



T.C.

ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME ANABİLİM DALI

*CUCURBITACEAE* FAMILİYASI TÜRLERİNDE  
KADMIYUM STRESİNİN AZALTIILMASINA NİTRİK OKSİTİN ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RANAN İŞİK

Tez Danışmanı  
DR. ÖĞR. ÜYESİ YAKUP ÇIKILI

ÇANAKKALE – 2022





T.C.

ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME ANABİLİM DALI

***CUCURBITACEAE* FAMILİYASI TÜRLERİNDE  
KADMIYUM STRESİNİN AZALTIILMASINA NİTRİK OKSİTİN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RANAN IŞIK

Tez Danışmanı  
DR. ÖĞR. ÜYESİ YAKUP ÇIKILI

ÇANAKKALE – 2022



T.C.  
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**Ranan IŞIK** tarafından Dr. Öğr. Üyesi Yakup ÇIKILI yönetiminde hazırlanan ve **28/11/2022** tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan “*Cucurbitaceae* Familyası Türlerinde **Kadmiyum Stresinin Azaltılmasına Nitrik Oksitin Etkisi**” başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı**’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak **oy birliği** ile kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri**

Dr. Öğr. Üyesi Yakup ÇIKILI  
(Danışman)

Prof. Dr. Nuray Mücella MÜFTÜOĞLU

Doç. Dr. Barış Bülent AŞIK

**İmza**

.....

.....

.....

Tez No : 10509124

Tez Savunma Tarihi : 28/11/2022

.....

Doç. Dr. Yener PAZARCIK

Enstitü Müdürü

...../12/2022

## ETİK BEYAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullediğimi taahhüt ve beyan ederim.

Ranan IŞIK

28/11/2022

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının konusunun belirlenmesinden, uygulama aşamaları ve tamamlanma sürecine kadar çalışmamın tüm basamaklarında ciddi bir emek ve özveriyle desteğini sunarak, sabırla akademik bilgi ve tecrübesini aktarmış olan çok kıymetli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Yakup ÇIKILI'ya teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca desteklerini eksik etmeyen Ömer Tolga EMER, Furkan ETEM, Ömer ERSOY, Yılmaz UZUN, Melek ÇETİN'e ve çalışmam boyunca saha çalışmasında dahil olmak üzere tüm zorlukları benimle göğüsleyen, süreçteki zorlukların üstünden birlikte geldiğimiz, olumlu fikirleri ve sevgisiyle hep yanımda olurken manevi desteğini de bir an olsun esirgememiş olan sevgili eşim Tunç IŞIK'a ve hayatımın her evresinde yanımda olan biricik anneannem Fatma YÜCESOY başta olmak üzere hayatımın her gününde destek ve şefkatiyle yanımda olan, her güzel şeyi öğreten, başarılarıma büyük katkısı olan canım annem Ümran YÜCESOY'a, tüm yaşamım boyunca maddi ve manevi olarak yanımda olan, aldığım tüm kararlarda beni destekleyip cesaretlendiren, varlığıyla güç bulduğum değerli babam Adnan YILMAZ'a sonsuz teşekkürü borç bilirim.

Ranan IŞIK  
Çanakkale, Kasım 2022

## ÖZET

### ***CUCURBITACEAE* FAMILYASI TÜRLERİNDE KADMIYUM STRESİNİN AZALTIILMASINA NİTRİK OKSİTİN ETKİSİ**

Ranan IŞIK

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr Üyesi Yakup ÇIKILI

28/11/2022, 88

Kadmiyum (Cd) toksisitesi gibi abiyotik stres koşullarının olumsuz etkilerini hafifletme mekanizmaları henüz tam olarak anlaşılmamakla birlikte çok fonksiyonlu bir sinyal molekülü olan nitrik oksit (NO) bitki gelişimindeki yararlı teşvik edici rolü açıklanmıştır. Bu çalışmada, geniş alanlarda yetiştiriciliği yapılan *Cucurbitaceae* (kabakgiller) familyasında Cd stresinin azaltılmasına kök ortamı ve yapraktan uygulanan ve bir NO verici olarak kullanılan sodyum nitroprusidin (SNP) etkisi türlerin bazı agronomik ve fizyolojik özellikleri değerlendirilerek ortaya konulmuştur. Bu amaçla; her türe ait tohumlar perlit ortamına üç tekerrürlü olarak ekilmiş ve (i) kontrol, (ii) Cd (40 µM CdCl<sub>2</sub>), (iii) Cd+SNP-k (40 µM CdCl<sub>2</sub> + kökten 100 µM SNP) ve (iv) Cd+SNP-y (40 µM CdCl<sub>2</sub> + yapraktan 100 µM SNP) uygulama çözeltileri eklenmiş besin çözeltileriyle sulanarak beş hafta boyunca yetiştirilmiştir.

Kadmiyum toksisitesi, *Cucurbitaceae* türlerinin gövde ve kök biokütleleri, bitki boyları, kök uzunlukları, toplam klorofil ve karotenoid içeriklerini azaltırken, gövde ve kök Cd konsantrasyonları ve köklerle net Cd akümülyasyonunu (NA-Cd) artırmıştır. Gövde kuru maddesindeki azalmalara göre Cd stresine dayanıklılık sıralaması *balkabağı* > *hıyar* > *sakız kabak* > *karpuz* > *acur* > *kavun* olarak belirlenmiştir. Hıyar hariç diğer türlerin Cd translokasyonu Cd stresinde azalmıştır. Cd translokasyonuna göre *Cucurbitaceae* türlerinin *hıyar* < *balkabağı* < *acur* < *sakız kabak* < *karpuz* < *kavun* olarak sıralandığı saptanmıştır. Cd+SNP-k

uygulamalarıyla türlerin ortalama bitki gelişim parametreleri ve fotosentetik pigment içeriklerinde Cd stresine göre artışlar belirlenirken, ortalama gövde ve kök Cd konsantrasyonları, Cd tolerans indeksi, Cd translokasyonu ve NA-Cd miktarında azalmalar belirlenmiştir. Kök ve yapraktan SNP uygulamalarına türlerin tepkileri ayrımlı olmuştur. Kökten SNP uygulaması ile Cd stresinin hafifletilmesi oranı en yüksek sakız kabakta ve en düşük kavunda saptanırken, yapraktan SNP uygulaması ile bu oran en yüksek acurda ve en düşük karpuzda belirlenmiştir. Cd stresinde *Cucurbitaceae* türlerindeki gelişim gerilemesinin SNP uygulamalarıyla hafifletilebileceği ancak türlerin hem Cd stresine hem de NO uygulama yöntemlerine tepkilerinin ayrımlı olduğu sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kabakgiller, Kadmiyum, Sodyum nitroprusid, Akümülyasyon, Translokasyon, Fotosentetik pigmentler



## ABSTRACT

### THE EFFECT OF NITRIC OXIDE ON ALLEVIATING CADMIUM STRESS IN *CUCURBITACEAE* SPECIES

Ranan IŞIK

Çanakkale Onsekiz Mart University

School of Graduate Studies

Master of Science Thesis in Soil Science and Plant Nutrition

Advisor: Assist. Prof. Dr. Yakup ÇIKILI

28/11/2022, 88

Although mechanisms to alleviate negative effects of abiotic stress conditions such as cadmium (Cd) toxicity are not yet fully understood, beneficial promoting role of nitric oxide (NO), a multifunctional signal molecule, in plant growth has been explained. In this study, effect of sodium nitroprusside (SNP) as a NO donor applied by exogenous foliar and root on alleviating Cd-stress in *Cucurbitaceae* species has demonstrated by evaluating some agronomic and physiological characteristics of species. For this purpose, by sowing in perlite medium every species seeds were grown for five weeks as three replications by irrigating with nutrient solutions added to treatment solutions: (i) control, (ii) Cd (40µM CdCl<sub>2</sub>), (iii) Cd+SNP-root (40µM CdCl<sub>2</sub>+100µM SNP), and (iv) Cd+SNP-foliar (40µM CdCl<sub>2</sub>+100µM SNP).

Cd-toxicity decreased shoot and root biomass, plant heights, root lengths, total chlorophyll and carotenoids contents of species, while shoot and root Cd concentrations and net Cd-accumulation via roots (NA-Cd) increased. On the basis of reduction rate in shoot dry biomass, tolerance ranking to Cd-stress found as *pumpkin*>*cucumber*> *squash*> *watermelon*> *gherkin*> *melon*. Cd-translocation in all species, except for cucumber, was decreased under Cd-stress. By Cd-translocation, *Cucurbitaceae* species showed ranking as follows: *cucumber*< *pumpkin*< *gherkin*< *squash*< *watermelon*< *melon*. It was found increases in average plant growth parameters and photosynthetic pigment contents of species with Cd+SNP-root applications compared to Cd-stress, while significant reductions were noted

shoot and root Cd concentrations, Cd-tolerance index, Cd-translocation and NA-Cd. The responses of species to root and foliar SNP-treatments were different. The rate of alleviating Cd-stress by SNP-root application was determined maximum in squash and minimum in melon, while this rate by SNP-foliar application was found the highest in gherkin and the least in watermelon. It was concluded that growth retardation determined in *Cucurbitaceae* species under Cd-stress might be alleviated by SNP applications, but responses of species to both Cd-stress and NO application methods are various.

**Keywords:** Cucurbits, Cadmium, Sodium nitroprusside, Accumulation, Translocation, Photosynthetic pigments



# İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
JÜRİ ONAY SAYFASI.....	i
ETİK BEYAN .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	vi
İÇİNDEKİLER.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	x
TABLolar DİZİNİ.....	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xiii
<b>BİRİNCİ BÖLÜM</b>	
<b>GİRİŞ</b>	
	1
<b>İKİNCİ BÖLÜM</b>	
<b>ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR</b>	
	5
<b>ÜÇÜNCÜ BÖLÜM</b>	
<b>MATERYAL VE YÖNTEM</b>	
	22
3.1. Materyal.....	22
3.2. Yöntem .....	22
3.2.1. Morfolojik Ölçümler .....	25
3.2.2. Bitki Analizleri.....	26
3.2.3. İstatistik Analizler .....	27
<b>DÖRDÜNCÜ BÖLÜM</b>	
<b>ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA</b>	
	28
4.1. <i>Cucurbitaceae</i> Familyası Türlerinin Toprak Üstü Aksam Gelişimi .....	28
4.2. <i>Cucurbitaceae</i> Familyası Türlerinin Kök Gelişimi .....	34
4.3. <i>Cucurbitaceae</i> Familyası Türlerinin Cd Tolerans İndeksi .....	40

4.4. <i>Cucurbitaceae</i> Familyası Türlerinin Kadmiyum Konsantrasyonları .....	42
4.5. <i>Cucurbitaceae</i> Familyası Türlerinde Kadmiyum Translokasyon ve Akümülyasyonu .....	47
4.6. <i>Cucurbitaceae</i> Familyası Türlerinin Kadmiyum Biyokonsantrasyonları .....	53
4.7. <i>Cucurbitaceae</i> Familyası Türlerinin Fotosentetik Pigment İçerikleri .....	57
BEŞİNCİ BÖLÜM	
SONUÇ VE ÖNERİLER	
65	
KAYNAKÇA .....	75
ÖZGEÇMİŞ .....	I



## SİMGELER VE KISALTMALAR

%	Yüzde oranı
B	Bor
BKF-Cd	Kadmiyum için Biyo-Konsantrasyon Faktörü
°C	Derece santigrat
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	Kalsiyum nitrat tetra hidrat
Cd	Kadmiyum
CdCl <sub>2</sub>	Kadmiyum klorür
Cl	Klor
Cu	Bakır
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	Bakır sülfat penta hidrat
Fe	Demir
FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	Demir sülfat hepta hidrat
g	Gram
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Hidrojen peroksit
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	Borik asit
HCl	Hidroklorik asit
HNO <sub>3</sub>	Nitrik asit
K	Potasyum
KA	Kuru ağırlık
kg	Kilogram
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	Potasyum di hidrojen fosfat
KNO <sub>3</sub>	Potasyum nitrat
KOH	Potasyum hidroksit
L	Litre
mg	Miligram
µM	Mikromolar
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	Magnezyum sülfat hepta hidrat
mL	Mililitre
mM	Milimolar
Mn	Mangan

MnSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O	Mangan sülfat mono hidrat
Mo	Molibden
N	Azot
Na	Sodyum
Na <sub>2</sub> [Fe(CN) <sub>5</sub> NO]·2H <sub>2</sub> O	Sodyum nitro prussid
Na <sub>2</sub> EDTA·2H <sub>2</sub> O	Etilen diamin tetra asetik asit dihidrat disodyum tuzu
NA-Cd	Köklerle Net Kadmiyum Akümülayonu
Ni	Nikel
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub> ·4H <sub>2</sub> O	Amonyum molibdat tetra hidrat
NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Nikel klörür hekza hidrat
NO	Nitrik oksit
S	Kükürt
SNP	Sodyum nitro prussid
TAR-Cd	Toplam Kadmiyum Akümülayon Oranı
TF-Cd	Kadmiyum için Translokasyon Faktörü
YA	Yaş ağırlık
Zn	Çinko
ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	Çinko sülfat hepta hidrat

## TABLULAR DİZİNİ

Tablo No	Tablo Adı	Sayfa No
Tablo 1.	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> türlerinin gövde yaş ve kuru ağırlıkları ve bitki boylarına kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisine ait varyans analiz sonuçları .....	28
Tablo 2.	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> türlerinin kök yaş ve kuru ağırlıklarına kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisine ait varyans analiz sonuçları .....	34
Tablo 3.	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> türlerinin kök uzunlukları ve kök hacimlerine kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisine ait varyans analiz sonuçları.....	37
Tablo 4.	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> familyası türlerinin gövde ve kök Cd konsantrasyonlarına kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisine ait varyans analiz sonuçları .....	43
Tablo 5.	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> familyası türlerinin Cd translokasyon faktörü, köklerle net Cd akümüasyonu ve toplam Cd akümüasyon oranına kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisine ait varyans analiz sonuçları.....	48
Tablo 6.	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> familyası türlerinin klorofil <i>a</i> ve klorofil <i>b</i> içeriklerine kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisine ait varyans analiz sonuçları.....	57
Tablo 7.	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> familyası türlerinin klorofil <i>a+b</i> ve karotenoid içeriklerine kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisine ait varyans analiz sonuçları .....	60

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa No
Şekil 1.	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> türlerinin gövde yaş ağırlıklarına kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi.....	29
Şekil 2.	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> türlerinin gövde kuru ağırlıklarına kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi.....	30
Şekil 3.	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> türlerinin bitki boylarına kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi .....	31
Şekil 4.	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> türlerinin gövde/kök oranlarına kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi .....	32
Şekil 5.	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> türlerinin kök yaş ağırlıklarına kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi.....	35
Şekil 6.	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> türlerinin kök kuru ağırlıklarına kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi.....	36
Şekil 7.	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> türlerinin kök uzunluklarına kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi .....	37
Şekil 8.	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> türlerinin kök hacimlerine kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi .....	38
Şekil 9.	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> familyası türlerinin Cd tolerans indekslerine kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi .....	41
Şekil 10.	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> familyası türlerinin gövde Cd konsantrasyonlarına kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi .....	44
Şekil 11.	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> familyası türlerinin kök Cd konsantrasyonlarına kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi .....	45
Şekil 12.	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> familyası türlerinin kadmiyumun translokasyon faktörüne (TF-Cd) kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi .....	49
Şekil 13.	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> familyası türlerinin köklerle net Cd akümülyasyonuna (NA-Cd) kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi .....	50
Şekil 14.	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> familyası türlerinin toplam Cd akümülyasyon oranına (TAR-Cd) kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi .....	51
Şekil 15.	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> familyası türlerinin gövde Cd biyo-konsantrasyon faktörüne (gövde BKF-Cd) kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi.....	54
Şekil 16.	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> familyası türlerinin kök Cd-biyo-konsantrasyon faktörüne (kök BKF-Cd) kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi.....	55



<b>Şekil 17.</b>	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> familyası türlerinin klorofil <i>a</i> içeriklerine kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi.....	58
<b>Şekil 18.</b>	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> familyası türlerinin klorofil <i>b</i> içeriklerine kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi .....	59
<b>Şekil 19.</b>	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> familyası türlerinin klorofil <i>a+b</i> içeriklerine kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi .....	61
<b>Şekil 20.</b>	Cd stresinden etkilenmiş <i>Cucurbitaceae</i> familyası türlerinin karotenoid içeriklerine kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi .....	62



## BİRİNCİ BÖLÜM

### GİRİŞ

Günümüzde insan, bitki ve hayvan sağlığını tehdit eden, ekolojik dengeyi bozan tehlikelerin başında çevre kirliliği gelmekte ve kentlerdeki hızlı nüfus artışı, hayat standartlarının değişmesi ve sanayinin gelişmesi sonucunda oluşan atıklar çevreyi olumsuz yönde etkilemektedir (Aybar vd., 2015). Dünya nüfusunun hızlı artması ve buna bağlı olarak beslenme sorununun çözülmesi için yapılan bütün çabaların istenmeyen bir sonucu olarak ortaya çıkan çevre kirliliği sorunu, günümüzde de giderek artan boyutlarda önem kazanmaktadır. Ağır metaller ise çevre kirliliğine neden olan ve günümüzde ekosistemin her aşamasında toksik etkileri görülebilen en önemli problemlerden biridir. Ağır metallerin çevreye yayılmasında birçok etmen rol oynamakta ve bunların başında endüstriyel faaliyetler, motorlu taşıtların egzozları, maden yatakları ve işletmeleri, volkanik faaliyetler, tarımda kullanılan gübre ve pestisitler ile kentsel atıklar gelmektedir (Stresty ve Madhava Rao, 1999).

Ağır metallerin doku ve organlardaki aşırı birikimi bitkilerin vejetatif ve generatif organlarının gelişimini olumsuz yönde etkilemektedir (Gür vd., 2004). Ağır metallerin toksik etkileri nedeniyle bitkilerde transpirasyon, stoma hareketleri, su alımı, fotosentez, enzim aktiviteleri, çimlenme, protein sentezi, membran stabilitesi, hormonal denge gibi birçok fizyolojik olayın bozulmasına neden olduğu çeşitli araştırmacılar tarafından açıklanmıştır (Kennedy ve Gonsalves, 1987; Alia-Saradhi, 1991). Ayrıca, ağır metaller bitkide yüksek konsantrasyonlarda fotosentez ürünlerinin taşınmasını engelleyerek sakkaroz, nişasta ve şekerlerin yapraklarda birikimine neden olmaktadır (Samarakoon ve Rauser, 1979).

Toksik ağır metallerden biri olan Cd, çevreyi kirleten etmenlerin başında gelmektedir (Stresty ve Madhava Rao, 1999). Bitki büyüme ve gelişimi için mutlak gerekli olmayıp, bununla beraber toksik özellikli bir element olmasından dolayı (Wang vd., 2016) hücrelerde biyokimyasal ve fizyolojik zararlara neden olduğu bilinmektedir (Mc Laughlin ve Singh, 1999). Toprakta  $3 \text{ mg kg}^{-1}$ , bitki kuru maddesinde ise  $1 \text{ mg kg}^{-1}$ 'dan fazla Cd toksik etkili olduğu açıklanmıştır (Özbek vd., 1995). Bitkilerin Cd içeriği genel olarak kuru ağırlık esasına göre  $<0.5 \text{ mg kg}^{-1}$ 'dir. Bitkinin cinsine ve türüne bağlı olarak bu değer değişebilmekte ve bezelye, fasulye, lahana, patates ve sebzelerde genel olarak düşük miktarlarda Cd bulu-

durken kereviz, yeşil lahana, ıspanak ve kıvırcık salata gibi bitkilerde daha yüksek miktarlarda Cd bulunmaktadır (Özbek vd., 1995). Hem bitki türleri hem de aynı türün genotipleri arasında Cd'ü absorbe etme, biriktirme ve tolere etme bakımından da büyük farklılıklar bulunmaktadır (Guo-Yan ve Marschner, 1995). Kadmiyum stresi koşullarında, kök büyümesini ve fotosentezi engellemekte, iç ve dış kök yapılarında hasara yol açmakta, proteinlerin sülfidril (-SH) gruplarındaki enzimleri inaktif etmekte, kökte hidrolik su iletkenliğinin azalmasına, besin maddesi absorpsiyonu ve dengesizliğine ve klorofil biyosentezinin bozulmasına neden olmakta (Tran ve Popova, 2013), ayrıca azot (N) metabolizmasının iki enzimi olan nitrat redüktaz ve nitrit redüktazın aktivitelerini azaltmakta ve bitkilerin nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) asimilasyonunda azalmaya neden olmaktadır (Gouia vd., 2000).

Bitkilerdeki önemli toksik sonuçları nedeniyle Cd kapsamlı olarak incelenen metallerden biri olmasına rağmen bitkilerdeki Cd'un olumsuz etkilerini en aza indirmek için yapılan sürdürülebilir stratejik araştırmaların sayısı oldukça azdır. Bununla birlikte, çok sayıda gelişmeye yönelik süreci düzenlemekteki rolleriyle bilinen ve başlıcaları arasında bitki hormonları (oksinler, gibberellinler, sitokininler, absisik asit, jasmonik asit, etilen ve salisilik asit), nitrik oksit (gaz formunda bir sinyal molekülü), steroid fitohormonlar ve poliaminlerin gösterilebileceği bitki büyüme düzenleyiciler (PGR'ler) ile farklı bitkilerde Cd'un olumsuz etkilerini hafifletmeye ya da baskılamaya dair çok sayıda çalışma literatürde yer bulmaktadır (Asgher vd., 2015; Ekinci vd., 2018).

Nitrik oksit (NO) düşük molekül ağırlığına sahip olan, çiftlenmemiş elektron taşıması nedeniyle serbest radikal olarak kabul edilen, lipofilik özellikte olduğundan dolayı hücre membranlarından kolayca difüzyona uğrayabilen, diğer moleküllerle kuvvetli reaksiyonlara girebilen ve birkaç saniye yarı ömrü olan fizyolojik haberci molekül olarak tanımlanır (Durner ve Klessig, 1999; Neill vd., 2002). Son yıllarda, en toksik çevre kirletici elementlerden biri olan Cd ile çok fonksiyonlu bir sinyal molekülü olan NO canlı organizmalarda etkileşime girer. Ağır metal mücadelesi yapılan bitkilerde endojen (dahili) olarak üretilen NO'nun fonksiyonel rolü hala tam bir bilinmemektedir. İlk yapılan farmakolojik yaklaşımlarla, eksojen (harici) olarak uygulanan NO'nun, bitkilerdeki Cd toksisitesini hafifletebileceği, reaktif oksijen türlerinin (ROS) doğrudan atılmasını veya antioksidan enzimleri aktive edebileceği yönünde olmasına karşın elde edilen son raporlar NO'nun Cd alımını teşvik ederek Cd

toksitesine katkıda bulunabildiğini ve hatta metalden kaynaklanan kök büyümemesi durumuna bile katılabildiği belirlenmiştir (Arasimowicz-Jelonek vd., 2011). Bununla birlikte, NO uygulamalarının bitkilerde ağır metaller, etilen ve herbisitlerin yıkıcı etkisini azalttığı ve CAT gibi enzimlerin aktivitelerinin artışına yol açarak bitkilerde Cd ve As gibi çeşitli ağır metallere toleransı artırdığı rapor edilmiştir (Ekinçi vd., 2018).

Kadmiyum bitkiler için toksik bir metal olmasına karşın, temel elementlerin membran taşıyıcıları tarafından farklı bitki kısımlarındaki bitki hücrelerine kolayca alınmakta (Clemens, 2006) ve bitkide Cd biyoakümülyasyonu gerçekleşmektedir. Bitkide Cd biyoakümülyasyonu ve hareketliliği; bitki türlerine ve gelişim aşamalarına, yetiştirme ortamına ilave edilen besin maddelerinin konsantrasyonuna, bitki büyüme koşullarına ve/veya kullanılan metal kombinasyonlarına bağlı olarak değişim gösterir (Sterckeman and Thomine, 2020). Kadmiyum toksitesi koşulları, bitkilerin gelişim aşamalarına, bitki kısımlarına, türleri ve çeşitlerine bağlı olarak bitki beslenmesini ve besin içeriğini farklı şekilde etkilemekte (Gonçalves vd. 2009), makro (P, K, Ca, Mg) ve mikro (Zn, Fe, Cu, Mn) besin elementleriyle Cd arasında alınma, taşınma ve fizyolojik işlevler açısından rekabet söz konusu olmakta (Rivetta vd., 1997) ve besin elementlerinin alınması ve fizyolojik faaliyetlerde kullanımını engelleyerek bitkilerin beslenmesi ve besin içeriklerinde dengesizlikler oluşturmaktadır (Krupa vd., 2002; Nazar vd., 2012). Bitkilerin beslenmesinde oluştuğu olumsuz etkiler ve bitkilerin kök, gövde ve diğer yenilebilir organlarında yüksek miktarda birikme eğiliminde olan Cd, beslenmesinin temelini oluşturan bitkilerden besin zinciri yoluyla insan ve hayvanlara ulaşarak çok ciddi sağlık sorunlarına neden olabilmektedir. Dolayısıyla; (i) bitkilerin beslenme ortamlarında Cd toksik koşulların ortaya çıkmamasını sağlayacak önlemlerin alınması, (ii) çevre kirlenmesinin bir sonucu olarak tarımsal alanlarda varolan Cd toksik koşullardan en az şekilde olumsuz etkilenecek ya da minimum Cd biyoakümülyasyonu yapabilecek bitki tür ve çeşitliliğinin belirlenmesi, (iii) farklı yöntemlerle bitki gelişim düzenleyicilerin bitkilere kök ya da yapraktan uygulamaları gibi bitkilerde fizyolojik ve biyokimyasal değişimleri tetikleyebilecek uygulamalarla Cd toksitesinin olumsuz etkilerinin hafifletilmesi/giderilmesi/azaltılmasının sağlanması bitki sağlığı ve besin zinciri yoluyla insan ve hayvan sağlığının korunmasında bakımından büyük önem arz etmektedir. Her geçen gün artan çevre kirliliğinin bir sonucu olarak ortaya toprak kirlenmesi ve oluşan ağır metal toksitesi koşullarında bitkilerin biyoakümülyasyon kapasitelerini ve Cd biyoakümülyasyonu azaltabilecek önlem ve uygulamaları öne çıkarmaktadır. Bitkilerin familya, tür çeşit veya genotip bazında

Cd biyoakümülyasyon kapasitelerinin bilinmesi ve beslenme yönüyle etki alanında bulunan bitki, insan ve hayvan sağlığının sürdürülebilir kılınması açısından önemlidir. Bu nedenle, Cd toksisitesinin olumsuz etkilerinin etkisi farklı familyalara ait bitki türlerinde tekil olarak veya aynı türün çeşit ya da genotiplerin tepkilerinin karşılaştırılmasına dair çalışmalar literatürde az sayıda rastlanmakta bununla birlikte aynı familyaya ait türlerin Cd toksisitesine duyarlılıkları, biyoakümülyasyon kapasitelerindeki farklılıklar ve yine Cd toksik koşullarda aynı familyaya ait türlerin NO uygulamalarına tepkilerine ait araştırmalara rastlanmamıştır. Bitki, insan ve hayvan sağlığında ciddi zararlanmalara yol açan Cd toksisitesinin, yaygın yetiştiriciliği yapılan *Cucurbitaceae* (kabakgiller) familyası türlerinde (hıyar, acur, kavun, karpuz, sakız kabağı ve bal kabağı) Cd biyoakümülyasyon kapasitesinin belirlenmesi, türlerin Cd toksisitesine olan duyarlılıkları ve türlere ait bitkilerde gelişim gerilemesi ve Cd biyoakümülyasyonunda azaltılmasına farklı yöntemlerle NO uygulamalarının etkisi araştırılmıştır.

## İKİNCİ BÖLÜM

### ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Kirbag Zengin ve Munzuroglu (2006), bir haftalık ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.) fidelerine on gün boyunca uygulanan Cd (0.05, 0.07 ve 0.09 mM CdCl<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O) seviyelerinin sonucu olarak; artan Cd uygulamalarına bağlı olarak fidelerin kök, sürgün ve yapraklarında absisik asit içeriği ile birlikte prolin içeriğinin de arttığı ve klorofil *a/b* oranı ile toplam protein içeriklerinin ise azaldığını belirtmişlerdir.

Liu vd. (2007) tarafından yapraklı sebzelerden olan Çin lahanası (pak-choi; *Brassica chinensis*) ve Pekin lahanası (*Brassica pekinensis*) bitkilerinin gelişimi ve metal alımına artan düzeylerde Cd (0, 10, 20, 50 ve 100 µM CdCl<sub>2</sub>) uygulamasının etkisinin hidroponik çözültü kültüründe incelendiği çalışmada; 10 µM'den yüksek Cd konsantrasyonunun, her iki bitki türünün de kök uzaması ve yaprak klorofil içeriğini azalttığı, *B. pekinensis* sürgünlerinin toplam ve suda çözünür Cd konsantrasyonlarının *B. chinensis* konsantrasyonlarından daha yüksek olduğu, her iki türünde köklerinin sürgünlerden daha fazla Cd biriktirdiği, köklerde biriken Cd'un çoğunun hücre duvarlarında bulunduğu, *B. pekinensis*'teki Cd konsantrasyonlarının sürgün/kök oranının her zaman *B. chinensis*'ten daha yüksek olduğu ancak *B. chinensis*'teki hücre duvarları Cd konsantrasyon ve oranının *B. pekinensis*'tekinden daha yüksek olduğu, Cd uygulamalarının her iki türün sürgünlerinde de toplam protein olmayan tiyol (NPT) konsantrasyonlarını arttırdığı ve sürgünlerindeki çözünür Cd ve NPT konsantrasyonları arasında anlamlı bir ilişkinin bulunduğu rapor edilmiştir.

Gonçalves vd. (2007), artan seviyelerde Cd (0, 100, 400 ve 1000 µM CdCl<sub>2</sub>) uygulanan hıyar (*Cucumis sativus* L.) fidelerinin enzimatik ve enzimatik olmayan antioksidan sistem parametrelerine etkisini incelemek amacıyla 10 gün boyunca yetiştirildiği çalışmada; en düşük Cd seviyesinin MDA konsantrasyonunu azalttığı, sadece 1000 µM Cd seviyesinin elektrolit sızıntısını arttırdığı, 400 ve 1000 µM Cd seviyesinin protein oksidasyonu, toplam çözünür protein içeriği ve askorbik asit miktarının arttığı, tüm Cd uygulamalarında askorbat peroksidaz (APX) aktivitesi inhibe edilirken, katalaz (CAT) ve süperoksit ismutaz (SOD) aktiviteleri ve protein olmayan tiyol gruplarının miktarlarının arttığı ve sonuç olarak hıyar fidelerinde Cd toksisitesine yanıt olarak enzimatik ve enzimatik olmayan antioksidan sistemin önemini kanıtladığı bildirilmiştir.

Burzyński ve Żurek (2007), Cd ve Cu uygulamaları (20 ve 50 µM) ile 48 saat muamele edilmiş hıyar (*Cucumis sativus* L.) bitkisinin kotiledon yapraklarındaki değişimlerini inceledikleri çalışmada; sadece 50 uM Cd uygulamasının klorofil *a* ve *b* içeriklerinin düşük seviyede azalması nedeniyle pigment içeriklerindeki değişikliklerin az olduğunu, her iki konsantrasyondaki metallerin net fotosentetik oranını ve stoma iletkenliğini önemli ölçüde azalttığını ancak dahili CO<sub>2</sub> konsantrasyonunu azaltmadığını ve her iki metalin ölçülen çoğu fotosentez parametresine etkilerinin benzer olduğunu ancak kotiledonlarda Cd birikiminin Cu birikiminden önemli ölçüde daha yüksek olduğunu rapor etmişlerdir.

Bosiacki (2008), üç farklı süs bitkisinin [ayçiçeği (*Helianthus annuus* 'Pacino'), kızıl adaçayı (*Salvia splendens* 'Fuego') ve kadife çiçeğinin (*Tagetes erecta* 'Inca Yellow')] farklı seviyelerde Cd (1, 5 ve 10 mg dm<sup>-3</sup> Cd) ile kontamine olmuş ortamda yetiştirilmesiyle bitki organlarına göre Cd alınımı ve birikimini belirlediği çalışmada; Cd'un esas olarak yapraklar ve sürgünlerde ve daha sonrada çiçek salkımlarında biriktiğini, en büyük Cd içeriğinin kadife çiçeğinin köklerinde, kızıl adaçayının yapraklarında ve sürgünlerinde ve ayçiçeğinin salkımlarında bulunduğunu ve süs bitkisi türleri *Tagetes erecta* bitkilerinin en yüksek Cd alımı ile karakterize edildiğini açıklamışlardır.

Alkan-Torun vd. (2009) tarafından Maxma-14 kiraz anaçlarına in vitro koşullarda dört ayrı alt kültür oluşturularak ve artan oranlarda 11 farklı Cd dozu (0, 2.5, 5, 10, 50, 75, 100, 200, 300, 500, 1000 µM) uygulanarak ve ayrıca su kültürü koşullarında 6 farklı Cd dozu (0, 10, 50, 100, 150 ve 200 µM) uygulanarak Cd toksisitesi belirtilerinin şiddeti, kuru madde verimi (kök ve yeşil aksam), yeşil aksam ve kökteki Cd konsantrasyonu gibi parametrelere göre Cd toksisitesi ve etkilerinin ortaya konulması amacıyla yürütülen çalışmalarda; her iki büyüme ortamında da artan Cd uygulamasına bağlı olarak kuru madde miktarının azaldığı ve bu azalmanın da toksisite belirtilerleriyle paralellik gösterdiği, 10 µM'dan sonraki Cd dozlarının her iki büyüme ortamında da hem simptomolojik olarak hem de verim azalması açısından kirazda toksik konsantrasyonlar olduğu, kiraz bitkisinde Cd konsantrasyon birikiminin kök>yeşil aksam şeklinde olduğu ve Cd konsantrasyonunun ortalama %94-96'sının kökte birikirken ancak %4-6'sı kadarının yeşil aksama geçtiği saptanmıştır.

Andresen ve Küpper (2012), Cd'un insan sağlığı ve çoğu organizma için potansiyel bir tehdit, çevre için ise önemli bir kirlenici olduğunu, bitkilerin toprak ve sudan Cd'u alıp

kök ve sürgünlerinde biriktirebileceğini, Cd kaynaklı olumsuz etkiler arasında oksidatif stres, genotoksisite, fotosentetik sistemin ve kök metabolizmasının engellenmesinin yer aldığı bildirilmiştir.

Choppala vd (2014), Cd'un çevreye girişinin antropojenik ve jeojenik kaynaklarla gerçekleştiğini, madencilik, elektrokaplama, demir-çelik fabrikaları ve pil üretimi gibi endüstriyel faaliyetlerin süreçleri sırasında Cd kullanıldığını ve sıklıkla buradan da çevre Cd verildiğini, toprakta düşük konsantrasyonlarda dahi hareketli ve fitotoksik olması nedeniyle tarımsal ekosistemler için zararlı olabileceğini, Cd fitotoksisitesinin tranprasyon ve fotosentez hızı, klorofil konsantrasyonu ile kök ve yapraklardaki besin maddesi konsantrasyonundaki değişim azalmalardan kaynaklandığını, Cd toksisitesine yanıt olarak bitkiler fitoşelatin ve metalotiyoninleri sentezlemek, metalleri valuolere bölümlendirmesi ve Cd toksisitesinin nötralize edilmesi için antioksidan enzimlerin aktivitesini artırmak gibi koruyucu hücrel mekanizmalar geliştirdiğini, bu doğrudan koruyucu mekanizmalar Cd toksisitesini hafifletmeye yardımcı olabileceğini ve ayrıca Cd alımını engelleyen mikro elementler (Zn, Fe, Mn ve Se) gibi diğer dolaylı mekanizmalarında bitkilerde Cd konsantrasyonunu azaltabileceğini ve Cd stresine karşı savunma mekanizmalarını aktive etmede Zn, Fe, Mn ve Se'un faydalı etkileri ile çeşitli azaltma stratejileri olabileceğini bildirilmiştir.

Moradi ve Ehsanzadeh (2015) tarafından aspir (*Carthamus tinctorius* L.) genotiplerinin (Nebraska-10, Kouseh, 2811, S149, C111 ve K12) fotosentetik ve fizyolojik parametrelerine Cd uygulamalarının (0, 1.5, 3 ve 4.5 mg/L CdCl<sub>2</sub>) etkilerini değerlendirilen çalışmada; en yüksek Cd uygulaması (4.5 mg/L CdCl<sub>2</sub>) ile bitkilerinin sürgün ve kök kuru kütleleri, bitki başına toplam yaprak alanı, net fotosentez hızı, stoma iletkenliği, klorofil *a*, *b*, *a+b* ve karotenoid içeriklerinin sırasıyla %57.0, %84.4, %50.5, %50.0, %31.6, %32.2, %31.8 ve %32.9 oranında azaldığı, prolin ve malondialdehit içeriklerinin %121 ve %110 ve sürgün ve köklerdeki Cd konsantrasyonunun 52 ve 157 kat arttığını ve bununda bitki dokularında önemli bir lipid peroksidasyonunun meydana getirdiğini, en yüksek net fotosentetik hıza ve en düşük sürgün ve kök Cd konsantrasyonuna sahip olan Nebraska-10 genotipinin diğer genotiplerden farklı olduğu bildirilmiştir.

Çıkılı vd. (2016), Cd toksisitesinin domates, biber, patlıcan ve altınçilek bitkilerinin gelişimi ve metal iyon akümülyasyonlarına etkisini belirlemek için yaptıkları çalışmada;



gövde kuru biyokütlesindeki azalma temel alındığında domatesin Cd'a toleranslı ve diğer bitkilerin ise Cd'a duyarlı olduğunu, Cd'un translokasyonuna göre bitkilerin altınçilek<bi-ber<patlıcan<domates olarak sıralandığını, altınçilek bitkisinde tüm metal besin iyonlarının (K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Zn, Cu) ve biber ile patlıcanda ise Zn ve Cu hariç iki değerlikli metal besin iyonlarının akümüülasyonunun arttığını açıklamışlardır.

Rizwan vd. (2017), insan sağlığını tehdit eden önemli çevre sorunlarından birinin sebzelerde Cd birikimi olduğunu, bitkilerin Cd stresine tepkisini anlamamanın ve stratejiler geliştirilmesinin sebzelerde Cd alımını azaltmaya yardımcı olabileceğini, Cd ile kirlenmiş topraklarda yetişen yapraklı sebzelerin, potansiyel olarak daha yüksek konsantrasyonlarda Cd biriktirdiğini ve bunun da gıda ürünleri için tehdit oluşturduğunu, Cd toksisitesinin sebzelerdeki tohum çimlenmesini, büyümesini, biyokütlesini ve kalitesini düşürdüğünü ve bunun mineral beslenmedeki değişimi, fotosentezi ve stoma iletkenliğini azalttığını, ayrıca Cd toksisitesinin oksidatif strese ve antioksidan enzim aktivitelerinde azalmaya neden olarak sebze biyokimyası ile etkileşme girdiğinin, sebzelerde Cd alımını ve toksisitesini azaltmak amacıyla eksojen (harici) olarak bitki büyüme düzenleyicilerinin uygulaması, mineral beslemenin uygun hale getirilmesi ile organik ve inorganik düzenleyicilerin uygulanmasının faydalı olabileceğini bildirmişlerdir.

Balcı (2018), Cd stresi koşullarında (0, 1.5, 3 ppm Cd) saksılarda yetiştirilen çilek fidelerine yaprakdan uygulanan 24-epibrassinosteroidin (BR; 0, 0.5, 1 µM) yaprak sayısı, yaprak alanı, kök uzunluğu, gövde çapı, yaprak, gövde ve kök yaş ve kuru ağırlıkları, yaprak klorofil içeriği (SPAD), antosiyanin ve membran geçirgenliği (EC) değerlerinin ölçülerek vejetatif büyümeyi ne şekilde etkileyeceğinin değerlendirdiği çalışmada; 0.5 µM BR uygulamasının yaprakların klorofil içeriği ve gövde kuru ağırlığı, 1 µM BR uygulamasının ise kök uzunluğu ve kök yaş ağırlıklarına önemli etkilerinin olduğunu ve BR uygulamalarının çilek fidelerinde Cd stres koşullarını hafiflettiğini açıklamıştır.

Çikili vd. (2020), erken gelişme döneminde ayçiçeği (*Helianthus annuus* L. cv. Sirena) bitkisinin gelişimine Cd maruziyetinin (0, 50, 100, 250, 500 ve 1000 µM CdCl<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O) etkilerini değerlendirdikleri çalışmada; Cd maruziyetinin bitki gelişimi ve kök uzamasını olumsuz etkilediğini, bitki gelişimine Cd'un zararlı etkisinin köklerden daha fazla gövdede görüldüğünü, nispi su içeriği, klorofil *a+b* ve karotenoid içerikleri, gövde ve kökte Zn, K ve

Ca alımları ve Cd'un biyoakümülyasyonu ve translokasyonunu azalttığını ve bununla birlikte artan Cd dozlarının toksik etkisiyle gövde ve kökteki Cd konsantrasyonları, kökler aracılığıyla net Cd akümülyasyonu, toplam Cd akümülyasyon oranı ve membran geçirgenliğinin arttığını saptamışlardır.

Emer ve Çıkılı (2021) tarafından *Solanaceae* (patlıcangiller) familyası türlerinde Cd stresinin (100 µM CdCl<sub>2</sub>) azaltılmasına Si uygulamalarının (0.2 ve 2.0 mM K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) etkisini belirlemek için yapılan çalışmada; Cd stresinin *Solanaceae* türlerinin gövde ve kök biyokütleleri, kök uzunluğu, toplam klorofil ve karotenoid içeriklerini azalttığı, gövde ve kök Cd konsantrasyonları ve alımları, köklerle net Cd akümülyasyonu, toplam Cd akümülyasyon oranı, gövde ve kök K konsantrasyonlarını artırdığı, tütün hariç diğer türlerin Cd translokasyonunun Cd stresi koşullarında azaldığı, Cd translokasyonuna göre türlerinin altınçilek< biber< patates< patlıcan< domates< tütün olarak sıralandığı ve kök gelişimine göre belirlenen Cd toksisitesine toleranslılık sıralamasının domates> patates> altınçilek> tütün> patlıcan> biber olarak saptandığı rapor edilmiştir.

Kadmiyum toksisitesinin olumsuz etkilerinin giderilmesi/hafifletilmesi için NO sağlayıcı olarak farklı yöntemlerle uygulanan SNP'nin farklı bitki tür, çeşit ve genotiplerindeki etkilerine dair yapılmış çalışmalar aşağıda özetlenmiştir

Hsu ve Kao (2004) tarafından çeltik yapraklarında farklı NO sağlayıcı ve süpürücülerin (PBN, SIN-1, SNP ve askorbik asit+NaNO<sub>2</sub>, c-PTIO,) Cd stresine karşı koruyucu etkisinin değerlendirildiği çalışmada; Cd toksisitesinin klorofil ve protein içeriğini azalttığı, Cd, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve MDA içeriği ve antioksidan enzimlerin aktivitelerini artırdığı, glutatyon (GSH) ve askorbik asit(Asc) miktarını azalttığı, fakat farklı NO sağlayıcıların Cd toksisite seviyesi ve MDA içeriğinde azalmalarda etkili olduğu, SNP uygulması ile CdCl<sub>2</sub> stresinden kaynaklı H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve MDA içeriği, antioksidan enzimlerin aktiviteleri ve fenilalanin amonyak-liyaz (PAL) enzim aktivitesindeki artışları, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> birikimini ve GSH ve Asc içeriği ve glutamin sentetaz (GS) enzim aktivitesindeki azalmaları önlediği, çeltik yapraklarında CdCl<sub>2</sub> stresinin NO tarafından azaltılmasının, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> gibi aktif oksijen türlerini temizleme yeteneği aracılığıyla gerçekleşmiş olabileceği ve SNP'nin koruyucu etkisinin salınan nitrik oksite atfedilebileceği belirtilmiştir.

Laspina vd. (2005) tarafından ayçiçeği yapraklarında Cd-kaynaklı (0.5 mM CdCl<sub>2</sub>) oksidatif strese karşı nitrik oksidin koruyucu etkisinin değerlendirildiği çalışmada; metale maruz kalmadan önce NO donörü olarak 100 µM SNP uygulanan fidelerden elde edilen yapraklarda, metalin neden olduğu kuru ağırlık kaybının ve klorofil bozunumunun önemli ölçüde tersine çevrildiği, Cd uygulaması ile yapraklarda gözlenen lipid peroksidasyon seviyesi, askorbat (ASC) içeriği ve SOD aktivitesindeki artışlar ile glutasyon (GSH) içeriği (%30) ve CAT aktivitesinde (%30) görülen azalmaların NO uygulamasıyla geri döndürüldüğü, Cd toksisitesine karşı harici NO uygulamasının yararlı olabileceği sağladığı ve bitkilerin ağır metal stresine karşı tolerans kazandırabileceği açıklanmıştır.

Mahmood vd. (2009) tarafından Cd stresi altında hidroponik ortamda yetiştirilen buğday bitkisi köklerinde nitrite (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)-bağlı NO üretimini aydınlatmak için yapılan çalışmada; uzun süreli bir Cd maruziyet denemesiyle, bitkilerin 1 µM Cd altında 4 hafta büyüdüğü, işlem görmemiş bitkilerle (0.1 mM) karşılaştırıldığında Cd stresli bitkilerin köklerindeki Cd konsantrasyonunun 2.5 mM olduğu, köklerdeki Cd konsantrasyonlarının sürgünlerden 9 kat daha yüksek olduğu, buna rağmen kök ve sürgünlerdeki Cd konsantrasyonunun bitki gelişimini etkilemediği, fakat Cd stresinin kök solunumunda 1.7 kat bir azalmaya ve NO emisyonunda 2.4 kat bir artışa neden olduğu belirtilirken, kısa süreli Cd maruziyet denemesinde ise hasat edilen ve Cd içermeyen köklerin 3 saat boyunca 10 µM Cd'a maruz bırakılmasıyla kök solunumunun %42 azaldığı, NO üretiminin ise %73 oranında arttığı ve bunun da buğday bitkilerinde NO üretiminin Cd stresi uyarıcı etkisiyle gerçekleştiği rapor edilmiştir.

Xiong vd. (2009) tarafından çeltikte (*Oryza sativa*) Cd toksisitesini hafifletmek için harici NO'nun katkı mekanizmalarını incelemek amacıyla, 0.2 mM CdCl<sub>2</sub> maruz bırakılan çeltik fidelerinin farklı konsantrasyonlarda SNP (0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5 mM) uygulandığı çalışmada; Cd toksisitesinin bitki uzunluğu ve biyokütlesi ile klorofil içeriğinde azalmalara neden olduğu, 0.1 mM SNP uygulamasının Cd toksisitesini açık şekilde azalttığı, yaprakların hem hücre duvarlarında hem de çözünür fraksiyonundaki Cd birikiminin önemli ölçüde azaltılmasına karşın köklerinin hücre duvarında biriken Cd miktarının oldukça arttırdığı, 0.1 mM SNP uygulamasının çeltik yapraklarındaki tranpirasyon hızı üzerine çok az etkiye sahip olduğu ancak kök hücre duvarlarındaki pektin ve hemiselüloz içeriğini artırırken selüloz içeriğini azalttığı ve sonuç olarak NO'nun kök hücre duvarlarındaki pektin ve

hemiselüloz içeriğini ve kök hücre duvarlarında Cd birikimini artırarak ve yapraklarda çözümlü fraksiyonunda Cd birikimini azaltarak çeltiğin Cd toleransını arttırdığı açıklanmıştır.

Xiong vd. (2010), harici olarak uygulanan nitrik oksidin (NO) bitkilerde ağır metal toksisitesinin hafifletilmesindeki rolünü dört başlık altında; (I) antioksidan içeriği ve antioksidan enzimlerin aktivitelerini artırarak oksidatif stresin azaltılması, (II) kök hücre duvarı bileşimi düzenleyerek, Cd birikimini azaltarak ve transpirasyon oranını kısıtlayarak ağır metal birikiminin azaltılması, (III) tolerans ile ilgili gen ifadesini (expression) düzenleyerek ve (IV) indol asetik asit (IAA) oksidaz aktivitesini azaltılması ve oksin dengesinin korunması şeklinde şematik olarak özetlemiştir.

Chen vd. (2010) tarafından Cd toksisitesine (5 µM CdCl<sub>2</sub>) duyarlı (Dong 17) ve dayanıklı (Weisuobuzhi) arpa genotiplerinin nitrik oksidin varlığı ve yokluğunda Cd stresine verdikleri tepkilerin değerlendirildiği çalışmada; 5 µM Cd uygulamasına Cd-duyarlı genotipin çok daha şiddetli tepki gösterdiği ve bitki boyu, klorofil içeriği, net fotosentez oranı ve biyokütle üretiminde azalmaya ve O<sub>2</sub><sup>-</sup>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve MDA birikiminde ise artışa neden olduğu, Cd stresi altında dayanıklı genotipin köklerinde antioksidan enzim aktivitelerini artarken duyarlı genotipin yapraklarında SOD ve APX ve özellikle sitozol askorbat peroksidaz (cAPX) enzim aktivitelerinde azalma olduğu, harici NO uygulaması ile Cd toksisitesinin önemli ölçüde azaldığı, Cd toksisitesi ile teşvik edilen reaktif oksijen türleri (ROS) ve MDA birikiminin belirgin şekilde azaldığı ve yaprak/kök ultrastrüktüründe oluşan hasarı iyileştirdiği ve klorofil içeriği ile net fotosentez oranını ise artırdığı, sonuç olarak güçlü bir antioksidan olarak NO'nun Cd stresi koşullarında ROS'u doğrudan ve dolaylı olarak temizleyerek arpa fidelerini oksidatif hasara karşı koruduğu ve hücre altı yapının durağanlığı ve bütünlüğünü korumaya yardımcı olduğu bildirilmiştir.

Jelonek vd. (2011), Cd'un son zamanlarda kirli ortamlarda oluşan en toksik elementlerden biri olduğunu ve canlı organizmalarda çok işlevli bir sinyal molekülü olan nitrik oksit (NO) ile etkileşime girdiğini, Cd stresine maruz kalan çeşitli bitki dokularında NO oluşumunun in vivo olarak gösterildiğini ancak NO oluşum süresi ve yoğunluğu ile ilgili verilerin çelişkili olduğunu, ağır metal stresindeki bitkilerde harici olarak verilen NO'nun fonksiyonel rolü hakkındaki bilgilerin hala sınırlı olduğunu, ilk farmakolojik yaklaşımların harici uygulanan NO'nun bitkilerde Cd toksisitesini hafifletebileceğini ve reaktif oksijen türlerinin (ROS)

doğrudan süpürülmesini teşvik ettiğini veya antioksidan enzimleri aktive ettiğini göstermişse de son yapılan çalışmalara göre NO'in Cd alımını teşvik ederek Cd toksisitesine katkıda bulunduğunu ve hatta metal kaynaklı kök büyümesinin azalmasına da katıldığını rapor etmişlerdir.

Liu vd (2011), yapraktan uygulanan farklı SNP düzeylerinin (0, 0.5, 1.0 ve 2.0 mmol/L) hıyar (*Cucumis sativus* L) çeşitlerinin (ZND407 ve ZND461) soğuk stresine (4°C) karşı koruyucu etkisinin incelendiği çalışmada; 1.0 mmol/L SNP ile MDA içeriğinin azaldığını ancak çözüner şeker ve klorofil içeriğinin arttığını, NO donörü uygulamasının süperoksid dismutaz (SOD), glutatyon redüktaz (GR), peroksidaz (POD) ve katalaz (CAT) enzimlerin aktivitelerini teşvik ettiğini, çözüner protein içeriğindeki değişimin önemli olmadığını, 1.0 mmol/L SNP uygulamasının hıyar bitkisinin soğuk stresine toleransını arttırdığını ve ZND407 çeşidinin soğuk stresine karşı daha yüksek tolerans gösterdiğini saptamışlardır.

Panda vd. (2011), beş günlük çeltik (*Oryza sativa* L. cv. MSE-9) fidelerine 7 gün süreyle uygulanan Cd stresinin (100 µM Cd) düzenlenmesindeki NO uygulamasının (100 µM SNP) etkisini değerlendirdikleri çalışmada; Cd kaynaklı oksidatif stresin çeltik fidelelerinde reaktif oksijen türlerini (ROS) üreterek kendini gösterdiğini ancak Cd stresi ile SNP birlikte verildiğinde SNP uygulamasının Cd toksisitesi altındaki çeltik fidelelerinde NO üretimini artırarak stres metabolizmasını düzenlediğini ve sonuç olarak SNP uygulamasının çeltik fidelelerini Cd stresinden koruma yollarından biri olabileceğini açıklamışlardır.

Jhanji vd. (2012) tarafından farklı düzeylerde Cd stresi [1, 2 and 4 mM Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>] ve harici NO (200 µg/mL SNP) uygulamalarının kanola (*Brassica napus* L. cv. GSL 1) bitkisinin gelişimi, fotosentetik özellikleri, verim bileşenleri ve yapısal özelliklerine etkisini incelemek amacıyla yapılan çalışmada; kontrole göre farklı Cd seviyelerinin bitki büyümesi geciktirdiği ve sürgün gelişimi (%27) ve kök uzunluğunda (%51) azalmalara neden olduğu, toplam kuru madde miktarını %31 oranında azalttığı, Cd uygulanmış bitkilerde fotosentetik parametreler olan yaprak alanı (%51), toplam klorofil (%27), klorofil a/b oranı (%22) ve kloroplastlardaki Hill reaksiyon aktivitesinin (%42) büyük ölçüde azaldığı, Cd uygulanmış bitkilerde verim parametreleri olan dal sayısı (23), bitkide silika sayısı (246), silikada tohum sayısı (10.3), bin tane ağırlığı (2.30 g) ve tohum veriminin (7.09 g) olumsuz şekilde etkilendiği ve 4 mM Cd uygulamasında olduğu gibi maksimum inhibisyonla kökteki damarlar gibi

çeşitli dokuların farklılaşmasını da farklı Cd uygulamalarının baskıladığı ve fakat harici NO uygulanmasının Cd stresindeki bitkilerin çeşitli morfo-fizyolojik ve fotosentetik özelliklerini kontrol bitkilerindeki parametrelere yaklaştırabileceği rapor edilmiştir.

Wang vd. (2013a) tarafından iki hafta boyunca Cd toksisitesine (0.1 mM CdCl<sub>2</sub>) maruz bırakılan İtalyan çiminin (*Lolium perenne* L.) gelişimine salisilik asit (0.2 mM SA) ve nitrik oksitin (0.1 mM SNP) tekil ve birlikte etkilerinin incelendiği çalışmada; Cd stresi koşullarında yapraklarda kloroz ve nekrotik lekeler gibi toksisite belirtilerinin görüldüğü, SA veya SNP uygulamalarının Cd'un toksik etkilerini hafiflettiği ve hem SA hem de SNP uygulamasından sonra toksisite belirtilerinin önemli ölçüde azaldığı, Cd stresinin kök ve sürgün kuru ağırlıkları, klorofil içeriği, net fotosentez oranı, transpirasyon hızı, mineral elementlerin alımı ve taşınımında azalmaya neden olduğu, hem kökler hem de sürgünlerde lipoksijenaz (LOX) aktivitesi ve MDA, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve prolin içeriklerini artırırken antioksidan enzimlerin [SOD, CAT, APX ve guaiakol peroksidaz (GPX)] aktivitelerini ise azalttığı ve Cd stresinin İtalyan çimi bitkilerinde fizyolojik streslere neden olduğu, SA veya SNP uygulamaları ile özellikle SA+SNP uygulamasının, Cd-stresine maruz kalan bitkilere kıyasla daha iyi gelişme sergilediği, Cd'nin kökten sürgüne taşınımını önemli ölçüde azalttığı ve SA+SNP uygulama kombinasyonunun klorofil içeriği ve hem kök hem de sürgünlerde antioksidan enzimlerin aktivitelerini arttırdığı, SA ve SNP'nin birlikte uygulanmasının yapraklarda klorofil içeriği, net fotosentez oranı, transpirasyon hızı, mineral elementlerin alımı ve taşınımını arttırdığı ve kök ve sürgünlerde H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve prolin birikimi ve lipid peroksidasyonu ise azalttığı ve sonuç olarak SA veya SNP uygulamaları ve özellikle de bunların kombinasyonunun İtalyan çimi bitkisine Cd stresinin olumsuz etkilerini önlediği saptanmıştır.

Tran vd. (2013) tarafından bezelye (*Pisum sativum* L. cv. Ran) yapraklarında Cd stresinden (25 µM CdCl<sub>2</sub>) kaynaklı yapısal bozukluklara karşı uygulanan NO seviyelerinin (500 ve 1000 µM SNP) koruyucu etkisinin araştırıldığı çalışmada; Cd toksisitesinin, yaprak boyutu ve kalınlığında azalmaya neden olduğu, mezofilde hücreler arası boşlukların, küçük kaplama hücrelerin ve stoma yoğunluğunun azaldığı, Cd stresinde ortaya çıkan bu anormalliklerin NO uygulamasıyla kısmen veya tamamen tersine çevrildiği ve 1000 uM SNP konsantrasyonunun Cd toksisitesinin olumsuz etkilerini önlemede çok etkili olduğu ve bu yolla yapraklarda kontrol uygulamasındaki yapraklara yakın yapısal parametrelere ulaşıldığı rapor edilmiştir.

Zhao vd. (2013) tarafından üç haftalık çeltik (*Oryza sativa* L., cv. Xiushui 63) fide-lerine sekiz gün süreyle uygulanan Cd kaynaklı (0.2 mM CdCl<sub>2</sub>·2.5H<sub>2</sub>O) toksisitenin neden olduğu oksidatif stres ve Cd alımına NO vericisi olarak harici SNP (0.05, 0.1, 0.2, and 0.4 mM) uygulamalarının etkilerini araştırmak amacıyla yapılan çalışmada; sürgün ve kök kuru ağırlıkları ve yaprak klorofil konsantrasyonlarında Cd stresinin neden olduğu gerilemenin 0.1 mM SNP uygulamasıyla önemli ölçüde azaldığı, NO uygulamalarının H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve askorbik asit konsantrasyonlarını azalttığı, glutatyon (GSH) konsantrasyonundaki azalma ve antioksidatif enzim aktivitelerinde Cd stresinin neden olduğu artışı engellediği, kökler tarafından Cd alımını artırarak ve sürgünler tarafından Cd birikimini azaltarak çeltiğin Cd toleransını arttırdığı ve sonuç olarak harici NO uygulamasının çeltiğin Cd toksisitesine karşı direncinde rol oynadığı bildirilmiştir.

Wang vd. (2013b) tarafından Cd toksisitesinin (100 µM CdCl<sub>2</sub>) ve bir NO vericisi olarak SNP (0, 50, 100 ve 200 µM SNP) uygulamasının çok yıllık çim (*Lolium perenne* L.) bitkisinin gelişimi, fizyolojik ve biyokimyasal özelliklerine etkilerine ilişkin yapılan çalışmada; Cd toksisitesinin ciddi seviyede kloroza neden olduğu, çim fidelerinin büyümesini ile makro ve mikro besin elementleri absorpsiyonunu engellediği, hem sürgün hem de köklerde Cd birikimini artırdığı, ROS birikimini ve bu birikimin sonucu olarak lipid peroksidasyonun arttığı ve ayrıca Cd ile birlikte SNP uygulamalarının köklerden sürgünlere Cd taşınmasını azalttığı, Cd toksisitesi sonucu bitkilerdeki K, Ca, Mg, Fe, Zn ve Cu absorpsiyonundaki azalmanın hafiflediği, ROS birikimi ve lipid peroksidasyonu azalttığı, SOD, POD, CAT ve APX aktivitelerini arttırdığı, Cd toksisitesi belirtilerini azalttığı ve bitki büyümesini desteklediği, 100 µM SNP uygulamasının Cd toksisitesine karşı en belirgin hafifletici etkiye sahip olduğu ve 400 µM SNP uygulamasının Cd toksisitesinin giderilmesinde anlamlı bir etki göstermediği açıklanmıştır.

He vd. (2014) tarafından nitrik oksitin ağır metaller de dahil olmak üzere biyotik ve abiyotik streslere karşı çeşitli fizyolojik süreçlere ve tepkilere aracılık eden bitkilerde biyoaktif bir molekül olduğu ve harici SNP (0, 10, 30, 50, 100, 200, 500 µM) uygulamalarının çeltik (*Oryza sativa* L. cv. Jiyou no. 9) tohumunun çimlenmesi ve fide büyümesine etkilerinin Cd stresi (100 µM) altında araştırıldığı ve olası bir mekanizmanın öne sürüldüğü çalışmada; Cd uygulamasının kök ve sürgün uzunlukları, fide yaş ağırlıkları, tohumda çimlenme

indeksi ve canlılık indeksinde kontrole kıyasla önemli ölçüde azalmaya ve Cd maruziyeti, çeliğin kök ve sürgünlerinde H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve MDA içeriğini artırarak oksidatif strese neden olduğu, tek başına Cd tedavisi ile karşılaştırıldığında harici SNP uygulamasının ise çimlenme inhibisyonunu ve Cd stresinin neden olduğu fide büyümesini doza bağlı olarak zayıflattığı, süperoksit dismutaz (SOD), askorbat peroksidaz (APX), guaiacol peroksidaz (POD) ve katalaz (CAT) aktivitelerini belirgin şekilde uyardığı ve böylece kök ve sürgünlerindeki antioksidan kapasitenin arttığı, en çok teşvik edici etkinin 30 µM SNP dozunda belirgin olduğu ve Cd stresine maruz kalan fidelerin H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve MDA içeriğini de azaltarak kısmen Cd toksisitesini önlediği ve fidelerdeki Cd birikiminin SNP tarafından önemli ölçüde azaltılabileceği bildirilmiştir.

Xu vd. (2014), kontrol ve Cd-toksik (100 µM Cd) koşullarda yapraktan püskürtülerek veya besin çözeltisiyle kök ortamından uygulanan SNP seviyelerinin (100, 250 ve 500 µM SNP) üç hafta süreyle yetiştirilen marul (*Lactuca sativa* L.) fidelerine etkisini belirledikleri çalışmada; Cd toksisitesinin marul fidelerinin gelişimini geriletmediği, hem yapraklarda hem de köklerde Cd birikiminin önemli ölçüde artırdığı ve Ca, Mg, Fe ve Cu alımını engellediği, yaprak ve köklerde süperoksit dismutaz (SOD), peroksidaz (POD) ve katalaz (CAT) aktivitelerini azalttığı ve süperoksit anyonu (O<sub>2</sub><sup>-</sup>), hidrojen peroksit (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) ve malondialdehit (MDA) birikimini artırdığı rapor edilmiştir. Araştırmacılar; kök veya yapraktan harici NO uygulamalarının (özellikle kökten 250 µM SNP ve yapraktan 500 µM SNP uygulamaları) Cd stresi kaynaklı gelişim gerilemesini hafiflettiği, fotosentezi olumlu yönde etkileyerek klorofil sentezini artırdığını, ROS ve MDA birikimini belirgin şekilde azalttığını, iyonların tutulması veya alımını teşvik etmek için H<sup>+</sup>-ATPase aktivitesini uyarmasıyla Ca, Mg, Fe ve Cu absorpsiyonunu artırdığını, köklerden sürgünlere Cd taşınımını engellediğini ve sonuç olarak Cd stresi altında harici NO uygulamalarının klorofil sentezini artırarak fotosentezi iyileştirdiğini, marul fidelerini ROS'u temizleyerek oksidatif hasara karşı koruduğunu, besin elementlerinin alımını sürdürmeye yardımcı olduğunu ve sürgünlere transfer edilen Cd'u etkili bir şekilde inhibe ettiğini belirtmişlerdir.

Lui vd. (2015) tarafından Cd mazruziyeti (100 µM CdCl<sub>2</sub>) koşullarında SNP uygulamalarının (10, 25, 50, 100, 200 ve 400 µM SNP) aküçgül (*Trifolium repens* L.) bitkisindeki rolünün araştırıldığı çalışmada; Cd mazruziyeti biyokütleyi, klorofil *a*, *b* ve toplam klorofil konsantrasyonunu ve NO üretimini azalttığı ancak bitkilerde ROS ve Cd birikimini artırdığı,



bunula birlikte 50 µM SNP uygulamasının büyüme gerilemesini, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve MDA seviyelerini önemli ölçüde azalttığı, ROS süpürücü enzimleri/ajanları uyardığı ve proton pompalarında H<sup>+</sup>-ATPase inhibisyonunu hafiflettiği, SNP uygulamasının bitki dokularında jasmonik asit ve prolin seviyelerini yukarı regüle ettiği, hem sürgünlerde hem de köklerde etilen seviyelerini ve sadece köklerde salisilik asit seviyelerini aşağı regüle ettiği, SNP uygulamalarının (25-200 µM) mineral absorpsiyonunu düzenlediği ve özellikle 50 µM SNP uygulamasının gövdede Mg ve Cu alımı ile kökte Ca, Mg ve Fe alımını önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiş ve NO'nun oksidatif hasarı ortadan kaldırarak, mineral alımını artırarak, proton pompalarını düzenleyerek ve hormon dengesini koruyarak Cd toksisitesini azalttığı sonucuna varılmıştır.

Xu vd. (2015a) tarafından Cd ile kirlenmiş (50 mg/kg) bir toprakta yetiştirilen marul (*Lactuca sativa*) fidelerine doğrudan veya bir kapsül, kâğıt torba, nişasta kaplı granül içerisinde ve yapraktan püskürtülerek NO uygulamalarının (8.94 mg SNP) Cd toksisitesine etkilerinin araştırıldığı çalışmada; Cd toksisitesinin klorofil içeriğini azalttığı, oksidatif strese neden olduğu, kök ve yapraklarda Cd birikimini artırdığı ve Ca, Mg ve Fe alımını engellediği ve Cd stresi ile birlikte NO uygulamalarının klorofil içeriğini artırdığı, antioksidan enzim aktivitelerini geliştirdiği, Ca, Mg ve Fe alımını artırdığı, Cd streinin neden olduğu oksidatif hasarları ve köklerden sürgünlere taşınan Cd miktarını azalttığı, farklı yöntemlerle uygulanan SNP'nin marul fidelerinin Cd toleransına etkilerinin farklı olduğu ve Cd toksisitesinin olumsuz etkisinin hafifletilmesinde doğrudan toprağa SNP uygulamasının en kötü uygulama yöntemi olarak belirlendiği ve diğer üç yavaş salınım yapan materyal içerisinde SNP uygulamalarının daha iyi hafifletme etkisine sahip yöntemler olduğu rapor edilmiştir.

Xu vd. (2015b) tarafından büyük tohum tipi (Huayu 22) ve küçük tohum tipine (Xiaobaisha) sahip iki yer fıstığı (*Arachis hypogaea* L.) çeşidinde Cd toksisitesinin (200 uM CdCl<sub>2</sub>) hafifletilmesinde salisilik asit (0.1 mM SA) ve nitrik oksidin (0.25 mM SNP) interaktif etkilerinin incelendiği çalışmada; fidelerinin veya sodyum nitroprussid bir NO donörü) ihtiva etmeyen veya ihtiva eden durumlarda ile muamele edildiği, Cd maruziyetinin her iki çeşitte de bitki büyümesini baskıladığı, ancak Xiaobaisha'dan daha fazla Huayu 22'nin bitki büyümesini baskıladığı, eksojen SA ve NO'in her iki fıstık çeşidinde de Cd toksisitesini hafiflettiği, bitki büyümesi, klorofil içeriği ve fotosentezi iyileştirdiği, ayrıca her iki çeşidin kök ve yapraklarında eksojen SA ve NO uygulamasının hücre duvarında Cd

birikimini arttırdığı, organellere Cd dağılımını ise azalttığı, özellikle SA+SNP'nin etkisinin daha açık olduğu saptanmıştır.

Deveci (2015), NO'in bitkilerde kök organogenezi, stoma hareketleri, tohum çimlenmesi, yaşlanma ve hücre çeperi lignifikasyonunda, sitosol, peroksizomlar, kloroplastlar ve mitokondrilerde bazı enzimlerin sentezi ve/veya düzenlenmesi ve bununla beraber biyotik/abiyotik stres koşullarında rol oynadığını, bitki türü, dokusu ve bitkinin içinde bulunduğu yetiştirme koşullarına bağlı olarak NO sentezinin değiştiğini ve NO'in normal koşullarda bitki hücresinde az miktarda sentezlendiğini, çeşitli hücrel aktivite için gerekli olduğunu ve hücrelerin de NO'e oldukça duyarlı olduğunu, NO'in SNP formuyla bitkiye dışardan verilmesinin Cd'a karşı bitki köklerinde oksidatif hasarı azalttığını ve Cd toksisitesine karşı koruyucu bir rol aldığını açıklamıştır.

Dong vd. (2016), SNP uygulamasının (250 µM SNP) Cd toksisitesini (50, 100 ve 200 µM CdCl<sub>2</sub>) hafifletmedeki rolünü incelemek için yer fıstığı (*Arachis hypogaea* L.) bitkisi ile yaptıkları çalışmada; Cd maruziyetinin bitki büyümesini baskıladığını, fotosentezi engellediğini ve oksidatif stres ile sonuçlandığını, Cd'un çoğunlukla düşük Cd stresi altında köklerde hücre duvarında hapsediği ancak çoğu Cd, yüksek Cd stresi altında çözünür fraksiyonda biriktiğini ve Cd uygulama seviyesinden bağımsız olarak yapraklarda hücre duvarında büyük bir kısmının biriktiğini, SNP uygulaması fotosentezi geliştirmesi, artırılmış antioksidan sistemi yukarı regüle etmesi ve gövde ve yapraklarda Cd birikimini azaltması ile köklerden sürgünlere Cd translokasyonu azaltarak Cd toksisitesini önemli ölçüde azalttığını ve ayrıca çözünür fraksiyonlarda ve hücre organellerinde Cd birikimini azaltıp kök ve yaprak hücre duvarında Cd tutulmasını artırarak yaprak ve kök dokularında Cd'un hücre içi dağılımını da değiştirdiğini açıklamışlardır.

Zhao vd. (2016), Cd stresine (444.8 µM CdCl<sub>2</sub>·2.5H<sub>2</sub>O) maruz kalan kedi kuyruğu ya da dar yapraklı saz otu (*Typha angustifolia*) bitkisine uygulanan NO'nun (100 µM SNP) etkisinin araştırıldığı çalışmalarında; SNP uygulamasının hem kökte Cd stresi ile tetiklenen MDA içeriği artışını hem de kök ve yapraktaki nispi elektrolit sızıntısını azaltabildiğini, antioksidan enzimlerin aktivitelerinde artışın azaltıldığını, kökteki protein olmayan tiyol ve fitoşelatinlerin içeriğinde meydana gelen Cd stresi kaynaklı değişikliklerin NO uygulaması ile tersine çevrilebildiğini, NO uygulamasının hücre duvarında Cd dağılımını arttırdığı ve

kök ile yaprağın çözünür fraksiyonundaki Cd dağılımını azalttığı ve sonuç olarak NO'nun antioksidan metabolizmayı düzenleyerek ve kökün hücre duvarında Cd birikimini artırarak *T. angustifolia*'da Cd toksisitesine karşı koyduğunu rapor etmişlerdir.

Per vd. (2017), aşırı Cd (50 µM Cd) uygulamasının hardal (*Brassica juncea* L.) bitkisinin fotosentez aktivitesindeki toksik etkisine NO (100 µM SNP) uygulamasının rolünü araştırdıkları çalışmada; Cd maruziyetinin oksidatif stresi (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriği ve lipid peroksidasyon) arttırdığını, bitki büyümesi ve fotosentez, klorofil floresansı ve klorofil içeriği ve stoma iletkenliğini azalttığını, SNP uygulamasının ROS tutucu bileşiklerin (SOD, APX, glutatyon redüktaz ve indirgenmiş glutatyon) uyarılmasıyla Cd'un olumsuz etkilerini tersine çevirdiğini, bitki büyümesi, fotosentez ve klorofil içeriğini arttırdığını ve reaktif oksijen türleri (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) ve TBARS içeriklerinin birikimini, Cd'un kloroplastların tilakoid zarına olumsuz etkilerini azalttığını, NO'nun koruyucu etkisinin azaltılmış glutatyon (GSH) üretiminin artmasıyla sağlandığını ve sonuç olarak NO'nun kükürt (S)-asimilasyonu ve GSH üretimini düzenleyerek *B. juncea*'daki Cd toksisitesini güçlü bir şekilde önlediğini rapor etmişlerdir.

Chen vd. (2018), NO donörü olarak SNP'nin (100 µM) İtalyan çimi bitkisinde (*Lolium perenne* L.) iki haftalık Cd toksisitesi (0, 100 ve 150 µM CdCl<sub>2</sub>) maruziyetinin etkilerini inceledikleri çalışmada; Cd stresinin (100 ve 150 µM CdCl<sub>2</sub>) İtalyan çimi fidelerinde zararlı etkiler yarattığını ve bitki büyümesini engellediğini, klorofil konsantrasyonunu ve Fe, Cu ve Zn gibi besin elementlerinin alımını azalttığını ve ayrıca fazla Cd'un antioksidan enzim aktivitelerini değiştirdiğini ve ROS birikimini arttırdığını, buna karşın harici NO'nun bitki büyümesini, klorofil içeriğini ve mineral besin konsantrasyonlarını arttırdığını, özellikle 150 µM Cd stresi altındaki İtalyan çimi fidelerindeki toksisiteyi hafiflettiğini, ayrıca Cd'un köklerden yapraklara geçişini de azalttığını ve bunun da bitkileri oksidatif stresten korumak için antioksidan sistemlerin artan kapasiteleri ile ilişkilendirilebileceğini rapor etmişlerdir.

Cikili vd. (2019) tarafından NO (100 µM SNP) ve Cd (100 ve 500 µM CdCl<sub>2</sub>) uygulamalarının karakavak (*Populus nigra* genotip Gazi) bitkisine tekil/birleşik etkilerininin araştırıldığı çalışmada; Cd uygulamalarının yaprak, ağaç kabuğu ve köklerde Cd konsantrasyonlarını ve MDA ile H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> birikimini arttırdığı, bitki biyokütlesi, fotosentetik pigmentlerin (klorofil *a*, *b*, *a+b* ve karotenoidler) içerikleri ve yapraklarda Zn<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup> ve Mn<sup>2+</sup> dü-

zeylerini azalttığı, Cd+SNP uygulamalarının yapraklar dışında Cd stresini azaltıcı etki yaptığı, fotosentetik pigment içeriklerini artırdığı, MDA ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> birikimini azalttığı ve sonuç olarak Cd toksisitesinin bitki büyümesinde ve mineral besleme parametrelerinde azalmaya neden olduğu ve SNP uygulamasının karakavak bitkisinde Cd-toksik şartlarda büyümeyi iyileştirici bir etki büyük potansiyel gösterdiği açıklanmıştır.

Çanakçı-Gülengül vd. (2019), yapraktan SNP (0, 25 ve 50 µM) dozları uygulanmış 15 günlük mısır (*Zea mays* L.) fidelerine uygulanan Cd konsantrasyonlarının (0, 25, 50 ve 75 µM) oluşturduğu biyokimyasal reaksiyonları hidrofonic ortamda inceledikleri çalışmada; kontrole göre Cd uygulanan mısır fidelerinin köklerinde ve yapraklara SNP ön uygulamasız fidelerde okside glutatyon (GSSG) ve redükte glutatyon (GSH) miktarlarının arttığını ve SNP ön uygulamalı fidelerde ise azaldığını, uygulanan Cd konsantrasyonları arttıkça hem SNP ön uygulamasız hem de SNP ön uygulamalı fidelerin yapraklarda ve köklerde palmitik asit (16:0), palmioleik asit (16:1), linoleik asit (18:2) miktarları ile köklerde stearik asit (18:0) miktarının arttığını, kontrole kıyasla 50 µM SNP tek başına uygulandığında palmitik asitin daha az bulunduğunu, SNP ön uygulamasız fidelerin yapraklarında Cd uygulamaları ile linolenik asit (18:3) miktarı azalırken SNP ön uygulamalı fidelerde ise arttığını ve sonuç olarak Cd toksisitesini baskılamada 50 µM SNP ön uygulamasının 25 µM SNP'den daha başarılı olduğunu saptanmışlardır.

Liu vd. (2020), Si veya NO uygulaması bitkilerde Cd birikimini ve toksisitesini hafifletebileceğini, ancak bunların Cd birikimini ve toksisiteyi hafifletmede ortak etkilerinin olup olmadığını bilmediğini ve Si ve NO uygulamasının mısırın gelişimi, Cd alımı, taşınımı ve Cd birikimindeki birlikte etkisini incelemek amacıyla yürüttükleri çalışmada; Cd stresinin büyümeyi azalttığını ve bitkilerde Cd birikimine neden olduğunu, Si ve NO birlikte şekilde uygulandığında ise mısırdaki önemli bir tepkiyi tetikleyerek bitki gelişimini arttırdığını ve Cd stresinin altında Cd alımı, birikimi, yer değiştirmesi ve biyobirikim faktörlerini ise azalttığını, Cd stresi koşullarına göre Si ve NO birlikte uygulandığında tane Cd konsantrasyonunun %66 oranında azaldığı ve mısırdaki Cd sağlık risk indeksini de etkili bir şekilde azalttığı ve Si ve NO'nun Cd alımı ve birikimini azaltarak Cd toksisitesinin olumsuz etkilerini hafifletmede güçlü bir etkiye sahip olduklarını bildirmişlerdir.

Dong vd. (2020) tarafından düşük (5 µM) veya yüksek (200 µM) Cd stresine maruz bırakılan yer fıstığı (*Arachis hypogaea* L. Xiaobaisha) bitkisinin fizyolojik tepkilerinin ve NO donörü olarak SNP (250 µM) uygulamasının Cd stresinin zararlı etkileri tersine çevirme yeteneğinin bitki büyüme parametreleri, klorofil içeriği, antioksidan sistem, besin içeriği ve Cd birikimindeki değişimleri değerlendirilerek incelendiği çalışmada; SNP ve 5 µM Cd stresinin bitki büyümesini ve klorofil içeriğini iyileştirdiği, antioksidatif sistemi yukarı regüle ettiği ve sonuç olarak süperoksit ( $O_2^{\cdot-}$ ) radikalının üretim hızının azaldığı, besin element alımının etkilenmediği ve Cd toksisitesinin gözlenmediği, fakat 200 µM Cd stresinin yukarıda bahsi geçen parametreler üzerinde olumsuz etkilere sahip olduğu ve tüm bitki organlarındaki Cd birikimini önemli ölçüde arttırdığı, 200 µM Cd+250 µM SNP uygulamasının ise bitki büyümesini uyardığı ve klorofil içeriğini arttırdığı, ayrıca antioksidatif sistemin düzenlenmesini iyileştirdiği,  $O_2^{\cdot-}$  radikalının üretim hızını ve MDA üretim oranını azalttığı, SNP uygulanmasının besin elementlerinin alımını arttırdığı ve Cd'nin alımını ve taşınmasını da kısıtladığı saptanmıştır.

Nabaei ve Amooaghaie (2020) tarafından toprakta oluşturulan farklı seviyelerdeki Cd stresi (0, 50, 100 ve 200 mg/kg) koşullarında yetiştirilen Cezayir menekşesi (*Catharanthus roseus* L.) bitkisinin kök ve sürgünlerin yaş ve kuru ağırlığı, klorofil içerikleri ve Cd toleransı ve birikimine yapraktan tek başına ve birlikte uygulananı SNP (200 µM) ve melatoninin (100 µM) etkilerinin değerlendirildiği çalışmada; 50 mg/kg Cd stresinin kök ve sürgün yaş ve kuru ağırlıkları ile klorofil *a* ve *b* içeriklerine önemli bir etkisinin olmadığı, ancak daha yüksek Cd düzeylerinde (100 ve 200 mg/kg) bu parametrelerde önemli ölçüde azalma görüldüğü, yaprakta elektrolit sızıntısı seviyesini artırdığı ve besin homeostazını bozduğu, yapraklardaki katalaz ve peroksidaz aktiviteleri düşük Cd (50 ve 100 mg/kg) düzeylerinde artarken, yüksek Cd seviyesinde (200 mg/kg) azaldığı, bununla birlikte yapraktan SNP ve/veya melatoninin uygulamalarının sürgün biyokütlesi, klorofil *a* ve *b* içerikleri, katalaz ve peroksidaz aktivitelerini arttırdığı, yaprakta elektrolit sızıntısı seviyesini azalttığı ve besin homeostazını düzelttiği, hem köklerde hem de sürgünlerde Cd birikimi, biyokonsantrasyon faktörü ve kökten gövdeye translokasyon faktörü olarak taşınımını arttırdığı, SNP ve melatoninin tek başına kullanımlarına göre birlikte uygulanmaları antioksidan enzimlerin aktivitelerini artırarak ve *C. roseus* bitkisinin mineral homeostazını düzenleyerek Cd toleransını artırdığı ve ayrıca, biyokütleyi artırarak ve Cd'nin kökten sürgüne alınması ve taşınmasını yükselterek *C. roseus* bitkisinin fitoremediasyon etkinliğini artırdığı tespit edilmiştir.

Kayın (2020), çarliston Yalova 341 ve Doru 16 biber çeşilerine tuzluluk (50 mM NaCl), ağır metaller (Zn, Cu ve Cd) ve B (1 mM) kaynaklı streslere karşı etkileri nitrik oksit (NO) vericisi olarak farklı seviyelerde SNP (0, 25 ve 50 µM) uygulamalarının bitkilerdeki büyüme, fotosentetik pigmentler, stres parametreleri ve antioksidatif enzim aktivitelerindeki değişimleri incelediği çalışmasında; tuz, ağır metal ve B stresi koşullarında bitkilerin kuru madde miktarı ve fotosentetik pigment içeriklerinin azaldığını, hidrojen peroksit (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), prolin, lipid peroksidasyon (MDA) ve askorbik asit (AsA) içerikleri ile süperoksit dismütaz (SOD), askorbat peroksidaz (APX), glutatyon redüktaz (GR), katalaz (CAT) ve peroksidaz (POD) enzim aktivitelerinin arttığını ve SNP uygulaması ile bitkilerde stres parametreleri (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, prolin, MDA ve AsA) ve enzim aktivitelerinin (SOD, APX, GR, CAT ve POD) arttığını belirlemiştir.

Azizi vd. (2021) tarafından Cd stresi (0, 75, 100 ve 150 µM CdCl<sub>2</sub>) altındaki zahter (*Satureja hortensis* L.) bitkisinin fizyolojik, biyokimyasal ve enzim aktivitelerine yaprakтан uygulanan NO'nun (0, 50, 100 and 200 µM SNP) etkisini araştırmak için yapılan çalışmada; Cd stresinin zahter bitkisinin bitki boyu, yaprak sayısı ve yan dal sayısını azalttığı ancak prolin birikimi, membran geçirgenliği, karbonhidratlar ve antioksidan enzimlerin aktivitesini arttırdığı ve bununla birlikte en yüksek Cd stresi (150 µM) ve yaprakтан NO (200 µM) uygulamasının bitki büyümesini iyileştirdiği, prolin (%116.5), klorofil *a*, *b* ve karotenoid içerikleri (sırasıyla %56.3, %38.4 ve %48.0), karbonhidratlar (%140) ve peroksidaz aktivitesinin (%85.8) arttığı ve sürgün ve köklerde Cd birikimini azalttığı belirtilmiştir.

Singh vd. (2022), silisyum (Si) ve NO'nun çeşitli bitki türlerinde metal toksisitesine bireysel etkisinin birçok kez belgelendiğini ancak metal stresinin düzenlenmesindeki bileşik etkilerine ilgili henüz pek çalışma olmadığını, bu nedenle buğday fidelerinde Cd toksisitesinin (100 µM CdCl<sub>2</sub>) azaltılmasında Si (10 µM Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) ve NO (100 µM SNP) 'nun birlikte uygulanmasının etkilerini inceledikleri çalışmalarında; Cd stresinde yetiştirilen fidede Cd birikimi ve antioksidan savunma sisteminin, özellikle askorbat ve glutasyon döngüsünün aşağı regülasyonu nedeniyle oksidatif stres belirteçlerindeki artışlar ve NO ile Si birikiminin azalması nedeniyle önemli oranda büyüme kaybı yaşandığını, fotosentetik verimlilikteki azalmanın neden olduğunu yaprak ve kök yapılarının değiştiği, Si ve NO'nun tekil ve birlikte uygulamasının Cd ve oksidatif stres belirteçlerinin birikimini azaltarak ve Cd stresi altında daha iyi bir fotosentetik oran sağlanması ile yaprak ve kök yapısı gelişimini iyileştirerek

buğday fidelerinde Cd toksisitesinin hafiflediğini ve sonuçta büyümeyi iyileştirdiğini ve özellikle Si ve NO birlikte uygulandığında antioksidan savunma sistemini (özellikle AsA-GSH döngüsü) yukarı regüle ederek oksidatif stres belirteçleri azalttığını ve bunun sonucunda tekil uygulamalarına göre Si+NO birlikte uygulandığında buğday fidelerinde Cd toksisitesine karşı artan etkinliğini ortaya koyduğunu bildirmişlerdir.

Ma vd. (2022) tarafından dört karnabahar (*Brassica oleracea* L.) genotipinin (FD-2, FD-3, FD-4 and Ceilo Blanco) Cd-toleransının iyileştirilmesi amacıyla kumda kültüründe Hoagland çözeltilisi ile yürütülen ve Cd stresi (0, 5, 10 and 20  $\mu\text{M}$  CdCl<sub>2</sub>) altında nitrik oksidin (0.10 mM SNP) varsayılan rollerinin incelendiği çalışmada; tüm karnabahar genotiplerinde artan Cd seviyeleriyle sürgün ve kök uzunluğu, sürgün ve kök yaş ağırlığı, sürgün ve kök kuru ağırlığı, çimlenme yüzdesi, çimlenme indeksi, ortalama çimlenme süresi, klorofil *a*, klorofil *b*, toplam klorofil ve karotenoid içerikleri, antioksidan (enzimatik veya enzimatik olmayan) kapasitesi ve bitkilerin beslenme durumunda önemli azalmalar görülürken MDA konsantrasyonu ve kökler ve sürgünlerde Cd birikiminde ise önemli artışlar belirlendiği, yetiştirme ortamdaki aynı Cd seviyeleri altında Cd stresine en duyarlı genotipler olarak Ceilo Blanco ve FD-4 belirlenirken, FD-2 ve FD-3 genotiplerinin ise Cd stresine daha fazla tolerans gösterdiği, sadece bitki gelişimi ve besin maddesi birikimini arttırmakla kalmayıp, aynı zamanda tüm genotiplerin çeşitli kısımlarında Cd birikimini ve zararlarla çevrili organellerde oksidatif hasarı azaltması nedeniyle NO uygulaması ile Cd kaynaklı toksik etkinin üstesinden gelinebileceği ve sonuç olarak NO uygulamasının bitkinin gelişimini düzenleyerek ve beslenme durumunu koruyarak karnabaharda Cd toksisitesi hafifletebileceği ve tüm karnabahar genotiplerinde Cd toksisitesinin neden olduğu oksidatif hasarın üstesinden gelebileceği tespit edilmiştir.

## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

### MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

Tez çalışmasında bitki materyali olarak ülkemiz ekonomisine oldukça yüksek katkı sağlayan ve ülkemizde yaygın olarak üretimi yapılan *Cucurbitacea* familyasına ait hıyar (*Cucumis sativus* cv. Toros), acur (*Cucumis melo* var. *flexuosus* cv. Anadolu Acur 016), kavun (*Cucumis melo* cv. Hasanbey), karpuz (*Citrilus lanatus* cv. Crimson Sweet), sakız kabak (*Cucurbita pepo* cv. Pelin) ve bal kabağı (*Cucurbita moschata* cv. Arıcan-97) türleri kullanılmıştır.

**Perlit:** Kabakgiller familyası türlerine ait bitkileri yetiştirme ortamı olarak 0-4 mm çapında ve zirai marketlerden temin edilen steril mikorize perlit kullanılmıştır.

**Besin Çözeltisi:** Kabakgiller familyası türlerinin besin maddesi ihtiyaçları modifiye edilmiş Hoagland besin çözeltisi ile sağlanmıştır.

**Kadmiyum:** Kadmiyum kaynağı olarak analitik saflıkta kadmiyum klorür ( $CdCl_2$ ) kullanılmıştır.

**Sodyum Nitro Prussid (SNP):** Molekül ağırlığı  $296 \text{ g mol}^{-1}$  ve kimyasal formülü  $Na_2[Fe(CN)_5NO] \cdot 2H_2O$  olan ve bitkilere harici NO uygulama çalışmalarında sıklıkla kullanılan nitrik oksit sağlayıcılarından (donör) biri olan sodyum nitro prussid (SNP) tez çalışmasında NO kaynağı olarak kullanılmıştır.

#### 3.2. Yöntem

Çalışma Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü'ne ait yarı kontrollü plastik serada faktöriyel deneme desenine uygun olarak yürütülmüştür. Seranın iklim koşulları; minimum/maksimum ortam sıcaklığı 20/37



°C ve minimum/maksimum bağıl nem ise %34/%60 olarak belirlenmiştir. Suda 24 saat şişirilen hıyar, acur, kavun, karpuz, sakız kabak, bal kabağı tohumları perlit ile doldurulmuş üç litre hacimli saksılara dört bitki/saksı olacak şekilde ekilmiştir. Çıkıştan sonra ise her saksıda iki bitki kalacak şekilde seyreltme yapılmıştır. Familyanın türlerine ait bitkiler deneme boyunca modifiye edilmiş Hoagland çözeltisi ile sulanmıştır.

Modifiye edilmiş Hoagland çözeltisinin bileşiminde; 4 mM  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , 6 mM  $\text{KNO}_3$ , 2 mM  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  ve 1 mM  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , 40.0  $\mu\text{M}$   $\text{H}_3\text{BO}_3$ , 45.7  $\mu\text{M}$   $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 9.0  $\mu\text{M}$   $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , 0.77  $\mu\text{M}$   $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 0.32  $\mu\text{M}$   $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , 0.17  $\mu\text{M}$   $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 0.10  $\mu\text{M}$   $(\text{NH}_4)_2\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  ve 55.0  $\mu\text{M}$   $\text{Na}_2\text{EDTA} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  bulunmaktadır. Hoagland çözeltinin pH'sı 6.0'ya HCl veya KOH kullanılarak ayarlanmıştır.

Tez çalışması kapsamında birer faktör olarak belirlenen ve uygulanacak olan deneme konularına ait koşullar, aşağıda açıklandığı şekilde hazırlanmış uygulama çözeltilerinin deneme konularına göre *Cucurbitaceae* familyasına ait türlere uygulanması ile sağlanmıştır.

**Kontrol:** Yetiştirilecek olan türlerin besin maddesi ihtiyacı modifiye edilmiş Hoagland çözeltisinin gelişmenin her gününde 100 mL çözelti olarak perlit ortamına sulama şeklinde verilmesi ile sağlanmıştır.

**Cd toksisitesi (Cd):** 40  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2$  uygulama çözeltisi eklenmiş modifiye edilmiş Hoagland çözeltisinin gelişmenin her gününde 100 mL çözelti olarak perlit ortamına sulama şeklinde verilmesi ile sağlanmıştır.

**Cd toksisitesi ve kökten SNP uygulaması (Cd+SNP-k):** 40  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2$  + 100  $\mu\text{M}$  SNP uygulama çözeltileri eklenmiş modifiye edilmiş Hoagland çözeltisinin gelişmenin her gününde 100 mL çözelti olarak perlit ortamına sulama şeklinde verilmesi ile sağlanmıştır.

**Cd toksisitesi ve yapraktan SNP uygulaması (Cd+SNP-y):** 40  $\mu\text{M}$   $\text{CdCl}_2$  uygulaması çözeltisi eklenmiş modifiye edilmiş Hoagland çözeltisinin gelişmenin her gününde 100 mL çözelti olarak perlit ortamına sulama şeklinde verilmesi ile büyütülen türlere ait bitkilere gelişmenin 21. ve 28. gününde iki kez olmak üzere 100  $\mu\text{M}$  SNP çözeltisinin yapraktan püskürtülerek uygulanması şeklinde yapılmıştır.

Ekimi yapılan türlerin besin çözeltisi ortamına uyum sağlayabilmesi için ilk 7 gün uygulama çözeltileri eklenmiş 1/4 Hoagland çözeltisi ve sonraki 7 gün uygulama çözeltileri eklenmiş 1/2 Hoagland çözeltisi ve 15. günden itibaren ise bitkiler uygulama çözeltileri eklenmiş tam Hoagland çözeltisi ile sulanmıştır.

Tohumların perlit ortamına ekiminden itibaren 5 hafta (35 gün) boyunca deneme kollarına göre uygulama çözeltileri eklenmiş Hoagland çözeltileri ile sulanan bitkiler kök boğazından kesilerek hasat edilmiştir.

Hasat edilen bitkilerin gövde ve kökleri ayrı ayrı örnek olarak alınmış, yıkanmış ve kurutularak analize hazırlanmıştır (Müftüoğlu vd., 2014). Elde edilen gövde ve kök süzüklerinde toplam Cd konsantrasyonları aşağıda detayları sunulan analiz yöntemleriyle belirlenmiştir.

### 3.2.1. Morfolojik Ölçümler

**Gövde ve Kök Yaş Ağırlıkları:** Kök boğazından kesilerek hasadı yapılan bitkilerin gövde ve kök yaş ağırlıkları (YA, g bitki<sup>-1</sup>) hassas terazide (0.01 g duyarlı) tartılarak belirlenmiş ve gövde ve kök biyolojik verimi olarak kaydedilmiştir.

**Gövde ve Kök Kuru Ağırlıkları:** Yaş ağırlıkları belirlenen ve sırasıyla iki kez musluk suyu, iki kez saf su ve bir kez de deiyonize su ile yıkanarak kese kâğıtlarına konulan bitkilerin gövde ve kökleri kurutma dolabında 70 °C’de sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. Kuruyan gövde ve kök örneklerinin kuru ağırlıkları (KA, g bitki<sup>-1</sup>) hassas terazide (0.001 g duyarlı) tartılarak belirlenmiştir (Müftüoğlu vd., 2014).

**Gövde/Kök Oranı:** Gövde ve kök kuru ağırlıklarının oranlanması sonucu aşağıdaki formüle (3.1) göre belirlenmiştir.

$$\text{Gövde/Kök Oranı} = \text{Gövde KA (g bitki}^{-1}\text{)} / \text{Kök KA (g bitki}^{-1}\text{)} \quad (3.1)$$

**Kök Uzunluğu:** Bitkilerin kök boğazı ile kök ucu arasındaki mesafe hasat sırasında ölçülerek (cm) belirlenmiştir.

**Kök Hacmi:** Türlerine ait temizlenen yaş köklerin birim hacimdeki ölçü kabında taşırdıkları su miktarının ( $\text{cm}^3$ ) ölçülmesi ile belirlenmiştir.

### 3.2.2. Bitki Analizleri

**Bitki Örneklerinin Analize Hazırlanması:** Kurutulan türlerin gövde ve kökleri blender yardımıyla öğütülmüştür. Daha sonra gövde ve kök örneklerinden porselen kroze içerisine 500 mg tartılmış ve sıcaklığı kademeli olarak yükseltilen ( $50-500\text{ }^\circ\text{C}$ ) kül fırınında gerçekleştirilmiştir. Türlerin yakılan örneklerine ait küller 2 mL 10 N nitrik asit ( $\text{HNO}_3$ ) ilave edilerek çözülmüş ve deiyonize su ile 100 mL kapasiteli ölçü balonuna aktararak derecelerine tamamlanmıştır. Ölçü balonundaki çözeltiler daha sonra uygun bir ekstrakt kabına mavi bant filtre kağıdı yardımıyla süzülmüş ve elementel analizler için buzdolabında saklanmıştır (Müftüoğlu vd., 2014).

**Fotosentetik Pigmentlerin Belirlenmesi:** Fizyolojik analizler hasat edilmeden önce alınan taze yaprak örneklerinden belirlenmiştir. Taze yaprak örnekler, ( $W = 200\text{ mg}$ ) küçük parçalara bölünerek bir homojenizatör yardımıyla 10 mL (V) %90 (v/v)'lık aseton ile homojenize edilerek Whatman No.4 filtre kâğıdından süzülümüştür. Homojenatların 663, 645 ve 470 nanometre dalga boylarındaki absorbansları spektrofotometrede belirlenerek klorofil *a* (3.2), klorofil *b* (3.3), klorofil *a+b* (3.4) ve karotenoidlerin (3.5) konsantrasyonları aşağıda detayları sunulan Lichtenthaler (1987)'in formülüne göre hesaplanmıştır.

$$\text{Klorofil } a \text{ (mg g}^{-1} \text{ YA)} = (11.75 \times A_{663}) - (2.35 \times A_{645}) \times V / W \quad (3.2)$$

$$\text{Klorofil } b \text{ (mg g}^{-1} \text{ YA)} = (18.61 \times A_{645}) - (3.96 \times A_{663}) \times V / W \quad (3.3)$$

$$\text{Klorofil } a+b \text{ (mg g}^{-1} \text{ YA)} = \text{Klorofil } a + \text{Klorofil } b \quad (3.4)$$

$$\text{Karotenoid (mg g}^{-1} \text{ YA)} = [(1000 \times A_{470}) - (2.27 \times \text{Chl } a)] - (81.4 \times \text{Chl } b / 227) \times V / W \quad (3.5)$$

**Toplam Cd Belirlemesi:** Kuru yakma yöntemine göre yakılarak analize hazırlanan gövde ve kök süzüklerinde toplam Cd içerikleri ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi (ICP-OES) ile belirlenmiştir (Müftüoğlu vd., 2014).

**Translokasyon Faktörü (TF-Cd):** Bitkilerin gövde ve kök Cd içerikleri dikkate alınarak aşağıdaki formüle (3.7) göre hesaplanmıştır (Çıkılı ve Samet, 2018; Shi vd., 2010).

$$TF-Cd = \text{Gövde Cd içeriği } ([Cd]_{\text{gövde}}) / \text{Kök Cd içeriği } ([Cd]_{\text{kök}}) \quad (3.7)$$

**Biyokonsantrasyon Faktörü (BKF):** Bitkilerin gövde ve kök Cd içerikleri ve yetiştirme ortamındaki toplam Cd iyonu miktarı dikkate alınarak aşağıdaki formül (3.8) yardımıyla hesaplanmıştır (Çıkılı ve Samet, 2018; Shi vd., 2010).

$$BKF-Cd = [Cd]_{\text{gövde/kök}} / [\text{toplam Cd}]_{\text{yetiştirme ortamı}} \quad (3.8)$$

**Köklerle Net Cd Akümüasyonu (NA-Cd):** Bitkilerin gövde ve kök Cd alımları ve kök kuru madde miktarları dikkate alınarak aşağıdaki formül (3.9) yardımıyla hesaplanmıştır (Moradi ve Ehsanzadeh, 2015).

$$NA-Cd (\mu\text{g g}^{-1} \text{KA}) = \text{Tüm bitkide toplam Cd miktarı } (\mu\text{g}) / \text{Kök KA (g)} \quad (3.9)$$

**Toplam Akümüasyon Oranı (TAR-Cd):** Bitkilerin gövde ve kök Cd içerikleri ve kuru madde miktarları dikkate alınarak aşağıdaki formüle (3.10) göre hesaplanmıştır (Shi vd., 2010).

$$TAR-Cd (\mu\text{g g}^{-1} \text{KA gün}^{-1}) = ([Cd]_{\text{gövde}} \times \text{KA}_{\text{gövde}}) + ([Cd]_{\text{kök}} \times \text{KA}_{\text{kök}}) / \text{gelişme gün sayısı} \times (\text{KA}_{\text{gövde}} + \text{KA}_{\text{kök}}) \quad (3.10)$$

### 3.2.3. İstatistik Analizler

Faktöriyel deneme desenine göre varyans analizine tabi tutularak Minitab16 paket programıyla önemlilik kontrolü  $F$  testine göre (\*:  $p \leq 0.050$ ; \*\*:  $p \leq 0.010$ ; \*\*\*:  $p \leq 0.001$ ; öd: önemli değil) ve ortalamaların çoklu karşılaştırmaları ise Duncan Çoklu Karşılaştırma Testine ( $\alpha$ : 0.05) göre yapılmıştır.

## DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

### ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

#### 4.1. *Cucurbitaceae* Familyası Türlerinin Toprak Üstü Aksam Gelişimi

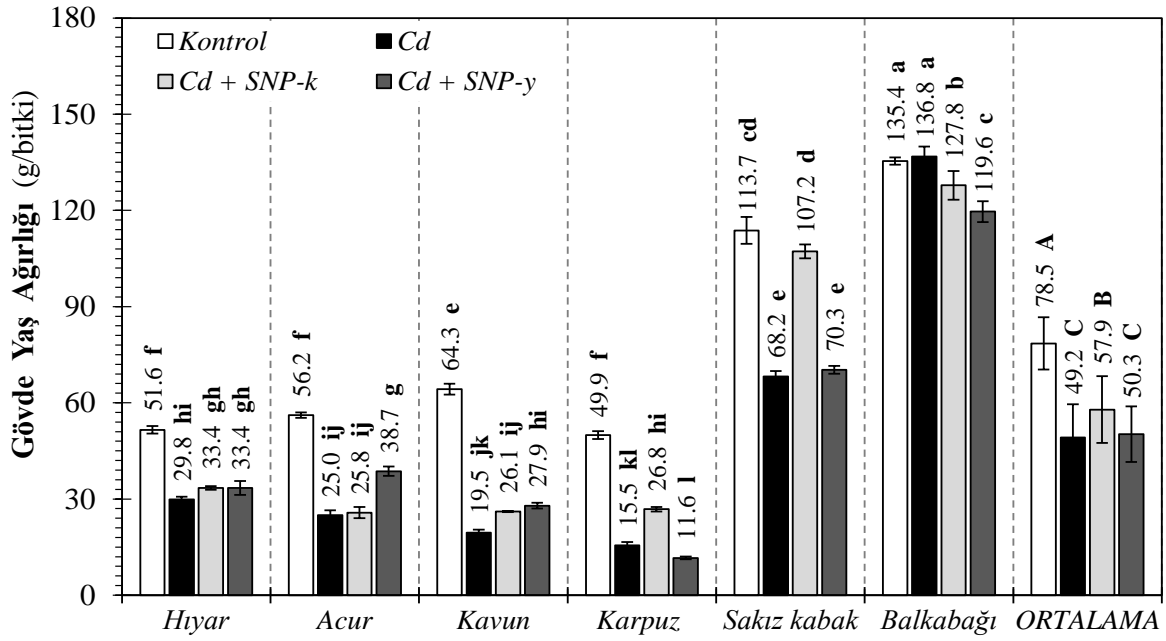
Kadmiyum stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* familyası türlerinin gövde yaş ve kuru ağırlıkları ve bitki boylarına NO kaynağı olarak SNP uygulamalarının etkisine ait varyans analiz sonuçları Tablo 1’de ve gövde yaş ağırlıklarına ait ortalamalar Şekil 1’de, gövde kuru ağırlıklarına ait ortalamalar Şekil 2’de ve bitki boylarına ait ortalamalar ise Şekil 3’de sunulmuştur. Tablo 1 ile Şekil 1, 2 ve 3 birlikte incelendiğinde; Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* türlerinde Cd stresinin hafifletilmesine SNP uygulamalarının gövde yaş ve kuru ağırlıkları ve bitki boyları üzerine türlerin, uygulamaların ve tür x uygulama interaksyonunun etkileri istatistiksel olarak %0.1 düzeyinde önemli bulunmuştur.

Tablo 1

Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* türlerinin gövde yaş ve kuru ağırlıkları ve bitki boylarına kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisine ait varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Gövde Yaş Ağırlığı		Gövde Kuru Ağırlığı		Bitki Boyu	
		Kareler Toplamı	F Değeri	Kareler Toplamı	F Değeri	Kareler Toplamı	F Değeri
Genel	71	119702.7	-	1333.1	-	26210.9	-
Tür (T)	5	103984.3	1166.1***	1059.6	1003.0***	11737.9	349.6***
Uygulama (U)	3	9997.0	186.9***	214.5	339.1***	8928.2	443.2***
T×U İnteraksiyonu	15	4865.4	18.2***	46.8	14.8***	5222.6	51.9***
Hata	48	856.1	-	11.1	-	322.3	-

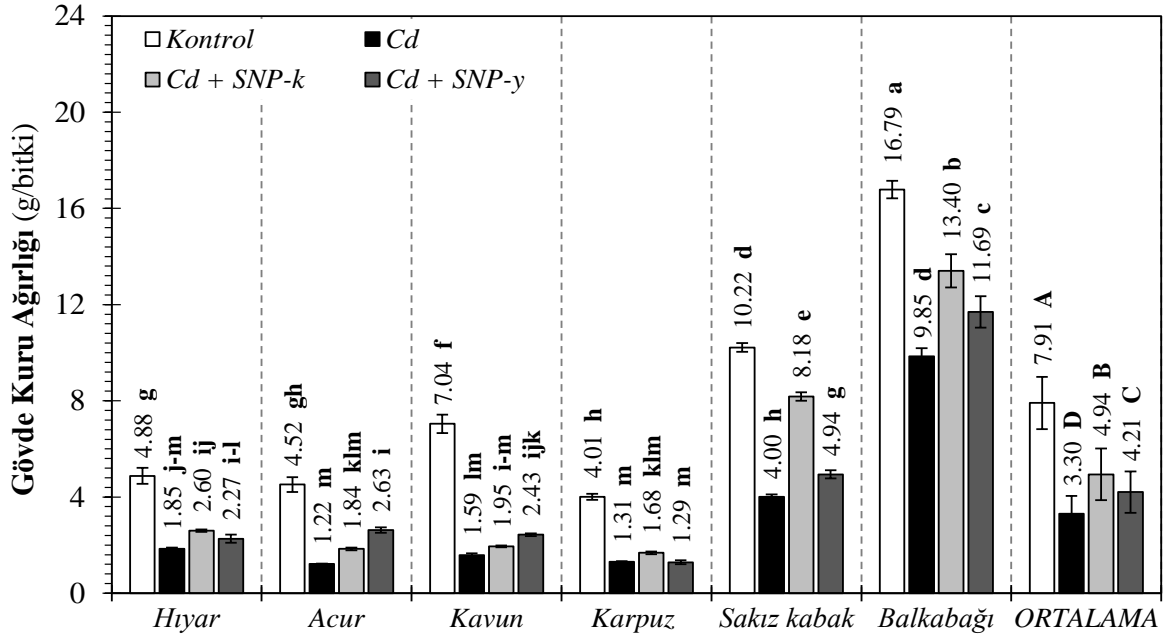
Familyadaki türler birlikte değerlendirildiğinde; kontrol uygulamasına (78.5 g bitki<sup>-1</sup>) göre Cd stresi koşullarında (49.2 g bitki<sup>-1</sup>) ortalama gövde YA %37.3 düzeyinde önemli bir azalma göstermiştir (Şekil 1). Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması (57.9 g bitki<sup>-1</sup>) ile ortalama gövde YA’ında %17.1 düzeyinde önemli bir artış gösterirken, Cd+SNP-y uygulaması ile (50.3 g bitki<sup>-1</sup>) ortalama gövde YA’ında %2.2 oranında belirlenen artış önemli bulunmamıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* türlerinin gövde yaş ağırlıklarına kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi

Balkabağı hariç diğer türlerin gövde YA'sında kontrole göre Cd stresi koşulları ile meydana gelen önemli azalmalar tespit edilmiştir (Şekil 1). Bu azalmalar; hıyarda %42.2, acurda %55.5, kavunda %69.6, karpuzda %68.9 ve sakız kabakta %40.0 seviyesinde belirlenmiştir. Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ile karpuz (%37.4) ve sakız kabakta (%57.6) saptanan artışlar ve balkabağında (%6.6) tespit edilen azalma önemli bulunurken hıyar (%12.1), acur (%3.1) ve kavunda (%33.6) belirlenen artışlar önemli bulunmamıştır. Bununla birlikte, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile acur (%57.4) ve kavunun (%42.9) gövde YA'sında tespit edilen artışlar ve balkabağı (%12.6) belirlenen azalma önemli bulunurken, diğer türlerin gövde YA'sında saptana değişimler önemsiz olmuştur (Şekil 1).

Familyadaki türler birlikte değerlendirildiğinde; kontrol uygulaması koşullarında  $7.85 \text{ g bitki}^{-1}$  olan ortalama gövde KA, Cd stresi koşullarında %58.0 düzeyinde önemli bir azalma göstererek  $3.30 \text{ g bitki}^{-1}$  olarak belirlenmiştir (Şekil 2). *Cucurbitaceae* familyasının toprak üstü aksam gelişimine Cd stresinin negatif etkileri SNP uygulamaları ile azaltılmıştır. Cd stresine kıyasla Cd+SNP-k uygulaması ( $4.94 \text{ g bitki}^{-1}$ ) ile %49.7 düzeyinde ve Cd+SNP-y uygulaması ( $4.21 \text{ g bitki}^{-1}$ ) ile %27.6 düzeyinde türlerin ortalama gövde KA'sında önemli artışlar saptanmıştır (Şekil 2).

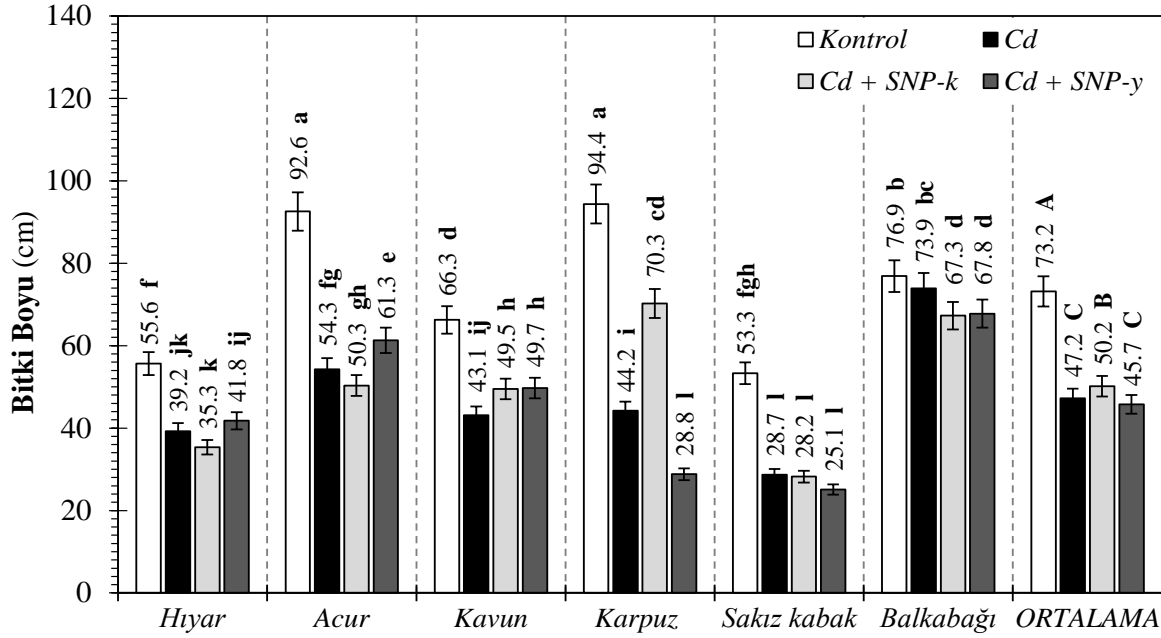


Şekil 2. Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* türlerinin gövde kuru ağırlıklarına kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi

Kontrole göre Cd toksisitesi koşulları ile tüm türlerin gövde KA'sında önemli azalmalar belirlenmiş ve bu azalma düzeyleri; hıyar için %59.3, acur için %73.0, kavun için %77.4, karpuz için %67.3, sakız kabak için %60.9 ve balkabağı için %41.3 olarak tespit edilmiştir (Şekil 2). Gövde kuru madde miktarındaki azalmalara göre Cd stresine dayanıklılık sıralaması *balkabağı* > *hıyar* > *sakız kabağı* > *karpuz* > *acur* > *kavun* olarak belirlenmiştir. Cd stresine göre Cd+SNP-k uygulaması ile sakız kabak (2.04 kat) ve balkabağında (%36.0) görülen artışlar dışında hıyar (%40.5), acur (%50.8), kavun (%22.6) ve karpuzda (%28.2) belirlenen artışlar istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır. Ayrıca, Cd stresi koşullarına kıyasla Cd+SNP-y uygulaması ile hıyar (+%22.7) ve karpuzun (-%1.5) gövde KA'sında saptanan değişimler hariç acur (%42.1), kavun (%52.8), sakız kabak (%23.5) ve balkabağının (%18.7) toprak üstü aksam kuru ağırlıklarında belirlenen artışlar önemli bulunmuştur (Şekil 2).

Familyadaki türler birlikte değerlendirildiğinde; kontrol uygulamasına (73.2 cm) göre Cd stresi koşullarında (47.2 cm) ortalama bitki boyu %35.5 düzeyinde önemli bir azalma göstermiştir (Şekil 3). Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması (50.2 cm)

ile ortalama bitki boyunda %6.4 düzeyinde önemli bir artış gösterirken, Cd+SNP-y uygulaması ile (45.7 cm) ortalama bitki boyunda %3.2 oranında belirlenen azalma önemli bulunmamıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* türlerinin bitki boylarına kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi

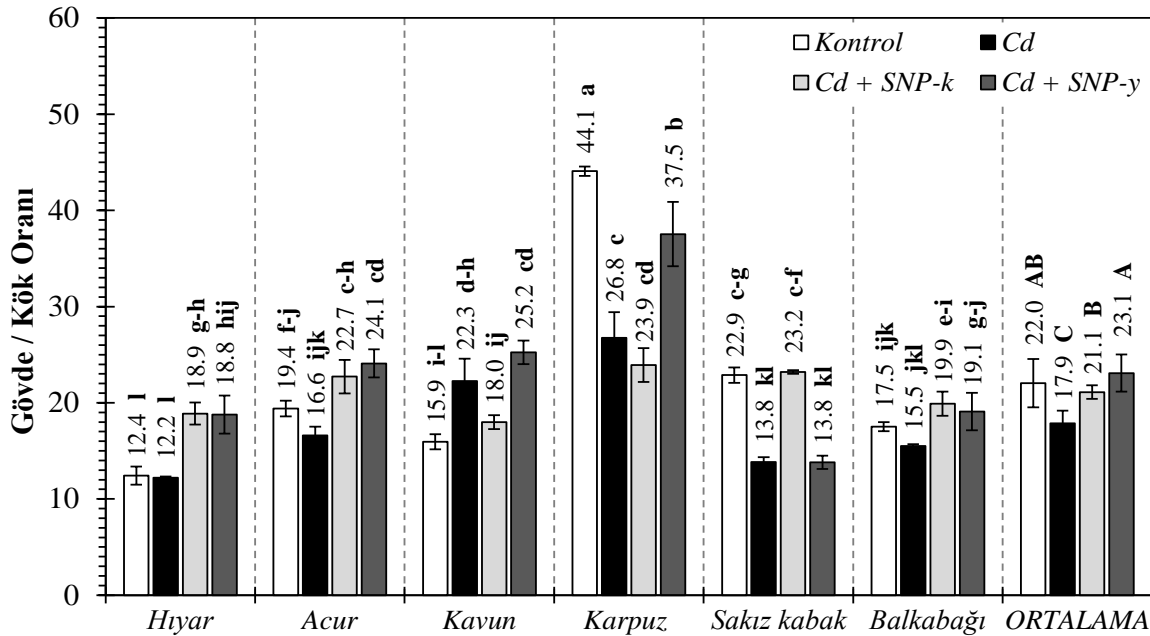
Kontrole göre Cd stresi koşulları altında türlerin bitki boylarında meydana gelen azalmalar balkabağı hariç diğer türlerde önemli bulunmuştur (Şekil 3). Bu azalmalar; hıyarda %29.5, acurda %41.4, kavunda %35.0, karpuzda %53.2, sakız kabakta %46.2 ve balkabağında %3.9 seviyesinde belirlenmiştir. Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ile kavun (%14.9) ve karpuzda (%59.1) saptanan artışlar ve balkabağında (%8.9) saptanan azalma önemli bulunurken, hıyar (%10.0), acur (%7.4) ve sakız kabakta (%1.7) belirlenen azalmalar önemli bulunmamıştır. Bunun yanında, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile acur (%12.9) ve kavunda (%15.3) tespit edilen artışlar ile karpuz (%34.8) ve balkabağında (%8.3) tespit edilen azalmalar önemli bulunurken, hıyar (+%6.6) ve sakız kabakta (-%12.5) meydana gelen değişimler önemli bulunmamıştır (Şekil 3).

Familyadaki türler birlikte değerlendirildiğinde; kontrol uygulamasına (22.04) göre Cd stresi koşullarında (17.86) ortalama gövde/kök oranı %19.0 düzeyinde bir azalma göstermiştir (Şekil 4). Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması (21.10) ile ortalama



gövde/kök oranı %18.1 düzeyinde bir artış gösterirken, Cd+SNP-y uygulaması ile (23.09) ortalama gövde/kök oranında %29.3 düzeyinde bir artış tespit edilmiştir (Şekil 4).

Kontrole göre Cd stresi koşulları altında türlerin gövde/kök oranında kavunda gözlenen artış (%39.6) dışında diğer türlerin gövde/kök oranında azalmalar meydana gelmiştir. Bu azalmalar; hıyarda %1.8, acurda %14.3, karpuzda %39.3, sakız kabakta %39.5 ve balkabağında %11.5 seviyesinde belirlenmiştir. Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ile hıyar (%54.8), acur (%36.8), sakız kabak (%67.6) ve balkabağı (%28.4) bitkilerinin gövde/kök oranında artışlar saptanırken, kavun (%19.2) ve karpuzda (%10.6) ise azalma tespit edilmiştir. Bunun yanında, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile hıyar (%53.9), acur (%45.1), kavun (%13.3), karpuz (%40.3) ve balkabağı (%23.0) bitkilerinin gövde/kök oranında artışlar saptanırken, sakız kabakta (%0.2) ise çok küçük bir azalma tespit edilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* türlerinin gövde/kök oranlarına kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi

Yetiştirme ortamında bulunan ve artan Cd miktarı, bitkinin fotosentetik aktivitesini ve besin dengesini sekteye uğratarak bitki büyümesini engellemektedir (Zhang vd., 2002; Shamsi vd., 2010). Kadmiyum toksisitesinin sebzelerde tohum çimlenmesi, büyümesi, biyokütlesi ve kalitesi düşürdüğü ve bunun mineral beslenmedeki değişimi, fotosentezi ve stoma

iletkenliğini azalttığı ve ayrıca Cd toksisitesinin oksidatif strese ve antioksidan enzim aktivitelerinde azalmaya neden olarak sebze biyokimyası ile etkileşme girdiği açıklamıştır (Rizwan vd., 2017). Kadmiyum toksisitesi koşullarında yapılan çalışmalarda farklı bitkiler için bitki gelişiminde gerileme ve gövde biyokütlesinde azalmalar çeşitli araştırmacılar tarafından da rapor edilmiştir. Çeltik için Xiong vd. (2009) ve He vd. (2014), arpa genotipleri için Chen vd. (2010), kanola için Jhanji vd. (2012), aspir genotipleri için Moradi ve Ehsanzadeh (2015), domates, biber, patlıcan ve altınçilek için Çıkılı vd. (2016), hardal için Per vd. (2017), çilek için Balcı (2018), ayçiçeği için Çikili vd. (2020), *Solanaceae* familyası türleri (domates, biber, patlıcan, tütün, altınçilek ve patates) için Emer ve Çıkılı (2021) tarafından araştırma bulgularımıza benzer şekilde Cd stresi koşullarında bitki gelişimi ve gövde biyokütlesinde azalmalar açıklanmıştır.

Oksidatif stresi, ağır metal birikimi ve IAA oksidaz aktivitesini azaltarak, oksin dengesini koruyarak ve tolerans ile ilgili gen ifadesini düzenleyerek harici olarak NO uygulamasının bitkilerde ağır metal toksisitesini hafifletebileceği açıklanmıştır (Xiong vd., 2010). Cd toksisitesi altında yetiştirilen bitki tür ve genotiplerinin bitki boyu, yaş ve kuru ağırlıkları gibi gelişim parametrelerindeki azalmaların farklı kaynaklardan harici olarak uygulanan NO'nun etkisi ile düzeltilebileceği/hafifletilebileceği araştırmacılar tarafından yapılan çok sayıda çalışma ile gösterilmiştir. Cd stresi altındaki zahter (*Satureja hortensis* L.) bitkisine yapraktan NO uygulamayla azalan bitki boyunda iyileşmeler olduğu açıklanmıştır (Azizi vd., 2021). Wang vd. (2013b) İtalyan çiminde, Xu vd. (2014) yer fıstığında, Per vd. (2017) hardalda, Çıkılı vd. (2018) karakavakta, Ma vd. (2022) karnabaharda Cd toksisitesinin bitkilerde büyümeyi engellediğini ancak NO dönörü olarak SNP uygulamalarının ise Cd toksisite belirtilerini azaltarak bitki büyümesini desteklediği, Laspina vd. (2005) ayçiçeğinde ve Zhao vd. (2013) çeltikte NO uygulamasının bitkilerde Cd stresinden kaynaklanan kuru ağırlık kaybını önemli ölçüde geriletmediğini bildirilmiştir. Cezayir menekşesi bitkisinin yüksek Cd seviyelerine maruz kalmasıyla meydana gelen kuru ve yaş ağırlık kaybının SNP ve melatoninin tekil veya birlikte yapraktan uygulanmasıyla iyileştiği saptanmıştır (Nabaei vd., 2019). Bununla birlikte, Si ve NO'nun tekil veya birlikte etkilerinin buğday fidelerinde Cd toksisitesini hafiflettiği ve sonuçta da bitki büyümesini iyileştirdiği saptanmıştır (Singh vd., 2022).

## 4.2. Cucurbitaceae Familyası Türlerinin Kök Gelişimi

Kadmiyum stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* familyası türlerinin kök yaş ve kuru ağırlıklarına NO kaynağı olarak kullanılan SNP uygulamalarının etkisine ait varyans analiz sonuçları Tablo 2’de, kök yaş ağırlıklarına ait ortalamalar Şekil 5’te ve kök kuru ağırlıklarına ait ortalamalar ise Şekil 6’da sunulmuştur. Tablo 2 ile Şekil 5 ve 6 birlikte incelendiğinde; Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* türlerinde Cd stresinin hafifletilmesine SNP uygulamalarının kök yaş ve kuru ağırlıkları üzerine türlerin, uygulamaların ve tür x uygulama interaksiyonunun etkileri ( $p<0.001$ ) istatistiksel olarak önemli bulunmuştur.

Tablo 2

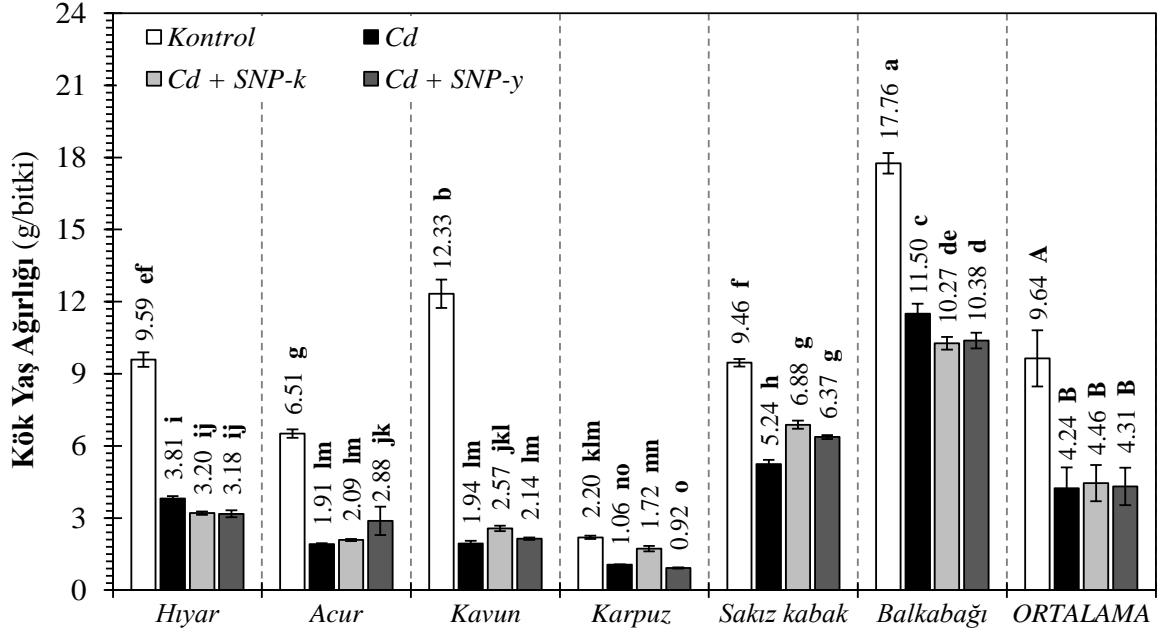
Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* türlerinin kök yaş ve kuru ağırlıklarına kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisine ait varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kök Yaş Ağırlığı		Kök Kuru Ağırlığı	
		Kareler Toplamı	F Değeri	Kareler Toplamı	F Değeri
Genel	71	1384.3	-	4.239	-
Tür (T)	5	869.5	912.7***	3.474	2045.3***
Uygulama (U)	3	380.1	665.0***	0.564	553.1***
T×U İnteraksiyonu	15	125.6	44.0***	0.185	36.2***
Hata	48	9.1	-	0.016	-

Familyadaki türler birlikte değerlendirildiğinde; kontrol uygulamasına (9.64 g bitki<sup>-1</sup>) göre Cd stres koşulları altında (4.24 g bitki<sup>-1</sup>) ortalama kök YA %56.0 seviyesinde önemli bir azalma göstermiştir (Şekil 5). Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması (4.46 g bitki<sup>-1</sup>) ile ortalama kök YA’ında %5.2 düzeyinde önemli olmayan bir artış gözlenirken, Cd+SNP-y uygulaması (4.31 g bitki<sup>-1</sup>) ile kök YA’ında %1.7 oranında önemli olmayan bir artış bulunmuştur (Şekil 5).

Kontrolle göre Cd toksisitesi koşulları ile tüm türlerin kök YA’ında kontrole göre Cd stresi koşulları altında önemli azalmalar tespit edilmiştir. Bu azalma düzeyleri; hıyarda %60.3, acurda %70.7, kavunda %84.1, karpuzda %51.8, sakız kabakta %44.6 ve balkabağında %35.2 seviyesinde belirlenmiştir. Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ile sakız kabakta (%31.3) saptanan artış ve balkabağında (%10.7) saptanan azalma önemli bulunurken, hıyarda (%16.0) belirlenen azalma ile acur (%9.4), kavun (%32.5) ve karpuzda

(%62.3) belirlenen artışlar önemli bulunmamıştır. Bunun yanında, Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-y uygulaması ile acur (%50.8) ve sakız kabak (%21.6) türlerinin kök YA'sında belirlenen artışlar ve balkabağının kök YA'sında belirlenen azalma (%9.7) önemli bulunurken, diğer türlerin kök YA'sında saptanan değişimler önemsiz bulunmuştur (Şekil 5).

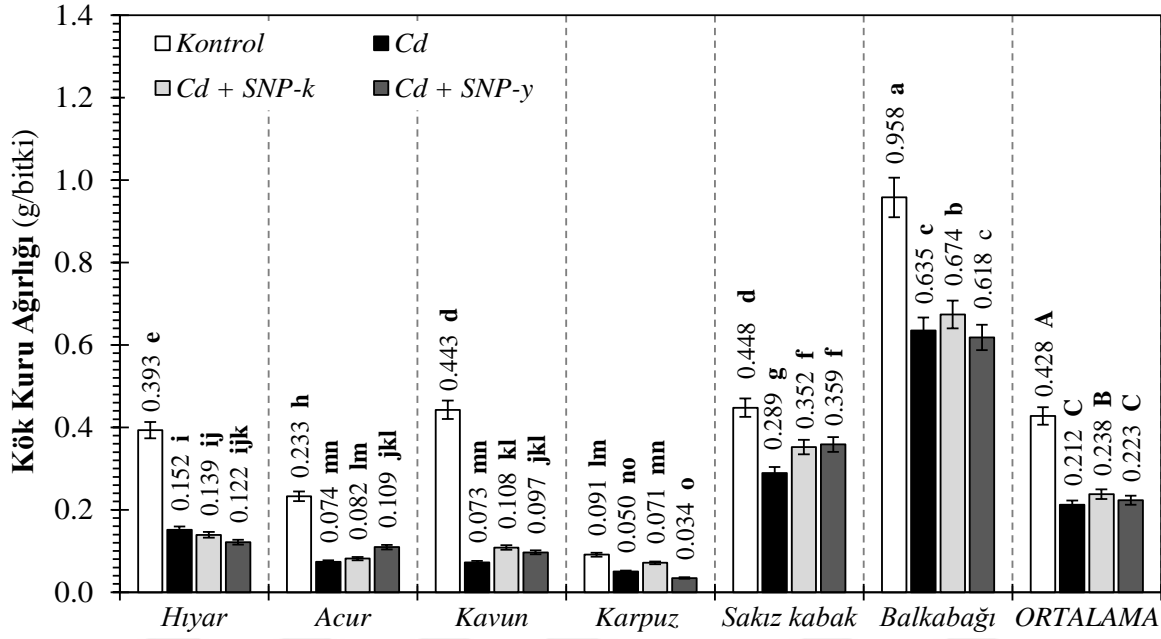


Şekil 5. Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* türlerinin kök yaş ağırlıklarına kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi

Familyadaki türler birlikte değerlendirildiğinde; kontrol uygulamasına (0.428 g bitki<sup>-1</sup>) göre Cd stres koşulları altında (0.212 g bitki<sup>-1</sup>) ortalama kök KA %50.5 seviyesinde önemli bir azalma göstermiştir (Şekil 6). Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması (0.238 g bitki<sup>-1</sup>) ile ortalama kök KA'sında %12.3 düzeyinde önemli bir artış gözlenirken, Cd+SNP-y uygulaması ile (0.223 g bitki<sup>-1</sup>) ortalama kök KA'sında belirlenen artışın (%5.2) önemli olmadığı tespit edilmiştir (Şekil 6).

Kontrole göre Cd toksisitesi koşulları altında türlerin kök KA'sında önemli azalmalar meydana geldiği saptanmıştır. Bu azalma düzeylerinin; hıyar için %61.3, acur için %68.2, kavun için %83.5, karpuz için %45.1, sakız kabak için %35.5 ve balkabağı için %33.7 düzeyinde olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6). Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ile kavun (%47.9), sakız kabak (%21.8) ve balkabağının (%6.1) kök KA'sında saptanan artışlar önemli bulunurken, hıyarda (%8.6) belirlenen azalma ile acur (%10.8) ve karpuzun

(%42.0) kök KA'sında belirlenen artışlar önemli bulunmamıştır. Bununla birlikte, Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-y uygulaması ile acur (%47.3) ve sakız kabağın (%24.2) kök KA'sında belirlenen artışlar önemli bulunurken, diğer türlerin kök KA'sında saptanan değişimler önemli bulunmamıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* türlerinin kök kuru ağırlıklarına kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi

Kadmiyum stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* familyası türlerinin kök uzunluğu ve kök hacmine NO kaynağı olarak kullanılan SNP uygulamalarının etkisine ait varyans analiz sonuçları Tablo 3'te, kök uzunluklarına ait ortalamalar Şekil 7'de ve kök hacimlerine ait ortalamalar ise Şekil 8'de sunulmuştur. Tablo 3 ile Şekil 7 ve 8 birlikte incelendiğinde; Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* türlerinde Cd stresinin hafifletilmesine SNP uygulamalarının kök uzunlukları ve kök hacimleri üzerine türlerin, uygulamaların ve tür x uygulama interaksiyonunun etkileri istatistiksel olarak %0.1 düzeyinde önemli bulunmuştur.

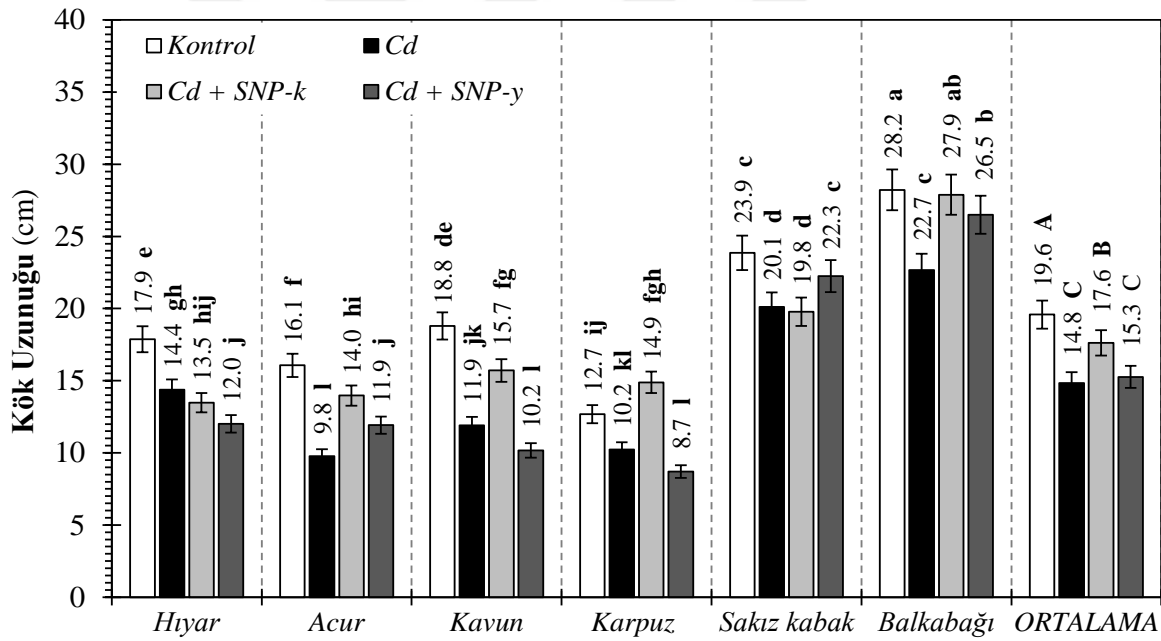
Familyadaki türler birlikte değerlendirildiğinde; kontrol uygulamasına (19.58 cm) göre Cd stresi koşulları altında (14.84 cm) ortalama kök uzunluğu %24.2 seviyesinde önemli bir azalma göstermiştir (Şekil 7). Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması (17.62 cm) ile ortalama kök uzunluğunda %18.7 düzeyinde önemli bir artış gözlenirken, Cd+SNP-

y uygulaması (15.26 cm) ile ortalama kök uzunluğunda saptanan artış (%2.8) önemli bulunmamıştır (Şekil 7).

Tablo 3

Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* türlerinin kök uzunlukları ve kök hacimlerine kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisine ait varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kök Uzunluğu		Kök Hacmi	
		Kareler Toplamı	F Değeri	Kareler Toplamı	F Değeri
Genel	71	2470.5	-	12526.4	-
Tür (T)	5	2005.4	382.4***	5535.3	386.9***
Uygulama (U)	3	263.4	83.7***	4291.5	500.0***
T×U İnteraksiyonu	15	151.4	9.6***	2562.4	59.7***
Hata	48	50.4	-	137.3	-

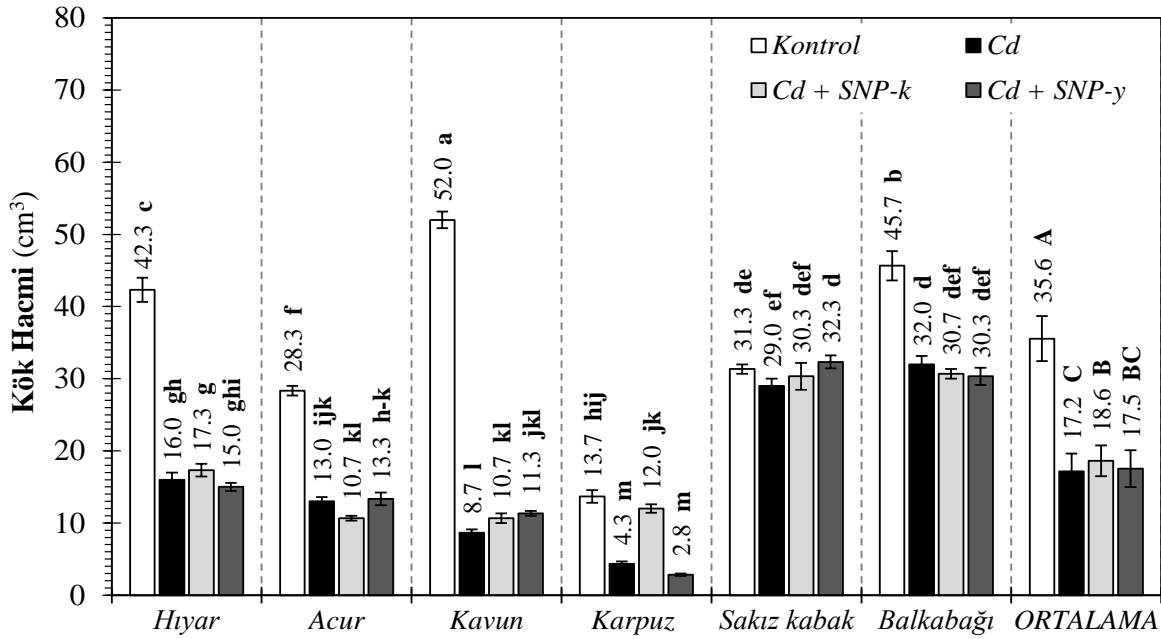


Şekil 7. Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* türlerinin kök uzunluklarına kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi

Kontrole göre Cd toksisitesi koşulları altında tüm türlerin kök uzunluklarında önemli azalmalar belirlenmiş ve bu azalmaların; hıyarda %19.6, acurda %39.3, kavunda %36.7, karpuzda %19.4, sakız kabakta %15.7 ve balkabağında %19.7 seviyesinde olduğu saptanmıştır. Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ile acur (%43.1), kavun (%32.0),

karpuz (%45.7) ve balkabağının (%23.0) kök uzunluklarında saptanan artışlar önemli bulunurken, hıyar (%6.3) ve sakız kabakta (%1.6) belirlenen azalmalar önemli bulunmamıştır. Bununla birlikte, Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-y uygulaması ile acur (%22.1), sakız kabak (%10.6) ve balkabağının (%16.9) kök uzunluklarında belirlenen artışlar ile hıyar (%16.5) ve kavunda (%14.5) tespit edilen azalmalar önemli bulunurken, sadece karpuzun (%14.8) kök uzunluğunda saptanmış olan azalma önemli bulunmamıştır (Şekil 7).

Familyadaki türler birlikte değerlendirildiğinde; kontrol uygulamasına (35.6 cm<sup>3</sup>) göre Cd stresi koşullarında (17.2 cm<sup>3</sup>) ortalama kök hacmi %51.7 seviyesinde önemli bir azalma göstermiştir (Şekil 8). Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması (18.6 cm<sup>3</sup>) ile ortalama kök hacminde %8.1 düzeyinde önemli bir artış belirlenirken, Cd+SNP-y uygulaması (17.5 cm<sup>3</sup>) ile ortalama kök hacminde saptanan artış (%1.7) önemli bulunmamıştır (Şekil 8).



Şekil 8. Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* türlerinin kök hacimlerine kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi

Kontrole göre Cd toksisitesi koşullarında türlerin kök hacimlerinde sakız kabak türünde meydana gelen azalma hariç diğer türlerde kök hacimlerinde önemli azalmalar saptanmıştır (Şekil 8). Bu azalma düzeylerinin; hıyar için %62.2, acur için %54.7 kavun için %83.3, karpuz için %68.6, sakız kabak için %7.3 ve balkabağı için %30.0 düzeyinde olduğu

tespit edilmiştir. Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ile karpuzun (2.79 kat) kök hacminde saptanan artış önemli bulunurken, hıyar (%8.1), kavun (%23.0) ve sakız kabakta (%4.5) belirlenen artışlar ile acur (%17.7) ve balkabağında (%4.1) belirlenen azalmalar önemli bulunmamıştır. Bunların yanında, Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-y uygulaması ile sakız kabak (%11.4) türünde belirlenen artış dışında, diğer türler olan hıyar (-%6.3), acur (+%2.3), kavun (+%29.9), karpuz (-%35.9) ve balkabağının (-%5.3) kök hacimlerinde saptanan değişimler önemli bulunmamıştır (Şekil 8).

Cd birikimi bitkilerde bazı yapısal, morfolojik, biyokimyasal ve fizyolojik değişimlere sebep olarak kök büyümesi ve biyokütle üretiminde düşümlere neden olabilmektedir (Sanità di Toppi ve Gabrielli 1999; Moussa 2004). Cd stresi koşulları, kök büyümesini ve fotosentezi engellemekte, iç ve dış kök yapılarında hasar oluşmakta, kökte hidrolik su iletkenliği azaltmakta, besin maddesi absorpsiyonunda dengesizlik ve klorofil biyosentezinde bozulmalar oluşturmaktadır (Tran ve Popova, 2013). Cd toksisitesi koşullarında farklı familyalara ait bitkilerle yapılan çalışmalarda köklerde meydana gelen agronomik ve morfolojik değişimler bazı araştırmacılar tarafından da açıklanmıştır. Liu vd. (2007) Çin lahanası (*Brassica chinensis*) ve Pekin lahanası (*B. pekinensis*) yapraklı sebzelerinde, Jhanji vd. (2012) kanolada, Balcı (2018) çilekte, Çıkılı vd. (2020) ayçiçeğinde, Emer ve Çıkılı (2021) *Solanaceae* familyası türlerinde (domates, biber, patlıcan, tütün, altınçilek ve patates) ve karnabaharda Ma vd. (2022) bitki gelişimiyle birlikte kök uzamasının da olumsuz yönde etkilediğini açıklamışlardır. Bununla birlikte, kiraz anacında (Alkan-Torun vd., 2009), çeltikte (Zhao vd., 2013), İtalyan çiminde (Wang vd., 2013), aspir (Moradi ve Ehsanzadeh, 2015), Cezayir menekşesinde (Nabaei ve Amooaghaie, 2020) ve karnabaharda (Ma vd., 2022) Cd maruziyetinin sonuçları olarak kök gelişimi ve biyokütlesinde gerilemeler rapor edilmiştir. Çeşitli araştırmacılar tarafından açıklanan sonuçlar ile çalışmamızdan elde ettiğimiz sonuçlar örtüşmektedir.

Sebzelerde Cd alımını ve toksisitesini azaltmak amacıyla eksojen (harici) olarak bitki büyüme düzenleyicilerinin uygulaması, mineral beslemenin uygun hale getirilmesi ile organik ve inorganik düzenleyicilerin uygulanmasının faydalı olabileceğini bildirilmiştir (Rizwan vd., 2017). Bitki büyümesi ve gelişmesi sırasında yan kök ve kılcal köklerin oluşumu ve düzenlenmesi için NO ile oksin etkileşime girmektedir (Correa-Aragunde vd., 2004). Çok sayıda gelişmeye yönelik süreci düzenlemekteki rolüyle bilinen ve gaz formunda bir sinyal molekülü olan NO gibi bitki büyüme düzenleyiciler ile farklı bitkilerde Cd'nin



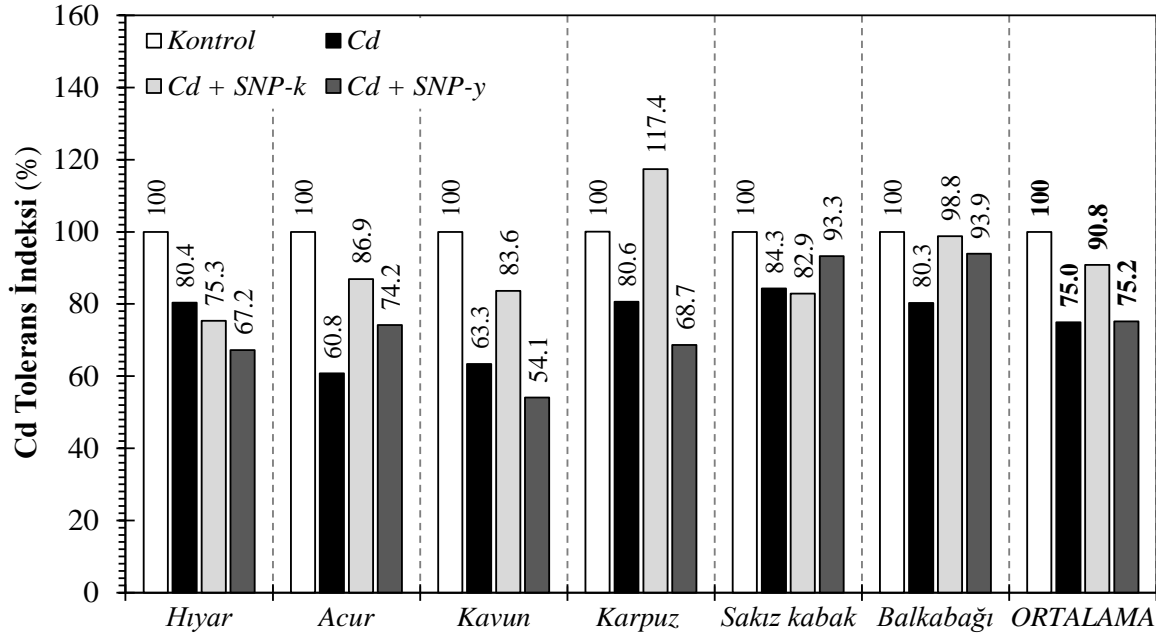
olumsuz etkilerini hafifletmeye ya da baskılamaya dair çok sayıda çalışma literatürde yer bulmaktadır (Asgher vd., 2015; Ekinci vd., 2018). Cd toksisitesinde NO'nun harici olarak uygulamasıyla sarı acı bakla (*Lupinus luteus* L.) fidelerinin köklerinde oluşan hasarın hafiflediği bildirilmiştir (Arasimowicz- Jelonek vd., 2012). Kanolanın (*Brassica napus* L.) büyüme ortamındaki farklı Cd seviyeleriyle kontrole kıyasla kök uzunluğunun %51 düzeyinde azaldığı fakat harici olarak uygulanan NO ile bu parametrenin kontrol koşullarında olduğu gibi bir özellik gösterdiği açıklanmıştır (Jhanji vd. 2012). Çeltik fidelerinde NO vericisi olarak uygulanan SNP'nin Cd toksisitenin neden olduğu kök kuru ağırlık kaybını önemli ölçüde azalttığı rapor edilmiştir (Zhao vd. 2013). Cezayir menekşesinin (*Catharanthus roseus* L.) yüksek Cd düzeylerinde kök yaş ve kuru ağırlığında önemli azalmalar meydana geldiği, bununla birlikte yapraktan SNP uygulanmasıyla bu değerlerde artışlar meydana geldiği rapor edilmiştir (Nabaei ve Amooaghaie, 2020). Dört karnabahar genotipinde artan seviyelerde Cd uygulamasıyla kök uzunluğu, yaş ve kuru ağırlığında önemli azalmalar meydana geldiği fakat NO uygulamasının bu parametrelerin gelişimini düzenlediği bildirilmiştir (Ma vd., 2022).

#### **4.3. Cucurbitaceae Familyası Türlerinin Cd Tolerans İndeksi**

Familyadaki türler birlikte değerlendirildiğinde; kontrol uygulamasına (%100) göre Cd stresi koşullarında (%75.0) ortalama Cd tolerans indeksi %25.0 düzeyinde bir azalma göstermiştir (Şekil 9). Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması (%90.8) ile ortalama Cd tolerans indeksi %21.1 düzeyinde artarken, Cd+SNP-y uygulaması (%75.2) ile ortalama Cd tolerans indeksinde %0.3 oranında bir artış saptanmıştır (Şekil 9).

Kontrole göre Cd stresi koşulları altında türlerin Cd tolerans indekslerinde azalmalar meydana gelmiştir (Şekil 9). Bu azalmalar; hıyar için %19.6, acur için %39.2, kavun için %36.7, karpuz için %19.4, sakız kabak için %15.7 ve balkabağı için %19.7 seviyelerinde gerçekleşmiştir. Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* familyası türlerinin Cd tolerans indekslerine göre sıralaması; *hıyar* < *balkabağı* < *acur* < *sakız kabak* < *karpuz* < *kavun* olarak belirlenmiştir. Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ile hıyar (%6.3) ve sakız kabağın (%1.7) Cd tolerans indekslerinde azalmalar saptanırken, acur (%42.9), kavun (%32.1), karpuz (%45.7) ve balkabağında (%23.0) ise artışlar gözlenmiştir. Bunun yanında, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile hıyar (%16.4), kavun (%14.5) ve karpuzun (%14.8) Cd tolerans indekslerinde azalmalar tespit edilirken, acur (%22.0), sakız kabak

(%10.7) ve balkabağında (%16.9) ise artışlar saptanmıştır (Şekil 9). Bir başka deyişle, Cd+SNP-k uygulaması acur, kavun, karpuz ve balkabağı türlerinin ve Cd+SNP-y uygulaması ise acur, sakız kabak ve balkabağı türlerinin Cd tolerans indekslerini artırmıştır.



Şekil 9. Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* familyası türlerinin Cd tolerans indekslerine kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi

Bitkiler, Cd toleransı için hücre duvarı bağlanma, fitoşelatinler ile şelatlama, vakuolde Cd'nin bölünmesi ve yaprak trikomlarında (tüyümsü çıkıntı/canlı türler) zenginleştirmeyi içeren bazı fonksiyonlar geliştirmiştir ve ayrıca kükürt metabolizması, antioksidan tepki ve bitkide plazma ve vakuol membranı boyunca Cd<sup>2+</sup> taşınması süreçlerinin de bitkideki Cd toleransı ile yakından ilişkili olduğu açıklanmıştır (Zhang ve Shu, 2006). Yetiştirme ortamında bulunan aynı Cd seviyelerinde dört karnabahar (*Brassica oleracea* L.) genotipinde Cd stresine en duyarlı genotipler olarak Ceilo Blanco ve FD-4 belirlenirken, FD-2 ve FD-3 genotiplerinin ise Cd stresine daha fazla tolerans gösterdiği saptanmıştır (Ma vd., 2022). Tütün bitkisi tarafından Cd bir dereceye kadar tolere edilebildiği rapor edilmiştir (Zhang vd., 2014). Çin lahanası (*Brassica chinensis* L.) türüne ait iki farklı çeşit ile yapılan çalışmada, Shanghaiqing çeşidi Cd-duyarlı ve Hangyoudong çeşidi Cd-tolerant olduğu saptanmıştır (Song vd., 2009). Bunun yanında, Shi vd. (2010) iki fıstık çeşidinden Luzi 101 çeşidinin Cd-tolerant, Luhua-11 çeşidinin Cd-duyarlı olduğunu, Naem vd. (2014) ise Seher-2006 buğday çeşidinin Cd-duyarlı ve Iqbal-2000 buğday çeşidinin ise Cd-tolerant oldu-

ğunu bildirmişlerdir. Cd toksisitesi koşullarında *Solanaceae* (patlıcangiller) familyası türlerinde toleranslılık sıralamasının domates> patates> altınçilek> tütün> patlıcan> biber olarak saptandığı rapor edilmiştir (Emer ve Çıkılı, 2021).

Farklı bitki türleri ve dokularında ağır metallere tolerans üzerine harici NO uygulamasının etkileri farklı araştırmacılar tarafından açıklanmıştır. Harici olarak uygulanan NO'nin oksidatif stresi, ağır metal birikimini ve IAA oksidaz enzim aktivitesini azaltarak, oksin dengeğini koruyarak ve tolerans ile ilgili gen ifadesini düzenleyerek bitkilerde ağır metal toksisitesini hafifletebileceği açıklanmıştır (Xiong vd., 2010). Bitkilere harici olarak uygulanan NO, tolerans ile ilgili gen ifadesini (expression) düzenleyerek bitkilerde ağır metal toksisitesinin hafifletilmesine katkıda bulunur (Xiong vd., 2010). NO uygulamalarının bitkilerde ağır metaller, etilen ve herbisitlerin yıkıcı etkisini azalttığı ve CAT gibi enzimlerin aktivitelerinin artışına yol açarak bitkilerde Cd ve arsenik (As) gibi çeşitli ağır metallere toleransı artırdığı rapor edilmiştir (Ekinci vd., 2018). NO'nun oksidatif hasarı azaltarak, oksin dengeğini koruyarak ve iyon emilimini artırarak bitkilerde Cd toleransını iyileştirdiği, ayrıca prolin ve toplam GSH içeriğinin üretimindeki artışla Fiçi yoncası (şufen, *Medicago truncatula*) köklerinde Cd toleransını da geliştirdiği rapor edilmiştir (Xu ve ark. 2010). Cd toksisitesi koşullarında dışarıdan uygulanan NO'nun ayçiçeği bitkisinde yararlı olabileceği ve bitkilerde ağır metal stresi için tolerans kazandırabileceği rapor edilmiştir (Laspina vd., 2005). NO kaynaklı Cd toleransı, çeltik (*Oryza sativa*) köklerinin hücre duvarlarındaki Cd dağılımına bağlıdır (Ye vd., 2013). Harici olarak uygulanan NO, fazla Cd'nin hücrel dağılımını ve hücre duvarındaki birikimi düzenleyerek Cd toksisitesine karşı koyar (Xiong vd., 2009). Çeltikte Cd toksisitesine karşı dışarıdan NO uygulaması kökler tarafından alınan Cd'ü artırırken bitki üst aksamındaki birikimi azaltarak bitki direncinde rol oynamış ve Cd toleransını arttırmıştır (Xiong vd., 2009; Zhao vd., 2013). Çeltik yapraklarında (Hsu ve Kao, 2004), ayçiçeği yapraklarında (Laspina vd., 2005) ve buğday köklerinde (Singh vd., 2008) Cd toksisitesine karşı NO'nin koruyucu bir etki sağladığı gösterilmiştir.

#### **4.4. *Cucurbitaceae* Familyası Türlerinin Cd Konsantrasyonları**

Kadmiyum stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* familyası türlerinin gövde ve kök Cd konsantrasyonlarına NO kaynağı olarak kullanılan SNP uygulamalarının etkisine ait varyans analiz sonuçları Tablo 4'te, gövde Cd konsantrasyonlarına ait ortalamalar Şekil 10'da ve kök Cd konsantrasyonlarına ait ortalamalar Şekil 11'de sunulmuştur. Tablo 4 ile Şekil 10

ve 11 birlikte incelendiğinde; Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* türlerinde Cd stresinin hafifletilmesine SNP uygulamalarının gövde Cd konsantrasyonu ve kök Cd konsantrasyonu üzerine türlerin, uygulamaların ve tür x uygulama interaksiyonunun etkileri ( $p<0.001$ ) istatistiksel olarak düzeyinde önemli bulunmuştur.

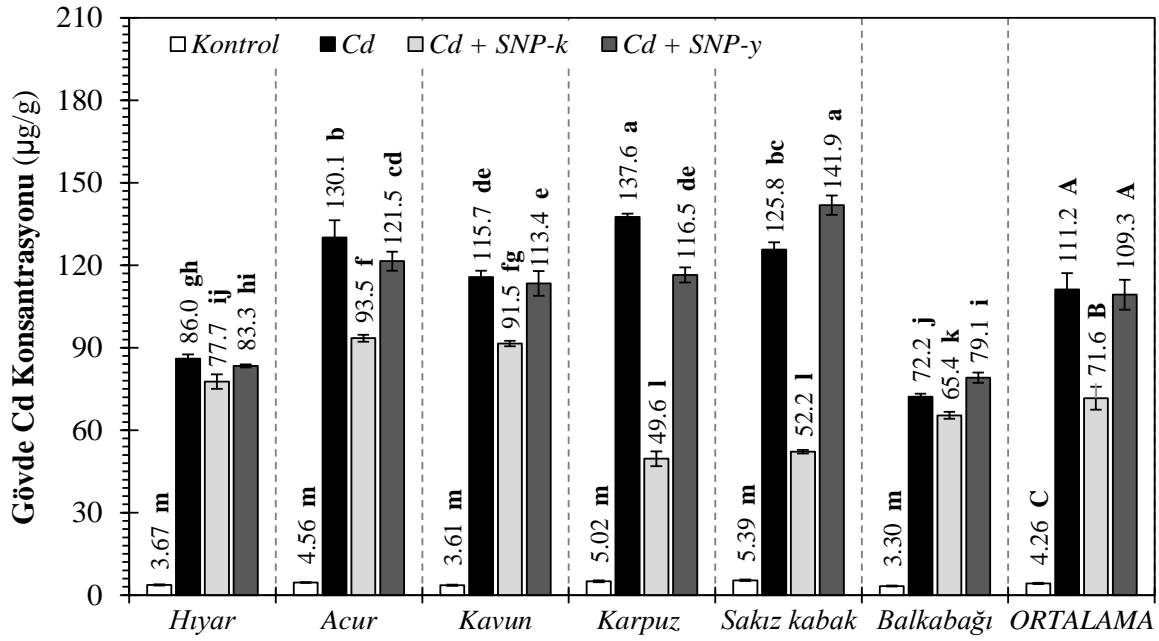
Tablo 4

Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* familyası türlerinin gövde ve kök Cd konsantrasyonlarına kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisine ait varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Gövde Cd Konsantrasyonu		Kök Cd Konsantrasyonu	
		Kareler Toplamı	F Değeri	Kareler Toplamı	F Değeri
Genel	71	160167	-	75424931	-
Tür (T)	5	9383	113.6***	13704696	433.5***
Uygulama (U)	3	135004	2724.5***	53508803	2821.2***
T×U İnteraksiyonu	15	14988	60.5***	7907966	83.4***
Hata	48	793	-	303467	-

Familyadaki türler birlikte değerlendirildiğinde; kontrol uygulamasına ( $4.3 \mu\text{g g}^{-1}$ ) göre Cd stresi koşullarında ( $111.2 \mu\text{g g}^{-1}$ ) ortalama gövde Cd konsantrasyonu 25.9 kat düzeyinde önemli bir artış göstermiştir (Şekil 10). Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ( $71.6 \mu\text{g g}^{-1}$ ) ile ortalama gövde Cd konsantrasyonu %35.6 düzeyinde önemli bir azalma gösterirken, Cd+SNP-y uygulaması ile ( $109.3 \mu\text{g g}^{-1}$ ) ortalama gövde Cd konsantrasyonunda % 1.7 düzeyinde belirlenen azalma ise önemli bulunmamıştır (Şekil 10).

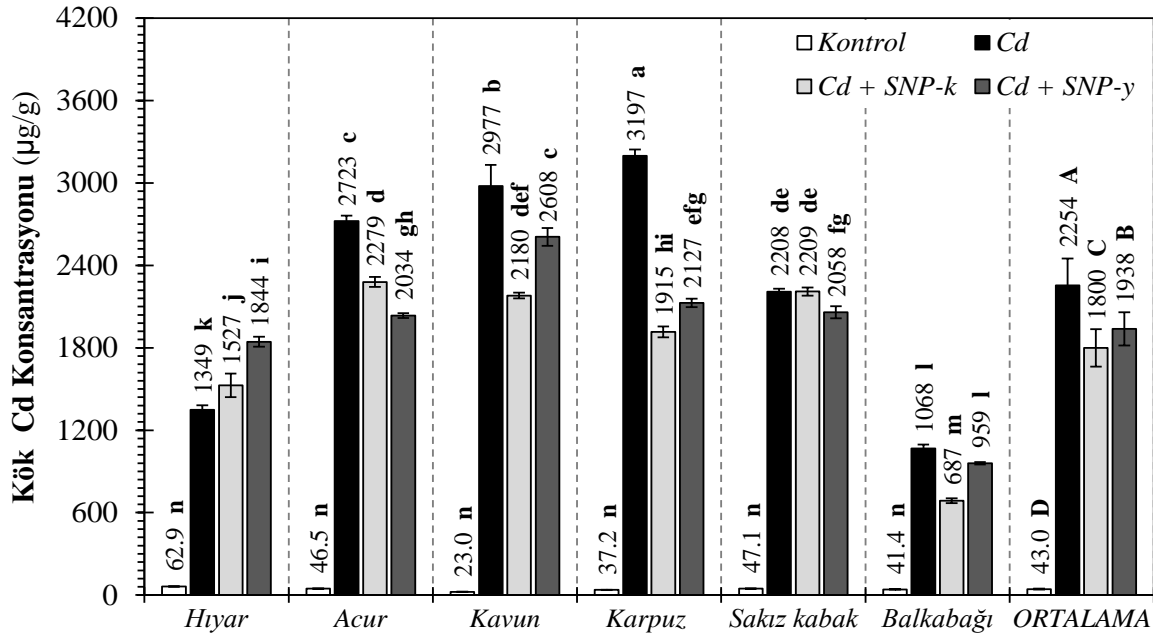
Kontrole göre Cd stresi koşulları altında türlerin gövde Cd konsantrasyonlarında önemli artışlar meydana gelmiştir (Şekil 10). Bu önemli artışlar; hıyar için 23.2 kat, acur için 28.3 kat, kavun için 32.1 kat, karpuz için 27.4 kat, sakız kabak 23.3 kat ve balkabağı için 21.9 kat seviyesinde belirlenmiştir. Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ile hıyar (%9.7), acur (%28.1), kavun (%20.9), karpuz (%63.8), sakız kabak (%58.5) ve balkabağının (%9.4) gövde Cd konsantrasyonlarında saptanan azalmalar önemli bulunmuştur. Bunun yanında, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile gövde Cd konsantrasyonlarında sakız kabak (%12.8) ve balkabağı (%9.5) için tespit edilen artışlar ile acur (%6.6) ve karpuz (%14.9) için saptanan azalmalar önemli bulunurken, hıyar (%3.1) ve kavunun (%2.0) gövde Cd konsantrasyonlarında meydana gelen azalmalar önemli bulunmamıştır (Şekil 10).



Şekil 10. Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* familyası türlerinin gövde Cd konsantrasyonlarına kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi

Familyadaki türler birlikte değerlendirildiğinde; kontrol uygulamasına ( $43 \mu\text{g g}^{-1}$ ) göre Cd stresi koşullarında ( $2254 \mu\text{g g}^{-1}$ ) ortalama kök Cd konsantrasyonu 52.4 kat düzeyinde önemli bir artış göstermiştir (Şekil 11). Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ( $1800 \mu\text{g g}^{-1}$ ) ile ortalama kök Cd konsantrasyonda %20.1 düzeyinde ve Cd+SNP-y uygulaması ( $1938 \mu\text{g g}^{-1}$ ) ile %14.0 düzeyinde önemli azalmalar belirlenmiştir (Şekil 11).

Kontrole göre Cd stresi koşulları altında türlerin kök Cd konsantrasyonlarında önemli artışlar belirlenmiştir (Şekil 11). Kök Cd konsantrasyonlarında belirlenen bu önemli artışların; hıyar için 21.4 kat, acur için 57.9 kat, kavun için 129.4 kat, karpuz için 86.4 kat, sakız kabak için 47.0 kat ve balkabağı için 26.0 kat düzeyinde olduğu tespit edilmiştir. Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ile kök Cd konsantrasyonlarında hıyar için (%13.2) saptanan artış ile acur (%16.3), kavun (%26.8), karpuz (%40.1) ve balkabağı (%35.7) için saptanan azalmalar önemli bulunurken, sakız kabağın kök Cd konsantrasyonunda meydana gelen değişim önemli bulunmamıştır. Bunun yanında, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile kök Cd konsantrasyonlarında hıyar için (%36.7) saptanan artış ile acur (%25.3), kavun (%12.4), karpuz (%33.5) ve sakız kabak (%6.8) için tespit edilen azalmalar önemli bulunurken, balkabağı kök Cd konsantrasyonunda belirlenen azalma (%10.2) ise önemli bulunmamıştır (Şekil 11).



Şekil 11. Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* familyası türlerinin kök Cd konsantrasyonlarına kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi

Kontrole göre Cd stresi koşulları altında türlerin kök Cd konsantrasyonlarında önemli artışlar belirlenmiştir (Şekil 11). Kök Cd konsantrasyonlarında belirlenen bu önemli artışların; hıyar için 21.4 kat, acur için 57.9 kat, kavun için 129.4 kat, karpuz için 86.4 kat, sakız kabak için 47.0 kat ve balkabağı için 26.0 kat düzeyinde olduğu tespit edilmiştir. Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ile kök Cd konsantrasyonlarında hıyar için (%13.2) saptanan artış ile acur (%16.3), kavun (%26.8), karpuz (%40.1) ve balkabağı (%35.7) için saptanan azalmalar önemli bulunurken, sakız kabağın kök Cd konsantrasyonunda meydana gelen değişim önemli bulunmamıştır. Bunun yanında, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile kök Cd konsantrasyonlarında hıyar için (%36.7) saptanan artış ile acur (%25.3), kavun (%12.4), karpuz (%33.5) ve sakız kabak (%6.8) için tespit edilen azalmalar önemli bulunurken, balkabağı kök Cd konsantrasyonunda belirlenen azalma (%10.2) ise önemli bulunmamıştır (Şekil 11).

Ağır metaller bitkide yüksek konsantrasyonlarda fotosentez ürünlerinin taşınmasını engelleyerek sakkaroz, nişasta ve şekerlerin yapraklarda birikimine neden olmaktadır (Samarakoon ve Rauser, 1979). Ortamda bulunan Cd bitkilerde birikime yol açarak bitki hücrelerini tahrip etmekte, fotosentezi engellemekte ve bu durumda yaprakların bozulmasına ve büyümenin engellenmesine neden olmaktadır (Benavides vd., 2005; Gichner vd., 2006). Cd

stresi (1  $\mu\text{M}$ ) altında yetiştirilen buğday köklerindeki Cd konsantrasyonunun sürgünlerden 9 kat daha yüksek olduğu, buna rağmen kök ve sürgünlerdeki Cd konsantrasyonunun bitki gelişimini etkilemediği rapor edilmiştir (Mahmood vd., 2009). Kadmiyum toksisitesi altındaki bitkilerle yapılan çalışmalarda araştırma bulgularımıza benzer sonuçlar bazı araştırmacılarca da açıklanmıştır. 10  $\mu\text{M}$ 'den yüksek düzeylerde uygulanan Cd ile Çin lahanası (*Brassica chinensis*) ve Pekin lahanası (*B. pekinensis*) bitkilerinin her ikisinde de köklerinde sürgünlerden daha fazla Cd biriktiği ve Pekin lahanasında Cd konsantrasyonlarının sürgün/kök oranının her zaman Çin lahanasından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Liu vd., 2007). Maxma-14 kiraz anaçlarına 10  $\mu\text{M}$ 'dan fazla dozda uygulanan Cd ile bitkide oluşan Cd konsantrasyon birikiminin kök>yeşil aksam şeklinde olduğu ve Cd konsantrasyonunun ortalama %94-96'sının kökte birikirken ancak %4-6'sı kadarının yeşil aksama geçtiği saptanmıştır (Alkan-Torun vd., 2009). Çikili vd. (2020) ayçiçeğinde, Emer ve Çıkılı (2021) *Solanaceae* (patlıcangiller) familyası türlerinde, Çıkılı vd. (2019) karakavakta Cd stresinin toksik etkisinin gövde ve kök Cd konsantrasyonlarını arttırdığını saptamışlardır. Bununla beraber, çilek (Tredder ve Cieslinski, 2005), domates, biber, patlıcan ve altınçilek (Çıkılı vd., 2016) ve makarnalık buğday (Rizwan vd., 2015) bitkilerinde artan Cd seviyeleriyle bitkilerin Cd içeriklerinin de arttığı açıklanmıştır. Aspir (*Carthamus tinctorius* L.) genotiplerinde Cd uygulaması ( $4.5 \text{ mg L}^{-1} \text{ CdCl}_2$ ) ile sürgün ve köklerdeki Cd konsantrasyonunun sırasıyla 52 ve 157 kat arttığı bildirilmiştir (Moradi ve Ehsanzadeh, 2015).

Bitkilerin Cd stresine tepkisini anlayarak stratejiler geliştirmenin sebzelerce Cd alınımını azaltmaya yardımcı olabileceği ve bu amaçla eksojen (harici) olarak organik ve inorganik düzenleyicilerin uygulanmasının faydalı olabileceği bildirilmiştir (Rizwan vd., 2017). Cd maruziyetinin ak üçgül (*Trifolium repens* L.) bitkisinde Cd birikimini artırıp NO üretimini azalttığı rapor edilmiştir (Lui vd., 2015). Harici olarak uygulanan NO bitkilerde Cd birikimini azaltarak, kök hücre duvarı bileşimini düzenleyerek ağır metal birikimini azaltmaktadır (Xiong vd., 2010). Xiong vd. (2009) tarafından NO'nin kök hücre duvarlarında Cd birikimini artırarak ve yapraklarda çözünür fraksiyonda Cd birikimini azaltarak çeltiğin Cd toleransını arttırdığı açıklanmıştır. Aynı araştırmacılar, NO'nin kök duvarı bileşenlerini etkileyerek kök hücre duvarında Cd birikimine yol açabileceğini ve bitkinin toprak üstü aksamında Cd konsantrasyonunun azalmasına neden olabileceğini bildirmişlerdir (Xiong vd., 2009). NO tarafından Cd toksisitesinin hafifletilmesi Cd konsantrasyonlarına, uygulama sü-

resine ve bitkinin gelişim aşamasına bağlıdır (Groppa vd., 2008). Düşük seviyedeki Cd stresinde Cd'un çoğunlukla yer fıstığı bitkisinin kök hücre duvarlarında hapsediği ancak yüksek seviyedeki Cd stresi altında çözünür fraksiyonda biriktiği, Cd uygulama seviyesinden bağımsız olarak büyük bir kısmının yaprak hücre duvarlarında biriktiği, SNP uygulaması ile gövde ve yapraklarda Cd birikiminin önemli ölçüde azaldığı ve ayrıca çözünür fraksiyonlarda ve hücre organellerindeki Cd birikiminin de azaldığı bildirilmiştir (Dong vd., 2016). Cezayir menekşesi (*Catharanthus roseus* L.) bitkisinde yüksek Cd seviyesinde (200 mg/kg) yapraktan uygulanan 100 µM SNP'nin köklerde ve sürgünlerde Cd birikimini arttırdığı bildirilmiştir (Nabaei ve Amooaghaie, 2020). Cd toksisitesi altındaki marul (*Lactuca sativa* L.) bitkinin gelişiminin gerilediği hem yapraklarda hem de köklerde Cd birikimini önemli ölçüde artırdığı harici olarak uygulanan NO'nin ise sürgünlere taşınan Cd'ü etkili bir şekilde engellediği belirtilmiştir (Xu vd., 2014). Çeltik (*Oryza sativa* L.) fidelerinde Cd kaynaklı strese, NO uygulamalarının kökler tarafından Cd alımını artırarak ve sürgünler tarafından Cd birikimini azaltarak çeltiğin Cd toleransını arttırdığı saptanmıştır (Zhao vd., 2013). İtalyan çimi (*Lolium perenne* L.) bitkisinde Cd toksisitesinin hem sürgün hem de köklerde Cd birikimini artırdığını SNP uygulamalarının ise köklerden sürgünlere Cd taşınmasını azalttığını bildirmiştir (Wang vd., 2013b). Cd stresine maruz kalan dar yapraklı saz otu (*Typha angustifolia*) bitkisine harici uygulanan NO, antioksidan metabolizmayı düzenleyerek ve kök hücre duvarında Cd birikimini artırarak bitkiyi Cd toksisitesine karşı korumaktadır (Zhao vd., 2016). Cd stresi altındaki zahter (*Satureja hortensis* L.) bitkisine uygulanan NO'nin sürgün ve köklerde Cd birikimini azalttığı belirtilmiştir (Azizi vd., 2021).

#### **4.5. Cucurbitaceae Familyası Türlerinde Cd Translokasyon ve Akümülyasyonu**

Kadmiyum stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* familyası türlerinin Cd translokasyon faktörü (TF-Cd), köklerle net Cd akümülyasyonu (NA-Cd) ve toplam Cd akümülyasyon oranına (TAR-Cd) NO kaynağı olarak kullanılan SNP uygulamalarının etkisine ait varyans analiz sonuçları Tablo 5'te ve Cd translokasyon faktörüne ait ortalamalar Şekil 12'de, köklerle net Cd akümülyasyonuna ait ortalamalar Şekil 13'te ve toplam Cd akümülyasyon oranına ait ortalamalar ise Şekil 14'te sunulmuştur. Tablo 5 ile Şekil 12, 13 ve 14 birlikte incelendiğinde; Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* türlerinde Cd stresinin hafifletilmesine SNP uygulamalarının TF-Cd, NA-Cd ve TAR-Cd üzerine türlerin, uygulamaların ve tür x uygulama interaksiyonunun etkileri istatistiksel olarak %0.1 düzeyinde önemli bulunmuştur.



Tablo 5

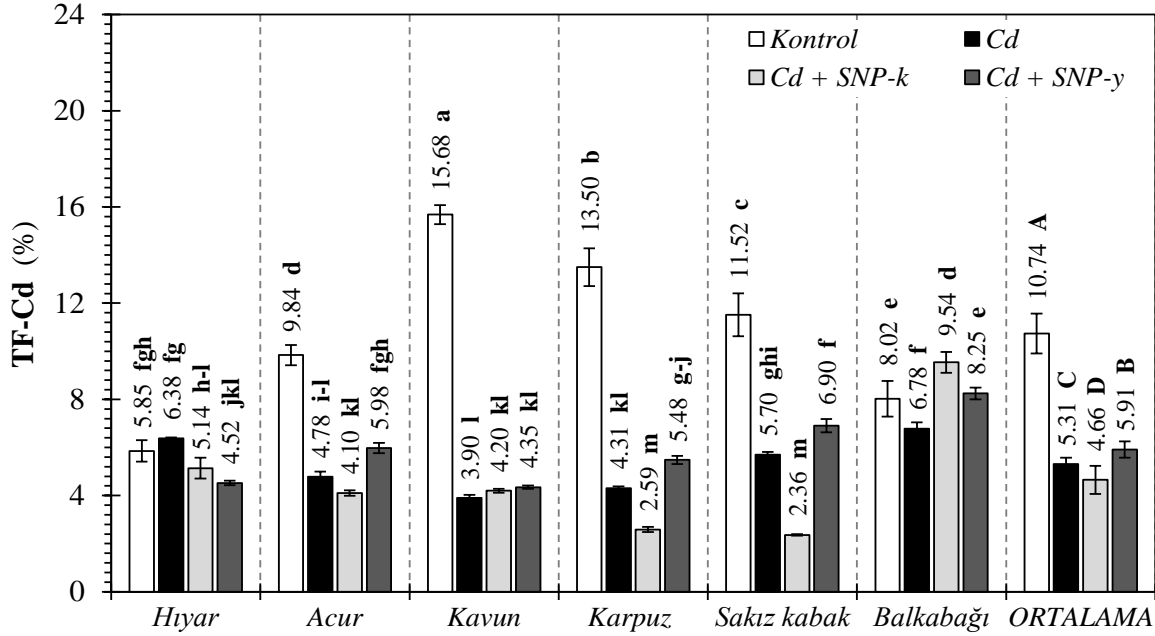
Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* familyası türlerinin Cd translokasyon faktörü, köklerle net Cd akümülyasyonu ve toplam Cd akümülyasyon oranına kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisine ait varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	TF-Cd		NA-Cd		TAR-Cd	
		Kareler Toplamı	F Değeri	Kareler Toplamı	F Değeri	Kareler Toplamı	F Değeri
Genel	71	0.07840	-	315855296	-	1986358	-
Tür (T)	5	0.00483	23.5***	55437311	110.8***	1353516	530.3***
Uygulama (U)	3	0.04145	336.1***	218331318	727.0***	215758	140.9***
T×U İnteraksiyonu	15	0.03014	48.9***	37281338	24.8***	392583	51.3***
Hata	48	0.00197	-	4805328	-	24501	-

Familyadaki türler birlikte değerlendirildiğinde; kontrol uygulamasına (%10.74) göre Cd stres koşulları altında (%5.31) ortalama Cd translokasyonunda %50.6 seviyesinde önemli bir azalma göstermiştir (Şekil 12). Cd stres koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması (%4.66) ile ortalama Cd translokasyonunda %12.2 düzeyinde önemli bir azalma görülürken, Cd+SNP-y uygulaması (%5.91) ile ortalama Cd translokasyonunda %11.3 oranında önemli bir artış tespit edilmiştir (Şekil 12).

Kontrolde göre Cd toksisitesi koşulları altında Cd translokasyonunda hıyar için istatistiksel olarak önemli bulunmayan bir artış (%9.1) belirlenirken, diğer tüm türlerde önemli azalmalar saptanmıştır. Cd translokasyonunda meydana gelen bu azalmaların; acur için %51.4, kavun için %75.1, karpuz için %68.1, sakız kabak için %50.5 ve balkabağı için %15.5 seviyesinde olduğu tespit edilmiştir. Kontrol koşullarında *Cucurbitaceae* familyası türlerinin Cd translokasyonuna göre *hıyar* < *balkabağı* < *acur* < *sakız kabak* < *karpuz* < *kavun* olarak sıralandığı tespit edilirken. Bununla birlikte, Cd stresi koşulları altında Cd translokasyonuna göre bir sıralama yapıldığında; *Cucurbitaceae* familyası türlerinin *kavun* < *karpuz* < *acur* < *sakız kabak* < *hıyar* < *balkabağı* şeklinde bir sıralama gösterdikleri belirlenmiştir. Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ile balkabağının Cd translokasyonunda saptanan artış (%40.7) ile hıyar (%19.4), karpuz (%39.9) ve sakız kabağın (%58.6) Cd translokasyonunda saptanan azalmalar önemli bulunurken, Cd translokasyonunda kavun için belirlenen artış (%7.7) ile acur için belirlenen azalma (%14.2) önemli bulunmamıştır. Bunların yanında, Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-y uygulaması ile hıyarın Cd translokasyonunda görülen azalma (%29.2) ile acur (%25.1), karpuz (%27.1), sakız kabak (%21.1)

ve balkabağının (%21.7) Cd translokasyonlarında meydana gelen artışlar önemli bulunurken, kavunun Cd translokasyonunda saptanan artış (%11.5) önemli bulunmamıştır (Şekil 12).

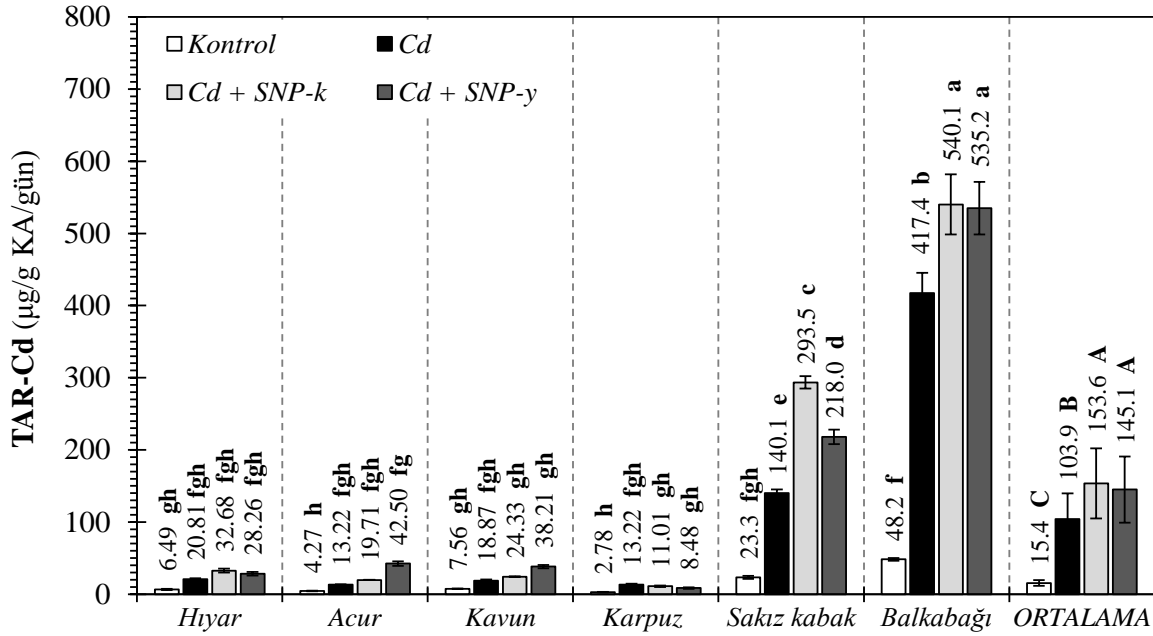


Şekil 12. Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* familyası türlerinin kadmiyumun translokasyon faktörüne (TF-Cd) kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi

Familyadaki türler birlikte değerlendirildiğinde; kontrol uygulamasına ( $0.14 \text{ mg g}^{-1}$ ) göre Cd stresi koşullarında ( $4.31 \text{ mg g}^{-1}$ ) ortalama köklerle net Cd akümülyasyonunda 30.8 kat düzeyinde önemli bir artış tespit edilmiştir (Şekil 13). Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ( $3.29 \text{ mg g}^{-1}$ ) ile ortalama köklerle net Cd akümülyasyonunda %23.7 düzeyinde önemli bir azalma saptanırken, Cd+SNP-y uygulaması ( $4.48 \text{ mg g}^{-1}$ ) ile ortalama köklerle net Cd akümülyasyonunda belirlenen artış (%3.9) önemli bulunmamıştır (Şekil 13).

Kontrole göre Cd stresi koşulları ile *Cucurbitaceae* familyası türlerinin köklerle net Cd akümülyasyonunda önemli artışlar tespit edilmiş ve bu artışların; hıyarda 21.8 kat, acurda 37.5 kat, kavunda 69.5 kat, karpuzda 26.4 kat, sakız kabakta 23.2 kat ve balkabağında 21.9 kat seviyesinde olduğu görülmüştür. Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ile hıyarın köklerle net Cd akümülyasyonunda saptanan artış (%25.0) ile kavun (%31.1), karpuz (%54.9) ve sakız kabağın (%13.4) köklerle net Cd akümülyasyonunda tespit edilen azalmalar önemli bulunurken, acur (%9.8) ve balkabağının (%9.1) köklerle net Cd akümülyasyonunda

görülen azalmalar önemli bulunmamıştır. Bununla birlikte, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile hıyarın köklerle net Cd akümülyasyonunda tespit edilen artış (%42.1) önemli bulunurken, diğer türlerin köklerle net Cd akümülyasyonunda saptanan değişimler önemsiz olmuştur (Şekil 13).

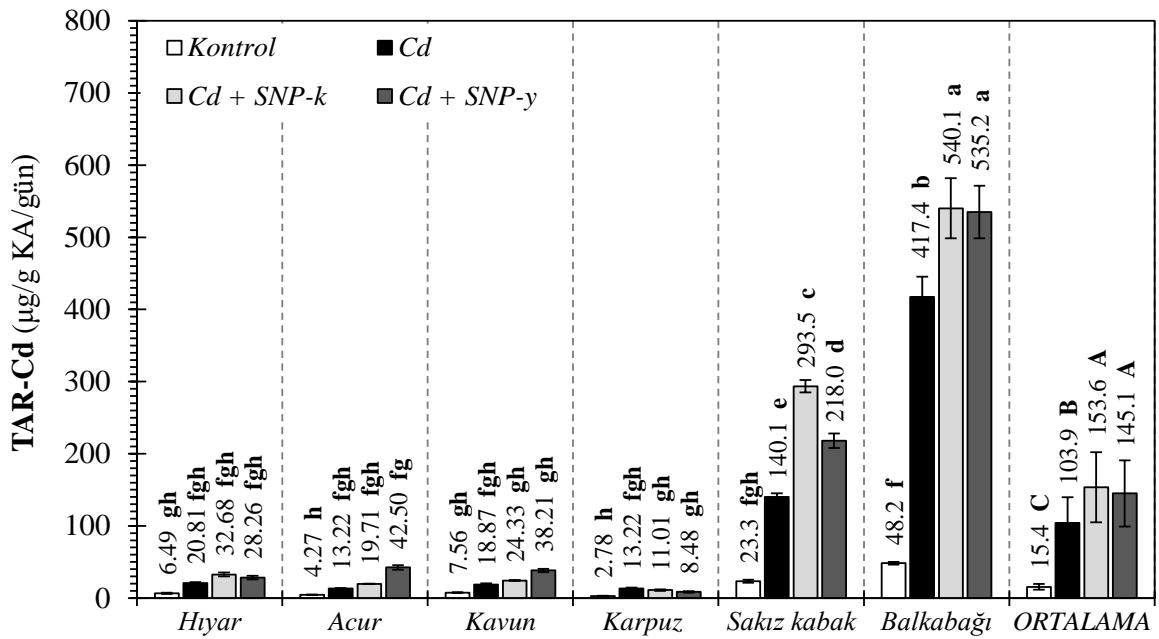


Şekil 13. Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* familyası türlerinin köklerle net Cd akümülyasyonuna (NA-Cd) kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi

Familyadaki türler birlikte değerlendirildiğinde; kontrol uygulamasına ( $15.4 \mu\text{g g}^{-1}$  KA  $\text{gün}^{-1}$ ) göre Cd stresi koşullarında ( $103.9 \mu\text{g g}^{-1}$  KA  $\text{gün}^{-1}$ ) ortalama TAR-Cd için 6.7 kat düzeyinde önemli bir artış belirlenmiştir (Şekil 14). Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ( $153.6 \mu\text{g g}^{-1}$  KA  $\text{gün}^{-1}$ ) ile ortalama TAR-Cd %47.8 düzeyinde ve Cd+SNP-y uygulaması ( $145.1 \mu\text{g g}^{-1}$  KA  $\text{gün}^{-1}$ ) ile ortalama TAR-Cd %39.7 düzeyinde belirlenen artışlar önemli bulunmuştur (Şekil 14).

Kontrole göre Cd stresi koşulları ile *Cucurbitaceae* familyası türlerinin toplam Cd akümülyasyon oranlarında artışlar meydana geldiği tespit edilmiştir (Şekil 14). Kontrole göre Cd stresi koşulları ile TAR-Cd'inde belirlenen bu artışların; hıyar için 3.2 kat, acur için 3.1 kat, kavunda 2.5 kat, karpuz için 4.7 kat, sakız kabak için 6.0 kat ve balkabağı için 8.7 kat seviyesinde olduğu görülmüştür. Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ile karpuz hariç diğer türlerin toplam Cd akümülyasyon oranlarında artışlar tespit edilmiş, en çok

artışın sakız kabakta (2.09 kat) olduğu ve bunu hıyar (%57.2), acur (%49.2), balkabağı (%29.4) ve kavun (%28.6) takip ettiği görülmüştür. Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ile sakız kabak ve balkabağının TAR-Cd'sinde belirlenen değişimler önemli bulunurken diğer türlerdeki değişimler önemli bulunmamıştır (Şekil 14). Ayrıca, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile sakız kabak (%55.6) ve balkabağının (%28.2) toplam Cd akümülyasyon oranlarında saptanan artışlar önemli bulunurken, hıyar (%36.1), acur (3.2 kat) ve kavun (2.0 kat) için toplam Cd akümülyasyon oranlarında belirlenen artışlar ve karpuz için saptanan azalma (%35.6) önemli bulunmamıştır (Şekil 14).



Şekil 14. Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* familyası türlerinin toplam Cd akümülyasyon oranına (TAR-Cd) kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi

Bitkilerde ağır metaller birikerek besin zinciri yoluyla insan vücuduna girebilmekte ve insan sağlığını tehdit edebilmektedir (Mahar vd., 2015; Liu vd., 2003). Ortamda bulunan Cd bitkilerde birikime yol açarak, bitki hücrelerini tahrip etmekte, fotosentezi engellemekte ve bu durum yaprakların bozulmasına ve büyümenin engellenmesine neden olmaktadır (Benavides vd., 2005; Gichner vd., 2006). Bitkide Cd biyoakümülyasyonu ve hareketliliği; bitki türlerine ve gelişim aşamalarına, yetiştirme ortamına ilave edilen besin maddelerinin konsantrasyonuna, bitki büyüme koşullarına ve/veya kullanılan metal kombinasyonlarına bağlı olarak değişim gösterir (Sterckeman ve Thomine, 2020). Ağır metallerin doku ve organlar-

daki aşırı birikimi bitkilerin vejetatif ve generatif organlarının gelişimini olumsuz yönde etkilemektedir (Gür vd., 2004). Feng vd. (2010) hıyarda, Zhang vd. (2008) ve Tripathi vd. (2012) çeltikte Cd uygulamalarının bitkilerde Cd birikimine neden olduğunu açıklamıştır. Çıkılı vd. (2016) altınçilekte artan Cd düzeyleriyle toplam akümülyasyon oranının da arttığını rapor etmişlerdir. Artan Cd dozlarının ayçiçeği bitkisinde Cd'un biyoakümülyasyonu ve translokasyonunu azalttığı ancak kökler aracılığıyla net Cd akümülyasyonu ve toplam Cd akümülyasyon oranını artırdığı saptanmıştır (Çikili vd., 2020). Cd stresinin patlıcangiller familyası türlerinde, tütün hariç diğer türlerin Cd translokasyonunu azalttığı, köklerle net Cd akümülyasyonu ve toplam Cd akümülyasyon oranını artırdığı ve Cd translokasyonuna göre türlerin altınçilek< biber< patates< patlıcan< domates< tütün olarak sıralandığı rapor edilmiştir (Emer ve Çıkılı, 2021). Çıkılı vd. (2016), Cd uygulamalarının domates hariç biber, patlıcan ve altınçilekte Cd'un translokasyonu azalttığı ve Cd translokasyonuna göre bitkilerin küçükten büyüğe altınçilek< biber< patlıcan< domates olarak sıralandıklarını tespit etmişlerdir. Ayçiçeği (*Helianthus annuus* 'Pacino'), kızıl adaçayı (*Salvia splendens* 'Fuego') ve kadife çiçeği (*Tagetes erecta* 'Inca Yellow') gibi üç farklı süs bitkisinin Cd'un esas olarak yapraklar ve sürgünlerde ve daha sonrada çiçek salkımlarında biriktiğini, en büyük Cd içeriğinin kadife çiçeğinin köklerinde, kızıl adaçayının yapraklarında ve sürgünlerinde ve ayçiçeğinin ise salkımlarında bulunduğunu ve kadife çiçeği bitkisinin en yüksek Cd alımı ile karakterize edildiğini belirtmiştir (Bosiacki, 2008).

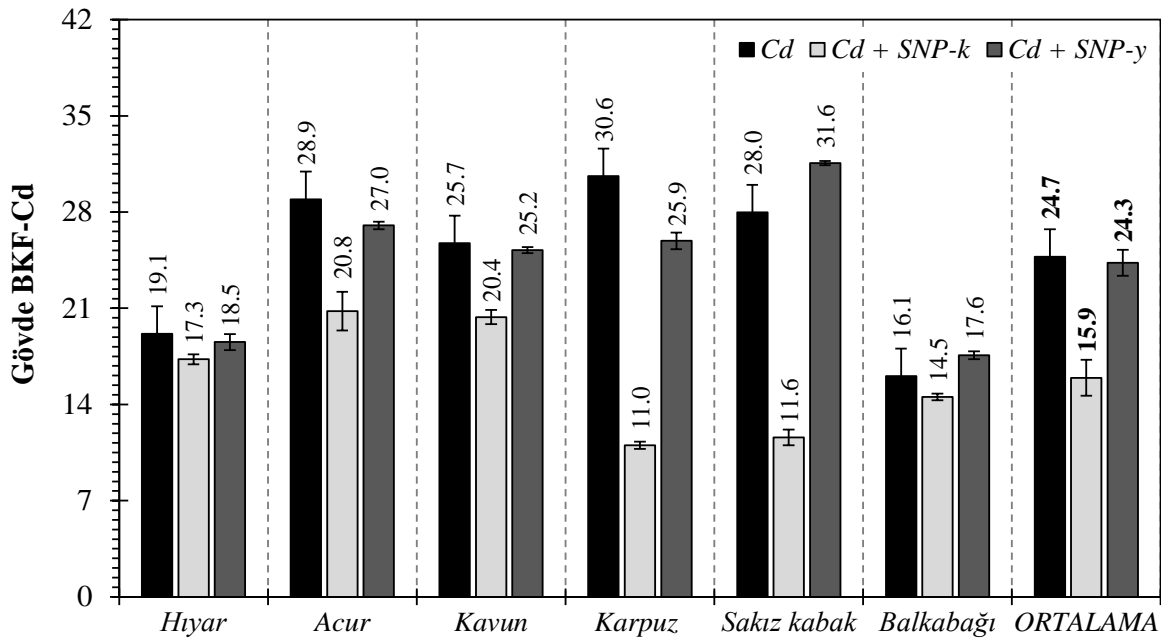
Ağır metal stresine karşı bitki savunmasında yer alan mekanizmalar ve NO'nun hemiyon homeostazını (dengeleşim) hem de ağır metallere karşı hücrel tepkileri düzenlemedeki rolleri hala açıkça anlaşılmamıştır (Xiong vd., 2010). Ancak NO, kök hücre duvarındaki metalleri şelatlama ve metal birikimini toksik düzeyin altına indirme gibi görevler üstlenmekte ve harici olarak uygulanan NO bitkilerde kök hücre duvarı bileşimini düzenleyerek, Cd birikimini azaltarak ve transpirasyon oranını kısıtlayarak ağır metal birikimini azaltmaktadır (Xiong vd., 2009). NO'nun kök duvarı bileşenlerini etkileyerek kök hücre duvarında Cd birikimine yol açabileceği ve bitkinin toprak üstü aksamında Cd konsantrasyonunun azalmasına neden olabileceği ve bununla birlikte kök hücre duvarlarında Cd birikimini artırarak ve yapraklarda çözünür fraksiyonda Cd birikimini azaltarak çeltiğin Cd toleransını arttırdığı açıklanmıştır (Xiong vd., 2009). Yerfıstığı bitkisinde düşük Cd stresi altında Cd'un çoğunlukla kök hücre duvarlarında hapsediği ancak yüksek Cd stresi altında çözünür fraksiyonda biriktiği ve Cd seviyesinden bağımsız olarak büyük bir kısmının yaprak hücre duvarlarında

biriktiği, SNP uygulaması ile gövde ve yapraklarda Cd birikiminin, köklerden sürgünlere Cd translokasyonunu ve çözünür fraksiyonlarda ve hücre organellerindeki Cd birikiminin azaldığı ve kök ve yaprak hücre duvarındaki Cd tutulmasının ise artırarak yaprak ve kök dokularındaki Cd'un hücre içi dağılımını değiştirdiği açıklanmıştır (Dong vd., 2016). Cezayir menekşesi (*Catharanthus roseus* L.) bitkisine yüksek Cd seviyesinde yapraktan uygulanan SNP'nin köklerde ve sürgünlerde Cd birikimini, biyokonsantrasyon faktörünü ve kökten gövdeye translokasyon faktörü taşınımını arttırdığı ve sonuç olarak Cd'nin kökten sürgüne alınması ve taşınmasını yükselterek *C. roseus* bitkisinin fitoremediasyon etkinliğini artırdığı tespit edilmiştir (Nabaei ve Amooaghaie, 2020). Ak üçgül (*Trifolium repens* L.) bitkisinde; Cd maruziyetinin Cd birikimini artırıp NO üretimini azalttığı rapor edilmiştir (Lui vd., 2015). Cd stresi altındaki zahter (*Satureja hortensis* L.) bitkisine uygulanan SNP'in sürgün ve köklerde Cd birikimini azalttığı belirtilmiştir (Azizi vd., 2021). Cd stresine maruz bırakılan yer fıstığı bitkisinde artan Cd birikiminin olumsuz etkilerinin SNP uygulamalarıyla tersine çevrildiği ve Cd alımını ve taşınmasının kısıtlandığı saptanmıştır (Dong vd., 2020). Çeltik (He vd., 2014) ve karnabahar (Ma vd., 2022) bitkilerinde Cd stresinde oluşan Cd birikiminin SNP tarafından önemli ölçüde azaltılabileceği bildirilmiştir. Zhao vd. (2013) çeltikte, Wang vd. (2013) İtalyan çiminde ve Xu vd. (2015) marul fidelerinde Cd kaynaklı streste, NO uygulamalarının kökler tarafından Cd alımını artırarak ve sürgünler tarafından Cd birikimini azaltarak Cd toleransını arttırdığı açıklanmıştır. Zhao vd. (2016) tarafından Cd stresine maruz kalan dar yapraklı saz otu (*Typha angustifolia*) bitkisine harici uygulanan SNP kök hücre duvarında Cd birikimini artırarak bitkiyi Cd toksisitesine karşı koruduğu bildirilmiştir. Liu vd. (2020) tarafından Cd stresinin mısırda büyümeyi azalttığı ve bitkilerde Cd birikimine neden olduğu, Si ve NO birlikte uygulanmasıyla ise Cd alımı, birikimi, yer değiştirmesi ve biyobirikim faktörlerini azalttığı, Si ve NO'nun Cd alımı ve birikimini azaltarak Cd toksisitesinin olumsuz etkilerini hafifletmede güçlü bir etkiye sahip oldukları bildirilmiştir.

#### **4.6. Cucurbitaceae Familyası Türlerinin Cd Biyokonsantrasyonları**

Familyadaki türler birlikte değerlendirildiğinde; Cd stresi koşullarına (24.7) göre Cd+SNP-k uygulaması (15.9) ile ortalama gövdede Cd biyo-konsantrasyonunda %35.6 oranında ve Cd+SNP-y uygulaması (24.3) ile ortalama gövde Cd biyo-konsantrasyonunda %1.6 oranında bir azalma saptanmıştır (Şekil 15).

Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ile türlerin gövde Cd biyo-konsantrasyonlarında azalmalar belirlenmiş ve en çok azalma karpuzda (%64.1) tespit edilirken, bunu sakız kabak (%58.6), acur (%28.0), kavun (%20.6), balkabağı (%9.9) ve hıyar (%9.4) izlemiştir. Bunun yanında, Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-y uygulaması ile sakız kabak (%12.9) ve balkabağının (%9.3) gövde Cd biyo-konsantrasyonlarında saptanan artışlar hariç, diğer türler olan karpuz (%15.4), acur (%6.6), hıyar (%3.1) ve kavunun (%1.9) gövde Cd biyo-konsantrasyonlarında azalmalar tespit edilmiştir (Şekil 15).

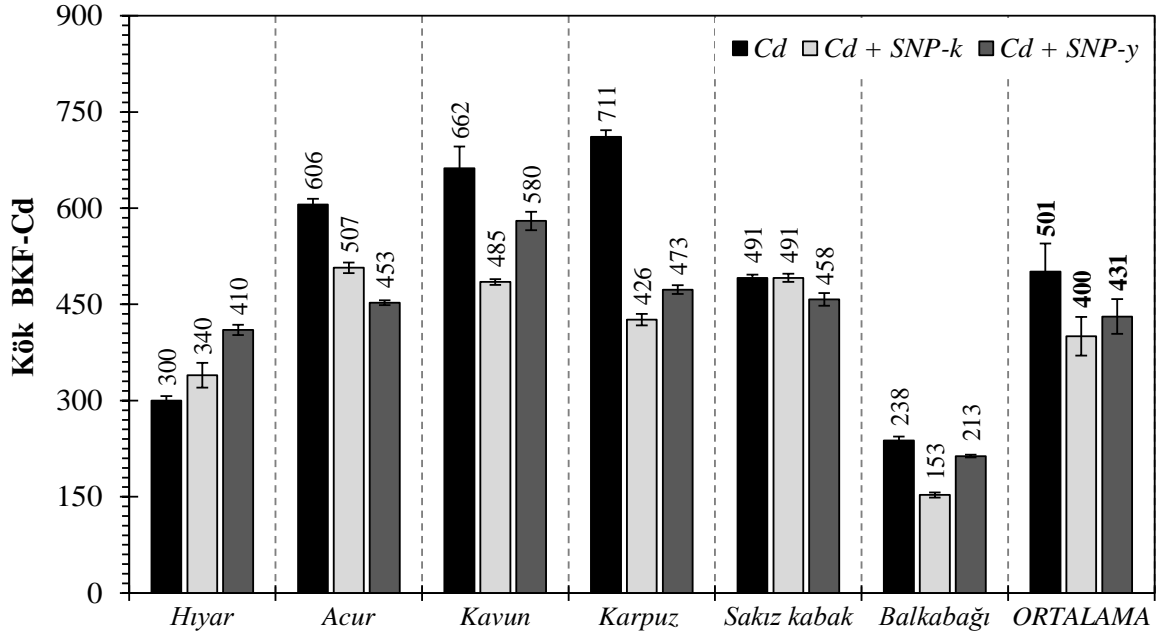


Şekil 15. Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* familyası türlerinin gövde Cd biyo-konsantrasyon faktörüne (gövde BKF-Cd) kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi

Familyadaki türler birlikte değerlendirildiğinde; Cd stresi koşullarına (501) göre Cd+SNP-k uygulaması (400) ile ortalama kök Cd biyo-konsantrasyonunda %20.2 düzeyinde ve Cd+SNP-y uygulaması ile (431) ortalama kök Cd biyo-konsantrasyonunda %14.0 düzeyinde azalmalar saptanmıştır (Şekil 16).

Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ile hıyar kök Cd biyo-konsantrasyonundaki artış (%13.3) hariç diğer türlerin kök Cd biyo-konsantrasyonlarında azalmalar belirlenmiş ve en çok azalma oranı %40.1 ile karpuzda görülürken bunu balkabağı (%35.7), kavun (%26.7) ve acur (%16.3) takip etmiştir (Şekil 16). Bunun yanında, Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-y uygulaması ile hıyar kök Cd biyo-konsantrasyonundaki artış (%36.7)

dışında diğer türlerin kök Cd biyo-konsantrasyonlarında azalmalar saptanmış ve bu azalmaların seviyesi karpuz (%33.5), acur (%25.2), kavun (%12.4), balkabağı (%10.5) ve sakız kabak (%6.7) sırasıyla düşmüştür (Şekil 16).



Şekil 16. Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* familyası türlerinin kök Cd-biyokonsantrasyon faktörüne (kök BKF-Cd) kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi

Bitkideki kimyasalın biyokonsantrasyon kapasitesini yansıtan biyokonsantrasyon faktörü (BKF), bir organizmadaki kimyasal konsantrasyonun çevredeki konsantrasyona oranıdır (Petoumenou vd., 2015). Bitki doku ve organlarda ağır metallerin aşırı birikimi bitkilerin vejetatif ve generatif organlarının gelişimini olumsuz yönde etkilemektedir (Gür vd., 2004). Bitkilerde gerçekleşen Cd biyoakümüülasyonu ve hareketliliği; (i) bitki türlerine ve gelişim aşamalarına, (ii) yetiştirme ortamına ilave edilen besin maddelerinin konsantrasyonuna, (iii) bitki büyüme koşullarına ve/veya kullanılan metal kombinasyonlarına bağlı olarak değişim gösterir (Sterckeman ve Thomine, 2020). Cd'un ortamda bulunmasıyla bitkilerde meydana gelen birikim hücrelerini tahrip etmekte, fotosentezi engellemekte, yapraklar bozulmakta ve bitki büyümesi engellenmektedir (Gichner vd., 2006; Benavides vd., 2005). Tripathi vd. (2012) ve Zhang vd. (2008) çeltikte, Feng vd. (2010) hıyarda Cd uygulamalarının bitkilerde Cd birikimine neden olduğunu açıklamışlardır. Cd uygulamalarının patlıcan, biber ve altınçilek bitkilerinde Cd-biyokonsantrasyonunu azalttığı belirtilmiştir (Çıkkılı vd.,



2016). Lukačová Kuliková ve Lux (2010) mısırdaki Cd'un çoğunlukla bitkinin kök sistemlerinde lokalize olduğunu ve Lukačová vd. (2013) ise mısırdaki sürgünlere taşındıkça köklerde çok daha fazla Cd tutulduğunu ve kökte Cd'un hücre duvarında biriktiğini ifade etmişlerdir. Üç farklı süs bitkisi olan ayçiçeği, kırmızı adaçayı ve kadife çiçeğinde Cd'un esas olarak yapraklar ve sürgünlerde ve daha sonradan çiçek salkımlarında biriktiği, en büyük Cd içeriğinin kadife çiçeğinin köklerinde, kırmızı adaçayının yapraklarında ve sürgünlerinde ve ayçiçeğinin salkımlarında bulunduğu ve kadife çiçeğinin en yüksek Cd alımı ile karakterize edildiği belirtilmiştir (Bosiacki, 2008).

Dışarıdan uygulanan NO; Cd birikimini azaltarak, bitkilerde kök hücre duvarı bileşimini düzenleyerek ve transpirasyon oranını kısıtlayarak ağır metal birikimini azaltmaktadır (Xiong vd., 2010). Aküçgül bitkisinde, Cd maruziyetinin Cd birikimini artırıp NO üretimini azalttığı rapor edilmiştir (Lui vd., 2015). NO uygulamasıyla kök hücre duvarlarındaki Cd birikimini artırarak ve yapraklarda çözünür fraksiyonunda Cd birikimi azaltarak çeltiğin Cd toleransının arttığı açıklanmıştır (Xiong vd. 2009). Yerfıstığı bitkisinde Cd'un düşük Cd stresi altında kök hücre duvarlarında hapsediği, yüksek Cd stresi altında ise çoğunlukla çözünür fraksiyonda biriktiği ve Cd uygulama seviyesinden bağımsız olarak büyük bir kısmının yaprak hücre duvarlarında biriktiği, SNP uygulaması ile gövde ve yapraklarda Cd birikimi ve ayrıca hücre organellerindeki Cd birikiminin azaldığı bildirilmiştir (Dong vd., 2016). Çeltik fideleri Cd stresi altında iken meydana gelen Cd birikiminin SNP tarafından önemli ölçüde azaltılabileceği bildirilmiştir (He vd., 2014). Cd stresine maruz bırakılan yerfıstığı bitkisinde artan Cd birikiminin olumsuz etkilerinin SNP uygulamalarıyla tersine çevrildiği ve Cd alımı ve taşınmasının kısıtlandığı saptanmıştır (Dong vd., 2020). Çeltikte (Zhao vd., 2013) ve saz otunda (Zhao vd., 2016) Cd stresi koşullarında dışarıdan uygulanan NO ile kökler tarafından Cd alımının arttığı, sürgünlerde biriktirilen Cd miktarının ise azaldığı tespit edilmiştir. Zahter (Azizi vd., 2021) ve karnabaharda (Ma vd., 2022) Cd uygulamalarının kökler ve sürgünlerde Cd birikiminde artışlara neden olduğu ancak dışarıdan uygulanan NO ile Cd birikiminin azaltılabileceği belirtilmiştir. İtalyan çimi (Wang vd., 2013b) ve marulda (Xu vd., 2014; Xu vd., 2015) Cd toksisitesinin hem sürgün hem de köklerde Cd birikimini artırdığı, harici olarak uygulanan NO'nun ise sürgünlere taşınan Cd'u etkili bir şekilde engellediği belirtilmiştir. Cezayir menekşesi bitkisinde Cd uygulamalarıyla hem köklerde hem de sürgünlerde Cd birikimi, biyokonsantrasyon faktörü ve kökten gövdeye translokasyon

faktörünün arttığı, SNP ve melatoninin birlikte uygulanmasının Cd'nin kökten sürgüne alınması ve taşınmasını artırarak fitoremediasyon etkinliğini artırdığı tespit edilmiştir (Nabaei ve Amooaghaie, 2020). Ayrıca, Nabaei ve Amooaghaie (2020) tarafından Cd stresi altındaki Cezayir menekşesi bitkisine yapraktan uygulanan SNP'nin köklerde ve sürgünlerde Cd birikimini arttırdığı bildirilmiştir.

#### 4.7. *Cucurbitaceae* Familyası Türlerinin Fotosentetik Pigment İçerikleri

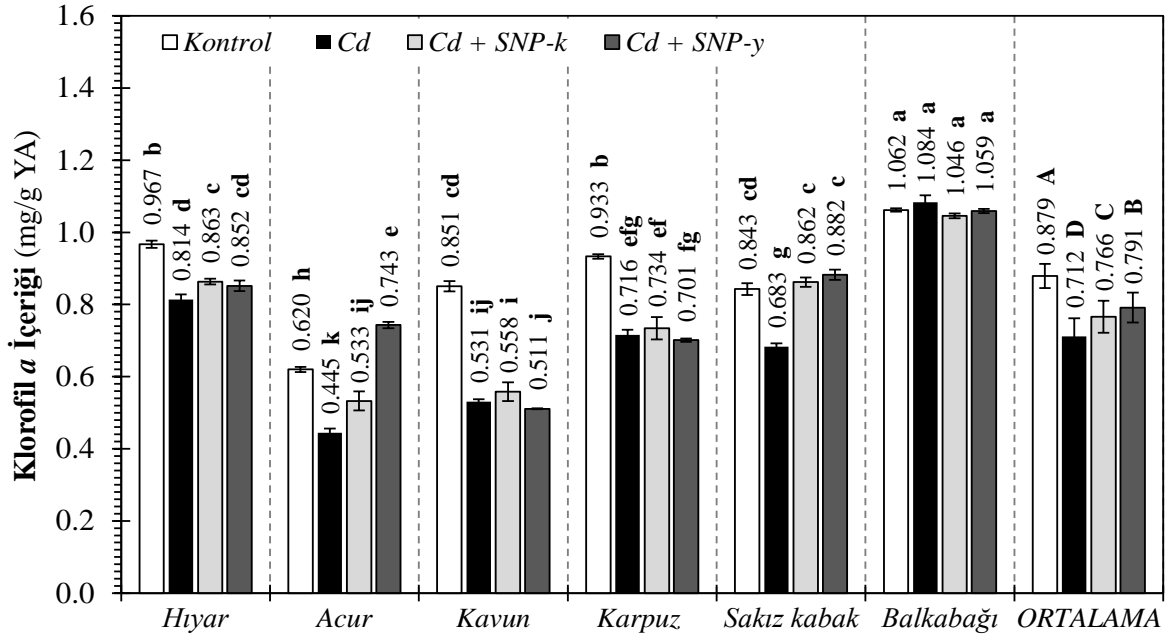
Kadmiyum stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* familyası türlerinin yapraklarında klorofil *a* ve klorofil *b* içeriklerine NO kaynağı olarak kullanılan SNP uygulamalarının etkisine ait varyans analiz sonuçları Tablo 6'da, klorofil *a* içeriğine ait ortalamalar Şekil 17'de ve klorofil *b* içeriğine ait ortalamalar ise Şekil 18'de sunulmuştur. Tablo 6 ile Şekil 17 ve 18 birlikte incelendiğinde; Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* türlerinde Cd stresinin hafifletilmesine SNP uygulamalarının klorofil *a* ve klorofil *b* içerikleri üzerine türlerin, uygulamaların ve tür x uygulama interaksiyonunun etkileri istatistiksel olarak %0.1 düzeyinde önemli bulunmuştur.

Tablo 6

Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* familyası türlerinin klorofil *a* ve klorofil *b* içeriklerine kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisine ait varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Klorofil <i>a</i> İçeriği		Klorofil <i>b</i> İçeriği	
		Kareler Toplamı	<i>F</i> Değeri	Kareler Toplamı	<i>F</i> Değeri
Genel	71	2.498	-	0.479	-
Tür (T)	5	1.870	608.6***	0.330	172.7***
Uygulama (U)	3	0.263	142.7***	0.091	79.3***
T×U İnteraksiyonu	15	0.335	36.4***	0.039	6.8***
Hata	48	0.0295	-	0.018	-

Familyadaki türler birlikte değerlendirildiğinde; kontrol uygulamasına (0.879 mg g<sup>-1</sup> YA) göre Cd stresi koşullarında (0.712 mg g<sup>-1</sup> YA) ortalama klorofil *a* içeriği %19.0 düzeyinde önemli bir azalma göstermiştir (Şekil 17). Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması (0.766 mg g<sup>-1</sup> YA) ile ortalama klorofil *a* içeriğinde %7.6 düzeyinde ve Cd+SNP-y uygulaması ile (0.791 mg g<sup>-1</sup> YA) ortalama klorofil *a* içeriğinde %11.1 düzeyinde belirlenen artışlar önemli bulunmuştur (Şekil 17).

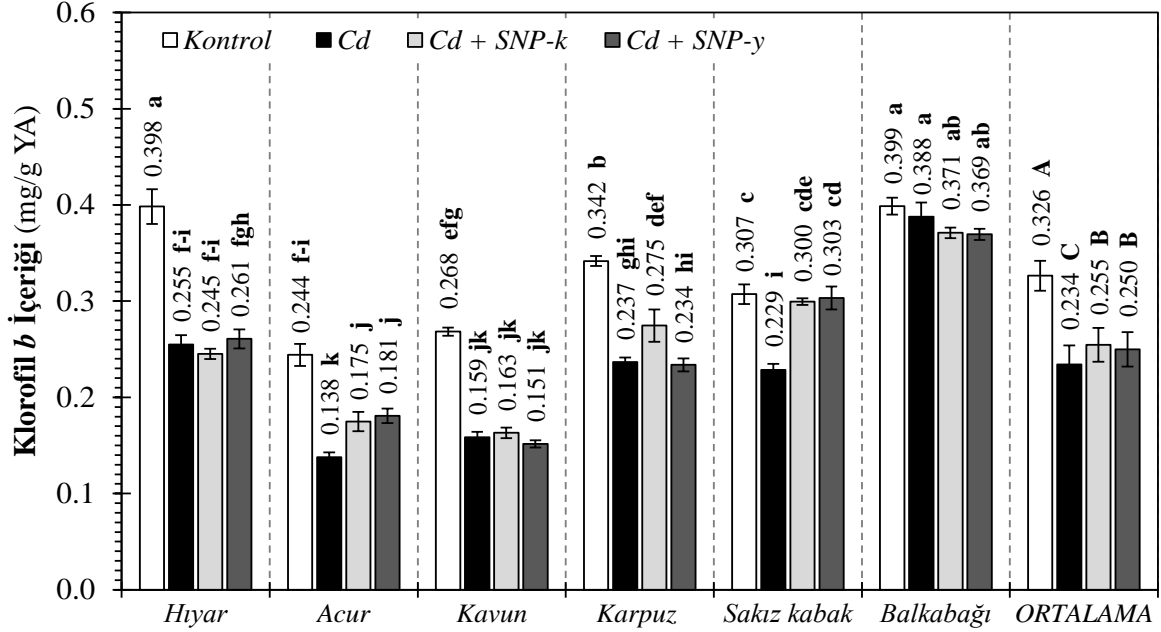


Şekil 17. Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* familyası türlerinin klorofil *a* içeriklerine kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi

Kontrole göre Cd stresi koşullarında *Cucurbitaceae* familyası türlerinin klorofil *a* içeriklerinde, balkabağı türünde saptanan istatistiksel olarak önemsiz artış (%2.1) haricinde diğer türlerde önemli azalmalar tespit edilmiştir (Şekil 17). Klorofil *a* içeriklerinde tespit edilen önemli orandaki azalmaların; hıyarda %15.8, acurda %28.2, kavunda %37.6, karpuzda %23.3 ve sakız kabakta %19.0 seviyesinde olduğu belirlenmiştir. Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ile hıyar (%6.0), acur (%19.8) ve sakız kabakta (%26.2) türlerinin klorofil *a* içeriklerinde saptanan artışlar önemli bulunurken, kavun (%5.1) ve karpuz (%2.5) türlerinin klorofil *a* içeriklerinde belirlenen artışlar ile balkabağı (%3.5) türünün klorofil *a* içeriğinde belirlenen azalma önemli bulunmamıştır. Bununla birlikte, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile acur (%67.0) ve sakız kabak (%29.1) türlerinin klorofil *a* içeriklerinde saptanan artışlar önemli bulunurken, hıyarın klorofil *a* içeriğinde belirlenen artış (%4.7) ile kavun (%3.8), karpuz (%2.1) ve balkabağının (%2.3) klorofil *a* içeriklerinde meydana gelen azalmalar istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır (Şekil 17).

Familyadaki türler birlikte değerlendirildiğinde; kontrol uygulamasına ( $0.326 \text{ mg g}^{-1} \text{ YA}$ ) göre Cd stresi koşullarında ( $0.234 \text{ mg g}^{-1} \text{ YA}$ ) ortalama klorofil *b* içeriği %28.2 düzeyinde önemli bir azalma belirlenmiştir (Şekil 18). Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ( $0.255 \text{ mg g}^{-1} \text{ YA}$ ) ile ortalama klorofil *b* içeriğinde %9.0 oranında ve Cd+SNP-y

uygulamasını (0.250 mg g<sup>-1</sup> YA) ile ortalama klorofil *b* içeriğinde %6.8 oranında belirlenen artışlar istatistiksel olarak önemli bulunmuştur (Şekil 18).



Şekil 18. Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* familyası türlerinin klorofil *b* içeriklerine kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi

Kontrole göre Cd stresi koşulları altında *Cucurbitaceae* familyası türlerinin klorofil *b* içeriklerinde azalmalar tespit edilmiştir (Şekil 18). Hıyar (%35.9), acur (%43.4), kavun (%40.7), karpuz (%30.7), sakız kabak (%25.4) türlerinin klorofil *b* içeriklerinde belirlenen azalmalar istatistiksel olarak önemli bulunurken, balkabağının klorofil *b* içeriğinde belirlenen azalma (%2.8) önemli bulunmamıştır. Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ile acur (%26.8), karpuz (%16.0) ve sakız kabak (%31.0) türlerinin klorofil *b* içeriklerinde saptanan artışlar önemli olarak saptanırken, kavunda belirlenen artış (%2.5) ile hıyar (%3.9) ve balkabağı (%4.4) türlerinin klorofil *b* içeriklerinde meydana gelen azalmalar önemli bulunmamıştır. Bununla birlikte, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile acur (%31.2) ve sakız kabak (%32.3) türlerinin klorofil *b* içeriklerinde saptanan artışlar önemli bulunurken, hıyarda belirlenen artış (%2.4) ile kavun (%5.0), karpuz (%1.3) ve balkabağı (%4.9) türlerinin klorofil *b* içeriklerinde meydana gelen azalmalar önemli bulunmamıştır (Şekil 18).

Kadmiyum stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* familyası türlerinin klorofil *a+b* ve karotenoid içerikleri NO kaynağı olarak kullanılan SNP uygulamalarının etkisine ait varyans

analiz sonuçları Tablo 7’de, klorofil *a+b* içeriklerine ait ortalamalar Şekil 19’da ve karotenoid içeriklerine ait ortalamalar Şekil 20’de sunulmuştur. Tablo 7 ile Şekil 19 ve 20 birlikte incelendiğinde; Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* türlerinde Cd stresinin hafifletilmesine SNP uygulamalarının klorofil *a+b* ve karotenoid içerikleri üzerine türlerin, uygulamaların ve tür x uygulama interaksyonunun etkileri istatistiksel olarak önemli ( $p<0.001$ ) bulunmuştur.

Tablo 7

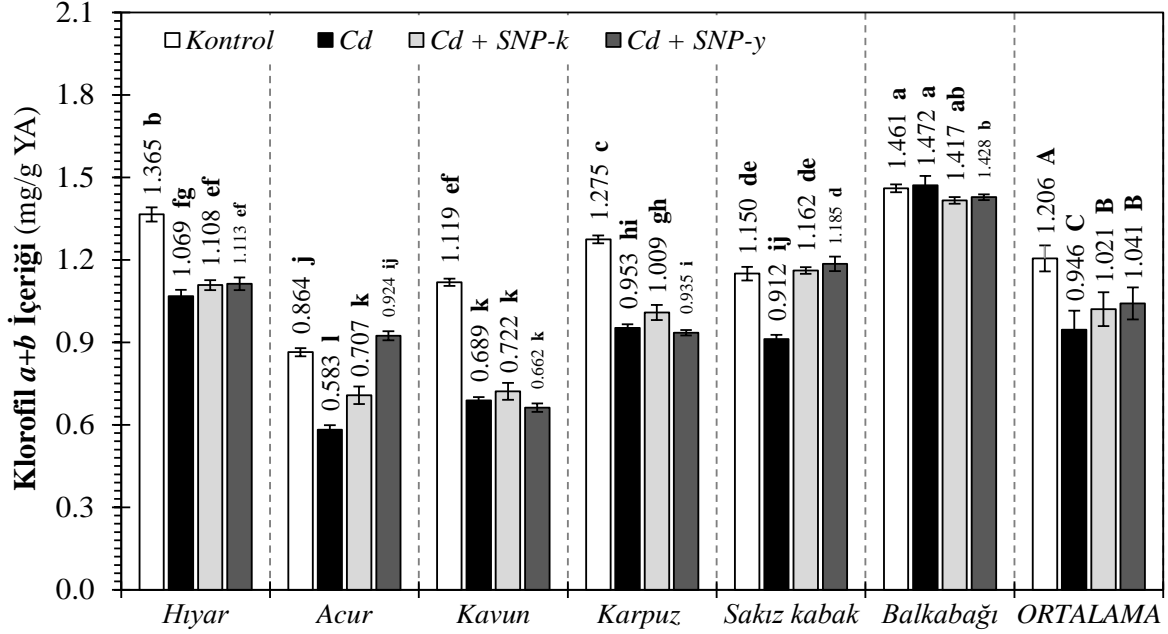
Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* familyası türlerinin klorofil *a+b* ve karotenoid içeriklerine kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisine ait varyans analiz sonuçları

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Klorofil <i>a+b</i> İçeriği		Karotenoid İçeriği	
		Kareler Toplamı	<i>F</i> Değeri	Kareler Toplamı	<i>F</i> Değeri
Genel	71	5.0023	-	0.5467	-
Tür (T)	5	3.7596	541.9***	0.4468	480.3***
Uygulama (U)	3	0.6471	155.4***	0.0439	78.6***
T×U İnteraksiyonu	15	0.5289	25.4***	0.0471	16.9***
Hata	48	0.0666	-	0.0089	-

Familyadaki türler birlikte değerlendirildiğinde; kontrol uygulamasına ( $1.206 \text{ mg g}^{-1}$  YA) göre Cd stresi koşullarında ( $0.946 \text{ mg g}^{-1}$  YA) ortalama klorofil *a+b* içerikleri %21.6 düzeyinde önemli bir azalma belirlenmiştir (Şekil 19). Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ( $1.021 \text{ mg g}^{-1}$  YA) ile ortalama klorofil *a+b* içeriğinde %7.9 düzeyinde ve Cd+SNP-y uygulaması ( $1.041 \text{ mg g}^{-1}$  YA) ile ortalama klorofil *a+b* içeriğinde %10.0 düzeyinde belirlenen artışlar önemli bulunmuştur (Şekil 19).

Kontrolde göre Cd stresi koşullarında klorofil *a+b* içeriklerinde balkabağı türünde saptanan artış (%0.8) haricinde diğer türlerde önemli azalmalar tespit edilmiştir (Şekil 19). Türlerin klorofil *a+b* içeriklerinde, hıyar için %21.7, acur için %32.5, kavun için %38.4, karpuz için %25.3 ve sakız kabak için %20.7 seviyesinde saptanan bu azalmalar önemli bulunmuştur. Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ile acur (%21.3) ve sakız kabak (%27.4) türlerinin klorofil *a+b* içeriklerinde saptanan artışlar önemli bulunurken, hıyar (%3.6), kavun (%4.8) ve karpuz (%5.9) türlerinde belirlenen artışlar ile balkabağı türünün klorofil *a+b* içeriğinde meydana gelen azalma (%3.7) önemli bulunmamıştır. Bununla birlikte, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile klorofil *a+b* içerikleri için acur (%58.5) ve sakız kabak (%29.9) türlerinde saptanan artışlar ile balkabağı (%3.0) türünde saptanan

azalma önemli bulunurken, hıyar için belirlenen artış (%4.1) ile kavun (%3.9) ve karpuz (%1.9) türlerinde belirlenen azalmalar istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır (Şekil 19).

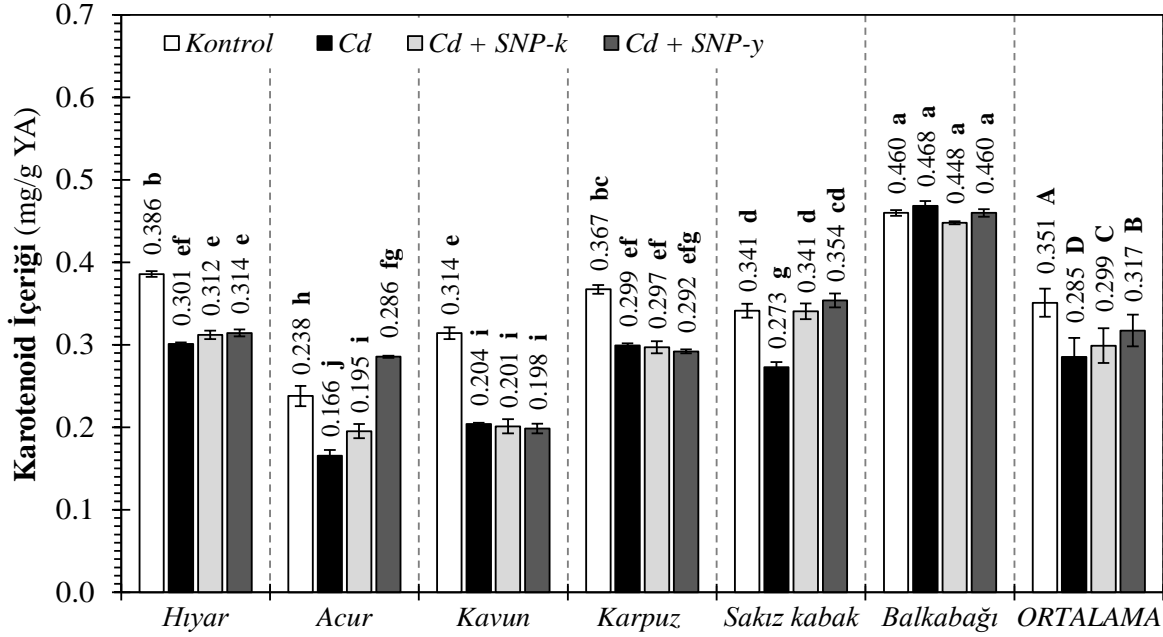


Şekil 19. Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* familyası türlerinin klorofil *a+b* içeriklerine kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi

Familyadaki türler birlikte değerlendirildiğinde; kontrol uygulamasına ( $0.351 \text{ mg g}^{-1}$  YA) göre Cd stresi koşullarında ( $0.285 \text{ mg g}^{-1}$  YA) ortalama karotenoid içeriğinde %18.8 düzeyinde önemli bir azalma saptanmıştır (Şekil 20). Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ( $0.299 \text{ mg g}^{-1}$  YA) ile ortalama karotenoid içeriğinde %4.9 düzeyinde ve Cd+SNP-y uygulaması ( $0.317 \text{ mg g}^{-1}$  YA) ile ortalama karotenoid içeriğinde %11.2 düzeyinde belirlenen artışlar istatistiksel olarak önemli bulunmuştur (Şekil 20).

Kontrole göre Cd stresi koşullarında türlerin karotenoid içeriklerinde, balkabağı türünde saptanan artış (%1.7) haricinde, diğer türlerde önemli azalmalar tespit edilmiştir (Şekil 20). Hıyar (%22.0), acur (%30.3), kavun (%35.0), karpuz (%18.5) ve sakız kabak (%19.9) türlerinin karotenoid içeriklerinde meydana gelen azalmalar istatistiksel olarak önemli bulunmuştur. Türlerinin karotenoid içeriklerinde Cd stresi koşullarına göre Cd+SNP-k uygulaması ile acur (%17.5) ve sakız kabakta (%24.9) saptanan artışlar önemli bulunurken, hıyarda belirlenen artış (%3.7) ile kavun (%1.5), karpuz (%0.7) ve balkabağında (%4.3) saptanan azalmalar önemli bulunmamıştır. Bunun yanında, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile

acur (%72.3) ve sakız kabak (%29.7) türlerinin karotenoid içeriklerinde saptanan artışlar önemli bulunurken, hıyar için belirlenen artış (%4.3) ile kavun (%2.9), karpuz (%2.3) ve balkabağı (%1.7) türlerinin karotenoid içeriklerinde meydana gelen azalmalar istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır (Şekil 20).



Şekil 20. Cd stresinden etkilenmiş *Cucurbitaceae* familyası türlerinin karotenoid içeriklerine kök ve yapraktan uygulanan SNP'nin etkisi

Bitki Cd stresi altındayken klorofil biyosentezinde görev yapan protoklorofil redüktaz ile aminolevulinik asit sentezi engellenerek klorofil sentezinde azalmalar meydana gelmektedir (Kirbağ Zengin ve Munzuroğlu, 2006). Cd kaynaklı olumsuz etkiler arasında fotosentetik sistemin ve kök metabolizmasının engellenmesi yer almaktadır (Andresen ve Küpper, 2012). Cd'un fitotoksik olması nedeniyle tarımsal ekosistemler için zararlı olabileceği, Cd fitotoksitesinin ise fotosentez hızı ve klorofil konsantrasyonundaki değişimlerden kaynaklandığı bildirilmiştir (Choppala vd., 2014). Ayrıca, ağır metaller bitkide yüksek konsantrasyonlarda fotosentez ürünlerinin taşınmasını engelleyerek sakkaroz, nişasta ve şekerlerin yapraklarda birikimine neden olmaktadır (Samarakoon ve Rauser, 1979). Kadmiyum fitotoksitesinin bezelye (Sandalio vd., 2001) ve maş fasulyesinde (Somashekaraiyah vd., 2006) Cd toksitesinin klorofil sentezini bozduğu bildirilmiştir. Cd toksitesi ile tütün (Lu vd., 2018), *Brassica* türleri (Vatehová vd., 2012), pamuk (Farooq vd., 2013) ve çeltik (Guo vd., 2017) bitkilerinde klorofil ve karotenoid miktarında azalmalar, Wang vd. (2014) çeltikte

klorofil *a* içeriğinde azalma, Nwugo ve Huerta (2008) ve Farooq vd. (2016) çeltik bitkisinde fotosentezde azalma, patates (Dorneles vd., 2019), hıyar (Feng vd., 2010) ve makarnalık buğday (Rizwan vd., 2015) bitkilerinde fotosentetik pigment içeriklerinde azalmalar, buğday (Rahman vd., 2020) ve mısır (Mihaličová Malčovská vd. 2014; Vaculík vd., 2015) bitkilerinde klorofil içeriği ve fotosistem II verimliliğinde azalmalar olduğu çeşitli araştırmacılar tarafından açıklanmıştır. Kirbag Zengin vd. (2006) ayçiçeğinde klorofil *a/b* oranının, Emer ve Çikili (2021) *Solanaceae* türlerinin klorofil ve karotenoid içeriklerinin, Liu vd. (2007) Çin lahanası ve Pekin lahanasının klorofil içeriğinin, Moradi vd. (2015) aspirin klorofil *a*, *b*, *a+b* ve karotenoid içeriklerinin ve Çikili vd. (2020) ayçiçeğinde klorofil *a+b* ve karotenoid içeriklerinin Cd toksisitesi ile azaldığını rapor etmişlerdir.

Cd toksisitesi fotosentetik özellikleri sınırlandırmakta ancak harici NO uygulanması ile sınırlandırılan bu özellikler iyileştirmektedir (Jhanji vd., 2012). Buna karşın fazla NO'nin fotosentetik elektron taşınımına zarar verebileceği de bildirilmiştir (Pedroso ve Durzan, 2000). Yerfıstığı fidelerinde Cd maruziyetinin fotosentezi engellediği ancak SNP uygulamasının ise fotosentezi geliştirdiği belirlenmiştir (Dong vd., 2016). Ayçiçeğinde NO uygulamasıyla Cd-kaynaklı klorofil bozunumunun önemli ölçüde tersine çevrildiği rapor edilmiştir (Laspina vd., 2005). Cd toksisitesinin çeltik (Hsu ve Kao, 2004; Xiong vd., 2009; Zhao vd., 2013), marul (Xu vd., 2015a), İtalyan çimi (Chen vd., 2018) ve yerfıstığı (Dong vd., 2020) bitkilerinde klorofil içeriğini azalttığı ancak NO sağlayıcıların Cd toksisite seviyesini azaltmada etkili olduğu çeşitli araştırmacılar tarafından deklare edilmiştir. Kara kavak (*Populus nigra*) bitkisinde Cd uygulamalarının fotosentetik pigment (klorofil *a*, *b*, *a+b* ve karotenoidler) içeriklerini azalttığı, Cd+SNP uygulamalarının ise Cd stresini azaltıcı etki yaptığı ve fotosentetik pigment içeriklerini artırdığı saptanmıştır (Çikili vd., 2019). Cd uygulamasının arpanın klorofil içeriği ve net fotosentez oranında azalmaya neden olduğu ancak NO uygulamasıyla Cd toksisitesinin önemli oranda azaldığı ve klorofil içeriği ile net fotosentez oranının da artırdığı saptanmıştır (Chen vd., 2010). Wang vd. (2013b) İtalyan çiminde ve Xu vd. (2015) yerfıstığında Cd stresıyla klorofil içeriği ve net fotosentez oranında azalmalar meydana geldiğini, salisilik asit ve SNP'nin birlikte uygulanmasıyla ise yapraklarda klorofil içeriği ve net fotosentez oranında artışlar olduğunu bildirmişlerdir. Hardal (Per vd., 2017) ve marul fidelerinde (Xu vd., 2014) SNP uygulamalarının Cd stresini hafiflettiği ve fotosentezi olumlu yönde etkileyerek klorofil sentezini artırdığı açıklanmıştır. Cd stresinin ak üçgül



(Liu vd., 2015) ve kanola (Jhanji vd., 2012) bitkilerinin klorofil *a*, *b* ve toplam klorofil konsantrasyonunu azalttığı fakat harici NO uygulanmasının Cd stresindeki bitkilerin fotosentetik özelliklerini kontrol bitkilerine yaklaştırdığı rapor edilmiştir. Cd stresi altında zahter (Azizi vd., 2021) ve karnabahar (Ma vd., 2022) klorofil *a*, klorofil *b*, toplam klorofil ve karotenoid içeriklerinde azalmalar meydana geldiği, bununla birlikte NO uygulamasıyla ise bahsi geçen parametrelerin içeriklerde ise artışlar olduğu bildirilmiştir.



## BEŞİNCİ BÖLÜM

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tez çalışmasında; son yıllarda ülkemiz tarımında önemli bir yere sahip olan, kullanımı giderek artan ve geniş alanlarda yetiştiriciliği yapılan *Cucurbitacea* (kabakgiller) familyasına ait olan bitkilerde (hıyar, acur, kavun, karpuz, sakız kabak ve bal-kabağı) Cd toksisitesinin azaltılmasında NO'in etkisi değerlendirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen verilere göre aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Familya ortalaması olarak Cd stresi koşullarında; gövde yaş ağırlığı (%37.3), gövde kuru ağırlığı (%58.0), bitki boyu (%35.5), kök yaş ağırlığı (%56.0) ve kök kuru ağırlığı (%55.5), kök uzunluğu (%24.2), kök hacmi (%51.6), Cd translokasyon faktörü (%50.5), gövde biyokonsantrasyon faktörü (%35.6) ve kök biyokonsantrasyon faktörü (%20.0), klorofil *a* (%19.1), klorofil *b* (%28.2) ve klorofil *a+b* (%21.6) ve karotenoid içeriklerinde (%18.8) önemli azalmalar tespit edilirken, gövde/kök oranı ve Cd tolerans indeksinde tespit edilen azalmalar önemsiz bulunmuştur. Bunun aksine, Cd stresi altında familyadaki türlerin ortalaması olarak, gövde Cd konsantrasyonu (25.86 kat), kök Cd konsantrasyonu (52.41 kat), köklerle net Cd akümülyasyonu (30.78 kat) ve Cd toplam akümülyasyon oranı (6.74 kat) önemli artışlar göstermiştir.

Familya ortalaması olarak Cd stresi koşullarında önemli azalmalar gösteren gövde yaş ağırlığı (%17.1), gövde kuru ağırlığı (%49.7), kök kuru ağırlığı (%12.3), bitki boyu (%6.4), kök uzunluğu (%18.7), kök hacmi (%8.1), Cd toplam akümülyasyon oranı (%47.8), klorofil *a* (% 7.6), klorofil *b* (%9.0), klorofil *a+b* (% 7.9) ve karotenoid içeriklerinde (%4.9) Cd+SNP-k uygulaması ile önemli artışlar belirlenirken, kök yaş ağırlığı, gövde/kök oranı ve Cd tolerans indeksinde meydana gelen artışlar önemsiz bulunmuştur. Bununla birlikte, Cd stresine göre Cd+SNP-k uygulaması ile familya ortalaması olarak gövde Cd konsantrasyonu (%35.6), kök Cd konsantrasyonu (%20.1) ve köklerle net Cd akümülyasyonunda (%23.7) belirlenen azalmalar önemli bulunurken, gövde ve kök Cd biyokonsantrasyonunda meydana gelen azalmalar önemsiz bulunmuştur.

Famulya ortalaması olarak Cd stresi koşullarında önemli azalmalar gösteren gövde kuru ağırlığı (%27.6), Cd toplam akümülayon oranı (%39.7), Cd translokasyon faktörü (%11.2), klorofil *a* (%11.1), klorofil *b* (%6.8), klorofil *a+b* (%10.0) ve karotenoid içerikleri (%11.2) Cd+SNP-y uygulaması ile önemli artışlar gösterirken, gövde yaş ağırlığı, kök yaş ağırlığı, bitki boyu, kök kuru ağırlığı, kök uzunluğu, kök hacmi, gövde/kök oranı, köklerle net Cd akümülayonu ve Cd tolerans indeksinde meydana gelen artışlar önemsiz bulunmuştur. Bununla birlikte, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile famulya ortalaması olarak kök Cd konsantrasyonunda (%14.0) belirlenen azalma önemli bulunurken, gövde Cd konsantrasyonu, gövde ve kök Cd biyokonsantrasyonunda meydana gelen azalmalar önemsiz bulunmuştur.

Cd stresi koşullarında hıyarın gövde yaş ağırlıkları (%42.2), gövde kuru ağırlıkları (%59.3), bitki boyu (%29.5), kök yaş ağırlığı (%60.3), kök kuru ağırlığı (%61.3), kök uzunluğu (%19.6), kök hacmi (%62.2) ile klorofil *a* (%15.8), klorofil *b* (%35.9), klorofil *a+b* (%21.7) ve karotenoid (%22.0) içeriklerinde önemli azalmalar saptanmıştır. Ayrıca, kontrol uygulamasına göre Cd stresi ile hıyarın gövde/kök oranı (%1.8) ve Cd tolerans indeksinde de (%19.6) azalmalar belirlenmiştir. Bunun aksine, Cd stresi koşullarında hıyarın gövde Cd konsantrasyonu (23.2 kat), kök Cd konsantrasyonu (21.4 kat) ve köklerle net Cd akümülayonu (21.8 kat) önemli artışlar gösterirken, Cd translokasyonu (%9.1) ve toplam Cd akümülayon oranında (3.2 kat) tespit edilen azalmaların önemsiz olduğu görülmüştür.

Cd stresine göre Cd+SNP-k uygulaması ile hıyarın kök Cd konsantrasyonu (%13.2), köklerle net Cd akümülayonu (%25.0) ve klorofil *a* (%6.0) içeriğinde önemli artışlar belirlenirken, gövde yaş ağırlığı (%12.1), gövde kuru ağırlığı (%40.5), kök hacmi (%8.1), toplam Cd akümülayon oranı (%57.2) ile klorofil *a+b* (%4.1) ve karotenoid (%3.7) içeriklerinde tespit edilen artışlar önemsiz bulunmuştur. Ayrıca, Cd stresine göre Cd+SNP-k uygulaması ile hıyarın gövde/kök oranı (%54.8) ve kök Cd biyokonsantrasyonunda da (%13.3) artış saptanmıştır. Bunun aksine, Cd stresine göre Cd+SNP-k uygulaması ile gövde Cd konsantrasyonu (%9.7) ve Cd translokasyonunda (%19.4) önemli azalmalar belirlenirken, bitki boyu (%10.0) kök yaş ağırlığı (%16.0), kök kuru ağırlığı (%8.6), kök uzunluğu (%6.3) ile klorofil *b* (%3.9) içeriğinde tespit edilen azalmalar önemsiz bulunmuştur. Ayrıca, Cd stresine göre Cd+SNP-k uygulaması ile Cd tolerans indeksi (%6.3) ve gövde Cd biyokonsantrasyonunda (%9.4) azalmalar saptanmıştır.

Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile hıyarın kök Cd konsantrasyonu (%36.7) ve köklerle net Cd akümülyasyonunda (%42.1) önemli artışlar tespit edilirken, gövde yaş ağırlığı, gövde kuru ağırlığı (%22.7), bitki boyu (%6.6), toplam Cd akümülyasyon oranı (%36.1) ile fotosentetik pigment içeriklerinde belirlenen artışlar önemsiz bulunmuştur. Ayrıca, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile hıyarın gövde/kök oranı (%53.9) ve kök Cd biyo-konsantrasyonunda da (%36.7) artışlar saptanmıştır. Buna karşın, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile hıyarın kök uzunluğu (%16.5) ve Cd translokasyonunda (%29.2) önemli azalmalar belirlenirken, kök yaş ve kuru ağırlıkları, kök hacmi ve gövde Cd konsantrasyonunda tespit edilen azalmalar önemsiz bulunmuştur. Ayrıca, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile Cd tolerans indeksi (%16.4) ve gövde Cd biyokonsantrasyonunda (%3.1) azalmalar tespit edilmiştir.

Cd stresi altındaki acurun gövde yaş ağırlığı (%55.5), gövde kuru ağırlığı (%73.0), bitki boyu (%41.4), kök yaş ağırlığı (%70.7), kök kuru ağırlığı (%68.2), gövde/kök oranında (%14.3), kök uzunluğu (%39.3), kök hacmi (%54.7), klorofil *a* (%28.2), klorofil *b* (%43.4), klorofil *a+b* (%32.5) ve karotenoid (%30.3) içeriklerinde önemli azalmalar saptanmıştır. Ayrıca, kontrol uygulamasına göre Cd tolerans indeksi (%39.2) ve Cd translokasyon faktöründe (%51.4) azalmalar tespit edilmiştir. Bunun aksine, Cd stresi altındaki acurun gövde Cd konsantrasyonu (28.3 kat), kök Cd konsantrasyonu (57.9 kat) ve köklerle net Cd akümülyasyonu (37.5 kat) önemli artışlar gösterirken, toplam Cd akümülyasyon oranında (3.1 kat) tespit edilen artış önemsiz bulunmuştur.

Cd stresine göre Cd+SNP-k uygulaması ile acurun kök uzunluğu (%43.1), klorofil *a* (%19.8), klorofil *b* (%26.8), klorofil *a+b* (%21.3) ve karotenoid (%17.5) içeriklerinde önemli artışlar belirlenirken, gövde yaş ve kuru ağırlığı, kök yaş ve kuru ağırlığı ve toplam Cd akümülyasyon oranında tespit edilen artışlar önemsiz bulunmuştur. Ayrıca, Cd stresi göre Cd+SNP-k uygulaması ile acurun Cd tolerans indeksinin %42.9 düzeyinde arttığı görülmüştür. Bunun aksine, Cd stresine göre Cd+SNP-k uygulaması ile acurun gövde Cd konsantrasyonu (%28.1) ve kök Cd konsantrasyonunda (%16.3) önemli azalmalar belirlenirken, bitki boyu, kök hacmi, Cd translokasyon faktörü, köklerle net Cd akümülyasyonunda tespit edilen azalmalar önemsiz bulunmuştur. Ayrıca, Cd stresine göre Cd+SNP-k uygulaması ile acurun gövde Cd biyokonsantrasyonu (%28.0) ve kök Cd biyokonsantrasyonunda (%16.3) azalmalar tespit edilmiştir.

Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile acurun gövde yaş ağırlığı (%57.4), gövde kuru ağırlığı (%42.1), bitki boyu (%12.9), kök yaş ağırlığı (%50.8), kök kuru ağırlığı (%47.3), kök uzunluğu (%22.1), Cd translokasyon faktörü (%25.1), klorofil *a* (%67.0), klorofil *b* (%31.2), klorofil *a+b* (%58.5) ve karotenoid (%72.3) içeriklerinde önemli artışlar belirlenirken, kök hacmi, köklerle net Cd akümüasyonu ve toplam Cd akümüasyon oranında tespit edilen artışlar önemsiz bulunmuştur. Bununla birlikte, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile gövde/kök oranında %45.1 ve Cd tolerans indeksinde ise %22.0 düzeyinde artışlar saptanmıştır. Buna karşın, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile acurun gövde Cd konsantrasyonu (%6.6) ve kök Cd konsantrasyonunda (%25.3) önemli azalmalar belirlenmiştir. Ayrıca, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile acurun gövde Cd biyokonsantrasyonu (%6.6) ve kök Cd biyokonsantrasyonunda (%25.2) azalmalar tespit edilmiştir.

Cd stresi altındaki kavunun gövde yaş ağırlığı (%69.6), gövde kuru ağırlığı (%77.4), bitki boyu (%35.0), kök yaş ağırlığı (%84.1), kök kuru ağırlığı (%83.5), kök uzunluğu (%36.7), kök hacmi (%83.3), Cd translokasyon faktörü (%75.1), klorofil *a* (%37.6), klorofil *b* (%40.7), klorofil *a+b* (%38.4) ve karotenoid (%35.0) içeriklerinde önemli azalmalar saptanmıştır. Ayrıca, kontrol uygulamasına göre acurun Cd tolerans indeksinde %36.7 düzeyinde bir azalma tespit edilmiştir. Bunun aksine, Cd stresi altındaki kavunun gövde Cd konsantrasyonu (32.1 kat), kök Cd konsantrasyonu (129.4 kat) ve köklerle net Cd akümüasyonu (69.5 kat) önemli artışlar gösterirken, toplam Cd akümüasyon oranında (2.5 kat) tespit edilen azalmalar önemsiz bulunmuştur. Bununla birlikte, Cd stresinde acurun gövde/kök oranının %39.6 düzeyinde bir artış belirlenmiştir.

Cd stresine göre Cd+SNP-k uygulaması ile kavunun bitki boyu (%14.9), kök kuru ağırlığı (%83.5) ve kök uzunluğunda (%32.0) önemli artışlar belirlenirken, gövde yaş ağırlığı (%33.6), gövde kuru ağırlığı (%22.6), kök yaş ağırlığı (%32.5), kök hacmi (%23.0), Cd translokasyon faktörü (%7.7), toplam Cd akümüasyon oranı (%28.6), klorofil *a* (%5.1), klorofil *b* (%5.1) ve klorofil *a+b* (%4.8) içeriklerinde tespit edilen artışlar önemsiz bulunmuştur. Ayrıca, kavunun gövde/kök oranı (%19.2) ve Cd tolerans indeksinin (%32.1) Cd stresine göre Cd+SNP-k uygulaması ile arttığı saptanmıştır. Buna karşın, Cd stresine göre Cd+SNP-k uygulaması ile kavunun gövde Cd konsantrasyonu (%20.9), kök Cd konsantrasyonu

(%26.8) ve köklerle net Cd akümülyasyonunda (%31.1) önemli azalmalar belirlenirken, karotenoid içeriğinde tespit edilen azalmalar ise önemsiz bulunmuştur. Ayrıca, Cd stresine göre Cd+SNP-k uygulaması ile kavunun gövde Cd biyokonsantrasyonu (%20.6) ve kök Cd biyokonsantrasyonunda (%26.7) azalmalar tespit edilmiştir.

Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile kavunun gövde yaş ağırlığı (%42.9), gövde kuru ağırlığı (%52.8), bitki boyunda (%15.3) önemli artışlar belirlenirken, kök yaş ağırlığı, kök kuru ağırlığı, kök hacmi (%29.9), Cd translokasyon faktörü (%11.5) ve toplam Cd akümülyasyon oranında (2.0 kat) tespit edilen artışlar önemsiz bulunmuştur. Bununla birlikte, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile kavunun gövde/kök oranında %13.3 düzeyinde bir artış saptanmıştır. Buna karşın, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile kavunun kök uzunluğu (%14.5) ve kök Cd konsantrasyonunda (%12.4) önemli azalmalar belirlenirken, gövde Cd konsantrasyonu, köklerle net Cd akümülyasyonu, klorofil *a*, klorofil *b*, klorofil *a+b* ve karotenoid içeriklerinde tespit edilen azalmalar önemsiz bulunmuştur. Ayrıca, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile kavunun Cd tolerans indeksi (%14.5), gövde Cd biyokonsantrasyonu (%1.9) ve kök Cd biyokonsantrasyonunda (%12.4) azalmalar belirlenmiştir.

Cd stresi koşullarında karpuzun gövde yaş ağırlığı (%68.9), gövde kuru ağırlığı (%67.3), bitki boyu (%53.2), kök yaş ağırlığı (%51.8), kök kuru ağırlığı (%45.1), kök uzunluğu (%19.4), kök hacmi (%68.6), Cd translokasyonu (%68.1) ile klorofil *a* (%23.3), klorofil *b* (%30.7), klorofil *a+b* (%25.3) ve karotenoid (%18.5) içeriklerinde önemli azalmalar saptanmıştır. Ayrıca, kontrol uygulamasına göre Cd stresi ile karpuzun gövde/kök oranı (%39.3) ve Cd tolerans indeksinde (%19.4) azalmalar tespit edilmiştir. Bunun aksine, Cd stresi koşullarında karpuzun gövde Cd konsantrasyonu (27.4 kat), kök Cd konsantrasyonu (86.4 kat) ve köklerle net Cd akümülyasyonunda (26.4 kat) önemli artışlar görülürken, toplam Cd akümülyasyon oranında 4.7 kat olarak tespit edilen artışın önemsiz olduğu görülmüştür.

Cd stresine göre Cd+SNP-k uygulaması ile karpuzun gövde yaş ağırlığı (%37.4), bitki boyu (%59.1), kök uzunluğunda (%45.7), kök hacmi (2.79 kat) ve klorofil *b* (%16.0) içeriğinde önemli artışlar belirlenirken, gövde kuru ağırlığı (%28.2), kök yaş ağırlığı (%62.3), kök kuru ağırlığı (%42.0) klorofil *a* ve klorofil *a+b* içeriklerinde tespit edilen artışlar önemsiz bulunmuştur. Ayrıca, Cd stresine göre Cd+SNP-k uygulaması ile karpuzun

gövde/kök oranı (%10.6) ve Cd tolerans indeksinde de (%45.7) artışlar saptanmıştır. Bunun aksine, Cd stresine göre Cd+SNP-k uygulaması ile karpuzun gövde Cd konsantrasyonu (%63.8), kök Cd konsantrasyonu (%40.1), Cd translokasyonu (%39.9) ve köklerle net Cd akümülyasyonunda (%54.9) önemli azalmalar belirlenirken, toplam Cd akümülyasyon oranı ve karotenoid içeriğinde tespit edilen azalmalar önemsiz bulunmuştur. Ayrıca, Cd stresine göre Cd+SNP-k uygulaması ile karpuzun gövde Cd biyokonsantrasyonu (%15.4) ve kök Cd biyokonsantrasyonunda (%40.1) azalmalar saptanmıştır.

Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile karpuzun Cd translokasyon faktöründe (%27.1) ve gövde/kök oranında (%40.3) önemli artışlar belirlenmiştir. Buna karşın, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile karpuzun bitki boyu (%34.8), gövde Cd konsantrasyonu (%14.9) ve kök Cd konsantrasyonunda (%33.5) önemli azalmalar belirlenirken, gövde yaş ve kuru ağırlıkları, kök yaş ve kuru ağırlıkları, kök uzunluğu (%14.8), kök hacmi (%35.9), köklerle net Cd akümülyasyonu, toplam Cd akümülyasyon oranı (%35.6) ve fotosentetik pigment içeriklerinde tespit edilen azalmalar önemsiz bulunmuştur. Ayrıca, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile karpuzun Cd tolerans indeksi (%14.8), gövde Cd biyokonsantrasyonu (%15.4) ve kök Cd biyokonsantrasyonunda (%33.5) azalmalar tespit edilmiştir.

Cd stresinde sakız kabağın gövde yaş ağırlığı (%40.0), gövde kuru ağırlığı (%60.9), bitki boyu (%46.2), kök yaş ağırlığı (%44.6), kök kuru ağırlığı (%35.5), kök uzunluğu (%15.7), Cd translokasyon faktörü (%50.5), klorofil *a* (%19.0), klorofil *b* (%25.4), klorofil *a+b* (%20.7) ve karotenoid (%19.9) içeriklerinde önemli azalmalar saptanırken, kök hacminde (%7.3) tespit edilen azalma önemsiz bulunmuştur. Ayrıca, kontrol uygulamasına göre sakız kabağın gövde/kök oranı (%39.5) ve Cd tolerans indeksinde (%15.7) azalmalar belirlenmiştir. Bunun aksine, sakız kabağın gövde Cd konsantrasyonu (23.3 kat), kök Cd konsantrasyonu (47.0 kat), köklerle net Cd akümülyasyonu (23.2 kat) ve toplam Cd akümülyasyon oranı (6.0 kat) Cd stresi koşullarında önemli artışlar göstermiştir.

Cd stresine göre Cd+SNP-k uygulaması ile sakız kabağın gövde yaş ağırlığı (%57.6), gövde kuru ağırlığı (2.04 kat), kök yaş ağırlığı (%31.3), kök kuru ağırlığı (%21.8), toplam Cd akümülyasyon oranı (2.09 kat), klorofil *a* (%26.2), klorofil *b* (%31.0), klorofil *a+b* (%27.4) ve karotenoid (%19.9) içeriklerinde önemli artışlar belirlenirken, kök hacmi ve kök Cd konsantrasyonunda tespit edilen artışlar önemsiz bulunmuştur. Ayrıca, Cd stresine göre

Cd+SNP-k uygulaması ile sakız kabağın gövde/kök oranında da (%67.6) artış saptanmıştır. Bunun aksine, Cd stresine göre Cd+SNP-k uygulaması ile sakız kabağın gövde Cd konsantrasyonu (%58.5), Cd translokasyonu (%58.6) ve köklerle net Cd akümülyasyonunda (%13.4) önemli azalmalar belirlenirken, sakız kabağın bitki boyu ve kök uzunluğunda tespit edilen azalmalar önemsiz bulunmuştur. Ayrıca, Cd stresine göre Cd+SNP-k uygulaması ile sakız kabağın Cd tolerans indeksi (%1.7) ve gövde Cd biyokonsantrasyonunda (%58.6) azalmalar tespit edilirken, kök Cd biyokonsantrasyonunda ise bir değişim belirlenmemiştir.

Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile sakız kabağın gövde kuru ağırlığı (%23.5), kök yaş ağırlığı (%21.6), kök kuru ağırlığı (%24.2), kök uzunluğu (%10.6), kök hacmi (%11.4), gövde Cd konsantrasyonu (%12.8), Cd translokasyon faktörü (%21.1), toplam Cd akümülyasyon oranı (%55.6), klorofil *a* (%29.1), klorofil *b* (%32.3), klorofil *a+b* (%29.9) ve karotenoid (%29.7) içeriklerinde önemli artışlar belirlenirken, gövde yaş ağırlığı, bitki boyu ve köklerle net Cd akümülyasyonunda tespit edilen artışlar önemsiz bulunmuştur. Bununla birlikte, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile Cd tolerans indeksi (%10.7) ve gövde Cd biyokonsantrasyonunda da (%12.9) artışlar saptanmıştır. Buna karşın, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile sakız kabağın kök Cd konsantrasyonunda (%6.8) önemli bir azalma belirlenmiştir. Ayrıca, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile sakız kabağın gövde/kök oranı (%0.2) ve kök Cd biyokonsantrasyonunda da (%6.7) azalmalar tespit edilmiştir.

Cd stresi koşullarında balkabağının gövde kuru ağırlığı (%41.3), kök yaş ağırlığı (%35.2), kök kuru ağırlığı (%33.7), kök uzunluğu (%19.7), kök hacmi (%30.0) ve Cd translokasyonunda (%15.5) önemli azalmalar saptanırken, bitki boyu ve klorofil *b* içeriğinde tespit edilen azalmalar önemsiz bulunmuştur. Ayrıca, kontrol uygulamasına göre Cd stresi ile balkabağının gövde/kök oranı (%11.5) ve Cd tolerans indeksinde (%19.7) azalmalar tespit edilmiştir. Buna karşın, Cd stresi koşullarında balkabağının gövde Cd konsantrasyonu (21.9 kat), kök Cd konsantrasyonu (26.0 kat), köklerle net Cd akümülyasyonu (21.9 kat) ve toplam Cd akümülyasyon oranında (8.7 kat) önemli artışlar bulunurken, gövde yaş ağırlığı ile klorofil *a*, klorofil *a+b* ve karotenoid içeriklerinde tespit edilen artışlar önemsiz bulunmuştur.

Cd stresine göre Cd+SNP-k uygulaması ile balkabağının gövde kuru ağırlığı (%36.0), kök kuru ağırlığı (%6.1), kök uzunluğu (%23.0), Cd translokasyonu (%40.7) ve



toplam Cd akümülyasyon oranında (%29.4) önemli artışlar belirlenmiştir. Ayrıca, Cd stresi göre Cd+SNP-k uygulaması ile balkabağının gövde/kök oranının %28.4 düzeyinde ve Cd tolerans indeksinin ise %23.0 düzeyinde arttığı görülmüştür. Bunun aksine, Cd stresine göre Cd+SNP-k uygulaması ile balkabağının gövde yaş ağırlığı (%6.6), bitki boyu (%8.9), kök yaş ağırlığı (%10.7), gövde Cd konsantrasyonu (%9.4) ve kök Cd konsantrasyonunda (%35.7) önemli azalmalar belirlenirken, kök hacmi, köklerle net Cd akümülyasyonu (%9.1) ve fotosentetik pigment içeriklerinde tespit edilen azalmalar önemsiz bulunmuştur. Ayrıca, Cd stresine göre Cd+SNP-k uygulaması ile balkabağının gövde Cd biyokonsantrasyon (%9.9) ve kök Cd biyokonsantrasyonunda (%35.7) azalmalar saptanmıştır.

Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile sakızkabağın gövde kuru ağırlığı (%18.7), kök uzunluğu (%16.9), gövde Cd konsantrasyonu (%9.5), Cd translokasyonu (%21.7) ve toplam Cd akümülyasyon oranında (%28.2) önemli artışlar belirlenirken, köklerle net Cd akümülyasyonunda tespit edilen artış önemsiz bulunmuştur. Bununla birlikte, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile gövde/kök oranı (%23.0), Cd tolerans indeksi (%16.9) ve gövde Cd biyokonsantrasyonda (%9.3) artışlar saptanmıştır. Buna karşın, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile balkabağının gövde yaş ağırlığı (%12.6), bitki boyu (%8.3), kök yaş ağırlığı (%9.7) ve klorofil *a+b* (%3.0) içeriğinde önemli azalmalar belirlenirken, kök kuru ağırlığı, kök hacmi, kök Cd konsantrasyonu (%10.2) ile klorofil *a*, klorofil *b* ve karotenoid içeriklerinde tespit edilen azalmalar önemsiz bulunmuştur. Ayrıca, Cd stresine göre Cd+SNP-y uygulaması ile balkabağının kök Cd biyokonsantrasyonunda (%6.7) azalmalar tespit edilmiştir.

Cd stresi koşullarında Cd tolerans indeksi en yüksek tür olarak sakız kabak (%84.3) belirlenmiş, bunu karpuz (%80.6), hıyar (%80.4), balkabağı (%80.3) ve kavun (%63.3) izlemiş ve en düşük Cd tolerans indeksine sahip tür olarak ise acur (%60.8) tespit edilmiştir. Cd tolerans indekslerine göre Cd toksisitesine toleranslılık sıralaması ise; *sakız kabak* > *karpuz* > *hıyar* > *balkabağı* > *kavun* > *acur* olarak saptanmıştır. Cd+SNP-k uygulaması koşullarında Cd tolerans indeksi en yüksek sahip tür olarak karpuz (%117.4) tespit edilmiş, bunu balkabağı (%98.8), acur (%86.9), kavun (%83.6) ve sakız kabak (%82.9) izlemiş ve en düşük Cd tolerans indeksi sahip tür ise hıyar (%75.3) olarak belirlenmiştir. Cd+SNP-k koşullarında Cd tolerans indekslerine göre Cd toksisitesine toleranslılık sıralaması *karpuz* > *balkabağı* >

*acur* > *kavun* > *sakız kabak* > *hıyar* olarak tespit edilmiştir. Cd+SNP-y uygulaması koşullarında Cd tolerans indeksi en yüksek sahip tür olarak balkabağı (%93.9) tespit edilmiş, bunu sakız kabak (%93.3), acur (%74.2), karpuz (%68,7) ve hıyar (%67.2) izlemiş ve en düşük Cd tolerans indeksi sahip tür ise kavun (%54.1) olarak belirlenmiştir. Cd+SNP-y koşulunda Cd tolerans indekslerine göre Cd toksisitesine toleranslılık sıralaması *balkabağı* > *sakız kabak* > *acur* > *karpuz* > *hıyar* > *kavun* olarak saptanmıştır.

Cd stresi, Cd+SNP-k ve Cd+SNP-y koşullarında en yüksek Cd translokasyonuna sahip tür olarak balkabağı (sırasıyla %6.78, %9.54 ve %8.25) belirlenmiştir. Cd stresi koşullarında kavun (%3.90), Cd+SNP-k koşullarında sakız kabak (%2.36) ve Cd+SNP-y koşullarında ise kavun (%4.35) en düşük Cd translokasyonuna sahip türler olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, Cd toksisitesi koşullarına göre, Cd translokasyonunun Cd+SNP-k uygulaması koşullarında kavun ve balkabağı hariç diğer türlerde azaldığı, Cd+SNP-y uygulaması koşullarında ise hıyar hariç diğer türlerde arttığı belirlenmiştir. Cd translokasyonuna göre bir sıralama yapıldığında *Cucurbitaceae* familyası türlerinin; Cd stresi koşullarında *kavun* < *karpuz* < *acur* < *sakız kabak* < *hıyar* < *balkabağı* şeklinde, Cd+SNP-k uygulaması koşullarında *sakız kabak* < *karpuz* < *acur* < *kavun* < *hıyar* < *balkabağı* şeklinde ve Cd+SNP-y uygulaması koşullarında ise *kavun* < *hıyar* < *karpuz* < *acur* < *sakız kabak* < *balkabağı* şeklinde bir sıralama gösterdikleri belirlenmiştir.

Yapılan çalışma ile *Cucurbitacea* familyasına ait altı türün toprak üstü ve kök kuru ağırlıklarındaki yüzde azalma temel alındığında, Cd stresine en dayanıklı türün balkabağı ve en duyarlı türün ise kavun olduğu belirlenmiştir. Toprak üstü aksam kuru madde miktarındaki azalmalara göre Cd stresine dayanıklılık sıralamasının *balkabağı* > *hıyar* > *sakız kabak* > *karpuz* > *acur* > *kavun* şeklinde olduğu saptanmıştır. Cd toksisitesinin giderilmesinde, SNP uygulamasının etkisi bitkinin toprak üstü aksam gelişimine göre kök gelişiminde daha fazla olmuştur. Cd translokasyonuna göre bitkiler sıralandığında ise; kökten gövdeye daha az Cd taşıyan, sürgünlerinde diğer türlere göre daha az Cd biriktiren ve Cd zararlanmasını bitkiye en az yansıtan bitkilerin kavun ve onu takiben de karpuz olduğu görülmüştür. Bu nedenle, besin zinciri dikkate alındığında *Cucurbitacea* türleri arasında, Cd ile kirlenmiş tarımsal alanlarda kavun ve karpuzun, toksik Cd seviyesinin altındaki tarımsal alanlarda ise balkabağı ve hıyar yetiştirilmesinin daha uygun olacağı düşünülmektedir.

Bünyesine aldığı Cd’u üst yapraklarına en fazla taşıyan tür olan balkabağının akümü-lasyon oranının en yüksek olduğu belirlenmiştir. Biyoremediasyon yeteneği fazla olan balkabağının, Cd ile kirlı alanların temizlenmesinde kullanılabileceği düşünölmektedir. SNP uygulamalarına türlerin tepkilerinin ayrımlı olduğu, karpuz hariç diğer türlerin köklerle net Cd akümü-lasyonu ve toplam Cd akümü-lasyon oranının SNP uygulamalarıyla arttığı ve besin maddesi dengesizliklerinin SNP uygulamasıyla hafifletileceği sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak, *Cucurbitacea* familyası bitkilerinde Cd stresinin azaltılmasında SNP’nin etkisinin bilinmesi, toksisite koşullarına dayanıklı türlerin tespit edilmesi ve yetiştirilecek türlerin se-çimine sağlayacağı katkı ile ürün miktarındaki azalmanın sebep olduğu ekonomik zararlan-mayı en aza indirecektir. Ayrıca elde edilen sonuçlar, *Cucurbitacea* familyasına ait türler için sürdürülebilir tarımsal üretim açısından yeterli miktarda verinin üretilmesini sağlayacak olup sera koşullarında yapılan bu çalışmanın tarla koşullarına uygulanması ile Cd toksik alanlarda SNP uygulaması yapılacak bir çalışma ile desteklenmesi gerekmektedir.

## KAYNAKÇA

- Alia-Saradhi, P. P. (1991). "Proline accumulation under heavy metal stress." *Journal of Plant Physiology*, 138, 554-558. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)80240-3](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)80240-3)
- Alkan-Torun, A., Kaçar, Y. A., Çakmak, Ö., Şimşek, Ö., Erdem, H., Yardım, P. ve Tolay, İ. (2009). "İn vitro doku kültürü ve su kültürü koşullarında maxma 14 kiraz anacında artan dozlarda uygulanan kadmiyum'un bitki büyümesi ve kadmiyum alımına etkisi". *Harran Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 13(4), 1-11.
- Andresen, E. ve Küpper, H. (2012). "Cadmium toxicity in plants". A. Sigel, H. Sigel and R. K. O. Sigel (ed.). in: *Cadmium: From toxicity to essentiality. Metal ions in life sciences*, (11), 395-413. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-5179-8\\_13](https://doi.org/10.1007/978-94-007-5179-8_13)
- Arasimowicz-Jelonek, M., Floryszak-Wieczorek, J. ve Gwózdź, E. A. (2011). "The message of nitric oxide in cadmium challenged plants." *Plant Science*, 181(5), 612-620. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.03.019>
- Arasimowicz-Jelonek, M., Floryszak-Wieczorek, J., Deckert, J., Rucinska- Sobkowiak, R., Gzyl, J., Pawlak- Sprada, S., Abramowski, D., Jelonek, T. ve Gwozdz, E. A. (2012). "Nitric oxide implication in cadmium-induced programmed cell death in roots and signalling response of yellow lupine plants". *Plant Physiology and Biochemistry*, 58,124–134. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.06.018>
- Asgher, M., Khan, M. I., Anjum, N. A. ve Khan, N. A. (2015). "Minimising toxicity of cadmium in plants role of plant growth regulators." *Protoplasma*, 252(2), 399-413. <https://doi.org/10.1007/s00709-014-0710-4>
- Aybar, M., Bilgin, A. ve Sağlam, B. (2015). "Fitoremediasyon yöntemi ile topraktaki ağır metallerin giderimi." *Artvin Çoruh Üniversitesi Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 1(1), 59-65.
- Azizi, I., Esmailpour, B. ve Fatemi, H. (2021). "Exogenous nitric oxide on morphological, biochemical and antioxidant enzyme activity on savory (*Satureja hortensis* L.) plants under cadmium stress." *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 20(6), 417-423. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.05.003>

- Balcı, G. (2018). “24-epibrassinosteroidin kadmiyum stresi koşullarında çilek fidele-rinin vejetatif büyüme kriterleri üzerine etkisi.” *Bahçe*, 47(2), 33-38.
- Benavides, M. P., Gallego, S. M. ve Tomaro, M. L. (2005). “Cadmium toxicity in plants”. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(1), 21-34. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202005000100003>
- Bosiacki, M. (2008). “Accumulation of cadmium in selected species of ornamental plants”. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 7(2), 21-31.
- Burzyński, M. ve Żurek, A. (2007). “Effects of copper and cadmium on photosynthesis in cucumber cotyledons.” *Photosynthetica*, 45(2), 239-244. <https://doi.org/10.1007/s11099-007-0038-9>
- Chen, F., Wang, F., Sun, H., Cai, Y., Mao, W., Zhang, G., Vincze, E. ve Wu, F. (2010). “Genotype-dependent effect of exogenous nitric oxide on Cd-induced changes in antioxidative metabolism ultrastructure and photosynthetic performance in barley seedlings (*Hordeum vulgare*).” *Journal of Plant Growth Regulation*, 29, 394-408. <https://doi.org/10.1007/s00344-010-9151-2>
- Chen, W., Dong, Y., Hu, G. ve Bai, X. (2018). “Effects of exogenous nitric oxide on cadmium toxicity and antioxidative system in perennial ryegrass.” *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 18(1), 129-143. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162018005000601>
- Choppala, G., Saifullah., Bolan, N., Bibi, S., Iqbal, M., Rengel, Z., Kunhikrishan, A., Ashwath, N. ve Ok, Y. S. (2014). “Cellular mechanisms in higher plants governing tolerance to cadmium toxicity”. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 33(5), 374-391. <https://doi.org/10.1080/07352689.2014.903747>
- Cikili, Y., Kulac, S., Samet, H. ve Filiz, E. (2019). “Effects of exogenous nitric oxide on cadmium toxicity in black poplar (*Populus nigra*): Physiological approaches.” *Acta Botanica Croatica*, 78(2), 116–124. <https://doi.org/10.2478/botcro-2019-0018>
- Clemens, S. (2006). “Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants.” *Biochimie*, 88, 1707-1719. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2006.07.003>

- Correa-Aragunde, N., Graziano, M. ve Lamattina, L. (2004). "Nitric oxide plays a central role in determining lateral root development in tomato". *Planta*, 218, 900–905. <https://doi.org/10.1007/s00425-003-1172-7>
- Çanakçı-Güलगül, S., Deveci, D. ve Karabulut, F. (2019). "Mısır (*Zea mays* L.) fidelerinde kadmiyum toksisitesi ile nitrik oksit arasındaki biyokimyasal ilişkiler." *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 376-386. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.459425>
- Çıkılı, Y. ve Samet, H. (2018). "Effects of excess cadmium on growth, tolerance and physiological characteristics of purslane varieties." *Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Science*, 28 (5), 7-18.
- Çıkılı, Y., Samet, H. ve Dursun, S. (2016). "Cadmium toxicity and its effects on growth and metal nutrient ion accumulation in *Solanaceae* plants." *Journal of Agricultural Sciences/Tarım Bilimleri Dergisi*, 22(4), 576-587. <https://doi.org/10.1501/Tarimbil0000001416>
- Çikili, Y., Samet, H. ve Çiçek, N. (2020). "Response of sunflower (*Helianthus annuus* L.) at early growth stage to cadmium exposure." *Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences*, 7(4), 1098-1107. <https://doi.org/10.30910/turkjans.682480>
- Deveci, D. (2015). "Mısır (*Zea mays* L.) bitkilerinde kadmiyum toksisitesi ile nitrik oksit arasındaki ilişkinin incelenmesi." Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Dong, Y. J., Chen, W. F., Liu, F. Z. ve Wan, Y. S. (2020). "Physiological responses of peanut seedlings to exposure to low or high cadmium concentration and the alleviating effect of exogenous nitric oxide to high cadmium concentration stress." *Plant Biosystems*, 154(3), 405-412. <https://doi.org/10.1080/11263504.2019.1651771>
- Dong, Y., Chen, W., Xu, L., Kong, J., Liu, S. ve He, Z. (2016). "Nitric oxide can induce tolerance to oxidative stress of peanut seedlings under cadmium toxicity." *Plant Growth Regulation*, 79(1), 19-28. <https://doi.org/10.1007/s10725-015-0105-3>
- Dorneles, A. O. S., Soares, P. A., Possebom, G., Peligrinotti, T. C., Rossato, L. V. ve Almeri, T. L. (2019). "Ameliorate the cadmium toxicity in *Solanum tuberosum* L. plants with

- selenium and silicon application”. *Advances in Horticultural Science*, 33(1), 49-56. <https://doi.org/10.13128/ahs-22863>
- Durner, J. ve Klessig, D. F. (1999). “Nitric oxide as a signal in plants.” *Current Opinion in Plant Biology*, 2, 369-374. [https://doi.org/10.1016/s1369-5266\(99\)00007-2](https://doi.org/10.1016/s1369-5266(99)00007-2)
- Ekinci, M., Örs, S., Turan, M. ve Yıldırım E. (2018). “Nitrik oksit uygulamalarının bitkilerde abiyotik stres şartlarına toleransı arttırmadaki etkileri.” *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 28(2), 254-265. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.427960>
- Emer, Ö. T. ve Çıkkılı, Y. (2021). “Effect of Silicon on Ameliorating of Cadmium Stress in Solanaceae Family Plants. *ISPEC 6th International Conference on Agriculture, Animal Science and Rural Development*, pp. 46-48, 16-18 Ma y 2021, Siirt, Turkey.
- Farooq, M. A., Ali, S., Hameed, A., Ishaque, W., Mahmood, K. ve Iqbal, Z. (2013). “Alleviation of cadmium toxicity by silicon is related to elevated photosynthesis, antioxidant enzymes; suppressed cadmium uptake and oxidative stress in cotton”. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 96, 242-249. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.07.006>
- Farooq, M. A., Detterbeck, A., Clemens, S. ve Dietz, K. J. (2016). “Silicon-induced reversibility of cadmium toxicity in rice”. *Journal of Experimental Botany*, 67, 3573-3585. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw175>
- Feng, J., Shi, Q., Wang, X., Wei, M., Yang, F. ve Xu, H. (2010). “Silicon supplementation ameliorated the inhibition of photosynthesis and nitrate metabolism by cadmium toxicity in *Cucumis sativus* L.”. *Scientia Horticulturae*, 123, 521–530. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.10.013>
- Gichner, T., Patková, Z., Száková, J. ve Demnerová, K. (2006). “Toxicity and DNA damage in tobacco and potato plants growing on soil polluted with heavy metals”. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 65, 420-426. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2005.08.006>
- Gonçalves, J. F., Antes, F. G., Maldaner, J., Pereira, L. B., Tabaldi, L. A., Rauber, R., Rosatoa, L. V., Bisognin, D. A., Dressler, V. L., Flores, E. M. M. ve Nicoloso, F. T. (2009). “Cadmium and mineral nutrient accumulation in potato plantlets grown under

- cadmium stress in two different experimental culture conditions.” *Plant Physiology and Biochemistry*, 47(9), 814-821. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2009.04.002>
- Gonçalves, J. F., Becker, A. G., Cargnelutti, D., Tabaldi, L. A., Pereira, L. B., Battisti, V., Spanevello, R. M., Morsch, V. M., Nicoloso, F. T. ve Schetinger, M. R. C. (2007). “Cadmium toxicity causes oxidative stress and induces response of the antioxidant system in cucumber seedlings”. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(3), 223-232. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000300006>
- Gouia, H., Gorbel, M. H. ve Meyer, C. (2000). Effects of cadmium on activity of nitrate reductase and on other enzymes of the nitrate assimilation pathway in bean. *Plant Physiology and Biochemistry*, 38, 629-638. [https://doi.org/10.1016/S0981-9428\(00\)00775-0](https://doi.org/10.1016/S0981-9428(00)00775-0)
- Groppa, M. D., Rosales, E. P., Iannone, M. F. ve Benavides, M. P. (2008). “Nitric oxide, polyamines and Cd-induced phytotoxicity in wheat roots”. *Phytochemistry*, 69, 2609–2615. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2008.07.016>
- Guo, L., Chen, A., He, N., Yang, D. ve Liu, M. (2017). “Exogenous silicon alleviates cadmium toxicity in rice seedlings in relation to cadmium distribution and ultrastructure changes”. *Journal of Soils and Sediments*, 18, 1691-1700. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1902-2>
- Guo-Yan, T. ve Marschner, H. (1995). “Uptake, distribution and binding of cadmium and nickel in different plant species.” *Journal of Plant Nutrition*, 18(12), 2691-2706. <https://doi.org/10.1080/01904169509365094>
- Gür, N., Topdemir, A., Munzuroğlu, Ö. ve Çobanoğlu, D. (2004). Ağır metal iyonlarının ( $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{Pb}^{+2}$ ,  $\text{Hg}^{+2}$ ,  $\text{Cd}^{+2}$ ) *Clivia* sp. bitkisi polenlerinin çimlenmesi ve tüp büyümesi üzerine etkileri. *F.Ü. Fen ve Matematik Bilimleri Dergisi*, 16(2), 177-182.
- He, J., Ren, Y., Chen, X. ve Chen, H. (2014). “Protective roles of nitric oxide on seed germination and seedling growth of rice (*Oryza sativa* L.) under cadmium stress.” *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 108, 114-119. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.05.021>



- Hsu, Y. T. ve Kao, C. H. (2004). "Cadmium toxicity is reduced by nitric oxide in rice leaves". *Plant Growth Regulation*, 42, 227-238. <https://doi.org/10.1023/B:GROW.0000026514.98385.5c>
- Jelonek, M. A., Wiczorek, J. F. ve Gwozdz, E. A. (2011). "The Massage of Nitric Oxide in Cadmium Challenged Plants". *Plant Science*, 181(5), 612-620. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.03.019>
- Jhanji, S., Setia, R. C., Kaur, N., Kaur, P. ve Setia, N. (2012). "Role of nitric oxide in cadmium-induced stress on growth, photosynthetic components and yield of *Brassica napus* L.". *Journal of Environmental Biology*, 33, 1027-1032.
- Kayın, G. B. (2020). "Nitrik oksit uygulamasının biber bitkisinde (*Capsicum annum* L.) kimi stres faktörleri üzerine etkisi." Doktora Tezi. Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı, Bursa. <http://hdl.handle.net/11452/15026>
- Kennedy, C. D. ve Gonsalves, F. A. N. (1987). The action of divalent zinc, cadmium, mercury, copper and lead on the trans-root potential and efflux of excised roots. *Journal of Experimental Botany*, 38, 800-817. <https://doi.org/10.1093/jxb/38.5.800>
- Kirbag-Zengin, F. ve Munzuroglu, Ö. (2006). "Toxic effects of cadmium on metabolism of sunflower (*Helianthus annuus* L.) seedlings". *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science*, 56 224-229. <https://doi.org/10.1080/0906471051003087>
- Krupa, Z., Siedlecka, A., Skorzynska-Polit, E. ve Maksymiec, W. (2002). "Heavy metal interactions with plant nutrients." M. N. V. Prasad and K. Strzalka, (ed.). in: *Physiology and Biochemistry of Metal Toxicity and Tolerance in Plants*. (p. 287-301). Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-2660-3\\_11](https://doi.org/10.1007/978-94-017-2660-3_11)
- Laspina, N. V., Groppa, M. D., Tomaro, M. L. ve Benavides, M P. (2005). "Nitric oxide protects sunflower leaves against Cd-induced oxidative stress." *Plant Science*, 169, 323-330. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2005.02.007>
- Lichtenthaler H. K. (1987). "Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes." *Methods in Enzymology*, 148, 350-382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)

- Liu, C. P., Shen, Z. G. ve Li, X. D. (2007). “Accumulation and detoxification of cadmium in *Brassica pekinensis* and *B. chinensis*”. *Biologia Plantarum*, 51(1), 116-120. <https://doi.org/10.1007/s10535-007-0023-y>
- Liu, J. G., Li, K. Q., Xu, J. K., Liang, J. S., Lu, X. L. ve Yang, J. C. (2003). “Interaction of Cd and five mineral nutrients for uptake and accumulation in different rice cultivars and genotypes”. *Field Crops Research*, 83, 271-281. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(03\)00077-7](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(03)00077-7)
- Liu, S., Yang, R., Pan, Y., Ma, M., Pan, J., Zhao, Y., Cheng, Q., Wu, M., Wang, M. ve Zhang, L. (2015). “Nitric oxide contributes to minerals absorption, proton pumps and hormone equilibrium under cadmium excess in *Trifolium repens* L. plants.” *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 119, 35-46. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.04.053>
- Liu, X., Wang, L., Liu, L., Guo, Y. ve Ren, H. (2011). “Alleviating effect of exogenous nitric oxide in cucumber seedling against chilling stress”. *African Journal of Biotechnology*, 10(21), 4380-4386. <https://doi.org/10.5897/AJB10.812>
- Liu, X., Yin, L., Deng, X., Gong, D., Du, S., Wang, S. ve Zhang, Z. (2020). “Combined application of silicon and nitric oxide jointly alleviated cadmium accumulation and toxicity in maize.” *Journal of Hazardous Materials*, 395, 122679. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122679>
- Lu, Y., Ma, H., Teng, Y., He, J., Christie, P., Zhu, L., Ren, W., Zhang, M. ve Deng, S. (2018). “Effect of silicon on growth, physiology, and cadmium translocation of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) in cadmium-contaminated soil”. *Pedosphere*, 28(4), 680-689. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60417-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60417-X)
- Lukačová Kuliková, Z. ve Lux, A. (2010). “Silicon influence on maize (*Zea mays* L.) hybrids exposed to cadmium treatment.” *Bulletin Environmental Contamination and Toxicology*, 85, 243–250. <https://doi.org/10.1007/s00128-010-0046-5>
- Lukačová, Z., Švubová, R., Kohanová, J. ve Lux, A. (2013). “Silicon mitigates the cadmium toxicity in maize in relation to cadmium translocation, cell distribution, antioxidant enzymes stimulation and enhanced endodermal apoplasmic barrier development”. *Plant Growth Regulation*, 70, 89-103. <https://doi.org/10.1007/s10725-012-9781-4>

- Ma, J., Saleem, M. H., Alsafran, M., Al Jabri, H., Mehwish, Rizwan, M., Nawaz, M., Ali, S. ve Usman, K. (2022). "Response of cauliflower (*Brassica oleracea* L.) to nitric oxide application under cadmium stress." *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 243, 113969. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113969>
- Ma, W., Xu, W., Xu, H., Chen, Y., He, Z. ve Ma, M. (2010). Nitric oxide modulates cadmium influx during cadmium-induced programmed cell death in tobacco BY-2 cells. *Planta*, 232(2), 325-335. <https://doi.org/10.1007/s00425-010-1177-y>
- Mahar, A., Wang, P., Li, R. H. ve Zhang, Z. Q. (2015). "Immobilization of lead and cadmium in contaminated soil using amendments: A review". *Pedosphere*, 25, 555-568. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)30036-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)30036-9)
- Mahmood, T., Gupta, K. J. ve Kaiser, W. M. (2009). "Cadmium stress stimulates nitric oxide production by wheat roots." *Pakistan Journal of Botany*, 41(3), 1285-1290.
- Mihaličová Malčovská, S., Dučaiová, Z., Maslaňáková, I. ve Bačkor, M. (2014). "Effect of silicon on growth, photosynthesis, oxidative status and phenolic compounds of maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium excess". *Water, Air and Soil Pollution*, 225, 2056. <https://doi.org/10.1007/s11270-014-2056-0>
- Moradi, L. ve Ehsanzadeh, P. (2015). Effects of Cd on photosynthesis and growth of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) genotypes. *Photosynthetica*, 53(4), 506-518. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0150-1>
- Moussa, H. R. (2004). "Effect of cadmium on growth and oxidative metabolism of faba bean plants". *Acta Agronomica Hungarica*, 52, 269-276. <https://doi.org/10.1556/AAgr.52.2004.3.8>
- Müftüoğlu N. M., Türkmen C. ve Çıkılı Y. (2014). Toprak ve Bitkide Verimlilik Analizleri (2. basım). Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara. ISBN: 978-605-133-895-8
- Nabaei, M. ve Amooaghaie, R. (2020). "Melatonin and nitric oxide enhance cadmium tolerance and phytoremediation efficiency in *Catharanthus roseus* (L.) Don." *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 6981-6994. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07283-4>
- Naeem, A., Saifullah, A. G. ve Farooq, M. (2014). "Suppression of cadmium concentration in wheat grains by silicon is related to its application rate and cadmium accumulating

- abilities of cultivars”. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95, 2467-2472. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6976>
- Nazar, R., Iqbal, N., Masood, A., Khan, M. I. R., Syeed, S. ve Khan, N. A. (2012). “Cadmium toxicity in plants and role of mineral nutrients in its alleviation”. *American Journal of Plant Sciences*, 3(10), 1476-1489. <https://doi.org/10.4236/ajps.2012.310178>
- Neill, S. J., Desikan, R., Clarke, A. ve Hancock, J. T. (2002). “Nitric oxide is a novel component of abscisic acid signalling in stomatal guard cell.” *Plant Physiology*, 128, 13-16. <https://doi.org/10.1104/pp.010707>
- Nwugo, C. C. ve Huerta, A. J. (2008). “Silicon-induced cadmium resistance in rice (*Oryza sativa* L.)”. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171(6), 841-848. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800082>
- Özbek H., Kaya Z., Gök M. ve Kaptan H. (1995). “Toprak Bilimi.” Çukurova Üni-versitesi Ziraat Fak. Genel Yayın No: 73, Ders Kitapları Yayın No: 16, Adana.
- Panda, P., Nath, S., Chanu, T. T., Sharma, G. D. ve Panda, S. K. (2011). “Cadmium stress-induced oxidative stress and role of nitric oxide in rice (*Oryza sativa* L.)”. *Acta Physiologia Plantarum*, 33, 1737-1747. <https://doi.org/10.1007/s11738-011-0710-3>
- Pedroso, M. C. ve Durzan, D. J. (2000). “Effect of different gravity environments on DNA fragmentation and cell death in *Kalanchoe* leaves”. *Annals of Botany*, 86, 983–994. <https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1260>
- Per, T. S., Masood, A., ve Khan, N. A. (2017). “Nitric oxide improves S-assimilation and GSH production to prevent inhibitory effects of cadmium stress on photosynthesis in mustard (*Brassica juncea* L.)”. *Nitric Oxide*, 68, 111-124. <https://doi.org/10.1016/j.niox.2016.12.012>
- Petoumenou, M. I., Pizzo, F., Cester, J., Fernández, A. ve Benfenati, E. (2015). “Comparison between bioconcentration factor (BCF) data provided by industry to the European Chemicals Agency (ECHA) and data derived from QSAR models”. *Environmental Research*, 142, 529-534. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.08.008>

- Rahman, S. U., Xuebin, Q., Yatao, X., Ahmad, M. I., Shehzad, M. ve Zain, M. (2020). "Silicon and its application methods improve physiological traits and antioxidants in *Triticum aestivum* (L.) under cadmium stress". *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20, 1110–1121. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00197-y>
- Rivetta, A, Negrini, N. ve Cocucci, M. (1997). "Involvement of Ca<sup>2+</sup>-calmodulin in Cd<sup>2+</sup> toxicity during the early phases of radish (*Raphanus sativus* L.) seed germination. *Plant Cell & Environment*, 20, 600-608. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1997.00072.x>
- Rizwan, M., Ali, S., Adrees, İbrahim, M., Tsang, D.C.V., Rehman, M. Z., Zahir, Z. A., Rinklebe, J., Tack F. M. G., and Ok, Y. O. (2017). "A critical review on effect tolerance mechanisms and management of cadmium in vegetables". *Chemosphere*, 182, 90-105. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.013>
- Rizwan, M., Meunier, J. D., Davidian, J. C., Pokrovsky, O. S., Bovet, N. ve Keller, C. (2015). "Silicon alleviates cadmium stress of wheat seedlings (*Triticum turgidum* L. cv. Claudio) grown in hydroponics". *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 1414-1427. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5351-4>
- Samarakoon, A. B. ve Rauser, W. E. (1979). "Carbohydrate levels and photoassimilate export from leaves of *Phaseolus vulgaris* exposed to excess cobalt, nickel and zinc." *Plant Physiology*, 63, 1165-1169. <https://doi.org/10.1104/pp.63.6.1165>
- Sandalio, L. M., Dalurzo, H. C., Gomez, M., Romero-Puertas, M. C. ve del Rio, L. A. (2001). "Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants". *Journal of Experimental Botany*, 52 (364), 2115-2126. <https://doi.org/10.1093/jexbot/52.364.2115>
- Sanità di Toppi, L. ve Gabbrielli, R. (1999). "Response to cadmium in higher plants". *Environmental and Experimental Botany*, 41, 105-131. [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(98\)00058-6](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(98)00058-6)
- 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. <https://doi.org/10.1080/01904167.2010.512052>

- Shi, G., Liu, C., Cai, Q., Liu, Q. ve Hou, C. (2010). “Cadmium accumulation and tolerance of two safflower cultivars in relation to photosynthesis and antioxidative enzymes.” *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 85, 256-263. <https://doi.org/10.1007/s00128-010-0067-0>
- Singh, H. P., Batish, D.R., Kaur, G., Arora, K. ve Kohli, R. K. (2008). “Nitric oxide (as sodium nitroprusside) supplementation ameliorates Cd toxicity in hydroponically grown wheat roots”. *Environmental and Experimental Botany*, 63,158–167. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.12.005>
- Singh, S., Prasad, S. M., Sharma, S., Dubey N. K., Ramawat, N., Prasad, R., Singh, V. P., Tripathi, D. K. ve Chauhan, D. K. (2022). “Silicon and nitric oxide-mediated mechanisms of cadmium toxicity alleviation in wheat seedlings.” *Physiologia Plantarum*, 174, e13065. <https://doi.org/10.1111/ppl.13065>
- Somashekaraiah, B. V., Padmaja, K. ve Prasad, A. R. K. (2006). “Phytotoxicity of cadmium ions on germinating seedlings of mung bean (*Phaseolus vulgaris*): involvement of lipid peroxides in chlorophyll degradation”. *Physiologia Plantarum*, 85, 85-89. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1992.tb05267.x>
- Song, A., Li Z., Zhang, J., Xue, G., Fan, F. ve Liang, 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”. *Journal of Hazardous Material*, 172 (1), 74-83. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.143>
- Sterckeman, T. ve Thomine, S. (2020). “Mechanisms of cadmium accumulation in plants.” *Critical Reviews in Plant Sciences*, 39(4), 322-359. <https://doi.org/10.1080/07352689.2020.1792179>
- Stresty, T. V. S. ve Madhava Rao, K. V. (1999). “Ultrastructural alterations in response to zinc and nickel stress in the root cell of pigeon pea.” *Environmental and Experimental Botany*, 41(1), 3-13. [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(98\)00034-3](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(98)00034-3)
- Tran, T. A., Vassileva, V., Petrov, P. ve Popova, L. P. (2013). “Cadmium-induced structural disturbances in *Pisum sativum* leaves are alleviated by nitric oxide”. *Turkish Journal of Botany*, 37(4), 698-707. <https://doi.org/10.3906/bot-1209-8>

- Tran, T. A. ve Popova, L. P. (2013). "Functions and toxicity of cadmium in plants: Recent advances and future prospects." *Turkish Journal of Botany*, 37(1), 1-13. <https://doi.org/10.3906/bot-1112-16>
- Treder, W. ve Cieslinski, G. (2005). "Effect of silicon application on cadmium uptake and distribution in strawberry plants grown on contaminated soils". *Journal of Plant Nutrition*, 28, 917–929. <https://doi.org/10.1081/PLN-200058877>
- Tripathi, D. K., Singh, V. P., Kumar, D. ve Chauhan, D. K. (2012). "Rice seedlings under cadmium stress: effect of silicon on growth, cadmium uptake, oxidative stress, antioxidant capacity and root and leaf structures". *Chemistry and Ecology*, 28, 281-291. <https://doi.org/10.1080/02757540.2011.644789>
- Vaculík, M., Pavlovič, A. ve Lux, A. (2015). "Silicon alleviates cadmium toxicity by enhanced photosynthetic rate and modified bundle sheath's cell chloroplasts ultrastructure in maize". *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 120, 66-73. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.05.026>
- Vatehová, Z., Kollárová, K., Zelko, I., Richterová, D., Bujdoš, M. ve Lišková, D. (2012). "Interaction of silicon and cadmium in *Brassica juncea* and *Brassica napus*". *Biologia*, 67(3), 498-504. <https://doi.org/10.2478/s11756-012-0034-9>
- Wang, H. Y., Wen, S. L., Chen, P., Zhang L., Cen, K. ve Sun, G. X. (2016). "Mitigation of cadmium and arsenic in rice grain by applying different silicon fertilizers in contaminated fields." *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 3781-3788. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5638-5>
- Wang, Q., Liang, X., Dong, Y., Xu, L., Zhang, X., Hou, J. ve Fan, Z. (2013a). "Effects of exogenous nitric oxide on cadmium toxicity, element contents and antioxidative system in perennial ryegrass." *Plant Growth Regulation*, 69(1), 11-20. <https://doi.org/10.1007/s10725-012-9742-y>
- Wang, Q., Liang, X., Dong, Y., Xu, L., Zhang, X., Kong, J. ve Liu, S. (2013b). "Effects of exogenous salicylic acid and nitric oxide on physiological characteristics of perennial ryegrass under cadmium stress." *Journal of Plant Growth Regulation*, 32, 721-731. <https://doi.org/10.1007/s00344-013-9339-3>

- Wang, S., Wang, F. ve Gao, S. (2014). “Foliar application with nano-silicon alleviates cadmium toxicity in rice seedlings”. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 2837-2845. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3525-0>
- Xiong, J., An, L., Lu, H. ve Zhu, C. (2009). “Exogenous nitric oxide enhances cadmium tolerance of rice by increasing pectin and hemicellulose contents in root cell wall.” *Planta*, 230, 755-765. <https://doi.org/10.1007/s00425-009-0984-5>
- Xiong, J., Fu, G., Tao, L. ve Zhu, C. (2010). Roles of nitric oxide in alleviating heavy metal toxicity in plants. *Archives of biochemistry and biophysics*, 497(1-2), 13-20. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2010.02.014>
- Xu, J., Wang, W., Yin, H., Liu, X., Sun, H. ve Mi, Q. (2010). “Exogenous nitric oxide improves antioxidative capacity and reduces auxin degradation in roots of *Medicago truncatula* seedlings under cadmium stress”. *Plant Soil*, 326, 321–330. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0011-4>
- Xu, L. L., Fan, Z. Y., Dong, Y. J., Kong, J., Liu, S., Hou, J. ve Bai, X. Y. (2015a). “Effects of exogenous NO supplied with different approaches on cadmium toxicity in lettuce seedlings.” *Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 149(2), 270-279. <https://doi.org/10.1080/11263504.2013.822030>
- Xu, L. L., Fan, Z. Y., Dong, Y. J., Kong, J. ve Bai, X. Y. (2015b). “Effect of exogenous salicylic acid and nitric oxide on physiological characteristics of two peanut cultivars under cadmium Stress.” *Biologia Plantarum*, 59, 171-182. <https://doi.org/10.1007/s10535-014-0475-9>
- Xu, L., Dong, Y., Kong, J. ve Liu, S. (2014). “Effects of root and foliar applications of exogenous NO on alleviating cadmium toxicity in lettuce seedlings”. *Plant Growth Regulation*, 72, 39-50. <https://doi.org/10.1007/s10725-013-9834-3>
- Ye, Y., Li, Z. ve Xing, D. (2013). “Nitric oxide promotes MPK6-mediated caspase-3-like activation in cadmium-induced *Arabidopsis thaliana* programmed cell death”. *Plant Cell & Environment*, 36, 1-15. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2012.02543.x>



- Zhang, C., Wang, L., Nie, Q., Zhang, W. ve Zhang, F. (2008). “Long-term effects of exogenous silicon on cadmium translocation and toxicity in rice (*Oryza sativa* L.)”. *Environmental and Experimental Botany*, 62, 300-307. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.10.024>
- Zhang, G., Fukami, M. ve Sekimoto, H. (2002). “Influence of cadmium on mineral concentrations and yield components in wheat genotypes differing in cd tolerance at seedling stage”. *Field Crops Research*, 77, 93-98. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(02\)00061-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00061-8)
- Zhang, J. ve Shu, W. S. (2006).” Mechanisms of heavy metal cadmium tolerance in plants”. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 32(1), 1-8.
- Zhang, X., Zhang, X., Gao, B., Li, Z., Xia, H., Li, H. ve Li, J. (2014). “Effect of cadmium on growth, photosynthesis, mineral nutrition and metal accumulation of an energy crop, King Grass (*Pennisetum americanum* x *P. purpureum*)”. *Biomass and Bioenergy*, 67, 179-187. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.04.030>
- Zhao, H., Jin, Q., Wang, Y., Chu, L., Li, X. ve Xu, Y. (2016). “Effects of nitric oxide on alleviating cadmium stress in *Typha angustifolia*.” *Plant Growth Regulation*, 78(2), 243-251. <https://doi.org/10.1007/s10725-015-0089-z>
- Zhao, X., Chen, L., Rehmani, M. I. A., Wang, Q., Wang, S., Hou, P., Li, G. ve Ding, Y. (2013). “Effect of nitric oxide on alleviating cadmium toxicity in rice (*Oryza sativa* L.)” *Journal of Integrative Agriculture*, 12(9), 1540-1550. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60417-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60417-7)