	2,50 ± 0,46	2,40 ± 0,32 A
	5	2,30 ± 0,55	
15	0	1,93 ± 0,58	1,70 ± 0,32 A
	5	1,47±0,33	
Ortalama	0	2,07 ± 0,26 A	
	5	2,01 ± 0,25 A	

Not: Cd ve Zn ortalamaları kendi içlerinde harflendirilmiştir ve harflendirmeler sadece kendi ortalama farklarını ifade etmek için kullanılmıştır. A en büyük değeri, B ortanca değeri ve C en küçük değeri simgelemektedir.

Ek 8. Farklı Cd konsantrasyonlarında (0, 10 ve 15 μM) yetiştirilen ve 0 ve 5 μM Zn uygulaması yapılmış mısır fidelerinin (*Zea mays* L. Mat 97) AP aktivitesine ilişkin ortalamalarının Tukey testi ile karşılaştırmaları.

Askorbat Peroksidaz (umol/min/g.TA)			
Cd Uygulamaları (μM)	Zn Uygulamaları (μM)		Ortalama
0	0	0,31 \pm 0,05	0,25 \pm 0,035 C
	5	0,19 \pm 0,00	
10	0	0,61 \pm 0,08	0,77 \pm 0,080 A
	5	0,93 \pm 0,06	
15	0	1,13 \pm 0,00	0,65 \pm 0,21 B
	5	0,18 \pm 0,02	
Ortalama	0	0,68 \pm 0,123 A	
	5	0,43 \pm 0,124 B	

Not: Cd ve Zn ortalamaları kendi içlerinde harflendirilmiştir ve harflendirmeler sadece kendi ortalama farklarını ifade etmek için kullanılmıştır. A en büyük değeri, B ortanca değeri ve C en küçük değeri simgelemektedir.

Ek 9. Farklı Cd konsantrasyonlarında (0, 10 ve 15 μM) yetiştirilen ve 0 ve 5 μM Zn uygulaması yapılmış mısır fidelerinin (*Zea mays* L. Mat 97) KAT aktivitesine ilişkin ortalamalarının Tukey testi ile karşılaştırmaları

Katalaz (nmol/min/g.TA)			
Cd Uygulamaları (μM)	Zn Uygulamaları (μM)		Ortalama
0	0	44,16 \pm 6,15	134,26 \pm 41,96 A
	5	224,36 \pm 25,50	
10	0	123,35 \pm 6,15	82,48 \pm 18,56 B
	5	41,62 \pm 4,06	
15	0	129,44 \pm 9,67	128,68 \pm 8,30 A
	5	127,91 \pm 15,83	
Ortalama	0	98,98 \pm 14,23	
	5	131,30 \pm 27,80	

Not: Cd ve Zn ortalamaları kendi içlerinde harflendirilmiştir ve harflendirmeler sadece kendi ortalama farklarını ifade etmek için kullanılmıştır. A en büyük değeri, B ortanca değeri ve C en küçük değeri simgelemektedir.

Ek 10. Kök Boyu ile ilgili varyans analizi sonuçları

Varyasyon kaynağı	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri
Genel	5	196,907			
Cd Uygulamaları	2	84,86	42,432	2,213	0,151
Zn Uygulamaları	1	92,480	92,480	4,836	0,048*
Zn*Cd Etkileşimi	2	19,563	9,782	0,512	0,612
Hata	0	229,473			

Ek 11. Kök Kuru Ağırlığı ile ilgili varyans analizi sonuçları

Varyasyon kaynağı	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri
Genel	5	0,0077			
Cd Uygulamaları	2	0,0059	42,432	9,603	,003
Zn Uygulamaları	1	0,08288	92,480	0,009	,925
Zn*Cd Etkileşimi	2	0,0018	9,782	3,022	,086
Hata	0	0,0114			

Ek 12. Kök Su İçeriği (%) ile ilgili varyans analizi sonuçları

Varyasyon kaynağı	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri
Genel	5	8,607			
Cd Uygulamaları	2	0,443	0,222	,041	,960
Zn Uygulamaları	1	0,077	0,077	,014	,907
Zn*Cd Etkileşimi	2	8,087	4,043	,739	,498
Hata	0	65,622			

Ek 13. Sürgün Boyu ile ilgili varyans analizi sonuçları

Varyasyon kaynağı	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri
Genel	5	572,798			
Cd Uygulamaları	2	337,803	168,902	5,776	0,017
Zn Uygulamaları	1	4,205	4,205	0,144	0,711
Zn*Cd Etkileşimi	2	230,790	115,395	3,946	0,048
Hata	0	350,907			

Ek 14. Sürgün Kuru Madde Miktarı ile ilgili varyans analizi sonuçları

Varyasyon kaynağı	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri
Genel	5	0,00127			
Cd Uygulamaları	2	0,000909	0,000454	4,032	0,046
Zn Uygulamaları	1	2,2222	2,2222	0,000	0,997
Zn*Cd Etkileşimi	2	0,000366	0,000183	1,62	0,238
Hata	0	0,001353			

Ek 15. Sürgün su içeriği (%) ile ilgili varyans analizi sonuçları

Varyasyon kaynağı	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri
Genel	5	5,263			
Cd Uygulamaları	2	2,141	1,070	0,677	0,526
Zn Uygulamaları	1	0,441	0,441	0,279	0,607
Zn*Cd Etkileşimi	2	2,681	1,340	0,848	0,452
Hata	0	18,966			

Ek 16. Kök/Sürgün oranı ile ilgili varyans analizi sonuçları

Varyasyon kaynağı	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri
Genel	5	2,226			
Cd Uygulamaları	2	1,464	0,732	0,342	0,164
Zn Uygulamaları	1	0,01494	0,01494	0,880	0,002
Zn*Cd Etkileşimi	2	0,748	0,374	0,565	0,091
Hata	0	7,479			

Ek 17. AP ile ilgili varyans analizi sonuçları

Varyasyon kaynağı	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri
Genel	5	2,437			
Cd Uygulamaları	2	0,897	0,448	91,559	0,000
Zn Uygulamaları	1	0,281	0,281	57,422	0,000
Zn*Cd Etkileşimi	2	1,259	0,629	128,473	0,000
Hata	0	0,05878			

Ek 18. KAT ile ilgili varyans analizi sonuçları

Varyasyon kaynağı	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri
Genel	5	68423,483			
Cd Uygulamaları	2	9691,570	4845,785	8,919	0,004
Zn Uygulamaları	1	4700,072	4700,072	8,651	0,012
Zn*Cd Etkileşimi	2	54031,841	27015,920	49,725	0,000
Hata	0	6519,627			