



T.C.

**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME ANABİLİM DALI

**SOLANACEAE FAMILİYASI BİTKİLERİNDE
KADMIYUM STRESİNİN AZALTILMASINA SİLİSYUMUN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖMER TOLGA EMER

**Tez Danışmanı
DR. ÖĞR. ÜYESİ YAKUP ÇIKILI**

ÇANAKKALE – 2021



T.C.

ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME ANABİLİM DALI

**SOLANACEAE FAMILİYASI BİTKİLERİNDE
KADMIYUM STRESİNİN AZALTILMASINA SİLİSYUMUN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖMER TOLGA EMER

Tez Danışmanı
DR. ÖĞR. ÜYESİ YAKUP ÇIKILI

ÇANAKKALE – 2021



T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



Ömer Tolga EMER tarafından Dr. Öğr. Üyesi Yakup ÇIKILI yönetiminde hazırlanan ve **07/07/2021** tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan “***Solanaceae* Familyası Bitkilerinde Kadmiyum Stresinin Azaltılmasına Silisyumun 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 Mücellâ MÜFTÜOĞLU

Prof. Dr. Murat Ali TURAN

İmza

.....

.....

.....

Tez No :

Tez Savunma Tarihi : 07/07/2021

.....

Prof. Dr. Pelin KANTEN

Enstitü Müdürü

...../...../2021

ETİK BEYAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; 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 çalışmada 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 kabullendiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Ömer Tolga EMER

07/07/2021

TEŞEKKÜR

Bu tezin konusunun belirlenmesinden, gerçekleşmesi ve sonuçlanmasına kadar çalışmamın her aşamasında benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen, sabırla bilgi ve deneyimlerini aktaran saygı değer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Yakup ÇIKILI'ya teşekkür ederim.

Son olarak tez çalışmam boyunca yardımları ve desteklerini bir an olsun eksik etmeyen Rabia Gülşen KARAHAN, Ömer ERSOY, Yılmaz UZUN'a ve bana maddi ve manevi desteklerini bir an olsun esirgemeyen değerli annem Gülcan EMER ve babam İbrahim EMER'e sonsuz teşekkürü borç bilirim.

Ömer Tolga EMER
Çanakkale, Temmuz 2021

ÖZET

SOLANACEAE FAMILİYASI BİTKİLERİNDE KADMIYUM STRESİNİN AZALTILMASINA SİLİSYUMUN ETKİSİ

Ömer Tolga EMER

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr Üyesi Yakup ÇIKILI

07/07/2021, 109

Bu çalışmada; *Solanaceae* (patlıcangiller) familyası bitkilerinde (domates, biber, patlıcan, patates, tütün, altınçilek) Cd stresinin azaltılmasına Si'un etkisi, türlerin bazı agronomik, morfolojik ve beslenme özellikleri değerlendirilerek ortaya konulmuştur. Bu amaçla, dört haftalık tür fideleri perlit ortamında kontrol, 100 µM CdCl₂, 0.2 mM K₂SiO₃ ve 2 mM K₂SiO₃ koşulları uygulanmış besin çözeltisiyle üç tekerrürlü olarak sera koşullarında dört hafta boyunca yetiştirilmiştir.

Solanaceae türlerinin gövde ve kök biyokütleleri, kök uzunluğu, toplam klorofil ve karotenoid içerikleri ile gövde Ca konsantrasyonlarını Cd stresi önemli oranda azaltırken, gövde ve kök Cd ve K konsantrasyonları, köklerde net Cd akümüasyonu ve toplam Cd akümüasyon oranını ise önemli oranda artırmıştır. Kök gelişimine bağlı olarak Cd toksisitesine toleranslılık sıralaması domates> patates> altınçilek> tütün> patlıcan> biber olarak saptanmıştır. Ayrıca, tütün hariç diğer türlerin Cd translokasyonu Cd stresi koşullarında azalmıştır. Cd translokasyonuna göre *Solanaceae* türlerinin altınçilek< biber< patates< patlıcan< domates< tütün şeklinde sıralandığı belirlenmiştir.

Kadmiyum stresine göre Cd+Si uygulamalarıyla türlerin ortalama gövde ve kök biyokütleleri, kök uzunluğu, kökte Cd, K ve Mg konsantrasyonları ve toplam Cd akümüasyon oranında önemli artışlar belirlenirken, gövde/kök oranı ve Cd translokasyonunda önemli azalmalar belirlenmiştir. Artan Si uygulamalarına türlerin tepkileri ayrılmış,

patlıcan hariç diğer türlerin gövde ve kök biyokütle üretimleri Si uygulamalarıyla artırmıştır. Silisyum uygulamaları tüm türlerde Cd biyokonsantrasyonu, köklerle net Cd akümülayonu ve toplam Cd akümülayonunu artırmıştır. Cd stresi altındaki *Solanaceae* familyası türlerinde belirlenen gelişim gerilemesi ve besin maddesi dengesizliklerinin Si uygulamasıyla hafifletilebileceği ancak türlerin hem Cd stresine hem de Si uygulama düzeylerine tepkilerinin ayrımlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Solanaceae*, Kadmiyum, Silisyum, Biyo-konsantrasyon, Translokasyon, Akümülayon



ABSTRACT

EFFECT OF SILICON ON AMELIORATING OF CADMIUM STRESS IN SOLANACEAE FAMILY PLANTS

Ömer Tolga EMER

Çanakkale Onsekiz Mart University

School of Graduate Studies

Master of Science Thesis in Soil Science and Plant Nutrition

Advisor: Assist. Prof. Dr. Yakup ÇIKILI

07/07/2021, 109

This study, the effect of Si on ameliorating of Cd stress in *Solanaceae* family species (tomato, pepper, eggplant, potato, tobacco, goldenberry) has been demonstrated by evaluating some agronomic, morphological and nutritional characteristics of the plants. For this purpose, four-week-old seedlings belonging to the species were grown in greenhouse in three replications with nutrient solutions applied in perlite medium to control, Cd (100 μ M CdCl₂), Cd+0.2 mM K₂SiO₃ and Cd+2.0 mM K₂SiO₃ for four weeks.

Shoot and root biomass, root length, total chlorophyll and carotenoid contents and shoot calcium (Ca) concentrations of *Solanaceae* species were significantly decreased by Cd stress, while shoot and root Cd and potassium (K) concentrations, shoot and root Cd uptake, net Cd accumulation via roots and total Cd accumulation rate were notably increased. Depending on the root development, the tolerance ranking to Cd stress was detected as tomato> potato> goldenberry> tobacco> eggplant> pepper. Cadmium translocation in all species, except for tobacco, was decreased under Cd stress. With respect to Cd translocation, *Solanaceae* species showed a ranking as follows: goldenberry< pepper< potato< eggplant< tomato< tobacco.

It was found that shoot and root biomass, root length, root Cd, K and magnesium (Mg) concentrations and total Cd accumulation rate as average of species with Cd+Si applications compared to Cd stress were increased, while significant reductions were noted

in shoot/root ratio and Cd translocation. The responses of the species to the increasing Si applications were varied, and the shoot and root biomass production in all species, except for eggplant, increased with Si applications. Silicon applications increased Cd bio-concentration, net Cd accumulation via roots and total Cd accumulation in all species. It has concluded that growth retardation and nutrient imbalances determined in *Solanaceae* family species under Cd stress might be alleviated by Si application; however, the responses of the species to both Cd stress and levels of Si application are various.

Keywords: *Solanaceae*, Cadmium, Silicon, Bioconcentration, Translocation, Accumulation



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
 BİRİNCİ BÖLÜM GİRİŞ	 1
 İKİNCİ BÖLÜM ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	 5
 ÜÇÜNCÜ BÖLÜM MATERYAL VE YÖNTEM	 29
3.1. Materyal	29
3.2. Yöntem.....	29
3.2.1. Morfolojik Ölçümler	30
3.2.2. Bitki Analizleri.....	31
3.2.3. İstatistik Analizler	33
 DÖRDÜNCÜ BÖLÜM ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	 34
4.1. Bitkilerin Toprak Üstü Aksam Gelişimine Uygulamaların Etkisi	34
4.2. Bitkilerin Kök Gelişimine Uygulamaların Etkisi.....	37
4.3. Bitkilerin Toplam Biyokütle Üretimine Uygulamaların Etkisi	41
4.4. Bitkilerin Kök Uzunluğu ve Gövde/Kök Oranına Uygulamaların Etkisi	44
4.5. Bitkilerin Cd Tolerans İndeksine Uygulamaların Etkisi	48

4.6. Bitkilerin Cd Konsantrasyonu ve Alımlarına Uygulamaların Etkisi	49
4.7. Bitkilerde Cd Translokasyonu ve Akümülyasyonuna Uygulamaların Etkisi.....	56
4.8. Bitkilerin Cd Biyokonsantrasyonuna Uygulamaların Etkisi	61
4.9. Bitkilerin Fotosentetik Pigment İçeriklerine Uygulamaların Etkisi.....	63
4.10. Bitkilerin N ve Ham Protein Konsantrasyonlarına Uygulamaların Etkisi	68
4.11. Bitkilerin P Konsantrasyonlarına Uygulamaların Etkisi	71
4.12. Bitkilerin K Konsantrasyonlarına Uygulamaların Etkisi	74
4.13. Bitkilerin Ca Konsantrasyonlarına Uygulamaların Etkisi	77
4.14. Bitkilerin Mg Konsantrasyonlarına Uygulamaların Etkisi	80
4.15. Bitkilerin Na Konsantrasyonlarına Uygulamaların Etkisi	82
 BEŞİNCİ BÖLÜM SONUÇ VE ÖNERİLER	 86
KAYNAKÇA	94
ÖZGEÇMİŞ.....	I

SİMGELER VE KISALTMALAR

Cd	Kadmiyum
Si	Silisyum
%	Yüzde oranı
Ca(NO ₃).4H ₂ O	Kalsiyum nitrat tetra hidrat
KNO ₃	Potasyum nitrat
MgSO ₄ .7H ₂ O	Magnezyum sülfat hepta hidrat
KH ₂ PO ₄	Potasyum di hidrojen fosfat
H ₃ BO ₃	Borik asit
FeSO ₄ .7H ₂ O	Demir sülfat hepta hidrat
MnSO ₄ .H ₂ O	Mangan sülfat mono hidrat
ZnSO ₄ .7H ₂ O	Çinko sülfat hepta hidrat
CuSO ₄ .5H ₂ O	Bakır sülfat penta hidrat
NiCl ₂ .6H ₂ O	Nikel klörür hekza hidrat
(NH ₄) ₂ Mo ₇ O ₂₄ .4H ₂ O	Amonyum molibdat tetra hidrat
Na ₂ EDTA.2H ₂ O	Etilen diamin tetra asetik asit dihidrat disodyum tuzu
HCl	Hidroklorik asit
KOH	Potasyum hidroksit
K ₂ SiO ₃	Potasyum silikat
CdCl ₂	Kadmiyum klörür
N	Azot
P	Fosfor
K	Potasyum
Ca	Kalsiyum
Mg	Magnezyum
Na	Sodyum
S	Kükürt
g	Gram
mg	Miligram
µg	Mikrogram
kg	Kilogram
°C	Derece santigart

L	Litre
mL	Mililitre
mM	Milimolar
μ M	Mikromolar
H ₂ O ₂	Hidrojen peroksit
Na ₂ (SiO ₂) ₂	Sodyum silikat
Na ₂ SiO ₃	Sodyum metasilikat
Na ₂ SiO ₃ .9H ₂ O	Sodyum metasilikat nano hidrat
YA	Yaş ağırlık
KA	Kuru ağırlık
TF	Translokasyon faktörü
BKF	Biyo-konsantrasyon faktörü
NA	Köklerde net akümülayon
TAR	Toplam akümülayon oranı

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo No	Tablo Adı	Sayfa No
Tablo 1	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin gövde yaş ve kuru ağırlıklarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.....	34
Tablo 2	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin gövde yaş ve kuru ağırlıklarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.	35
Tablo 3	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin kök yaş ve kuru ağırlıklarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.	37
Tablo 4	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin kök yaş ve kuru ağırlıklarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.	38
Tablo 5	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin toplam yaş ve kuru ağırlıklarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.	41
Tablo 6	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin toplam yaş ve kuru ağırlıklarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.	42
Tablo 7	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin kök uzunluğu ve gövde/kök oranına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.	45
Tablo 8	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin kök uzunluğu ve gövde/kök oranına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.	46
Tablo 9	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin Cd tolerans indeksine (%) Cd ve Si uygulamalarının etkisi.....	48
Tablo 10	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin gövde ve kök Cd konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.	50
Tablo 11	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin gövde ve kök Cd konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.	51
Tablo 12	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin gövde ve kök Cd alımlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.	53
Tablo 13	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin gövde ve kök Cd alımlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.	54
Tablo 14	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinde Cd translokasyon faktörü (TF-Cd), köklerde net Cd akümüasyonu (NA-Cd) ve toplam Cd akümüasyon oranı (TAR-Cd) üzerine Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.	57

Tablo 15	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinde Cd translokasyon faktörü, köklerde net Cd akümülayonu ve toplam Cd akümülayon oranına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.	58
Tablo 16	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin gövde ve kök biyo-konsantrasyon faktörüne (BKF-Cd) Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.	61
Tablo 17	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin klorofil <i>a</i> ve klorofil <i>b</i> içerikleri üzerine Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.	63
Tablo 18	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin klorofil <i>a</i> ve klorofil <i>b</i> içeriklerine Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.	64
Tablo 19	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin klorofil <i>a+b</i> ve karotenoid içeriklerine Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.	65
Tablo 20	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin klorofil <i>a+b</i> ve karotenoid içerikleri üzerine Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.	66
Tablo 21	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin gövde N ve ham protein konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.	68
Tablo 22	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin gövde N ve ham protein konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.	69
Tablo 23	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin gövde ve kök P konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.	72
Tablo 24	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin gövde ve kök P konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.	73
Tablo 25	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin gövde ve kök K konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.	74
Tablo 26	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin gövde ve kök K konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.	75
Tablo 27	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin gövde ve kök Ca konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.	77
Tablo 28	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin gövde ve kök Ca konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.	78
Tablo 29	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin gövde ve kök Mg konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.	80

Tablo 30	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin gövde ve kök Mg konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.	81
Tablo 31	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin gövde ve kök Na konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.	83
Tablo 32	<i>Solanaceae</i> familyası bitkilerinin gövde ve kök Na konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.	84



BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

Günümüzde insan, bitki ve hayvan sağlığını tehdit eden, ekolojik dengeyi bozan tehlikelerin başında çevre kirliliği gelmektedir. 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 (Doğan, 2003). Ağır metaller ise çevre kirliliğine neden olan ve günümüzde ekosistemin her aşamasında toksik etkileri görülebilen en önemli problemlerden biridir. 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).

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., 2009) hücrelerde biyokimyasal ve fizyolojik zararlara neden olduğu bilinmektedir (Mc Laughlin ve Singh, 1999). Bitkilerde Cd birikimi ve buna bağlı olarak insan sağlığına olan zararlı etkisi son yıllarda dikkat çeken araştırma konularından biridir (Dorris vd., 2002; Tsadilas vd., 2005).

Kadmiyumun tarım topraklarına girişi ve yayılması endüstriyel faaliyetler, kullanılan fosforlu gübreler, lağım atıkları ve atmosferik depozitler yoluyla olmaktadır (Alloway ve Steinnes, 1999). Tarım yapılan topraklarda verimi artırmak amacıyla kullanılan diamonyum fosfat (DAP), triple süper fosfat (TSP) ve kompoze gübrelerin özellikle Cd içeriği (>8 mg kg^{-1} gübre) oldukça yüksektir (Köleli ve Kantar, 2006). Kadmiyum içeriği bakımından zengin cevherler fosfat gübrelerinin üretimi için kullanıldığında, bu ürünlerin Cd içerikleri 340 mg kg^{-1} 'a kadar yükselebildiği ve bu gübrelerin kullanıldığı topraklarda yetişen bitkilerin Cd alımında önemli düzeyde bir artış olduğu gösterilmiştir (Sarkar, 2002). Toprak

ve sudaki Cd düzeyinin artması suda yaşayan canlılarda, toprak verimliliğinde ve ekosistem faaliyetlerinde etkili olmakla birlikte bitki bünyesine geçerek başta fotosentez ve solunum olmak üzere, iyon alımı, büyüme ve gelişme gibi birçok metabolik aktiviteyi etkilemesi nedeniyle tarımsal üretimde verim ve kalitenin azalmasına yol açmaktadır (Öktüren-Asri ve Sönmez, 2006).

Kadmiyumun toprakta 3 mg kg^{-1} ve bitki kuru maddesinde ise 1 mg kg^{-1} 'dan fazla olması durumunda toksik etkili olduğu açıklanmıştır (Özbek vd., 1995). Bitkilerin Cd içeriği genel olarak kuru ağırlık esasına göre $<0.5 \text{ mg kg}^{-1}$ olup bitkinin cinsine ve türüne bağlı olarak değişebilmektedir (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 stres 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 (Sheoran vd., 1990) ve ayrıca N metabolizmasının iki enzimi olan nitrat redüktaz ve nitrit redüktazın aktivitelerini azaltmakta ve bitkilerin NO_3^- asimilasyonunda azalmaya neden olmaktadır (Gouia vd., 2000).

Diğer ağır metallere göre 2-20 kat daha fazla toksik etkiye sahip olan Cd'un %90'ı bitki tarafından topraktan alınırken, %10'u atmosferden alındığı ve bununla birlikte endüstri bölgeleri ve yoğun trafiği olan yollara yakın yerlerdeki bitkilerde bulunan Cd'un %40'ından fazlasının havadan alındığı belirtilmiştir (Öktüren-Asri vd., 2007). Toprakten bitki tarafından alınma hızı çok yüksek olan ve toprakta oldukça hareketli olan Cd'un çok düşük konsantrasyonlarda bile özellikle Zn noksanlığında bitkiler tarafından kolaylıkla alınması ve bitkilerin yenen kısımlarında birikmesi bu metalin çevre sağlığı açısından büyük bir tehlike potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Türkiye topraklarının yaklaşık yarısında Zn noksanlığı olduğu dikkate alındığında durumun önemi daha çok netleşmektedir (Cakmak, 2008).

Tek veya çok yıllık, otsu, tırmanıcı, çalı veya ağaç formunda bitkiler içeren bir takson olan *Solanaceae* familyası *Solaneles* takımına ait bir familyadır ve yeryüzünde 85 cins ve 2200'den fazla türden oluşmaktadır. Ülkemizde ise, 9 cins ve 31 tür doğal olarak yetişmektedir. *Solanaceae* familyasında ülkemiz tarımında önemli yeri bulunan, devamlı

yetiştiriciliği yapılan ve ekonomik katkı sağlayan türleri arasında patates (*Solanum tuberosum*), patlıcan (*Solanum melongena*), domates (*Lycopersicum esculentum*), biber (*Capsicum annuum*) ve tütün (*Nicotiana tabacum*) bulunmaktadır (Tanker vd., 2007). Son zamanlarda, az bilinen ve bazı bölgelerde alternatif ürün olarak yetiştiriciliği yapılan bir bitki olan altınçilek (*Physalis peruviana*)’de patlıcangiller (*Solanaceae*) familyasına ait bir tür d r.

Farklı Cd seviyelerinde kumlu bir toprakta 9 familyaya ait 34 bitki türü yetiştirilen çalışmada, bitkiler düşük, orta ve yüksek Cd biriktiren olmak üzere üç gruba ayrılmış ve patlıcangiller familyasına ait bitkilerin yüksek Cd biriktirdiği tespit edilmiştir (Kuboi vd., 1986). Kök büyüme ve gelişmesini engellemesi nedeniyle Cd stresi gösteren bitkilerde su ve iyon alımı azalmakta ve ayrıca Cd stresine maruz kalan bitkilerde stomaların kapanması nedeniyle görülen transpirasyon ile su kaybı azalmakta ve Cd taşınması engellenmektedir (Salt vd., 1995).

Topraktaki Cd’un zararlı etkilerinin ortadan kaldırılması, yetiştirme ortamından uzaklaştırılması ve bitkiler tarafından alımını azaltmak için yapılan çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalardan biri de Si içerikli bileşiklerin tarım topraklarına uygulanmasıdır. Silisyum, yeryüzünde oksijenden sonra en çok bulunan ikinci elementtir ve yer kabuğının Si içeriği ortalama olarak %28 oranındadır (Huang vd., 2011). Toprak çözeltisinde $\text{Si}(\text{OH})_4$ konsantrasyonu 1-100 mg kg⁻¹ arasında değişmektedir (Raven, 1983). Bitki biyolojisinde Si’un rolüne ait bilgiler sınırlı olmasına rağmen, Si yüksek bitkilerin gelişimi için mutlak gerekli besin elementleri arasında yer almayan, ancak yararlı olduğu belirlenen bir bitki besin elementi olarak kabul edilmektedir (Epstein, 1999; Meunier, 2003).

Silisyum bitkide ksilem  zsuyunda monosilisilik asit [$\text{Si}(\text{OH})_4$] şeklinde bulunmakta ve bitkide hareketsiz (immobil) olduğu için transpirasyon olayı ile bitkinin üst yapraklarına taşınmakta, alınan Si özellikle yaprakta birikerek yaprakların daha dik durmasını sağlamakta, fotosentetik aktiviteyi artırmakta ve transpirasyonu iyileştirmekte ve ayrıca bitki sapının yapısını güçlendirerek yatmaya karşı bitkinin direncini artırmakta ve fide dikimi sonrası kardeşlenme sayısını artırmaktadır (Liang vd., 2005). Bitkiler Si’u kökleriyle monosilisilik asit ve pH’sı yüksek (alkalin) ortamlarda hidroksil (OH^-) ve bikarbonat (HCO_3^-) iyonları aracılığıyla değişim yoluyla trihidrojen ortosilikat (H_3SiO_4^-) iyonu şeklinde alırlar. Si biriktirmeyen bitkilerin Si alımları yavaş, buna karşılık Si biriktiren

bitkilerin Si alımı ise daha hızlı olmaktadır (Ma, 2004). Toprakta $\text{Si}(\text{OH})_4$ ağır metallere (Cd, Zn, Pb, Hg vd.) kompleksler oluşturmak suretiyle onların toksik etkilerini azaltmakta ve bu etki ortamda bulunan Si konsantrasyonu ile değişmektedir. Toprak düşük Si içeriğine sahipse oluşan komplekslerin çözünürlüğü düşük olurken, yüksek düzeylerde Si'un varlığında ise oluşan komplekslerin stabilitesi de çok daha güçlü olmaktadır (Birchall vd., 1989). Si'un bitkide tuz stresi (Romero-Aranda vd., 2006; Aranda vd., 2005), kuraklık stresi (Gong vd., 2005) ve ağır metal (Al, Mn, Cd) toksisitesine (Barcelo vd., 1993) karşı bitki direncini arttırdığı açıklanmıştır. Silisyumun verim ve bitki gelişimini artırıcı etkileri de yapılan çalışmalar ile ispatlanmıştır (Lee vd., 1990; Ma vd., 1992; Ma ve Takahashi, 2002).

Silisyumun bitkiler üzerindeki fonksiyonları fizyolojik değil mekaniksel (Ma ve Takahashi, 2002). Bununla birlikte, domates ve hıyar (Miyake ve Takahashi, 1983), soya fasulyesi (Miyake ve Takahashi, 1985) ve çilek (Miyake ve Takahashi, 1986) için Si'un gerekliliği kabul edilmiş ve ayrıca pamuk, buğday, yer fıstığı, kakao, elma, tütün ve kavun gibi diğer bitki türlerinin de Si'un büyümesine yararlı etkisi çalışmalar sonucunda belirlenmiştir (Ma ve Takahashi, 2002).

Bu çalışmada; ülkemizde en çok üretimi yapılan ve ülkemiz ekonomisine önemli katkı sağlayan *Solanaceae* familyasına ait domates, biber, patlıcan, patates, tütün ve bazı bölgelerde alternatif ürün olarak yetiştiriciliği yapılan altınçilek bitkilerinde, son zamanlarda toksik etkisi yaygın olarak görülen, bitki sağlığı yanında insan ve hayvan sağlığında da ciddi zararlanmalara yol açan Cd'un birikiminin azaltılması amacı ile bitkiler tarafından Cd alınımının hafifletilmesinde Si'un etkisi araştırılmıştır.

İKİNCİ BÖLÜM

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Liang vd. (2005) tarafından Cd (0, 20 ve 40 mg kg⁻¹ CdCl₂.H₂O) ile kirlenmiş asitli bir toprakta Si uygulamasının (50 ve 400 mg kg⁻¹ Na₂SiO₃.9H₂O) mısır bitkisinde Cd fitotoksitesini hafifletici etkilerini incelemek amacıyla yapılan çalışmada; Cd uygulamasının gövde ve kök kuru ağırlıklarını önemli ölçüde azalttığı, her iki seviye Si ilavesinde biyokütleyi önemli ölçüde artırdığı, 400 mg kg⁻¹ Si ilavesinin toprak pH'ını önemli ölçüde artırdığı ancak toprakta Cd alınabilirliğini azalttığı ve böylece gövde ve köklerdeki Cd konsantrasyonu ve sürgünlerde toplam Cd miktarını azalttığı, Si uygulanmış toprakta daha fazla Cd'un spesifik adsorbe formda veya Fe-Mn oksitlere bağlı fraksiyon formunda olduğu, buna karşılık 50 mg kg⁻¹ Si ilavesinden toprak pH'sı, alınabilir Cd ve Cd formlarının etkilenmediği, Si uygulanmış Cd uygulamalarına göre Si uygulanmamış koşullarda gövde ve köklerdeki toplam Cd konsantrasyonlarının önemli ölçüde daha yüksek olduğu ve ksilem özsuyundaki Cd konsantrasyonun ise önemli ölçüde azaldığı ve sonuç olarak Si ile Cd toleransının artırılmasının sadece toprakta silikat kaynaklı pH artışı nedeniyle Cd hareketsizleşmesine değil, aynı zamanda bitkilerde Si aracılığıyla Cd-detoksifikasyonunun da neden olabileceği rapor edilmiştir.

Shi vd. (2005), toksik Cd seviyesi (50 µM CdSO₄) altında yetiştirilen çeltik fidelerinde (*Oryza sativa* L., cv. Qiu Guang) Cd dağılımına uygulanan Si'un (1.8 mM K₂SiO₃) etkilerini araştırmak için yaptıkları çalışmada; uygulanan Si'un çeltik fidelerinde Cd toksitesini önemli ölçüde hafiflettiğini ve Cd'a bağlı gelişim gerilemesini düzelttiğini, Si uygulamasının köklerde Cd birikimini artırdığı, Cd'un köklerden gövdeye taşınmasını kısıtladığını, sürgünlerdeki Cd dağılımını %33 oranında azalttığını, Cd'un esas olarak endodermis ve epidermisin yakınlarında biriktiğini, Si birikiminin epidermise göre endodermisin çevresinde daha yoğun olduğunu ve Si'un sürgünlerde ve köklerde Cd konsantrasyonlarını azalttığını ancak simplast ve apoplastta Cd'un dağılım oranını değiştirmedikini bildirmişlerdir.

Treder ve Cieslinski (2005) tarafından farklı Cd seviyeleri (0, 4.4, 8.8, 13.2 ve 17.6 µM kg⁻¹) ile kirlenmiş kumlu ve kumlu killi topraklarda yetiştirilen frigo tipi çilek bitkisinin (Elsanta çeşidi) Cd alımı ve dağılımına püskürtme yoluyla veya ekimden önce doğrudan

toprağa uygulanan potasyum silikatın ($16.7 \text{ mM kg}^{-1} \text{ Si}$) etkisini belirlemek için serada yapılan çalışma sonunda; Cd alımı ve dağılımını toprak kirliliği ve toprak tipinin önemli ölçüde etkilediği ve topraktaki artan Cd seviyeleriyle Cd alımının arttığı, kumlu toprakta yetişen bitkilerin tüm organlarında kumlu killi toprağa kıyasla belirgin şekilde daha yüksek Cd konsantrasyonları tespit edildiği, kumlu toprakta yetişen çilek bitkilerinin aşırı Cd alımını önlemede ekimden önce toprağa Si uygulamasının etkili olduğu, Si uygulamasının etkisiyle gövde, yaprak ve meyvelerde Cd konsantrasyonlarının azaldığı ancak kökte değişimin olmadığı ve yapraklara püskürtülen potasyum silikatın çilek bitkisinin organlarında Cd konsantrasyonunu azaltmadığı belirlenmiştir.

Liang vd. (2007), Si'un hem yer kabuğunda hem de toprakta en çok bulunan ikinci element olmasına rağmen, henüz bitkiler için mutlak gerekli elementler arasında olmadığını ancak Si'un birçok bitki türünün büyüme ve gelişimini teşvikteki yararlı rolünün genel olarak kabul edildiğini, abiyotik streslerin Si aracılığıyla hafifletme mekanizmaları henüz tam olarak anlaşılmamakla birlikte Mn, Al ve ağır metal toksisiteleri ve tuzluluk, kuraklık, soğuk ve donma stresleri gibi çeşitli abiyotik stresleri etkili bir şekilde azalttığını açıklamışlardır. Araştırmacılar, bitkilerde abiyotik streslerin Si aracılığıyla hafifletilmesinin temel mekanizmalarını; (a) bitkilerde antioksidan sistemlerin teşvik edilmesi, (b) Si ile toksik metal iyonlarının kompleksleşmesi veya çökeltilmesi, (c) gelişme ortamında toksik metal iyonlarının hareketsizleşmesi (immobilizasyonu), (d) alım süreçleri ve (e) bitkilerdeki metal iyonlarının bölünmesi olarak belirtmişlerdir.

Cunha vd. (2008) tarafından Cd ve Zn ile kirlenmiş bir toprakta yetiştirilen mısır (*Zea mays* L.) bitkisine uygulanan Si'un (0, 50, 100, 150 ve $200 \text{ mg kg}^{-1} \text{ CaSiO}_3$) ağır metal stresinin iyileştirilmesi üzerine etkileri ile Cd ve Zn'nun biyoyararlılığı ve toprak fraksiyonlarına göre dağılımını değerlendirmek amacıyla yaptıkları çalışmada; kirlenmiş toprağa Si ilavesinin ağır metal stresini etkili bir şekilde azalttığı, Si uygulanmamış kirlenmiş toprağa kıyasla biyokütlenin arttığı ve bu artışın kalsiyum metasilikat (CaSiO_3) uygulamasından kaynaklanan toprak pH'nın artmasından ziyade toprakta Cd ve Zn immobilizasyonuna bağlı olduğu ve Si uygulamasının biyoyararlılık havuzlarındaki paylarını azaltarak ve organik madde ve kristal demir oksitler gibi daha stabil fraksiyonlardaki metallerin dağılımını arttırarak toprak fraksiyonlarında Cd ve Zn dağılımını değiştirdiği tespit edilmiştir.

Liu vd. (2008), kirlenmiş bir toprakta yetiştirilen çeltik bitkisinde Cd toksisitesinin hafifletilmesine iki Si solüsyonunun yapraktan uygulamasının etkilerini araştırmak için yaptıkları çalışmalarında; yapraktan Si uygulaması gövde ve tanenin kuru ağırlıklarını (kabuksuz) arttırdığı, ancak gövde ve tanenin Cd konsantrasyonunu belirgin şekilde azalttığı, her iki Si solüsyonunun yapraktan uygulanması ile çeltiğin tanesindeki toplam Cd birikiminin azaldığı ancak gövdede Cd birikimine anlamlı bir etkide bulunamadığı, çeltik yetiştiriciliği Si uygulamasından optimum etkiyi elde edebilmek için kardeşlenme aşamasında yapraktan uygulanmasının gerektiği ve çeltik tanelerinde Cd'un toksisitesini ve birikimini hafifletmek için Si'un yapraktan uygulanma mekanizmasının muhtemelen gövde hücre duvarlarında Cd'un alıkoyulması ile ilişkili olabileceği tespit edilmiştir.

Nwugo ve Huerta (2008) tarafından hidroponik ortamda yetiştirilen çeltik (*Oryza sativa* L.) fidelerine sırasıyla erken ve geç dönem Si uygulamalarını temsil eden 6. ve 20. günlerde Si (0, 0.2 ve 0.6 mM) ve 6. günde Cd (0 ve 2.5 μ M) ilave ederek Si'un düşük seviyeli Cd toksisite belirtilerine etkisini araştırmak için yapılan çalışmada; düşük seviye Cd uygulamasının genellikle büyüme ve fotosentezi azalttığı, 0.2 ve 0.6 mM Si ilavesinin kök ve yaprak Cd içeriğini önemli ölçüde azalttığı, geç dönem Si ilavesinin (0.6 mM) düşük seviyeli Cd kaynaklı büyüme gerilemesini önemli ölçüde hafiflettiği, 0.2 mM Si uygulamasının Cd uygulanan bitkilerde net karbon dioksit (CO₂) asimilasyon (A) oranını azaltmadan veya engellemeden 0.6 mM Si uygulamasına kıyasla stoma iletkenlik oranını (gs) azalttığı ve su kullanım etkinliğini (WUE) de arttırdığı, Cd uygulanan bitkilerde 0.6 mM Si uygulaması ile klorofil miktarını önemli ölçüde azalttığı ve 0.2 mM Si uygulamasının ışık kullanım etkinliğinde bir artışa neden olduğu sonucuna varmışlardır. Aynı çalışmada, Si'un çeltik bitkisinde verimi hafif olarak arttırarak düşük seviye Cd toksisitesinin hafifletildiği belirtilmiştir.

Zhang vd. (2008), üç farklı düzeyindeki Cd (0, 2 ve 4 μ M) ve silisyum dioksit (SiO₂) (0, 2 ve 4 mM) uygulamaları ile 105 gün boyunca yetiştirilen ve dört farklı gelişim döneminde örnekleme yapılarak çeltik bitkisinde (*Oryza sativa* L.) biyokütle üretimi, Cd alımı ve sürgün ve köklerde Cd dağılımına Cd ve Si'un etkisini belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada; Cd uygulanmayan koşullarda Si uygulamasının sürgün biyokütlesini %61-238 ve kök biyokütlesini %48-173 oranında arttırdığı, Si uygulanmayan koşullara kıyasla 2 μ M Cd + Si uygulamasının sürgün ve kök biyokütlesini %125-171 ve %100-106

oranında arttırdığı, 4 µM Cd + Si uygulaması koşullarında Si'un kök ve sürgün biyokütlesine olan yararlı etkilerinin azaldığı, Si ilavesinin gövde Cd konsantrasyonlarını %30-50 oranında ve gövdede Cd dağılımını %25.3-46.0 oranında düşürdüğü, düşük Si ilavesi veya yüksek Cd stresinin daha fazla biyokütle ve daha yüksek Si konsantrasyonuna sahip köklere yol açacağı ve Si'un bitki gelişimini arttırdığı ve sürgünlerde Cd birikimini azalttığı ve böylece potansiyel gıda kirliliği risklerinin azaltılmasına yardımcı olduğu sonucuna varmışlardır.

Song vd. (2009), *Brassica chinensis* L. türüne ait iki farklı çeşitte (Cd-duyarlı, *Shanghaiqing* ve Cd-toleranslı *Hangyoudong*) Cd toleransının arttırılmasında Si'un rolünü araştırmak için 0, 0.5 ve 5 mg L⁻¹ Cd stresi altında ve 1.5 mM Si uygulaması koşullarında yetiştirilen bitkilerle yaptıkları çalışmalarında; Cd stresine maruziyet süresi bir hafta olduğunda düşük Cd seviyesinde Cd-toleranslı çeşitlerin büyümesinin teşvik edildiği ancak yüksek Cd seviyesinde azaldığı, Cd stresine maruziyet süresi üç hafta kadar sürdüğünde bitki büyümesinin her iki Cd seviyesinde de önemli oranda azaldığı, Cd stres süresine bakılmaksızın her iki Cd seviyesinde de Cd-duyarlı çeşidin büyümesinin önemli oranda azaldığı, Si ilavesinin her iki çeşit ve Cd seviyesinde de sürgün ve kök biyokütlesini arttırdığı ve Cd alımını ve kökten gövdeye taşınımını azalttığı, süperoksit dismutaz (SOD), katalaz (CAT) ve askorbat peroksidaz (APX) enzim aktivitelerinin Si ilavesiyle azaldığı ancak malondialdehit (MDA) ve hidrojen peroksit (H₂O₂) konsantrasyonlarının ise yüksek Cd seviyesinde arttığı, askorbik asit, glutasyon ve protein olmayan tiyol konsantrasyonlarının yüksek Cd seviyesinde arttığı ve bu artışın Si ilavesiyle daha da yoğunlaştığı, Si'un Cd toleransını arttırmadaki etkisinin Cd-toleranslı çeşitte Cd-duyarlı çeşite göre daha fazla olduğu ve sonuç olarak ise *Brassica chinensis* bitkisinin Cd toleransının, Cd alımı ve kökten gövdeye Cd taşınımı baskılanması ve antioksidan savunma aktivitesinin Si ilavesi ile arttığını tespit etmişlerdir.

Vaculík vd. (2009), ortamda Cd (5 µM) varlığında 13 gün yetiştirilen mısır bitkisinin gelişimine Si (35 mM)'un etkisinin belirlenmek amacıyla dört farklı uygulama (kontrol, Cd, Si ve Cd+Si) ile yapılan çalışmada sonucunda; kontrol göre yalnızca Si uygulamasının büyüme parametrelerinin çoğunda olumlu etkileri olduğu, Cd uygulamasına kıyasla Cd+Si uygulamasındaki Si'un tüm büyüme parametrelerini geliştirdiği, kontrole göre hem Si hem de Cd+Si uygulamalarındaki Si'un hücre duvarı uzamasını arttırdığı, Cd'un mısır bitkisinin gelişimine kısıtlayıcı etkisinin Si tarafından hafifletilmesinin, bitki tarafından Cd alımının

azaltılmasına bağılı olmadığı ve hatta Cd uygulamasına göre Cd+Si uygulamasında toprak üstü ve toprak altı bitki aksamalarında ve bitkide toplam Cd miktarının önemli ölçüde daha yüksek olduğu, endodermal gelişimin ikinci aşamasında, Cd uygulanan bitkilere göre Cd+Si uygulanan bitkilerin kök ucundan daha uzak bir mesafede suberin lamellerinin oluştuğu ve böylece Cd+Si uygulanan bitkilerde artan Cd içeriğinin endodermisin gelişimi ile ilişkilendirilebileceği ve mısır bitkisinin köklerinde kontrole kıyasla Si uygulamasının suberin lamelleri gelişimini etkilemediği açıklanmıştır.

Feng vd. (2010), Cd toksisitesinin (100 μM CdCl_2) hıyar (*Cucumis sativus* L.) bitkisinin gelişimi, pigmentleri, fotosentetik ve klorofil ışınım parametreleri ile N metabolizmasına Si uygulamasının (1 mM Na_2SiO_3) etkilerini araştırdıkları çalışmada; kontrole kıyasla Cd uygulamasının hıyar yapraklarında ciddi Cd birikmesine neden olduğu, klorozu büyük ölçüde tetiklediği, Si'un uygulanması klorozu düzelttiği, kloroplastı düzensizlikten koruduğu ve esas olarak Cd stresi altında daha yüksek fotosentetik oran ve biyokütle birikmesinden sorumlu olabilecek pigment içeriklerini önemli ölçüde artırdığı, Cd uygulaması ile fotosentezdeki azalma stomatal kısıtlamadan kaynaklanmazken daha yüksek hücreler arası karbon dioksit (CO_2) konsantrasyonu (Ci) ve daha düşük klorofil ışınımı ve verimliliği (Fv/Fm) ile fotosistem II (FPSII)'den sonuçlanabilen fotosentetik mekanizmadaki bütünlük hasarı veya işlev kaybı ile yakından ilişkili olabileceği, fotosentez, Fv/Fm ve FPSII seviyelerindeki Cd kaynaklı kısıtlamanın Si uygulaması ile hafifletildiği, azot redüktaz (NR), glutamin sentetaz (GOGAT), glutamat sentaz ve glutamat dehidrogenaz (GDH) dahil N metabolizması enzimlerini Cd uygulamasının büyük ölçüde inhibe ettiği ve Si uygulamasının Cd'un olumsuz etkilerini azalttığı sonucuna varmışlardır.

Lukačová Kuliková ve Lux (2010), 30 adet *Zea mays* L. melezinin gelişim parametrelerine Cd uygulamalarının [0 ve 100 μM $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$] ve aralarından seçilen 5 mısır melezine Cd uygulamaları ile birlikte uygulanan Si'un [0 ve 5 mM $\text{Na}_2(\text{SiO}_2)_2$] etkisini topraksız yetiştirme ortamı kullanarak araştırdıkları çalışmada; Cd ile muamele edilmiş bitkilerin büyüme parametreleri, Cd birikimi ve translokasyonunda önemli farklılıkların olduğu, Cd konsantrasyonunda kök/gövde oranının 2.78 (Nova) ile 12.83 (Reduta) arasında değiştiği, Cd'un çoğunlukla bitkinin kök sistemlerinde lokalize olduğu ve ayrıca seçilen mısır melezine uygulanan Si'un köklerde Cd birikimini ve gövdeye translokasyonunu azalttığı rapor edilmiştir.

Shi vd. (2010), farklı Cd duyarlılığına sahip iki fındık (*Arachis hypogaea* L.) çeşidinin (Cd-duyarlı Luhua 11 ve Cd-tolerant Luzi 101) başlıca antioksidan enzimlerin (SOD, POD ve CAT) aktivitelerinin yanı sıra Cd'un doku ve hücre altı seviyede dağılımına Si (0 ve 1.8 mM K₂SiO₃) ve Cd (0 ve 200 µM CdCl₂) uygulamalarının etkilerini araştırdıkları çalışmada; sadece Cd elementine maruziyetinin bitki büyümesini baskıladığını ve her iki çeşit için oksidatif strese neden olduğunu ve bu toksisitenin Cd-duyarlı çeşitte (Luhua 11) Cd-tolerant çeşitte (Luzi 101) göre daha belirgin olduğunu, Si'un fındık fidelerinde Cd toksisitesini önemli ölçüde hafiflettiğini ve bunun sürgünlerde Cd birikiminin azalması, yapraklarda hücre altı seviyede Cd dağılımının değişimi ve antioksidatif enzimlerin teşvik edilmesi ile ilişkilendirileceğini açıklamışlardır. Yine aynı çalışmada, Cd stresinin Si ile iyileştirme mekanizmalarının çeşit ve dokuya bağlı olduğu, Cd-duyarlı çeşitte (Luhua 11) köklerden sürgünlere Cd taşınmasının azaltılmasının ve köklerdeki SOD, POD ve CAT aktivitelerinin artırılmasının Si'un rolü olabileceği ve Cd-tolerant çeşit (Luzi 101) için, Cd toksisitesinin Si ile hafifletilmesinin gövde Cd konsantrasyonundaki azalmaya ve antioksidan sistemlerinin teşvik edilmesine bağlı olduğu saptanmıştır.

Gu vd. (2011), çok metalle kirlenmiş (mg kg⁻¹ olarak; Cd: 10, Zn: 329, Cu: 479 ve Pb: 946) asit karakterli bir toprakta yetiştirilen çeltikte silisyumca zengin ve yarayıslı Si içeriği 4430 mg kg⁻¹ olan uçucu kül (20 ve 40 g kg⁻¹) ve yarayıslı Si içeriği 9790 mg kg⁻¹ olan çelik cürufu (3 ve 6 g kg⁻¹) uygulamalarının çeltikte ağır metal birikiminin azaltılmasına etkilerini inceledikleri saksı denemesi çalışmasında; uçucu kül ve çelik cürufu uygulamasının toprak pH'sını 4.0'den 5.0-6.4'e çıkardığı, ağır metallerin biyoyarayıslılığını en az %60 düzeyinde azalttığı, topraktan çözeltiye ağır metal difüzyonunun %84'den daha fazla azaldığı, gövdeden yaprağa metal translokasyonunu çarpıcı bir şekilde kısıtladığı ve çok metalli kirlenmiş asitli topraklarda yetişen çeltikte ağır metal birikimini azaltmada kül ve çelik cürufunun etkili olabileceği saptanmıştır.

Nwugo ve Huerta (2011), Si'un Cd toleransında yer alan moleküler mekanizmaları tanımlamak için çeltik yaprağı proteomundaki değişiklikleri araştırdıkları çalışmada; Cd ve/veya Si uygulamaları nedeniyle farklı şekilde düzenlenmiş 60 proteini tanımlandığı ve fotosentez, redoks homeostazi, regülasyon/protein sentezi, patojen tepkisi ve şaperon (refakatçı protein) aktivitesi ile ilişkili proteinler de dahil olmak üzere 50 tanesinin Si tarafından önemli ölçüde düzeltildiği belirtilmiştir.

Amiri vd. (2012), *Echium amoenum* (kırmızı türlü engerek otu) bitkisine Si'un Cd stresi ile birlikte lipid peroksidasyon, MDA ve diğ r aldehitler, antosiyanin ve flavonoid içeriği gibi bazı fizyolojik ve biyokimyasal parametreler etkisini araştırmak için bitkinin 7. yaprakları ortaya çıktığında beş seviye Si [0, 0.2, 0.5, 0.7 ve 1.5 mM Na₂(SiO₂)₃] uygulayarak ve sonrasında bitkilere iki seviye Cd (30 ve 90 mM) ilave ederek y r t kleri çalışmalarında; Cd ilavesinin MDA, diğ r aldehidler, antosiyanin ve flavonoidlerin içeriklerini önemli ölçüde arttırdığını, Si uygulamasının *Echium amoenum* bitkisine Cd stresinin negatif etkisini dengelediğini, Cd stresine toleransını ve membran bütünlüğünü ve antioksidan kapasitesini arttırdığını rapor etmişlerdir.

Rizwan vd. (2012) tarafından kirlenmiş bir tarım toprağında 71 gün boyunca yetiştirilen buğday bitkisinde Cd fitotoksitesini hafifletmede diyatomit madeninden ekstrakte edilmiş amorf Si'un (0, 1, 10 ve 15 ton ha⁻¹) etkilerinin araştırıldığı saksı denemesi çalışmasında; Si uygulamalar ile bitki biyokütlesinin ve bitkideki Si konsantrasyonunun arttığı, toprakta yarayışlı Cd miktarı ve sürgüne Cd translokasyonunun azaldığı ve Cd'un köklerde daha verimli bir şekilde alıkonulduğu, amorf Si'un bitkilerin Si alımını sınırlandırdığı ve sonuç olarak topraktaki bitkiye yarayışlı Si'un buğday gövdesinde Cd konsantrasyonunun azaltılmasına katkıda bulunduğu ve buğdaydaki Cd konsantrasyonlarının kontrolünde yardımcı olduğu rapor edilmiştir.

Tripathi vd. (2012),  eltik fidelerine uygulanan Cd (0, 2, 5, 10, 15, 20, 50, 100, 150  M Cd) ve Si (0, 2, 5, 10, 15, 20, 50, 200, 600  M Si) düzeyleri ile yapılan tarama çalışması sonunda 50  M ve 10  M Si düzeylerinin seçildiği,  eltik fidelerine 50  M Cd uygulamasının kök ve gövdede önemli miktarda Cd birikmesine neden olduğu,  eltik fidelerinde Cd birikiminin oksidatif strese neden olduğu ve bununda H₂O₂ ve MDA birikimindeki artış ile kanıtlandığı, Cd ile birlikte Si (10  M) ilavesinin Cd, H₂O₂ ve MDA birikimini önlediği, antioksidan enzim aktivitesinin Cd toksitesisi ile azaldığı ancak Si ilavesi ile arttığı, Cd toksitesisinin kök tüyü uzunluğu ve sıklığını, stomata sıklığını ve ayrıca bozuk yaprak mezofil hücreleri ve iletim demetlerini azalttığı ancak Cd ile birlikte Si ilavesinin tüm bu anormallikleri azalttığını ve sonuç olarak harici olarak uygulanan Si'un kök ve yaprak yapısı ve bütünlüğünü koruyarak antioksidan kapasite ve Si birikimini artırıp oksidatif stres ve Cd birikimini önleyerek  eltik fidelerini Cd toksitesisine karşı koruduğunu tespit etmişlerdir.

Vaculík vd. (2012), hidroponik ortamda Si (5 mM) ve Cd (5 ve 50 mM) uygulamalarının mısırın (*Zea mays*) 10 günlük bitki büyümesi ve gelişmesine, kök dokularının gelişimi ile ilişkili olarak Cd'un hücre altı dağılımı ve alımına etkisini belirlemek için yaptıkları çalışmada; Cd'a maruz kalan mısır bitkilerinin büyümesini Si'un teşvik ettiği, kasparyan şeridi ve suberin lamellerinin yanı sıra kök iletim dokularının gelişimini etkilediği, Si'un mısır köklerindeki apoplazmik ve simplazmik Cd dağılımını etkilemediği ancak mısır gövdelerinde Cd'un apoplazmik konsantrasyonunu artırdığı ve simplazmik konsantrasyonunu ise azalttığı, kök ve gövdelerin Cd alımındaki farklılıkların apoplazmik bariyerlerin gelişimi ve köklerdeki iletim dokuların olgunlaşması ile ilişkili olabileceği ve Cd toksisitesinin Si ile hafifletilmesinin mısır gövdelerinde Cd'un apoplazmik fraksiyona daha fazla bağlanmasının artırılmasına dayandırabileceğini rapor etmişlerdir.

Vatehová vd. (2012), hidroponik ortamda yetiştirdikleri potansiyel olarak fitoekstraksiyon için kullanılabilecek *Brassica* türlerinde (*B. juncea* L. Czern., cv. Vitasso ve *B. napus* L., cv. Atlantik) Si ve Cd'un kök ve sürgün gelişimine etkisini ve Cd alımını tespit etmek için yapmış oldukları çalışmada; Cd'un kök uzamasına engelleyici etkilerinin Si'un etkisiyle azaldığını, sadece Cd uygulamasına göre Cd+Si birlikte uygulandığında birincil köklerin uzamasının daha fazla olduğu ve lateral kök sayısının *B. juncea*'da *B. napus*'dan daha düşük olduğu, *B. napus*'un kök ve sürgünde Cd içeriğinin *B. juncea*'dan daha yüksek olduğu, Cd uygulamasının her iki türde de klorofil ve karotenoid miktarını azalttığı ancak Si ilavesinin fotosentetik pigment içeriklerin olumlu yönde etkilediği ve bu etkinin *B. napus*'ta *B. juncea*'dan daha yüksek olduğunu, Si uygulamasının *B. juncea* göre *B. napus*'un gövdesine Cd translokasyonunu daha fazla artırdığını tespit etmişlerdir. Araştırmacılar, Cd+Si uygulamasına göre sadece Cd uygulamasında kök ucunda suberin lamellerinin köke daha yakın yerde oluştuğunu ve bu durumun *B. napus*'ta *B. juncea*'dan daha yüksek olduğu ve Cd uygulanmış *Brassica* türlerinde Si uygulamasının koruyucu etkisinin endodermiste daha geniş suberin lamel gelişimine bağlanabileceğini açıklamışlardır.

Ye vd. (2012), Si'un (0, 70, 100 mg L⁻¹) bir tür mangrov olan *Kandelia obovata* (S., L.) Yong'un kök uçlarında Cd (0.5, 5 mg L⁻¹) dağılımına etkilerini araştırdıkları çalışmada; Si uygulamaları ile mangrov fidelerinin kök uçlarının apoplastik özsularında ve simplastik fraksiyonlarındaki Cd konsantrasyonlarının azaldığı, kök uçlarında baryum klorür (BaCl₂) ile ekstre edilebilir hücre duvarı-Cd konsantrasyonlarının azaldığı ancak kök uçlarındaki

sodyumsitrat ile ekstrakte edilebilir hücre duvarı-Cd ve HCl ile ekstrakte edilebilir hücre duvarı-Cd konsantrasyonlarının arttığı, Cd'nin toplam kök ucu içeriği esas olarak apoplastta dağıldığı ve apoplasttaki Cd'un çoğunun hücre duvarına bağlı olduğu, Si uygulamasının apoplast Cd oranını (>% 87.08) arttırdığı ve simplast Cd oranını azalttığı (<% 12.92), Si'un Cd'un hücre duvarlarına bağlanmasını arttırdığı ve Cd'un apoplastik taşınmasını kısıtladığı tespit edilmiştir.

Farooq vd. (2013), pamuk (*Gossypium hirsutum*) bitkisinin Cd (0, 1 ve 5 μ M Cd) stres toleransının artırılmasında Si uygulamasının (0 ve 1 mM Si) etkisini fizyokimyasal değişiklikler ile belirlemek için yaptıkları çalışmada; kontrol bitkilerine kıyasla Cd uygulanan bitkilerde büyüme ve aynı zamanda antioksidan aktivite veriminin azaldığı, bununla birlikte Cd+Si uygulamasıyla bitki gelişimi, net fotosentez oranı, stoma iletkenliği, terleme hızı, su kullanım etkinliği, klorofil ve karotenoid içeriği ve antioksidan enzimlerin performansının arttığı, Cd'un bitki gelişimi üzerindeki olumsuz etkileri Si uygulamasıyla hafifletilerek fotosentetik parametreler, biyokütle üretimi, bitki gelişimi ile yaprak ve köklerdeki antioksidan enzim aktivitesini önemli oranda arttığı ve MDA, H₂O₂ ve elektrolit sızıntı (EL) içeriklerinin azaldığı ve sonuç olarak pamuk bitkisinin büyüme ve fotosentez özelliklerini geliştirerek, MDA, H₂O₂ ve EL içeriklerini azaltarak ve antioksidan enzim aktivitesini artırarak Cd stresinin olumsuz etkisinin Si ilavesi ile hafifletilebileceği açıklanmıştır.

Liu vd. (2013a) tarafından ortamda Si'un yokluğu ve varlığı koşullarında çeltik (*Oryza sativa*) bitkisine uygulanan Cd (5, 30 ve 60 μ M) düzeylerinin bitki hücrelerinde Cd alımının Si ile engellenme olasılığının araştırıldığı çalışmada; Si'un çoğunun hücre duvarlarında bağlı organo-Si bileşikleri formunda biriktiği, orta seviyede Cd uygulanan koşullarda Si biriktirici (+Si) hücrelerin protoplastlarından kültür ortamına gelen toplam Cd konsantrasyonunun Si sınırlayıcı (-Si) hücrelerden gelene kıyasla belirgin şekilde azaldığı belirlenmiştir. Aynı çalışmada; Cd ve/veya Si işlemlerine maruz bırakılmış çeltiğin süspansiyon ve kök hücrelerinde Cd iyonunun hücre alımları ölçüldüğünde, -Si hücrelerine kıyasla +Si hücrelerinin net Cd²⁺ alımını önemli ölçüde inhibe ettiği ve Si biriktirici (+Si) hücrelerin duvarlarındaki net negatif yük yoğunluğunun, çözeltideki Cd²⁺ konsantrasyonundaki artışla nötrleştirilebileceğini, Si ve Cd'nin hücre duvarlarında karmaşık bileşikler oluşturarak biriktirme mekanizması, Cd iyon alımının inhibisyonunu ile

açıklanabileceğini ve bunun çeltikteki Cd'nin detoksikasyonu için in vivo koşullarda makul bir açıklama olabileceğini rapor etmişlerdir.

Liu vd. (2013b), Cd ile kirlenmiş toprakları ıslah etmek için potansiyel bir bitki kabul edilen itüzümü (*Solanum nigrum* L.) bitkisinde Cd toksisitesinin Si aracılığıyla azaltılması amacıyla üç haftalık itüzümü fidelerine dört gün boyunca Si (1 mM) ve farklı Cd (0 ve 100 μ M) seviyelerini içeren Hoagland çözeltileri uygulanarak yapılan çalışmada; Si uygulanan bitkilerin hem kök hem de gövde ve özellikle de olgun ve yaşlı yapraklarda Cd konsantrasyonlarının önemli ölçüde azaldığı, köklerde etanol ile, su ile ve sodyum klorür (NaCl) ile ekstrakte edilebilir Cd'un nispi oranının Si ilavesi ile artarken kökten gövdeye Cd translokasyonunun azalmadığı, yalnızca Cd uygulamasıyla karşılaştırıldığında Si ilavesinin H₂O₂ birikimini, köklerde hücre ölümünü ve fonksiyonel yapraklarda elektrolit sızıntısını H₂O₂ konsantrasyonunu azaltabileceği, Cd maruziyeti ile fonksiyonel yapraklarda SOD, CAT, POD ve APX aktivitesi belirgin şekilde artarken sadece Cd ilavesine kıyasla Cd+Si uygulamasında fidelerdeki antioksidatif enzim aktivitelerinin önemli ölçüde daha düşük olabileceği ve sonuç olarak köklerde Cd alımı, olgun ve yaşlı yapraklarda Cd dağılımının azalması ve bitkilerde Cd kaynaklı oksidatif stresin azalması nedeniyle itüzümü bitkisinde Cd toleransının Si ile arttırılabileceğini bildirmişlerdir.

Lukačová vd. (2013), yedi gün süreyle uygulanan farklı Cd (0, 5, 10 μ M / 100 μ M) ve Si (0.08 mM Si / 5.0 mM Si) seviyelerinin mısır bitkisinin gelişimi, fotosentetik pigment içeriği, antioksidan enzim aktiviteleri (POX, SOD, CAT), Cd ve Si birikimi ve translokasyonu ile Cd ve Si'un hücre duvarında birikimlerine etkilerini belirlemek için yaptıkları çalışmada; Cd uygulamalarının (5 ve 10 μ M) gelişim parametrelerine olan olumsuz etkisinin 0.08 mM Si uygulamasıyla hafifletildiği, Si'un olumlu etkisinin daha yüksek Cd ve Si seviyelerinde gözlenmediği, Si'un Cd toksisitesini hafifletici etkisinin Cd ve Si seviyelerine bağlı olduğu, Cd toksisitesine bitkilerin antioksidan enzim aktivitelerini artırarak karşılık verdiği ve Cd uygulamasına kıyasla Cd+Si uygulamasında antioksidan enzim aktivitelerinin arttığı, Cd uygulanmış bitkilerdeki klorofil ve karotenoid içeriğinin Si'dan önemli ölçüde etkilenmediği, sürgünlere taşındıkça köklerde çok daha fazla Cd tutulduğu, 5 Cd + 0.08 Si ve 10 Cd + 0.08 Si uygulamalarıyla birlikte gövde, kök ve hücre duvarlarındaki Cd konsantrasyonunda artış belirlendiği, gövdeye Cd taşınımında 5 Cd + 0.08 Si ve 10 Cd + 0.08 Si uygulamalarında Si'un hafif bir azalmaya neden olduğu, kökte Cd'un

hücre duvarında birikimi ile Cd taşınımı arasında negatif bir ilişki olduğu, Cd ve/veya Si uygulamalarının kök anatomisini değiştirdiği, Cd suberin lamel gelişimi ve eski metaksilem lignifikasyonunu artırdığı, Cd uygulamalarına kıyasla Cd+Si uygulamalarındaki Si suberin lamel birikimini hızlandırdığı ve üçüncül endodermal hücre duvarlarının oluşumunu arttırdığı ve endodermal hücre duvarlarının gelişimi ile Cd taşınımı arasında negatif bir ilişki olduğu rapor edilmiştir.

Zhang vd. (2013) tarafından Cd stresi ($5 \text{ mg L}^{-1} \text{ CdCl}_2$) altındaki mangrov (*Avicennia marina* (Forsk.) Vierh.) fidanlarına Si (0, 50, 100 $\text{mg L}^{-1} \text{ Na}_2\text{SiO}_3$) uygulamasının gelişim, köklerin anatomisi, radyal oksijen kaybı (ROL) ve kök yüzeyindeki Fe/Mn plaklarına etkisini araştırmak için yapılan çalışmada; Si uygulamasının fidanların büyümesini teşvik ettiği, mangrovun kök, gövde ve yaprak Cd konsantrasyonunu azalttığı, Cd alımının azaltılması ile ilişkili olabilecek şekilde köklerde apoplastik bariyerin gelişmesine neden olduğu, Si uygulamasına bağlı olarak kök yüzeyinde ROL ve Mn plak miktarlarının daha fazla olmasının mangrov fidanlarının Cd toleransının rtmsıyla ilişkili olabileceği, köklerin anatomisinin değiştirilmesi ve mangrov fidanlarında ROL ve Mn plaklarının artışının Si kaynaklı Cd toksisitesinin azaltılmasında önemli bir rol oynadığı ifade edilmiştir.

Kim vd. (2014), çeltik (*Oryza sativa*) bitkisinde Cd ve/veya Cu (Cd/Cu) toksisitesini önlemede Si'un rolünü araştırdıkları çalışmada; Si'un çeltik bitkisinin gelişimini ve biyokütlesini önemli ölçüde iyileştirdiğini ve farklı stres dönemlerinde Cd/Cu'm toksik etkilerini azalttığı, şiddetli kök zararlanması olan Si uygulanmayan çeltik bitkilerine kıyasla Si uygulamasının kök fonksiyonunu ve yapısını iyileştirdiğini, Si'un varlığında Cd/Cu konsantrasyonlarının önemli ölçüde azaldığını ve bitki dokularındaki lipid peroksidasyon ve yağ asidi desatürasyonunun azaldığını, köklerde metal alımının azalması absisik asit, jasmonik asit ve salisilik asit gibi stres ve konak savunma tepkilerinde gereken fitohormonların sinyalini hafiflettiğini, metallerin düşük konsantrasyonu Si-metal uygulanmış çeltik bitkilerinde ağır metal taşıyıcılarını (OsHMA2 ve OsHMA3) kodlayan enzimlerin mRNA ekspresyonunu önemli ölçüde azalttığını ve yapılan çalışmanın kök morfolojisindeki değişiklikler yoluyla ağır metal maruziyetinden kaynaklanan streslerin düzenlenmesinde Si'un aktif rolünü desteklediğini bildirmişlerdir.

Mihaličová Malčovská vd. (2014) tarafından hidroponik sistemde yetiştirilen mısır bitkisinin (*Zea mays* L., hibrit *Valentina*) fizyolojik ve fotosentetik parametreleri ile Cd toksisitesinin strese bağlı yönlerine etkisini bir Si (5 mM) ve iki Cd (5 ve 50 μ M) seviyesinde uygulama yaparak araştırdıkları çalışmada; tek başına Cd uygulamasının büyümeyi engellediği, toplam klorofil içeriği ve fotosistem II verimliliğini olumsuz yönde etkilediği, köklerde, reaktif oksijen türlerinin birikmesine ve bunun sonucunda membran lipid peroksidasyonuna neden olduğu, bunula birlikte Si ilavesinin Cd'un mısır bitkisi üzerindeki toksik etkisini hafiflettiği, gelişimi ve fotosentetik parametrelerin bir kısmını başarıyla artırdığı, oksidatif stres seviyesini düşürdüğü ve yüksek konsantrasyonlarda Cd'a maruz kalan bitkilerde ve özellikle köklerde Si uygulamasının Cd birikimini azalttığı saptanmıştır.

Naeem vd. (2014), Cd'un toprakta immobilizasyonu belirlemek ve toprakta yapay olarak oluşturulan Cd (10 mg kg⁻¹) stresi koşullarında yetiştirilen düşük (LSCd; cv. Iqbal-2000 ve Lasani- 2008) ve yüksek sürgün-Cd (HSCd; cv. İnqlab-91 ve Sehar-2006) konsantrasyonlarına sahip buğday çeşitlerinin gelişimine Si uygulamalarının (50, 100 ve 150 mg kg⁻¹ CaSiO₃) etkisi belirlemek amacıyla yapılan çalışmada; çeşitlerin hiçbirinin uygulanan Cd stresine karşı herhangi bir toksiklik veya büyüme geriliği göstermediği, Cd uygulanmış bitkilere Si uygulandığında kök ve gövde kuru madde miktarını arttırmadığı ancak 150 mg kg⁻¹ Si uygulamasının tane verimini önemli ölçüde arttırdığı, 150 mg kg⁻¹ Si uygulamasının toprak pH'ını etkilemeden bitkiye yarayışlı Cd'u azalttığı, Si uygulamalarının hem gövde ve tanenin Cd içeriğinde doğrusal bir azalmaya neden olduğu hem de kökten gövde ve taneye Cd taşınımını azalttığı, gövde Cd konsantrasyonundaki azalma HSCd çeşitlerinde LSCd çeşitlerinden daha fazla iken, tanede Cd konsantrasyonu için tersinin geçerli olduğu, hem kökten gövdeye Cd taşınımındaki hem de toprakta bitkiye yarayışlı Cd miktarındaki azalmalar nedeniyle buğday çeşitlerinin Cd konsantrasyonunun Si ilavesi ile azaldığı ve 150 mg kg⁻¹ Si uygulamasının buğdayın tanesinde Cd konsantrasyonunu önemli ölçüde azaltabilecek bir seviye olduğu saptanmıştır.

Wang vd. (2014), CdCl₂ yokluğunda ve varlığında (20 μ M) yetiştirilen çeltik fidelerinde (*Oryza sativa* L., cv. Youyou 128) Cd stresinin hafifletilmesinde 2.5 mM nano-Si'un yaprak uygulamasının etkisini incelemek için yapılan çalışmada; Cd uygulamasının bitki gelişimi ve Mg, Fe, Zn, klorofil a ve glutatyon (GSH) içeriğini azalttığını, Cd birikimini artırdığı, Cd stresi altında yaprakta nano-Si uygulamasının çeltik fidelerinin gelişimini,

magnezyum (Mg), demir (Fe) ve çinko (Zn) beslenmesini ve klorofil a içeriğini iyileştirdiği ve Cd birikimi ve kökten sürgünlere Cd translokasyonunu azalttığı, Cd uygulamasının lipit peroksidasyon seviyesi (MDA) ve antioksidan enzimlerin aktivitelerinde (SOD, POD ve CAT) artış ve glutatyon (GSH) içeriğinde azalma belirlenmiş olan oksidatif strese neden olduğu, daha yüksek Cd toleransının bir göstergesi olarak nano-Si uygulanmış bitkilerin MDA içeriğinde azalma ve GSH içeriğinde artış ve antioksidan enzim aktivitelerine farklılıklara sahip olduğu ve Cd birikimini, gövdede dağılımını ve MDA seviyesini azaltarak ve bazı mineral elementlerin (Mg, Fe ve Zn) içeriğini ve antioksidan enzim kapasitesini artırarak nano-Si uygulamasının çeltikte Cd toksisitesini azalttığı belirtilmiştir.

Balakhnina vd. (2015), Si kaynağı olan zeolitin bulunduğu (+Si) ve bulunmadığı (-Si) ortamlarda yetiştirilen arpa fidelerine (*Hordeum vulgare* L. cv. Barton) uygulanan 0, 450 ve 1000 $\mu\text{mol Cd(NO}_3)_2$ 'ın etkilerini inceledikleri çalışmada; zeolit ilavesinin (+Si) yapraklarda tekli ve çoklu silisik asitlerin birikmesine neden olduğu, fidelerin büyümesinde ve biyokütle üretimini artırdığı, tiyobarbitürik asit reaktif maddelerinin azaldığı ve antioksidan enzimlerin (SOD, APX ve GPX) aktivitelerinde artış olduğu, zeolit ilavesi edilmeyen ortamda (-Si) yetiştirilen bitkilerde klorofil içeriğinde ve fotosentez oranında azalma yanında (TBAR) içeriğinde artışın Cd^{2+} 'nın negatif etkileri olarak ortaya çıktığı, -Si ve +Si bitkilerinin yapraklarında çözültide Cd^{2+} konsantrasyonunun artışıyla SOD, APX ve GPX aktivitelerinin arttığı, arpa yetiştiriciliği için Si-zengin mineral zeolitin kullanılmasının metabolizmayı teşvik ettiği ve oksidatif zararlanma oranı ile antioksidan enzimlerin aktivitesi arasındaki dinamik dengeyi enzim aktivitesi lehine değiştirerek bitkilerin Cd stresine direncini arttırdığı belirtilmiştir.

Dresler vd. (2015) tarafından Si uygulamalarının (0, 0.1, 0.5, 1.5, 3.0 ve 5.0 mM Si) Cd stresi altında yetiştirilen mısır bitkisinin fide gelişimi, Si ve Cd birikimi ve tiyol peptid sentezine etkisinin incelendiği çalışmada; büyüme ortamına uygulanan Si ilavesinin bitki dokularında Si birikimini artırdığı, Cd uygulanmamış bitkilerde kök ve gövde taze ağırlıkları ve kök net uzama oranı gibi büyüme parametrelerine üzerine Si'un yararlı bir rol aldığı ancak mısır fidelerinde Cd toksisitesini azaltmaya dair bir kanıt olmadığı ve Cd toksisitesine maruz kalan bitkilerin büyümesinin kısıtlandığı ve fitoşelatin sentezinin teşvik edildiği, besin çözültisindeki Si konsantrasyonun artmasıyla köklerde Cd ve fitoşelatinlerin birikiminin azaldığı ancak sürgünlerde değişmediği tespit edilmiştir.

Guo vd. (2015), iki selvi çeşidinin (*Juniperus chinensis* ve *Platycladus orientalis*) 220 gün süreyle 100 mg kg⁻¹ Cd ve/veya 400 mg kg⁻¹ Si uygulamalarına maruz bırakılmasıyla rizosferlerde fenolik maddelerin sızması ve Cd biyoyararışılığının etkisini Si'un araştırmak için yaptıkları çalışmada; *P. orientalis*'in daha fazla Cd biriktirdiği ve *J. chinensis* göre yapraklarda daha yüksek büyüme gerilemesine neden olduğu, Si'un her iki çeşitte de Cd toksisitesinin neden olduğu büyüme gerilemesine hafiflettiği, *J. chinensis* için Si'un kök sızmasını etkilemediği ancak eksodermis dokularını güçlendirmesiyle kökte gövdeye Cd translokasyonunu kısıtlayarak köklerde Cd tutulmasını arttırdığı, *P. orientalis* için sadece Cd uygulamasına kıyasla rizosferde daha yüksek Cd hareketliliğine ve gövdede Cd birikiminin artmasına neden olarak Si uygulamasının köklerden fenoliklerin (ferulik asit, kateşin ve agllik asit) sızmasını önemli ölçüde arttırdığı ve Si-kaynaklı fenoliklerle rizosferde Cd-şelatlamının *P. orientalis*'teki Cd detoksifikasyonunda rol oynadığı açıklanmıştır.

Rizwan vd. (2015), 1 mM Si uygulamasının makarnalık buğdayda (*Triticum turgidum* L. durum) Cd toleransını artırma ve toksisitesini (0, 0.5, 5.0 ve 50 µM Cd) azaltmada potansiyel rolünü belirlemek üzere yaptıkları çalışmada; Cd toksisitesinin hem sürgün hem de köklerde büyüme parametreleri, fotosentetik pigmentler ve mineral besin konsantrasyonlarında azalmaya neden olduğu, bitkilerde artan Cd konsantrasyonları ile sürgün ve köklerde malat, sitrat ve akonitat içerikleri artarken, fosfat, nitrat ve sülfat içeriklerinin azaldığı, Si ilavesi ile bu olumsuz etkilerin hafifletildiği, köklerin Zn alımı ile birlikte kök hücrelerinde apoplastik seviyede adsorbe edilen Cd konsantrasyonu arttıkça sürgün Cd konsantrasyonunun azaldığı, Si varlığında toplam Cd alımının azaldığı, ne sürgünlerde ne de kökte Cd ve Si'un birlikte lokalizasyonunun olmadığı, yaprak fitolitlerinde Cd'un tespit edilemediği, köklerde Cd kortikal parankimada ve Si ise endodermiste tespit edilirken 50 µM Cd + 1 mM Si uygulamasında yetiştirilen bitkilerin dış ince kök yüzeyinde homojen olmayan Cd ve Si zenginleşmelerinin olduğu ve bu sonuçların kök-sürgün translokasyonunu sınırlandırılması ve kök yüzeyinin Si ve Cd içeren bileşiklerle kaplanması ile oluşan kökte yerleşik koruma mekanizmasının varlığını gösterdiğini açıklamışlardır.

Vaculík vd. (2015), üç farklı seviyede Cd'a (0, 5 ve 50 µM) maruz bırakılan mısır bitkisine uygulanan Si'un (0 ve 5 mM) etkisini fotosentez ve ilgili süreçler (net fotosentez oranı, klorofil *a* ışınımı, pigment analizi) yanı sıra yaprak dokusu anatomisi ve hücre

protoplasma yapısını değerlendirerek yaptıkları çalışmada; Si'un yaprak dokularındaki Cd konsantrasyonunu azaltmamasına rağmen, net fotosentez oranı, fotosistem II'nin etkili fotokimyasal kuantum verimi ve asimile edilen pigmentlerinin içeriğini artırarak Cd'un toksisitesini etkin bir şekilde hafiflettiği, Cd'un yaprak anatomisini ve yaprak mezofil hücre kloroplastlarının yapısını etkilemediği ancak Cd'un demet kını hücrelerinin kloroplastlarında tilakoid oluşumunu olumsuz etkilediği ve bu olumsuz etkinin Si tarafından hafifletildiği ve sonuç olarak demet kını hücrelerinin kloroplastlarında tilakoid oluşumundaki iyileşmenin Si kaynaklı olarak fotosentezin artışı ve bir C4 bitkisi olan mısırın biyokütle üretimindeki artışa katkı sağladığı açıklanmıştır.

Wu vd. (2015), tohumdan itibaren hidropinik ortamda iki hafta boyunca hıyar (*Cucumis sativus* L.) bitkisine 0.5 mM Si ve domates (*Solanum lycopersicum* L.) bitkisine 2.0 mM Si uygulayarak yetiştirilen fidelerde Cd (100 µM Cd) toksisitesinin hafifletici etkilerini araştırdıkları çalışmada; her iki bitki türünün gelişimi de Cd uygulaması tarafından kısıtlandığı ancak Si uygulamasının gelişmedeki gerilemeyi etkisileştirdiği, Si her iki bitki türünün gövdesinde ve hıyarın köklerinde Cd konsantrasyonlarını azalttığı, kökten gövdeye Cd taşınması Si ilavesiyle domateste azalırken hıyarda ise arttığı, Cd stresi altında Si uygulamasıyla toplam organik asit içeriklerinin domates yapraklarında azaldığı fakat hıyar kök ve yapraklarında ise arttığı, Si uygulaması ile her iki türün köklerini hücre duvarındaki polisakkarit seviyelerinin arttığı ve Si uygulamasıyla her iki türde de Cd kaynaklı oksidatif zararlanmanın azaldığı belirtilmiştir. Araştırmacılar sonuç olarak, domatesin kökten gövdeye Cd taşınmasını ve hıyarın ise kökleriyle Cd alımını azaltmak gibi Si aracılığıyla gövdedeki Cd birikimini azaltan farklı mekanizmaların bitkilerde var olduğunu açıklamışlardır.

Çıkılı vd. (2016), serada yetiştirdikleri ve deneme toprağına beş farklı düzeyde Cd (0, 2.5, 5, 10 ve 20 mg kg⁻¹) uyguladıkları dört farklı *Solanaceae* familyası bitkisinde (domates, biber, patlıcan ve altınçilek) bitkinin gelişimi, Cd biyoakümülayonu ve translokasyonu ile bitkilerin metal besin iyonları (K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu, Zn) akümülayonuna Cd toksisitesinin etkisini araştırdıkları çalışmada;

- Domates hariç, diğer bitkilerin gövde ve kök kuru biyokütlelerinin artan Cd düzeylerine bağlı olarak azaldığını,
- Gövde kuru biyokütlesindeki yüzde azalma temel alındığında, domatesin Cd-toleranslı ve diğer bitkilerin ise Cd- duyarlı olduğunu,

- Altınçilek bitkisinde gövde Cd içeriği ve kök Cd alımı hariç, bitkilerde gövde ve kökün Cd içerikleri, Cd alımları ve toplam akümülasyon oranlarının artan Cd düzeylerine bağlı olarak arttığını,
- Domates için translokasyon faktörü hariç tüm bitkilerde, Cd'un biyokonsantrasyon ve translokasyon faktörünün azaldığını,
- Altınçilek bitkisinin gövdesinde, tüm metal besin iyonlarının akmlasyonunun Cd uygulamalarıyla arttığını,
- Biber ve patlıcanda, Zn ve Cu hariç iki değerlikli metal besin iyonlarının akümülasyonu artarken, tek değerlikli metal besin iyonu olarak K akmlasyonunun sadece biberde azaldığını,
- Cd translokasyonuna göre bitkiler değerlendirildiğinde, altınçilek < biber < patlıcan < domates olarak sıralandıklarını tespit etmişlerdir.

Fan vd. (2016), Si uygulamasının Cd ve/veya Zn stresi altındaki iki eltik eşidi (Feng-Hua-Zhan ve Hua-Hang-Si-Miao) köklerinin kök morfolojik özellikleri, hücre yapısı ve salgılarına etkilerini belirlemek için yapılan çalışmada; Cd, Zn ve Cd+Zn uygulamalarının toplam kök uzunluğu, kök yüzey alanı, kök hacmi, ortalama kök çapı ve kök aktivitesinde önemli azalmalara neden olduğu ancak 1.5 mM Si ilavesi ile bu olumsuz etkilerin tersine çevrildiği, her iki çeşitte de eltik kök hücrelerinin Cd ve/veya Zn stresi altında ağır hasar gördüğünü, Si ilavesi ile hücre yapısı bütünlüğünün arttığı, Cd ve/veya Zn stresi altında Feng-Hua-Zhan eşidinin kök sızıntılarında oksalik, asetik, tartarik, maleik ve fumarik asit seviyelerinin düşük olduğu, Hua-Hang-Si-Miao eşidinde ise oksalik ve fumarik asit seviyelerinin önemli ölçüde azaldığı ancak Si ilavesinin asit seviyelerini arttırdığı belirlenmiştir. Araştırıcılar, Si ilavesinin çeltikte kök özellikleri, hücre yapısının iyileştirilmesi ve kök salgılarını etkileyerek ağır toksisitesini hafifletebileceğini rapor etmişlerdir.

Farooq vd. (2016), stres altındaki bitkilere Si uygulayarak stres etkilerinin geri çevrilebileceğini araştırmak için yaptıkları çalışmada, eltiklere hidroponik ortamda 4 gün boyunca 10 μM CdCl_2 , sonraki 4 gün boyunca Cd ile birlikte 0.6 mM Si(OH)_4 uygulamışlardır. Çalışmanın sonucunda; bitkilerin gelişimi, fotosentez, elementel bileşimleri ve bazı biyokimyasal parametreleri zerine Cd stresinin olumsuz etkilerinin Si tarafından düzeltildiği, Cd stresine bağlı besin maddesi homeostazında (dengesi) bozulmanın Si ilavesi

ile düzeltildiği, Si ilavesi ile askorbat glutatyon sisteminin güçlü şekilde uyarılmasıyla ilişkili olarak fotosentetik geri kazanım olduğu, bu tepkinin stresle ilişkili protein ailesinin üyelerini kodlayan genlerine vurgu yapan transkript analizleri ile de doğrulandığı, biyokimyasal parametrelerdeki değişikliklerle birlikte Cd stresi altındaki çeltiğin gelişimindeki düzelmenin ve hücre redoks dengesinin yeniden düzenlenmesindeki belirleyici rolünün Si önemini vurguladığı açıklanmıştır.

Greger vd. (2016), Si (0 ve 1 mM K_2SiO_3) ve Cd (0 ve 1 μM $CdCl_2$) uygulamaları ile buğday hücresel seviyede Cd alımının Si ile azaltılıp azaltılmadığını araştırdıkları çalışmada; buğday fidelerinin kök ve sürgünlerinde Cd, Si ve Fe birikimi analiz edilmiş ve Si uygulamasının özellikle gövdede Cd birikimini azalttığı, sitoplazmaya Cd taşınmasını azalttığı, Cd uygulamasının fitoşelatin oluşumunu arttırdığı ve kök ve gövdede Fe taşınmasını kolaylaştıran ve Cd tarafından regülasyonu azalan Fe ve metal taşıyıcı gen olan *IRT1* gen seviyesinin Si uygulaması ile regülasyonun arttığı bildirilmiştir.

Kabir vd. (2016), yoncadaki Cd toksisitesinin (0 ve 1 mM $CdCl_2$) iyileştirmesinde Si uygulamasının (0 ve 1 mM K_2SiO_3) rolünü araştırdıkları çalışmalarında; Cd stresindeki bitkilerde Si ilavesinin morfo-fizyolojik özelliklerin yanı sıra toplam protein ve membran stabilitesinde de önemli bir iyileşmeye neden olduğu, Cd stresinde Si uygulanan bitkilerin uygulanmayanlara kıyasla hem kök hem de gövdelerinde Cd ve Fe konsantrasyonlarının azaldığı, Si aracılığıyla Cd stresine toleransın yoncadaki Cd kısıtlaması ile ilişkili olduğu ve iki metal şelatör (fitochelatin sentetaz, *MsPCS1* ve metallothionein, *MsMT2*) gen ekspresyonundaki değişikliklerin ve fitochelatin birikiminin önemli olmadığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca, Cd stresindeki yonca köklerinde Fe redüktaz aktivitesinde, Fe ile ilişkili genler (Fe taşıyıcı, *MsIRT1* - metal taşıyıcı, *MsNramp1* ve ferrik şelat redüktaz, *OsFRO1*) ve Fe şelatörlerinde (sitrata ve malata) Si uygulaması ile tutarlı bir azalma gözlemlendiğini, Araştırmacılar, Fe kazanım mekanizmalarının down-regülasyonu yoluyla Fe alımının sınırlandırılmasının yoncada Si aracılığıyla Cd toksisitesinin hafifletilmesini sağladığını ve Si uygulamasının bitkilerde metionin ve prolin ile birlikte CAT, APX ve SOD aktivitelerinin artırarak kısmende olsa H_2O_2 miktarını azaltıp yoncada Cd stresine karşı antioksidan savunmayı sağlamada rol oynayabileceğini tespit etmişlerdir.

Wang vd. (2016) tarafından farklı Si gübrelerinin (K-Si, Ca-Si ve Na_2SiO_3) uygulanmasının çeltik tanesinde Cd ve As konsantrasyonlarını aynı anda azaltılabileceği hipotezi ile yapılan çalışmada; NP ile birlikte yüksek miktarda uygulanan 9 ton ha^{-1} (NP+KSi9000) K-Si gübresinin çeltik tanesinde As konsantrasyonunu kontrole kıyasla % 20.1'e kadar azalttığı, Si gübrelemesinin çeltikteki Cd konsantrasyonunu As konsantrasyonundan daha önemli ölçüde azalttığı, sodyum metasilikat (Na_2SiO_3) dışındaki tüm Si gübrelerinin çeltik tanesinde Cd konsantrasyonunu azaltmada yüksek bir etki gösterdiği, Ca-Si gübresinin çeltik tanesinde Cd konsantrasyonunun azaltılmasında en etkili Si kaynağı olduğu, 9000 kg ha^{-1} (NPK+CaSi9000) ve 900 kg ha^{-1} (NPK+CaSi900) dozlarında uygulanan Ca-Si gübresinin çeltik tanesinde Cd konsantrasyonunu sırasıyla %71.5 ve %48.0 oranında azalttığı, 9000 kg ha^{-1} (NP+KSi9000) ve 900 kg ha^{-1} (NP+KSi900) dozlarında uygulanan K-Si gübresinin çeltik tanesindeki Cd konsantrasyonunu sırasıyla %42.0 ve %26.5 oranında azalttığı ve Si gübrelerinin çeltik tanesinde Cd ve As konsantrasyonunu azaltma potansiyelinin olduğunu açıklamışlardır.

Wu vd. (2016), Cd stresi altında (0, 1, 5 ve 25 $\mu\text{M CdCl}_2$) yetiştirilen buğday bitkilerinin kök morfolojisi, köklerden oksalat sızması ve Cd dağılımına Si varlığı ve yokluğu (0 ve 1 mM Na_2SiO_3) koşullarının etkisini araştırdıkları çalışmada; Si'un bitki gelişimini iyileştirerek Cd konsantrasyonlarını azalttığı, hücre altı dağılım çalışmalarında Si'un hücre duvarları veya vakuollerde Cd birikimini hızlandırmadığını, Si uygulamasına bakılmaksızın Cd'un aşağıdan yukarı (akropetal) translokasyonunun etkilenmediği, yaprak Cd konsantrasyonlarındaki Si-ilişkili azalmanın kökten dışlamaya dayandırıldığı ve bu etkinin kökten oksalat sızması ile izlenebileceği, Cd stresi altındaki bitkilerde kök uçlarından (apeks) oksalat sızma kabiliyetinin zayıfladığı ancak Si ilavesi ile bu yeteneğin geri kazanıldığı ve böylece köklerde Cd alımının azaldığı, kök oksalat sızmasının artmasıyla Si'un Cd alımını azalttığı ve kök oksalat sızmasını kolaylaştırabilecek toplam kök ucu (tip) sayısını arttırdığı saptanmıştır.

Cui vd. (2017), hücre kültüründe çeltikte Cd toksisitesi üzerine Si-nano partiküllerinin (SiNP) varlığı (19 nm, 48 nm ve 202 nm) veya yokluğu koşullarında Si'un moleküler mekanizmalara etkisini araştırmak için yapılan çalışmada; 19 nanometre (nm, 48 nm ve 202 nm boyutundaki SiNP'lerin varlığında canlı hücrelerin oranını sırasıyla %95.4, %78.6 ve %66.2 düzeyinde arttırdığı, SiNP'lerin yokluğunda hücrelerin organel

bütünlüğündeki anormal hasar ve ciddi yapısal değişikliklerin meydana geldiği, oysa SiNP'lerin varlığında yüksek Cd konsantrasyonlarında bile hücrelerin neredeyse bozulmadan kaldığı, çeltik hücrelerinin yüzeyinde SiNP'lerin biriktiği, SiNP'lerin (19 nm, 48 nm ve 202 nm) bulunduğu ortamlarda ortalama Cd^{2+} alımının sırasıyla 15.7, 11.1 ve 4.6 kat azaldığı, Cd alımı ve taşınımı gen ekspresyonunun SiNP'ler tarafından engellendiği fakat vakuoldeki Cd taşınımı gen ekspresyonu ve Si alımının SiNP'ler tarafından artırıldığı tespit edilmiştir. Yine aynı çalışmada, SiNP'lerin varlığının Si alım kapasitesini en az 1.87 kat arttırdığı, Cd alım kapasitesini engellendiği ve çeltikte Cd toksisitesinin azalmasına neden olduğunu belirlenmiştir.

Guo vd. (2017), çeltik fidelerinde Cd birikimi ve dağılımına Si'un engelleyici etkisini belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada; denemenin 35. gününden sonra Cd (5 mg L^{-1}) uygulanan çeltik fidelerinde toksisite belirtilerinin görüldüğü, biyokütle, klorofil ve karotenoid içeriklerinin azaldığı ancak bu parametrelerin Si (120 mg L^{-1}) ilavesinden sonra arttığı, Si'un çeltik bitkilerinde Cd birikimini azalttığını biyokonsantrasyon ve translokasyon faktörü değerlerinin gösterdiği, ayrıca kökten gövdeye Cd taşınım oranını azaltarak Cd toksisitesini etkili bir şekilde hafiflettiği, Si'un olumlu etkilerinin esas olarak kloroplastlarda grana lamel ve membran yapılarındaki düzelme ve membran morfolojisinin onarımı ve mitokondride cristae sayısının artması şeklinde ortaya çıktığı, Si'un çeltik fidelerinde (özellikle gövdede) Cd alımını azalttığı ve topraküstü aksamlarına Cd taşınmasını engellediği, Si'un lipid peroksidasyonundaki azalma nedeniyle kloroplastların fonksiyonlarını düzenlediği ve kloroplast biyosentezindeki iyileşme ve Cd biyoyararlanımının azalması nedeniyle Cd toksisitesinin hafifletildiği belirtilmiştir.

Ji vd. (2017), uzun süreli çeltik tarımı için kullanılan ve Cd ile kirlenmiş topraklarda yetiştirilen çeltik bitkilerinin kardeşlenme döneminde kök, gövde ve yaprak gelişimine farklı Si'ca zengin materyallerin (cüruf, diyatomeli toprak) ve gübrelerin (aktif cüruf, ticari Si gübre) etkisini araştırdıkları çalışmada; Si'ca zengin materyal uygulamaların çeltik biyokütlesini % 15.5'e kadar arttırdığı, yaprakta toplam Cd konsantrasyonunu %8.5-%21.9 arasındaki oranlarda azalttığı, uygulamalar arasında ticari Si gübresinin en etkili uygulama olduğu, monosilik asidin biyoyararlı Cd'un adsorpsiyon ve fiksasyonunu sağladığı ve kök ve köküstü apoplastlarda monosilik asidin Cd'u çökeltebileceği ve sonuç olarak Cd'un

gövde ve yapraklara taşınması ve topraktaki hareketliliğinin sistemdeki monosilik asit içeriğine bağlı olduğu belirtilmiştir.

Rahman vd. (2017), tarla bezelyesinde Si'un Cd toksisitesinin biyokimyasal ve moleküler seviyede hafifletilme etkisini ve bu etkisinin nasıl olduğunu araştırdıkları çalışmada; Si'un uygulamasının Cd stresindeki bitkilerin büyüme ve gelişimi ile toplam protein ve membran stabilitesini belirgin şekilde arttırdığı ve Si'un bezelyede Cd detoksifikasyonunda kritik bir role sahip olduğu, Cd stresi altında Si uygulanan ve uygulanmayan bitkiler karşılaştırıldığında, sırasıyla kök ve sürgünlerde Cd ve Fe'de önemli artış ve azalmalar görüldüğü, moleküler düzeyde fitoşelatinin öncüsü olan GSH1 ve metalotiyonin (MTA) transkriptlerinin ağırlıklı olarak köklerde olduğu, Cd uygulamasına kıyasla Si ve Cd+Si uygulanmış bitkilerin sürgünlerinde bezelye Fe taşıyıcılarını (RIT1) regüle ettiği, bezelye bitkisinde Cd toksisitesinin hafifletilmesinin, köklerde Cd'un alıkoyulması ve Fe taşınımının düzenlenmesi ile sürgünlere Cd translokasyonunun azalması ile ilişkili olabileceği, CAT, POD, SOD ve GR enzim aktivitelerindeki artış ile birlikte S-metabolitlerinin (sistein, metionin, glutatyon) miktarındaki yükselmelerin ile reaktif oksijen türlerinin süpürülmelerine aktif olarak katılmaları bezelyede Cd toksisitesini kısmen azaltılabildiğinde rol oynadığı sonucuna varılmıştır.

Zaheer vd. (2017), glayöl (kuzgunkılıcı, *Gladiolus grandiflora* L.) soğanlarında Cd toksisitesinin (50 mg kg^{-1}) azaltılmasında Si ve K'un rolünü araştırdıkları çalışmalarında; Cd stresinin H_2O_2 ve MDA dâhil oksidatif stres belirteçlerinin seviyelerini önemli ölçüde artırdığı, K ve Si uygulamalarının protein ve prolin üretimini artırdığı, Cd stresi altında K ve Si uygulanan bitkilerde antioksidan enzimlerin aktivitesinde artış ve MDA, H_2O_2 ve Cd alım seviyelerinde ise azalma olduğu, K ve Si uygulamalarının mineral besin alımını (Ca, Mg, Mn, S ve K) artırdığı ve toplam fenolik ve flavonoid miktarlarını yükselttiği ve sonuç olarak oksidatif stresi ve Cd alımını azaltarak ve antioksidan savunma enzimlerinin aktivitesini, ikincil metabolitlerin ve bitki beslenme miktarını artırarak Si ve K'un glayölün gelişimini iyileştirebileceği tespit edilmiştir.

Alzahrani vd. (2018), 15 günlük fide döneminde karşılaşılan tuzluluk (200 mM NaCl), kuraklık (tarla kapasitesinin %50'si) ve Cd (2 mM) streslerine buğday bitkisinin toleransının iyileştirilmesinde Si uygulamasının (0, 2, 4 ve 6 mM) etkisini incelemek için

yapılan çalışmada; stres olmayan koşullarda Si uygulamalarının Si içeriğini arttırdığı ve elektrolit sızıntısı, MDA ve Na^+ içeriklerindeki azalmanın bir sonucu olarak büyümeyi teşvik ettiği, stres koşullarında büyüme, gaz değişimi, doku suyu ve membran stabilite ve K^+ içeriğinde Si takviyesi ile artış sağlandığı, Si uygulanmayan koşullar ile karşılaştırıldığında, buğdayda abiyotik strese karşı antioksidan savunma sağlayan antioksidanlar ve osmokoruyucuların (serbest prolin, çözünür şekerler, askorbik asit ve glutatyon) içeriklerinin artışıyla bağlantılı olarak enzim (SOD, CAT ve POD) aktivitesinin Si uygulamaları arttığı, tuz ve kuraklık stresi hafifletilmesinde 4 mM Si ve Cd stresinin hafifletilmesinde ise 6 mM Si seviyesinin en etkili düzeyler olduğu tespit edilmiştir.

Lu vd. (2018), Si'un tütün bitkisinde (*Nicotiana tabacum* L.) Cd toksisitesini azaltmadaki etkisini araştırmak için üç Cd (0, 1 ve 5 mg kg^{-1}) ve üç Si konsantrasyonu (0, 1 ve 4 g kg^{-1}) uyguladıkları ve bitki büyüme parametreleri, biyokütle ve Cd konsantrasyonu, malondialdehit (MDA), klorofil ve karotenoidlerin konsantrasyonları gibi parametreleri araştırdıkları çalışmada; Si uygulamasının, Cd stresi altındaki tütün bitkilerinin büyümesini arttırdığı, 5 mg kg^{-1} Cd uygulaması ile birlikte Si uygulanması kök, gövde ve yaprak biyokütlesini Si uygulanmayan koşullara göre sırasıyla %26.1-43.3, %33.7-43.8 ve %50.8-69.9 arasında arttırdığı, hem 1 mg kg^{-1} hem de 5 mg kg^{-1} Cd uygulamalarında Si uygulamasının tütündeki Cd'un sürgünden köke tranlokasyonunu %21 düzeyinde ve MDA içeriklerini ise sırasıyla %5.5-17.1 düzeyinde azalttığı ve Si uygulamasının sadece Cd uygulamalarına göre klorofil ve karotenoid içeriklerini sırasıyla %33.9-41.0 and %25.8-47.3 düzeylerinde arttırdığı ve sonuç olarak Si uygulamasının tütünde Cd toksisitesini azalttığı rapor etmişlerdir.

Naeem vd. (2018), onbeş günlük Cd-tolerant (Iqbal-2000) ve Cd-duyarlı (Sehar-2006) buğday fidelerine uygulanan 15 μM Cd, 0.6 mM Si ve bunların kombinasyonunun Cd konsantrasyonun azaltılmasındaki rolü ve Si'nin bitki gelişimindeki olumlu etkisini belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada; Si uygulaması ile Cd-duyarlı çeşidin kök ve gövde kuru madde miktarı artarken Cd-tolerant çeşitte değişimlerin önemli olmadığı, Sehar-2006 çeşidinin klorofil içeriği ve fotosentez miktarında belirgin iyileşmeler gözlemlenirken stoma iletkenliği ve terleme hızında gerilemeler olduğu, CAT, APX, GPX ve SOD gibi enzimatik antioksidanların aktivitelerini arttırdığı ve bu artışların Cd-tolerant çeşitte daha yüksek olduğu, Si ilavesi her iki çeşitte de MDA içeriğini azaltsada Cd-duyarlı çeşitte bu

azalmasının daha belirgin olduğu, Si uygulamasının her iki çeşidin de kök ve sürgünlerinde Cd birikimini azalttığı, gövdede Cd miktarındaki azalmanın kökler tarafından Cd alımında ve kökten gövdeye Cd translokasyonundaki azalma ile ilişkili olduğu ve Cd-duyarlı çeşitte terleme hızını azaltarak ve Cd-tolerant çeşitte antioksidan aktiviteyi artırarak Si uygulamasının Cd içeriğini baskıladığı sonucuna varmışlardır.

Shi vd. (2018), Cd toksisitesine (0, 5 μ M ve 20 μ M Cd; $\text{CdCl}_2 \cdot 3/2\text{H}_2\text{O}$) Si uygulamasının (1 mM Si; $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) hafifletici rolünü buğday bitkisinin büyüme durumu, fotosentez parametreleri, kök morfolojisi, antioksidan sistem ve Cd^{2+} alımını dikkate alarak inceledikleri hidroponik çalışmada; Si uygulamasının fotosentezi olduğu kadar bitki biyokütlesini de iyileştirdiğini ancak Cd stresi altında fidelerin kök morfolojisine çok az etkisi olduğunu, Si ilavesi ile hem gövde hem de kök Cd içeriklerinin azaldığını, Si uygulamasının MDA ve H_2O_2 içeriğini azaltarak ve SOD ve POD aktivitesini artırarak buğday yapraklarındaki oksidatif stresi azalttığını ve sonuç olarak Si'un bitki büyümesini ve antioksidan kapasitesini artırarak ve Cd alımını ile lipit peroksidasyonunu azaltarak buğday fidelerinde Cd toksisitesini azaltabileceğini ortaya koymuşlardır.

Dorneles vd. (2019), altı farklı uygulama (T1: Kontrol - T2: 2.5 μ M selenyum (Se) - T3: 2,5 mM Si - T4: 50 μ M Cd - T5: 50 μ M Cd + 2.5 μ M Se; T6: 50 μ M Cd + 2.5 mM Si) koşullarında 60 gün boyunca yetiştirilen patates (*Solanum tuberosum* L.) bitkilerinde 30. ve 60 günde gelişim parametrelerine Se ve Si uygulamalarının Cd toksisitesini giderici etkisini araştırmak için yaptıkları çalışmada; Cd'un araştırılan tüm gelişim parametrelerinde (kuru ve yaş ağırlık, bitki boyu, yaprak sayısı, yaprak alanı, kök ve fotosentetik parametreler) oldukça toksik olduğu, Se ve Si'un tüm gelişim parametrelerinde Cd toksisitesini azaltmada etkili olduğu ancak Si'un kuru ağırlık ve bitki boyu parametrelerinde Se'dan daha etkili olduğu rapor edilmiştir.

Greger ve Landberg (2019) tarafından çeşitli formlarda 500 kg ha⁻¹ Si [(1) K_2SiO_3 çözeltisi, (2) mikrosilisyum; amorf SiO_2 ve (3) Solaritt; CaSiO_3 , $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$ ve CaO karışımı) ilavesinin patates, havuç, soğan ve buğday bitkilerinin yenilebilir kısımlarında Cd ve As birikimini azaltmadaki etkilerini araştırdıkları tarla koşullarında yapılan çalışmada; tüm bitkilerin yenilebilir kısımlarında Si ilavesinin Si içeriğini %12-28 oranında arttırdığı ve Cd ve As içeriklerini sırasıyla %10-25 ve %20-%40 oranında azalttığı, toprakta mevcut Si

içeriğinin Si ilavesiyle 10 kat arttığı ancak mevcut As ve Cd içeriklerinin değişmediği, K_2SiO_3 ve mikrosilisyum toprakta Si içeriğinin yüksek olması nedeniyle en yüksek etkiye sahip oldukları ve toprakta bitkiye yararlı Si miktarının artışıyla türlerin yenilebilir kısımlarındaki As ve Cd içeriğinin azalttığı tespit edilmiştir.

Rostami vd. (2019), Si yokluğunda (-Si) ve varlığında ((+Si: 1 mmol L⁻¹ Na₂SiO₃) farklı düzeylerde Cd (0, 2.5, 5 ve 10 mg L⁻¹ CdCl₂) uygulamalarının balangu (*Lallemantia royleana*) bitkisinin fizyolojik özelliklerine etkilerini incelemek için yapılan çalışmada; Si yokluğunda (-Si) 10 mg L⁻¹ Cd uygulaması ile en yüksek gövde Cd içeriğinin (84.1 mg kg⁻¹) belirlendiği, +Si uygulamalarının tamamında sürgün Cd içeriğinin azaldığı, en yüksek translokasyon faktörünün (0.195) -Si ve 2.5 mg L⁻¹ Cd uygulamasında gözlemlendiği ve bitki büyüme ortamında Cd konsantrasyonunun artması ile translokasyon faktörünün önemli ölçüde azaldığı, -Si bitkilerine göre +Si bitkilerinde Cd'un translokasyon faktörünün önemli ölçüde azaldığı, Cd konsantrasyonunun 2.5 mg L⁻¹ düzeyine kadar artırılmasının göreceli su içeriği, yaprak alanı, klorofil *a* ve katalaz aktivitesine önemli bir etkisinin olmadığı, -Si bitkileriyle karşılaştırıldığında +Si ve 10 mg L⁻¹ Cd uygulanan bitkilerde peroksidaz (%23), katalaz (%55) ve süperoksit dismutaz aktivitesi (%30) arttığı, ya antioksidan enzimlerin aktivitesini artırarak ya da gövdeye Cd translokasyonunu azaltarak azalttığı Si'un Cd'un bitki büyümesindeki olumsuz etkilerini azalttığı ve bu nedenle büyümeyi artırmak ve 5 mg L⁻¹ Cd konsantrasyonunun altında daha sağlıklı bitkiler üretmek için Si uygulamasının tavsiye edildiği bildirilmiştir.

Bitkiler için mutlak gerekli olmamasına rağmen Si'un bitkilerde abiyotik stres oluşturabilecek ağır metaller/metaloidlerin [mutlak gerekli olmayan; Cd, kurşun (Pb), krom (Cr), alüminyum (Al), arsenik (As) ve antimon (Sb) ve mutlak gerekli olan; bakır (Cu), nikel (Ni) ve çinko (Zn)] fazlalığından kaynaklı fitotoksisiteyi hafiflettiğini, rizosfer kök bölgesinde bu metaller/metaloidlerin alımının ve hareketliliğinin kısıtlanmasının muhtemelen ilk savunma mekanizması olduğu, ayrıca kök apoplazmasında elementlerin tutulmasının bitkilerin direncini ve canlılığını arttırdığını, hücresel düzeyde Si ve metaller/metaloidler arasında çözünmeyen komplekslerin oluşumu ve bunların hücre duvarları içinde depolanmasının bitkilerin mevcut element konsantrasyonunu azaltmasına ve sim plazmik alımını kısıtlamasına yardımcı olduğunu ve Si'un çeşitli antioksidanların aktivitesini değiştirerek bitkilerin oksidatif durumunu etkilediğini, membran stabilitesini geliştirdiğini

ve kesin rolü hala tam olarak açıklanmamasına rağmen gen ekspresyonu üzerinde rolü olduğu açıklanmıştır (Vaculík vd., 2020).

Khan vd. (2020), Si varlığı (1 mM Si) ve yokluğunda tekil ve kombine olarak uygulanan Cd (200 μ M Cd) ve tuzluluk (100 mM NaCl) stresinin hurma ağacında (*Phoenix dactylifera* L.) fizyo-hormonal etkilerini araştırdıkları çalışmada; stresli (Cd/NaCl) koşullar altında Si uygulanmamış fideler ile karşılaştırıldığında Si uygulamasının bitki büyümesinde ve fizyolojisinde önemli iyileşmelere yol açtığı, Si uygulamasının kombine stres altında daha düşük Cd alımına ve bitkide makro besin alımının artmasına yol açtığı, lipid peroksidasyon oranını ve peroksidaz ve katalaz aktivitelerini düşürerek tuzluluk ve Cd kaynaklı oksidatif stresi hafiflettiği, askorbat peroksidaz seviyesi ve sitosolik Cu/Zn süperoksit dismutaz ekspresyonunun artırdığı ve Si uygulamasının tekil NaCl stresi ve kombine NaCl/Cd stresi altında dâhili salisilik asit, jasmonik asit ve absisik asidin regülasyonunu önemli ölçüde düşürdüğü belirtilmiştir. Yine aynı çalışmada; kombine stresi hafifletmek için Si'nin birikimi artırarak ve Cd alımını engelleyerek biyokütle üretiminin ve antioksidan sistemin etkinliğinin iyileşmesine neden olduğu, kombine stres altında hurma fidelerinde Proline Transporter 2 ve GAPDH genlerinin daha yüksek transkript birikimi ve ABA receptor geninin regülasyonunun düşmesi Si'un stresi iyileştirici rolü olduğunu gösterdiği açıklanmıştır.

Rahman vd. (2020) tarafından kökten ve yapraktan Si (1 mmol L⁻¹ Na₂SiO₃) uygulama yöntemlerinin dört farklı Cd stresi (0, 50, 100 ve 200 μ mol L⁻¹) altında yetiştirilen kışlık buğday (*Triticum aestivum* L.) bitkisine etkisinin incelendiği çalışmada; Cd stresinin büyümeyi, klorofil içeriğini ve fizyolojik özellikleri önemli ölçüde etkilediğini ve antioksidatif savunma sistemi aktivitesini, osmoprotektant ve Cd içeriğini artırdığını, ancak yaprak veya kökten Si uygulamasının büyüme, klorofil içerikleri, membran stabilite indeksi ve Si içeriklerini önemli ölçüde artırarak ve elektrolit sızması, MDA ve H₂O₂ içeriklerini azaltarak Cd'un toksik etkilerini geri çevirdiği ve enzimatik ve enzimatik olmayan antioksidatif savunma sisteminin aktivitesini artırdığı ve kökten Si uygulanmasının tercih edilmesi ile buğdayın yaprak alanı, bitki biyokütlesi, membran karakteristiği, fotosentetik oranı ve antioksidatif savunma sistemini geliştirerek Cd toksisitesini hafiflettiği belirtilmiştir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Bitki materyali olarak ülkemizde yaygın olarak üretimi yapılan *Solanaceae* familyasına ait domates (*Solanum lycopersicum* L., cv. H-2274), biber (*Capsicum annuum* L., cv. Yalova Çorbacı-12), patlıcan (*Solanum melongena* L., cv. Kemer), patates (*Solanum tuberosum* L., cv. Agria), tütün (*Nicotiana tabacum* L., cv. Adıyaman) ve altınçilek (*Physalis peruviana* L., Colombian ecotype) türleri kullanılmıştır.

3.2. Yöntem

Çalışma Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü'ne ait yarı kontrollü plastik serada yürütülmüştür. Seranın iklim koşulları; ortalama ortam sıcaklığı 18/33 °C (minumum/maksimum) ve ortalama bağıl nem ise %37/67 (minumum/maksimum) olarak belirlenmiştir. Suda 12 saat şişirilen domates, biber, patlıcan, tütün ve altınçilek tohumları 1/3 perlit/torf karışımı doldurulmuş viyollere ve patates ise perlit doldurulmuş uygun büyüklükteki plastik kasalara ekilmiştir. Sulama ve bakım işleri yapılarak dört haftalık süre sonunda elde edilen türlere ait fidelerin kökleri yıkanıp temizlendikten sonra iki litrelik saksılara doldurulan perlit ortamına 2 bitki/saksı olacak şekilde üç tekrarlamalı olarak şaşırtılmıştır. *Solanaceae* familyasına ait türler deneme süresince modifiye edilmiş Hoagland çözeltisi ile sulanmıştır.

Modifiye edilmiş Hoagland çözeltisinin bileşiminde; 5 mM $\text{Ca}(\text{NO}_3)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 5 mM KNO_3 , 2 mM $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ve 1 mM KH_2PO_4 , 45.5 μM H_3BO_3 , 44.7 μM $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 9.1 μM $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 0.77 μM $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.32 μM $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 0.17 μM $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 0.10 μM $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_7 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ ve 55.0 μM $\text{Na}_2\text{EDTA} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ bulunmaktadır. Hoagland çözeltinin pH'sı 6.0'ya HCl veya KOH kullanılarak ayarlanmıştır.

Türlere ait fidelerin besin çözeltisi ortamına alıştırılması için ilk 4 gün boyunca uygulama çözeltileri eklenmiş 1/4 Hoagland çözeltisi ve sonraki 4 gün uygulama çözeltileri eklenmiş 1/2 Hoagland çözeltisi ile sulanmıştır. Bitkiler, 9. günden itibaren uygulama

  zelteleri eklenmiş tam Hoagland   zeltisi ile sulanarak uygulamalar yapılmıştır. Kontrol koşullarında yetiştirilen türlere ait bitkilerin besin maddesi ihtiya ı her gün 100 mL modifiye edilmiş Hoagland   zeltisi uygulamasıyla karşılanmıştır. Cd toksisitesi koşulları, modifiye edilmiş Hoagland   zeltisi içerisinde 100  M CdCl₂ uygulaması yapılarak sağlanmıştır. Si₁+Cd koşulları modifiye edilmiş Hoagland   zeltisi içerisinde 0.2 mM K₂SiO₃ + 100  M CdCl₂ uygulaması ve Si₂+Cd koşulları ise modifiye edilmiş Hoagland   zeltisi içerisinde 2.0 mM K₂SiO₃ + 100  M CdCl₂ uygulaması yapılarak sağlanmıştır.

Fidelerin perlit ortamına şaştırılmasından itibaren 4 hafta boyunca deneme konularına göre uygulama   zelteleri eklenmiş Hoagland   zelteleri ile sulanan bitkiler kök boğazından kesilerek hasat edilmiştir.

3.2.1. Morfolojik  l  mler

Kök Uzunluğu: Bitkilerin hasat sırasında kök boğazından itibaren kök ucu arasındaki mesafe ölçülerek (cm) belirlenmiştir.

Gövde, Kök ve Toplam Biyolojik Verim: Kök boğazından kesilerek hasadı yapılan bitkilerin gövde ve kök yaş ağırlıkları (YA, g saksı⁻¹) hassas terazide (0.01 g duyarlı) tartılarak belirlenmiş ve gövde ve kök biyolojik verimi olarak kaydedilmiştir. Toplam biyolojik verim, gövde ve kök biyolojik verimleri toplanarak belirlenmiştir.

Gövde, Kök ve Toplam Kuru Madde Miktarı: Yaş ağırlıkları belirlenen ve sırasıyla iki kez musluk suyu, iki kez saf su ve bir kez de deiyonize su ile yıkanarak kese k ağıtlarına konulan bitkilerin gövde ve kökleri kurutma dolabında 70  C’de sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. Kuruyan gövde ve kök örneklerinin kuru ağırlıkları (KA, g saksı⁻¹) hassas terazide (0.01 g duyarlı) tartılarak belirlenmiştir. Toplam kuru madde miktarı, gövde ve kök kuru madde miktarları toplanarak belirlenmiştir (Müftüoğlu vd., 2014).

Gövde/Kök Oranı: Kurutma dolabında 70  C’de sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulan ve daha sonra hassas terazide (1 mg duyarlı) tartılarak bulunan gövde ve kök kuru ağırlıklarının birbirlerine oranlaması sonucu 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 °C) kül fırınında yakma işlemi gerçekleştirilmiştir. Türlerin yakılan örneklerine ait küller 2 mL 10 N nitrik asit (HNO₃) ilave edilerek çözülmüş ve deiyonize su ile 100 mL kapasiteli ölçü balonuna aktararak derecelerine tamamlanmıştır. Ölçü balonundaki çözeltiler daha sonra uygun bir ekstrakt kabına Whatman No.42 filtre kağıdı yardımıyla süzülüş ve elementel analizler için buzdolabında saklanmıştır (Müftüoğlu vd., 2014).

Fotosentetik Pigmentlerin Belirlenmesi: Hasat edilmeden önce alınan taze yaprak örnekleri (W = 200 mg) küçük parçalara bölünerek bir homojenizatör yardımıyla 10 mL (V) %90 (v/v)'lık aseton ile homojenize edilerek Whatman No.4 filtre kâğıdından süzülüştür. Homojenatların 663, 645 ve 470 nanometre dalga boylarındaki absorpsanları spektrofotometrede belirlenerek klorofil *a* (3.1), klorofil *b* (3.2), klorofil *a+b* (3.3) ve karotenoidlerin (3.4) konsantrasyonları aşağıda detayları sunulan Lichtenthaler (1987)'in formülüne göre hesaplanmıştır.

$$\text{Klorofil } a \text{ (mg g}^{-1} \text{ YA)} = (11.75 \times A_{663}) - (2.35 \times A_{645}) \times V \text{ (mL)} / W \text{ (mg)} \quad (3.1)$$

$$\text{Klorofil } b \text{ (mg g}^{-1} \text{ YA)} = (18.61 \times A_{645}) - (3.96 \times A_{663}) \times V \text{ (mL)} / W \text{ (mg)} \quad (3.2)$$

$$\text{Klorofil } a+b \text{ (mg g}^{-1} \text{ YA)} = \text{Klorofil } a \text{ (mg/g YA)} + \text{Klorofil } b \text{ (mg/g YA)} \quad (3.3)$$

$$\text{Karotenoid (mg g}^{-1} \text{ YA)} = [(1000 \times A_{470}) - (2.27 \times \text{Chl } a)] - (81.4 \times \text{Chl } b / 227) \times V \text{ (mL)} / W \text{ (mg)} \quad (3.4)$$

Toplam Cd Belirlemesi: Kuru yakma yöntemine göre yakılarak analize hazırlanan gövde ve kök süzüklerinde toplam Cd içerikleri (µg g⁻¹) İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi (ICP-OES) ile belirlenmiştir (Müftüoğlu vd., 2014).

Bitkilerde Cd alımı: Bitkilerin gövde ve kök Cd içerikleri ve kuru madde miktarları dikkate alınarak aşağıdaki formül (3.5) yardımıyla hesaplanmıştır (Çıkılı ve Samet, 2018; Shi vd., 2010).

$$\text{Cd alımı } (\mu\text{g bitki}^{-1}) = \text{Cd içeriği } (\mu\text{g g}^{-1}) \times \text{KA (g)} \quad (3.5)$$

Translokasyon faktörü (TF-Cd): Bitkilerin gövde ve kök Cd içerikleri dikkate alınarak aşağıdaki formül (3.6) yardımıyla hesaplanmıştır (Çıkılı ve Samet, 2018; Shi vd., 2010).

$$\text{TF-Cd} = \text{Cd içeriği } ([\text{Cd}]_{\text{gövde}}) / \text{Cd içeriği } ([\text{Cd}]_{\text{kök}}) \quad (3.6)$$

Biyokonsantrasyon Faktörü (BKF): Bitkilerin gövde ve kök Cd içerikleri ve yetiştirme ortamındaki toplam Cd iyonu miktarı dikkate alınarak aşağıdaki formüle (3.7) göre hesaplanmıştır (Çıkılı ve Samet, 2018; Shi vd., 2010).

$$\text{BKF-Cd} = [\text{Cd}]_{\text{gövde/kök}} / [\text{toplam Cd}]_{\text{yetiştirme ortamı}} \quad (3.7)$$

Köklerle Net Cd Akümüasyonu (NA-Cd): Bitkilerin gövde ve kök Cd alımları ve kök kuru madde miktarları dikkate alınarak aşağıdaki formüle (3.8) göre hesaplanmıştır (Moradi ve Ehsanzadeh, 2015).

$$\text{NA-Cd } (\mu\text{g g}^{-1} \text{ KA}) = \text{Tüm bitkide toplam Cd miktarı } (\mu\text{g}) / \text{Kök kuru maddesi (g)} \quad (3.8)$$

Toplam Akümüasyon Oranı (TAR-Cd): Bitkilerin gövde ve kök Cd içerikleri ve kuru madde miktarları dikkate alınarak aşağıdaki formül (3.9) yardımıyla hesaplanmıştır (Shi vd., 2010).

$$\text{TAR-Cd } (\mu\text{g g}^{-1} \text{ KA gün}^{-1}) = ([\text{Cd}]_{\text{gövde}} \times \text{KA}_{\text{gövde}}) + ([\text{Cd}]_{\text{kök}} \times \text{KA}_{\text{kök}}) / \text{gelişme gün sayısı} \times (\text{KA}_{\text{gövde}} + \text{KA}_{\text{kök}}) \quad (3.9)$$

Bitkide Toplam N Belirlenmesi: Kurutulan ve öğütülerek analize hazırlanan bitki örneklerinde Kjeldahl yöntemine göre belirlenmiştir (Müftüoğlu vd., 2014).

Bitkide Ham Protein İçeriğinin Belirlenmesi: Kjeldahl yöntemine göre belirlenen bitkide toplam N miktarının 6.25 faktörü ile çarpılması sonucunda elde edilmiştir (Özkaya ve Kahveci, 1990).

Bitkide Toplam P Belirlemesi: Kuru yakma yöntemine göre yakılarak analize hazırlanan gövde ve kök süzüklerinde vanadomolibdo fosforik sarı renk yöntemine göre spektrofotometrik olarak belirlenmiştir (Müftüoğlu vd., 2014).

Bitkide Toplam K, Ca, Mg ve Na Belirlemesi: Kuru yakma yöntemine göre yakılarak analize hazırlanan gövde ve kök süzüklerinde fleymfotometrik olarak belirlenmiştir (Müftüoğlu vd., 2014).

Cd Tolerans İndeksinin Belirlenmesi: Bitkilerin kök uzunlukları dikkate alınarak aşağıdaki formül (3.10) yardımıyla hesaplanmıştır (Ait Ali vd, 2004).

$$Tİ-Cd (\%) = [Kök \text{ uzunluğu (Uygulama)} / Kök \text{ Uzunluğu (Kontrol)}] \times 100 \quad (3.10)$$

3.2.3. İstatistik Analizler

Tesadüf bloklarında bölünmüş parseller 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 (α : 0.05) göre yapılmıştır.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Bitkilerin Toprak Üstü Aksam Gelişimine Uygulamaların Etkisi

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde yaş ve kuru ağırlıkları üzerine Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analiz sonuçları Tablo 1’ de ve gövde yaş ve kuru ağırlıklarına ait ortalamalar ise Tablo 2’de toplu olarak verilmiştir. Tablo 1 ve Tablo 2 birlikte değerlendirildiğinde; *Solanaceae* familyası bitkilerinde Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının gövde yaş ve kuru ağırlıkları üzerine türlerin, uygulamaların ve tür x uygulama interaksyonunun etkileri ($p \leq 0.001$) önemli bulunmuştur.

Tablo 1

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde yaş ve kuru ağırlıklarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Gövde Yaş Ağırlığı		Gövde Kuru Ağırlığı	
		Kareler Toplamı	F Değeri	Kareler Toplamı	F Değeri
Genel	71	122185.72	-	1147.58	-
Tür (T)	5	104932.04	577.56***	836.22	372.68***
Uygulama (U)	3	7217.34	66.21***	105.73	78.53***
T x U İnteraksiyonu	15	8292.20	15.21***	184.09	27.35***
Hata	48	1744.15	-	21.54	-

Uygulamaların ortalaması olarak gövde yaş ağırlığı en fazla olan tür tütün (127.9 g bitki⁻¹) ve en az olan tür ise biber (30.7 g bitki⁻¹) olarak belirlenmiştir (Tablo 2). Altınçilek (115.5 g bitki⁻¹) ve domates (112.0 g bitki⁻¹) hariç diğer türlerin ortalama gövde yaş ağırlıkları arasındaki farklar önemli bulunmuştur. Türlerin ortalaması olarak kontrol uygulamasında 97.5 g bitki⁻¹ olan gövde yaş ağırlığı, Cd uygulaması ile %27.1 düzeyinde azalma göstererek 71.1 g bitki⁻¹ olarak bulunmuştur (Tablo 2). Bununla birlikte, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulaması (75.6 g bitki⁻¹) ile gövde yaş ağırlığında %6.3 düzeyinde ve Si₂+Cd uygulaması ile (82.0 g bitki⁻¹) ise %15.3 düzeyinde önemli artışlar saptanmıştır (Tablo 2).

Cd ve Si uygulamaları ile altınçilek hariç diğer türlerin gövde yaş ağırlığında meydana gelen değişimler istatistiksel olarak önemli bulunmuştur (Tablo 2). Kontrole göre türlerin gövde yaş ağırlığına Cd toksisitesinin etkisi farklı olmuş ve altınçilek hariç diğer türlerin gövde yaş ağırlıklarında önemli azalmalar belirlenmiştir. Bu azalmaların domateste %12.8, biberde %68.9, patlıcanda %66.6, patateste %15.3 ve tütünde %12.8 seviyesinde olduğu saptanmıştır (Tablo 2). Bununla birlikte, Cd uygulamasına kıyasla Si₁+Cd uygulaması ile biber ve patlıcanda belirlenen değişimler hariç domateste %19.1 ve tütünde %15.4 seviyesinde önemli artışlar ile patateste %15.3 seviyesinde önemli azalma belirlenmiştir (Tablo 2). Si₂+Cd uygulamasında ise, biber ve patlıcanda belirlenen artışlar hariç diğer türlerin gövde yaş ağırlıklarında önemli artışlar bulunmuş ve bu artışların domateste %15.1, biberde %6.6, patlıcanda %18.3, patateste %32.7 ve tütünde %16.4 seviyesinde olduğu tespit edilmiştir. Cd ve Si uygulamalarının altınçileğin gövde yaş ağırlığına etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamakla birlikte, gövde yaş ağırlığında kontrole kıyasla Cd uygulamasında %12.4 düzeyinde azalma ve Cd uygulamasına kıyasla Si₁+Cd uygulamasında %7.6 ve Si₂+Cd uygulamasında ise %6.6 oranında artışlar belirlenmiştir (Tablo 2).

Tablo 2

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde yaş ve kuru ağırlıklarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.

Uygulama	Domates	Biber	Patlıcan	Patates	Tütün	Altınçilek	Ortalama
Gövde Yaş Ağırlığı (g bitki⁻¹)							
Kontrol	114.4 a [#]	63.0 a	88.4 a	64.9 b	131.4 a	123.1	97.5 A
Cd	99.8 b	19.6 b	29.5 bc	55.0 c	114.6 b	107.9	71.1 D
Si ₁ + Cd	118.9 a	19.3 b	20.6 c	46.6 d	132.2 a	116.1	75.6 C
Si ₂ + Cd	114.9 a	20.9 b	34.9 b	73.0 a	133.4 a	115.0	82.0 B
Ortalama	112.0 B	30.7 E	43.4 D	59.9 C	127.9 A	115.5 B	
Gövde Kuru Ağırlığı (g bitki⁻¹)							
Kontrol	12.55	7.54 a	12.65 a	4.73 b	13.00 a	10.16	10.11 A
Cd	11.19	2.45 b	3.50 b	4.39 b	11.61 b	8.64	6.97 C
Si ₁ + Cd	13.08	2.89 b	2.11 c	4.69 b	12.04 b	9.30	7.35 C
Si ₂ + Cd	12.75	3.23 b	3.83 b	7.35 a	12.97 a	9.44	8.26 B
Ortalama	12.39 A	4.03 D	5.52 C	5.29 C	12.41 A	9.39 B	

[#]: Her bitki için aynı sütunda farklı harf ile gösterilen uygulamaların ortalamaları (n = 3) arasındaki farklar önemlidir.

Uygulamalar birlikte değerlendirildiğinde, en fazla gövde kuru ağırlığa sahip türün tütün ($12.41 \text{ g bitki}^{-1}$) ve en az gövde kuru ağırlığa sahip türün ise biber ($4.03 \text{ g bitki}^{-1}$) olduğu saptanmıştır (Tablo 2). Tütün ve domates ile patlıcan ve patates arasındaki farklar hariç türlerin ortalama gövde kuru ağırlıklarında farklar önemli bulunmuştur. Türlerin ortalaması olarak kontrol koşullarında $10.11 \text{ g bitki}^{-1}$ olarak belirlenen gövde kuru ağırlığı Cd uygulanan koşullarda %31.1 azalarak $6.97 \text{ g bitki}^{-1}$ bulunmuştur. *Solanaceae* türlerinin toprak üstü aksamına Cd toksisitesinin olumsuz etkileri Si uygulamaları ile hafifletilmiş ve Cd uygulamasına kıyasla türlerin gövde kuru ağırlığında Si_1+Cd uygulamasında %5.5 düzeyindeki artış önemli bulunmazken, Si_2+Cd uygulamasında %18.5 düzeyindeki artış önemli olarak saptanmıştır (Tablo 2).

Domates ve altınçilek hariç diğer türlerin gövde kuru ağırlığında Cd ve Si uygulamaları ile meydana gelen değişimler istatistiksel olarak önemli bulunmuştur (Tablo 2). Türlerin gövde kuru ağırlıklarına Cd stresinin etkisi ayrımlı olmuş ve domates, altınçilek ve patates hariç diğer türlerin gövde kuru ağırlıklarında önemli azalmalar belirlenmiştir. Biberde %67.5, patlıcanda %72.3 ve tütünde %10.7 düzeyinde belirlenen azalmalar önemli olarak saptanırken domateste %10.8, patateste %7.2 ve altınçilekte %15.0 seviyesinde belirlenen azalmalar önemsiz bulunmuştur (Tablo 2). Cd uygulamasına göre Si_1+Cd uygulaması ile patlıcanın gövde kuru ağırlığında belirlenen %39.7 seviyesindeki azalma önemli bulunurken tütünde %3.7, patateste %6.8 ve biberde %18.0 seviyelerinde saptanan artışlar önemsiz bulunmuştur (Tablo 2). İstatistiksel olarak önemli bulunmamakla birlikte, Cd stresine kıyasla Si_1+Cd koşullarında domateste %4.2 ve altınçilekte ise %7.6 oranında gövde kuru ağırlığında artışlar belirlenmiştir. Si_2+Cd uygulamasında ise, patates ve tütünün gövde kuru ağırlıklarında önemli artışlar belirlenmiş ve bu artışlar patateste %67.4 ve tütünde %11.7 olarak tespit edilmiştir (Tablo 2). Cd uygulamasına göre Si_2+Cd uygulaması ile gövde kuru ağırlıklarında domateste %11.4, biberde %31.8, patlıcanda %9.4 ve altınçilekte %9.3 seviyesinde belirlenen artışlar olarak ortaya çıkan değişimler önemsiz olarak belirlenmiştir.

Kadmiyum miktarı arttıkça, bitkinin fotosentetik aktivitesini ve besin dengesini kesintiye uğratarak bitkinin büyümesini azaltmaktadır (Zhang vd., 2002; Shamsi vd., 2010). Si'un ise bitki büyümesini teşvik etmede kilit rol oynadığı ifade edilmektedir (Wu vd., 2013). Araştırma bulgularımıza benzer sonuçlar çeşitli araştırmacılar tarafından da açıklanmıştır.

Solanaceae bitkileri olan biber, patlıcan ve altınçileğin gövde kuru biyokütlelerinin artan Cd düzeylerine bağlı olarak azaldığı rapor edilmiştir (Çıkılı vd., 2016). Bununla birlikte, mısır (Liang vd., 2005), *Juniperus chinensis* ve *Platycladus orientalis* selvi çeşitleri (Guo vd., 2015) ve kışlık buğdayda (Rahman vd., 2020) Cd uygulamalarının gövde kuru ağırlıklarını önemli ölçüde azalttığı ancak Cd ile birlikte Si uygulamalarının toprak üstü aksam biyokütlelerini artırdığı tespit edilmiştir. Cd uygulanmış buğday çeşitlerine Si uygulandığında gövde kuru madde miktarını artmadığı ancak Si uygulamasının tane verimini önemli ölçüde arttırdığı belirlenmiştir (Naeem vd., 2014). Dresler vd. (2015) mısır bitkisinde gövde yaş ağırlığının, Liu vd. (2008) çeltikte gövde ve tanenin kuru ağırlıklarının, Naeem vd. (2018) buğday fidelerinde gövde kuru madde miktarının, Balakhnina vd. (2015) arpa fidelerinin büyümesinin ve Khan vd. (2020) hurma ağacında büyümenin Si uygulamalarıyla arttığını ifade etmişlerdir.

4.2. Bitkilerin Kök Gelişimine Uygulamaların Etkisi

Solanaceae familyası bitkilerinin kök yaş ve kuru ağırlıkları üzerine Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analiz sonuçları Tablo 3’ de ve kök yaş ve kuru ağırlıklarına ait ortalamalar ise Tablo 4’de toplu olarak verilmiştir. Tablo 3 ve Tablo 4 birlikte değerlendirildiğinde; *Solanaceae* familyası bitkilerinde Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının kök yaş ve kuru ağırlıkları üzerine türlerin, uygulamaların ve tür x uygulama interaksiyonunun etkileri %0.1 düzeyinde önemli bulunmuştur.

Tablo 3

Solanaceae familyası bitkilerinin kök yaş ve kuru ağırlıklarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kök Yaş Ağırlığı		Kök Kuru Ağırlığı	
		Kareler Toplamı	F Değeri	Kareler Toplamı	F Değeri
Genel	71	2427.54	-	16.24	-
Tür (T)	5	724.39	83.23***	6.30	61.70***
Uygulama (U)	3	684.45	131.07***	2.91	47.50***
T x U İnteraksiyonu	15	935.14	35.82***	6.05	19.76***
Hata	48	83.55	-	0.98	-

Uygulamalar birlikte değerlendirildiğinde, en fazla kök yaş ağırlığına sahip tür domates (15.33 g bitki⁻¹) ve en az kök yaş ağırlığına sahip tür ise biber (7.68 g bitki⁻¹) olarak belirlenmiştir (Tablo 4). Patlıcan ile diğer türlerin kök yaş ağırlıkları arasındaki farklar önemli bulunurken domates, tütün ve altınçilek ile biber ve patatesin kök yaş ağırlıklarındaki değişimler önemsiz bulunmuştur. Türlerin ortalaması olarak kontrol koşullarında 11.53 g bitki⁻¹ olan kök yaş ağırlığı Cd uygulanan koşullarda %37.5 azalarak 7.21 g bitki⁻¹ bulunmuştur. *Solanaceae* türlerinin kök gelişimine Cd toksisitesinin olumsuz etkileri Si uygulamaları ile düzeltilmiş ve Cd uygulamasına kıyasla türlerin kök yaş ağırlığında Si₁+Cd uygulamasında %81.0 ve Si₂+Cd uygulamasında ise 2.2 kat düzeyinde önemli artışlar saptanmıştır (Tablo 4).

Tablo 4

Solanaceae familyası bitkilerinin kök yaş ve kuru ağırlıklarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.

Uygulama	Domates	Biber	Patlıcan	Patates	Tütün	Altınçilek	Ortalama
Kök Yaş Ağırlığı (g bitki ⁻¹)							
Kontrol	10.01 c [#]	8.86 a	20.13 a	2.92 c	14.73 a	12.54 b	11.53 C
Cd	9.14 c	5.93 b	6.02 c	3.18 c	9.04 b	9.99 c	7.21 D
Si ₁ + Cd	16.59 b	8.29 a	5.90 c	11.75 b	17.58 a	18.20 a	13.05 B
Si ₂ + Cd	25.58 a	7.65 ab	9.55 b	15.76 a	16.31 a	19.52 a	15.73 A
Ortalama	15.33 A	7.68 C	10.40 B	8.40 C	14.42 A	15.06 A	
Kök Kuru Ağırlığı (g bitki ⁻¹)							
Kontrol	1.53 b	0.87 a	2.02 a	0.31 b	1.73 a	1.38 a	1.31 A
Cd	1.25 d	0.67 b	0.66 c	0.37 b	0.78 b	1.01 b	0.79 B
Si ₁ + Cd	1.43 c	0.88 a	0.53 c	1.21 a	1.69 a	1.52 a	1.21 A
Si ₂ + Cd	1.81 a	0.78 ab	0.83 b	1.08 a	1.43 a	1.39 a	1.22 A
Ortalama	1.50 A	0.80 D	1.01 C	0.75 D	1.41 AB	1.32 B	

[#]: Her bitki için aynı sütunda farklı harf ile gösterilen uygulamaların ortalamaları (n = 3) arasındaki farklar önemlidir.

Cd stresinin türlerin kök yaş ağırlığına etkisi kontrole göre ayrılmış, domates ve patates hariç diğer türlerin kök yaş ağırlıklarında önemli azalmalar belirlenmiştir (Tablo 4). Bu azalmaların domatesten %8.7, biberde %33.1, patlıcanda %70.1, tütünde %38.6 ve altınçilekte %20.3 seviyesinde olduğu saptanmıştır. Patatesin kök yaş ağırlığında kontrole kıyasla Cd uygulamasında saptanan artış istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur. Bununla birlikte, Cd uygulamasına kıyasla Si₁+Cd uygulaması ile patlıcanda belirlenen değişim hariç

diğer türlerin kök yaş ağırlıklarında önemli artışlar belirlenmiş ve bu artışlar domatestes %81.5, biberde %39.8, tütünde %94.5 ve altınçilekte %82.2 düzeyinde iken patatestes 3.7 kat seviyesinde gerçekleşmiştir (Tablo 4). Si₂+Cd uygulamasında ise, biberde belirlenen artış hariç diğer türlerin kök yaş ağırlıklarında önemli artışlar bulunmuş ve bu artışlar biberde %29.0, patlıcanda %58.6, tütünde %80.4 ve altınçilekte %95,6 seviyesinde iken domatestes 2.8 kat ve patatestes 5.0 kat olarak tespit edilmiştir (Tablo 4).

Uygulamaların ortalamaları birlikte değerlendirildiğinde, kök kuru ağırlığı en fazla olan tür domates (1.50 g bitki⁻¹) ve kök kuru ağırlığı en az olan tür ise patates (0.75 g bitki⁻¹) olarak belirlenmiştir (Tablo 4). Patlıcan ile diğer türlerin kök kuru ağırlıkları arasındaki farklar önemli bulunurken tütün, domates ve altınçilek ile biber ve patatesin kök kuru ağırlıklarında değişimler önemsiz bulunmuştur. Türlerin ortalaması incelendiğinde Cd uygulaması ile diğer uygulamaların kök kuru ağırlıkları arasındaki farklar önemli bulunurken kontrol ile Si₁+Cd ve Si₂+Cd uygulamalarının kök kuru ağırlıkları arasındaki değişimler önemsiz bulunmuştur (Tablo 4). Buna ek olarak, kontrol uygulamasında 1.31 g bitki⁻¹ olan kök kuru ağırlığı, Cd uygulaması ile %39.7 seviyesinde azalma göstererek 0.79 g bitki⁻¹ olarak bulunmuştur. Cd uygulamasına göre ise Si₁+Cd uygulamasında (1.21 g bitki⁻¹) kök kuru ağırlığında %53.2 seviyesinde ve Si₂+Cd uygulamasında (1.22 g bitki⁻¹) ise %54.4 seviyesinde önemli artışlar saptanmıştır (Tablo 4).

Domatesin kök kuru ağırlığında kontrole göre Cd uygulaması ile % 18.3 düzeyinde ve Si₁+Cd uygulaması ile %6.5 düzeyinde önemli azalmalar belirlenirken, Si₂+Cd uygulaması ile %18.3 düzeyinde belirlenen artış önemli bulunmuştur (Tablo 4). Bununla birlikte, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulamasında kök kuru ağırlığı %14.4 düzeyinde ve Si₂+Cd uygulamasında ise %44.8 düzeyindeki artışlar önemli bulunmuştur (Tablo 4). Kontrole göre biberin kök kuru ağırlığında Cd uygulaması ile %23.0 düzeyinde önemli azalma bulunurken, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulamasında %31.3 düzeyinde önemli artış bulunmuştur. Si₂+Cd uygulamasında ise %16.4 düzeyinde artış olarak belirlenen değişim önemli bulunmamıştır (Tablo 4). Patlıcanın kök kuru ağırlığında kontrole göre Cd uygulaması ile %67.3 düzeyinde, Si₁+Cd uygulaması ile %73.8 düzeyinde ve Si₂+Cd uygulaması ile %58.9 düzeyinde belirlenen azalmalar önemli bulunmuştur. Buna karşılık, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulamasında %19.7 düzeyindeki azalma önemli bulunmazken Si₂+Cd uygulamasında %25.8 düzeyindeki artış önemli bulunmuştur (Tablo 4).

Patatesin kök kuru ağırlığında kontrole kıyasla Cd uygulaması ile %19.4 seviyesindeki artış önemsiz olarak saptanmıştır. Buna ek olarak, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulamasında 3,3 kat düzeyindeki ve Si₂+Cd uygulamasında 2,9 kat düzeyindeki artışlar önemli olarak belirlenmiştir (Tablo 4). Tütünün kök kuru ağırlığında kontrole göre Cd uygulamasında %54.9 düzeyindeki azalma önemli bulunurken, Si₁+Cd ve Si₂+Cd uygulamalarında belirlenen azalmalar önemli bulunmamıştır. Bununla birlikte, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulaması ile 2.2 kat ve Si₂+Cd uygulaması ile %83.3 seviyesinde önemli artışlar tespit edilmiştir (Tablo 4). Altınçileğin kök kuru ağırlığında kontrole göre Cd uygulamasında %26.8 seviyesindeki azalma önemli bulunurken, Si₁+Cd ve Si₂+Cd uygulamalarında belirlenen artışlar önemli bulunmamıştır. Bununla birlikte, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulaması ile %50.5 düzeyinde ve Si₂+Cd uygulaması ile %37.6 düzeyinde önemli artışlar tespit edilmiştir (Tablo 4). Cd toksisitesi koşullarında toprak üstü aksamdaki gelişme gerilemesi, kökteki gelişme gerilemesine göre daha az olmuş ve Si uygulamasının bitkinin kök gelişimine etkisi toprak üstü aksam gelişimine göre daha fazla olmuştur.

Bitkilerde Cd birikiminin birçok morfolojik, fizyolojik, biyokimyasal ve yapısal değişikliğe neden olarak kök büyümesinde ve biyokütle üretiminde azalmaya neden olabilmektedir (Sanità di Toppi ve Gabbrielli 1999; Moussa 2004). Gelişen bitkilere Si ilavesinin yaprak kalınlığını, kök tazeliğini ve kuru ağırlığını arttırdığı bildirilmiştir (Adatia ve Besford, 1986). Rizwan vd. (2015) makarnalık buğdayda, Çıkılı vd. (2016) biber, patlıcan ve altınçilekte kök büyüme parametrelerinin artan Cd düzeylerine bağlı olarak azaldığını, Lu vd. (2018) tütünde Cd+Si uygulamasının kök biyokütlesini Si uygulanmayan koşullara göre arttırdığını, Song vd. (2009) *Brassica chinensis* L. türüne ait *Shanghaiqing* ve *Hangyoudong* adlı iki farklı çeşitte Cd uygulamasıyla azalan kök biyokütlesinin Si ilavesi ile arttığını, Naeem vd. (2018) buğday fidelerine Si uygulaması ile Cd-duyarlı (Sehar-2006) çeşidin kök kuru madde miktarı artarken Cd-tolerant (Iqbal-2000) çeşitte değişim olmadığını, Zhang vd. (2008) çeltikte Cd uygulanmayan koşullarda Si uygulamasının kök biyokütlesini arttırdığı ancak Cd+Si uygulamasının, Si'un kök biyokütlesine olan yararlı etkilerini azalttığını, Liang vd. (2005) mısırdaki, Dorneles vd. (2019) patatesteki Cd uygulamasının kök kuru ve yaş ağırlıklarını önemli ölçüde azalttığını ancak Si ilavesi ile bu parametrelerin arttığını, Naeem vd. (2014) buğdayda Cd uygulanmış bitkilere Si uygulandığında kök kuru madde miktarını arttırmadığını ve Dresler vd. (2015) ise mısırdaki kök yaş ağırlıkları üzerine Si'un yararlı bir rol oynadığını ifade etmişlerdir.

4.3. Bitkilerin Toplam Biyokütle Üretimine Uygulamaların Etkisi

Solanaceae familyası bitkilerinin toplam yaş ve kuru ağırlıkları üzerine Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analiz sonuçları Tablo 5’ de ve toplam yaş ve kuru ağırlıklarına ait ortalamalar ise Tablo 6’da toplu olarak verilmiştir. Tablo 5 ve Tablo 6 birlikte değerlendirildiğinde; *Solanaceae* familyası bitkilerinde Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının toplam yaş ve kuru ağırlıkları üzerine türlerin, uygulamaların ve tür x uygulama interaksyonunun etkileri ($p \leq 0.001$) önemli bulunmuştur.

Tablo 5

Solanaceae familyası bitkilerinin toplam yaş ve kuru ağırlıklarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Toplam Yaş Ağırlığı		Toplam Kuru Ağırlığı	
		Kareler Toplamı	F Değeri	Kareler Toplamı	F Değeri
Genel	71	146670.08	-	1378.68	-
Tür (T)	5	121883.28	557.47***	981.28	397.06***
Uygulama (U)	3	9275.20	70.71***	133.57	90.07***
T x U İnteraksiyonu	15	13412.71	20.45***	240.12	32.39***
Hata	48	2098.90	-	23.73	-

Uygulamaların ortalamaları birlikte değerlendirildiğinde, toplam yaş ağırlığı en fazla olan tür tütün ($142.30 \text{ g bitki}^{-1}$) ve toplam yaş ağırlığı en az olan tür ise biber ($38.38 \text{ g bitki}^{-1}$) olarak tespit edilmiştir (Tablo 6). Altınçilek ($130.59 \text{ g bitki}^{-1}$) ile domatesin ($127.35 \text{ g bitki}^{-1}$) toplam yaş ağırlıkları arasındaki fark hariç diğer türlerin ortalama toplam yaş ağırlıkları arasındaki farklar önemli bulunmuştur. Türlerin ortalamaları incelendiğinde kontrol uygulamasında $109.07 \text{ g bitki}^{-1}$ olan toplam yaş ağırlık Cd uygulaması ile %28.2 düzeyinde önemli azalma göstererek $78.29 \text{ g bitki}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, Cd uygulamasına göre $\text{Si}_1 + \text{Cd}$ uygulaması ($88.67 \text{ g bitki}^{-1}$) ile %13.3 düzeyinde ve $\text{Si}_2 + \text{Cd}$ uygulaması ($97.76 \text{ g bitki}^{-1}$) ile %24.9 düzeyinde önemli artışlar saptanmıştır (Tablo 6).

Domatesin toplam yaş ağırlığında kontrole göre Cd uygulaması ile %12.4 düzeyinde önemli azalma belirlenirken, $\text{Si}_1 + \text{Cd}$ uygulamasında %8.9 düzeyinde belirlenen artış önemli bulunmamıştır. $\text{Si}_2 + \text{Cd}$ uygulamasında ise %12.9 düzeyinde belirlenen artış önemli bulunmamıştır (Tablo 6). Cd uygulamasına göre $\text{Si}_1 + \text{Cd}$ uygulaması ile %24.3 düzeyinde ve

Si₂+Cd uygulaması ile %28.9 düzeyindeki artışlar önemli bulunmuştur (Tablo 6). Kontrole göre biberin toplam yaş ağırlığında Cd uygulaması ile %64.5 düzeyinde, Si₁+Cd uygulaması ile %61.6 düzeyinde ve Si₂+Cd uygulaması ile %60.4 düzeyinde önemli azalmalar bulunurken, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulamasında %8.2 düzeyinde ve Si₂+Cd uygulamasında %11.8 düzeyinde artış olarak belirlenen değişimler önemli bulunmamıştır (Tablo 6). Patlıcanın toplam yaş ağırlığında kontrole göre Cd uygulaması ile %67.3 seviyesindeki azalma önemli bulunmuştur. Buna karşılık, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulaması ile %25.4 seviyesindeki azalma ve Si₂+Cd uygulaması ile %25.4 seviyesindeki artış önemli bulunmamıştır (Tablo 6). Kontrole göre patatesin toplam yaş ağırlığında Cd uygulaması ile %14.2 düzeyinde ve Si₁+Cd uygulaması ile %14.0 düzeyinde önemli azalmalar ve Si₂+Cd uygulamasında ise %31.0 düzeyindeki artış önemli bulunmuştur. Buna ek olarak, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulamasında %0.2 düzeyindeki azalma ve Si₂+Cd uygulamasında %52.6 seviyesindeki artış önemli olarak belirlenmiştir (Tablo 6). Tütünün toplam yaş ağırlığında kontrole göre Cd uygulamasında %15.4 düzeyindeki azalma önemli bulunurken, Si₁+Cd ve Si₂+Cd uygulamalarında belirlenen artışlar önemli bulunmamıştır.

Tablo 6

Solanaceae familyası bitkilerinin toplam yaş ve kuru ağırlıklarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.

Uygulama	Domates	Biber	Patlıcan	Patates	Tütün	Altınçilek	Ortalama
Toplam Yaş Ağırlığı (g bitki⁻¹)							
Kontrol	124.4 b [#]	71.9 a	108.5 a	67.8 b	146.1 a	135.6	109.1 A
Cd	109.0 c	25.5 b	35.5 bc	58.2 c	123.6 b	117.9	78.3 D
Si ₁ + Cd	135.5 ab	27.6 b	26.5 c	58.3 c	149.8 a	134.3	88.7 C
Si ₂ + Cd	140.5 a	28.5 b	44.5 b	88.8 a	149.7 a	134.5	97.8 B
Ortalama	127.4 B	38.4 E	53.8 D	68.3 C	142.3 A	130.6 B	
Toplam Kuru Ağırlığı (g bitki⁻¹)							
Kontrol	14.08	8.41 a	14.68 a	5.04 c	14.72 a	11.54 a	11.41 A
Cd	12.43	3.12 b	4.16 b	4.76 c	12.39 c	9.65 b	7.75 D
Si ₁ + Cd	14.51	3.77 b	2.64 c	5.90 b	13.74 b	10.82 a	8.56 C
Si ₂ + Cd	14.56	4.01 b	4.65 b	8.44 a	14.40 ab	10.82 a	9.48 B
Ortalama	13.90 A	4.83 D	6.53 C	6.04 C	13.81 A	10.71 B	

#: Her bitki için aynı sütunda farklı harf ile gösterilen uygulamaların ortalamaları (n = 3) arasındaki farklar önemlidir.

Bununla birlikte, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulaması ile %21.2 düzeyinde ve Si₂+Cd uygulaması ile %21.1 düzeyinde önemli artışlar tespit edilmiştir. Altınçileğin toplam yaş ağırlığında kontrole göre uygulamalarla meydana gelen değişimler istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır (Tablo 6).

Uygulamaların ortalaması olarak en fazla toplam kuru ağırlığa sahip tür domates (13.90 g bitki⁻¹) ve en az toplam kuru ağırlığa sahip tür ise biber (4.83 g bitki⁻¹) olarak belirlenmiştir (Tablo 6). Altınçilek ve biber ile diğer türlerin toplam kuru ağırlıkları arasındaki farklar önemli bulunurken domates ve tütün ile patlıcan ve patatesin toplam kuru ağırlıklarındaki değişimler önemsiz bulunmuştur. Türlerin ortalaması olarak kontrol koşullarında 11.41 g bitki⁻¹ olan toplam kuru ağırlığı Cd uygulanan koşullarda %32.1 azalarak 7.75 g bitki⁻¹ bulunmuştur. *Solanaceae* türlerinin toplam biyokütle üretimine Cd toksisitesinin olumsuz etkileri Si uygulamaları ile azaltılmış ve Cd uygulamasına kıyasla türlerin toplam kuru ağırlığında Si₁+Cd uygulamasında %10.5 düzeyinde ve Si₂+Cd uygulamasında ise %22.3 düzeyinde önemli artışlar saptanmıştır (Tablo 6).

Domatesin toplam kuru ağırlığında kontrole göre uygulamalarla meydana gelen değişimler istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır (Tablo 6). Biberin toplam kuru ağırlığında kontrole göre Cd uygulaması ile %62.9 düzeyinde, Si₁+Cd uygulaması ile %55.2 düzeyinde ve Si₂+Cd uygulaması ile %52.3 düzeyinde önemli azalmalar bulunurken, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulamasında %20.8 düzeyinde ve Si₂+Cd uygulamasında ise %28.5 düzeyinde artışlar olarak belirlenen değişimler önemli bulunmamıştır (Tablo 6). Kontrole göre patlıcanın toplam kuru ağırlığında Cd uygulaması ile %71.7 düzeyinde, Si₁+Cd uygulaması ile %82.0 düzeyinde ve Si₂+Cd uygulaması ile %68.3 düzeyinde belirlenen azalmalar önemli bulunmuştur. Buna karşılık, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulamasında %36.5 düzeyindeki azalma önemli bulunurken, Si₂+Cd uygulamasında %11.8 düzeyindeki artış önemli bulunmamıştır (Tablo 6). Patatesin toplam kuru ağırlığında kontrole kıyasla Cd uygulamasında %5.6 seviyesindeki azalma önemli bulunmazken, Si₁+Cd uygulaması ile %17.1 seviyesinde ve Si₂+Cd uygulamasında ise %67.5 seviyesinde önemli artışlar tespit edilmiştir. Buna ek olarak, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulaması ile %23.9 düzeyindeki ve Si₂+Cd uygulaması ile %77.3 düzeyindeki artışlar önemli olarak belirlenmiştir (Tablo 6). Tütünün toplam kuru ağırlığında kontrole göre Cd uygulaması ile %15.8 düzeyinde ve Si₁+Cd uygulaması ile %6.7 düzeyindeki azalmalar önemli bulunurken, Si₂+Cd uygulamasında

belirlenen %2.2 düzeyindeki azalma önemli bulunmamıştır. Buna karşılık, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulaması ile %10.9 düzeyinde ve Si₂+Cd uygulaması ile %16.2 düzeyinde önemli artışlar tespit edilmiştir (Tablo 6). Altınçileğin toplam kuru ağırlığında kontrole göre Cd uygulamasında %16.4 seviyesindeki azalma önemli bulunurken, Si₁+Cd ve Si₂+Cd uygulamalarında belirlenen azalmalar önemli bulunmamıştır. Bununla birlikte, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd ve Si₂+Cd uygulamaları ile %6.2 seviyesinde önemli artışlar tespit edilmiştir (Tablo 6).

Kadmiyum ile kirlenmiş topraklarda Si uygulamasının mısır ve çilek gibi birçok bitki türünün biyokütle üretimini artırdığını gösteren kanıtlar artmaktadır (Treder ve Cieslinski, 2005; Krantev vd., 2008). Cd stresi altında yetişen bitkilerle yapılan çalışmalarda araştırma bulgularımıza benzer sonuçlar çeşitli araştırmacılar tarafından bildirilmiştir. Mihaličová Malčovská vd. (2014) ile Lukačová Kuliková ve Lux (2010) mısırdaki, Shi vd. (2010) iki fıstık çeşidinde (Luhua 11 ve Luzi 101), Wang vd. (2014) çeltikte, Wu vd. (2015) hıyar ve domateste Cd uygulamalarının bitki büyümesini azalttığını belirtmişlerdir. Nwugo ve Huerta (2008) ve Farooq vd. (2016) çeltikte, Shi vd. (2005) çeltik fidelerinde, Farooq vd. (2013) pamukta, Rahman vd. (2017) tarla bezelyesinde, Vaculík vd. (2012) mısırdaki ve Wu vd. (2016) buğdayda Cd uygulamasının bitkilerin büyümesini azalttığını ancak Si uygulaması ile Cd'a bağlı bitki büyüme ve gelişiminin arttığını saptamışlardır. Shi vd. (2018), Alzahrani vd. (2018) ve Rizwan vd. (2012) buğdayda, Vaculík vd. (2009) ve Vaculík vd. (2015) mısırdaki, Kim vd. (2014) ve Ji vd. (2017) çeltikte ve Liang vd. (2007) ise birçok bitki türünde herhangi bir stres ortamı olmayan koşullarda bile Si uygulamalarının bitki büyüme ve gelişimini teşvik ederek bitki biyokütlesini arttırdığını açıklamışlardır.

4.4. Bitkilerin Kök Uzunluğu ve Gövde/Kök Oranına Uygulamaların Etkisi

Solanaceae familyası bitkilerinin kök uzunluğu ve gövde/kök oranı üzerine Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analiz sonuçları Tablo 7'de ve kök uzunluğu ve gövde/kök oranına ait ortalamalar ise Tablo 8'de toplu olarak verilmiştir. Tablo 7 ve Tablo 8 birlikte incelendiğinde; *Solanaceae* familyası bitkilerinde Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının kök uzunluğu üzerine türlerin etkisi ($p \leq 0.001$), uygulamaların etkisi ($p \leq 0.001$) ve tür x uygulama interaksyonunun etkisi ($p \leq 0.050$) önemli bulunmuştur. *Solanaceae* familyası bitkilerinde Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının

gövde/kök oranı üzerine türlerin ve uygulamaların etkisi %0.1 düzeyinde ve tür x uygulama interaksyonunun etkisi ise %1 düzeyinde önemli olarak tespit edilmiştir (Tablo 7 ve Tablo 8).

Uygulamalar birlikte değerlendirildiğinde, en fazla kök uzunluğuna sahip tür altınçilek (21.38 cm) ve en az kök uzunluğuna sahip tür ise biber (12.85 cm) olarak belirlenmiştir (Tablo 8). Patlıcan, patates ve biber ile domates ve patlıcanın kök uzunlukları arasındaki farklar önemli bulunmazken diğer türler ile kök uzunlukları arasındaki farklar önemli bulunmuştur. Türlerin ortalaması incelendiğinde Cd uygulaması ile diğer uygulamaların kök uzunlukları arasındaki farklar önemli bulunurken kontrol ile Si₁+Cd ve Si₂+Cd uygulamalarının kök uzunlukları arasındaki değişimler önemsiz bulunmuştur (Tablo 8). Türlerin ortalaması olarak kontrol koşullarında 17.19 cm olan kök uzunluğu Cd uygulaması ile %19.7 azalarak 13.81 cm bulunmuştur. *Solanaceae* türlerinin kök uzunluklarına Cd stresinin olumsuz etkileri Si uygulamaları ile düzeltilmiş ve Cd uygulamasına kıyasla türlerin kök uzunluklarında Si₁+Cd uygulamasında %18.5 düzeyinde ve Si₂+Cd uygulamasında ise %19.7 düzeyinde önemli artışlar saptanmıştır (Tablo 8).

Tablo 7

Solanaceae familyası bitkilerinin kök uzunluğu ve gövde/kök oranına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kök Uzunluğu		Gövde/ Kök Oranı	
		Kareler Toplamı	F Değeri	Kareler Toplamı	F Değeri
Genel	71	1076.32	-	1462.93	-
Tür (T)	5	588.14	25.76***	352.84	7.07***
Uygulama (U)	3	119.67	8.73***	208.65	6.97***
T x U İnteraksiyonu	15	149.30	2.18*	422.35	2.82**
Hata	48	219.21	-	479.09	-

Patates, tütün ve altınçilek hariç diğer türlerin kök uzunluklarında Cd ve Si uygulamaları ile meydana gelen değişimler istatistiksel olarak önemli bulunmuştur (Tablo 8). Cd uygulamasının türlerin kök uzunluklarına etkisi kontrole göre farklı olmuş, domates hariç diğer türlerin kök uzunluklarında azalmalar belirlenmiştir. Bu azalmaların biberde %46.8, patlıcanda %37.5, patateste %13.2, tütünde %16.6 ve altınçilekte %15.2 seviyesinde olduğu ve biber ile patlıcanda belirlenen azalmaların önemli olduğu saptanmıştır. Domatesin kök uzunluğunda kontrole kıyasla Cd uygulamasında saptanan artış istatistiksel olarak önemli

bulunmamıştır (Tablo 8). Bununla birlikte, Cd uygulamasına kıyasla Si₁+Cd uygulaması ile domatestede %11.4 seviyesinde ve patlıcanda %17.1 seviyesindeki artışlar önemli bulunmazken biberde %73.7 seviyesinde önemli artış saptanmıştır (Tablo 8). Si₂+Cd uygulamasında ise, domatestede %17.4 düzeyinde ve patlıcanda %18.5 düzeyindeki artışlar önemli bulunmazken biberde belirlenen %61.6 düzeyindeki artış önemli bulunmuştur (Tablo 8).

Uygulamaların ortalaması olarak gövde/kök oranı en fazla olan tür tütün (10.88) ve en az olan tür ise biber (4.93) olarak belirlenmiştir (Tablo 8). Tütün hariç diğer türlerin ortalama gövde/kök oranları arasındaki farklar önemli bulunmamıştır. Türlerin ortalaması olarak kontrol uygulamasında 8.90 olan gövde/kök oranı, Cd uygulaması ile %10.1 düzeyinde artış göstererek 9.80 olarak bulunmuştur (Tablo 8). Bununla birlikte, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulaması ile gövde/kök oranında %42.1 düzeyinde ve Si₂+Cd uygulaması ile %34.5 düzeyinde önemli artışlar saptanmıştır (Tablo 8).

Tablo 8

Solanaceae familyası bitkilerinin kök uzunluğu ve gövde/kök oranına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.

Uygulama	Domates	Biber	Patlıcan	Patates	Tütün	Altınçilek	Ortalama
Kök Uzunluğu (cm)							
Kontrol	12.92 b [#]	15.50 a	18.67 a	13.83	18.67	23.58	17.19 A
Cd	15.33 ab	8.25 b	11.67 b	12.00	15.58	20.00	13.81 B
Si ₁ + Cd	17.08 a	14.33 a	13.67 b	14.67	17.92	20.50	16.36 A
Si ₂ + Cd	18.00 a	13.33 a	13.83 b	14.33	18.25	21.42	16.53 A
Ortalama	15.83 C	12.85 D	14.46 CD	13.71 D	17.60 B	21.38 A	
Gövde/Kök Oranı							
Kontrol	8.20 ab	8.68 a	6.25 a	15.31 a	7.55	7.39 b	8.90 A
Cd	8.97 a	3.62 b	5.36 b	12.59 a	19.64	8.63 a	9.80 A
Si ₁ + Cd	9.12 a	3.30 b	4.04 c	4.24 b	7.22	6.13 c	5.67 B
Si ₂ + Cd	7.05 b	4.14 b	4.64 c	6.79 b	9.09	6.82 bc	6.42 B
Ortalama	8.34 AB	4.93 C	5.07 C	9.73 AB	10.88 A	7.24 BC	

[#]: Her bitki için aynı sütunda farklı harf ile gösterilen uygulamaların ortalamaları (n = 3) arasındaki farklar önemlidir.

Tütün hariç diğer türlerin gövde/kök oranında Cd ve Si uygulamaları ile meydana gelen değişimler istatistiksel olarak önemli bulunmuştur (Tablo 8). Domatesin gövde/kök oranında kontrole göre diğer uygulamalardaki değişimler önemli bulunmamıştır. Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulaması ile %1.8 düzeyindeki artış önemli bulunmazken,

Si₂+Cd uygulaması ile %21.4 düzeyindeki azalma önemli bulunmuştur (Tablo 8). Kontrole göre biberin gövde/kök oranında Cd uygulaması ile %58.3 düzeyinde önemli azalma bulunurken, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulamasında %8.8 düzeyinde azalma ve Si₂+Cd uygulamasında ise %14.4 düzeyinde artış olarak belirlenen değişimler önemli bulunmamıştır (Tablo 8). Patlıcanın gövde/kök oranında kontrole göre Cd uygulaması ile %14.24 düzeyinde belirlenen azalma önemli bulunmuştur. Buna karşılık, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulamasında %24.6 düzeyinde ve Si₂+Cd uygulamasında %13.4 düzeyindeki azalmalar önemli bulunmuştur (Tablo 8). Patatesin gövde/kök oranında kontrole kıyasla Cd uygulaması ile %17.8 seviyesindeki azalma önemli bulunmamıştır. Buna ek olarak, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulaması ile %66.3 düzeyinde ve Si₂+Cd uygulaması ile %46.1 düzeyindeki azalmalar önemli olarak belirlenmiştir (Tablo 8). Kontrole göre altınçileğin gövde/kök oranında Cd uygulaması ile %16.8 düzeyindeki artış ve Si₁+Cd uygulaması ile %17.1 düzeyindeki azalma önemli bulunurken, Si₂+Cd uygulamasında %7.7 düzeyinde belirlenen azalma önemli bulunmamıştır. Bununla birlikte, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulaması ile %29.0 seviyesinde ve Si₂+Cd uygulaması ile %21.0 seviyesinde önemli azalmalar tespit edilmiştir (Tablo 8).

Bitki doku ve aksamlarında Cd gibi ağır metallerin aşırı birikimi strese neden olmakta ve strese bağlı olarak kök uzunluğu gibi büyüme parametrelerinde azalmalar olmaktadır. Bitki tarafından alınan Si'un hücre zarının esnekliğini artırarak kök büyümesini teşvik ettiği belirtilmiştir (Tunçtürk vd., 2020). Çeşitli araştırmacılar tarafından araştırmaya bulgularımıza benzer sonuçlar rapor edilmiştir. *Brassica* türlerinde (*B. juncea* L. Czern., cv. Vitasso ve *B. napus* L., cv. Atlantik) Cd'un kök uzamasına engelleyici etkilerinin Si'un etkisiyle azaldığı, sadece Cd uygulamasına göre Cd+Si uygulamasıyla birincil köklerin uzamasının daha fazla olduğu ve lateral kök sayısının *B. juncea*'da *B. napus*'dan daha düşük olduğu belirlenmiştir (Vatehová vd., 2012). Dresler vd. (2015) mısırdaki kök net uzama oranının, Vaculík vd. (2012) mısırdaki kasparyan şeridi ve suberin lamellerinin, Fan vd. (2016) çeltikte toplam kök uzunluğu, kök yüzey alanı ve kök hacmi gibi parametrelerin ve Tripathi vd. (2012) çeltik fidelerinde kök tüyü uzunluğu ve sıklığının Cd ile azaldığı ancak Si uygulaması ile tüm olumsuz etkilerin tersine çevrildiğini ifade etmişlerdir. İtüzümü bitkisinde Cd uygulamasıyla kıyaslandığında Si ilavesinin köklerde hücre ölümünü azalttığı rapor edilmiştir (Liu vd., 2013b). Kim vd. (2014) çeltikte kök fonksiyonlarının ve Wu vd. (2016) buğdayda toplam kök ucu sayısının Si ile arttığını tespit etmişlerdir.

Bitkilerde kök gelişimi gövde gelişiminden daha az olursa gövde/kök oranı artar. Buna göre, bitkilerin kök meristem hücrelerinde uzamanın gövdeye göre Cd stresıyla azalacağı ve böylece gövde/kök oranının artacağı söylenebilir. Lukačová Kuliková ve Lux (2010) tarafından 30 adet mısır melezine Cd uygulamalarının kök/gövde oranını 2.78 (Nova) ile 12.83 (Reduta) arasında değiştirdiği bildirilmiştir. *Thlaspi praecox*'un köklerinde biriktirdiği Cd miktarının topraktaki kadmiyuma oranla 75 kat daha fazla olduğunu ve bu biriktirmede kök/gövde oranının 5.6 olduğunu belirtmişlerdir (Vogel vd., 2005).

4.5. Bitkilerin Cd Tolerans İndeksine Uygulamaların Etkisi

Cd uygulaması ortalamaları birlikte değerlendirildiğinde; Cd tolerans indeksi en fazla olan tür domates (118.7) olarak bulunmuş ve bunu sırasıyla patates (86.8), altınçilek (84.8), tütün (83.5) ve patlıcan (62.5) izlemiştir (Tablo 9). Biber (53.2) ise kontrole göre Cd tolerans indeksi en az olan tür olarak belirlenmiştir. Cd tolerans indekslerine göre Cd toksisitesine toleranslılık sıralaması domates> patates> altınçilek> tütün> patlıcan> biber olarak tespit edilmiştir. Buna göre; Cd stresine en toleranslı türün domates ve en duyarlı türün ise biber olduğu saptanmıştır (Tablo 9).

Tablo 9

Solanaceae familyası bitkilerinin Cd tolerans indeksine (%) Cd ve Si uygulamalarının etkisi.

Uygulama	Domates	Biber	Patlıcan	Patates	Tütün	Altınçilek
Kontrol	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Cd	118.7	53.2	62.5	86.8	83.5	84.8
Si ₁ + Cd	132.2	92.5	73.2	106.0	96.0	86.9
Si ₂ + Cd	139.3	86.0	74.1	103.6	97.8	90.8

Si₁+Cd uygulaması ortalamaları olarak en fazla Cd tolerans indeksine sahip olan tür domates (%132.2) olarak bulunmuş ve bunu sırasıyla patates (%106.0), tütün (%96.0), altınçilek (%86.9) ve biber (%92.5) takip etmiştir (Tablo 9). Patlıcan (%73.2) ise kontrole göre en az Cd tolerans indeksine sahip tür olarak tespit edilmiştir. Si₁+Cd koşulunda Cd tolerans indekslerine göre Cd toksisitesine toleranslılık sıralaması domates> patates> tütün> biber> altınçilek> patlıcan olarak saptanmıştır. Buna göre Si₁+Cd uygulamasına en toleranslı türün domates ve en duyarlı türün ise patlıcan olduğu belirlenmiştir (Tablo 9).

Si₂+Cd uygulaması ortalamaları birlikte incelendiğinde; Cd tolerans indeksi en fazla olan tür domates (%139.3) olarak bulunmuş ve bunu sırasıyla patates (%103.6), tütün (%97.8), altınçilek (%90.8) ve biber (%86.0) izlemiştir (Tablo 9). Patlıcan (%74.1) ise kontrole göre Cd tolerans indeksi en az olan tür olarak belirlenmiştir. Si₂+Cd koşulunda Cd tolerans indekslerine göre Cd toksisitesine toleranslılık sıralaması domates> patates> tütün> altınçilek> biber> patlıcan olarak tespit edilmiştir. Buna göre, Si₂+Cd uygulamasında kontrole göre en toleranslı türün domates ve en duyarlı türün ise patlıcan olduğu saptanmıştır (Tablo 9).

Kadmiyum, tütün tarafından nispeten tolere ediliyor gibi görünmektedir (Zhang vd., 2014a). Si'un çeltikte ağır metal toleransını desteklediği gösterilmiştir (Ma vd., 2006), şeker kamışı (Epstein, 1994) ve *Arabidopsis* (Lee vd., 2003). Konuyla ilgili çalışmalar çeşitli araştırmacılar tarafından ortaya atılmıştır; Çıkılı vd. (2016) bitkilerin gövde kuru biyokütlesindeki yüzde azalma temel alındığında, domatesin Cd toleranslı ve biber, patlıcan ile altınçileğin Cd duyarlı olduğunu saptamıştır. *Brassica chinensis* L. türüne ait iki farklı çeşit ile yapılan çalışmada *Shanghaiqing*'in Cd duyarlı ve *Hangyoudong*'ın Cd toleranslı olduğu ve Si'nin Cd toleransını arttırmadaki etkisinin Cd toleranslı çeşitte Cd duyarlı çeşite göre daha fazla olduğu rapor edilmiştir (Song vd., 2009). Buna karşılık; Naeem vd. (2018) buğday fideleriyle yaptığı çalışmada Iqbal-2000'in Cd toleranslı, Seher-2006'nın Cd duyarlı olduğunu belirlerken, Shi vd. (2010) iki fıstık çeşidiyle yaptığı çalışmada Luhua 11'in Cd duyarlı, Luzi 101'in Cd toleranslı olduğunu belirlemiştir. Amiri vd. (2012) Si uygulamasının *Echium amoenum* bitkisinde, Cd stresine toleransını arttırdığını belirtmiştir. Kabir vd. (2016) ise yoncanın Cd stresine toleransının, Si uygulamasıyla Cd'un azaltılması ile ilişkili olabileceğini savunmuştur.

4.6. Bitkilerin Cd Konsantrasyonu ve Alımlarına Uygulamaların Etkisi

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde ve kök Cd konsantrasyonları üzerine Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analiz sonuçları Tablo 10' da ve gövde ve kök Cd konsantrasyonlarına ait ortalamalar ise Tablo 11'de toplu olarak verilmiştir. Tablo 10 ve Tablo 11 birlikte değerlendirildiğinde; *Solanaceae* familyası bitkilerinde Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının gövde ve kök Cd

konsantrasyonları üzerine türlerin, uygulamaların ve tür x uygulama interaksyonunun etkileri ($p \leq 0.001$) önemli bulunmuştur.

Tablo 10

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde ve kök Cd konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Gövde Cd Konsantrasyonu		Kök Cd Konsantrasyonu	
		Kareler Toplamı	F Değeri	Kareler Toplamı	F Değeri
Genel	71	1245.07	-	191070.62	-
Tür (T)	5	658.98	624.15***	65128.41	426.60***
Uygulama (U)	3	347.56	548.65***	78041.18	851.97***
T x U İnteraksiyonu	15	228.39	72.11***	46435.52	101.39***
Hata	48	10.14	-	1465.61	-

Uygulamaların ortalaması olarak gövde Cd konsantrasyonu en fazla olan tür tütün ($9.30 \mu\text{g g}^{-1}$) ve gövde Cd konsantrasyonu en az olan tür ise altınçilek ($0.46 \mu\text{g g}^{-1}$) olarak belirlenirken türlerin ortalama gövde Cd konsantrasyonları arasındaki farklar önemli bulunmuştur (Tablo 11). Türlerin ortalaması olarak kontrol uygulamasında $0.29 \mu\text{g g}^{-1}$ olan gövde Cd konsantrasyonu, Cd uygulaması ile 18.5 kat artış göstererek $5.36 \mu\text{g g}^{-1}$ olarak saptanmıştır (Tablo 11). Bununla birlikte, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulaması ile ($5.34 \mu\text{g g}^{-1}$) gövde Cd konsantrasyonunda %0.4 düzeyinde azalma ve Si₂+Cd uygulaması ile ($5.38 \mu\text{g g}^{-1}$) ise %0.4 düzeyindeki artış önemli olarak tespit edilmemiştir (Tablo 11).

Domatesin gövde Cd konsantrasyonunda kontrole göre Cd uygulaması ile 41.2 kat, seviyesinde belirlenen artış önemli bulunmuştur (Tablo 11). Bununla birlikte, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulamasında gövde Cd konsantrasyonunda %1.6 düzeyinde azalma ve Si₂+Cd uygulamasında ise %3.2 düzeyindeki artış önemli bulunmamıştır (Tablo 11). Kontrole göre biberin gövde Cd konsantrasyonunda Cd uygulaması ile 5 kat düzeyinde önemli artış belirlenirken, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulamasında %2.3 düzeyinde artış ve Si₂+Cd uygulamasında ise %7.0 düzeyinde azalma olarak belirlenen değişimler önemli bulunmamıştır (Tablo 11). Patlıcanın gövde Cd konsantrasyonunda kontrole göre Cd uygulaması ile 29.2 kat düzeyinde belirlenen artış önemli bulunmuştur. Buna karşılık, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulamasında %18.3 düzeyindeki artış ve Si₂+Cd uygulamasında %10.0 düzeyindeki azalma önemli bulunmuştur (Tablo 11). Patatesin gövde

Cd konsantrasyonunda kontrole kıyasla Cd uygulaması ile 6.7 kat seviyesinde belirlenen artış önemli olarak tespit edilmiştir. Buna ek olarak, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulamasında %5.3 düzeyinde ve Si₂+Cd uygulamasında %1.6 düzeyindeki azalmalar önemli olarak saptanmamıştır (Tablo 11). Kontrole göre tütünün gövde Cd konsantrasyonunda Cd uygulaması ile 37.9 kat düzeyindeki artış önemli bulunurken, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulaması ile %9.12 seviyesinde önemli azalma ve Si₂+Cd uygulaması ile %4.16 seviyesinde önemli artış tespit edilmiştir (Tablo 11). Altınçileğin gövde Cd konsantrasyonunda kontrole göre Cd uygulaması ile 3.1 kat düzeyindeki artış önemli bulunurken, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulaması ile %21.7 seviyesinde ve Si₂+Cd uygulaması ile %41.3 seviyesinde önemli artışlar tespit edilmiştir (Tablo 11).

Tablo 11

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde ve kök Cd konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.

Uygulama	Domates	Biber	Patlıcan	Patates	Tütün	Altınçilek	Ortalama
Gövde Cd Konsantrasyonu ($\mu\text{g g}^{-1}$)							
Kontrol	0.18 c [#]	0.26 c	0.23 d	0.57 b	0.33 b	0.15 d	0.29 B
Cd	7.41 ab	1.28 ab	6.72 b	3.80 a	12.50 a	0.46 c	5.36 A
Si ₁ + Cd	7.29 b	1.31 a	7.95 a	3.60 a	11.36 a	0.56 b	5.34 A
Si ₂ + Cd	7.65 a	1.19 b	6.05 c	3.74 a	13.02 a	0.65 a	5.38 A
Ortalama	5.63 B	1.01 E	5.24 C	2.93 D	9.30 A	0.46 F	
Kök Cd Konsantrasyonu ($\mu\text{g g}^{-1}$)							
Kontrol	0.15 d	0.55 d	0.38 c	2.97 d	0.43 b	0.62 d	0.85 D
Cd	12.41 c	92.10 c	82.31 b	122.73 a	15.80 a	45.11 c	61.74 C
Si ₁ + Cd	15.82 b	99.75 b	97.76 a	109.83 b	19.96 a	123.63 b	77.79 B
Si ₂ + Cd	30.02 a	108.83 a	85.42 b	82.84 c	20.64 a	176.50 a	84.04 A
Ortalama	14.60 D	75.31 B	66.47 C	79.59 B	14.21 D	86.46 A	

[#]: Her bitki için aynı sütunda farklı harf ile gösterilen uygulamaların ortalamaları ($n = 3$) arasındaki farklar önemlidir.

Uygulamaların ortalamaları birlikte değerlendirildiğinde kök Cd konsantrasyonu en fazla olan tür altınçilek ($86.46 \mu\text{g g}^{-1}$) ve kök Cd konsantrasyonu en az olan tür ise tütün ($14.21 \mu\text{g g}^{-1}$) olarak tespit edilmiştir (Tablo 11). Domates ile tütün ve patates ile biberin kök Cd konsantrasyonları arasındaki fark hariç diğer türlerin ortalama toplam yaş ağırlıkları arasındaki farklar önemli bulunmuştur. Türlerin ortalamaları incelendiğinde kontrol

uygulamasında $0.85 \mu\text{g g}^{-1}$ olan kök Cd konsantrasyonu Cd uygulaması ile 72.6 kat düzeyinde önemli artış göstererek $61.74 \mu\text{g g}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, Cd uygulamasına göre Si_1+Cd uygulaması ($77.79 \mu\text{g g}^{-1}$) ile %26.0 düzeyinde ve Si_2+Cd uygulaması ($84.04 \mu\text{g g}^{-1}$) ile %36.1 düzeyinde önemli artışlar saptanmıştır (Tablo 11).

Domatesin kök Cd konsantrasyonunda kontrole göre Cd uygulaması ile 82.7 kat düzeyinde önemli artış belirlenirken, Cd uygulamasına göre Si_1+Cd uygulaması ile %27.5 düzeyinde ve Si_2+Cd uygulaması ile %89.8 düzeyindeki artışlar önemli bulunmuştur (Tablo 11). Kontrole göre biberin kök Cd konsantrasyonunda Cd uygulaması ile 167.5 kat düzeyinde önemli artış bulunurken, Cd uygulamasına göre Si_1+Cd uygulamasında %8.3 düzeyinde ve Si_2+Cd uygulamasında %18.2 düzeyinde artış olarak belirlenen değişimler önemli bulunmuştur (Tablo 11). Patlıcanın kök Cd konsantrasyonunda kontrole göre Cd uygulaması ile 216.6 kat seviyesindeki artış önemli bulunmuştur. Buna karşılık, Cd uygulamasına göre Si_1+Cd uygulaması ile %18.8 seviyesindeki artış önemli bulunurken, Si_2+Cd uygulaması ile %3.8 seviyesindeki artış önemli bulunmamıştır (Tablo 11). Kontrole göre patatesin kök Cd konsantrasyonunda Cd uygulaması ile 41.3 kat düzeyindeki artış önemli bulunmuştur. Buna ek olarak, Cd uygulamasına göre Si_1+Cd uygulamasında %10.5 düzeyinde ve Si_2+Cd uygulamasında %32.5 seviyesindeki azalmalar önemli olarak belirlenmiştir (Tablo 11). Tütünün kök Cd konsantrasyonunda kontrole göre Cd uygulamasında 36.7 kat düzeyindeki artış önemli bulunurken, Cd uygulamasına göre Si_1+Cd uygulaması ile %26.3 düzeyinde ve Si_2+Cd uygulaması ile %30.6 düzeyindeki artışlar önemli olarak saptanmamıştır (Tablo 11). Kontrole göre altınçileğin kök Cd konsantrasyonunda Cd uygulaması ile 72.8 kat düzeyinde önemli artış bulunurken, Cd uygulamasına göre Si_1+Cd uygulamasında 2.7 kat düzeyinde ve Si_2+Cd uygulamasında ise 3.9 kat düzeyinde artış olarak belirlenen değişimler önemli bulunmuştur (Tablo 11).

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde ve kök Cd alımları üzerine Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analiz sonuçları Tablo 12’ de ve gövde ve kök Cd alımlarına ait ortalamalar ise Tablo 13’de toplu olarak verilmiştir. Tablo 12 ve Tablo 13 birlikte değerlendirildiğinde; *Solanaceae* familyası bitkilerinde Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının gövde ve kök Cd alımları üzerine türlerin, uygulamaların ve tür x uygulama interaksiyonunun etkileri %0.1 seviyesinde önemli bulunmuştur.

Tablo 12

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde ve kök Cd alımlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Gövde Cd Alımı		Kök Cd Alımı	
		Kareler Toplamı	F Değeri	Kareler Toplamı	F Değeri
Genel	71	191193.12	-	2404.96	-
Tür (T)	5	120055.61	798.61***	1271.52	168.31***
Uygulama (U)	3	29560.46	327.73***	530.30	116.99***
T x U İnteraksiyonu	15	40133.87	88.99***	530.62	23.41***
Hata	48	1443.18	-	72.52	-

Uygulamaların ortalamaları birlikte değerlendirildiğinde, gövde Cd alımı en fazla olan tür tütün ($113.64 \mu\text{g bitki}^{-1}$) ve gövde Cd alımı en az olan tür ise biber ($3.19 \mu\text{g bitki}^{-1}$) olarak tespit edilmiştir (Tablo 13). Patlıcan ile patates ve altınçilek ile biberin gövde Cd alımları arasındaki fark hariç diğer türlerin ortalama gövde Cd alımları arasındaki farklar önemli bulunmuştur. Türlerin ortalamaları incelendiğinde kontrol uygulamasında $2.63 \mu\text{g bitki}^{-1}$ olan gövde Cd alımı Cd uygulaması ile 17.4 kat artış göstererek $45.89 \mu\text{g bitki}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Cd uygulamasına göre ise Si_1+Cd uygulaması ($45.76 \mu\text{g bitki}^{-1}$) ile %0.3 düzeyinde azalma ve Si_2+Cd uygulaması ($54.47 \mu\text{g bitki}^{-1}$) ile %18.7 düzeyindeki artış önemli olarak saptanmıştır. Bununla birlikte, kontrol uygulamasına göre Si_1+Cd uygulaması ile 17.4 kat artış istatistiksel açıdan önemli bulunmamıştır (Tablo 13).

Kontrole göre domatesin gövde Cd alımında Cd uygulaması ile 37.2 kat artış önemli bulunurken, Cd uygulamasına göre Si_1+Cd uygulaması ile %14.7 düzeyinde ve Si_2+Cd uygulaması ile %17.7 düzeyindeki artışlar önemli bulunmamıştır (Tablo 13). Biberin gövde Cd alımında kontrole göre Cd uygulaması ile %58.9 seviyesinde önemli artış belirlenirken, Cd uygulamasına göre Si_1+Cd uygulaması ile %21.1 seviyesinde ve Si_2+Cd uygulaması ile %23.0 seviyesindeki artışlar önemli olarak tespit edilmemiştir (Tablo 13). Patlıcanın gövde Cd alımında kontrole göre Cd uygulamasında 8.0 kat artış önemli bulunmuştur. Buna karşılık, Cd uygulamasına göre Si_1+Cd uygulaması ile %28.5 seviyesindeki azalma önemli bulunurken, Si_2+Cd uygulaması ile %1.7 seviyesindeki azalma önemli bulunmamıştır (Tablo 13). Kontrole göre patatesin gövde Cd alımında Cd uygulaması ile 6.2 kat artış önemli bulunmuştur. Buna ek olarak, Cd uygulamasına göre Si_1+Cd uygulamasında %0.8 düzeyindeki artış önemli bulunmazken, Si_2+Cd uygulamasında %64.1 seviyesindeki artış

önemli olarak belirlenmiştir (Tablo 13). Tütünün gövde Cd alımında kontrole göre Cd uygulaması ile 33.3 kat artış önemli olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulaması ile %5.7 düzeyinde azalma önemli bulunmazken, Si₂+Cd uygulaması ile %16.3 düzeyindeki artış önemli olarak tespit edilmiştir (Tablo 13). Altınçileğin gövde Cd alımında kontrole göre Cd uygulaması ile 2.5 kat düzeyinde önemli artış bulunurken, Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulamasında %30.8 düzeyinde ve Si₂+Cd uygulamasında ise %55.8 düzeyinde artış olarak belirlenen değişimler önemli bulunmuştur (Tablo 13).

Tablo 13

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde ve kök Cd alımlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.

Uygulama	Domates	Biber	Patlıcan	Patates	Tütün	Altınçilek	Ortalama
Gövde Cd Alımı ($\mu\text{g bitki}^{-1}$)							
Kontrol	2.23 b [#]	1.97 b	2.96 c	2.71 c	4.35 c	1.57 d	2.63 C
Cd	82.96 a	3.13 a	23.54 a	16.78 b	144.98 b	3.96 c	45.89 B
Si ₁ + Cd	95.19 a	3.79 a	16.83 b	16.92 b	136.68 b	5.18 b	45.76 C
Si ₂ + Cd	97.62 a	3.85 a	23.13 a	27.53 a	168.55 a	6.17 a	54.47 A
Ortalama	69.50 B	3.19 D	16.61 C	15.99 C	113.64 A	4.22 D	
Kök Cd Alımı ($\mu\text{g bitki}^{-1}$)							
Kontrol	0.27 d	0.23 c	0.47 b	0.18 b	0.58 c	0.21 c	0.32 C
Cd	9.22 c	0.86 b	4.41 a	1.48 b	9.95 b	0.46 b	4.40 B
Si ₁ + Cd	10.44 b	1.16 a	4.19 a	4.36 a	19.05 a	0.85 a	6.67 A
Si ₂ + Cd	13.85 a	0.94 b	5.00 a	4.06 a	18.55 a	0.90 a	7.22 A
Ortalama	8.45 B	0.79 D	3.52 C	2.52 C	12.03 A	0.61 D	

[#]: Her bitki için aynı sütunda farklı harf ile gösterilen uygulamaların ortalamaları ($n = 3$) arasındaki farklar önemlidir.

Uygulamaların ortalaması olarak en fazla kök Cd alımına sahip tür tütün (12.03 $\mu\text{g bitki}^{-1}$) ve en az kök Cd alımına sahip tür ise altınçilek (0.61 $\mu\text{g bitki}^{-1}$) olarak belirlenmiştir (Tablo 13). Patlıcan ile patates ve biber ile altınçileğin kök Cd alımları arasındaki fark hariç diğer türlerin ortalama kök Cd alımları arasındaki farklar önemli bulunmuştur. Türlerin ortalaması olarak kontrol koşullarında 0.32 $\mu\text{g bitki}^{-1}$ olan kök Cd alımı Cd uygulanan koşullarda 13.8 kat artarak 4.40 $\mu\text{g bitki}^{-1}$ bulunmuştur. Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulaması (6.67 $\mu\text{g bitki}^{-1}$) ile %51.6 düzeyinde ve Si₂+Cd uygulaması (7.22 $\mu\text{g bitki}^{-1}$) ile %64.1 düzeyindeki artışlar önemli olarak saptanmıştır. Bununla birlikte, Si₁+Cd ve Si₂+Cd uygulamaları arasındaki fark istatistiksel açıdan önemli bulunmamıştır (Tablo 13).

Domatesin kök Cd alımında kontrole göre Cd uygulaması ile 34.1 kat düzeyinde önemli artış bulunurken, Cd uygulamasına göre Si_1+Cd uygulamasında %13.2 düzeyinde ve Si_2+Cd uygulamasında ise %50.2 düzeyinde artış olarak belirlenen değişimler önemli bulunmuştur (Tablo 13). Biberin kök Cd alımında kontrole göre Cd uygulaması ile 3.7 kat düzeyinde önemli artış belirlenmiştir. Buna karşılık Cd uygulamasına göre Si_1+Cd uygulamasında %34.9 düzeyindeki artış önemli bulunurken, Si_2+Cd uygulamasında %9.3 düzeyindeki artış önemli bulunmamıştır (Tablo 13). Kontrole göre patlıcanın kök Cd alımında Cd uygulaması ile 9.4 kat düzeyinde önemli artış bulunurken, Cd uygulamasına göre Si_1+Cd uygulamasında %5.0 düzeyindeki azalma ve Si_2+Cd uygulamasında %13.4 düzeyindeki artış önemli bulunmamıştır (Tablo 13). Patatesin kök Cd alımında kontrole kıyasla Cd uygulamasında 8.2 kat seviyesindeki artış önemli bulunmamıştır. Buna karşılık, Cd uygulamasına göre Si_1+Cd uygulaması ile 2.9 kat düzeyinde ve Si_2+Cd uygulaması ile 2.7 kat düzeyindeki artışlar önemli olarak belirlenmiştir (Tablo 13). Tütünün kök Cd alımında kontrole göre Cd uygulaması ile 17.2 kat düzeyindeki artış önemli bulunmuştur. Buna ek olarak, Cd uygulamasına göre Si_1+Cd uygulaması ile %91.5 düzeyinde ve Si_2+Cd uygulaması ile %86.4 düzeyinde önemli artışlar tespit edilmiştir (Tablo 13). Kontrole göre altınçileğin kök Cd alımında Cd uygulaması ile 2.2 kat düzeyindeki artış önemli bulunurken, Cd uygulamasına göre Si_1+Cd uygulaması ile %84.8 düzeyinde ve Si_2+Cd uygulaması ile %95.7 düzeyinde önemli artışlar belirlenmiştir (Tablo 13).

Silisyum birikiminin olduğu kök, sap ve yapraklarda Cd içeriğinin azaldığı tespit edilmiştir (Pereira vd., 2018). Treder ve Cieslinski (2005) frigo tipi çilekte, Çıkılı vd. (2016) domates, biber ve patlıcanda bitkilerin Cd içeriklerinin artan Cd seviyeleriyle arttığını, Rizwan vd. (2015) ise makarnalık buğdayda Cd konsantrasyonu arttıkça sürgün Cd konsantrasyonunun azaldığını açıklamışlardır.

Kadmium stresi altında yetişen bitkilerle yapılan çalışmalarda araştırma bulgularımıza benzer sonuçlar çeşitli araştırmacılar tarafından da açıklanmıştır. Nwugo ve Huerta (2008) ve Shi vd. (2005) çeltik fidelerinde, Liu vd. (2008), Wang vd. (2016), Liu vd. (2013a) ve Kim vd. (2014) çeltikte, Liu vd. (2013b) itüzümünde, Greger ve Landberg (2019) patates, havuç, soğan ve buğdayda, Wu vd. (2016) buğdayda, Shi vd. (2018) buğday fidelerinde, Liang vd. (2005) ve Lukačová vd. (2013) mısırdaki, Zhang vd. (2013) mangrovdaki, Kabir vd. (2016) yoncada ve Rahman vd. (2020) ise kışlık buğdayda Si ilavelerinin bitki kök ve gövde Cd konsantrasyonunu önemli ölçüde azalttığını rapor etmişlerdir. Treder ve

Cieslinski (2005) frigo tipi çilekte topraktan Si uygulamasının bitkinin gövde, yaprak ve meyvelerinde Cd konsantrasyonlarını azalttığı ancak kökte değişimin olmadığı ve yapraklara püskürtülen potasyum silikatın bitkinin organlarında Cd konsantrasyonunu azaltmadığını belirlemiştir. Zhang vd. (2008) ve Ji vd. (2017) çeltikte, Shi vd. (2010) fıstık fidelerinde, Rizwan vd. (2012) buğdayda, Vaculík vd. (2012) mısırdaki ve Rostami vd. (2019) balangu bitkisinde Si uygulamalarının gövde Cd konsantrasyonlarını düşürdüğünü ancak Vaculík vd. (2015) mısırdaki Si'un yaprak dokularındaki Cd konsantrasyonunu değiştirmediğini belirlemişlerdir. Buğdayda Si uygulamalarının gövde ve tanenin Cd konsantrasyonunda azalmaya neden olduğunu, gövde Cd konsantrasyonundaki azalmanın İnqlab-91 ve Sehar-2006'da, Iqbal-2000 ve Lasani- 2008'den daha fazla iken, tanede Cd konsantrasyonu için tersinin geçerli olduğu ve buğday çeşitlerinin Cd konsantrasyonunun Si ilavesi ile azaldığını saptanmıştır (Naeem vd., 2014). Vatehová vd. (2012) *Brassica* türlerinde (*B. juncea* L. Czern., cv. Vitasso ve *B. napus* L., cv. Atlantik) sadece Cd uygulamasına göre Cd+Si birlikte uygulandığında *B. napus*'un kök ve sürgünde Cd konsantrasyonunun *B. juncea*'dan daha yüksek olduğunu ifade ederken, Wu vd. (2015) hıyar ve domatesin gövdesinde ve hıyarın köklerinde Cd konsantrasyonunun Si ile azaltıldığını belirtmiştir. Ye vd. (2012) ise mangrov fidelerinde Si uygulamaları ile kök Cd konsantrasyonlarının azaldığını ortaya koymuştur.

4.7. Bitkilerde Cd Translokasyonu ve Akümülyasyonuna Uygulamaların Etkisi

Solanaceae familyası bitkilerinin Cd translokasyonu ve akümülyasyonu üzerine Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analiz sonuçları Tablo 14' de ve Cd translokasyonu ve akümülyasyonuna ait ortalamalar ise Tablo 15'de toplu olarak verilmiştir. Tablo 14 ve Tablo 15 birlikte incelendiğinde; *Solanaceae* familyası bitkilerinde Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının Cd translokasyon faktörü ve toplam Cd akümülyasyon oranı üzerine türlerin etkisi, uygulamaların etkisi ve tür x uygulama interaksyonunun etkileri %0.1 düzeyinde önemli bulunmuştur. *Solanaceae* familyası bitkilerinde Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının köklerde net Cd akümülyasyonu üzerine türlerin etkisi %1 düzeyinde, uygulamaların etkisi ve tür x uygulama interaksyonunun etkileri %0.1 düzeyinde önemli olarak tespit edilmiştir (Tablo 14 ve Tablo 15).

Tablo 14

Solanaceae familyası bitkilerinde Cd translokasyon faktörü, köklerde net Cd akümülayonu ve toplam Cd akümülayon oranına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi 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	8.18	-	346108.86	-	83235.42	-
Tür (T)	5	4.99	185.54***	27504.61	4.8678**	32828.67	188.07***
Uygulama (U)	3	2.00	123.97***	187645.02	55.35***	31616.67	301.87***
T x U İnteraksiyonu	15	0.93	11.56***	76715.78	4.53***	17114.10	32.68***
Hata	48	0.26	-	54243.46	-	1675.77	-

Uygulamalar birlikte değerlendirildiğinde, en fazla Cd translokasyon faktörüne sahip tür tütün (0.706) ve en az Cd translokasyon faktörüne sahip tür ise altınçilek (0.070) olarak belirlenmiştir (Tablo 15). Biber, patates ve altınçileğin Cd translokasyon faktörleri arasındaki fark hariç diğer türlerin Cd translokasyon faktörleri arasındaki değişim önemli bulunmuştur. Türlerin ortalaması olarak kontrol koşullarında 0.588 olan Cd translokasyon faktörü Cd uygulanan koşullarda %56.8 azalarak 0.254 bulunmuştur. Cd uygulamasına kıyasla türlerin Cd translokasyonu Si₁+Cd uygulamasında %20.1 düzeyinde ve Si₂+Cd uygulamasında ise %33.1 düzeyinde önemli azalmalar saptanmıştır (Tablo 15).

Kadmiyum toksisitesinin türlerin Cd translokasyon faktörü üzerine etkisi kontrole göre farklı olmuş, tütün hariç diğer türlerin Cd translokasyon faktörlerinde önemli azalmalar belirlenmiştir (Tablo 15). Bu azalmaların domateste %50.9, biberde %97.0, patlıcanda %86.5, patateste %84.0 ve altınçilekte %96.2 seviyesinde olduğu saptanmıştır. Tütünün Cd translokasyon faktöründe uygulamalarla saptanan değişiklikler istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur. Bununla birlikte, Cd uygulamasına kıyasla Si₁+Cd uygulaması ile patateste belirlenen %6.5 düzeyinde artış hariç diğer türlerin Cd translokasyon faktörlerinde önemli olmayan azalmalar belirlenmiş ve bu değişimler domateste %22.9, biberde %7.1, patlıcanda %1.2 ve altınçilekte %50.0 düzeyinde gerçekleşmiştir (Tablo 15). Si₂+Cd uygulamasında ise, biberde %21.4, patlıcanda %13.4 ve altınçilekte %60.0 seviyelerinde belirlenen azalmalar hariç domateste %99.6 seviyesindeki azalma ve patateste %45.2 seviyesindeki artış önemli bulunmuştur (Tablo 15). Cd translokasyonuna göre türler ise tütün> domates> patlıcan> patates> biber> altınçilek olarak sıralanmıştır (Tablo 15).

Uygulamaların ortalaması olarak en fazla net Cd akümülyasyonuna sahip tür tütün (124.8 $\mu\text{g g}^{-1}$ KA) ve en az net Cd akümülyasyonuna sahip tür ise domates (61.7 $\mu\text{g g}^{-1}$ KA) olarak belirlenmiştir (Tablo 15). Türlerin ortalaması olarak kontrol koşullarında 3.8 μg olan köklerde net Cd akümülyasyonu Cd uygulanan koşullarda 33.6 kat artarak 127.7 $\mu\text{g g}^{-1}$ KA bulunmuştur. Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulaması (111.9 $\mu\text{g g}^{-1}$ KA) ile %12.4 düzeyinde ve Si₂+Cd uygulaması (123.2 $\mu\text{g g}^{-1}$ KA) ile %3.5 düzeyindeki azalmalar önemli olarak saptanmamıştır (Tablo 15).

Tablo 15

Solanaceae familyası bitkilerinde Cd translokasyon faktörü, köklerde net Cd akümülyasyonu ve toplam Cd akümülyasyon oranına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.

Uygulama	Domates	Biber	Patlıcan	Patates	Tütün	Altınçilek	Ortalama
TF-Cd							
Kontrol	1.218 a [#]	0.474 a	0.609 a	0.194 a	0.770	0.264 a	0.588 A
Cd	0.598 b	0.014 b	0.082 b	0.031 c	0.792	0.010 b	0.254 B
Si ₁ + Cd	0.461 b	0.013 b	0.081 b	0.033 bc	0.625	0.005 b	0.203 C
Si ₂ + Cd	0.255 c	0.011 b	0.071 b	0.045 b	0.636	0.004 b	0.170 C
Ortalama	0.633 B	0.128 D	0.211 C	0.076 D	0.706 A	0.070 D	
NA-Cd ($\mu\text{g Cd g}^{-1}$ KA)							
Kontrol	1.6 b	2.8 d	1.8 c	11.7 d	3.0 b	1.8 d	3.8 B
Cd	78.9 a	96.7 c	118.3 ab	168.5 a	254.6 a	49.0 c	127.7 A
Si ₁ + Cd	82.2 a	104.1 b	129.9 a	125.2 b	102.8 ab	127.0 b	111.9 A
Si ₂ + Cd	84.0 a	113.8 a	113.4 b	108.2 c	138.9 ab	181.0 a	123.2 A
Ortalama	61.7 C	79.3 BC	90.9 B	103.4 AB	124.8 A	89.7 B	
TAR-Cd ($\mu\text{g Cd g}^{-1}$ KA gün⁻¹)							
Kontrol	1.24 d	0.75 c	1.96 c	0.66 b	2.68 d	1.00 c	1.38 D
Cd	44.14 c	7.34 b	11.54 a	10.85 b	69.75 c	17.09 c	26.78 C
Si ₁ + Cd	61.55 b	12.41 a	6.49 b	31.35 a	82.93 b	74.80 b	44.92 B
Si ₂ + Cd	79.04 a	12.75 a	15.82 a	35.66 a	101.74 a	97.12 a	57.02 A
Ortalama	46.49 B	8.31 D	8.95 D	19.63 C	64.27 A	47.50 B	

[#]: Her bitki için aynı sütunda farklı harf ile gösterilen uygulamaların ortalamaları ($n = 3$) arasındaki farklar önemlidir.

Cd toksisitesinin türlerin köklerde net Cd akümülyasyonuna etkisi kontrole göre ayrılmış ve türlerin köklerde net Cd akümülyasyonlarında önemli artışlar belirlenmiştir (Tablo 15). Bu artışların domateste 48.3 kat, biberde 34.5 kat, patlıcanda 65.7 kat, patateste

14.4 kat, tütünde 84.9 kat ve altınçilekte 27.2 kat olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte, Cd uygulamasına kıyasla Si_1+Cd uygulaması ile köklerde net Cd akümülayasyonlarında domatestede %4.2 düzeyinde ve patlıcanda %9.8 düzeyindeki artışlar önemli bulunmazken, tütünde %59.6 seviyesindeki azalma önemli bulunmamıştır. Buna ek olarak, biberde %7.7 düzeyinde ve altınçilekte 2.6 kat seviyesindeki artışlar önemli olarak belirlenirken, patatestede %25.7 düzeyindeki azalma önemli bulunmuştur (Tablo 15). Si_2+Cd uygulaması ile köklerde net Cd akümülayasyonlarında ise, domatestede %6.5 düzeyindeki artış önemli bulunmazken biberde %17.7 düzeyindeki ve altınçilekte 3.7 kat artışlar önemli olarak belirlenmiştir. Buna karşılık patlıcanda %4.1 düzeyinde ve tütünde %45.4 düzeyindeki azalmalar önemli bulunmazken patatesteki %35.8 seviyesinde azalma önemli olarak tespit edilmiştir (Tablo 15).

Uygulamalar birlikte değerlendirildiğinde, en fazla toplam Cd akümülayasyon oranına sahip tür tütün ($64.27 \mu g g^{-1} KA gün^{-1}$) ve en az toplam Cd akümülayasyon oranına sahip tür ise biber ($8.31 \mu g g^{-1} KA gün^{-1}$) olarak belirlenmiştir (Tablo 15). Altınçilek ve domates ile patlıcan ve biberin toplam Cd akümülayasyon oranları arasındaki farklar önemli bulunmazken diğer türler ile toplam Cd akümülayasyon oranları arasındaki farklar önemli bulunmuştur (Tablo 15). Türlerin ortalaması incelendiğinde kontrol koşullarında $1.38 \mu g g^{-1} KA gün^{-1}$ olan toplam Cd akümülayasyon oranı Cd uygulaması ile 19.4 kat artarak $26.78 \mu g g^{-1} KA gün^{-1}$ bulunmuştur. Cd uygulamasına kıyasla türlerin toplam Cd akümülayasyon oranlarında Si_1+Cd uygulamasında %67.7 düzeyinde ve Si_2+Cd uygulamasında ise 2.1 kat düzeyinde önemli artışlar saptanmıştır (Tablo 15).

Cd uygulamasının türlerin toplam Cd akümülayasyon oranlarına etkisi kontrole göre farklı olmuş, patates ve altınçilek hariç diğer türlerin toplam Cd akümülayasyon oranlarında önemli artışlar belirlenmiştir. Bu artışların domatestede 35.6 kat, biberde 9.8 kat, patlıcanda 5.9 kat, patatestede 16.4 kat, tütünde 26.0 kat ve altınçilekte 17.1 kat olduğu saptanmıştır (Tablo 15). Patates ve altınçileğin toplam Cd akümülayasyon oranlarında kontrole kıyasla Cd uygulamasında saptanan artışlar istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır. Bununla birlikte, Cd uygulamasına kıyasla Si_1+Cd uygulaması ile patlıcanda belirlenen değişim hariç diğer türlerin toplam Cd akümülayasyon oranlarında önemli artışlar belirlenmiş ve bu artışlar domatestede %39.4, biberde %69.1 ve tütünde %18.9 düzeyinde iken patatestede 2.9 kat ve altınçilekte 4.4 kat seviyesinde gerçekleşmiştir (Tablo 15). Patlıcanın toplam Cd akümülayasyon oranında Cd uygulamasına göre Si_1+Cd uygulaması ile %43.8 düzeyindeki

azalma önemli olarak belirlenmiştir. Si₂+Cd uygulamasında ise, patlıcanda belirlenen artış hariç diğer türlerin toplam Cd akümülayon oranlarında önemli artışlar bulunmuş ve bu artışlar domateste %79.1, biberde %73.7, patlıcanda %37.1 ve tütünde %45.9 seviyesinde iken patateste 3.3 kat ve altınçilekte 5.7 kat olarak tespit edilmiştir (Tablo 15).

Bitkiler için mutlak gerekli olmamasına rağmen Si'un bitkilerde abiyotik stres oluşturabilecek ağır metallerin hareketliliğinin kısıtlanmasının muhtemelen ilk savunma mekanizması olduğu açıklanmıştır (Vaculík vd., 2020). Çıkılı vd. (2016), Cd uygulamalarının domates hariç biber, patlıcan ve altınçilekte Cd'un translokasyon faktörünü azalttığı ve Cd translokasyonuna göre bitkilerin altınçilek< biber< patlıcan< domates olarak sıralandıklarını tespit etmişlerdir. Wu vd. (2015) domateste, Lu vd. (2018) tütünde, Song vd. (2009) *Brassica chinensis* L. türüne ait iki farklı çeşitte (Cd-duyarlı, *Shanghaiqing* ve Cd-toleranslı *Hangyoudong*), Rizwan vd. (2012), Naeem vd. (2014) ve Naeem vd. (2018) buğdayda, Lukačová Kuliková ve Lux (2010) mısırdaki, Rahman vd. (2017) tarla bezelyesinde, Guo vd. (2017), Ji vd. (2017), Wang vd. (2014) ve Shi vd. (2005) çeltikte, Rostami vd. (2019) balanguda, Guo vd. (2015) iki selvi çeşidi olan *Juniperus chinensis* ve *Platycladus orientalis*'de ve Shi vd. (2010) Luhua 11 fıstık çeşidinde Si uygulamasının kökten gövdeye Cd translokasyonunu azalttığını rapor etmişlerdir. Çeltikte (Gu vd., 2011) gövdeden yapraklara ve buğday fidelerinin (Greger vd., 2016) kök ve sürgünlerinden sitoplazmaya Cd translokasyonunun Si uygulaması ile azaldığı ifade edilmiştir. Buna karşılık, Liu vd. (2013b) itüzümünde ve Wu vd. (2016) buğdayda Si'un kökten gövdeye Cd translokasyonunu etkilemediğini, Wu vd. (2015) ise hıyarda Si'un kökten gövdeye Cd translokasyonunu arttırdığını saptamışlardır.

Ağır metaller bitkilerde birikebilir ve bu nedenle besin zinciri yoluyla insan vücuduna girebilir ve insan sağlığını tehdit edebilir (Liu vd., 2003; Nagajyoti vd., 2010; Mahar vd., 2015). Topraktaki Cd'un bitkilerde Cd birikimine yol açıp, bitki hücrelerini tahrip ederek fotosentezi engelleyebileceği bu nedenle yaprakların bozulmasına ve büyümenin engellenmesine neden olabileceği ifade edilmiştir (Benavides vd., 2005; Gichner vd., 2006). Çıkılı vd. (2016) altınçilekte toplam akümülayon oranının artan Cd düzeylerine bağlı olarak arttığını rapor etmiştir. Liu vd. (2008) çeltikte yapraklardan Si uygulamasının toplam Cd birikimini azalttığı ancak gövdede Cd birikimine etki etmediğini, Zhang vd. (2008) çeltikte, Tripathi vd. (2012) çeltik fidelerinde ve Feng vd. (2010) hıyarda Cd

uygulamalarının bitkilerde Cd birikimine neden olduğu ancak Si uygulamasının bu durumu hafiflettiğini bildirmişlerdir. Mihaličová Malčovská vd. (2014) ise mısırdaki Cd uygulamasının köklerde, reaktif oksijen türlerinin birikmesine ve bunun sonucunda membran lipid peroksidasyonuna neden olduğu ve özellikle köklerde Si uygulamasının Cd birikimini azalttığını saptamıştır.

4.8. Bitkilerin Cd Biyokonsantrasyonuna Uygulamaların Etkisi

Si₁+Cd uygulamasının türlerin gövde biyokonsantrasyonlarına etkisi Cd uygulamasına göre ayrılmış, domateste %1.7 düzeyinde, patateste %5.0 düzeyinde ve tütünde %9.1 düzeyinde azalmalar görülürken, biberde %2.6 düzeyinde, patlıcanda %18.2 düzeyinde ve altınçilekte %22.0 düzeyinde artışlar belirlenmiştir (Tablo 16). Bununla birlikte, Cd uygulamasına kıyasla türlerin gövde biyokonsantrasyonlarında Si₂+Cd uygulaması ile domateste %3.3 seviyesinde, tütünde %4.1 seviyesinde ve altınçilekte %41.5 seviyesinde artışlar belirlenirken, biberde %7.0 seviyesinde, patlıcanda %10.0 seviyesinde ve patateste %1.5 seviyesinde azalmalar tespit edilmiştir (Tablo 16).

Tablo 16

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde ve kök biyo-konsantrasyon faktörüne (BKF-Cd) Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.

Uygulama	Domates	Biber	Patlıcan	Patates	Tütün	Altınçilek
Gövde BKF-Cd						
Kontrol	-	-	-	-	-	-
Cd	0.659	0.114	0.598	0.338	1.112	0.041
Si ₁ + Cd	0.648	0.117	0.707	0.321	1.011	0.050
Si ₂ + Cd	0.681	0.106	0.538	0.333	1.158	0.058
Kök BKF-Cd						
Kontrol	-	-	-	-	-	-
Cd	1.104	8.194	7.323	10.920	1.406	4.013
Si ₁ + Cd	1.408	8.875	8.698	9.772	1.776	10.999
Si ₂ + Cd	2.671	9.683	7.600	7.370	1.836	15.703

Si₁+Cd uygulamasının türlerin kök biyokonsantrasyonlarına etkisi Cd uygulamasına göre farklı olmuş, patates hariç diğer türlerin kök biyokonsantrasyonlarında artışlar

belirlenmiştir (Tablo 16). Bu artışların domateste %27.5, biberde %8.3, patlıcanda %18.8 ve tütünde %26.3 seviyesinde iken altınçilekte 2.7 kat olduğu saptanmıştır. Patatesin kök biyokonsantrasyonunda ise Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulaması ile %10.5 düzeyinde azalma belirlenmiştir (Tablo 16). Bununla birlikte, Cd uygulamasına kıyasla Si₂+Cd uygulaması ile patates hariç diğer türlerin kök biyokonsantrasyonlarında artışlar tespit edilmiştir (Tablo 16). Bu artışların biberde %18.2, patlıcanda %3.8 ve tütünde %30.6 düzeyinde iken domateste 2.4 kat ve altınçilekte 3.9 kat olduğu belirlenmiştir. Cd uygulamasına göre patatesin kök biyokonsantrasyonunda Si₂+Cd uygulamasında %32.5 düzeyinde azalma saptanmıştır (Tablo 16).

Biyokonsantrasyon faktörü (BKF), bir organizmadaki kimyasal konsantrasyonun çevredeki konsantrasyona oranıdır ve bitkideki kimyasalın biyokonsantrasyon kapasitesini yansıtır (Petoumenou vd., 2015). Biber, patlıcan ve altınçilekte Cd'un BKF'nü azalttığı rapor edilmiştir (Çıkılı vd., 2016). BKF değerleri Si'un çeltikte Cd birikimini azalttığı gösterilmiştir (Guo vd., 2017). Lukačová vd. (2013) mısırdaki sürgünlere taşındıkça köklerde çok daha fazla Cd tutulduğu ve kökte Cd'un hücre duvarında biriktiğini, Lukačová Kuliková ve Lux (2010) ise mısırdaki Cd'un çoğunlukla bitkinin kök sistemlerinde lokalize olduğunu ve Si'un köklerde Cd birikimini azalttığını ifade etmişlerdir.

Greger vd. (2016) buğday fidelerinin kök ve sürgünlerinde, Naeem vd. (2018) ve Wu vd. (2016) buğdayda, Shi vd. (2010) iki fıstık çeşidi (Cd-duyarlı Luhua 11 ve Cd-tolerant Luzi 101) fidelerinin sürgünlerinde, Wang vd. (2014) çeltik fidelerinde, Rahman vd. (2017) tarla bezelyesinde ve Wu vd. (2015) hıyarda Si uygulamasının Cd birikimini azalttığı sonucuna varmışlardır.

Shi vd. (2005) çeltik fidelerinde Si uygulamasının köklerde Cd birikimini arttırdığı ve Cd'un esas olarak endodermis ve epidermisin yakınlarında biriktiğini, Guo vd. (2015) ise iki selvi çeşidinden (*Juniperus chinensis* ve *Platycladus orientalis*) *P. orientalis*'in daha fazla Cd biriktirdiği, Si'un köklerde Cd tutulmasını arttırdığı, *P. orientalis* için sadece Cd uygulamasına kıyasla rizosferde daha yüksek Cd hareketliliğine ve gövdede Cd birikiminin artmasına neden olduğunu açıklamışlardır.

4.9. Bitkilerin Fotosentetik Pigment İçeriklerine Uygulamaların Etkisi

Solanaceae familyası bitkilerinin klorofil *a* ve klorofil *b* içerikleri üzerine Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analiz sonuçları Tablo 17’ de ve klorofil *a* ve klorofil *b* içeriklerine ait ortalamalar ise Tablo 18’de toplu olarak verilmiştir. Tablo 17 ve Tablo 18 birlikte değerlendirildiğinde; *Solanaceae* familyası bitkilerinde Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının klorofil *a* ve klorofil *b* içerikleri üzerine türlerin, uygulamaların ve tür x uygulama interaksiyonunun etkileri %0.1 seviyesinde önemli bulunmuştur.

Tablo 17

Solanaceae familyası bitkilerinin klorofil *a* ve klorofil *b* içeriklerine Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi 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	8.01	-	2.59	-
Tür (T)	5	4.74	142.37***	1.38	104.59***
Uygulama (U)	3	1.99	99.78***	0.87	109.64***
T x U İnteraksiyonu	15	0.95	9.52***	0.22	5.56***
Hata	48	0.32	-	0.13	-

Uygulamalar birlikte değerlendirildiğinde, en fazla klorofil *a* içeriğine sahip tür altınçilek (1.43 mg g⁻¹ YA) ve en az klorofil *a* içeriğine sahip tür ise patates (0.76 mg g⁻¹ YA) olarak belirlenmiştir (Tablo 18). Altınçilek ve biber ile diğer türlerin klorofil *a* içerikleri arasındaki farklar önemli bulunurken domates ve tütün ile patlıcan ve patatesin klorofil *a* içeriklerinde değişimler önemsiz bulunmuştur. Türlerin ortalaması olarak kontrol koşullarında 1.43 mg g⁻¹ YA olan klorofil *a* içeriği Cd uygulanan koşullarda %27.3 azalarak 1.04 mg g⁻¹ YA bulunmuştur. Cd uygulamasına kıyasla türlerin klorofil *a* içeriklerinde Si₁+Cd uygulamasında %2.9 düzeyinde artış ve Si₂+Cd uygulamasında ise %1.9 düzeyindeki azalma önemli saptanmamıştır (Tablo 18).

Cd toksisitesinin türlerin klorofil *a* içeriğine etkisi kontrole göre ayrılmı olmuştur, tütün ve altınçilek hariç diğer türlerin klorofil *a* içeriklerinde önemli azalmalar belirlenmiştir (Tablo 18). Bu azalmaların domateste %18.8, biberde %27.4, patlıcanda %45.4, patateste

%57.9 ve tütünde %10.9 seviyesinde olduğu saptanmıştır. Altınçileğin klorofil *a* içeriğinde kontrole kıyasla uygulamalarla saptanan değişimler istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır. Bununla birlikte, Cd uygulamasına kıyasla Si₁+Cd uygulaması ile patates hariç biber ve patlıcanın klorofil *a* içeriklerinde önemli artışlar belirlenmiş ve bu artışlar biberde %21.9, patlıcanda %14.1 ve patateste %5.9 düzeyinde gerçekleşmiştir. Cd uygulamasına kıyasla Si₁+Cd uygulaması ile domateste %4.8 ve tütünde %9.0 seviyesindeki azalmalar ise önemli bulunmamıştır (Tablo 18). Si₂+Cd uygulamasında ise, tütün hariç diğer türlerin klorofil *a* içeriklerinde önemli azalmalar bulunmuş ve bu azalmaların domateste %16.8, patlıcanda %35.2 ve tütünde %1.6 seviyesinde olduğu tespit edilmiştir. Cd uygulamasına göre Si₂+Cd uygulaması ile biberde %13.2 ve patateste %49.0 düzeyindeki artışlar önemli bulunmuştur (Tablo 18).

Tablo 18

Solanaceae familyası bitkilerinin klorofil *a* ve klorofil *b* içeriklerine Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.

Uygulama	Domates	Biber	Patlıcan	Patates	Tütün	Altınçilek	Ortalama
Klorofil <i>a</i> İçeriği (mg g⁻¹ YA)							
Kontrol	1.54 a [#]	1.57 a	1.30 a	1.21 a	1.37 a	1.56	1.43 A
Cd	1.25 b	1.14 d	0.71 c	0.51 c	1.22 ab	1.41	1.04 B
Si ₁ + Cd	1.19 b	1.39 b	0.81 b	0.54 bc	1.11 b	1.35	1.07 B
Si ₂ + Cd	1.04 c	1.29 c	0.46 d	0.76 b	1.20 b	1.38	1.02 B
Ortalama	1.26 C	1.35 B	0.82 D	0.76 D	1.22 C	1.43 A	
Klorofil <i>b</i> İçeriği (mg g⁻¹ YA)							
Kontrol	0.64 a	0.79 a	0.40 a	0.39 a	0.46 a	0.90 a	0.60 A
Cd	0.39 b	0.38 c	0.24 b	0.15 b	0.38 ab	0.52 b	0.34 B
Si ₁ + Cd	0.37 bc	0.50 b	0.23 b	0.15 b	0.45 a	0.48 b	0.36 B
Si ₂ + Cd	0.34 c	0.42 bc	0.12 c	0.22 b	0.31 b	0.55 b	0.33 B
Ortalama	0.43 C	0.52 B	0.25 D	0.23 D	0.40 C	0.61 A	

[#]: Her bitki için aynı sütunda farklı harf ile gösterilen uygulamaların ortalamaları ($n = 3$) arasındaki farklar önemlidir.

Uygulamaların ortalaması olarak en fazla klorofil *b* içeriğine sahip tür altınçilek (0.61 mg g⁻¹ YA) ve en az klorofil *b* içeriğine sahip tür ise patates (0.23 mg g⁻¹ YA) olarak belirlenmiştir (Tablo 18). Altınçilek ve biber ile diğer türlerin klorofil *b* içerikleri arasındaki farklar önemli bulunurken domates ve tütün ile patlıcan ve patatesin klorofil *b* içeriklerinde

değişimler önemsiz bulunmuştur. Türlerin ortalaması olarak kontrol koşullarında 0.60 mg g^{-1} YA olan klorofil *b* içeriği Cd uygulanan koşullarda %43.3 azalarak 0.34 mg g^{-1} YA bulunmuştur. Cd uygulamasına göre Si_1+Cd uygulaması (0.36 mg g^{-1} YA) ile %5.9 düzeyindeki artış ve Si_2+Cd uygulaması (0.33 mg g^{-1} YA) ile %2.9 düzeyindeki azalma önemli olarak saptanmamıştır (Tablo 18).

Kontrole göre Cd toksisitesinin türlerin klorofil *b* içeriklerine etkisi farklı olmuş, tütün hariç diğer türlerin klorofil *b* içeriklerinde önemli azalmalar belirlenmiştir (Tablo 18). Bu azalmaların domateste %39.1, biberde %51.9, patlıcanda %40.0, patateste %61.5, tütünde %17.4 ve altınçilekte %42.2 seviyesinde olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte, Si_1+Cd uygulaması ile biberde %31.6 düzeyindeki artış hariç diğer türlerin klorofil *b* içeriklerindeki değişimler önemli bulunmamıştır (Tablo 18). Cd uygulamasına kıyasla Si_2+Cd uygulamasında ise, domateste %12.8 düzeyinde ve patlıcanda %50.0 düzeyindeki azalmalar hariç diğer türlerin klorofil *b* içeriklerindeki değişimler istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır (Tablo 18).

Solanaceae familyası bitkilerinin klorofil *a+b* ve karotenoid içerikleri üzerine Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analiz sonuçları Tablo 19’ da ve klorofil *a+b* ve karotenoid içeriklerine ait ortalamalar ise Tablo 20’de toplu olarak verilmiştir. Tablo 19 ve Tablo 20 birlikte değerlendirildiğinde; *Solanaceae* familyası bitkilerinde Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının klorofil *a+b* ve karotenoid içerikleri üzerine türlerin, uygulamaların ve tür x uygulama interaksyonunun etkileri ($p \leq 0.001$) önemli bulunmuştur.

Tablo 19

Solanaceae familyası bitkilerinin klorofil *a+b* ve karotenoid içeriklerine Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Klorofil <i>a+b</i> İçeriği		Karotenoid İçeriği	
		Kareler Toplamı	F Değeri	Kareler Toplamı	F Değeri
Genel	71	18.63	-	1.71	-
Tür (T)	5	11.06	140.31***	0.95	108.71***
Uygulama (U)	3	5.49	116.05***	0.57	109.44***
T x U İnteraksiyonu	15	1.33	5.62***	0.10	4.00***
Hata	48	0.76	-	0.08	-

Uygulamalar birlikte değerlendirildiğinde, en fazla klorofil *a+b* içeriğine sahip tür altınçilek (2.04 mg g⁻¹ YA) ve en az klorofil *a+b* içeriğine sahip tür ise patates (0.99 mg g⁻¹ YA) olarak belirlenmiştir (Tablo 20). Altınçilek ve biber ile diğer türlerin klorofil *a+b* içerikleri arasındaki farklar önemli bulunurken domates ve tütün ile patlıcan ve patatesin klorofil *a+b* içeriklerinde değişimler önemsiz bulunmuştur. Türlerin ortalaması olarak kontrol koşullarında 2.02 mg g⁻¹ YA olan klorofil *a+b* içeriği Cd uygulanan koşullarda %31.7 azalarak 1.38 mg g⁻¹ YA bulunmuştur. Cd uygulamasına kıyasla türlerin klorofil *a+b* içeriklerinde Si₁+Cd uygulamasında %3.6 düzeyinde artış ve Si₂+Cd uygulamasında ise %2.2 düzeyindeki azalma önemli saptanmamıştır (Tablo 20).

Tablo 20

Solanaceae familyası bitkilerinin klorofil *a+b* ve karotenoid içeriklerine Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.

Uygulama	Domates	Biber	Patlıcan	Patates	Tütün	Altınçilek	Ortalama
Klorofil <i>a+b</i> İçeriği (mg g ⁻¹ YA)							
Kontrol	2.18 a [#]	2.37 a	1.70 a	1.60 a	1.83 a	2.46 a	2.02 A
Cd	1.65 b	1.52 c	0.95 b	0.66 c	1.60 b	1.94 b	1.38 B
Si ₁ + Cd	1.55 b	1.89 b	1.04 b	0.70 bc	1.55 b	1.83 b	1.43 B
Si ₂ + Cd	1.38 c	1.71 b	0.58 c	0.98 b	1.51 b	1.94 b	1.35 B
Ortalama	1.69 C	1.87 B	1.07 D	0.99 D	1.62 C	2.04 A	
Karotenoid İçeriği (mg g ⁻¹ YA)							
Kontrol	0.62 a	0.70 a	0.46 a	0.45 a	0.49	0.77 a	0.58 A
Cd	0.45 b	0.40 d	0.26 b	0.19 b	0.42	0.54 b	0.38 B
Si ₁ + Cd	0.42 c	0.52 b	0.27 b	0.19 b	0.36	0.50 b	0.38 B
Si ₂ + Cd	0.38 d	0.46 c	0.17 c	0.27 b	0.39	0.55 b	0.37 B
Ortalama	0.47 C	0.52 B	0.29 E	0.28 E	0.42 D	0.59 A	

[#]: Her bitki için aynı sütunda farklı harf ile gösterilen uygulamaların ortalamaları (*n* = 3) arasındaki farklar önemlidir.

Cd toksisitesinin türlerin klorofil *a+b* içeriğine etkisi kontrole göre ayrılmış ve türlerin klorofil *a+b* içeriklerinde önemli azalmalar belirlenmiştir (Tablo 20). Bu azalmaların domatestte %24.3, biberde %35.9, patlıcanda %44.1, patatestte %58.8, tütünde %12.6 ve altınçilekte %21.1 seviyesinde olduğu saptanmıştır (Tablo 20). Bununla birlikte, Cd uygulamasına kıyasla Si₁+Cd uygulaması ile domatestte %6.1, tütünde %3.1 ve altınçilekte %5.7 seviyesindeki azalmalar ile patlıcanda %9.5 düzeyinde ve patatestte %6.1 seviyesindeki artışlar önemli bulunmazken biberde %24.3 seviyesindeki artış önemli bulunmuştur (Tablo 20). Cd uygulamasına göre Si₂+Cd uygulamasında ise, tütün ve altınçilek hariç diğer türlerin

klorofil $a+b$ içeriklerinde önemli değişimler bulunmuş ve bu değişimler domatestede %16.4 ve patlıcanda %38.9 düzeyinde azalma ile biberde %12.5 ve patatestede %48.5 düzeyinde artış olarak tespit edilmiştir. Cd uygulamasına göre Si_2+Cd uygulaması ile altınçileğin klorofil $a+b$ içeriğinde bir değişme olmazken tütünde %5.6 düzeyindeki azalma önemli bulunmamıştır (Tablo 20).

Uygulamaların ortalaması olarak en fazla karotenoid içeriğine sahip tür altınçilek (0.59 mg g^{-1} YA) ve en az karotenoid içeriğine sahip tür ise patates (0.28 mg g^{-1} YA) olarak belirlenmiştir (Tablo 20). Patlıcan ve patates arasındaki fark hariç diğer türlerin ortalama karotenoid içerikleri arasındaki farklar önemli bulunmuştur. Türlerin ortalaması olarak kontrol koşullarında 0.58 mg g^{-1} YA olan karotenoid içeriği Cd uygulanan koşullarda %34.5 azalarak 0.38 mg g^{-1} YA bulunmuştur. Cd uygulamasına göre Si_1+Cd uygulaması (0.38 mg g^{-1} YA) ile önemli değişme olmazken Si_2+Cd uygulaması (0.37 mg g^{-1} YA) ile %2.6 düzeyindeki azalma önemli olarak saptanmamıştır (Tablo 20).

Kontrole göre Cd toksisitesinin türlerin karotenoid içeriklerine etkisi farklı olmuş ve tütün hariç diğer türlerin karotenoid içeriklerinde önemli azalmalar belirlenmiştir (Tablo 20). Bu azalmaların domatestede %27.4, biberde %42.9, patlıcanda %43.5, patatestede %57.8, tütünde %14.3 ve altınçilekte %29.9 olduğu saptanmıştır. Tütünün karotenoid içeriğinde kontrole göre uygulamalarla meydana gelen değişimler istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır (Tablo 20). Bununla birlikte, Cd uygulamasına kıyasla Si_1+Cd uygulaması ile domatestede %6.7 düzeyindeki azalma ve biberde %30.0 seviyesindeki artış önemli bulunurken diğer türlerin karotenoid içeriklerinde önemli bir değişme saptanmamıştır (Tablo 20). Cd uygulamasına göre Si_2+Cd uygulaması ile domatestede %15.6 düzeyinde ve patlıcanda %34.6 düzeyindeki azalmalar ile biberde %15.0 seviyesindeki artış önemli bulunurken diğer türlerin karotenoid içeriklerinde önemli bir değişme tespit edilmemiştir (Tablo 20).

Toksik düzeyde Cd klorofil biyosentezinde görev yapan protoklorofil redüktaz ile aminolevulinik asit sentezini engelleyerek klorofil sentezinin azalmasına neden olmaktadır (Zengin ve Munzuroğlu, 2005). Maş fasulyesinde (Somashekaraiah vd., 2006) ve bezelyede (Sandalio vd., 2001) Cd'un klorofil sentezini bozduğu, Si uygulamasının ise fotosentetik parametlerde Cd'dan dolayı meydana gelen hasarın giderilmesini sağladığını ve ayrıca kloruzu azalttığı tespit edilmiştir (Feng vd., 2010). Vatehová vd. (2012) *Brassica* türlerinde,

Lu vd. (2018) tütünde, Guo vd. (2017) çeltik fidelerinde ve Farooq vd. (2013) pamukta klorofil ve karotenoid miktarını, Wang vd. (2014) çeltik fidelerinde klorofil *a* içeriğini, Farooq vd. (2016) ve Nwugo ve Huerta (2008) çeltikte fotosentezi, Feng vd. (2010) hiyarda, Dorneles vd. (2019) patatest ve Rizwan vd. (2015) makarnalık buğdayda fotosentetik pigmentleri, Rahman vd. (2020) kışlık buğdayda, Vaculík vd. (2015) ve Mihaličová Malčovská vd. (2014) mısırdaki klorofil içeriği ve fotosistem II verimliliğini Cd uygulamasının azalttığı ancak Si ilavesinin arttırdığını rapor etmişlerdir. Buna karşılık, Lukačová vd. (2013) Cd uygulanmış mısırın klorofil ve karotenoid içeriğine Si'un önemli bir etki etmediğini açıklamışlardır. Naeem vd. (2018) ve Shi vd. (2018) buğdayda sadece Si uygulamasının klorofil içeriğini ve fotosentezi arttırdığını belirlemişlerdir.

4.10. Bitkilerin N ve Ham Protein Konsantrasyonlarına Uygulamaların Etkisi

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde N ve ham protein konsantrasyonları üzerine Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analiz sonuçları Tablo 21' de ve gövde N ve ham protein konsantrasyonlarına ait ortalamalar ise Tablo 22'de toplu olarak verilmiştir. Tablo 21 ve Tablo 22 birlikte değerlendirildiğinde; *Solanaceae* familyası bitkilerinde Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının gövde N ve ham protein konsantrasyonları üzerine türlerin, uygulamaların ve tür x uygulama interaksyonunun etkileri ($p \leq 0.001$) önemli bulunmuştur.

Tablo 21

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde N ve ham protein konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Gövde N Konsantrasyonu		Gövde Ham Protein Konsantrasyonu	
		Kareler Toplamı	F Değeri	Kareler Toplamı	F Değeri
Genel	71	1036.96	-	40506.38	-
Tür (T)	5	514.98	136.77***	20116.39	136.77***
Uygulama (U)	3	33.62	14.88***	1313.13	14.88***
T x U İnteraksiyonu	15	452.22	40.03***	17664.87	40.03***
Hata	48	36.15	-	1411.99	-

Uygulamalar birlikte değerlendirildiğinde, en fazla gövde N konsantrasyonuna sahip tür patates (37.64 mg g^{-1}) ve en az gövde N konsantrasyonuna sahip tür ise biber (29.20 mg g^{-1})

olarak belirlenmiştir (Tablo 22). Türlerin ortalaması olarak kontrol koşullarında 34.09 mg g^{-1} olan gövde N konsantrasyonu Cd uygulanan koşullarda %3.4 azalarak 32.92 mg g^{-1} bulunmuştur. Cd uygulamasına kıyasla türlerin gövde N konsantrasyonunda $\text{Si}_1 + \text{Cd}$ uygulamasında %1.1 düzeyindeki azalma önemli bulunmazken, $\text{Si}_2 + \text{Cd}$ uygulamasında ise %1.9 düzeyindeki azalma önemli olarak saptanmıştır (Tablo 22).

Tablo 22

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde N ve ham protein konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.

Uygulama	Domates	Biber	Patlıcan	Patates	Tütün	Altınçilek	Ortalama
Gövde N Konsantrasyonu (mg g^{-1})							
Kontrol	31.93 b [#]	35.66 a	27.15 b	43.09 a	30.98	35.71	34.09 A
Cd	32.37 b	26.95 bc	36.06 a	37.88 b	30.45	33.81	32.92 B
$\text{Si}_1 + \text{Cd}$	33.34 a	27.95 b	35.69 a	34.48 c	30.23	33.79	32.57 BC
$\text{Si}_2 + \text{Cd}$	31.80 b	26.22 c	34.67 a	35.16 c	31.84	34.07	32.29 C
Ortalama	32.36 D	29.20 F	33.39 C	37.64 A	30.87 E	34.34 B	
Gövde Ham Protein Konsantrasyonu (mg g^{-1})							
Kontrol	199.5 b	222.9 a	169.7 b	269.3 a	193.6	223.2	213.0 A
Cd	202.3 b	168.5 bc	225.4 a	236.7 b	190.3	211.3	205.7 B
$\text{Si}_1 + \text{Cd}$	208.4 a	174.7 b	223.4 a	215.3 c	188.9	211.2	203.6 BC
$\text{Si}_2 + \text{Cd}$	198.7 b	163.9 c	216.7 a	219.7 c	199.0	213.0	201.8 C
Ortalama	202.2 D	182.5 F	208.7 C	235.3 A	193.0 E	214.6 B	

[#]: Her bitki için aynı sütunda farklı harf ile gösterilen uygulamaların ortalamaları ($n = 3$) arasındaki farklar önemlidir.

Cd toksisitesinin türlerin gövde N konsantrasyonlarına etkisi kontrole göre farklı olmuş ve domateste %1.4 düzeyindeki artış ile tütün ve altınçilekteki azalmalar önemsiz bulunmuştur (Tablo 22). Buna karşın, biberde %24.4 düzeyinde ve patateste %12.1 düzeyindeki azalmalar ile patlıcanda %32.8 seviyesindeki artış önemli olarak saptanmıştır (Tablo 22). Cd uygulamasına kıyasla türlerin gövde N konsantrasyonlarında $\text{Si}_1 + \text{Cd}$ uygulaması ile domateste %3.0 seviyesindeki artış önemli bulunurken, biberde %3.7 seviyesindeki artış önemli bulunmamıştır. Buna ek olarak, patateste %9.0 düzeyindeki azalma önemli iken patlıcanda %1.0 düzeyindeki azalma önemsiz olarak bulunmuştur (Tablo 22). Cd uygulamasına kıyasla $\text{Si}_2 + \text{Cd}$ uygulaması ile patates, tütün ve altınçilek hariç diğer türlerin gövde N konsantrasyonlarında önemli olmayan azalmalar belirlenmiş ve bu azalmalar

domateste %1.8, biberde %2.7, patlıcanda %3.9, düzeyinde gerçekleşmiştir. Cd uygulamasına kıyasla Si₂+Cd uygulaması ile patateste %7.2 seviyesindeki azalma ise önemli olarak saptanmıştır (Tablo 22). Tütün ve altınileğın gövde N konsantrasyonlarında kontrole göre uygulamalarla meydana gelen değişimler istatistiksel olarak önemsiz tespit edilmiştir (Tablo 22).

Uygulamaların ortalaması olarak en fazla gövde ham protein konsantrasyonuna sahip tür patates (235.3 mg g⁻¹) ve en az gövde ham protein konsantrasyonuna sahip tür ise biber (182.5 mg g⁻¹) olarak belirlenmiştir (Tablo 22). Türlerin ortalaması olarak kontrol koşullarında 213.0 mg g⁻¹ olan gövde ham protein konsantrasyonu Cd uygulanan koşullarda %3.4 azalarak 205.7 mg g⁻¹ bulunmuştur. Cd uygulamasına kıyasla türlerin gövde ham protein konsantrasyonunda Si₁+Cd uygulaması (203.6) ile %1.0 düzeyindeki azalma önemli bulunmazken, Si₂+Cd uygulaması (201.8) ile %1.9 düzeyindeki azalma önemli olarak saptanmıştır (Tablo 22).

Cd toksisitesinin türlerin gövde ham protein konsantrasyonlarına etkisi kontrole göre ayrımlı olmuş ve domateste %1.4 düzeyindeki artış ile tütün ve altınilekteki azalmalar önemli bulunmamıştır (Tablo 22). Buna karşılık, biberde %24.4 düzeyinde ve patateste %12.1 düzeyindeki azalmalar ile patlıcanda %32.8 seviyesindeki artış önemli olarak saptanmıştır (Tablo 22). Cd uygulamasına kıyasla türlerin gövde ham protein konsantrasyonlarında Si₁+Cd uygulaması ile domateste %3.0 seviyesindeki artış önemli bulunurken, biberde %3.7 seviyesindeki artış önemli bulunmamıştır. Buna ek olarak, patateste %9.0 düzeyindeki azalma önemli iken patlıcanda %0.9 düzeyindeki azalma önemsiz olarak belirlenmiştir (Tablo 22). Cd uygulamasına kıyasla Si₂+Cd uygulaması ile patates, tütün ve altınçilek hariç diğer türlerin gövde ham protein konsantrasyonlarında önemli olmayan azalmalar belirlenmiş ve bu azalmalar domateste %1.8, biberde %2.7, patlıcanda %3.9, düzeyinde gerçekleşmiştir. Cd uygulamasına kıyasla Si₂+Cd uygulaması ile patateste %7.2 seviyesindeki azalma ise önemli olarak tespit edilmiştir (Tablo 22). Tütün ve altınileğın gövde N konsantrasyonlarında kontrole göre uygulamalarla meydana gelen değişimler istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır (Tablo 22).

Bitkiler tarafından kolayca alınan ve bitki bünyesinde biriktirilen Cd, protein sentezi, N ve karbonhidrat metabolizması gibi birçok metabolik aktivitenin bozulmasına neden olmaktadır (Asri vd., 2007). Cd'un kök bölgesinde nitrat (NO₃⁻) redüktaz aktivitesini

engelleyerek yaklaşık %70 oranında nitratın absorpsiyonunu azalttığı rapor edilmiştir (Van Assche ve Clijsters, 1990). Si'un N ile sinergistik etkisinden dolayı bitkide optimum N seviyesini artırarak verimi artıracakı bildirilmiştir (Ho vd., 1980). Ancak toprağa yüksek düzeyde Si ilavesinin N verimliliğini azalttığı da belirlenmiştir (Deren, 1997). Farklı bitkilerle yapılan çalışmalarda da araştırma bulgularımıza benzer sonuçlar çeşitli araştırmacılar tarafından ortaya atılmıştır. Doğan (2018), çilekte Cd uygulamasının bitki N içeriğini azalttığını ancak Si uygulamasının bu durumu iyileştirdiğini belirtmiştir. Rahman vd. (2017) tarla bezelyesinde Si'un uygulamasının Cd stresindeki bitkilerin toplam protein içeriklerini belirgin şekilde artırdığını, Zaheer vd. (2017) Cd stresi altında yetişen glayöl soğanlarında K ve Si uygulamalarının protein ve prolin üretimini artırdığını ifade etmişlerdir. Nwugo ve Huerta (2011) ise çeltikte Cd ve Si uygulamaları nedeniyle farklı şekilde düzenlenmiş 60 protein tanımlandığı ve fotosentez, redoks homeostazi, regülasyon/protein sentezi, patojen tepkisi ve şaperon (refakatçı protein) aktivitesi ile ilişkili proteinler de dahil olmak üzere 50 tanesinin Si tarafından önemli ölçüde düzeltildiğini rapor etmiştir.

4.11. Bitkilerin P Konsantrasyonlarına Uygulamaların Etkisi

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde ve kök P konsantrasyonları üzerine Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analiz sonuçları Tablo 23' de ve gövde ve kök P konsantrasyonlarına ait ortalamalar ise Tablo 24'de toplu olarak verilmiştir. Tablo 23 ve Tablo 24 birlikte değerlendirildiğinde; *Solanaceae* familyası bitkilerinde Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının gövde ve kök P konsantrasyonları üzerine türlerin, uygulamaların ve tür x uygulama interaksyonunun etkileri %0.1 seviyesinde önemli bulunmuştur.

Uygulamalar birlikte değerlendirildiğinde, en fazla gövde P konsantrasyonuna sahip tür patates (4.28 mg g^{-1}) ve en az gövde P konsantrasyonuna sahip tür ise tütün (1.94 mg g^{-1}) olarak belirlenmiştir (Tablo 24). Türlerin ortalaması olarak kontrol koşullarında 2.55 mg g^{-1} olan gövde P konsantrasyonu Cd uygulanan koşullarda %22.7 artarak 3.13 mg g^{-1} bulunmuştur. Cd uygulamasına kıyasla türlerin gövde P konsantrasyonunda Si_1+Cd uygulamasında %3.8 düzeyinde artış ve Si_2+Cd uygulamasında ise %2.9 düzeyindeki azalma önemli olarak saptanmıştır (Tablo 24).

Tablo 23

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde ve kök P konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Gövde P Konsantrasyonu		Kök P Konsantrasyonu	
		Kareler Toplamı	F Değeri	Kareler Toplamı	F Değeri
Genel	71	85.39	-	339.31	-
Tür (T)	5	58.56	650.73***	228.51	842.77***
Uygulama (U)	3	5.07	93.85***	47.44	291.59***
T x U İnteraksiyonu	15	20.90	77.42***	60.76	74.70***
Hata	48	0.86	-	2.60	-

Cd toksisitesinin türlerin gövde P konsantrasyonlarına etkisi kontrole göre farklı olmuş, domates ve patates hariç diğer türlerin gövde P konsantrasyonlarında önemli artışlar belirlenmiştir (Tablo 24). Bu artışların biberde %10.3, tütünde %74.3 ve altınçilekte %17.3 seviyesinde iken patlıcanda 2.1 kat olduğu saptanmıştır. Domateste %0.7 düzeyinde ve patateste %19.9 düzeyinde saptanan azalmalar istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır (Tablo 24). Bununla birlikte, Cd uygulamasına kıyasla Si₁+Cd uygulaması ile patates ve tütün hariç diğer türlerin gövde P konsantrasyonlarında önemli artışlar belirlenmiş ve bu artışlar domateste %8.1, biberde %12.1, patlıcanda %21.7 ve altınçilekte %27.4 düzeyinde gerçekleşmiştir. Cd uygulamasına kıyasla Si₁+Cd uygulaması ile patateste %12.8 ve tütünde %28.7 seviyesindeki azalmalar ise önemli bulunmuştur (Tablo 24). Cd uygulamasına kıyasla Si₂+Cd uygulaması ile patlıcan, patates ve tütün hariç diğer türlerin gövde P konsantrasyonlarında önemli artışlar belirlenmiş ve bu artışlar domateste %9.9, biberde %12.9, patlıcanda %3.0 ve altınçilekte %20.5 düzeyinde gerçekleşmiştir. Cd uygulamasına kıyasla Si₂+Cd uygulaması ile patateste %25.4 ve tütünde %19.1 düzeyindeki azalmalar ise önemli olarak tespit edilmiştir (Tablo 24).

Uygulamaların ortalaması olarak en fazla kök P konsantrasyonuna sahip tür patates (6.52 mg g⁻¹) ve en az kök P konsantrasyonuna sahip tür ise domates (1.71 mg g⁻¹) olarak belirlenmiştir (Tablo 24). Altınçilek ve tütün hariç diğer türlerin ortalama kök P konsantrasyonları arasındaki farklar önemli bulunmuştur. Türlerin ortalaması olarak kontrol koşullarında 2.47 mg g⁻¹ olan kök P konsantrasyonu Cd uygulanan koşullarda %68.4 artarak 4.16 mg g⁻¹ bulunmuştur. Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulaması (4.39 mg g⁻¹) ile %5.5

düzeyindeki ve Si₂+Cd uygulaması (4.42 mg g⁻¹) ile %6.3 düzeyindeki artışlar önemli olarak saptanmıştır (Tablo 24).

Kontrole göre Cd toksisitesinin türlerin kök P konsantrasyonlarına etkisi ayrımlı olmuş, domates hariç diğer türlerin kök P konsantrasyonlarında önemli artışlar belirlenmiştir (Tablo 24). Bu artışların domateste %5.6, biberde %40.6, patateste %48.6 seviyesinde iken patlıcanda 2.9 kat, tütünde 2.1 kat ve altınçilekte 2.1 kat düzeyinde olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte, Si₁+Cd uygulaması ile domateste %29.3, biberde %9.9 ve patlıcanda %9.0 düzeyindeki artışlar önemli bulunurken diğer türlerin kök P konsantrasyonlarındaki değişimler önemli bulunmamıştır (Tablo 24). Cd uygulamasına kıyasla Si₂+Cd uygulamasında ise, patates hariç diğer türlerin kök P konsantrasyonlarında önemli artışlar belirlenmiştir. Bu artışların domateste %32.7, biberde %21.7, patlıcanda %32.6, tütünde %44.4 ve altınçilekte %61.6 düzeyinde olduğu saptanmıştır. Patateste ise %49.2 seviyesindeki azalma önemli olarak tespit edilmiştir (Tablo 24).

Tablo 24

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde ve kök P konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.

Uygulama	Domates	Biber	Patlıcan	Patates	Tütün	Altınçilek	Ortalama
Gövde P Konsantrasyonu (mg g⁻¹)							
Kontrol	2.85 b [#]	2.32 c	2.05 c	5.03 a	1.44 c	1.62 c	2.55 D
Cd	2.83 b	2.56 b	4.37 b	4.61 a	2.51 a	1.90 b	3.13 B
Si ₁ + Cd	3.06 a	2.87 a	5.32 a	4.02 b	1.79 b	2.42 a	3.25 A
Si ₂ + Cd	3.11 a	2.89 a	4.50 b	3.44 c	2.03 b	2.29 a	3.04 C
Ortalama	2.96 C	2.66 D	4.06 B	4.28 A	1.94 F	2.06 E	
Kök P Konsantrasyonu (mg g⁻¹)							
Kontrol	1.42 b	3.67 d	1.87 d	5.54 b	1.17 c	1.12 c	2.47 C
Cd	1.50 b	5.16 c	5.34 c	8.23 a	2.43 b	2.32 b	4.16 B
Si ₁ + Cd	1.94 a	5.67 b	5.82 b	8.13 a	2.40 b	2.39 b	4.39 A
Si ₂ + Cd	1.99 a	6.28 a	6.84 a	4.18 c	3.51 a	3.75 a	4.42 A
Ortalama	1.71 E	5.20 B	4.97 C	6.52 A	2.38 D	2.39 D	

[#]: Her bitki için aynı sütunda farklı harf ile gösterilen uygulamaların ortalamaları (n = 3) arasındaki farklar önemlidir.

Farklı türlerde yapılan önceki çalışmalarda da Cd stresinin etkisiyle bitkinin kök ve yapraklarında P içeriğinin azaldığı bildirilmiştir (Sanita diToppi ve Gabbrielli, 1999; Anjum

vd., 2008; Muradoğlu vd., 2015). Topraklarda P noksanlığı tüm dünyada yaygın bir problemdir (Ma, 2004). Si doğrudan olarak P alımını etkilememektedir (Ma ve Takahashi, 1989). Si toprakta Fe ve Mn ile kompleks oluşturarak P konsantrasyonunu önemli derecede azaltmakta ve böylece P'un bitki tarafından alımını teşvik ederek bitkideki konsantrasyonunu (özellikle sap ve başakta) arttırmaktadır (Nagaoka, 1998). Farouk vd. (2011), Cd uygulamasının turp bitkisinin P içeriğinin azaldığı tespit edilmiştir. Acir ve Erdem (2020) biokömür uygulanmış toprakta yetişen ekmeklik buğdayda Cd uygulamalarının P konsantrasyonunu arttırdığını ve Özkutlu (2021) brokolide tuz ve Cd uygulamalarının bitkide yeşil aksam P konsantrasyonunu değiştirmedığını saptamışlardır. Doğan (2018), Cd uygulamasının çileğin P konsantrasyonunu azalttığını ancak Si uygulamasının arttırdığını ifade etmiştir.

4.12. Bitkilerin K Konsantrasyonlarına Uygulamaların Etkisi

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde ve kök K konsantrasyonları üzerine Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analiz sonuçları Tablo 25' de ve gövde ve kök K konsantrasyonlarına ait ortalamalar ise Tablo 26'da toplu olarak verilmiştir. Tablo 25 ve Tablo 26 birlikte değerlendirildiğinde; *Solanaceae* familyası bitkilerinde Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının gövde ve kök K konsantrasyonları üzerine türlerin, uygulamaların ve tür x uygulama interaksyonunun etkileri ($p \leq 0.001$) önemli olarak tespit edilmiştir.

Tablo 25

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde ve kök K konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Gövde K Konsantrasyonu		Kök K Konsantrasyonu	
		Kareler Toplamı	F Değeri	Kareler Toplamı	F Değeri
Genel	71	9314.35	-	5084.64	-
Tür (T)	5	7054.10	151.11***	2395.59	49.00***
Uygulama (U)	3	225.43	8.05***	991.59	33.81***
T x U İnteraksiyonu	15	1586.66	11.33***	1228.15	8.37***
Hata	48	448.16	-	469.31	-

Uygulamalar birlikte değerlendirildiğinde, en fazla gövde K konsantrasyonuna sahip tür patates (70.55 mg g^{-1}) ve en az gövde K konsantrasyonuna sahip tür ise tütün (40.91 mg g^{-1}) olarak belirlenmiştir (Tablo 26). Patates, tütün ve altınçilek hariç diğer türlerin ortalama gövde K konsantrasyonları arasındaki farklar önemli bulunmamıştır. Türlerin ortalaması olarak kontrol koşullarında 49.69 mg g^{-1} olan gövde K konsantrasyonu Cd uygulanan koşullarda %1.5 artarak 50.42 mg g^{-1} bulunmuştur. Cd uygulamasına kıyasla türlerin gövde K konsantrasyonlarında $\text{Si}_1 + \text{Cd}$ uygulamasında %2.5 düzeyindeki artış önemli bulunmazken, $\text{Si}_2 + \text{Cd}$ uygulamasında ise %7.8 düzeyindeki artış önemli olarak saptanmıştır (Tablo 26).

Tablo 26

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde ve kök K konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.

Uygulama	Domates	Biber	Patlıcan	Patates	Tütün	Altınçilek	Ortalama
Gövde K Konsantrasyonu (mg g^{-1})							
Kontrol	45.92 b [#]	55.32 a	35.36 c	76.72	34.32 b	50.52 c	49.69 B
Cd	44.96 b	39.48 c	46.96 b	70.08	43.92 a	57.12 b	50.42 B
$\text{Si}_1 + \text{Cd}$	46.28 b	43.08 bc	54.60 a	66.28	41.04 a	58.80 b	51.68 B
$\text{Si}_2 + \text{Cd}$	53.32 a	45.84 b	48.48 b	69.12	44.36 a	64.92a	54.34 A
Ortalama	47.62 C	45.93 C	46.35 C	70.55 A	40.91 D	57.84 B	
Kök K Konsantrasyonu (mg g^{-1})							
Kontrol	4.60 b	4.00 d	15.95 b	10.20	7.81 d	5.64 d	8.03 C
Cd	2.87 c	24.77 c	11.81 c	9.12	13.10 b	6.88 c	11.43 B
$\text{Si}_1 + \text{Cd}$	4.11 b	33.94 a	16.57 b	15.96	11.23 c	12.37 b	15.70 A
$\text{Si}_2 + \text{Cd}$	8.63 a	32.39 b	19.71 a	14.34	15.97 a	14.33 a	17.56 A
Ortalama	5.05 E	23.78 A	16.01 B	12.41 C	12.03 CD	9.80 D	

[#]: Her bitki için aynı sütunda farklı harf ile gösterilen uygulamaların ortalamaları ($n = 3$) arasındaki farklar önemlidir.

Kontrole göre Cd toksisitesinin türlerin gövde K konsantrasyonuna etkisi ayrımlı olmuş, domatestede %2.1 düzeyindeki azalma önemsiz bulunurken, biberde %28.6 seviyesinde azalma önemli olarak belirlenmiştir (Tablo 26). Patlıcanda %32.8, tütünde %28.0 ve altınçilekte %13.1 seviyesindeki artışlar önemli olarak tespit edilirken patatesin gövde K konsantrasyonunda kontrole göre uygulamalarla meydana gelen değişimler önemsiz olarak saptanmıştır (Tablo 26). Bununla birlikte, Cd uygulamasına kıyasla $\text{Si}_1 + \text{Cd}$ uygulaması ile patlıcanda %16.3 seviyesinde artış önemli bulunurken diğer türlerin gövde K konsantrasyonunda belirlenen değişimler önemli bulunmamıştır (Tablo 26). Cd uygulamasına göre $\text{Si}_2 + \text{Cd}$ uygulamasında ise, patlıcan ve tütün hariç diğer türlerin gövde K konsantrasyonlarında

önemli artışlar bulunmuş ve bu artışlar domatesteste %18.6, biberde %16.1, patlıcanda %3.2, tütünde %1.0 ve altınçilekte %13.7 düzeyinde olduğu belirlenmiştir (Tablo 26).

Uygulamaların ortalaması olarak en fazla kök K konsantrasyonuna sahip tür biber (23.78 mg g⁻¹) ve en az kök K konsantrasyonuna sahip tür ise domates (5.05 mg g⁻¹) olarak belirlenmiştir (Tablo 26). Türlerin ortalaması olarak kontrol koşullarında 8.03 mg g⁻¹ olan kök K konsantrasyonu Cd uygulanan koşullarda %42.3 artarak 11.43 mg g⁻¹ bulunmuştur. Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulaması (15.70 mg g⁻¹) ile %37.4 düzeyinde ve Si₂+Cd uygulaması (17.56 mg g⁻¹) ile %53.6 düzeyinde artışlar önemli olarak saptanmıştır (Tablo 26).

Cd toksisitesinin türlerin kök K konsantrasyonlarına etkisi kontrole göre farklı olmuş domates, patlıcan ve patates hariç diğer türlerin kök K konsantrasyonlarında önemli artışlar belirlenmiştir (Tablo 26). Bu artışların tütünde %67.7 ve altınçilekte %22.0 düzeyinde iken biberde 6.2 kat olduğu saptanmıştır. Domatesteste ise %37.6 düzeyinde ve patlıcanda %26.0 düzeyinde azalmalar önemli bulunurken, patatesin kök K konsantrasyonunda kontrole göre uygulamalarla meydana gelen değişimler istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır (Tablo 26). Bununla birlikte, Cd uygulamasına kıyasla Si₁+Cd uygulaması ile tütün ve patates hariç diğer türlerin kök K konsantrasyonlarında önemli artışlar tespit edilmiştir (Tablo 26). Bu artışların domatesteste %43.2, biberde %37.0, patlıcanda %40.3, patatesteste %75.0 ve altınçilekte %79.8 seviyesinde olduğu saptanmıştır. Tütünde ise %14.3 düzeyinde azalma önemli bulunmuştur (Tablo 26). Cd uygulamasına göre Si₂+Cd uygulaması ile patates hariç diğer türlerin kök K konsantrasyonlarında önemli artışlar tespit edilmiştir. Bu artışların biberde %30.8, patlıcanda %66.9, patatesteste %57.2, tütünde %21.9 seviyesinde iken domatesteste 3.0 kat ve altınçilekte 2.1 kat düzeyinde olduğu saptanmıştır (Tablo 26).

Çeşitli türlerle yapılan önceki çalışmalarda da Cd stresinin etkisiyle bitkinin kök ve yapraklarında K kapsamının azaldığı bildirilmiştir (Sanita diToppi ve Gabbrielli, 1999; Anjum vd., 2008; Muradoğlu vd., 2015). Si'lu gübre olarak K₂SiO₃ kullanımı, bitkilerin K içeriğini arttırabilmektedir. Sandalio vd. (2001) bezelye filizlerinde ve Farouk vd. (2011) turpta K içeriğinin Cd uygulamasıyla azaldığını ifade etmişlerdir. Çıkılı vd. (2016) altınçilek gövdesinde K iyonu akümülyasyonunun Cd uygulamalarıyla artarken, biberde K iyonu akümülyasyonunun azaldığını, Özkutlu (2021) brokolide tuz ve Cd uygulamalarının, Obamate ve Umebayashi (2008) barbunya ve bezelyede ve Koç vd. (2013) ise biberde Cd

uygulamasının K konsantrasyonunu azalttığını rapor etmişlerdir. Doğan (2018), çilekte Cd uygulamasının K konsantrasyonunu azalttığını ancak Si uygulamasının arttırdığını ve Alzahrani vd. (2018) buğdayda Si uygulamalarının K içeriğini arttırdığını belirtmişlerdir. Zaheer vd. (2017) glayöl soğanlarında K ve Si uygulamalarının K alımını artırdığını, Gerami ve Rameeh (2012) ise çeltikte Si uygulamasının sap K seviyesini arttırdığını ve artan Si ile K içeriğinin pozitif yönde etkilediğini bildirmişlerdir.

4.13. Bitkilerin Ca Konsantrasyonlarına Uygulamaların Etkisi

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde ve kök Ca konsantrasyonları üzerine Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analiz sonuçları Tablo 27’ de ve gövde ve kök Ca konsantrasyonlarına ait ortalamalar ise Tablo 28’de toplu olarak verilmiştir. Tablo 27 ve Tablo 28 birlikte değerlendirildiğinde; *Solanaceae* familyası bitkilerinde Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının gövde ve kök Ca konsantrasyonları üzerine türlerin, uygulamaların ve tür x uygulama interaksyonunun etkileri %0.1 seviyesinde önemli olarak belirlenmiştir.

Tablo 27

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde ve kök Ca konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Gövde Ca Konsantrasyonu		Kök Ca Konsantrasyonu	
		Kareler Toplamı	F Değeri	Kareler Toplamı	F Değeri
Genel	71	841.30	-	1023.84	-
Tür (T)	5	660.72	1089.75***	343.15	117.45***
Uygulama (U)	3	36.66	100.77***	49.58	28.28***
T x U İnteraksiyonu	15	138.10	75.92***	603.07	68.81***
Hata	48	5.82	-	28.05	-

Uygulamalar birlikte değerlendirildiğinde, en fazla gövde Ca konsantrasyonuna sahip tür domates (11.51 mg g^{-1}) ve en az gövde Ca konsantrasyonuna sahip tür ise patlıcan (4.11 mg g^{-1}) olarak belirlenmiştir (Tablo 28). Biber ve patlıcan hariç diğer türlerin ortalama gövde Ca konsantrasyonları arasındaki farklar önemli bulunmuştur. Türlerin ortalaması olarak kontrol koşullarında 8.22 mg g^{-1} olan gövde Ca konsantrasyonu Cd uygulanan koşullarda %17.8 azalarak 6.76 mg g^{-1} bulunmuştur. Cd uygulamasına göre türlerin gövde

Ca konsantrasyonunda Si₁+Cd uygulamasında %6.5 düzeyinde azalma önemli iken Si₂+Cd uygulamasında %0.3 düzeyindeki artış önemli olarak saptanmamıştır (Tablo 28).

Cd toksisitesinin türlerin gövde Ca konsantrasyonlarına etkisi kontrole göre ayrımlı olmuş ve türlerin gövde Ca konsantrasyonlarında önemli değişimler belirlenmiştir (Tablo 28). Kontrole göre Cd uygulaması ile biberde %14.2, patlıcanda %75.7 ve patateste %42.8 seviyesinde önemli azalmalar tespit edilirken tütünde %17.0 düzeyindeki artış önemli olarak saptanmıştır. Domateste ve altınçilekte kontrole göre uygulamalarla meydana gelen değişimler ise istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır (Tablo 28). Bununla birlikte, Cd uygulamasına kıyasla Si₁+Cd uygulaması ile patates ve tütün hariç diğer türlerin gövde Ca konsantrasyonlarında önemli azalmalar belirlenmiş ve bu azalmalar domateste %1.0, biberde %20.7, patlıcanda %35.4, patateste %14.1 ve altınçilekte %6.9 düzeyinde gerçekleşmiştir. Cd uygulamasına kıyasla Si₁+Cd uygulaması ile tütünde %2.9 seviyesindeki artış ise önemli bulunmamıştır (Tablo 28). Cd uygulamasına kıyasla Si₂+Cd uygulaması ile patlıcanda %18.1 düzeyinde ve tütünde %6.8 düzeyinde belirlenen artışlar önemli bulunmazken patateste %26.2 düzeyindeki artış önemli bulunmuştur. Biberde ise %30.4 seviyesinde azalma önemli olarak tespit edilmiştir (Tablo 28).

Tablo 28

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde ve kök Ca konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.

Uygulama	Domates	Biber	Patlıcan	Patates	Tütün	Altınçilek	Ortalama
Gövde Ca Konsantrasyonu (mg g⁻¹)							
Kontrol	11.41	5.36 a [#]	9.76 a	7.55 a	9.39 b	5.83	8.22 A
Cd	11.65	4.60 b	2.37 b	4.32 c	10.99 a	6.67	6.76 B
Si ₁ + Cd	11.53	3.65 c	1.53 c	3.71 c	11.31 a	6.21	6.32 C
Si ₂ + Cd	11.45	3.20 d	2.80 b	5.45 b	11.74 a	6.04	6.78 B
Ortalama	11.51 A	4.20 E	4.11 E	5.26 D	10.86 B	6.19 C	
Kök Ca Konsantrasyonu (mg g⁻¹)							
Kontrol	9.00 c	24.22 a	7.64 d	11.11 b	7.16 c	12.07 c	11.87 A
Cd	9.26 bc	9.71 b	15.39 a	14.36 a	7.67 ab	16.91 a	12.22 A
Si ₁ + Cd	10.15 a	9.14 b	11.59 b	14.03 a	8.04 a	13.47 b	11.07 B
Si ₂ + Cd	9.97 ab	10.37 b	9.62 c	11.15 b	7.26 bc	11.98 c	10.06 C
Ortalama	9.60 D	13.36 A	11.06 C	12.66 B	7.53 E	13.61 A	

[#]: Her bitki için aynı sütunda farklı harf ile gösterilen uygulamaların ortalamaları (n = 3) arasındaki farklar önemlidir.

Uygulamaların ortalaması olarak en fazla kök Ca konsantrasyonuna sahip tür altınçilek (13.61 mg g^{-1}) ve en az kök Ca konsantrasyonuna sahip tür ise tütün (7.53 mg g^{-1}) olarak belirlenmiştir (Tablo 28). Altınçilek ve biber hariç diğer türlerin ortalama kök Ca konsantrasyonları arasındaki farklar önemli bulunmuştur. Türlerin ortalaması olarak kontrol koşullarında 11.87 mg g^{-1} olan kök Ca konsantrasyonu Cd uygulanan koşullarda %2.9 artarak 12.22 mg g^{-1} bulunmuştur. Cd uygulamasına göre Si_1+Cd uygulaması (11.07 mg g^{-1}) ile %9.4 düzeyindeki ve Si_2+Cd uygulaması (10.06 mg g^{-1}) ile %17.7 düzeyindeki azalmalar önemli olarak saptanmıştır (Tablo 28).

Kontrole göre Cd toksisitesinin türlerin kök Ca konsantrasyonlarına etkisi farklı olmuş, domates ve biber hariç diğer türlerin kök Ca konsantrasyonlarında önemli artışlar belirlenmiştir (Tablo 28). Bu artışların domateste %2.9, patateste %29.3, tütünde %7.1 ve altınçilekte %4.1 düzeyinde iken patlıcanda 2.0 kat olduğu saptanmıştır. Biberde ise %59.9 seviyesindeki azalma önemli bulunmuştur (Tablo 28). Bununla birlikte, Cd uygulamasına göre Si_1+Cd uygulaması ile domateste %9.6 düzeyinde artış önemli olarak belirlenirken patlıcanda %24.7 düzeyinde ve altınçilekte %20.3 düzeyindeki azalmalar önemli bulunmuştur. Buna ek olarak, diğer türlerin kök Ca konsantrasyonlarındaki değişimler önemli bulunmamıştır (Tablo 28). Cd uygulamasına kıyasla Si_2+Cd uygulamasında ise, patlıcanda %37.5, patateste %22.4 ve altınçilekte %29.2 düzeyinde azalmalar önemli olarak tespit edilirken tütünde %5.3 seviyesindeki azalma ile domateste %7.7 düzeyinde ve biberde %6.8 düzeyindeki artışlar önemli olarak saptanmamıştır (Tablo 28).

Farklı türlerde yapılan önceki çalışmalarda da Cd stresinin etkisiyle bitkinin kök ve yapraklarında Ca konsantrasyonunun azaldığı bildirilmiştir (Sanita di Toppi ve Gabbrielli, 1999; Anjum vd., 2008; Muradoğlu vd., 2015). Ca ile Si arasında antogonistik ilişki olduğu ve Ca bulunan ortamlarda Si'nin Ca ile CaSiO_3 şeklinde kompleks oluşturduğu bildirilmiştir (Matichenkov ve Bocharnikova, 2001). Düşük Si seviyelerinde Ca alımının arttığı ve buna bağlı olarak mısır bitkisinin gövde uzunluğunun da arttığı bildirilmiştir (Corrales vd., 1997). Zaheer vd. (2017), glayöl soğanlarında K ve Si uygulamalarının Ca alımını artırdığını, Çıkılı vd. (2016) altınçilek gövdesinde Ca iyonu akümülyasyonunun Cd uygulamasıyla arttığını saptamışlardır. Doğan (2018), çilekte Cd uygulamasının Ca konsantrasyonunu azalttığı ancak Si uygulamasının arttırdığını, Sandalio vd. (2001) bezelye filizlerinde ve Koç vd. (2013) biberde Ca konsantrasyonunun Cd uygulamasıyla azaldığını bildirmişlerdir.

4.14. Bitkilerin Mg Konsantrasyonlarına Uygulamaların Etkisi

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde ve kök Mg konsantrasyonları üzerine Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analiz sonuçları Tablo 29’ da ve gövde ve kök Mg konsantrasyonlarına ait ortalamalar ise Tablo 30’da toplu olarak verilmiştir. Tablo 29 ve Tablo 30 birlikte değerlendirildiğinde; *Solanaceae* familyası bitkilerinde Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının gövde ve kök Mg konsantrasyonları üzerine türlerin, uygulamaların ve tür x uygulama interaksyonunun etkileri ($p \leq 0.001$) önemli olarak tespit edilmiştir.

Tablo 29

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde ve kök Mg konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Gövde Mg Konsantrasyonu		Kök Mg Konsantrasyonu	
		Kareler Toplamı	F Değeri	Kareler Toplamı	F Değeri
Genel	71	146.70	-	182.20	-
Tür (T)	5	129.64	659.90***	42.22	46.80***
Uygulama (U)	3	0.86	7.32***	46.19	85.34***
T x U İnteraksiyonu	15	14.31	24.27***	85.13	31.46***
Hata	48	1.89	-	8.66	-

Uygulamalar birlikte değerlendirildiğinde, en fazla gövde Mg konsantrasyonuna sahip tür domates (8.76 mg g^{-1}) ve en az gövde Mg konsantrasyonuna sahip tür ise patlıcan (4.80 mg g^{-1}) olarak belirlenmiştir (Tablo 30). Türlerin ortalaması olarak kontrol koşullarında 7.38 mg g^{-1} olan gövde Mg konsantrasyonu Cd uygulanan koşullarda %1.2 azalarak 7.29 mg g^{-1} bulunmuştur. Cd uygulamasına kıyasla türlerin gövde Mg konsantrasyonunda $\text{Si}_1 + \text{Cd}$ uygulamasında %2.2 düzeyinde ve $\text{Si}_2 + \text{Cd}$ uygulamasında ise %2.3 düzeyindeki azalmalar önemli olarak saptanmıştır (Tablo 30).

Cd toksisitesinin türlerin gövde Mg konsantrasyonlarına etkisi kontrole göre farklı olmuş, domates, biber ve tütün hariç diğer türlerin gövde Mg konsantrasyonlarında önemli azalmalar belirlenmiştir (Tablo 30). Bu azalmaların domateste %4.6, patlıcanda %21.6, patateste %8.7 ve altınçilekte %3.9 seviyesinde olduğu saptanmıştır. Kontrole göre Cd uygulaması ile biberde %20.9 düzeyinde ve tütünde %13.3 düzeyinde saptanan artışlar

önemli bulunmuştur. Domateste kontrole göre uygulamalarla meydana gelen değişimler istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır (Tablo 30). Bununla birlikte, Cd uygulamasına kıyasla türlerin gövde Mg konsantrasyonlarında Si₁+Cd uygulaması ile biberde %7.7, patlıcanda %3.3 ve altınçilekte %9.3 seviyesindeki azalmalar önemli olarak belirlenirken patateste %0.7 ve tütünde %2.1 düzeyindeki artışlar önemli bulunmamıştır (Tablo 30). Cd uygulamasına göre Si₂+Cd uygulaması ile biberde %19.5 düzeyinde ve altınçilekte %8.7 düzeyindeki azalmalar önemli bulunurken patlıcanda %2.4 seviyesinde azalma önemli bulunmamıştır. Patateste ise %11.1 düzeyinde artış önemli olarak belirlenirken tütünde %2.2 düzeyindeki artış önemli bulunmamıştır (Tablo 30).

Tablo 30

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde ve kök Mg konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.

Uygulama	Domates	Biber	Patlıcan	Patates	Tütün	Altınçilek	Ortalama
Gövde Mg Konsantrasyonu (mg g⁻¹)							
Kontrol	8.90	6.02 c [#]	5.80 a	7.43 a	6.86 b	9.24 a	7.38 A
Cd	8.49	7.28 a	4.55 b	6.78 b	7.77 a	8.88 b	7.29 A
Si ₁ + Cd	8.85	6.72 b	4.40 c	6.83 b	7.93 a	8.05 c	7.13 B
Si ₂ + Cd	8.82	5.86 c	4.44 bc	7.53 a	7.94 a	8.11 c	7.12 B
Ortalama	8.76 A	6.47 E	4.80 F	7.14 D	7.62 C	8.57 B	
Kök Mg Konsantrasyonu (mg g⁻¹)							
Kontrol	3.51 c	5.13 d	6.27 a	4.21	2.89 d	3.60 c	4.27 C
Cd	3.27 c	5.84 b	5.02 a	3.92	3.85 c	4.18 c	4.35 C
Si ₁ + Cd	4.19 b	6.78 a	3.37 b	4.19	5.01 b	7.48 b	5.17 B
Si ₂ + Cd	6.33 a	5.55 c	4.88 a	4.57	6.46 a	9.74 a	6.26 A
Ortalama	4.32 D	5.82 B	4.89 C	4.22 D	4.55 CD	6.25 A	

[#]: Her bitki için aynı sütunda farklı harf ile gösterilen uygulamaların ortalamaları (n = 3) arasındaki farklar önemlidir.

Uygulamaların ortalaması olarak en fazla kök Mg konsantrasyonuna sahip tür altınçilek (6.25 mg g⁻¹) ve en az kök Mg konsantrasyonuna sahip tür ise patates (4.22 mg g⁻¹) olarak belirlenmiştir (Tablo 30). Altınçilek ve biber hariç diğer türlerin ortalama kök Mg konsantrasyonları arasındaki farklar önemli bulunmamıştır. Türlerin ortalaması olarak kontrol koşullarında 4.27 mg g⁻¹ olan kök Mg konsantrasyonu Cd uygulanan koşullarda %1.9 artarak 4.35 mg g⁻¹ bulunmuştur. Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulaması (5.17 mg g⁻¹) ile %18.9 düzeyindeki ve Si₂+Cd uygulaması (6.26 mg g⁻¹) ile %43.9 düzeyindeki artışlar önemli olarak tespit edilmiştir (Tablo 30).

Kontrole göre Cd toksisitesinin türlerin kök Mg konsantrasyonlarına etkisi farklı olmuş, domateste %6.8 düzeyinde, patlıcanda %19.9 düzeyinde ve patateste %6.9 düzeyindeki azalmalar ile altınçilekte %16.1 düzeyindeki artış önemli bulunmazken, biberde %13.8 seviyesinde ve tütünde %33.2 seviyesindeki artışlar önemli olarak tespit edilmiştir (Tablo 30). Patateste kontrole göre uygulamalarla meydana gelen değişimler istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır. Si₁+Cd uygulamasının türlerin kök Mg konsantrasyonlarına etkisi Cd uygulamasına göre ayrılmı olmuştur, patlıcan ve patates hariç diğer türlerin kök Mg konsantrasyonlarında önemli artışlar belirlenmiştir (Tablo 30). Bu artışların, domateste %28.1, biberde %16.1, patateste %6.9, tütünde %30.1 ve altınçilekte %78.9 seviyesinde olduğu saptanmıştır. Patlıcanın kök Mg konsantrasyonunda Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulaması ile %32.9 düzeyinde önemli azalma belirlenmiştir (Tablo 30). Cd uygulamasına kıyasla Si₂+Cd uygulamasında ise, domateste %93.6 düzeyinde tütünde %67.8 düzeyinde ve altınçilekte 2.3 kat düzeyindeki artışlar ile biberde %5.0 düzeyindeki azalma önemli olarak tespit edilirken, patlıcanda %2.8 seviyesindeki azalma önemli bulunmamıştır (Tablo 30).

Plazma membranlarının geçirgenliğine etkisinden dolayı besin alımına müdahale edebilen bir ağır metal olan Cd, klorofilin merkezinde bulunan Mg gibi iki değerlikli katyonlar için rekabetçi iyon olarak kabul edilmektedir (Liamas vd., 2000; Roth vd., 2006). Farklı türlerde yapılan önceki çalışmalarda da Cd stresinin etkisiyle bitkinin kök ve yapraklarında Mg düzeyinin azaldığı bildirilmiştir (Sanita di Toppi ve Gabbrielli, 1999; Anjum vd., 2008; Muradoğlu vd., 2015). Koç vd. (2013) biberde, Yang vd. (1996) ise mısır, beyaz yonca ve çavdar otunda Mg alımının ve taşınmasının Cd ile azaltıldığını ifade etmişlerdir. Çıkılı vd. (2016), altınçilek gövdesinde Mg iyonu akümülyasyonunun Cd uygulamasıyla arttığını, Wang vd. (2014) çeltik fidelerinde, Sandalio vd. (2001) bezelye filizlerinde ve Doğan (2018) ise çilekte Cd uygulamasının Mg içeriğini azalttığını ve Si uygulamasının arttırdığını belirlerken, Özkutlu (2021) brokolide tuz ve Cd uygulamalarının Mg konsantrasyonunda önemli bir değişme göstermediğini belirlemişlerdir. Zaheer vd. (2017) ise glayöl soğanlarında K ve Si uygulamalarının Mg alımını arttırdığı bildirmiştir.

4.15. Bitkilerin Na Konsantrasyonlarına Uygulamaların Etkisi

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde ve kök Na konsantrasyonları üzerine Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analiz sonuçları Tablo 31' de

ve gövde ve kök Na konsantrasyonlarına ait ortalamalar ise Tablo 32’de toplu olarak verilmiştir. Tablo 31 ve Tablo 32 birlikte değerlendirildiğinde; *Solanaceae* familyası bitkilerinde Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının gövde ve kök Na konsantrasyonları üzerine türlerin, uygulamaların ve tür x uygulama interaksyonunun etkileri %0.1 seviyesinde önemli olarak belirlenmiştir.

Tablo 31

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde ve kök Na konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisine ait varyans analizi sonuçları.

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Gövde Na Konsantrasyonu		Kök Na Konsantrasyonu	
		Kareler Toplamı	F Değeri	Kareler Toplamı	F Değeri
Genel	71	67.48	-	292.73	-
Tür (T)	5	61.35	808.41***	185.95	481.94***
Uygulama (U)	3	0.96	21.12***	19.20	82.92***
T x U İnteraksiyonu	15	4.44	19.49***	83.88	72.46***
Hata	48	0.73	-	3.70	-

Uygulamalar birlikte değerlendirildiğinde, en fazla gövde Na konsantrasyonuna sahip tür domates (2.77 mg g^{-1}) ve en az gövde Na konsantrasyonuna sahip tür ise altınçilek (0.37 mg g^{-1}) olarak belirlenmiştir (Tablo 32). Biber ve altınçilek hariç diğer türlerin ortalama gövde Na konsantrasyonları arasındaki farklar önemli bulunmuştur. Türlerin ortalaması olarak kontrol koşullarında 1.15 mg g^{-1} olan gövde Na konsantrasyonu Cd uygulanan koşullarda %27.0 artarak 1.46 mg g^{-1} bulunmuştur. Cd uygulamasına kıyasla türlerin gövde Na konsantrasyonunda $\text{Si}_1 + \text{Cd}$ uygulaması ile %5.5 düzeyinde azalma önemli bulunmazken $\text{Si}_2 + \text{Cd}$ uygulamasında ise %8.9 düzeyindeki azalma önemli olarak saptanmıştır (Tablo 32).

Cd toksisitesinin türlerin gövde Na konsantrasyonlarına etkisi kontrole göre farklı olmuş, domateste %8.1 düzeyinde azalma önemli bulunurken biberde %10.6 düzeyindeki azalma önemli bulunmamıştır (Tablo 32). Buna ek olarak, patlıcanda 2.3 kat seviyesinde ve tütünde %24.2 seviyesindeki artışlar önemli bulunurken patates ve altınçileğin gövde Na konsantrasyonunda kontrole göre uygulamalarla meydana gelen değişimler istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır (Tablo 32). Bununla birlikte, Cd uygulamasına kıyasla $\text{Si}_1 + \text{Cd}$ uygulaması ile domatesin gövde Na konsantrasyonunda %4.0 düzeyindeki azalma önemli

bulunmazken patlıcanda %34.0 düzeyindeki azalma önemli olarak belirlenmiştir. Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulaması ile biberde %7.1 seviyesindeki artış önemli bulunmazken tütünde %28.2 seviyesindeki artış önemli olarak tespit edilmiştir (Tablo 32). Cd uygulamasına kıyasla Si₂+Cd uygulaması ile biberde %11.9 düzeyinde ve patlıcanda %18.4 düzeyindeki azalmalar önemli bulunurken diğer türlerin gövde Na konsantrasyonlarındaki değişimler önemli bulunmamıştır (Tablo 32).

Tablo 32

Solanaceae familyası bitkilerinin gövde ve kök Na konsantrasyonlarına Cd stresinin azaltılmasında Si uygulamalarının etkisi.

Uygulama	Domates	Biber	Patlıcan	Patates	Tütün	Altınçilek	Ortalama
Gövde Na Konsantrasyonu (mg g⁻¹)							
Kontrol	2.97 a [#]	0.47 a	1.29 c	0.55	1.20 c	0.41	1.15 C
Cd	2.73 b	0.42 a	2.94 a	0.85	1.49 b	0.35	1.46 A
Si ₁ + Cd	2.62 b	0.45 a	2.31 b	0.63	1.91 a	0.37	1.38 AB
Si ₂ + Cd	2.73 b	0.37 b	2.40 b	0.59	1.56 b	0.36	1.33 B
Ortalama	2.77 A	0.43 E	2.24 B	0.66 D	1.54 C	0.37 E	
Kök Na Konsantrasyonu (mg g⁻¹)							
Kontrol	2.67 b	1.63 a	7.37 a	2.37 b	3.72 c	4.26 c	3.67 B
Cd	1.77 c	1.53 a	2.69 d	1.81 bc	3.53 c	4.24 c	2.60 C
Si ₁ + Cd	1.69 c	1.42 a	3.96 b	1.35 c	5.12 a	7.67 b	3.53 B
Si ₂ + Cd	3.65 a	1.13 b	3.32 c	3.08 a	4.12 b	8.57 a	3.98 A
Ortalama	2.45 C	1.43 E	4.34 B	2.15 D	4.12 B	6.19 A	

[#]: Her bitki için aynı sütunda farklı harf ile gösterilen uygulamaların ortalamaları ($n = 3$) arasındaki farklar önemlidir.

Uygulamaların ortalaması olarak en fazla kök Na konsantrasyonuna sahip tür altınçilek (6.19 mg g⁻¹) ve en az kök Na konsantrasyonuna sahip tür ise biber (1.43 mg g⁻¹) olarak belirlenmiştir (Tablo 32). Patlıcan ve tütün hariç diğer türlerin ortalama kök Na konsantrasyonları arasındaki farklar önemli bulunmuştur. Türlerin ortalaması olarak kontrol koşullarında 3.67 mg g⁻¹ olan kök Na konsantrasyonu Cd uygulanan koşullarda %29.2 azalarak 2.60 mg g⁻¹ bulunmuştur. Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulaması (3.53 mg g⁻¹) ile %35.8 düzeyindeki ve Si₂+Cd uygulaması (3.98 mg g⁻¹) ile %53.1 düzeyindeki artışlar önemli olarak saptanmıştır (Tablo 32).

Kontrole göre Cd toksisitesinin türlerin kök Na konsantrasyonlarına etkisi ayrılmış olmuş, domates ve patlıcan hariç diğerk türlerin kök Na konsantrasyonlarındaki azalmalar önemli bulunmamıştır (Tablo 32). Bu azalmaların domateste %33.7, biberde %6.1, patlıcanda %63.5, patateste %23.6, tütünde %5.1 ve altınçilekte %0.5 düzeyinde olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte, Si₁+Cd uygulaması ile patlıcanda %47.2, tütünde %45.0 ve altınçilekte %80.9 düzeyindeki artışlar önemli bulunurken diğerk türlerin kök Na konsantrasyonlarındaki azalmalar önemli bulunmamıştır (Tablo 32). Cd uygulamasına kıyasla Si₂+Cd uygulamasında ise, biber hariç diğerk türlerin kök Na konsantrasyonlarında önemli artışlar belirlenmiştir. Bu artışların, patlıcanda %23.4, patateste %70.2 ve tütünde %16.7 düzeyinde iken domateste 2.1 kat ve altınçilekte 2.0 kat olduğu saptanmıştır. Biberde ise %26.1 seviyesindeki azalma önemli olarak tespit edilmiştir (Tablo 32).

Çıkılı vd. (2016) altınçilek gövdesinde Na akümülayonunun Cd uygulamasıyla arttığını ve Alzahrani vd. (2018) ise buğdayda Si uygulamalarının Na içeriğini azalttığını tespit etmişlerdir.

BEŞİNCİ BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tez çalışmasında; ülkemiz tarımında önemli yeri bulunan ve yetiştiriciliği geniş alanlarda yapılan *Solanaceae* (patlıcangiller) familyası bitkilerinde (domates, biber, patlıcan, patates, tütün ve altınçilek) Cd stresinin azaltılmasına Si'un etkisinin bitkilerin bazı agronomik, morfolojik ve beslenme özellikleri değerlendirilerek ortaya konulması hedeflenmiştir. Bu çalışma sonucunda aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

Cd toksisitesi koşullarında türlerin ortalaması olarak gövde yaş ve kuru ağırlıkları (sırasıyla %27.1 ve %31.1), kök yaş ve kuru ağırlıkları (sırasıyla %37.5 ve %39.7), toplam yaş ve kuru ağırlıkları (sırasıyla %28.2 ve %32.1), kök uzunluğu (%19.7), Cd translokasyonu (%56.8), klorofil *a*, *b* ve *a+b* (sırasıyla %27.3, %43.3 ve %31.7) ve karotenoid içerikleri (%34.5), gövde N ve ham protein (%3.4) konsantrasyonları, gövde Ca konsantrasyonları (%17.8) ve kök Na konsantrasyonlarında (%29.2) önemli azalmalar belirlenmiştir. Buna karşılık, gövde ve kök Cd konsantrasyonları (sırasıyla 18.5 kat ve 72.6 kat) ve Cd alımları (sırasıyla 17.4 kat ve 13.8 kat), köklerde net Cd akümüasyonu (33.6 kat), toplam Cd akümüasyon oranı (19.4 kat), gövde ve kök P konsantrasyonları (sırasıyla %22.7 ve %68.4), kök K konsantrasyonu (%42.3) ve gövde Na konsantrasyonu (%27.0) önemli düzeyde artmıştır. Bunun yanında, gövde/kök oranı (%10.1), gövde K konsantrasyonu (%1.5) ile kök Ca ve Mg konsantrasyonlarında (sırasıyla %2.9 ve %1.9) meydana gelen artışların önemli olmadığı saptanmıştır.

Türlerin ortalaması olarak, Cd toksisitesi koşullarında önemli azalmalar görülen gövde yaş ağırlığı (sırasıyla %6.3 ve %15.3), kök yaş ağırlığı (sırasıyla %81.2 ve 2.2 kat), kök kuru ağırlığı (sırasıyla %53.2 ve %54.4), toplam yaş ağırlığı (sırasıyla %13.3 ve %24.9), toplam kuru ağırlığı (sırasıyla %10.5 ve %22.3) ve kök uzunluğunda (%18.5) Si₁+Cd ve Si₂+Cd uygulamaları ile önemli artışlar tespit edilmiştir. Ayrıca, Si₁+Cd ve Si₂+Cd uygulamaları ile kök Cd konsantrasyonu (sırasıyla %26.0 ve %36.1), kök Cd alımı (sırasıyla %51.6 ve %64.1), toplam Cd akümüasyon oranı (sırasıyla %67.7 ve 2.1 kat), kök P konsantrasyonu (sırasıyla %5.5 ve %6.3), kök K konsantrasyonu (sırasıyla %37.4 ve %53.6) ve kök Mg konsantrasyonunda (sırasıyla %18.9 ve %43.9) önemli düzeyde artmıştır. Si₁+Cd

uygulamasý ile gövde kuru ağırlığı ve gövde K konsantrasyonundaki (sırasıyla %5.5 ve %2.5) artışlar istatistiksel olarak önemli bulunmazken, Si₂+Cd uygulaması ile aynı parametrelerdeki (sırasıyla %18.5 ve %7.8) artışlar önemli bulunmuştur. Bununla birlikte, Si₁+Cd uygulaması ile gövde Cd alımı (%0.3) ve kök Na konsantrasyonunda (%35.8) önemli azamalar belirlenirken, Si₂+Cd uygulaması ile aynı parametrelerde (sırasıyla %18.7 ve %53.1) önemli artışlar saptanmıştır. Buna ek olarak, Si₁+Cd uygulaması ile gövde P konsantrasyonundaki (%3.8) artış ve Si₂+Cd uygulaması ile (%2.9) azalma önemli olarak belirlenmiştir.

Türlerin ortalaması olarak, Si₁+Cd ve Si₂+Cd uygulamaları ile gövde/kök oranı (sırasıyla %42.1 ve %34.5), Cd translokasyonu (sırasıyla %20.1 ve %33.1), kök Ca konsantrasyonu (sırasıyla %9.4 ve %17.7) ve gövde Mg konsantrasyonunda (sırasıyla %2.2 ve %2.3) önemli azalmalar belirlenmiştir. Buna ek olarak, Si₁+Cd uygulaması ile gövde Ca konsantrasyonundaki (%6.5) azalma önemli iken, Si₂+Cd uygulaması ile aynı parametredeki (%0.3) artış önemli olarak saptanmamıştır. Ayrıca, Si₁+Cd uygulaması ile gövde N ve ham protein konsantrasyonları ve gövde Na konsantrasyonundaki (sırasıyla %1.1 ve %5.5) azalmalar önemli bulunmazken, Si₂+Cd uygulaması ile aynı parametrelerde (sırasıyla %1.9 ve %8.9) belirlenen azalmalar önemli olarak tespit edilmiştir. Si₁+Cd uygulaması ile gövde Cd konsantrasyonundaki (%0.4) azalma ve Si₂+Cd uygulaması ile aynı parametredeki (%0.4) artış ve köklerde net Cd akümülyasyonundaki Si₁+Cd ve Si₂+Cd uygulamaları ile (sırasıyla %12.4 ve %3.5) belirlenen azalmalar istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır. Si₁+Cd uygulaması ile klorofil *a*, *b* ve *a+b* (sırasıyla %2.9, %5.9 ve %3.6) artışlar ve Si₂+Cd uygulaması ile aynı parametrelerdeki (sırasıyla %1.9, %2.9 ve %2.2) azalmalar istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır. Buna karşılık, Si₁+Cd uygulaması ile karotenoid içeriğinde bir değişim tespit edilmezken, Si₂+Cd uygulaması ile aynı parametredeki (%2.6) azalma önemli bulunmamıştır.

Cd uygulaması ile domatesin, gövde, kök ve toplam yaş ve kuru ağırlıkları, gövde ve kök K ve Mg konsantrasyonları ile gövde P konsantrasyonunda azalmalar belirlenmiş ancak bu parametrelerde belirlenen azalmalar Si uygulamaları ile hafifletilerek düzeltilmiştir. Genel olarak, Si₁+Cd uygulamasına göre Si₂+Cd uygulamasının etkisi daha fazla olmuş ve bununla birlikte gövde ve toplam kuru ağırlıkları ile gövde Mg konsantrasyonundaki uygulamalarla meydana gelen değişimler istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır. Buna

karşılık, domateste Cd uygulaması ile kontrole göre gövde ve kök Na konsantrasyonlarındaki azalmalar, Si_1+Cd uygulaması ile devam etmiş fakat Si_2+Cd uygulaması ile gövde Na konsantrasyonunda bir değişim olmazken, kök Na konsantrasyonu artmıştır. Domateste Cd translokasyonu ile klorofil *a*, *b*, *a+b* ve karotenoid içeriklerinde kontrole göre Cd uygulaması ile meydana gelen azalmalar Si uygulamalarıyla da azalmıştır. Si_2+Cd uygulamasındaki azalmalar, Si_1+Cd uygulamasına göre daha fazla olmuştur. Domateste Cd uygulaması ile kontrole göre kök uzunluğu, kök Cd konsantrasyonu, gövde ve kök Cd alımları, köklerde net Cd akümüasyonu, toplam Cd akümüasyon oranı ve kök P ve Ca konsantrasyonlarında artışlar olmuş ve bu artışlar Si uygulamaları ile devam etmiştir. Kök Ca konsantrasyonu hariç diğerlerinde Si_2+Cd uygulamasının etkisi Si_1+Cd uygulamasına göre daha fazla olmuştur. Domates gövde/kök oranı ve gövde N ve ham protein konsantrasyonunda kontrole göre Cd uygulaması ile meydana gelen artışlar, Si_1+Cd uygulaması ile artmış fakat Si_2+Cd uygulaması ile azalmıştır. Domateste Cd uygulaması ile kontrole göre gövde Cd konsantrasyonunda meydana gelen artış Si_1+Cd uygulaması ile azalmış, Si_2+Cd uygulamasıyla ise artmıştır. Domates gövde Ca konsantrasyonunda ise uygulamalarla meydana gelen değişimler istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

Biberin gövde kuru ağırlığı, kök ve toplam yaş ve kuru ağırlıkları, kök uzunluğu, klorofil *a*, *b*, *a+b* ve karotenoid içerikleri ve gövde K konsantrasyonunda kontrole göre Cd uygulaması ile azalmalar tespit edilmiş ancak bu parametrelerde belirlenen azalmalar Si uygulamaları ile artmıştır. Genellikle, Si_2+Cd uygulamasına göre Si_1+Cd uygulamasının etkisi daha fazla olmuştur. Buna karşılık, biberde Cd uygulaması ile kontrole göre gövde yaş ağırlığı, gövde/kök oranı ve kök Ca konsantrasyonundaki azalmalar, Si_1+Cd uygulaması ile devam etmiş ancak Si_2+Cd uygulaması ile artmıştır. Bununla birlikte, biberde Cd uygulaması ile kontrole göre gövde N, ham protein ve Na konsantrasyonlarındaki azalmalar Si_1+Cd uygulaması ile artmış fakat Si_2+Cd uygulaması ile azalmıştır. Biberde Cd translokasyonu ile gövde Ca ve kök Na konsantrasyonlarında kontrole göre Cd uygulaması ile meydana gelen azalmalar Si uygulamalarıyla da azalmıştır ve Si_2+Cd uygulamasındaki azalmalar Si_1+Cd uygulamasına göre daha fazla olmuştur. Biberde Cd uygulaması ile kontrole göre kök Cd konsantrasyonu, gövde ve kök Cd alımları, köklerde net Cd akümüasyonu, toplam Cd akümüasyon oranı, gövde ve kök P konsantrasyonları ve kök K konsantrasyonunda artışlar olmuş ve bu artışlar Si uygulamaları ile devam etmiştir. Kök Cd alımı ve kök K konsantrasyonu hariç diğerlerinde Si_2+Cd uygulamasının etkisi Si_1+Cd

uygulamasına göre daha fazla olmuştur. Biber gövde Cd ve kök Mg konsantrasyonlarında kontrole göre Cd uygulaması ile meydana gelen artışlar, Si₁+Cd uygulaması ile artmış fakat Si₂+Cd uygulaması ile azalmıştır. Biberin gövde Mg konsantrasyonunda kontrole göre Cd uygulaması ile meydana gelen artış Si uygulamalarıyla azalmış ve Si₁+Cd uygulamasına göre Si₂+Cd uygulamasındaki azalma daha fazla olmuştur.

Cd uygulaması ile patlıcanın, kök uzunluğu ve kök K ve Na konsantrasyonlarında azalmalar belirlenmiş ancak bu parametrelerde belirlenen azalmalar Si uygulamaları ile iyileştirilmiştir. Patlıcanda Cd uygulaması ile kontrole göre gövde, kök ve toplam yaş ve kuru ağırlıkları ve gövde Ca konsantrasyonunda saptanan önemli azalmalar, Si₁+Cd uygulaması ile devam etmiş fakat Si₂+Cd uygulaması ile artmıştır. Buna karşılık, patlıcanda Cd uygulaması ile kontrole göre gövde/kök oranı, Cd translokasyonu, klorofil *b* içeriği, gövde ve kök Mg konsantrasyonundaki azalmalar Si uygulamalarıyla da azalmıştır. Genel olarak, Si₁+Cd uygulamasındaki azalmalar Si₂+Cd uygulamasına göre daha fazla olmuştur. Patlıcanda klorofil *a*, *a+b* ve karotenoid içeriklerinde kontrole göre Cd uygulaması ile meydana gelen azalmalar, Si₁+Cd uygulaması ile artmış fakat Si₂+Cd uygulaması ile azalmıştır. Patlıcanda Cd uygulaması ile kontrole göre kök Cd konsantrasyonu, gövde ve kök P konsantrasyonu ve gövde K konsantrasyonunda artışlar olmuş ve bu artışlar Si uygulamaları ile devam etmiştir. Kök P konsantrasyonu hariç diğerlerinde Si₁+Cd uygulamasının etkisi Si₂+Cd uygulamasına göre daha fazla olmuştur. Patlıcan gövde Cd konsantrasyonu ve köklerde net Cd akümülyasyonunda kontrole göre Cd uygulaması ile meydana gelen artışlar, Si₁+Cd uygulaması ile artmış fakat Si₂+Cd uygulaması ile azalmıştır. Patlıcanda Cd uygulaması ile kontrole göre kök Cd alımı ve toplam Cd akümülyasyon oranında meydana gelen artışlar Si₁+Cd uygulaması ile azalmış, Si₂+Cd uygulamasıyla ise artmıştır. Cd uygulaması ile patlıcanın, gövde Cd alımı, gövde N ve ham protein konsantrasyonu, kök Ca ve gövde Na konsantrasyonlarında artışlar belirlenmiş ancak bu parametrelerde belirlenen artışlar Si uygulamaları ile azalmıştır.

Patatesin gövde kuru ağırlığı, toplam yaş ve kuru ağırlıkları, kök uzunluğu, Cd translokasyonu, klorofil *a* ve *a+b* içerikleri, kök K konsantrasyonu ile gövde ve kök Mg konsantrasyonlarında kontrole göre Cd uygulaması ile azalmalar belirlenmiş ancak bu parametrelerde belirlenen azalmalar Si uygulamaları ile hafifletilmiştir. Buna ek olarak, patatesin klorofil *b* ve karotenoid içeriklerinde kontrole göre Cd uygulaması ile tespit edilen

azalma Si_1+Cd uygulaması ile değişmezken, Si_2+Cd uygulaması ile artmıştır. Genel olarak, Si_1+Cd uygulamasına göre Si_2+Cd uygulamasının etkisi daha fazla olmuş ve bununla birlikte kök uzunluğu, kök K ve Mg konsantrasyonlarındaki uygulamalarla meydana gelen değişimler istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır. Buna karşılık, patatesten Cd uygulaması ile kontrole göre gövde yaş ağırlığı, gövde Ca konsantrasyonu ve kök Na konsantrasyonundaki azalmalar, Si_1+Cd uygulaması ile devam etmiş fakat Si_2+Cd uygulaması ile artmıştır. Patatesten gövde/kök oranı, gövde N ve ham protein konsantrasyonu ile gövde P ve K konsantrasyonlarında kontrole göre Cd uygulaması ile meydana gelen azalmalar Si uygulamalarıyla da azalmıştır. Genel olarak, Si_1+Cd uygulamasındaki azalmalar, Si_2+Cd uygulamasına göre daha fazla olmuş ve bununla birlikte gövde K konsantrasyonunda uygulamalarla meydana gelen değişimler istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır. Patatesten Cd uygulaması ile kontrole göre kök yaş ve kuru ağırlıkları, gövde ve kök Cd alımları ve toplam Cd akümülyasyon oranında artışlar olmuş ve bu artışlar Si uygulamaları ile devam etmiştir. Kök kuru ağırlığı ve kök Cd alımı hariç diğerlerinde Si_2+Cd uygulamasının etkisi Si_1+Cd uygulamasına göre daha fazla olmuştur. Cd uygulaması ile patatesin, gövde ve kök Cd konsantrasyonları, köklerde net Cd akümülyasyonu, kök P ve Ca konsantrasyonları ile gövde Na konsantrasyonunda kontrole göre artışlar belirlenmiş fakat bu parametrelerde belirlenen artışlar Si uygulamaları ile azalmıştır. Gövde Cd konsantrasyonu hariç diğerlerinde Si_2+Cd uygulamasının etkisi Si_1+Cd uygulamasına göre daha fazla olmuş ve bununla birlikte gövde Na konsantrasyonunda uygulamalarla meydana gelen değişimler istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

Cd uygulaması ile tütünün, gövde, kök ve toplam yaş ve kuru ağırlıkları, kök uzunluğu ve kök Na konsantrasyonunda azalmalar belirlenmiş fakat bu parametrelerde belirlenen azalmalar Si uygulamaları ile iyileştirilerek düzeltilmiştir. Bununla birlikte, kök uzunluğundaki uygulamalarla meydana gelen değişimler istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır. Buna karşılık, tütünde Cd uygulaması ile kontrole göre klorofil *a*, *a+b* ve karotenoid içerikleri ile gövde N ve ham protein konsantrasyonlarındaki azalmalar, Si uygulamalarıyla da devam etmiştir. Si_1+Cd uygulamasındaki azalmalar Si_2+Cd uygulamasına göre daha fazla olmuş ve bununla birlikte karotenoid içeriği ve gövde N ve ham protein konsantrasyonundaki uygulamalarla meydana gelen değişimler istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır. Tütünde Cd uygulaması ile kontrole göre klorofil *b* içeriğindeki azalma, Si_1+Cd uygulaması ile artmış ancak Si_2+Cd uygulaması ile tekrar

azalmıştır. Tütünde Cd uygulaması ile kontrole göre kök Cd konsantrasyonu ve alımı, toplam Cd akümülyasyon oranı, gövde Ca ve Na konsantrasyonu ile gövde ve kök Mg konsantrasyonlarında artışlar olmuş ve bu artışlar Si uygulamaları ile devam etmiştir. Genel olarak, Si₂+Cd uygulamasının etkisi Si₁+Cd uygulamasına göre daha fazla olmuştur. Tütün kök Ca konsantrasyonunda kontrole göre Cd uygulaması ile meydana gelen artış, Si₁+Cd uygulaması ile artmış fakat Si₂+Cd uygulaması ile azalmıştır. Tütünde Cd uygulaması ile kontrole göre gövde Cd konsantrasyonu ve alımı, kök P konsantrasyonu ile gövde ve kök K konsantrasyonlarında meydana gelen artışlar Si₁+Cd uygulaması ile azalmış, Si₂+Cd uygulamasıyla ise artmıştır. Tütünün gövde/kök oranı, Cd translokasyonu, köklerde net Cd akümülyasyonu ve gövde P konsantrasyonlarında kontrole göre Cd uygulaması ile meydana gelen artışlar Si uygulamaları ile azalmış ve Si₂+Cd uygulamasına göre Si₁+Cd uygulamasındaki azalmalar daha fazla olmuştur ve bununla birlikte, gövde/kök oranı ve Cd translokasyonundaki uygulamalar ile meydana gelen değişimler istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

Altınçileğin gövde, kök ve toplam yaş ve kuru ağırlıkları, kök uzunluğu ve gövde ve kök Na konsantrasyonlarında kontrole göre Cd uygulaması ile azalmalar belirlenmiş fakat bu parametrelerde belirlenen azalmalar Si uygulamaları ile hafifletilmiştir. Genel olarak, Si₁+Cd uygulamasına göre Si₂+Cd uygulamasının etkisi daha fazla olmuş ve bununla birlikte gövde yaş ve kuru ağırlıkları, toplam yaş ağırlığı, kök uzunluğu ve gövde Na konsantrasyonundaki uygulamalarla meydana gelen değişimler istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır. Buna karşılık, altınçilekte Cd uygulaması ile kontrole göre klorofil *b*, *a+b* ve karotenoid içerikleri ile gövde N ve ham protein konsantrasyonlarındaki azalmalar, Si₁+Cd uygulaması ile devam etmiş fakat Si₂+Cd uygulaması ile artmıştır. Altınçileğin gövde N ve ham protein konsantrasyonlarındaki uygulamalarla meydana gelen değişimler istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır. Altınçilekte Cd translokasyonu, klorofil *a* içeriği ve gövde Mg konsantrasyonunda kontrole göre Cd uygulaması ile meydana gelen azalmalar Si uygulamalarıyla da azalmıştır. Genel olarak, Si₁+Cd uygulamasındaki azalmalar Si₂+Cd uygulamasına göre daha fazla olmuş ve bununla birlikte klorofil *a* içeriğinde uygulamalarla meydana gelen değişimler istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır. Altınçilekte Cd uygulaması ile kontrole göre gövde ve kök Cd konsantrasyonları ve alımları, köklerde net Cd akümülyasyonu, toplam Cd akümülyasyon oranı, gövde ve kök P konsantrasyonları, gövde ve kök K konsantrasyonları ile kök Mg konsantrasyonunda artışlar olmuş ve bu artışlar Si

uygulamaları ile devam etmiştir. Gövde P konsantrasyonu hariç diğerlerinde Si_2+Cd uygulamasının etkisi Si_1+Cd uygulamasına göre daha fazla olmuştur. Cd uygulaması ile altınçileğin gövde/kök oranı ile gövde ve kök Ca konsantrasyonlarında kontrole göre artışlar belirlenmiş ancak bu parametrelerde belirlenen artışlar Si uygulamaları ile azalmıştır. Gövde/kök oranı hariç diğerlerinde Si_2+Cd uygulamasının etkisi Si_1+Cd uygulamasına göre daha fazla olmuş ve bununla birlikte gövde Ca konsantrasyonunda uygulamalarla meydana gelen değişimler istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

Cd toksisitesi koşullarında kontrole göre en yüksek Cd tolerans indeksine sahip olan tür domates (%118.7) ve en düşük Cd tolerans indeksine sahip olan tür ise biber (%53.2) olarak belirlenmiştir. Cd tolerans indekslerine göre Cd toksisitesine toleranslılık sıralaması ise domates> patates> altınçilek> tütün> patlıcan> biber olarak saptanmıştır. Kontrole göre Si_1+Cd ve Si_2+Cd uygulamalarına göre Cd tolerans indeksi en yüksek olan tür domates (sırasıyla %132.2 ve %139.3) ve en düşük olan tür ise patlıcan (sırasıyla %73.2 ve %74.1) olarak belirlenmiştir. Si_1+Cd koşulunda Cd tolerans indekslerine göre Cd toksisitesine toleranslılık sıralaması domates> patates> tütün> biber> altınçilek> patlıcan iken, Si_2+Cd koşulunda Cd tolerans indekslerine göre Cd toksisitesine toleranslılık sıralaması domates> patates> tütün> altınçilek> biber> patlıcan olarak saptanmıştır.

Cd, Si_1+Cd ve Si_2+Cd uygulamalarına bağlı olarak en yüksek Cd translokasyonuna sahip tür tütün (sırasıyla 0.792, 0.625 ve 0.636) ve en düşük Cd translokasyonuna sahip tür ise altınçilek (sırasıyla 0.010, 0.005 ve 0.004) olarak saptanmıştır. Bununla birlikte, Cd toksisitesi koşullarına göre, Cd translokasyonunun Si_1+Cd uygulaması koşullarında patates hariç, Si_2+Cd uygulaması koşullarında ise patates ve tütün hariç diğer türlerde azaldığı belirlenmiştir. Tüm uygulamalarda Cd translokasyonuna göre türler tütün> domates> patlıcan> patates> biber> altınçilek olarak sıralanmıştır.

Yapılan bu çalışma ile *Solanaceae* familyasına ait altı türün toprak üstü ve kök kuru ağırlıklarındaki yüzde azalma temel alındığında, domatesin Cd'a en toleranslı ve biberin ise Cd'a en duyarlı tür olduğu belirlenmiştir. Cd toksisitesinin giderilmesinde, Si uygulamasının etkisi bitkinin kök gelişimine, toprak üstü aksam gelişimine göre 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 veya

meyveye en az yansıtan bitkilerin altınçilek ve onu takiben biber olduğu görülmüştür. Bu nedenle, besin zinciri dikkate alındığında *Solanaceae* türleri arasında, Cd ile kirlenmiş tarımsal alanlarda altınçilek ve biberin, toksik Cd seviyesinin altındaki tarımsal alanlarda ise tütün ve domatesin yetiştirilmesinin daha uygun olacağı düşünülmektedir. Bünyesine aldığı Cd'ü üst yapraklarına en fazla taşıyan tür olan tütünün akümülyasyon oranının en yüksek olduğu belirlenmiştir. Biyoremediasyon yeteneği fazla olan tütünün ise, Cd ile kirli alanların temizlenmesinde kullanılabileceği düşünülmektedir. Si uygulamalarına türlerin tepkilerinin ayrımlı olduğu, patlıcan hariç diğer türlerin gövde ve kök biyokütle üretimlerinin Si uygulamalarıyla arttığı, Si uygulamalarının tüm türlerde Cd biyokonsantrasyonunu, köklerde net Cd akümülyasyonunu ve toplam Cd akümülyasyon oranını arttırdığı, türlerin Cd tolerans indekslerini artırarak gelişim gerilemesi ve besin maddesi dengesizliklerinin Si uygulamasıyla hafifletilebileceği sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla, *Solanaceae* familyası bitkilerinde Cd stresinin hafifletilmesinde Si'un etkisinin bilinmesi, stres koşullarına dayanıklı türlerin belirlenmesi ve yetiştirilecek türlerin seçimine sağlanacak katkı ile üreticinin ürün miktarındaki azalmaya bağlı olarak ekonomik zararlanmasını en aza indirecektir. Ayrıca elde edilen sonuçlar, *Solanaceae* familyasına ait türler için sürdürülebilir tarımsal üretim açısından yeterli miktarda verinin üretilmesini sağlayacak olup sera koşullarında yapılan bu çalışmanın, tarla koşullarında Cd toksik alanlarda Si gübrelemesi uygulayarak yapılacak bir çalışma ile desteklenmesi gerekmektedir.

KAYNAKÇA

Acir, Y. ve Erdem, H. (2020). "Biochar uygulamalarının ekmeklik buğdayın kadmiyum (Cd) alımına etkisi". *Akademik Ziraat Dergisi*. 9 (2), 327-336. <http://dx.doi.org/10.29278/azd.813360>

Adatia, M. H. ve Besford, R. T. (1986). "The effect of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution". *Annals of Botany*, 58, 343-351. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087212>

Ait Ali, N., Bernal, M. P. ve Ater, M. (2004). "Tolerance and bioaccumulation of cadmium by *Phragmites australis* grown in the presence of elevated concentrations of cadmium, copper, and zinc". *Aquatic Botany*, 80 (3), 163-176. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2004.08.008>

Alia-Saradhi, P. P. (1991). "Proline accumulation under heavy metal stress". *Journal 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)

Alloway, B. J. ve Steinnes, E. (1999). "Anthropogenic additions of cadmium to soils". In: Laughlin M.J., Singh B.R., (Eds), *Cadmium in Soil and Plants*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (The Netherlands), pp. 97-123.

Alzahrani, Y., Kuşvuran, A., Alharby, H. F., Kuşvuran, S. ve Rady, M. M. (2018). "The defensive role of silicon in wheat against stress conditions induced by drought, salinity or cadmium". *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 154, 187-196. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.02.057>

Amiri, J., Entesari, S., Delavar, K., Saadatmand, M. ve Rafie, N. A. (2012). "The effect of silicon on cadmium stress in *Echium amoenum*". *International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering*, 6 (2), 51-54.

Anjum, N. A., Umar, S., Ahmad, A., Iqbal, M. ve Khan, N. A. (2008). "Ontogenic variation in response of *brassica campestris* l. to cadmium toxicity". *Journal of Plant Interactions*. <https://doi.org/10.1080/17429140701823164>

Balakhnina, T. I., Bulak, P., Matichenkov, V. V., Kosobryukhov, A. A. ve Włodarczyk, T. M. (2015). "The influence of si-rich mineral zeolite on the growth processes

and adaptive potential of barley plants under cadmium stress”. *Plant Growth Regulation*. 75, 557-565. <https://doi.org/10.1007/s10725-014-0021-y>

Barcelo, J., Guevara, P. ve Poschenrieder, C. (1993). “Silicon amelioration of aluminum toxicity in teosinte (*Zea mays* L. spp. Mexicana)”. *Plant Soil*, 154, 249-255. <https://doi.org/10.1007/BF00012530>

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>

Birchall, J. D., Exley, C. ve Chappell, J. S. (1989). “Acute toxicity of aluminum to fish eliminated in silicon-rich acid waters”. *Nature*, 338, 146-148. <https://doi.org/10.1038/338146a0>

Corrales, I., Poschenrieder, C. ve Barcelo, J. (1997). “Influence of silicon pretreatment on aluminum toxicity in maize roots”. *Plant and Soil*, 190, 203–209. <https://doi.org/10.1023/A:1004209828791>

Cui, J., Liu, T., Li, F., Yi, J., Liu, C. ve Yu, H. (2017). “Silica nanoparticles alleviate cadmium toxicity in rice cells: Mechanisms and size effects”. *Environmental Pollution* 228, 363-369. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.05.014>

Cunha, K. P. V., Nascimento, C. W. A. ve Silva, A. J. (2008). “Silicon alleviates the toxicity of cadmium and zinc for Maize (*Zea mays* L.) grown on a contaminated soil”. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171, 849-853. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800147>

Cakmak, I. (2008). “Zinc deficiency in wheat in Turkey”. *Micro-nutrient Deficiencies in Global Crop Production*, p, 181-200.

Çıkılı, Y. ve Samet, H. (2018). “Effects of excess cadmium on growth, tolerance and physiological characteristics of purslane varieties”. *YYU J Agri Science/ YYÜ Tarım Bilimleri Dergisi*, 28 (Special Issue), 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”. *Tarım Bilimleri Dergisi/Journal of Agricultural Sciences*, 22 (4), 576-587. <https://doi.org/10.1501/Tarimbil0000001416>

Deren, C. W. (1997). "Changes in nitrogen and phosphorus concentrations of silicon fertilized rice grown on organic soil". *Journal of Plant Nutrition*, 20, 765-771. <https://doi.org/10.1080/01904169709365292>

Doğan, M. (2003). "Şanlıurfa'da Karakoyun Deresi atık suları ile sulanan soğanda (*Allium cepa* L.) toksik element birikimi üzerine bir araştırma". *Ekoloji*, 48, 1-3.

Doğan, M. (2018). "Çilekte Kadmiyum Toksisitesi Altındaki Bitkiler Üzerine Hümk Asit Ve Silikonun Etkilerinin İncelenmesi". Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Bahçe Bitkileri Anabilim Dalı, Şanlıurfa.

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>

Dorris, J., Atieh, B. H. ve Gupta, R. C. (2002). "Cadmium uptake by radishes fom soil contaminated with nickel-cadmium batteries toxicity and safety considerations". *Toxicology Mechanisms and Methods*, 12 (4), 265-276. <https://doi.org/10.1080/1537652020 8951163>

Dresler, S., Wójcik, M., Bednarek, W., Hanaka, A. ve Tukiendorf, A. (2015). "The effect of silicon on maize growth under cadmium stress". *Russian Journal of Plant Physiology*, 62 (1), 86-92. <https://doi.org/10.1134/S1021443715010057>

Epstein, E. (1994). "The anomaly of silicon in plant biology". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 91, 11- 17. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.11>

Epstein, E. (1999). "Silicon annual review". *Plant Physiology Plant Molecular Biology*, 50, 641644.

Fan, X., Wen, X., Huang, F., Cai, Y. ve Cai, K. (2016). "Effects of silicon on morphology, ultrastructure and exudates of rice root under heavy metal stress". *Acta Physiologiae Plantarum*. 38, 197. <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2221-8>

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>

Farouk, S., Mosa, A. A., Taha, A. A., Ibrahim, H. M. ve El-gahmery, A. M. (2011). "Protective effect of humic acid and chitosan on radish (*Raphanus Sativus*, L. Var. *Sativus*) plants subjected to cadmium stress". *Journal of Stress Physiology and Biochemistry*, 7 (2), 99-116.

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>

Gerami, M. ve Rameeh, V. (2012). "Study of silicon and nitrogen effects on yield components and shoot ions nutrient composition in rice". *Agriculture (Poľnohospodárstvo)*, 58 (3), 93-98. <https://doi.org/10.2478/v10207-012-0011-x>

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". *Ecotox Environ Safe*. 65, 420-426. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2005.08.006>

Gong, H., Chen, G., Chen, G., Wang, S. ve Zhang, C. (2005). "Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought". *Plant Science*, 169, 313-321. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2005.02.023>

Gouia, H., Gorbil, 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)

Greger, M. ve Landberg, T. (2019). "Silicon reduces cadmium and arsenic levels in field-grown crops". *Silicon*, 11, 2371-2375. <https://doi.org/10.1007/s12633-015-9338-z>

Greger, M., Kabir, A. H., Landberg, T., Maity, P. J. ve Lindberg, S. (2016). "Silicate reduces cadmium uptake into cells of wheat". *Environmental Pollution*, 211, 90-97. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.12.027>

Gu, H. H., Qiu, H., Tian, T., Zhan, S. S, Deng, T. H. B., Chaney, R. L., Wang, S. Z., Tang, Y. T., Morel, J. L. ve Qiu, R. L. (2011). "Mitigation effects of silicon rich amendments

on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on multi-metal contaminated acidic soil”. *Chemosphere*, 83, 1234-1240. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.03.014>

Guo, B., Liu, C., Ding, N., Fu, Q., Lin, Y., Li, H. ve Li, N. (2015). “Silicon alleviates cadmium toxicity in two cypress varieties by strengthening the exodermis tissues and stimulating phenolic exudation of roots”. *Journal of Plant Growth Regulation*. 35, 420-429. <https://doi.org/10.1007/s00344-015-9549-y>

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 (Cu^{+2} , Pb^{+2} , Hg^{+2} , Cd^{+2}) *Clivia* sp. bitkisi polenlerinin çimlenmesi ve tüp büyümesi üzerine etkileri”. *F.Ü. Fen ve Matematik Bilimleri Dergisi*, 16 (2), 177-182.

Ho, D. Y., Zhang, H. L. ve Zhang, X. P. (1980). “The silicon supplying ability of some important paddy soils of South China In: Proceedings of the symposium on paddy soil”. *Nanjing China*, pp. 19-24.

Huang, P. M., Li, Y. ve Sumner, E. M. (2011). “Handbook of soil science- properties and processes, 2nd Edition”. 1442 pages, CRC Press, USA.

Ji, X., Liu, S., Juan, H., Bocharnikova, E. A. ve Matichenkov, V. V. (2017). “Effect of silicon fertilizers on cadmium in rice (*Oryza sativa*) tissue at tillering stage”. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 10740- 10748. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8730-1>

Kabir, A. H., Hossain, M. M., Khatun, M. A., Mandal, A. ve Haider, S. A. (2016). “Role of silicon counteracting cadmium toxicity in alfalfa (*Medicago sativa* L.)”. *Frontiers in Plant Science*. 7, 1117. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01117>

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>

Khan, A., Bilal, S., Khan, A. L., Imran, M., Harrasi, A. A., Rawahi, A. A. ve Lee, I. J. (2020). "Silicon-mediated alleviation of combined salinity and cadmium stress in date palm (*Phoenix dactylifera* L.) by regulating physio-hormonal alteration". *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 188, 109885. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109885>

Kim, Y. H., Khan, A. L., Kim, D. H., Lee, S. Y., Kim, K. M., Wagas, M., Jung, H. Y., Shin, J. H., Kim, J. G. ve Lee I. J. (2014). "Silicon mitigates heavy metal stress by regulating P-type heavy metal ATPases, *Oryza sativa* low silicon genes, and endogenous phytohormones". *BMC Plant Biology*. 14, 13. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-14-13>

Koç, E., Ergün, N., Üstün, A. S. ve Öncel I. (2013). "Kahramanmaraş-Acı Biber (*Capsicum Annuum* L.) fidelerinde mineral içerik üzerine kadmiyumun etkisi". *Anadolu Doğa Bilimleri Dergisi* 4 (2), 14-18.

Köleli, N. ve Kantar, Ç. (2006). "Fosforlu gübrelerde ağır metal tehlikesi". *Ekoloji Dergisi*, 9, 1-5.

Krantev, A., Yordanova, R., Janda, T., Szalai, G. ve Popova, L. (2008). "Treatment with salicylic acid decreases the effect of cadmium on photosynthesis in maize plants". *Journal of Plant Physiology*, 165, 920-93. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2006.11.014>

Kuboi, T., Noguchi, A. ve Yazaki, J. (1986). "Family-dependent cadmium accumulation characteristics in higher plants". *Plant and Soil*, 92, 405-415. <https://doi.org/10.1007/BF02372488>

Lee, D. B., Kwon, T. O. ve Park, K. H. (1990). "Influence of nitrogen and silica on the yield and the lodging related traits of paddy rice". *Research Reports of the Rural Development Administration, Soil & Fertilizer*, 32 (2), 15-23.

Lee, S., Petros, D., Moon, J. S., Ko, T.S., Goldsbrough, P. B. ve Korban, S. S. (2003). "Higher levels of ectopic expression of Arabidopsis phytochelatin synthase do not lead to increased cadmium tolerance and accumulation". *Plant Physiology and Biochemistry*, 41, 903-910. [https://doi.org/10.1016/S0981-9428\(03\)00140-2](https://doi.org/10.1016/S0981-9428(03)00140-2)

Liamas, A., Ullrich, C. I. ve Sanz, A. (2000). “Cd²⁺ effects on transmembrane electrical potential difference, respiration and membrane permeability of rice (*Oryza Sativa* L.) roots”. *Plant and Soil*, 219, 21-28. <https://doi.org/10.1023/A:1004753521646>

Liang, Y., Sun, W., Zhu, Y. G. ve Christie, P. (2007). “Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review”. *Environmental Pollution* 147, 422-428. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008>

Liang, Y., Wong, J. W. ve Wei, L. (2005). “Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil”. *Chemosphere*, 58 (4), 475-483. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.09.034>

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., Lio, F., Luo, C., Liu, X., Wang, S., Liu, T. ve Li, X. (2008). “Foliar application of two silica sols reduced cadmium accumulation in rice grains”. *Journal of Hazardous Materials*, 161 (2-3), 1466-72. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.116>.

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, J., Ma, J., He, C., Li, X., Zhang, W., Xu, F., Lin, Y. ve Wang, L. (2013a). “Inhibition of cadmium ion uptake in rice (*Oryza sativa* L.) cells by a wall-bound form of silicon”. *New Phytologist*, 200, 691–699. <https://doi.org/10.1111/nph.12494>

Liu, J., Zhang, H., Zhang, Y. ve Chai, T. (2013b). “Silicon attenuates cadmium toxicity in *Solanum nigrum* L. by reducing cadmium uptake and oxidative stress”. *Plant Physiology and Biochemistry*. 68, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.03.018>

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 apoplastic barrier development". *Plant Growth Regulation*, 70, 89-103. <https://doi.org/10.1007/s10725-012-9781-4>

Ma, J. F. (2004). "Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses". *Soil Science and Plant Nutrition*, 50 (1), 11-18. <https://doi.org/10.1080/00380768.2004.10408447>

Ma, J. F. ve Takahashi, E. (1989). "Effect of silicic acid on phosphorus uptake by rice plant". *Soil Sciences and Plant Nutrition*, 35, 227-234. <https://doi.org/10.1080/00380768.1989.10434755>

Ma, J. F. ve Takahashi, E. (2002). "Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan". *Elsevier Science*, Amsterdam.

Ma, J. F., Tamai, K., Yamaji, N., Mitani, N., Konishi, S., Katsuhara, M., Ishiguro, M., Murata, Y. ve Yano, M. (2006). "A silicon transporter in rice". *Nature*, 440, 688-691. <https://doi.org/10.1038/nature04590>

Ma, T. S., Wang, D. P., Liung, Y. T., Chen, S. H., Zhang, F. S., Wang, S. F., Chieng, Z. Z. ve Liu, L. Z. (1992). "Effect of high efficiency silicate fertilizer on rice". *Turang*, 24 (2), 168-169 (In Chinese).

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)

Matichenkov, V. V. ve Bocharnikova E. A. (2001). "Chapter 13 the relationship between silikon and soil physical and chemical properties". *Studies in plant Science*, 8, 209-219. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80017-3](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80017-3)

Mc Laughlin, M. J. ve Singh, B. R. (Eds) (1999). "Cadmium in soils and plants". *Development in Plant and Soil Sciences*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 85, 288 pages.

Meunier, J. (2003). "The role of plants in the transfer of silicon from the plant surface into the cytosol". *Geoscience*, 335 (16), 1199-1206. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2003.07.007>

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>

Miyake, Y. ve Takahashi, E. (1983). "Effect of silikon on the growth of solition-cultured cucumber plant". *Soil Science and Plant Nutrition*, 29 (1), 71-83. <https://doi.org/10.1080/00380768.1983.10432407>

Miyake, Y. ve Takahashi, E. (1985). "Effect of silikon on the growth of soybean plants in a solition culture". *Soil Science and Plant Nutrition*, 31 (4), 625-636. <https://doi.org/10.1080/00380768.1985.10557470>

Miyake, Y. ve Takahashi, E. (1986). "Effect of silikon on the growth and fruit pruction of strawberry plants in a solition culture". *Soil Science and Plant Nutrition*, 32 (2), 321-326. <https://doi.org/10.1080/00380768.1986.10557510>

Moradi, L. ve Ehsanzadeh, P. (2015). "Effects of cadmium 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>

Muradoğlu, F., Gundoğlu, M., Ercişli, S., Encu, T., Balta, F., Jafaar, H. Z. ve Zıa-Ul-Hak, M. (2015). "Cadmium toxicity affects chlorophyll a and b content, antioxidant enzyme activities and mineral nutrient accumulation in strawberry". *Biological Research*, 48, 11. <http://dx.doi.org/10.1186/S40659-015-0001-3>

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

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>

Naeem, A., Saifullah, A. G., Rehman, M. Z., Akhtar, T., Zia, M. H. ve Aslam, M. (2018). “Silicon nutrition lowers cadmium content of wheat cultivars by regulating transpiration rate and activity of antioxidant enzymes”. *Environmental Pollution*, 242, 126-135. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.069>

Nagajyoti, P. C., Lee, K. D. ve Sreekanth, T. V. M. (2010). “Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review”. *Environmental Chemistry Letters*, 8, 199-216. <https://doi.org/10.1007/s10311-010-0297-8>

Nagaoka, K. (1998). “Study on İnteraction Between P ve Si in Rice Plants”. Graduation Thesis, Kinki University.

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>

Nwugo, C. C. ve Huerta, A. J. (2011). “The effect of silicon on the leaf proteome of rice (*Oryza sativa* L.) plants under cadmium-stress”. *Journal of Proteome Research*. 10, 518-528. <https://doi.org/10.1021/pr100716h>

Obamate, H. ve Umebayashi, M. (2008). “Effects of cadmium on mineral nutrient concentrations in plants differing in tolerance for cadmium”. *Journal of Plant Nutrition*, 20 (1), 97-105. <https://doi.org/10.1080/01904169709365236>

Tunçtürk, R., Oral, E., Tunçtürk, M. ve Kulaz, H. (2020). “Silisyumun fasulyede (*Phaseolus Vulgaris* L.) tuz (NaCl) stresini azaltmadaki etkisi”. *KSÜ Tarım ve Doğa Dergisi*, 23 (6), 1616-1625. <https://doi.org/10.18016/ksutarimdoga.vi.702302>

Öktüren-Asri, F. ve Sönmez S. (2006). “Ağır metal toksisitesinin bitki metabolizması üzerine etkileri”. *Derim*, 23 (2), 36-45.

Öktüren-Asri, F., Sönmez, S. ve Çıtak, S. (2007). “Kadmiyumun çevre ve insan sağlığı üzerine etkileri”. *Derim*, 24 (1), 32-39.

Özbek, H., Kaya, Z., Gök, M. ve Kaptan, H. (1995). “Toprak Bilimi”. Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Genel Yayın No: 73 Ders Kitapları Yayın No: 16, Adana.

Özkaya, H. ve Kahveci, B. (1990). “*Tahıl ve Ürünleri Analiz Yöntemleri*”. Gıda Teknolojisi Derneği Yayınları, No:14, s. 1-152, Ankara.

Özkutlu, F. (2021). “Kadmiyum ve NaCl uygulamalarının brokolide (*Brassica oleracea* var. *italica*) kuru madde miktarı ve besin elementi içeriğine etkisi”. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 8 (1), 77–84. <https://doi.org/10.30910/turkjans.712033>

Pereira, T. S., Souza, C. L. F., Lima, E. J. A., Batista, B. L. ve Lobato, A. K. S. (2018). “Silicon deposition in roots minimizes the cadmium accumulation and oxidative stress in leaves of cowpea plants”. *Physiology and Molecular Biology Plants*, 24 (1), 99–114. <https://dx.doi.org/10.1007%2Fs12298-017-0494-z>

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, M. F., Ghosal, A., Alam, M. F. ve Kabir, A. H. (2017). “Remediation of cadmium toxicity in field peas (*Pisum sativum* L.) through exogenous silicon”. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 135, 165-172. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.09.019>

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>

Raven, J.A. (1983). “The transport and function of silicon in plants”. *Biological Reviews*. 58, 179- 207. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1983.tb00385.x>

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>

Rizwan, M., Meunier, J. D., Miche, H. ve Keller, C. (2012). “Effect of silicon on reducing cadmium toxicity in durum wheat (*Triticum turgidum* L. cv. Claudio W.) grown in

a soil with aged contamination”. *Journal of Hazardous Materials*. 209-210, 326-334. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.01.033>

Romero-Aranda, M. R., Jurado, O. ve Cuartero, J. (2006). “Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status”. *Journal of Plant Physiology*, 63 (8), 847-855. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.05.010>

Rostami, M., Mohammadi, H., Müller, T. ve Mirzaeitalarposhti, R. (2019). “Silicon application affects cadmium translocation and physiological traits of *Lallemantia Royleana* Under cadmium stress”. *Journal of Plant Nutrition*, 43 (5), 753–761. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1701022>

Roth, U., Roepenack-Lahaye, E. V. ve Clemens, S. (2006). “Proteome changes in *Arabidopsis thaliana* roots upon exposure to Cd²⁺”. *Journal of Experimental Botany*, 57 (15), 4003-4013. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl170>

Salt, D., Price, R., Pickering, I. ve Raskin, I. (1995). “Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in indian mustard”. *Plant Physiology*, 109, 1427-1433. <https://doi.org/10.1104/pp.109.4.1427>

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)

Sarkar, B. (eds) (2002). “Heavy metals in the environment”. Marcel Dekker, New York, 725 pp. ISBN, 0-8247-0630-7.

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>

Sheoran, I. S., Singal, H. R. ve Singh, R. (1990). "Effect of cadmium and nickel on photosynthesis and enzymes of the photosynthetic carbon reduction cycle in pigeon pea (*Cajanus cajan* L.)". *Photosynthesis Research*, 23, 345-351. <https://doi.org/10.1007/BF00034865>

Shi, G., Cai, Q., Liu, C. ve Wu, L. (2010). "Silicon alleviates cadmium toxicity in peanut plants in relation to cadmium distribution and stimulation of antioxidative enzymes". *Plant Growth Regulation*, 61, 45–52. <https://doi.org/10.1007/s10725-010-9447-z>

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>

Shi, X., Zhang, C., Wang, H. ve Zhang, F. (2005). "Effect of si on the distribution of cadmium in rice seedlings". *Plant and Soil*, 272, 53–60. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-3920-2>

Shi, Z., Yang, S., Han, D., Zhou, Z., Li, X., Liu, Y. ve Zhang B. (2018). "Silicon alleviates cadmium toxicity in wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) by reducing cadmium uptake and enhancing antioxidative capacity". *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 7638–7646. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1077-9>

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>

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)

Tanker, N., Koyuncu, M. ve Coşkun, M. (2007). “Solanaceae”. *Farmasötik Botanik*, Ankara Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Yayınları, Ankara, 296-301.

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>

Tsadilas, C. D., Karaivazoglou, N. A., Tsotsolis, N. C., Stamadiadis, S. ve Samaras V. (2005). “Cadmium uptake by tobacco as affected by liming, n form, and year of cultivation”. *Environmental Pollution*, 134, 239-246. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.08.008>

Vaculík, M., Lux, A., Luxová, M., Tanimoto, E. ve Lichtscheid, I. (2009). “Silicon mitigates cadmium inhibitory effects in young maize plants”. *Environmental and Experimental Botany* 67, 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.012>

Vaculík, M., Landberg, T., Greger, M., Luxová, M., Stoláriková, M. ve Lux, A. (2012). “Silicon modifies root anatomy, and uptake and subcellular distribution of cadmium in young maize plants”. *Annals of Botany* 110, 433–443. <https://doi.org/10.1093/aob/mcs039>

Vaculík, M., Lukačová, Z., Bokor, B., Martinka, M., Tripathi, D. K. ve Lux, A. (2020). “Alleviation mechanisms of metal(loid) stress in plants by silicon: a review”. *Journal of Experimental Botany*. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa288>

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>

Van Assche, F. ve Clijsters, H. (1990). “Effect of metalson enzyme activity in plants”. *Plant Cell Environment*, 13, 195- 206. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1990.tb01304.x>

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>

Vogel-Mikuš, K., Drobne, D. ve Regvar, M. (2005). "Zn, Cd and Pb accumulation and arbuscular mycorrhizal colonisation of pennycress *Thlapsi praecox* Wulf. (Brassicaceae) from the vicinity of a lead mine and smelter in Slovenia". *Environmental Pollution*, 133 (2), 233-242. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.06.021>

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, L., Cao, J., Chen, D., Liu, X., Lu, H. ve Liu, Z. (2009). "Role of oxidative stress, apoptosis, and intracellular homeostasis in primary cultures of rat proximal tubular cells exposed to cadmium". *Biological Trace Element Research*, 127, 53-68. <https://doi.org/10.1007/s12011-008-8223-7>

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>

Wu, J. W., Shi, Y., Zhu, Y. X., Wang, Y. C. ve Gong, H. J. (2013). "Mechanisms of enhanced heavy metal tolerance in plants by silicon: a review". *Pedosphere*, 23, 815-825. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(13\)60073-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60073-9)

Wu, J., Geilfus, C. M., Pitann, B. ve Mühling, K. H. (2016). "Silicon-enhanced oxalate exudation contributes to alleviation of cadmium toxicity in wheat". *Environmental and Experimental Botany*, 131, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.06.012>

Wu, J., Guo, J., Hu, Y. ve Gong, H. (2015). "Distinct physiological responses of tomato and cucumber plants in silicon mediated alleviation of cadmium stress". *Frontiers in Plant Science*, 6, 453. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00453>

Yang, X., Baligar, V. C., Martens, D. C. ve Clark, R. B. (1996). "Cadmium effects on influx and transport of mineral nutrients in plant species". *Journal of Plant Nutrition*, 19 (3-4), 643-656. <https://doi.org/10.1080/01904169609365148>

Ye, J., Yan, C., Liu, J., Lu, H., Liu, T. ve Song, Z. (2012). "Effects of silicon on the distribution of cadmium compartmentation in root tips of *Kandelia obovata* (S., L.) yong. *Environmental Pollution*. 162, 369-373. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.002>

Zaheer, M. M., Yasin, N. A., Ahmad, S. R., Khan, W. U., Ahmad, A., Ali, A. ve Rehman, S. U. (2017). "Amelioration of cadmium stress in gladiolus (*Gladiolus grandiflora* L.) by application of potassium and silicon". *Journal of Plant Nutrition*, 41 (4), 461–476. <http://doi.org/10.1080/01904167.2017.1385808>

Zengin, K. F ve Munzuroğlu, Ö. (2005). "Fasulye fidelerinin (*Phaseolus vulgaris* L.Strike) klorofil ve karotenoid miktarı üzerine bazı ağır metallerin (Ni^{+2} , Co^{+2} , Cr^{+3} , Zn^{+2}) etkileri". *F.Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17(1), 164-172.

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, Q., Yan, C., Liu, J., Lu, H., Wang, W., Du, J. ve Duan, H. (2013). "Silicon alleviates cadmium toxicity in *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. seedlings in relation to root anatomy and radial oxygen loss". *Marine Pollution Bulletin*, 76, 187-193 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.09.005>

Zhang, X., Zhang, X., Gao, B., Li, Z., Xia, H., Li, H. ve Li, J. (2014a). "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.2014.04.0300>