

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİLİSYUMUN (Si) SORGUM BİTKİSİNDE (*Sorghum bicolor* L.)
KADMİYUM (Cd) STRESİNİ HAFİFLETİCİ ROLÜNÜN
ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
HAZEL GÖKDERE

TARLA BİTKİLERİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Dr. Öğr. Üyesi Hava Şeyma İNCİ

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI
Dr. Öğr. Üyesi Bedriye BİLİR

BİNGÖL-2025

**SİLİSYUMUN (Si) SORGUM BİTKİSİNDE (*Sorghum bicolor* L.)
KADMIYUM(Cd) STRESİNİ HAFİFLETİCİ ROLÜNÜN ARAŞTIRILMASI**

Dr. Öğr. Üyesi Hava Şeyma İNCİ danışmanlığında, Hazel GÖKDERE tarafından hazırlanan bu çalışma 27/05/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Tarla Bitkileri Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Erdal ÇAÇAN	İmza	:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Hava Şeyma İNCİ	İmza	:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Bedriye BİLİR	İmza	:
Üye	: Dr. Öğr. Hasan KALE	İmza	:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Ömer Faruk DEMİR	İmza	:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun// tarih ve/
nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer ŞİAR
Enstitü Müdürü

Bu çalışma, TÜBİTAK 1002- A projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: 124O079

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam süresince her aşamada benimle birlikte büyük emekler sarf ederek maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, kıymetli bilgi ve birikimlerini paylaşarak, öğrenmekten ve öğretmekten asla vazgeçmeyen, bana olan inancını yitirmeden her konuda yapabileceğime inandıran ve cesaretlendiren, güler yüzüyle yolumu aydınlatan, kocaman kalbi ve sıcacık sevgisiyle bir abla olarak her zaman yanımda olan değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hava Şeyma İNCİ' ye sonsuz saygı, sevgi ve en içten şükranlarımı sunarım. Tez çalışmalarım sırasında maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, her daim varlığını hissettiğim, her başım sıkıştığında hoşgörüsü ile yardımcı olan, değerli bilgilerini benimle paylaşarak yaptığı yönlendirmeler ve katkılarından dolayı ikinci danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Bedriye BİLİR'e sonsuz saygı, sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında her zaman çok büyük destekçim olarak, lisans ve yüksek lisans eğitimimde büyük emekleri olan, her zaman en doğru yolu gösteren ve bu yolda kendisini örnek almaktan mutluluk ve gurur duyduğum Sayın Prof. Dr. Hakan İNCİ'ye ve aynı zamanda ekibinde bulunarak her türlü yardımı ve desteği sağlayan, tüm içtenlikleri ile yanımda olan arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmam da her zaman yanımda olarak çok büyük desteğini hissettiğim ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Erdal ÇAÇAN hocama ve tüm tarla bitkileri bölüm hocalarıma teşekkür ederim.

Bu süreçte yanımda olarak çalışmanın en iyi şekilde ilerleyebilmesi için tüm özverileri ile yardımcı olan başta Faik BİNGÖL ve Bayram BİLİCİ olmak üzere Gıda, Tarım ve Hayvancılık Meslek Yüksekokulu Tarla bitkileri programı öğrencilerine çok teşekkür ederim. Tez çalışmasına desteklerinden dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (Proje No: 1002-A/124O079) teşekkürlerimi sunarım. Her zaman çok büyük desteğini hissettiğim ve hissedeceğim, benim için hiçbir fedakârlıktan kaçınmadan yanımda olan, çok büyük saygı ve sevgi duyduğum canım babam ve anneme minnettarım.

Hazel GÖKDERE

Bingöl, 2025

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	vi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Kadmiyum (Cd).....	2
1.2. Silisyum (Si)	3
2. KAYNAK ÖZETLERİ	8
2.1. Silisyumun (Si) Kadmiyum (Cd) Alımındaki Etkileri	8
2.2. Silisyumun (Si) Kadmiyum (Cd) Alımındaki Etkisinin İncelendiği Çalışmalar	10
2.3. Bitkilerde Cd ve Si ile Fe, Zn, Mn P, K, Ca ve Mg Etkileşimleri	15
3. MATERYAL VE YÖNTEM	18
3.1. Hasat.....	23
3.2. Morfolojik Ölçümler	23
3.3. Bitkide Cd, Si, Fe, Zn ve Mn Konsantrasyonlarının Belirlenmesi (kök, gövde, yaprak ve salkım)	24
3.4. Toprakta Ölçülen Parametreler	25
3.5. Toprak Örnekleri İçin Alınabilir Si Belirlenmesi	25
3.6. Yem Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi	26
3.7. İstatistiksel Analiz	26
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	27
4.1. Bitki Organlarında Cd, Si, Fe, Mn ve Zn Konsantrasyonları.....	27
4.1.1. Bitkide Cd Akümülasyonu	27

4.1.2. Bitkide Si Konsantrasyonu.....	36
4.1.3. Bitkide Fe Konsantrasyonu	41
4.1.4. Bitkide Mn Konsantrasyonu	46
4.1.5. Bitkide Zn Konsantrasyonu.....	51
4.2. Kadmiyum (Cd) ve Silisyum (Si) Uygulamalarının Sorgumun Yem Kalite Özelliklerine Etkisi	56
4.2.1. Gövde, Yaprak ve Salkımlarda P (%) İçeriği.....	56
4.2.2. Gövde, Yaprak ve Salkımlarda K (%) İçeriği.....	60
4.2.3. Gövde, Yaprak ve Salkımlarda Ca (%) İçeriği	65
4.2.4. Gövde, Yaprak ve Salkımlarda Mg (%) İçeriği	69
4.2.5. Gövde, Yaprak ve Salkımlarda ADF (%) Oranı	73
4.2.6. Gövde, Yaprak ve Salkımlarda NDF (%) Oranı	77
4.2.7. Gövde, Yaprak ve Salkımlarda Ham Protein (HP) (%) Oranı	81
4.2.8. Gövde, Yaprak ve Salkımlarda Ham Kül (HK) (%) Oranı	85
4.3. Kadmiyum (Cd) ve Silisyum (Si) Uygulamalarının Sorgumun Morfolojik Özelliklerine Etkisi	89
4.3.1. Bitki Boyu (cm)	89
4.3.2. Bitki Gövde Çapı (mm).....	90
4.3.3. Salkım Uzunluğu (cm)	91
4.3.4. Kuru Kök Ağırlığı (g)	92
4.3.5. Kuru Sap Ağırlığı (g)	93
4.3.6. Kuru Yaprak Ağırlığı (g)	94
4.3.7. Kuru Salkım Ağırlığı (g).....	95
4.3.8. Tüm Bitki Ağırlığı (g).....	97
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	99
KAYNAKLAR	100

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Si	: Silisyum
μM	: Mikromolar
Ni	: Nikel
Ca	: Kalsiyum
Cr	: Krom
Fe	: Demir
Ge	: Germanyum
HP	: Ham protein
HK	: Ham kül
da	: Dekar
Cd	: Kadmiyum
Zn	: Çinko
P	: Fosfor
H_4SiO_4	: Silisik asit
Mn	: Manganez
Mo	: Molibden
ADF	: Asit Deterjanda Çözünmeyen Lif
NDF	: Nötral Deterjanda Çözünmeyen Lif
kg	: Kilogram
mm	: Milimetre
Pb	: Kurşun
Ag	: Gümüş
cm	: Santimetre

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Denemede uygulanan Cd ve Si konsantrasyonlarının gösterimi	19
Şekil 3.2. Toprak hazırlığı.....	20
Şekil 3.3. Kadmiyum ve Si dozlarının hazırlığı ve uygulanması.....	21
Şekil 3.4. Fidelerin saksılara aktarımı.....	22
Şekil 3.5. Çiçeklenme öncesi bitkilere ait görüntüler	22
Şekil 3.6. Salkım oluşturan bitkilere ait görüntüler	23
Şekil 3.7. Hasat dönemine ait görüntüler	24
Şekil 3.8. Bitkilerin analiz aşamasına ait görüntüler.....	25
Şekil 3.9. Toprak analizine ait görüntüler	26
Şekil 4.1. Kökteki Cd konsantrasyonuna Si uygulamasının % etkisi	29
Şekil 4.2. Gövdedeki Cd konsantrasyonuna Si uygulamasının % etkisi.....	31
Şekil 4.3. Yapraktaki Cd konsantrasyonuna Si uygulamasının % etkisi	33
Şekil 4.4. Salkımdaki Cd konsantrasyonuna Si uygulamasının % etkisi.....	34

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3. 1. Tarım ve Orman Bakanlığı Bitkisel Üretim Genel Müdürlüğü Tohumluk Tescil ve Sertifikasyon Merkez Müdürlüğü verilerine göre çeşide ait özellikler (Anonim, 2024)	18
Tablo 3. 2. Denemede kullanılan toprağa ait bazı özellikler.....	18
Tablo 4. 1. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun kök, gövde, yaprak ve salkımlarındaki Cd içeriklerine ait varyans analizi	27
Tablo 4. 2. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, köklerdeki Cd içeriklerine (mg kg ⁻¹) etkisi ve oluşan ortalamalar	28
Tablo 4. 3. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, gövdedeki Cd içeriklerine (mg kg ⁻¹) etkisi ve oluşan ortalamalar	30
Tablo 4. 4. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, yapraklardaki Cd içeriklerine (mg kg ⁻¹) etkisi ve oluşan ortalamalar	32
Tablo 4. 5. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımlardaki Cd içeriklerine (mg kg ⁻¹) etkisi ve oluşan ortalamalar	33
Tablo 4. 6. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki Cd içeriğine (mg kg ⁻¹) ve ortalamalarına etkisi	35
Tablo 4. 7. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun kök, gövde, yaprak ve salkımlarındaki Si içeriklerine (mg kg ⁻¹) ait varyans analizi	37
Tablo 4. 8. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, köklerdeki Si içeriklerine (g kg ⁻¹) etkisi ve oluşan ortalamalar	37
Tablo 4. 9. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, gövdedeki Si içeriklerine (g kg ⁻¹) etkisi ve oluşan ortalamalar	38
Tablo 4. 10. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, yapraklardaki Si içeriklerine (g kg ⁻¹) etkisi ve oluşan ortalamalar	39
Tablo 4. 11. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımlardaki Si içeriklerine (g kg ⁻¹) etkisi ve oluşan ortalamalar	40
Tablo 4. 12. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki Si içeriğine (g kg ⁻¹) ve ortalamalarına etkisi	41

Tablo 4. 13. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun kök, gövde, yaprak ve salkımlarındaki Fe içeriklerine ait varyans analizi.....	42
Tablo 4. 14. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, köklerdeki Fe içeriklerine (mg kg^{-1}) etkisi ve oluşan ortalamalar	42
Tablo 4. 15. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, gövdedeki Fe içeriklerine (mg kg^{-1}) etkisi ve oluşan ortalamalar	43
Tablo 4. 16. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, yapraklardaki Fe içeriklerine (mg kg^{-1}) etkisi ve oluşan ortalamalar	44
Tablo 4. 17. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımlardaki Fe içeriklerine (mg kg^{-1}) etkisi ve oluşan ortalamalar	44
Tablo 4. 18. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki Si içeriğine (mg kg^{-1}) ve ortalamalarına etkisi	45
Tablo 4. 19. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun kök, gövde, yaprak ve salkımlarındaki Mn içeriklerine ait varyans analizi	47
Tablo 4. 20. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, köklerdeki, Mn içeriklerine (mg kg^{-1}) etkisi ve oluşan ortalamalar	47
Tablo 4. 21. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, gövdedeki Mn içeriklerine (mg kg^{-1}) etkisi ve oluşan ortalamalar	48
Tablo 4.22. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, yapraklardaki, Mn içeriklerine (mg kg^{-1}) etkisi ve oluşan ortalamalar	49
Tablo 4. 23. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımlardaki Mn içeriklerine (mg kg^{-1}) etkisi ve oluşan ortalamalar	49
Tablo 4. 23. (Devam) Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımlardaki Mn içeriklerine (mg kg^{-1}) etkisi ve oluşan ortalamalar.....	50
Tablo 4. 24. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki Mn içeriğine (mg kg^{-1}) ve ortalamalarına etkisi	50
Tablo 4. 25. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun kök, gövde, yaprak ve salkımlarındaki Zn içeriklerine ait varyans analizi	52
Tablo 4. 26. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, köklerdeki Zn içeriklerine (mg kg^{-1}) etkisi ve oluşan ortalamalar	52
Tablo 4. 27. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, gövdedeki Zn içeriklerine (mg kg^{-1}) etkisi ve oluşan ortalamalar	53

Tablo 4. 28. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, yapraklardaki Zn içeriklerine (mg kg ⁻¹ etkisi ve oluşan ortalamalar	54
Tablo 4. 29. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımlardaki Zn içeriklerine (mg kg ⁻¹) etkisi ve oluşan ortalamalar	54
Tablo 4. 30. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki Zn içeriğine (mg kg ⁻¹) ve ortalamalarına etkisi	55
Tablo 4. 31. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun gövde, yaprak ve salkımlarındaki P içeriklerine ait varyans analizi.....	57
Tablo 4. 32. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, gövdenin P içeriğine (%) etkisi ve oluşan ortalamalar	57
Tablo 4. 33. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, yapraklardaki P içeriğine (%) etkisi ve oluşan ortalamalar	58
Tablo 4. 34. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımlardaki P içeriğine (%) etkisi ve oluşan ortalamalar	59
Tablo 4. 35. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki P içeriğine (%) ve ortalamalarına etkisi	59
Tablo 4. 35. (Devam) Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki P içeriğine (%) ve ortalamalarına etkisi	60
Tablo 4. 36. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun gövde, yaprak ve salkımlarındaki K içeriklerine ait varyans analizi.....	61
Tablo 4. 37. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, gövdenin K içeriğine (%) etkisi ve oluşan ortalamalar	61
Tablo 4. 38. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, yaprağın K içeriğine (%) etkisi ve oluşan ortalamalar	62
Tablo 4. 39. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımlardaki K içeriğine (%) etkisi ve oluşan ortalamalar	63
Tablo 4. 40. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki K içeriğine (%) ve ortalamalarına etkisi	63
Tablo 4. 40. (Devam) Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki K içeriğine (%) ve ortalamalarına etkisi	64
Tablo 4. 41. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun gövde, yaprak ve salkımlarındaki Ca içeriklerine ait varyans analizi	65

Tablo 4. 42. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, gövdenin Ca içeriğine (%) etkisi ve oluşan ortalamalar	65
Tablo 4. 43. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, yaprağın Ca içeriğine (%) etkisi ve oluşan ortalamalar	66
Tablo 4. 44. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımın Ca içeriğine (%) etkisi ve oluşan ortalamalar	67
Tablo 4. 45. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki Ca içeriğine (%) ve ortalamalarına etkisi	67
Tablo 4. 45. (Devam) Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki Ca içeriğine (%) ve ortalamalarına etkisi	68
Tablo 4. 46. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun gövde, yaprak ve salkımlarındaki Ca içeriklerine ait varyans analizi	69
Tablo 4. 47. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, gövdenin Mg içeriğine (%) etkisi ve oluşan ortalamalar	70
Tablo 4. 48. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, yaprağın Mg içeriğine (%) etkisi ve oluşan ortalamalar	70
Tablo 4. 49. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımın Mg içeriğine (%) etkisi ve oluşan ortalamalar	71
Tablo 4. 50. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarının Mg (%) içeriklerine ve ortalamalarına etkisi	72
Tablo 4. 51. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun gövde, yaprak ve salkımlarındaki ADF oranlarına ait varyans analizi	73
Tablo 4. 52. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, gövdenin ADF oranına (%) etkisi ve oluşan ortalamalar	74
Tablo 4. 53. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, yaprağın ADF oranına (%) etkisi ve oluşan ortalamalar	74
Tablo 4. 54. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımın ADF oranına (%) etkisi ve oluşan ortalamalar	75
Tablo 4. 55. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarının ADF (%) oranlarına ve ortalamalarına etkisi	76
Tablo 4. 56. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun gövde, yaprak ve salkımlarındaki NDF oranlarına ait varyans analizi	77

Tablo 4. 57. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, gövdenin NDF oranına (%) etkisi ve oluşan ortalamalar	78
Tablo 4. 58. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, yaprağın NDF oranına (%) etkisi ve oluşan ortalamalar	78
Tablo 4. 59. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımın NDF oranına (%) etkisi ve oluşan ortalamalar	79
Tablo 4. 60. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarının NDF (%) oranlarına ve ortalamalarına etkisi	80
Tablo 4. 61. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun gövde, yaprak ve salkımlarındaki ham kül (HK) oranlarına ait varyans analizi	81
Tablo 4. 62. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, gövdenin ham protein (HP) oranına (%) etkisi ve oluşan ortalamalar	82
Tablo 4. 63. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, yaprağın ham protein (HP) oranına (%) etkisi ve oluşan ortalamalar	82
Tablo 4. 64. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımın ham protein (HP) oranına (%) etkisi ve oluşan ortalamalar	83
Tablo 4. 65. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarının ham protein (HP) (%) oranlarına ve ortalamalarına etkisi	84
Tablo 4. 66. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun gövde, yaprak ve salkımlarındaki ham kül (HK) oranlarına ait varyans analizi	85
Tablo 4. 67. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, gövdenin ham kül (HK) oranına (%) etkisi ve oluşan ortalamalar	85
Tablo 4. 68. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, yaprağın ham kül (HK) oranına (%) etkisi ve oluşan ortalamalar	86
Tablo 4. 69. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımın ham kül (HK) oranına (%) etkisi ve oluşan ortalamalar	87
Tablo 4. 70. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarının ham kül (HK) (%) oranlarına ve ortalamalarına etkisi	87
Tablo 4. 70. (Devam) Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarının ham kül (HK) (%) oranlarına ve ortalamalarına etkisi	88
Tablo 4. 71. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun bitki boyuna ait varyans analizi	89
Tablo 4. 72. Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının sorgumun bitki boyuna (cm) etkisi ve oluşan ortalamalar	89

Tablo 4. 73. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun gövde çapına ait varyans analizi.....	90
Tablo 4. 74. Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının sorgumun gövde çapına (mm) etkisi ve oluşan ortalamalar	90
Tablo 4. 75. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun salkım uzunluğuna ait varyans analizi	91
Tablo 4. 76. Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının sorgumun salkım uzunluğuna (cm) etkisi ve oluşan ortalamalar	92
Tablo 4. 77. Farklı Cd ve Si dozlarının, kuru kök ağırlığına ait varyans analizi	92
Tablo 4. 78. Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının sorgumun kuru kök ağırlığına (g) etkisi ve oluşan ortalamalar	93
Tablo 4. 79. Farklı Cd ve Si dozlarının, kuru kök ağırlığına ait varyans analizi	93
Tablo 4. 80. Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının sorgumun kuru sap ağırlığına (g) etkisi ve oluşan ortalamalar	94
Tablo 4. 81. Farklı Cd ve Si dozlarının, kuru yaprak ağırlığına ait varyans analizi	94
Tablo 4. 82. Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının sorgumun kuru yaprak ağırlığına (g) etkisi ve oluşan ortalamalar	95
Tablo 4. 83. Farklı Cd ve Si dozlarının, kuru salkım ağırlığına ait varyans analizi.....	96
Tablo 4. 84. Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının sorgumun kuru salkım ağırlığına (g) etkisi ve oluşan ortalamalar	96
Tablo 4. 85. Farklı Cd ve Si dozlarının, kuru salkım ağırlığına ait varyans analizi.....	97
Tablo 4. 86. Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının sorgumun tüm bitki ağırlığına (g) etkisi ve oluşan ortalamalar	97

SİLİSYUMUN (Si) SORGUM BİTKİSİNDE (*Sorghum bicolor* L.) KADMIYUM (Cd) STRESİNİ HAFİFLETİCİ ROLÜNÜN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Bu çalışma kadmiyum (Cd) stresi altındaki sorgum bitkisinde silisyum (Si) uygulamasının bitkide meydana getireceği öngörülen, hafifletici etkileri incelemek amacıyla saksı denemesi olarak yürütülmüştür. Deneme tesadüf parsellerinde faktöriyel deneme desenine göre 4 Si dozu (0, 100, 200 ve 300 mg kg⁻¹) ve 3 Cd dozu (0, 10 ve 20 mg kg⁻¹) ile 4 tekkerrürlü olarak kurulmuştur. Araştırmada Master BMR sorgum çeşidi kullanılmıştır. Bitkiler 90 gün sonra hasat edilmiş ve bitki organlarında Cd, Si, Fe, Mn ve Zn konsantrasyonları, yem kalite özellikleri ve sorgumun morfolojik özellikleri incelenmiştir.

Araştırmada Cd*Si interaksiyonu sonucunda sorgumun kök, gövde, yaprak ve salkımlarındaki Cd, Fe ve Zn konsantrasyonları, yapraklarındaki Si konsantrasyonu, kök ve gövdesindeki Mn konsantrasyonu, gövde ve yaprakta P oranı, yaprak ve salkımda K oranı, salkımda Ca oranı, gövde ve salkımda Mg oranı, gövdede ADF (Asit Deterjan Lif) oranı, NDF (Nötral Deterjan Lif) oranı, HK (Ham Kül) oranı, kuru sap ve kuru salkım ağırlıkları p<0,01 seviyesinde önemli bulunmuştur.

Kadmiyum sorgumun diğer organlarına göre en fazla köklerinde birikmiştir; kök>gövde>yaprak=salkım. Silisyum uygulaması dokularda Si içeriğinin artışına neden olmakla birlikte yapraklar ve özellikle salkımlarda köklerden ve gövdeden daha fazla Si birikimi gerçekleşmiştir. Uygulamalar (Cd*Si) kökte Fe, Mn ve Zn içeriğinin, gövde ve yapraklarda Ca ve Mg oranının azalmasına neden olmuştur. Yine uygulamalar (Cd*Si) gövde ve yapraklarda ADF, NDF ve HK oranlarının artmasına, yapraklarda ham protein oranının azalmasına neden olurken salkımlarda HP (Ham Protein) oranını etkilemediği görülmüştür. Silisyum uygulamasının kuru yaprak, kuru salkım ve tüm bitki ağırlığını arttırdığı belirlenmiştir.

Sonuç olarak Si uygulamasının sorgum bitkisinde Cd stresini hafifletmedeki rolünde; kökte Cd konsantrasyonunu en çok azaltan (%38) Cd₁₀Si₂₀₀ uygulaması, gövdede (%28,9), yapraklarda (%30,9) ve salkımlarda (%86,6) Cd konsantrasyonunu en çok azaltan Cd₁₀Si₃₀₀ uygulaması olmuştur. Uygulanan 20 mg kg⁻¹ Cd dozunda, bitkide gerçekleşen Cd akümülyasyonun hafifletilmesinde 3 farklı Si dozunda etkili olmadığı anlaşılmaktadır. Salkımlara Cd taşınımında, 10 mg kg⁻¹ Cd varlığında 300 mg kg⁻¹ Si uygulamasının taşınımı engellemekte güçlü bir potansiyele sahip olduğu görülmüştür. Bu çalışmada kullanılan toprağa benzer özelliklerdeki kontamine alanlarda (<10 mg kg⁻¹), 300 mg kg⁻¹ silisyumun Cd taşınımını engellemekte umud vaad edeceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kadmiyum, silisyum, sorgum, yem kalite, akümülyasyon.

INVESTIGATION OF THE ROLE OF SILICON (Si) IN MITIGATING CADMIUM (Cd) STRESS IN SORGHUM (*Sorghum bicolor* L.)

ABSTRACT

This study was conducted as a pot experiment to investigate the predicted mitigating effects of silicon (Si) treatment on sorghum under cadmium (Cd) stress. The experiment was established in 4 replications with 4 Si doses (0, 100, 200 and 300 mg kg⁻¹) and 3 Cd doses (0, 10 and 20 mg kg⁻¹) according to the factorial design in randomised plots. Master BMR sorghum variety was used in the study. The plants were harvested after 90 days and the concentrations of Cd, Si, Fe, Mn and Zn in plant organs, forage quality and morphological characteristics of sorghum were investigated.

As a result of Cd*Si interaction, Cd, Fe and Zn concentrations in roots, stems, leaves and panicles, Si concentration in leaves, Mn concentration in roots and stems, P content in stems and leaves, K content in leaves and panicles, Ca content in panicles, Mg content in stems and panicles, ADF (Acid Detergent Fibre) content in stems, NDF (Neutral Detergent Fibre) content in leaves, CA (Crude Ash) content in stems and leaves, dry stem and dry panicle weights were found significant at p<0,01 level was found to be significant.

Cadmium accumulated more in roots than in other organs of sorghum; root>stem>leaf=panicle. Silicon application caused an increase in Si content in tissues, but leaves and especially panicles accumulated more Si than roots and stems. The treatments (Cd*Si) caused a decrease in Fe, Mn and Zn content in roots, Ca and Mg content in stems and leaves. Again, the treatments (Cd*Si) caused an increase in ADF, NDF and crude ash content in stems and leaves and a decrease in crude protein content in leaves, but did not affect CP (crude protein) content in panicles. Silicon treatment increased dry leaf, dry panicle and total plant weight.

As a result, in the role of Si treatment in alleviating Cd stress in sorghum plants, Cd₁₀Si₂₀₀ treatment reduced the Cd concentration in the root (38%), Cd₁₀Si₃₀₀ treatment reduced the Cd concentration in the stem (28.9%), leaves (30.9%) and panicles (86.6%). At the applied dose of 20 mg kg⁻¹ Cd, it is understood that 3 different Si doses were not effective in alleviating Cd accumulation in the plant.

In Cd translocation to panicles, 300 mg kg⁻¹ Si treatment in the presence of 10 mg kg⁻¹ Cd was found to have a strong potential to inhibit Cd translocation. In contaminated areas (<10 mg kg⁻¹) with similar characteristics to the soil used in this study, 300 mg kg⁻¹ silicon is thought to be promising in preventing Cd translocation.

Keywords: Cadmium, silicon, sorghum, feed quality, accumulation.

1. GİRİŞ

Sorgum (*Sorghum bicolor* L.) “Darıların Kralı” olarak adlandırılan, Poaceae familyasına ait bir bitkidir, kurak ve yarı kurak bölgelerde tahıl, yem, şeker, biyoenerji ve fitoremediasyon amaçlı yetiştirilmektedir (Rajabi Dehnavi vd. 2020). Basit yetiştirme yöntemleri ile kısa bir büyüme döneminde önemli miktarda biyokütle üretimi sergilemekte ve toprak iyileştirme amacıyla da diğer bitkilere göre belirgin avantajlara sahip olmaktadır (Wang vd. 2023). Sorgum birçok ülkede gıda ve yem olarak kullanılan, üretim miktarı yönünden Dünya’da buğday, pirinç, mısır ve arpadan sonra beşinci sırada yer alan en önemli bitkilerden biridir (FAOSTAT, 2020). FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) verilerine göre Dünya sorgum üretimi 2022 yılında 40.762.472 ha alanda 57.581.942 ton olarak gerçekleşmiştir (FAO, 2024). Türkiye 2023 yılı sorgum üretimi yaklaşık 96 da (59 ton sorgum+37 ton yeşil ot) alanda 177 ton (18 ton sorgum+159 ton yeşil ot) olarak gerçekleşmiştir (TÜİK, 2024).

Sorgum mükemmel bir besin kaynağıdır ve çoklu çevresel stres faktörlerini tolere edebilen bir C4 bitkisidir, bu da onu birçok bölgede yetiştirmek için ideal bir ürün haline getirmektedir (Roussi vd. 2022; Ennoury vd. 2023). Küresel olarak üretilen sorgumun %50’ sine yakını insan beslenmesi için kullanılırken ABD’de %90’ı hayvan beslenmesinde kullanılmaktadır (Hamman vd. 2001). Küresel perspektiften bakıldığında, ABD en büyük sorgum tahılı üreticisidir, ancak çoğu gelişmiş ülkede olduğu gibi sorgum esas olarak hayvan yemi ve etanol üretimi için yetiştirilmektedir (Nesbitt, 2023).

Sorgum, kirlenmiş topraktan ağır metalleri uzaklaştırmada sahip olduğu kapasite ile önemli bitkilerden biri olarak kabul edilmektedir (Shafiei Darabi vd. 2016). Sorgum bir ağır metal akümülatörüdür ve farklı çevresel şartlara yanıt verme kapasitesi nedeniyle çevre korumada önemli bir rol oynamaktadır (Jawad Hassan vd. 2020; Wang vd. 2021). Singh vd. (2024), sorgumun buğday ve mısıra göre kadmiyum (Cd) kirliliğine daha toleranslı olduğunu ve ayrıca sorgumun kadmiyumu sudan uzaklaştırmak için iyi bir adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğunu bildirmişlerdir.

Ağır metal kavramı Kahvecioğlu vd. (2003) tarafından, dansitesi cm^3 'lük hacimde 5 g'dan daha ağır olan metaller için (Cd, Cr, Ni, Fe gibi 60 tan fazla element) kullanılmıştır. Duffus, (2002) ise “ağır metaller” teriminin yaygın olarak kullanılmaya başlandığını, çoğunlukla kontamine ve toksisite veya ekotoksisite ile ilişkilendirilen elementler (metaller) için bir grup adı olarak kullanıldığını ifade etmiştir. Civa, kurşun, kadmiyum, krom ve arsenik gibi metallerin insanlar için toksik olduğu bilinmektedir (Balali Mood vd. 2021).

Ağır metaller hem doğal hem de insan kaynaklı olabilir ve çeşitli çevresel sektörlerde (toprak, hava, su ve ara yüzey) birikebilir. Birçok çalışma, ağır metal kirliliğinin çeşitli doğal nedenlerini göstermiştir. Metaller endemik alanlarından doğal ayrışma süreçleri yoluyla çeşitli çevresel segmentlere aktarılabilir. Doğal ağır metal emisyonları çeşitli çevresel koşullar altında meydana gelir. Bu tür emisyonlar arasında kaya ayrışması, deniz tuzu spreyleri, volkanik patlamalar, biyogenik kaynaklar ve rüzgarla taşınan toprak partikülleri yer almaktadır (Bakshe ve Jugade 2023).

1.1 Kadmiyum (Cd)

Kadmiyum (Cd), her ortamda bulunabilen en endişe verici ağır metallerden biri olarak bilinmektedir (Rai vd. 2016). Kadmiyum kontaminasyonu tüm dünyada önemli bir çevresel sorundur ve bitki gelişimini olumsuz etkilemektedir. Kadmiyum insanlar için Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı (IARC) tarafından 1. sınıf kanserojen olarak bildirilmiştir (IARC, 1993).

Farklı ülkelerde referans topraklarda Cd içeriğinin 0.06 ila 4.3 mg kg^{-1} aralığın da olduğu bildirilmiştir (Govindaraju, 1994).

Tarımsal alanlarda Cd bulaşıklığı, fosfat kaynaklı gübreler ve kanalizasyon atıkları sebebiyle de gerçekleşmektedir (Haktanır, 1987). Çinko rezervlerinin, işletmeciliğinde (madencilik) yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Kadmiyumun Ni-Cd ve Ag-Cd pillerinin üretiminde pigmentler kaplamalar ve stabilizatörlerde de kullanımı yaygındır (Kabata-Pendias, 2011).

Yerkabuğunun ortalama Cd içeriği 0.1 mg kg^{-1} iken (Reimann ve Caritat, 1998) Dünya topraklarında Cd konsantrasyonu $0.01\text{-}1.0 \text{ mg kg}^{-1}$ arasında değişmekle birlikte, ortalama 0.36 mg kg^{-1} olarak bildirilmiştir (Kubier vd. 2019).

Bitkilerde Cd taşınımında ve birikiminde süreç şu şekilde ilerlemektedir; köklerin Cd alımı, ksilem ile kökten sürgünlere Cd translokasyonunu, daha sonra ksilem yoluyla floeme Cd translokasyonu ve floem vasıtasıyla meyvelere ya da tohumlara Cd transferi şeklindedir (Yamaguchi vd. 2012).

Chaney ve Hornick (1977), toprakta artan Cd seviyelerine bitkilerin tepkilerinin, bitkilerin kadmiyumu absorbe yeteneklerinde farklılık olduğunu ifade etmiştir. Simmons vd. (2003), pirinç tohumlarında soya fasulyesi tohumlarından daha fazla yüksek Cd akümüasyonu gerçekleştiğini bildirmiştir. Bitki organlarında kadmiyum dağılımında farklılık söz konusudur; kökten toprak üstü kısımlara özellikle yapraklara hızlı taşınma olduğu bilinmektedir.

Farklı bitkilerde yapılan araştırmalar sonucunda kadmiyumun büyümenin inhibisyonuna ve neredeyse bitkilerin ölümüne yol açabilecek fitotoksikite etkisine sahip olduğunu göstermiştir (Yi ve Wang, 2017). Bitkilerdeki Cd proteinlere bağlanarak, proteinlerin denatürasyonuna ve fonksiyon bozukluğuna neden olarak büyüme üzerine inhibe edici etkiye neden olabilmektedir (Asgher vd. 2015). Bitkilerde yüksek Cd akümüasyonunun, büyümenin gerilemesine, yaprak alanının küçülmesine, klorofilin azalmasına, fotosentez hızının düşmesine ve biyokütlenin azalışına sebep olduğu bilinmektedir (Zhu vd. 2021). Sönmez ve Kılıç (2021), sulama suyu, toprak ve bitkilerde toksik Cd konsantrasyonu için izin verilen sınır değerleri (WHO/FAO, 2007) sırasıyla şu şekilde bildirmişlerdir; sulama suyunda $0,01 \text{ } \mu\text{g ml}^{-1}$, bitkilerde $0,2 \text{ } \mu\text{g ml}^{-1}$ ve topraklarda $3 \text{ } \mu\text{g ml}^{-1}$.

1.2. Silisyum (Si)

Silisyum (Si), özellikle oksijen ile kombinasyon halinde, tüm kayaçların metalik olmayan temel bileşenleridir ve yalnızca biyokimyasal işlevi açısından iz element olarak kabul edilir. Litosferde en çok bulunan ikinci elementtir ve yer kabuğunun %25,7'sini (ağırlıkça) oluşturur. Silisyum çok yönlü özelliklerinden dolayı bazı çelik, alüminyum alaşımları, cam ve refrakter malzemelerin imalatı gibi birçok farklı sektörde kullanılmaktadır. Silisyum bir

yarı iletken olarak kabul edilir ve bu nedenle bilgisayar imalat işinde önemli bir maddedir. Ayrıca seramik, çimento, kağıt ve tekstil üretiminde ve böcek ilacı, kozmetik ve eczacılık dahil olmak üzere diğer birçok üretimde kullanılmaktadır (Kabata-Pendias, 2011).

Silisyum toprakta en çok bulunan elementtir, ancak bazı topraklarda içeriği çok daha yüksektir. Takeda vd. (2004), farklı toprak gruplarındaki ortalama SiO_2 içeriğine ilişkin verileri aşağıdaki şekilde (% olarak) sunmuştur: Andosoller, %43; Cambisoller, %56; Gleysoller, %63 ve Acrisoller, %66.

Yerkabuğunda oksijenden sonra en çok bulunan ikinci element silisyum olup özellikle biyotik ve abiyotik stres altında bitkilere sağladığı çok sayıda fayda nedeniyle yarı esansiyel bir element olarak kabul edilir (Rasoolizadeh vd. 2018).

Silisyum topraklarda bol miktarlarda bulunmasına rağmen, bitkilerin yararlanabileceği form çoğu toprak türünde genellikle sınırlıdır. Bitki kökleri silisyumu silisik asit (H_4SiO_4) formunda alır; toprak çözeltisindeki konsantrasyonu ise 0.1 ile 0.6 mmol L^{-1} arasında değişir (Hodson vd. 2005). Carlisle vd. (1974), toprak çözeltisinde çözünür silisyumun (esas olarak H_4SiO_4 olarak) yaklaşık $1\text{-}200 \text{ mg L}^{-1}$ ile arasında değiştiğini bildirmiştir. Bitkilerdeki Si konsantrasyonları, bitki türlerine göre 1 ile 100 g kg^{-1} arasında değişmektedir (Deshmukh vd. 2017). Örneğin, çim türlerindeki ortalama Si içeriği %0,3 ile %1,2 arasında değişirken, baklagillerdeki konsantrasyonları %0,05 ile %0,2 arasında değişir. Bazı türler $>\%10$ 'a kadar çok daha yüksek miktarlarda Si biriktirebilir, örneğin sazlar, ısırganlar, atkuyruğu ve diatomlar (Epstein, 1994). Pirinç, Si biriktirici olarak bilinir ve silisyumu gövdesinde $\%10$ 'a kadar ve tanelerde $\%4$ 'e kadar içerebilirler (Alyoshin vd. 1988).

Silisyumun topraktaki hareketliliği tek başına pH'dan doğru bir şekilde tahmin edilemese de, toprak pH'ının çözeltilerdeki Si konsantrasyonları üzerinde özellikle belirgin bir etkisi vardır (Kabata-Pendias, 2011). Genellikle Si, alkali topraklarda daha hareketlidir ancak Carlisle'nin (Krauskopf, 1959) tanımladığı gibi, pH'yı yaklaşık 9'a çıkarmak çözeltilerdeki Si konsantrasyonunu azaltır. Çözünmüş silikat (H_4SiO_4) formundaki silisyum, bitkiler tarafından kolayca emilir ve genellikle katı, şekilsiz bir Si opal olarak biriktirilir.

Silisyumun bazı bitki türlerinin gelişimi için gerekliliği, büyümeye ve verim artışına olan yararı, biyokimyasal reaksiyonları düzenlemesi, tuz, ağır metal ve patojenik streslere karşı

bitki direncini arttırması gibi etkileri birçok bilim adamı tarafından deneysel olarak onaylanmıştır (Datnoff vd. 2005; Horuz vd. 2017).

Önceleri silisyumun bitki biyolojisindeki rolü tam olarak anlaşılamadığı için yüksek bitkiler için gerekli bir element olarak bilinmemekteydi (Epstein, 1999), ancak son yıllarda yapılan çalışmalar silisyumun bitkilerin çevresel strese karşı dayanıklılığını artıran önemli bir element olduğunu doğrulamıştır (Savant vd. 1999). Ayrıca silisyumun bitki büyümesi, gelişmesi ve güçlü yapı için gerekli olduğuna inanılmaktadır (Richmond ve Sussman, 2003). Silisyum epidermal ve vasküler dokuların duvarlarını emprenye eder (Kaufman vd. 1969) böylece Si, bitki dokularını güçlendirir, su kaybını ve mantar enfeksiyonunu azaltır. Wallace (1971) çözüner silisyumun bitki büyümesini uyardığını bildirmiştir. Bu uyarım, silisyumun bitkiler tarafından artan P ve Mo alımı üzerindeki gözlenen etkileri ve ayrıca bitki dokularında Mn taşınması ile ilgili gibi olabilmektedir (Horst ve Marschner, 1978). Silisyumun B, Mn ve Fe alımı üzerindeki antagonistik etkileri de gözlemlenmiştir. Silisyum, arsenik (As) ve germanyumun (Ge) pirinç tanelerindeki mitokondri aktiviteleri üzerindeki zararlı etkilerini engellediği gibi (Alyoshin vd. 1988) Al ve Mn'nin fitotoksitesini azalttığı görülmektedir (Foy vd. 1978). Alyoshin (1989), kloroplastlardaki metabolik süreçler ve pirinç tanelerindeki fosforilasyon süreçleri üzerinde silisyumun faydalı bir etkisini gözlemlemiştir.

Miyake ve Takahashi (1978) Si eksikliğinin kültür solüsyonunda yetiştirilen domates bitkilerinin üreme organlarının gelişimini engellediğini bildirmiştir. Pirinç yetiştirilen bölgelerin topraklarında fitoyararlı Si eksikliği, kahverengi leke ve gövde çürümesi gibi bazı hastalıklara karşı direncin azalması nedeniyle pirinç üzerinde bozulma etkisine sahip olabilir (Rush ve Lee, 1992; Roy, 1996). Bu etkiler Si gübrelemesi kullanılarak en aza indirilebilir (Seebold vd. 2001).

Rodrigues vd. (2003), Brezilya'daki pirinç tarlalarında mevcut silisyumun olumlu etkilerini doğrulamıştır. Toprak çözeltisinde Mn-Si, Al-Si ve Fe-Si kompleksleri bitkilerde ağır metallerin toksitesini azaltmış, hücre duvarı kalınlığını artırmıştır. Ayrıca silikatlar, Na-silikat kompleksi oluşturarak sodyum (Na) iyonlarının konsantrasyonunu ve bitkide oluşacak tuz zararını azaltabilmektedir (Horuz, 2018).

Silisyumun (Si) Ağır Metal Stresindeki Etki Mekanizması:

Ağır metallerin immobilizasyonu: İmmobilizasyon ya toprak pH'sının artması ya da silikat komplekslerinin oluşumu yoluyla toprak çözeltisindeki metal türlerinin değişmesi nedeniyle gerçekleşmektedir ayrıca toprak substratında metal iyonlarının azaltılması, toksik metallerin birlikte çökeltilmesi, metal taşınımı ile ilgili gen düzenlemesi, şelasyon, antioksidanların uyarılması, Si tarafından uyarılan enzimatik ve enzimatik olmayan antioksidan sistem, ROS üretimini azaltarak oksidatif stresi düşürmeye yardımcı olması ve bitkilerdeki yapısal değişiklikler (Bhat vd. 2019).

Silisyum, toprak çözeltisinde silikat kompleksleri oluşturarak metallerin türlerini toksik formdan toksik olmayan forma değiştirmeye yardımcı olur. Silisyum katkılı toprakta Cd çoğunlukla oksit formunda bulunur veya Fe-Mn oksitleri tarafından adsorbe edilir (Liang vd. 2005).

Mineral-Si doğası gereği alkalidir bu nedenle yüzeyi büyük miktarda değiştirilebilir kasyonları ve az miktarda değiştirilebilir H^+ kolayca taşıyabilir, bu da topraktaki değiştirilebilir kasyonların güçlü hidrolizine neden olarak toprak çözeltisinde yüksek oranda NaOH ortaya çıkar ve toprak pH'sını daha da artırır (Ma vd. 2021). Ortaya çıkan yüksek toprak pH'sının Cd, Cr, Pb, Fe, Mn ve Zn gibi kasyonların kullanılabilirliğini azalttığını göstermiştir (Wan vd. 2019).

Türkiye bugün Çin, ABD gibi sanayi devi ülkelerin geldiği kirlilik noktasına büyük bir hızla yaklaşma riski altındadır, ağır metallerle bulaşık olmayan topraklarımız hızla azalmaktadır. En tehlikeli ağır metallerden biri olarak kabul edilen Cd, Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı tarafından insanlar için 1. sınıf kanserojen olarak belirlenmiştir (IARC, 1993). Özellikle tarımda gübreleme (fosforlu gübreler) ilaçlama gibi faaliyetler toprakları Cd ile kontamine edebilen etkenlerdir. Kadmiyum, topraklardan bitkilere bitkilerden hayvanlara ve insanlara transfer olmakta besin zincirine dahil olarak sağlık üzerine olumsuz etkilerde bulunmaktadır. Ayrıca bitkisel üretimde ürün ve verim kayıplarına da neden olmaktadır. Kontamine olmamış toprak bulmak günümüzde neredeyse imkansız duruma gelmiştir bu yüzden temiz toprak arayışı yerine var olan kadmiyumu bitkilerin bünyelerine almaması, kullanmaması, daha az alması ya da daha az Cd stresi yaşaması için çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Silisyum (Si) esansiyel bir

element olmamasına rağmen, bitkilere ağır metal toksisitesinin hafifletilmesi ile yakın bir ilişki göstermiştir (Patrícia vd. 2008). Silisyum uygulaması Cd toksisitesini hafifletmesi açısından umut verici bir yöntemdir. Kadmiyumun olumsuz etkileri bitkiler üzerinde fizyolojik ve morfolojik olarak kendini göstermekte bu ise ürün ve verim kayıpları olarak üreticilere yansımaktadır. Silisyum ise; toprak çözeltisinde Cd, Pb, Al, Mn, Fe gibi ağır metallerle kompleksler oluşturarak muhtemel ağır metal etkisini azaltabilmektedir. Kadmiyum (Cd) stresi altındaki sorgum bitkisinde Si uygulaması daha önce denenmemiştir. Birçok çalışmada Si uygulamasının ağır metal toksisitesini hafiflettiği görülmüştür fakat sorgum gibi mısıra alternatif olan bir yem bitkisinde Cd toksisitesini Si uygulamasının nasıl etkilediği ve bitkinin son aşaması olan salkım gelişimine kadar takip edilen araştırmalar çok azdır (genellikle fide dönemi araştırılmıştır) ve yine Cd kirliliğinde Si uygulaması ile Cd birikiminin sorgumun hangi organlarında (kök, gövde, yaprak ve salkım) ne oranda birikeceği araştırılmamıştır.

Bu çalışmada, Si uygulamasının, kadmiyumun (Cd) sorgum bitkisinde meydana getireceği olumsuz etkiyi ve bitkide Cd birikimini hafifletmedeki rolünün araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda sorgumda Cd akümülyasyonunun bitkinin hangi organlarında (kök, gövde, yaprak ve salkım) gerçekleştiği, Cd stresinin Si uygulaması ile bitkinin morfolojik özelliklerine olan etkisi ve bu uygulamalar ile sorgumun yem kalite özelliklerinin nasıl değişim gösterdiği incelenmek istenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Silisyumun (Si) Kadmiyum (Cd) Alımındaki Etkileri

Silisyum, kök ucuna yakın endodermal hücre duvarlarında suberize bariyer oluşumunu teşvik ederek kadmiyumun gövdeye ve dolayısıyla sürgüne kadar taşınmasını önler. Kök hücre duvarlarında Cd bölümlenir ve pirinç sürgünlerinde Cd birikimi azalış gösterir (Vaculík vd. 2012). Silisyum eklenmesi, bitki hücre duvarlarında yüksek konsantrasyonda Si biriktirerek ve biyokütleyi artırarak Cd konsantrasyonunu seyrelterek köklerden yapraklara Cd taşınmasını sınırlayabilir, böylece bitkilerdeki Cd stresini hafifletir (Shi vd. 2005). Silisyum, kök hücre duvarlarına bağlanarak kadmiyumu hapseder ve böylece kadmiyumun hücresel alımını önler (Liu vd. 2013). Eksojen Si uygulamasının Cd emilimini azaltmada ve metal taşıyıcı genleri düzenleyerek hücresel organelleri Cd hasarından korumada etkili olduğu bulunmuştur (Gheshlaghpour vd. 2021). Liang vd. (2005), Si eklemenin toprak pH'ını da artırdığını ve toprak Cd'nin etkinliğini azalttığını, böylece köklerdeki ve yapraklardaki Cd içeriğini azalttığını göstermiştir.

Hücre duvarına bağlanan Si, Cd ile kovalent olarak bağlanarak ve hücre duvarı ve hücre içi boşluklardan difüze olan kadmiyumu yakalayarak apoplastik Cd alımını engeller (Naeem vd. 2015).

Hücre duvarlarında kadmiyuma yüksek spesifik adsorbsiyon özelliği olan kolloidal silisyumun oluşması, kadmiyumun hücre içine alımını engellemektedir (Kidd vd. 2001).

Kadmiyumun silikatlarla birlikte çökmesi, kadmiyumun hücre duvarlarına güçlü bir şekilde bağlanmasına neden olur ve böylece simplasttaki Cd konsantrasyonu azalış gösterir (Barcelo vd. 1993).

Silisyumun sürgünlere metal translokasyonunu azaltmadaki rolü; hücre duvarında Si birikiminin metallerin apoplastik yoluna bir bariyer oluşturması nedeniyle gerçekleşmiştir (Shi vd. 2005).

Silisyum, kök hücre duvarındaki toplam polisakkaritlerin ve bunların bileşenlerinin (pektin ve selüloz) içeriğini önemli ölçüde artırır ve kadmiyumun pektin ve selüloza bağlanma yeteneğini geliştirir, bu da apoplast yolu ile kadmiyum taşıma verimliliğini azaltır (Cai vd. 2022).

Silisyum tarafından şelatlanan As/Cd bitki kök hücrelerinin vakuollerinde tutulur, toksik metallerin ksilem yükünü düşürür ve sürgüne daha az translokasyona yol açar (Meng vd. 2018).

Hücre duvarı lokalize proteinlerinin spesifik amino asit bileşimi de silisleşmeye yol açabilir (Guerriero vd. 2016). Silisyum, hücre duvarının katyon değişim kapasitesini artırır; kadmiyum, silisyum varlığında hücre duvarına daha fazla bağlanır (Lukačová vd. 2013). Agregatlar veya fitolitler halinde korteksin yakınında yoğun silisyum birikmesi, özellikle iç kortekste kökün iç dokularının hücre duvarı gözenekliliğini azaltabilir (Lux vd. 2020). Silisyumdioksit (SiO_2) endodermise yakın kitlesel birikmesi fiziksel olarak kök boyunca plazmodezmata akışını bloke eder, böylece bitki hücreleri üzerindeki toksik etkilerini azaltmak için kadmiyumun plazmodezmata taşınmasını engeller (Shi vd. 2005).

Bitkiler topraktan silisyumu silisik asidi formunda alırlar ve yapraklarda silika olarak biriktirir (He vd. 2013). Raven (2003) silikanın çeltikte yaprak, gövde ve tane kabuğunun epidermal hücrelerinin hücre duvarlarında çift-silika-epiderm tabakaları ve çift-silika-selüloz tabakaları şeklinde depolandığını bildirmiştir. Bitkilerin stres toleransına karşı Si etkisini destekleyen mekanizmalar çoğunlukla bilinmemektedir ve hatta mineralizasyon süreci bile tam olarak anlaşılamamıştır. Bu nedenle sorgum (*Sorghum bicolor*) yapraklarında yürütülen çalışmada Si mineralizasyonunu incelemek amacıyla epidermal silika hücrelerinde silika birikimini takip edilmiştir. Silisik aside maruz kalan yapraklarda normal mineralizasyonu tespit ederek bu bitkilerdeki yaprak silisleşmesinin sağlam olduğunu ve silisik asiti silikaya dönüştürülürken silika hücreleri hayatta kaldığı belirlenmiştir. Silisleşmiş duvar kalınlaştıkça fonksiyonel sitoplazma çok küçük bir alana büzülmüştür. Bu sonuçlar ise yaprak silika birikiminin basit bir çökelmenin aksine aktif, fizyolojik olarak düzenlenmiş bir süreç olduğunu göstermektedir (He vd. 2013).

Toprakta bulunan kadmiyumun fitotoksik etkileri, bitkiler tarafından alınıp çeşitli doku ve organlara taşınmaya kadar ortaya çıkmaz. Kadmiyumun köke girişi apoplast ve simplast olmak üzere iki yolu vardır (Redjala vd. 2009; Song vd. 2017). Apoplast yolunda, toprakta bulunan kadmiyum serbest difüzyon yoluyla bitki kökleri tarafından emilir; ancak kadmiyum hücrelere girmek yerine rizodermis ve korteksin hücre duvarlarındaki boşluklardan geçerek ksilem ve floeme girer (Degryse vd. 2006; Tao vd. 2019). Simplast yolu, kadmiyumun sitoplazmik süreklilik kullanılarak plazmodesmata yoluyla bir hücreden (protoplast) diğerine taşınmasını ifade eder; ve kadmiyumun membranlar boyunca taşınması, bu sürece hücre duvarında bulunan taşıyıcılar aracılık eder (Kreszies vd. 2018). Silisyum bu iki taşıma yoluna çeşitli şekillerde müdahale ederek bitkilerde kadmiyum birikimini engelleyerek birçok bitkiye olan zararını azaltır (Kabir vd. 2016; Song vd. 2021).

Apoplast boşluğunda fiziksel bir bariyerin oluşması, kadmiyum taşıma oranlarını azaltır, böylece kadmiyumun sitoplazmada birikimini ve dağılımını azaltır (Ye vd. 2012; Zhang vd. 2014; Luyckx vd. 2017; Riaz vd. 2022). Silisyum, bitkilerde kadmiyumun alımını ve taşınmasını azaltan spesifik hücrelerin (silisli hücreler) oluşumu yoluyla fiziksel bir bariyer oluşturur (Ma ve Yamaji, 2008). Silisyum, kök dokularında üç ana yolla biriktirilir: (1) endodermal hücre duvarının emdirilmesi; (2) endodermal hücrelerin iç teğet duvarı ile ilişkili silika agregatlarının oluşumu ve (3) kalın duvarlı sklerenkimatöz dokularla ilişkili spesifik hücrelerde silika agregatlarının veya fitolitlerin oluşumu (Lux vd. 2020).

2.2. Silisyumun (Si) Kadmiyum (Cd) Alımındaki Etkisinin İncelendiği Çalışmalar

Lin vd. (2017) Cd stresi altında, düşük Si-influx 1-RNAi transgenik Lemont pirinci (Lsi1 RNAi hattı), muadilleri olan yabani tip ve Lsi1-overexpression transgenik pirince (Lsi1-OE hattı) göre daha fazla Cd alımı sergilediğini bildirmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, pirinçte Cd toksisitesinin Si tarafından azaltılmasının, Cd alımı ve taşınmasının engellenmesi ve anti-oksidatif enzim faaliyetlerinin artırılması gibi işlevlerin yanı sıra pirinçte Si-alımının düzenlenmesinde Lsi1 geni ile ilgili ifadeyi de içerebileceğini göstermiştir.

Wei vd. (2018) tarafından üç farklı Si uygulamasının çeltik toprağındaki As, Cd ve Pb üzerindeki etkileri ve bu ağır metallerin pirinç kök, yaprak ve tanesine taşınımı değerlendirilmiştir. Si uygulamalarının pirinç verimi ve kalitesi üzerinde olumlu etkisinin

olduğu bildirilmiştir. Bununla birlikte yapraklar ve tanedeki ağır metal içeriğini As %2,2-54,0, Cd %11,4-51,9 ve Pb %3,2-51,4 oranında azalttığı rapor edilmiştir. Sonuç olarak Si uygulamasının ağır metallerin kökten taneye taşınmasında fizyolojik azalma mekanizmasını harekete geçirdiği bildirilmiştir.

Chen vd. (2019) hidroponik kültürde pirinç bitkilerinde bor (B), silisyum (Si) ve bunların karışımının Cd birikimi ve toksisitesi üzerindeki hafifletici etkilerini incelemişlerdir. Cd uygulaması (100 μ M), bitki büyümesinde önemli azalmanın yanı sıra köklerde ve sürgünlerde Cd birikimine yol açmıştır. Bununla birlikte, B veya silisyumun uygulanması, Cd birikimini ve toksisitesini önemli ölçüde azaltmıştır. Ayrıca, B ve silisyumun eşzamanlı uygulanması daha iyi hafifletici etki göstermiştir. Bor ve Si ilavesi, MDA ve H₂O₂ ve azaltmış ve ana antioksidan enzimlerin aktivitelerini arttırmış ve ayrıca Cd ile muamele edilmiş bitkilerde kadmiyumun neden olduğu oksidatif stresi hafifletmiştir. Kadmiyum maruziyeti, Cd taşıyıcı genlerinin (OsHMA2, OsHMA3, OsNramp1 ve OsNramp5) ekspresyonunu indüklemiştir. Buna karşılık, Cd ile muamele edilmiş bitkilerde eş zamanlı B ve Si ilavesi, gen ekspresyonunu sekteye uğratmıştır. Sonuçta, hem B hem de silisyumun, oksidatif stresi iyileştirerek ve Cd alımını ve taşınmasını baskılayarak Cd birikimini ve toksisitesini hafiflettiği ve iki elementin ortak etki gösterdiği bildirilmiştir.

Singh vd. (2019) silisyum (Si) ve salisilik asidin (SA) mısır fidelerinde Cd kaynaklı toksisitenin düzenlenmesindeki etkisini değerlendirmek için bir çalışma yapmışlardır. Kadmiyum (Cd: 100 μ M), kök ve gövde yaş ağırlığını ve uzunluğunu, fotosentetik pigmentleri, toplam çözünür protein içeriğini ve klorofil floresans parametrelerini önemli ölçüde azaltmıştır. Kadmiyum, kontrol bitkileri ile karşılaştırıldığında sırasıyla kök ve sürgün uzunluğunu %23 ve %19 oranında azaltırken, kök ve sürgün yaş ağırlığını %27 ve %24 oranında azaltmıştır. Araştırmacılar SA ve silisyumun her ikisinin de tek başına mısır fidelerinde kadmiyumun neden olduğu toksisiteyi azaltabilmesine rağmen, bunların kombinasyonunun, mısır fidelerinde kadmiyumun neden olduğu toksisiteyi etkisiz hale getirmede en etkili olduğunu öne sürmüşlerdir.

Liu vd. (2020) Si ve nitrik oksit (NO) uygulamasının mısır büyümesi, Cd alımı, Cd taşınması ve Cd birikimi üzerindeki ortak etkisini bir saksı deneyinde araştırmışlardır. Cd stresinin büyümeyi azalttığını, bitkilerde Cd birikimine neden olduğunu bildirmişlerdir. Si

ve NO'nun birlikte uygulanması, bitki büyümesini artırarak ve Cd stresi altında Cd alımını, birikimini, translokasyonunu ve biyobirikim faktörlerini azaltarak mısırdaki önemli bir yanıt olarak belirlenmiştir. Tane Cd konsantrasyonu Si ve NO birlikte muamelesinde Cd muamelesine göre %66 oranında azaltılmıştır. Ayrıca, Si ve nitrik oksit birlikte uygulanması, mısırdaki Cd sağlık risk indeksini tek başına uygulamadan daha etkili bir şekilde azaltmıştır. Bu çalışma, Si ve nitrik oksit, Cd alımını ve birikimini azaltarak, Cd toksisitesinin olumsuz etkilerini hafifletmede güçlü bir ortak etkiye sahip olduğuna dair yeni kanıtlar sağlamıştır. Araştırmacılar pratik bir yaklaşım olarak Cd toksisitesini hafifletmek için, Cd ile kirlenmiş toprağın Si gübreleriyle ve NO ile desteklenmesini savunmuşlardır.

Cai vd. (2020) yaptıkları çalışmada farklı büyüme evrelerinde uygulanan silisyumun pirinç bitkisinin biyokütlesi ve verimi üzerine olumlu etkilerini gözlemişlerdir. Gövde, yaprak ve tane dahil olmak üzere sürgünün kuru ağırlığı, ekim aşamasında Si eklendiğinde %15 oranında önemli ölçüde artmıştır. Dikim ve sonrasındaki 2 farklı büyüme evresinde ise Si ile sağlanan tane verimi sırasıyla %14, %11 ve %12 oranında bariz bir şekilde artış göstermiştir. Si uygulaması ile pirinç bitkilerinde Cd birikimindeki artışlar, esas olarak köklerde kendini göstermiştir. Kontrol ile karşılaştırıldığında, dikim ve kardeşlenme aşamalarında Si uygulandığında kökte Cd birikimi sırasıyla %75 ve %64 oranında artmıştır. Toprak üstü organlarının dokulardaki Cd birikimi ise Si ilavesi ile azalmıştır. Çiçeklenme aşamasında Si eklendiğinde biyokonsantrasyon ve translokasyon faktörleri önemli ölçüde azalmıştır. Genel olarak, dikim sırasında Si uygulaması pirincin büyümesi ve kökteki Cd içeriğinin artmasında etkili olurken, çiçeklenme sırasında uygulanan silisyumun tane dolumu ve sürgündeki Cd birikimini azaltmak için daha uygun olacağını belirtmişlerdir.

Memari-Tabrizi vd. (2021), çalışmalarında, kadmiyum (Cd) ile kirlenmiş toprakta sater (*Satureja hortensis*) bitkisinin toprak üstü kısımlarında silisyum nanopartiküllerin (Si-NP'ler) büyüme, su içeriği, fenolik ve flavonoid içeriği ve uçucu yağ (EO) profili üzerindeki etkilerini göstermeyi amaçlamışlardır. Saksı deneyi, Cd konsantrasyonu (0, 10 ve 20 mg Cd kg⁻¹ toprak) ve SiNP'lerin yaprak uygulaması (0, 0.75, 1.5 ve 2.25 mM SiO₂) ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, şiddetli Cd stresinin (20 mg Cd kg⁻¹ toprak) kök ve sürgün ağırlığını, bağıl su içeriğini (RWC) önemli ölçüde azalttığını, ancak köklerde ve

sürgünlerde Cd birikimini ve prolin konsantrasyonunu arttırdığını ortaya koymuştur. Orta Cd seviyesi (10 mg Cd kg⁻¹ toprak) toplam fenolik içeriği (TPC), toplam flavonoid içeriğini (TFC) ve EO içeriğini iyileştirmiştir. Cd stresi altında, 1,5 veya 2,25 mM Si-NP'ler, büyümeyi ve EO verimini iyileştirmek için oldukça etkili konsantrasyonlar olarak bulunmuştur. Bu çalışmada, Cd stresi ile başa çıkmak için sater bitkilerinin fizyobiyokimyasal durumunu iyileştirmede 1,5–2,25 mM Si-NP'lerinin uygun olduğu bildirilmiştir.

Gheshlaghpour vd. (2021) Cd stresi altında fesleğen bitkisinin fizyobiyokimyasal özellikleri ve sekonder metabolit üretimi üzerindeki Si'nin etkinliğini değerlendirmek için bu çalışmayı yapmışlardır. Bu doğrultuda bitkiler sera koşullarında yetiştirilmiş ve çeşitli konsantrasyonlarda Cd (0, 25 ve 50 mg kg⁻¹ toprak) ve yaprak Si çözeltilerine (0, 1 ve 2 mM) tek başına ve/veya kombinasyon halinde tabi tutulmuştur. Cd toksisitesi, savunma enzimlerinin ve bileşiklerinin aktivitelerini, hücre zarının oksidasyonunu ve ikincil metabolitlerin üretimini arttırmıştır. Toprakta artan Cd toksisitesi ile fesleğenin hem sürgününde hem de kökünde Cd seviyesi önemli ölçüde yükselmiştir. Sonuçlar, silisyumun Cd ile kirlenmiş fesleğen bitkilerinde antistres etkisine sahip olduğunu göstermiştir. Si muamelesi, Cd birikimini, kökten sürgüne Cd taşınımını, Malondialdehit (MDA) içeriğini, elektrolit sızıntısı yüzdesini azaltmış ve antioksidan enzimlerin aktivitesini, fenolik-flavonoidlerin konsantrasyonunu, kafeik, şikorik ve rosmarinik asit miktarını arttırmıştır.

Kadmiyum (Cd) ve kurşun (Pb) bitkiler üzerinde fitotoksik ve toksik etkileri olan ve ürün veriminde önemli düşüslere neden olan ağır metaller arasındadır. Yapılan çalışmada, Si uygulamasının ıspanak, lahana ve amarant (horoz ibiği) bitkilerinde Pb ve kadmiyumun, konsantrasyonu ve alımı üzerindeki iyileştirme mekanizması üzerindeki etkilerini değerlendirilmiştir. Sera koşullarında yürütülen çalışmada uygulamalar Pb, Pb + Si, Cd, Cd + Si, Si ve kontrol şeklinde yapılmıştır. Kadmiyum uygulamasının kök biyokütlesini %53-70 oranında, Pb uygulaması ise kontrole göre %54-61 oranında azaltmıştır. Silisyum gübrelemesi biyokütle toleransını üç kat arttırmış ve Pb ve Cd konsantrasyonunu ve alımını önemli ölçüde azaltmıştır. Sonuçlar Cd konsantrasyonları ile büyüme parametreleri arasında güçlü bir negatif korelasyon olduğunu göstermiştir. Çalışma, yapraklı sebzelerin Pb ve Cd toksisitesine karşı toleransını arttırmak için Si uygulamasını önermektedir (Ngugi vd. 2022).

Gu vd. (2022) buğdayda ağır metal riski son zamanlarda önemli boyutlara ulaştığı için üç farklı minerali (Si, Se ve Zn) yaprak gübresi olarak uygulamış ve sonucunda silisyumun (Si) buğdayda bitki boyunu büyük ölçüde artırdığını ve As (arsenik) ile Pb (Kurşun) içeriklerini azalttığını göstermiştir.

An vd. (2022) Cd stresi (20 mg kg^{-1} toprak) altındaki mısır bitkilerinde Si uygulamasının (200 mg kg^{-1} toprak) sürgün ve kök büyümesi üzerindeki etkilerini, Cd alımını ve taşınması, derin köklü ve yüzeysel köklü iki genotipte çiçeklenme ve olgunluk aşamalarında bir saksı deneyinde değerlendirmişlerdir. Si uygulaması kök kuru ağırlığını, bitki boyunu ve kök uzunluğunu önemli ölçüde artırmıştır. Kök hacmi ve ortalama kök çapı sırasıyla kök Cd konsantrasyonu, biyoakümülyasyon ve translokasyon faktörü ile çiçeklenme aşamasındaki iki mısır genotipinde önemli ölçüde pozitif korelasyon göstermiştir. Si ilavesi, derin köklü genotipin (Zhongke11) köklerinde Cd konsantrasyonunu, biyokonsantrasyon ve translokasyon faktörünü önemli ölçüde arttırmış, ancak yüzeysel köklü (Shengrui9999) genotipte her iki büyüme aşamasında da bu parametrelerin değerlerini düşürmüştür. Birlikte Cd ve Si muamelesi yapıldığında tanede Cd konsantrasyonu, yalnızca Cd muamelesine göre %14,4 (Zhongke11) ve %21,4 (Shengrui999) azalmıştır. Ayrıca Si ilavesi, mısırdaki günlük Cd alımını ve sağlık risk indeksini önemli ölçüde azaltmıştır. Bu çalışmanın, Si ilavesinin mısır sürgünü ve tanede Cd birikimini ortadan kaldırarak sağlık riskini azalttığı ve sık köklü Shengrui999 genotipinde daha derin etkilerle Cd stresini hafiflettiği ifade edilmiştir.

Sodyum silikat ve silisyum nanopartiküllerinin (SiNP) kadmiyum (Cd) ile kirlenmiş toprakta yetiştirilen mısırdaki bitki büyümesi, biyokütle, pigmentler, çözünür protein, prolin, oksidatif stres, antioksidan enzimler ve Cd birikimi üzerindeki etkisi bir saksı deneyinde karşılaştırılmıştır. Topraklar değişen konsantrasyonlarda Cd ($0, 25$ ve 50 mg kg^{-1}) ile kirlenmiştir. Cd stresi, oksidatif stresi artırarak tarımsal özelliklerde önemli bir azalmaya neden olmuştur. Buna karşılık, Si ve silisyum nanopartiküllerinin yapraktan püskürtülmesi mısır bitkilerinde Cd kaynaklı düşüşün önemli ölçüde üstesinden gelmiştir. Silisyum, 25 ve 50 mg kg^{-1} Cd stresi altında tanelerdeki Cd içeriğini sırasıyla %60,6 ve %43,2 oranında önemli ölçüde azaltırken, silisyum nanopartiküllerinin 25 ve 50 mg kg^{-1} Cd stresi altında tanelerdeki Cd içeriğini sırasıyla %62,2 ve %48,7 oranında azaltmıştır. Silisyum ve silisyum nanopartiküllerinin ayrı ayrı verilmesinin koruyucu nitelik üzerinde istatistiksel

olarak anlamlı bir etkisi olmadığı kaydedilmiştir. Dolayısıyla, her iki silisyum formunun yapraktan uygulanması, Cd stresi koşulları altında bitki direncini arttırmada yardımcı olabileceği bildirilmiştir (Rahman vd. 2023).

Jalil vd. (2023) çalışmalarında, pirinç genotipi '9311'in Cd stresine karşı fizyolojik ve moleküler tepkilerini ve silisyum oksit nanopartiküllerinin (SiONP'ler) hafifletici etkilerini araştırmışlardır. Kadmiyuma maruz kalma, bitki büyümesini, klorofil içeriğini ve fotosentezi ciddi şekilde engellemiştir. Bununla birlikte, SiONP takviyesi, kadmiyumun neden olduğu toksisiteyi önemli ölçüde hafifletmiştir, klorofil içeriğini ve fotosentetik özellikleri korurken bitki büyümesi üzerindeki olumsuz etkileri gidermiştir. SiONP uygulaması aynı zamanda Cd birikimini de azaltmıştır, bu da genotip 9311'de Si alımının tercih edildiğini göstermiştir. MDA ve H₂O₂ içeriklerindeki dalgalanmalarla birlikte Cd, Si, Mg, Ca ve K arasındaki karmaşık etkileşimler ortaya çıkarılmıştır. Stoma açıklığı ve mezofil hücre yapılarında, nişasta granülleri, grana tilakoidler ve ozmofilik plastoglobuli değişiklikleri dahil olmak üzere belirgin morfolojik değişiklikler gözlenmiştir. Ayrıca Cd stresi, SiONP takviyesinin ardından genotip 9311, peroksidaz, süperoksit dismutaz ve katalaz aktivitelerini sürgünlerde sırasıyla %56, %44 ve %53 ve köklerde %62, %49 ve %65 oranında artırmıştır. Özellikle OsNramp5, OsHMA3, OsSOD-Cu/Zn, OsCATA, OsCATB ve OsAPX1, SiO₂NP muamelesinden sonra önemli bir ekspresyon göstermiş; bu, pirinç dokularında potansiyel Cd translokasyonunu düşündürmüştür. Genel olarak, SiO₂NP takviyesi, temel fizyolojik fonksiyonları korurken pirinç bitkilerinde Cd toleransını artırma konusunda umut vaat etmiştir.

2.3. Bitkilerde Cd ve Si ile Fe, Zn, Mn P, K, Ca ve Mg Etkileşimleri

Potasyum (K), kültür bitkilerinde en bol bulunan katyondur ve stoma düzenlenmesi, fotosentez, enzim aktivasyonu, protein sentezi, floemde taşıma, abiyotik streslerden kaynaklanan oksidatif hasarın hafifletilmesi ve diğer besin maddelerinin etkin kullanımı gibi birçok fizyolojik ve biyokimyasal süreçte hayati bir rol oynar (Ma vd. 2013). Soya fasulyesinde ve bazı yem bitkilerinde (*Panicum maximum* ve *Brachiaria ruziziensis* × *Brachiaria brizanth*), Si takviyesi yapraklarda daha yüksek K konsantrasyonuna neden olmuştur (Miao vd. 2010; Buchelt vd. 2020; Pavlovic vd. 2021). Cd stresi altındaki buğday

ve kolza bitkilerinde, köklerde ve üst kısımlarda belirgin şekilde K konsantrasyonu düşmüştür (Zembala vd. 2010).

Cd-P etkileşimleri, bitkiler tarafından Cd alımı üzerindeki P etkilerinde sergilenmektedir. Fosfat muamelesi altında Cd içeriğinin hem arttığı hem de azaldığı rapor edilmiştir. Görünüşe göre, bu reaksiyonlar kök ortamında gerçekleşmektedir ve bu nedenle P kaynağının topraklar üzerindeki etkisi çeşitli topraklar ve ürünler için farklılık gösterebilir (Kabata- Pendias, 2011).

Silisyumun kalsiyum (Ca) alımı ve birikimi üzerindeki farklı etkileri, bitki türlerine, deneysel koşullara, stres türüne ve uygulanan Si miktarına bağlı olarak literatürde rapor edilmiştir (Pavlovic vd. 2021): Birçok çalışma, silisyumun optimum koşullar altında yetiştirilen çeşitli bitkilerde (Greger vd. 2018) veya kuraklık stresi altında yetiştirilen mısırdaki olduğu gibi çeşitli stres türlerine maruz kalan bitkilerde Ca alımını teşvik ettiğini bildirmiştir (Kaya vd. 2011). Buna karşılık, diğer çalışmalar Si'nin Ca birikimini etkilemediğini (Cooke ve Leishman, 2016) veya hatta azalttığını (Jang vd. 2018) öne sürmüştür. Dahası, pirinç ve kamışta (*Phragmites australis*) artan Si uygulaması ile doku Ca birikiminde kademeli bir düşüş olduğu gösterilmiştir (Brackhage vd. 2013; Jang vd. 2018).

Demir (Fe), çinko (Zn) ve mangan (Mn) bitkiler de dahil olmak üzere tüm canlı organizmalar için temel mikro elementlerdir ve çok sayıda önemli fizyolojik işlevden sorumludurlar (Bityutskii vd. 2014). Demir (Fe), solunum ve fotosentez dahil olmak üzere çeşitli biyolojik süreçlerde yer alan bir dizi enzimin bileşenidir (Römhald ve Nikolic, 2006). Zn birçok enzimin önemli bir bileşeni, proteinlerin ve bitki membranlarının yapısal stabilizatörüdür (Aravind ve Prasad, 2004). Mn, fotosentez için gerekli elektronları sağlayan fotosistem II'nin su ayrıştırma sisteminin aktif bileşenidir (Goussias vd. 2002).

Hem Fe hem de Cd, benzer kimyasal özelliklere sahip oldukları ve aynı taşıyıcıları paylaştıkları için (Ogo vd. 2014) bitkilerde yakından ilişkilidir (Rizwan vd. 2016). Kadmiyumun temel metallerle ait taşıyıcılar tarafından absorbe edilebildiği ve taşınabildiği bildirilmiştir. Bu taşıyıcılar Fe^{+2} , Zn^{+2} , Mn^{+2} ve Cd^{+2} gibi iki değerlikli metallerle karşı geniş bir substrat özgülüğü göstermektedir (Vert vd. 2002). Bitkilerde kadmiyumun varlığı,

kadmiyumun sadece Fe emilimini değil, aynı zamanda toprakaltı kısımlarından topraküstü kısımlarına Fe taşınımını da engellediği bir Fe eksikliği semptomuna neden olmaktadır (Liu vd. 2017). Bitkiler Si ile muamele edildiğinde köklerde yüksek Fe birikimi gözlenmiştir (Pavlovic vd. 2013; Bityutskii vd. 2014) bu durum kök apoplastik havuzlarındaki yüksek Fe miktarına (Pavlovic vd. 2013) veya kök yüzeylerinde çökmesine bağlanmıştır.

Ardışık beş yıl boyunca marul, ıspanak, buğday, hindiba ve mısır saksılarda yetiştirilmiş ve hem doğal bulunan hem de toprağa uygulanan Zn ve kadmiyumun bitkinin Zn ve Cd konsantrasyonları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak Zn bitkinin Cd alımını azaltmış arttırmamıştır ve Zn ve Cd arasındaki etkileşimli modelin antagonistik olduğu bildirilmiştir. Sadece balçık toprakta Zn ve Cd bir dereceye kadar sinerjik ilişki göstermiştir; bitkinin Zn alımı uygulanan Cd ile artmıştır (Smilde vd. 1992; Millaleo vd. 2010).

Kadmiyum uygulaması, hemiselüloz ve selülozdaki Cd konsantrasyonunu önemli ölçüde artırmaktadır (Guo vd. 2022).

Pirinç kökünde, Si, [Si-duvar matrisi] Cd kompleksasyonu yoluyla hücre duvarlarında Cd ile birlikte biriktirilmektedir (Liu vd. 2013). Si takviyesi, pirinç süspansiyon hücrelerine Cd^{+2} girişini azaltır ve kökler tarafından Cd alımında ve pirincin kök hücre duvarlarındaki Cd bağlanmasında hafif bir düşüşe yol açar (Ma vd. 2015). Silisyum hücre duvarlarında değişikliklere neden olur ve polisakkaritlerle çapraz bağlanma (He vd. 2015) dahil olmak üzere mekanik ve kimyasal özelliklerini iyileştirir, bu da ikincil hücre duvarı bileşenlerinin sentezini ve metabolizmasını uyarır (Yamamoto vd. 2012). Verilen Si, [Si-duvar matrisi] Cd kompleksleşmesinin bir sonucu olarak hücre duvarında Cd ile birlikte biriktirilebilir (Liu vd. 2013).

Hücre duvarındaki ağır metallerin birincil bağlanma yerleriyle ilgili olarak, çeşitli çalışmalar polisakkaritler ve Si içerikleri arasında pozitif bir korelasyon olduğunu göstermiştir (Guo vd. 2022).

3. MATERİYAL VE YÖNTEM

Bu araştırma 2024 yılı yazlık ürün yetiştirme sezonunda Bingöl Üniversitesi Gıda, Tarım ve Hayvancılık Meslek Yüksekokulu bahçesinde açık alanda yürütülmüştür. Çalışmada bitkisel materyal olarak Master BMR sorgum çeşidi kullanılmıştır. Master BMR çeşidinin Tarım ve Orman Bakanlığı Bitkisel Üretim Genel Müdürlüğü Tohumluk Tescil ve Sertifikasyon Merkez Müdürlüğü verilerine göre bazı özellikleri aşağıda verilmiştir (Anonim, 2024).

Tablo 3. 1. Tarım ve Orman Bakanlığı Bitkisel Üretim Genel Müdürlüğü Tohumluk Tescil ve Sertifikasyon Merkez Müdürlüğü verilerine göre çeşide ait özellikler (Anonim, 2024)

Master BMR çeşidine ait özellikler	
Yeşil Ot Verimi (kg da ⁻¹): 14535.2	Ham Selüloz (%): 23.7
Kuru Madde Verimi (kg da ⁻¹): 3575.5	ADF (%):30.6
Salkım oluşturma süresi (gün):84	NDF(%): 41.3
Bitki boyu: 208 cm	Ham kül(%):6.4
Yaprak sap oranı (%): 1.bıçım;19.5 2.bıçım; 78	

Deneme için kullanılacak toprak Bingöl Üniversitesi Kampüs alanından temin edilmiş olup toprağa ait bazı özellikler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 3. 2. Denemede kullanılan toprağa ait bazı özellikler

pH	EC (μs)	Kireç (CaCO ₃ , %)	Organik madde (%)	K (mg kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	
6.88	190.3	1.96	0.38	354.5	21.23	
Alınabilir (mg kg ⁻¹)						
Cd	Si	Zn	Fe	Mn	Ca	Mg
0.06	7.6	1.71	24.02	32.74	7322.01	301.22

- Deneme tesadüf parselleri faktöriyel deneme desenine göre kurulmuş olup çalışmada 48 adet saksı (4 Si seviyesi x 3 Cd seviyesi x 4 tekerrür) kullanılmıştır.
- Silisyum konsantrasyonları: 0, 100, 200 ve 300 mg kg⁻¹ ve Cd konsantrasyonları: 0, 10 ve 20 mg kg⁻¹ şeklindedir. Denemede uygulanan Cd ve Si konsantrasyonlarının gösterimi Şekil 3.1’de sunulmuştur.

Konsantrasyonlar	0 mg kg ⁻¹ Si	100 mg kg ⁻¹ Si	200 mg kg ⁻¹ Si	300 mg kg ⁻¹ Si
0 mg kg ⁻¹ Cd				
10 mg kg ⁻¹ Cd				
20 mg kg ⁻¹ Cd				

Şekil 3.1. Denemede uygulanan Cd ve Si konsantrasyonlarının gösterimi

- Silisyum ve kadmiyum konsantrasyonlarının belirlenmesinde yapılan önceki çalışmalardaki dozlar dikkate alınmıştır:

An vd. (2022) iki mısır genotipi ile ilgili yaptıkları çalışmada Cd konsantrasyonu 20 mg kg^{-1} belirlerken silisyum konsantrasyonu 200 mg kg^{-1} olarak belirlemişlerdir.

Gheshlaghpour vd. (2021) Cd stresi altında fesleğen bitkisinde yapraktan uygulanan Si etkilerini inceledikleri çalışmada toprağa uyguladıkları Cd konsantrasyonu 0, 25, ve 50 mg kg^{-1} olarak belirlemişlerdir.

Patrícia vd. (2008) mısırın metal stresinin iyileştirilmesinde yaptığı çalışmada Si için 0, 50, 100, 150 ve 200 mg kg^{-1} konsantrasyonlarını, Cd için ise 20 mg kg^{-1} dozunu kullanmıştır.

- Bingöl Üniversitesi kampüs alanından temin edilen toprak hava kuru ağırlığına gelmiş, 4 mm'lik elekten elenmiş, 10 kg ağırlığında tartılmış ve daha sonra saksılara aktarılmıştır. Toprak hazırlığına ait görseller Şekil 3.2'de sunulmuştur.



Şekil 3.2. Toprak hazırlığı

- Kullanılan saksılar plastik üretim saksısı özelliğinde olup 11.5 lt hacminde, 25-30 cm yüksekliğinde ve 25-30 cm genişliğindedir.
- Kadmiyum ($3\text{Cd}_3\text{SO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) ticari olarak temin edilmiştir.
- Silisyum (Na_2SiO_3) ticari olarak temin edilmiştir.
- 10 kg olarak saksılara konulan toprağa herhangi bir tohum ekimi yapılmadan 0, 10 ve 20 mg kg^{-1} Cd uygulanmış ve uygulanan kadmiyumun toprak içinde homojen bir dağılım göstermesini sağlamak için birkaç gün yalnızca sulama yapılmıştır (saksının altına Cd sızması önlenerek).

- Kadmiyum uygulamasının toprağa yapıldığı tarihten birkaç gün sonra 0, 100, 200 ve 300 mg kg⁻¹ konsantrasyonlarında Si uygulaması yapılmıştır. Kadmiyum ve Si dozlarının hazırlığı ve uygulanmasına ait görseller Şekil 3.3'te sunulmuştur.
- Silisyum uygulaması sonrası (birkaç gün) sorgum bitkisi için önerilen gübreleme 20 kg da⁻¹ N ve 10 kg da⁻¹ P₂O₅ saksılara uygun şekilde oranlanarak hesaplanıp verilmiştir.



Şekil 3.3. Kadmiyum ve Si dozlarının hazırlığı ve uygulanması

- Önceden viyollerde yetiştirilen ve yaklaşık 10 cm büyüklükte olan sorgum fideleri (Cd, Si ve uygun gübrelemeden sonra) saksılara aktarılmıştır.
- Her saksıda 1 bitki yetiştirilmiş, ölçüm ve analizlerde tüm saksılardaki bir bitki kullanılmıştır.

Sorgum fidelerinin yetiştirilmesi: Tohumlar viyollerde torf ortamında çimlendirilip fide gelişimi gerçekleştirilmiştir. Her viyole 3'er tohum ekilmiş ve çıkıştan sonra seyreltme yapılmıştır. Seyreltme işlemi yapılan sağlıklı fide sayısının saksı sayısının 4 katı olacak şekilde saksılarda olası bir tehlikeye karşı sürekli viyollerde yedek fide bulundurulmuştur. Fidelerin saksılara aktarımına ait görseller Şekil 3.4'te sunulmuştur.



Şekil 3.4. Fidelerin saksılara aktarımı

- Saksılara aktarılan sorgum fideleri yaklaşık 90 gün süre ile saksı altlarına sızma olmayacak şekilde sulanmıştır.
- Sulama bitkilerin ihtiyaçları doğrultusunda tarla kapasitesine göre şebeke suyu ile yapılmıştır. Cd ve Si yıkanmasını önlemek için saksı altlıklarına sızmanın ve taşmanın önüne geçilmesine dikkat edilerek sulama yapılmıştır.

Çiçeklenme öncesi bitkilere ait görüntüler Şekil 3.5’te ve salkım oluşumdaki bitkiler Şekil 3.6’da sunulmuştur.



Şekil 3.5. Çiçeklenme öncesi bitkilere ait görüntüler



Şekil 3.6. Salkım oluşturan bitkilere ait görüntüler

3.1. Hasat

• Sorgum bitkileri yaklaşık 90 günlük büyüme periyodu sonunda saksılardan budama makası ile kesilerek hasat edilmiştir. Toprak üstü organları (yaprak, gövde ve salkım) ayrılmış yıkanmış ve kurutulmuştur. Saksı içersinde kalan kökler ise; saksılar tek tek büyük bir leğene ters çevrilmek sureti ile içinden kökler ayıklanarak alınmış ve bol su ile yıkanarak temizlenmiş ve kurutulmuştur. Leğen içerisinde köklerden geriye kalan topraktan ise analizler için homojen örnek alımı yapılmıştır (Şekil 3.7).

3.2. Morfolojik Ölçümler

- Kuru yaprak ağırlığı: Her bir bitki için yapraklar etüvde 70 °C’de sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuş ve tartılmıştır.
- Kuru gövde ağırlığı: Her bir bitki için gövde etüvde 70 °C’de sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuş ve tartılmıştır.
- Kuru salkım ağırlığı: Her bir bitki için salkımlar etüvde 70 °C’de sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuş ve tartılmıştır.

Kuru kök ağırlığı: Her bir saksıdaki bir bitkiye ait olan kökler yıkandıktan sonra etüvde 70 °C’de sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuş ve tartılmıştır.

- Bitki boyu (cm): Sorgum bitkisinin saksıdaki toprakla olan noktasından salkımın en uç noktası arasındaki kısım metre ile ölçülerek cm olarak belirlenmiştir.

- Gövde çapı (mm): Sorgumun gövdesinde yer alan ilk boğum ile ikinci boğum arasındaki kısım dijital kumpas yardımıyla ölçülmüş ve mm olarak kaydedilmiştir.
- Salkım uzunluğu (cm): Bitkilerde ana salkımın en alt noktası ile en üst noktası arasındaki uzunluk ölçülerek cm olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.7. Hasat dönemine ait görüntüler

3.3. Bitkide Cd, Si, Fe, Zn ve Mn Konsantrasyonlarının Belirlenmesi (kök, gövde, yaprak ve salkım)

Bitki örnekleri Miller (1998) tarafından bildirilen yöntemle göre mikrodalga toplam yakma cihazında nitrik asit (HNO_3) ile yakılmıştır. Daha sonra süzme ve seyreltme işlemi tamamlanmış Cd, Si, Fe, Zn ve Mn konsantrasyonu ICP-MS cihazında belirlenmiştir.

Hesaplama işlemi: Bitkide toplam Cd/Si/Fe/Zn/Mn $\text{mg kg}^{-1} = It \times F$

It = düzenlenmiş bitki çözeltisine ait okuma değeri (tanık çözeltisine göre)

F= seyreltme faktörü (kat sayısı)/ örnek ağırlığı

Bitkilerin analiz aşamasına ait görüntüler Şekil 3.8’de sunulmuştur.



Şekil 3.8. Bitkilerin analiz aşamasına ait görüntüler

3.4. Toprakta Ölçülen Parametreler

Çalışma alanı topraklarının pH ve EC değerleri, Demiralay (1993) ve Rhoades (1996) tarafından bildirilen yöntemle göre pH ve EC metre ile, toplam kireç içeriği Scheibler kalsimetresi (Allison ve Moodie 1965) ve organik madde ise modifiye edilmiş Walkley-Black yöntemiyle (Nelson vd. 1996) belirlenmiştir. Bitkiye yarayışlı Ca, Mg ve K oranları, 1 N amonyum asetat (NH_4OAC , pH=7) yöntemi (Helmke ve Sparks 1996) ile bitkiye yarayışlı P, Olsen ve Sommers (1982) tarafından bildirilen 0.5 M NaHCO_3 yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Ekstrakte edilebilir Cd, Fe, Zn ve Mn DTPA yöntemi (Lindsay ve Norvell 1978) kullanılarak belirlendi.

3.5. Toprak Örnekleri İçin Alınabilir Si Belirlenmesi

Toprakta ekstrakte edilebilir Si 1 N NH_4OAC çözeltisi yöntemine göre 2 mm'lik çapa sahip çelik elekten geçirilen toprak numunesi ekstrakte edilmiştir. Elde edilen süzükte ICP-MS cihazı kullanılarak Si okuması yapılmıştır (Jones ve Dreher, 1996; Snyder, 2001). Toprak analizine ait görüntüler Şekil 3.9'da sunulmuştur.



Şekil 3.9. Toprak analizine ait görüntüler

3.6. Yem Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi

Örneklerinin ham protein, ham kül, asit deterjanda çözünmeyen lif (ADF), nötr deterjanda çözünmeyen lif (NDF) oranları ile fosfor (P), potasyum (K), kalsiyum (Ca) ve magnezyum (Mg) oranlarına ait analizler, NIRS (Near Infrared Spectroscopy) cihazı yardımıyla yapılmıştır.

3.7. İstatistiksel Analiz

Tesadüf parsellerinde faktöriyel deneme desenine göre yürütülen çalışmada ölçüm ve analizler ile elde edilen tüm verilere, "JMP 13.2.0" programı kullanılarak (JMP, 2018) varyans analizi (ANOVA) yapılmış ve elde edilen ortalamalar LSD (least significant difference) testi (%5) ile karşılaştırılmıştır.

Deneme 4 tekerrürlü kurulmuştur fakat analizler 3 tekerrür üzerinden gerçekleştirilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Bitki Organlarında Cd, Si, Fe, Mn ve Zn Konsantrasyonları

4.1.1. Bitkide Cd Akümülayonu

Farklı dozlarda Cd ve Si uygulamalarının bitki organlarında biriken Cd konsantrasyonlarına etkisine ait varyans analizi sonucu Tablo 4.1’de verilmiştir. Kök, gövde, yaprak ve salkımda biriken Cd konsantrasyonunda Cd uygulaması, Si uygulaması ve Cd*Si interaksyonu çok önemli ($p<0,01$) bulunmuştur.

Tablo 4. 1. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun kök, gövde, yaprak ve salkımlarındaki Cd içeriklerine ait varyans analizi

Kaynak	SD	Kök				Gövde			
		KO	F değeri			KO	F değeri		
Cd	2	747,12	732,52**			468,87	228,52**		
Si	3	12,61	12,36**			47,60	23,20**		
Cd*Si	6	11,66	11,43**			24,09	11,74**		
Tekerrür	2	0,38	0,37			3,38	1,64		
Hata	22	1,02				2,05			
Genel	35								
		R ²	0,99	DK	%9,69	R ²	0,97	DK	%12,72
		Yaprak				Salkım			
		KO	F değeri			KO	F değeri		
Cd	2	60,45	1126,57**			43,53	726,10**		
Si	3	1,69	31,48**			6,02	101,36**		
Cd*Si	6	0,78	14,56**			4,07	68,07**		
Tekerrür	2	0,05	0,82			0,06	0,96		
Hata	22	0,05				0,06			
Genel	35								
		R ²	0,99	DK	%7,90	R ²	0,99	DK	%11,27

** $P<0,01$, SD: Serbestlik derecesi, R²: Belirtme katsayısı, DK: Değişim katsayısı (%).

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının kökte biriken Cd konsantrasyonuna (mg kg^{-1}) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4. 2. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, köklerdeki Cd içeriklerine (mg kg^{-1}) etkisi ve oluşan ortalamalar

Uygulamalar (mg kg^{-1})	Kökte Cd konsantrasyonu (mg kg^{-1})				
	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd₀	2,03 ^{d**}	1,56 ^d	1,36 ^d	1,34 ^d	1,57^{C**}
Cd₁₀	16,61 ^{ab}	15,69 ^{ab}	10,26 ^c	11,45 ^c	13,50^B
Cd₂₀	16,88 ^{ab}	15,31 ^b	15,36 ^b	18,39 ^a	16,48^A
Ortalama	11,84^{A**}	10,85^{AB}	8,99^C	10,39^B	

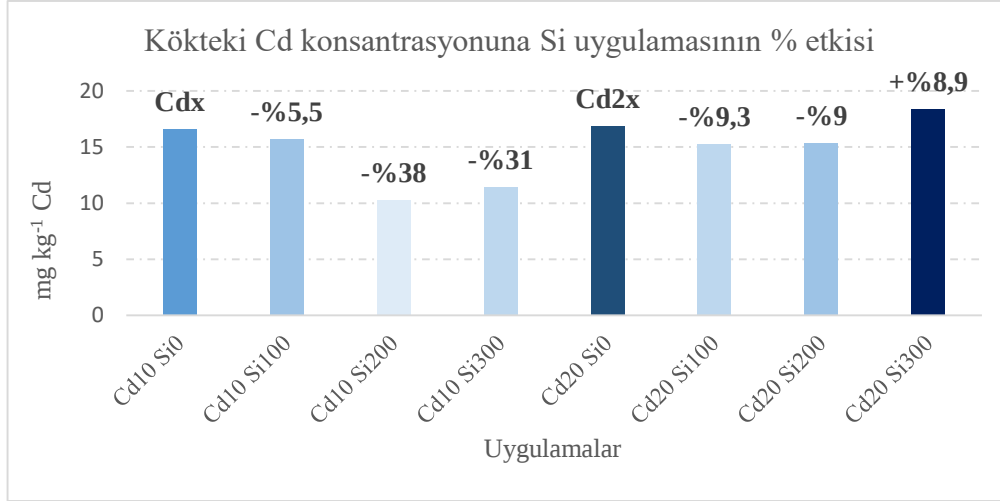
** : $p < 0.01$ önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Uygulanan Si dozlarının artışı kökte Cd birikiminin Si₃₀₀ uygulamasına kadar azalmasına neden olmuştur. En düşük Cd birikimi ($8,99 \text{ mg kg}^{-1}$) Si₂₀₀ uygulamasında iken en yüksek Cd birikimi ($11,84 \text{ mg kg}^{-1}$) Si₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Uygulanan Cd dozları kökte Cd konsantrasyonunun artmasına neden olmuştur. En düşük Cd konsantrasyonu ($1,57 \text{ mg kg}^{-1}$) Cd₀ uygulamasında iken en yüksek Cd konsantrasyonu ($16,48 \text{ mg kg}^{-1}$) Cd₂₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Kökte, Cd*Si interaksiyonu sonucunda en az Cd birikimi ($1,34\text{-}2,03 \text{ mg kg}^{-1}$) Cd₀Si_{0, 100, 200, 300} uygulamasında iken en fazla Cd birikimi ($18,39 \text{ mg kg}^{-1}$) Cd₂₀Si₃₀₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Kökteki Cd konsantrasyonuna Si uygulamasının % etkisi Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Kökteki Cd konsantrasyonuna Si uygulamasının % etkisi

Kökte Cd konsantrasyonunu azaltmada en etkili uygulama Cd₁₀Si₂₀₀ uygulaması olmuştur (Şekil 4.1).

Kökte Cd birikimi Si₃₀₀ uygulaması hariç diğer Si uygulamalarında azalma göstermiştir. Nwugo vd. (2008) pirinç fidelerinde silisyum (Si) ilavesinin kökte Cd konsantrasyonunun azalmasına neden olduğunu bildirmiştir. Dresler vd. (2015) mısır fidelerinin köklerindeki Cd birikiminin, besin çözeltisindeki Si konsantrasyonlarının artmasıyla önemli ölçüde azalma gösterdiğini bildirmişlerdir. An vd. (2022) Cd stresi altındaki mısır bitkilerinde Si uygulamasının derin köklü genotipin köklerinde Cd konsantrasyonunu arttırdığını ancak yüzeysel köklü genotipte düşürdüğünü ifade etmişlerdir.

Besin solüsyonuna Si eklenmesinin köklerde Cd birikimini arttırdığı çalışmalarda bulunmaktadır (Cunha ve Nascimento, 2009; Song vd. 2011).

Ayrıca Cd uygulamasındaki doz artışına paralel olarak (Si uygulamasından bağımsız) köklerde Cd konsantrasyonu da artış göstermiştir. Roy vd. (2016) sorgum bitkisinde Cd stresi uyguladıkları çalışmada doz artışıyla birlikte bitki köklerindeki Cd konsantrasyonunun arttığını belirtmişlerdir.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının gövdede biriken Cd konsantrasyonuna (mg kg⁻¹) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4. 3. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, gövdedeki Cd içeriklerine (mg kg^{-1}) etkisi ve oluşan ortalamalar

Gövdede Cd konsantrasyonu (mg kg^{-1})					
Uygulamalar (mg kg^{-1})	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd ₀	0,99 ^{e**}	0,91 ^e	0,82 ^e	0,83 ^e	0,89^{C**}
Cd ₁₀	8,32 ^{cd}	12,90 ^b	11,94 ^{bc}	5,92 ^d	9,78^B
Cd ₂₀	9,53 ^{bcd}	11,71 ^{bc}	19,77 ^a	10,78 ^{bc}	12,95^A
Ortalama	6,28^{C**}	8,51^B	10,84^A	5,84^C	

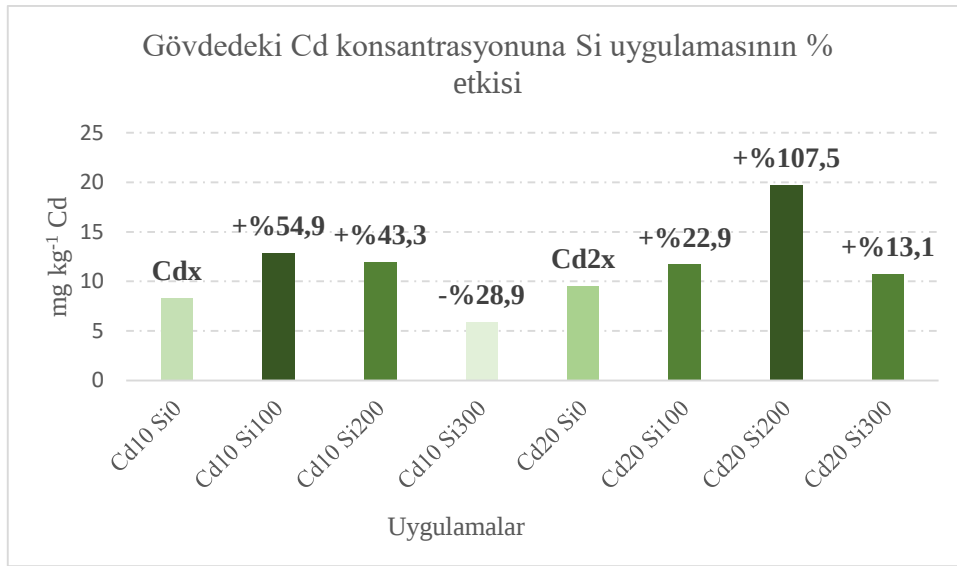
** $p < 0,01$ önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Uygulanan Si dozları gövdede Cd birikimini Si₃₀₀ uygulamasına kadar azaltamamıştır. En düşük Cd birikimi ($5,84 \text{ mg kg}^{-1}$) Si₃₀₀ uygulamasında iken en yüksek Cd birikimi ($10,84 \text{ mg kg}^{-1}$) Si₂₀₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Uygulanan Cd dozları gövdede Cd konsantrasyonunun artmasına neden olmuştur. En düşük Cd konsantrasyonu ($0,89 \text{ mg kg}^{-1}$) Cd₀ uygulamasında iken en yüksek Cd konsantrasyonu ($12,95 \text{ mg kg}^{-1}$) Cd₂₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Gövdede, Cd*Si interaksiyonu sonucunda en az Cd birikimi ($0,82\text{-}0,99 \text{ mg kg}^{-1}$) Cd₀Si₀, 100, 200, 300 uygulamalarında iken en fazla Cd birikimi ($19,77 \text{ mg kg}^{-1}$) Cd₂₀Si₂₀₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Gövdedeki Cd konsantrasyonuna Si uygulamasının % etkisi Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Gövdedeki Cd konsantrasyonuna Si uygulamasının % etkisi

Gövdede Cd konsantrasyonunu azaltmada en etkili uygulama $Cd_{10}Si_{300}$ uygulaması olmuştur (Şekil 4.2).

Silisyum uygulaması gövdede Cd konsantrasyonunun değişken hareket etmesine neden olmuştur. Silisyum, hücre duvarının katyon değişim kapasitesini artırır; kadmiyum, silisyum varlığında hücre duvarına yokluğundan daha fazla bağlanır (Lukačová vd. 2013). Kadmiyumun köke girişi apoplast ve simplast olmak üzere iki yolu vardır (Redjala vd. 2009; Song vd. 2017). Apoplast yolunda, toprakta bulunan kadmiyum serbest difüzyon yoluyla bitki kökleri tarafından emilir; ancak kadmiyum hücrelere girmek yerine rizodermis ve korteksin hücre duvarlarındaki boşluklardan geçerek ksilem ve floeme girer (Degryse vd. 2006; Tao vd. 2019). Simplast yolu, kadmiyumun sitoplazmik süreklilik kullanılarak plazmodesmata yoluyla bir hücreden (protoplast) diğerine taşınmasını ifade eder ve kadmiyumun membranlar boyunca taşınması, bu süreçte hücre duvarında bulunan taşıyıcılar aracılık eder (Kreszies vd. 2018). Silisyum bu iki taşıma yoluna çeşitli şekillerde müdahale ederek bitkilerde kadmiyum birikimini engellemeye çalışır (Kabir vd. 2016; Song vd. 2021).

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının yapraklarda biriken Cd konsantrasyonuna ($mg\ kg^{-1}$) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4. 4. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, yapraklardaki Cd içeriklerine (mg kg^{-1}) etkisi ve oluşan ortalamalar

Yaprakta Cd konsantrasyonu (mg kg^{-1})					
Uygulamalar (mg kg^{-1})	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd ₀	0,44 ^{f**}	0,36 ^f	0,28 ^f	0,28 ^f	0,34^{C**}
Cd ₁₀	3,82 ^d	4,17 ^{cd}	4,88 ^{ab}	2,64 ^e	3,88^B
Cd ₂₀	4,03 ^d	4,75 ^{abc}	5,01 ^a	4,22 ^{bcd}	4,50^A
Ortalama	2,76^{B**}	3,09^A	3,39^A	2,38^C	

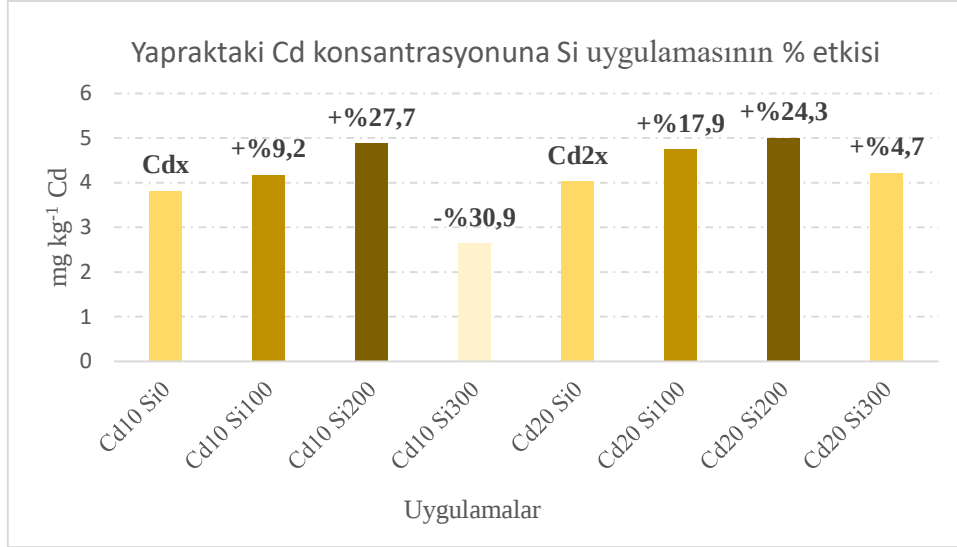
** $p < 0,01$ önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Uygulanan Si dozları yaprakta Cd birikimini Si₃₀₀ uygulamasına kadar azaltamamıştır. En düşük Cd birikimi ($2,38 \text{ mg kg}^{-1}$) Si₃₀₀ uygulamasında iken en yüksek Cd birikimi ($3,09$ - $3,39 \text{ mg kg}^{-1}$) Si_{100,200} uygulamalarında ölçülmüştür.

Uygulanan Cd dozları yaprakta Cd konsantrasyonunun artmasına neden olmuştur. En düşük Cd konsantrasyonu ($0,34 \text{ mg kg}^{-1}$) Cd₀ uygulamasında iken en yüksek Cd konsantrasyonu ($4,50 \text{ mg kg}^{-1}$) Cd₂₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Yaprakta, Cd*Si interaksiyonu sonucunda en az Cd birikimi ($0,28$ - $0,44 \text{ mg kg}^{-1}$) Cd₀Si_{0, 100, 200, 300} uygulamalarında, en fazla Cd birikimi ($5,01 \text{ mg kg}^{-1}$) ise Cd₂₀Si₂₀₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Yapraktaki Cd konsantrasyonuna Si uygulamasının % etkisi Şekil 4.3'te sunulmuştur.



Şekil 4.3. Yapraktaki Cd konsantrasyonuna Si uygulamasının % etkisi

Yapraklarda Cd konsantrasyonunu azaltmada en etkili uygulama Cd₁₀Si₃₀₀ uygulaması olmuştur (Şekil 4.3).

Yapraklarda silisyumun Cd konsantrasyonunu azaltmadaki etkisi sadece Si₃₀₀ uygulamasında görülmüştür. Wang vd. (2000), silisyumun, kadmiyumun yaprak ve kök hücrelerinden apoplastik olarak uzaklaştırılmasına neden olduğunu bildirmiştir. Wei vd. (2018) tarafından Si uygulamasının çeltiğin yapraklarında Cd içeriğini %11,4 oranında azalttığı rapor edilmiştir.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının salkımlarda biriken Cd konsantrasyonuna (mg kg⁻¹) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4. 5. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımlardaki Cd içeriklerine (mg kg⁻¹) etkisi ve oluşan ortalamalar

Salkımda Cd konsantrasyonu (mg kg ⁻¹)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd ₀	0,23 ^{e**}	0,22 ^e	0,23 ^e	0,26 ^e	0,24 ^{C**}
Cd ₁₀	4,09 ^b	2,40 ^c	1,33 ^d	0,55 ^e	2,10 ^B
Cd ₂₀	3,71 ^b	5,41 ^a	5,07 ^a	2,00 ^{cd}	4,05 ^A
Ortalama	2,68 ^{A**}	2,68 ^A	2,21 ^B	0,94 ^C	

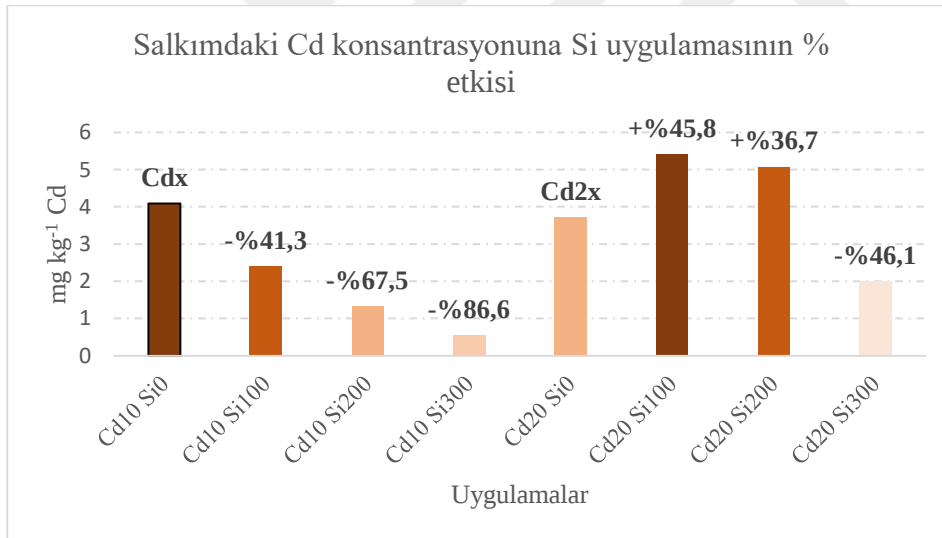
** : p<0,01 önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Uygulanan Si dozları salkımda Cd birikiminin Si₂₀₀ uygulamasından sonra düşüşüne neden olmuştur. En düşük Cd birikimi (0,94 mg kg⁻¹) Si₃₀₀ uygulamasında iken en yüksek Cd birikimi (2,68 mg kg⁻¹) Si₁₀₀ uygulamasında ölçülmüştür.

Uygulanan Cd dozları salkımda Cd konsantrasyonunun artmasına neden olmuştur. En düşük Cd konsantrasyonu (0,24 mg kg⁻¹) Cd₀ uygulamasında iken en yüksek Cd konsantrasyonu (4,05 mg kg⁻¹) Cd₂₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Salkımda, Cd*Si interaksiyonu sonucunda en az Cd birikimi (0,22-0,26 mg kg⁻¹) Cd₀Si₀, 100, 200, 300 ve Cd₁₀Si₃₀₀ (0,55 mg kg⁻¹) uygulamalarında ve en fazla Cd birikimi (5,07 ve 5,41 mg kg⁻¹) Cd₂₀Si₂₀₀ ve Cd₂₀Si₁₀₀ uygulamalarında belirlenmiştir.

Salkımdaki Cd konsantrasyonuna Si uygulamasının % etkisi Şekil 4.4'te sunulmuştur.



Şekil 4.4. Salkımdaki Cd konsantrasyonuna Si uygulamasının % etkisi

Kadmiyum konsantrasyonu, Cd₁₀Si_{100,200,300} uygulamalarında silisyumun doz artışına paralel olarak salkımlarda azalma göstermiş ve salkımlardaki Cd konsantrasyonu Cd₁₀Si₃₀₀ uygulamasında %86,6 oranında azalmıştır (Şekil 4.3).

Wei vd. (2018) Si uygulamasının çeltik bitkisinin tanelerinde Cd içeriğini %51,9 oranında azalttığını bildirmiştir. Liu vd. (2020) Cd stresi altındaki mısır bitkilerinin tanelerinde

Cd konsantrasyonunun Si ve NO uygulamaları ile birlikte %66 oranında azaldığını belirtmişlerdir. An vd. (2022) Cd uygulanan iki farklı mısır genotipinde Si uygulamasının tanede Cd konsantrasyonu, yalnızca Cd uygulanan bitkilere göre %14,4 (Zhongke11) ve %21,4 (Shengrui999) azalttığını bildirmişlerdir. Rahman vd. (2023) Cd stresi (25 ve 50 mg kg⁻¹) altındaki mısır bitkisinde silisyum uygulaması ile tanelerin Cd içeriğinin sırasıyla %60,6 ve %43,2 oranında önemli ölçüde azaldığını bildirmişlerdir.

Silisyum, bitkilerde kadmiyumun sürgünlerden tanelere taşınmasını simplastik olarak engellemektedir (Wu vd. 2019).

Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki Cd içeriğine ve ortalamalarına etkisi Tablo 4.6'da gösterilmiştir.

Tablo 4. 6. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki Cd içeriğine (mg kg⁻¹) ve ortalamalarına etkisi

Uygulamalar	Kök	Gövde	Yaprak	Salkım	Ortalama
Cd₀ Si₀	2,03 ^{d**}	0,99 ^{e**}	0,44 ^{f**}	0,23 ^{e**}	0,92^{D**}
Cd₀ Si₁₀₀	1,56 ^d	0,91 ^e	0,36 ^f	0,22 ^e	0,76^D
Cd₀ Si₂₀₀	1,36 ^d	0,82 ^e	0,28 ^f	0,24 ^e	0,68^D
Cd₀ Si₃₀₀	1,34 ^d	0,83 ^e	0,28 ^f	0,26 ^e	0,68^D
Cd₁₀ Si₀	16,61 ^{ab}	8,33 ^{cd}	3,82 ^d	4,09 ^b	8,21^{ABC}
Cd₁₀ Si₁₀₀	15,69 ^{ab}	12,90 ^b	4,17 ^{cd}	2,40 ^c	8,79^{ABC}
Cd₁₀ Si₂₀₀	10,26 ^c	11,94 ^{bc}	4,88 ^{ab}	1,33 ^d	7,10^{BC}
Cd₁₀ Si₃₀₀	11,45 ^c	5,92 ^d	2,64 ^e	0,55 ^e	5,14^C
Cd₂₀ Si₀	16,88 ^{ab}	9,53 ^{bcd}	4,03 ^d	3,71 ^b	8,54^{ABC}
Cd₂₀ Si₁₀₀	15,31 ^b	11,71 ^{bc}	4,75 ^{abc}	5,41 ^a	9,29^{AB}
Cd₂₀ Si₂₀₀	15,36 ^b	19,77 ^a	5,01 ^a	5,07 ^a	11,30^A
Cd₂₀ Si₃₀₀	18,39 ^a	10,78 ^{bc}	4,22 ^{bcd}	2,00 ^{cd}	8,85^{ABC}
Ortalama	10,52^{A**}	7,87^B	2,91^C	2,13^C	

** : p<0,01 önemli.

Bitki organları arasında en yüksek Cd akümülayonu (10,52 mg kg⁻¹) bitkinin köklerinde en düşük Cd akümülayonu (2,13 mg kg⁻¹) bitkinin salkımlarında belirlenmiştir.

En yüksek Cd akümülayonu (11,30 mg kg⁻¹) Cd₂₀Si₂₀₀ uygulamasında, en düşük Cd akümülayonu (0,68-0,92 mg kg⁻¹) Cd₀Si_{0, 100, 200, 300} uygulamalarında belirlenmiştir.

Kadmiyum sorgumun diğer organlarına göre en fazla köklerinde birikmiştir. Bitkilerin genellikle köklerinde sürgünden önemli ölçüde daha fazla Cd biriktirdiği bilinmektedir (Kirkham 2006). Kadmiyumun köklerde birikmesinde silisyumun gösterdiği etkinin açıklanmasında araştırmacılar tarafından belirtilen bilgiler aşağıda sunulmuştur.

Silisyum, kök ucuna yakın endodermal hücre duvarlarında suberize bariyer oluşumunu teşvik ederek kadmiyumun gövdeye ve dolayısıyla sürgüne kadar taşınmasını önlemede etkindir (Vaculík vd. 2012). Silisyum, kök hücre duvarlarına bağlanarak kadmiyumu hapseder ve böylece kadmiyumun hücresel alımını önler (Liu vd. 2013). Silisyum tarafından şelatlanan Cd bitki kök hücrelerinin vakuollerinde tutulur, toksik metallerin ksilem yükünü düşürür ve sürgüne daha az translokasyona yol açar (Meng vd. 2018). Wei vd. (2018) Si uygulamasının çeltikte ağır metallerin kökten taneye taşınmasında fizyolojik azalma mekanizmasını harekete geçirdiği bildirilmişlerdir. Cai vd. (2020) Si uygulaması ile pirinç bitkilerinde Cd birikimindeki artışların, esas olarak köklerde kendini gösterdiğini bildirmişlerdir. Silisyum, kök hücre duvarındaki toplam polisakkaritlerin ve bunların bileşenlerinin (pektin ve selüloz) içeriğini önemli ölçüde artırır ve kadmiyumun pektin ve selüloza bağlanma yeteneğini geliştirir, bu da apoplast yolu ile kadmiyum taşıma verimliliğini azaltır (Cai vd. 2022).

Gramineous bitkilerinde, kökler tarafından alınan mineraller doğrudan tanelere taşınmaz, ancak bitki boğumlarında yeniden yönlendirilir. Bu nedenle, salkımlardaki element birikiminin boğumlardaki dağılımın seçici kontrolünde gerçekleşen önemli bir adım olduğu düşünülmektedir (Feng vd. 2011).

4.1.2. Bitkide Si Konsantrasyonu

Farklı dozlarda Cd ve Si uygulamalarının bitki organlarında biriken Si konsantrasyonlarına etkisine ait varyans analizi sonucu Tablo 4.7’de verilmiştir. Kökte biriken Si konsantrasyonunun da Cd uygulaması çok önemli ($p<0,01$), Si uygulaması önemli ($p<0,05$) ve Cd*Si interaksyonu önemsiz, gövdede biriken Si konsantrasyonunda Cd ve Si uygulaması çok önemli ($p<0,01$), Cd*Si interaksyonu önemsiz, yaprakta biriken Si konsantrasyonunda Cd uygulaması, Si uygulaması ve Cd*Si interaksyonu çok önemli ($p<0,01$) bulunurken salkımda biriken Si konsantrasyonunda Si uygulaması çok önemli ($p<0,01$), Cd uygulaması ve Cd*Si interaksyonu önemsiz bulunmuştur.

Tablo 4. 7. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun kök, gövde, yaprak ve salkımlarındaki Si içeriklerine (mg kg⁻¹) ait varyans analizi

Kaynak	SD	Kök				Gövde			
		KO	F değeri			KO	F değeri		
Cd	2	0,04	7,38**			0,17	24,87**		
Si	3	0,03	4,27*			0,04	6,05**		
Cd*Si	6	0,0	0,56			0,01	0,77		
Tekerrür	2	0,04	5,60			0,02	3,07		
Hata	22	0,01				0,01			
Genel	35								
		R ²	0,66	DK	%15,37	R ²	0,78	DK	%17,77
		Yaprak				Salkım			
		KO	F değeri			KO	F değeri		
Cd	2	0,45	565,11**			0,01	0,89		
Si	3	0,15	185,37**			0,07	6,45**		
Cd*Si	6	0,05	61,50**			0,02	1,31		
Tekerrür	2	0,01	1,19			0,01	0,27		
Hata	22	0,00				0,01			
Genel	35								
		R ²	0,99	DK	%3,29	R ²	0,57	DK	%9,09

** : P<0,01* : p<0,05 SD: Serbestlik derecesi, R²: Belirtme katsayısı, DK: Değişim katsayısı (%).

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının köklerdeki Si konsantrasyonuna (g kg⁻¹) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.5’de verilmiştir.

Tablo 4. 8. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, köklerdeki Si içeriklerine (g kg⁻¹) etkisi ve oluşan ortalamalar

Kökte Si konsantrasyonu (g kg ⁻¹)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd₀	0,41 ^{öd}	0,46	0,44	0,56	0,47^{B**}
Cd₁₀	0,56	0,57	0,54	0,61	0,57^A
Cd₂₀	0,38	0,44	0,49	0,56	0,47^B
Ortalama	0,45^{B*}	0,49^{AB}	0,49^{AB}	0,58^A	

** : p<0,01, * : p<0,05 ve öd: önemli değil. Büyük harfler ortalama gruplarını göstermektedir.

Uygulanan Si dozlarının artmasıyla kökte Si konsantrasyonu artmıştır. En düşük Si birikimi (0,45 g kg⁻¹) Si₀ uygulamasında iken en yüksek Si birikimi (0,58 g kg⁻¹) Si₃₀₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Cd₁₀ uygulaması kökte Si birikimi üzerine artışa (0,57 g kg⁻¹) neden olurken Cd₂₀ uygulaması azalışa (0,47 g kg⁻¹) neden olmuştur.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) kökte biriken Si konsantrasyonu üzerine etkisi istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur.

Toprağa eklenen Si konsantrasyonun da ki artış bitki dokularına da yansımıştır. Çalışmada her 1 kg toprağa denk gelen saf Si miktarı yaklaşık olarak 100 g kg⁻¹ Si uygulaması için: 0,76 g, 200 g kg⁻¹ Si uygulaması için 1,51 g ve 300 g kg⁻¹ Si uygulaması için 2,27 g olarak belirlenmiş ve sorgumun köklerinde Si konsantrasyonu 0,38-0,61 g kg⁻¹ arasında değişmiştir. Owino-Gerroh ve Gascho (2004) mısır bitkisine uyguladıkları bu çalışmaya benzer konsantrasyondaki 3 farklı Si dozunda (her 1 kg toprağa denk gelen Si miktarı: 1,30 g, 2,61 g ve 3,92 g) kök dokularında ölçtükleri Si konsantrasyonu bu çalışmaya benzer şekilde 0,57-0,72 g kg⁻¹ arasında değişmiştir.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının gövdedeki Si konsantrasyonuna (g kg⁻¹) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.9' da verilmiştir.

Tablo 4. 9. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, gövdedeki Si içeriklerine (g kg⁻¹) etkisi ve oluşan ortalamalar

Gövdede Si konsantrasyonu (g kg ⁻¹)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd₀	0,31 ^{öd}	0,35	0,38	0,43	0,37^{B**}
Cd₁₀	0,34	0,39	0,41	0,43	0,40^B
Cd₂₀	0,44	0,54	0,65	0,69	0,58^A
Ortalama	0,36^{B**}	0,43^{AB}	0,48^A	0,52^A	

** : p<0,01, öd: önemli değil. Büyük harfler ortalama gruplarını göstermektedir.

Uygulanan Si dozlarının artışı gövdede Si birikimin artmasına neden olmuştur. En düşük Si birikimi (0,36 g kg⁻¹) Si₀ uygulamasında iken en yüksek Si birikimi (0,48 ve 0,52 g kg⁻¹) Si₂₀₀, ₃₀₀ uygulamalarında belirlenmiştir.

Uygulanan Cd dozları gövdede Si konsantrasyonunun artmasına neden olmuştur. En düşük Si konsantrasyonu ($0,37 \text{ g kg}^{-1}$) Cd₀ uygulamasında iken en yüksek Si konsantrasyonu ($0,58 \text{ g kg}^{-1}$) Cd₂₀ uygulamasında belirlenmiştir.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) gövdede biriken Si konsantrasyonu üzerine etkisi istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur.

Silisyumun bitkinin ağır metal stresine karşı direncindeki rolü, köklerin, yaprakların ve gövdelerin hücre duvarlarına Si birikmesine atfedilir. Cd stresi altındaki mısır bitkisinde silisyum uygulamasının bitki dokularında daha yüksek bir Si içeriği ile sonuçlandığı bildirilmiştir (Dresler vd. 2015).

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının yapraklardaki Si konsantrasyonuna (g kg^{-1}) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.10'da verilmiştir.

Tablo 4. 10. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, yapraklardaki Si içeriklerine (g kg^{-1}) etkisi ve oluşan ortalamalar

Yaprakta Si konsantrasyonu (g kg^{-1})					
Uygulamalar (mg kg^{-1})	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd₀	0,40 ^{g**}	0,51 ^f	0,89 ^e	0,94 ^{de}	0,69^{C**}
Cd₁₀	0,99 ^{bcd}	0,99 ^{bcd}	1,13 ^a	1,04 ^b	1,04^A
Cd₂₀	0,95 ^{de}	0,95 ^{cde}	1,03 ^{bc}	1,06 ^{ab}	1,00^B
Ortalama	0,78^{B**}	0,82^B	1,02^A	1,02^A	

** : $p < 0,01$. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Uygulanan Si dozlarının artışı yaprakta Si birikimin artmasına neden olmuştur. En düşük Si birikimi ($0,78\text{-}0,82 \text{ g kg}^{-1}$) Si₀ uygulamasında iken en yüksek Si birikimi ($1,02 \text{ g kg}^{-1}$) Si_{200, 300} uygulamalarında belirlenmiştir. Cd₁₀ uygulaması yaprakta Si birikimi üzerine artışa ($1,04 \text{ g kg}^{-1}$) neden olurken Cd₂₀ uygulaması azalışa ($1,00 \text{ g kg}^{-1}$) neden olmuştur. Yaprakta, Cd*Si interaksiyonu sonucunda en az Si birikimi ($0,40 \text{ g kg}^{-1}$) Cd₀Si₀ uygulamasında en fazla Si birikimi ($1,13 \text{ g kg}^{-1}$) Cd₁₀Si₂₀₀ uygulamasında belirlenmiştir. Uygulanan silisyum dozlarının artışının katlar şeklinde olmasına karşın yaprak dokularında Si içeriği birbirine yakın oranlarda artmıştır (Tablo 4.10). Benzer eğilim, Çelik (2016) tarafından kavunda NaCl stresine karşı Si uygulaması yapılan çalışmada; uygulanan Si

dozları 0,5-1,0-2,0 mM iken bitkilerin yapraklarında Si konsantrasyonunu sırasıyla %1,25-1,25- 1,43 olarak belirlemiştir.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının salkımlardaki Si konsantrasyonuna (g kg^{-1}) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.11’de verilmiştir.

Tablo 4. 11. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımlardaki Si içeriklerine (g kg^{-1}) etkisi ve oluşan ortalamalar

Uygulamalar (mg kg^{-1})	Salkımda Si konsantrasyonu (g kg^{-1})				
	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd₀	1,06 ^{öd}	1,12	1,19	1,36	1,18^{öd}
Cd₁₀	1,16	1,22	1,22	1,25	1,21
Cd₂₀	1,10	1,16	1,38	1,31	1,24
Ortalama	1,11^{C**}	1,17^{BC}	1,26^{AB}	1,31^A	

**₂: $p < 0,01$, öd: önemli değil. Büyük harfler ortalama gruplarını göstermektedir.

Uygulanan Si dozları salkımda Si birikiminin artmasına neden olmuştur. En düşük Si birikimi ($1,11 \text{ g kg}^{-1}$) Si₀ uygulamasında iken en yüksek Si birikimi ($1,31 \text{ g kg}^{-1}$) Si₃₀₀ uygulamasında ölçülmüştür.

Uygulanan Cd dozlarının salkımda biriken Si konsantrasyonuna etkisi istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur.

Salkımda, Cd*Si interaksiyonu sonucunda Si birikimi istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur.

Ding vd. (2005) pirinçte, silisyumun köklerden gövde ve yapraklara, oradan da kabuk ve tanelere doğru bir artış olduğunu tespit etmişlerdir.

Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki Si içeriğine ve ortalamalarına etkisi Tablo 4.12’de gösterilmiştir.

Tablo 4. 12. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki Si içeriğine (g kg⁻¹) ve ortalamalarına etkisi

Uygulamalar	Kök	Gövde	Yaprak	Salkım	Ortalama
Cd₀ Si₀	0,41 ^{ab*}	0,31 ^{c**}	0,40 ^{g**}	1,06 ^{b*}	0,55^{D**}
Cd₀ Si₁₀₀	0,46 ^{ab}	0,35 ^c	0,51 ^f	1,12 ^{ab}	0,61^{CD}
Cd₀ Si₂₀₀	0,44 ^{ab}	0,38 ^c	0,89 ^e	1,19 ^{ab}	0,72^{BC}
Cd₀ Si₃₀₀	0,56 ^{ab}	0,43 ^{bc}	0,94 ^{de}	1,36 ^{ab}	0,82^{AB}
Cd₁₀ Si₀	0,56 ^{ab}	0,34 ^c	0,99 ^{bcd}	1,16 ^{ab}	0,76^{ABC}
Cd₁₀ Si₁₀₀	0,57 ^{ab}	0,39 ^c	0,99 ^{bcd}	1,22 ^{ab}	0,79^{AB}
Cd₁₀ Si₂₀₀	0,54 ^{ab}	0,41 ^{bc}	1,13 ^a	1,22 ^{ab}	0,83^{AB}
Cd₁₀ Si₃₀₀	0,61 ^a	0,43 ^{bc}	1,04 ^b	1,25 ^{ab}	0,83^{AB}
Cd₂₀ Si₀	0,38 ^b	0,44 ^{bc}	0,95 ^{de}	1,10 ^{ab}	0,72^{BC}
Cd₂₀ Si₁₀₀	0,44 ^{ab}	0,54 ^{abc}	0,95 ^{cde}	1,16 ^{ab}	0,77^{AB}
Cd₂₀ Si₂₀₀	0,49 ^{ab}	0,65 ^{ab}	1,03 ^{bc}	1,38 ^a	0,89^A
Cd₂₀ Si₃₀₀	0,56 ^{ab}	0,69 ^a	1,06 ^{ab}	1,31 ^{ab}	0,91^A
Ortalama	0,50^{C**}	0,45^C	0,91^B	1,21^A	

** : p<0,01 ve * : p<0,05 önemli.

Bitki organları arasında en yüksek Si akümülayonu (1,21 g kg⁻¹) bitkinin salkımlarında en düşük Si akümülayonu (0,50 ve 0,45 g kg⁻¹) bitkinin kök ve gövdesinde belirlenmiştir. Bitkide en yüksek Si akümülayonu (0,89 ve 0,91 g kg⁻¹) Cd₂₀Si_{200, 300} ve uygulamalarında, en düşük Si akümülayonu (0,55 g kg⁻¹) Cd₀Si₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Yapraklar ve özellikle salkımda köklerden daha fazla Si birikmiştir. Nwugo vd. (2008) Si ile muamele edilen bitkilerin (pirinç) sürgünlerinde köklerinden daha fazla Si biriktiğini göstermiştir. Alınan Si mısırın köklerinde tutulmamış, bunun yerine sürgünlere kolayca taşınmıştır ve bu da organların dokularında benzer Si konsantrasyonlarıyla sonuçlanmıştır (Dresler vd. 2015). Henriët vd. (2006) besin çözeltisinde çeşitli Si konsantrasyonları ile hidroponik olarak yetiştirilen muz bitkilerinin çeşitli kısımlarındaki Si konsantrasyonlarını ölçmüşlerdir; çözeltideki Si konsantrasyonu ne olursa olsun, bitki içinde Si taşınmasında transpirasyonun önemli rolünü yansıtan bir konsantrasyon gradyanı bulmuşlardır. Yem bitkileri tarafından yüksek Si emilimi, bu elementin birikimini artırır (Buchelt vd. 2021).

4.1.3. Bitkide Fe Konsantrasyonu

Farklı dozlarda Cd ve Si uygulamalarının bitki organlarındaki Fe konsantrasyonlarına etkisine ait varyans analizi sonucu Tablo 4.13'te verilmiştir. Kök, gövde, yaprak ve

salkımda belirlenen Fe konsantrasyonunda Cd uygulaması, Si uygulaması ve Cd*Si interaksyonu çok önemli ($p<0,01$) bulunmuştur.

Tablo 4. 13. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun kök, gövde, yaprak ve salkımlarındaki Fe içeriklerine ait varyans analizi

Kaynak	SD	Kök				Gövde			
		KO		F değeri		KO		F değeri	
Cd	2	9113795,5		253,54**		8020,94		362,54**	
Si	3	858408		23,88**		1844,99		83,39**	
Cd*Si	6	1616574		44,97**		1230,61		55,62**	
Tekerrür	2	295045		0,82		13,41		0,61	
Hata	22	35946				22,12			
Genel	35								
		R ²	0,97	DK	%10,62	R ²	0,98	DK	%10,36
		Yaprak				Salkım			
		KO		F değeri		KO		F değeri	
Cd	2	4570,47		328,87**		13184,21		431,88**	
Si	3	188,79		13,58**		859,23		28,15**	
Cd*Si	6	781,78		56,25**		237,43		7,78**	
Tekerrür	2	25,06		1,80		33,95		1,11	
Hata	22	13,90				30,53			
Genel	35								
		R ²	0,98	DK	%6,89	R ²	0,98	DK	%15,02

** : $P<0,01$, SD: Serbestlik derecesi, R²: Belirtme katsayısı, DK: Değişim katsayısı (%).

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının köklerdeki Fe konsantrasyonuna (mg kg^{-1}) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.14'te verilmiştir.

Tablo 4. 14. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, köklerdeki Fe içeriklerine (mg kg^{-1}) etkisi ve oluşan ortalamalar

Kökte Fe konsantrasyonu (mg kg^{-1})					
Uygulamalar (mg kg^{-1})	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd ₀	4169,13 ^{a**}	2650,50 ^b	2634,42 ^b	1552,09 ^{de}	2751,54 ^{A**}
Cd ₁₀	1119,12 ^{def}	1619,81 ^{cd}	2131,38 ^{bc}	1324,18 ^{def}	1548,62 ^B
Cd ₂₀	987,89 ^f	1023,59 ^{ef}	990,55 ^{ef}	1228,95 ^{def}	1057,75 ^C
Ortalama	2092,05 ^{A**}	1764,63 ^B	1918,78 ^{AB}	1368,41 ^C	

** : $p<0,01$ önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksyon gruplarını göstermektedir.

Uygulanan Si dozlarının artmasına paralel olarak kökteki Fe konsantrasyonu azalma göstermiştir. En düşük ($1368,41 \text{ mg kg}^{-1}$) Fe içeriği Si₃₀₀ uygulamasında en yüksek Fe içeriği ($2092,05 \text{ mg kg}^{-1}$) ise Si₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Uygulanan Cd dozlarının artmasıyla kökte Fe içeriği düşüş göstermiştir. En düşük (1057,75 mg kg⁻¹) Fe içeriği Cd₂₀ uygulamasında en yüksek Fe içeriği (2751,54 mg kg⁻¹) ise Cd₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Kökte, Cd*Si interaksyonu sonucunda en az Fe içeriği (987,89 mg kg⁻¹) Cd₂₀Si₀ uygulamasında iken en fazla Fe içeriği (4169,13 mg kg⁻¹) Cd₀Si₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının gövdedeki Fe konsantrasyonuna (mg kg⁻¹) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.15'te verilmiştir.

Tablo 4. 15. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, gövdedeki Fe içeriklerine (mg kg⁻¹) etkisi ve oluşan ortalamalar

Gövdede Fe konsantrasyonu (mg kg ⁻¹)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd₀	29,39 ^{c**}	22,47 ^c	23,69 ^c	26,48 ^c	25,51^{C**}
Cd₁₀	84,22 ^a	96,0 ^a	95,67 ^a	22,45 ^c	74,59^A
Cd₂₀	45,79 ^b	23,41 ^c	49,66 ^b	24,92 ^c	35,95^B
Ortalama	53,13^{AB**}	47,29^B	56,34^A	24,62^C	

** : p<0,01 önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksyon gruplarını göstermektedir.

Gövdede en düşük Fe konsantrasyonu (24,62 mg kg⁻¹) Si₃₀₀ uygulamasında iken en yüksek Fe konsantrasyonu (56,34 mg kg⁻¹) Si₂₀₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Gövdede Cd uygulaması sonucunda en düşük Fe konsantrasyonu (25,51 mg kg⁻¹) Cd₀ uygulamasında iken en yüksek Fe konsantrasyonu (74,59 mg kg⁻¹) Cd₁₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Gövdede, Cd*Si interaksyonu sonucunda Fe içeriği 22,45-96,0 mg kg⁻¹ arasında değişim göstererek 3 farklı ortalama grubunu oluşturmuştur.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının yapraklardaki Fe konsantrasyonuna (mg kg⁻¹) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.16'da verilmiştir.

Tablo 4. 16. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, yapraklardaki Fe içeriklerine (mg kg^{-1}) etkisi ve oluşan ortalamalar

Yaprakta Fe konsantrasyonu (mg kg^{-1})					
Uygulamalar (mg kg^{-1})	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd ₀	78,52 ^{a**}	64,75 ^c	45,12 ^d	85,65 ^a	68,51^{A**}
Cd ₁₀	75,88 ^{ab}	59,14 ^c	67,23 ^{bc}	45,72 ^d	61,99^B
Cd ₂₀	18,24 ^f	35,46 ^{de}	31,90 ^e	42,11 ^{de}	31,93^C
Ortalama	57,55^{A**}	53,11^A	48,09^B	57,83^A	

** $p < 0,01$ önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Si uygulamaları sonucunda yaprakta belirlenen Fe konsantrasyonu 48,09-57,83 mg kg^{-1} arasında değişim göstererek iki farklı ortalama grubunu oluşturmuştur.

Yaprakta Cd uygulaması sonucunda Fe konsantrasyonu düşmüştür. En düşük Fe konsantrasyonu (31,93 mg kg^{-1}) Cd₂₀ uygulamasında iken en yüksek Fe konsantrasyonu (68,51 mg kg^{-1}) Cd₀ uygulamasında belirlenmiştir.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) Fe içeriği en düşük (18,24 mg kg^{-1}) Cd₂₀Si₀ uygulamasında, en yüksek (78,52 ve 85,65 mg kg^{-1}) ise Cd₀Si₀ ve Cd₀Si₃₀₀ uygulamalarında belirlenmiştir.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının salkımlardaki Fe konsantrasyonuna (mg kg^{-1}) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.17’de verilmiştir.

Tablo 4. 17. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımlardaki Fe içeriklerine (mg kg^{-1}) etkisi ve oluşan ortalamalar

Salkımda Fe konsantrasyonu (mg kg^{-1})					
Uygulamalar (mg kg^{-1})	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd ₀	18,66 ^{de**}	14,20 ^{de}	10,38 ^e	19,69 ^{de}	15,73^{B**}
Cd ₁₀	29,91 ^d	20,28 ^{de}	13,76 ^{de}	14,84 ^{de}	19,70^B
Cd ₂₀	100,05 ^a	73,29 ^b	53,02 ^c	73,73 ^b	75,02^A
Ortalama	49,54^{A*}	35,92^B	25,72^C	36,08^B	

** $p < 0,01$, * $p < 0,05$ önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Salkımda en düşük Fe konsantrasyonu ($25,72 \text{ mg kg}^{-1}$) Si_{200} uygulamasında iken en yüksek Fe konsantrasyonu ($49,54 \text{ mg kg}^{-1}$) Si_0 uygulamasında belirlenmiştir.

Uygulanan Cd dozları salkımda Fe içeriğinin artmasına neden olmuştur. Cd_0 ($15,73 \text{ mg kg}^{-1}$) ve Cd_{10} ($19,70 \text{ mg kg}^{-1}$) uygulamaları aynı ortalama grubunu oluştururken Cd_{20} ($75,02 \text{ mg kg}^{-1}$) uygulaması farklı ortalama grubunu oluşturmuştur.

Salkımda, $\text{Cd} \times \text{Si}$ interaksyonu sonucunda en az Fe içeriği ($10,38 \text{ mg kg}^{-1}$) $\text{Cd}_0\text{Si}_{200}$ uygulamasında iken en fazla Fe içeriği ($100,05 \text{ mg kg}^{-1}$) $\text{Cd}_{20}\text{Si}_0$ uygulamasında belirlenmiştir.

Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki Fe içeriğine ve ortalamalarına etkisi Tablo 4.18'de gösterilmiştir.

Tablo 4. 18. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki Si içeriğine (mg kg^{-1}) ve ortalamalarına etkisi

Uygulamalar	Kök	Gövde	Yaprak	Salkım	Ortalama
$\text{Cd}_0 \text{ Si}_0$	4169,13 ^{a***}	29,39 ^{c***}	78,52 ^{a***}	18,66 ^{de***}	1073,93^{A***}
$\text{Cd}_0 \text{ Si}_{100}$	2650,50 ^b	22,47 ^c	64,75 ^c	14,20 ^{de}	687,98^{AB}
$\text{Cd}_0 \text{ Si}_{200}$	2634,42 ^b	23,69 ^c	45,12 ^d	10,38 ^e	678,40^{AB}
$\text{Cd}_0 \text{ Si}_{300}$	1552,09 ^{de}	26,48 ^c	85,65 ^a	19,69 ^{de}	420,98^B
$\text{Cd}_{10} \text{ Si}_0$	1119,12 ^{def}	84,22 ^a	75,88 ^{ab}	29,91 ^d	327,28^B
$\text{Cd}_{10} \text{ Si}_{100}$	1619,80 ^{cd}	96,00 ^a	59,14 ^c	20,28 ^{de}	448,80^B
$\text{Cd}_{10} \text{ Si}_{200}$	2131,38 ^{bc}	95,67 ^a	67,23 ^{bc}	13,76 ^{de}	577,01^{AB}
$\text{Cd}_{10} \text{ Si}_{300}$	1324,18 ^{def}	22,45 ^c	45,72 ^d	14,84 ^{de}	351,80^B
$\text{Cd}_{20} \text{ Si}_0$	987,89 ^f	45,79 ^b	18,24 ^f	100,05 ^a	287,99^B
$\text{Cd}_{20} \text{ Si}_{100}$	1023,59 ^{ef}	23,41 ^c	35,46 ^{de}	73,29 ^b	288,94^B
$\text{Cd}_{20} \text{ Si}_{200}$	990,55 ^{ef}	49,66 ^b	31,90 ^e	53,02 ^c	281,28^B
$\text{Cd}_{20} \text{ Si}_{300}$	1228,95 ^{def}	24,92 ^c	42,11 ^{de}	73,73 ^b	342,43^B
Ortalama	1785,97^{A***}	45,35^B	54,14^B	36,82^B	

***: $p < 0,01$ önemli.

Bitki organları arasında en yüksek Fe içeriği ($1785,97 \text{ mg kg}^{-1}$) bitkinin köklerinde en düşük Fe içeriği ($45,35$, $54,14$ ve $36,82 \text{ mg kg}^{-1}$) bitkinin gövde, yaprak ve salkımlarında belirlenmiştir.

Bitkide en yüksek Fe konsantrasyonu 1073,93 mg kg⁻¹ ile Cd₀Si₀ uygulamasında belirlenirken diğer uygulamalarda Fe konsantrasyonu 281,28- 687,98 mg kg⁻¹ arasında değişim göstererek 2 farklı ortalama grubu oluşturmuştur.

Bitki organları arasında en yüksek Fe içeriği köklerde ölçülmüştür (Tablo 4.18). Bitkiler Si ile muamele edildiğinde köklerde yüksek Fe birikimi gözlenmiş (Pavlovic vd. 2013, Bityutskii vd. 2014) bu durum kök apoplastik havuzlarındaki yüksek Fe miktarına (Pavlovic vd. 2013) veya kök yüzeylerinde çökmesine bağlanmıştır.

Kök ve yapraklarda Cd dozlarının artmasıyla Fe konsantrasyonu azalma göstermiştir. Bitkilerde Cd'nin varlığı, Cd'nin sadece Fe emilimini değil (Sharma vd. 2004), aynı zamanda bitkinin toprakaltı kısımlarından toprak üstü kısımlarına Fe taşınımını da engellemektedir (Yoshihara vd. 2006, Solti vd. 2011, Xu vd. 2015). Salkımlarda ise Fe konsantrasyonu Cd doz artışından etkilenmeden artış göstermiştir bunun sebebinin bitki organlarında Cd birikiminin salkımda en az olmasının olduğu düşünülmektedir (Tablo 4.6). Kadmiyum taneye daha az taşındığı için Fe elementinin taneye taşınımı engellenmemiş olabilir.

Yem bitkilerinin doğal Fe içeriği 18-1000 mg kg⁻¹ arasında değişmektedir (Kabata-Pendias, 2011). Çalışmamızda toprak üstü organların Fe içeriği bu sınırlar içerisinde yer almaktadır. Silisyum uygulaması ile kökteki Fe konsantrasyonunun azaldığı görülmektedir. Fu vd. (2012) ortama Si ilavesinin, sürgüne taşınması nedeniyle pirinçteki demir plak üzerindeki Fe konsantrasyonunu azalttığını göstermiştir.

4.1.4. Bitkide Mn Konsantrasyonu

Farklı dozlarda Cd ve Si uygulamalarının bitki organlarındaki Mn konsantrasyonlarına etkisine ait varyans analizi sonucu Tablo 4.19'da verilmiştir. Kök ve gövdede belirlenen Mn konsantrasyonunda Cd uygulaması, Si uygulaması ve Cd*Si interaksyonu çok önemli (p<0,01) bulunurken, yapraklarda Cd uygulaması ve Si uygulaması çok önemli (p<0,01) iken Cd*Si interaksyonu önemli (p<0,05), salkımda belirlenen Mn konsantrasyonunda yalnızca Cd uygulaması çok önemli (p<0,01) bulunmuştur.

Tablo 4. 19. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun kök, gövde, yaprak ve salkımlarındaki Mn içeriklerine ait varyans analizi

Kaynak	SD	Kök				Gövde			
		KO		F değeri		KO		F değeri	
Cd	2	32226,82		484,73**		3780,39		13,93**	
Si	3	5801,56		87,26**		2313,41		8,52**	
Cd*Si	6	10832,66		162,94**		1314,45		4,85**	
Tekerrür	2	27,3		0,41		260,17		0,96	
Hata	22	66,5				271,45			
Genel	35								
		R ²	0,99	DK	%7,50	R ²	0,79	DK	%18,43
		Yaprak				Salkım			
		KO		F değeri		KO		F değeri	
Cd	2	2102,30		19,82**		3498,57		13,36**	
Si	3	3303,84		31,15**		340,87		1,30	
Cd*Si	6	347,85		3,28*		77,22		0,29	
Tekerrür	2	15,51		0,15		399,79		1,53	
Hata	22	106,07				261,86			
Genel	35								
		R ²	0,87	DK	%9,20	R ²	0,62	DK	%19,01

**: P<0,01, *:p<0,05, SD: Serbestlik derecesi, R²: Belirtme katsayısı, DK: Değişim katsayısı (%).

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının köklerdeki Mn konsantrasyonuna (mg kg⁻¹) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.20’de verilmiştir.

Tablo 4. 20. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, köklerdeki, Mn içeriklerine (mg kg⁻¹) etkisi ve oluşan ortalamalar

Kökte Mn konsantrasyonu (mg kg ⁻¹)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd ₀	304,41 ^{a**}	144,63 ^b	135,49 ^b	88,90 ^{cd}	168,36 ^{A**}
Cd ₁₀	70,45 ^{de}	85,30 ^{cd}	98,31 ^c	75,44 ^{cde}	82,37 ^B
Cd ₂₀	59,33 ^e	79,79 ^{cde}	70,73 ^{de}	91,13 ^{cd}	75,25 ^B
Ortalama	144,73 ^{A**}	103,24 ^B	101,51 ^B	85,16 ^C	

**: p<0,01 önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Uygulanan Si dozlarının artışı kökte Mn konsantrasyonunun azalmasına neden olmuştur. En düşük (85,16 mg kg⁻¹) Mn içeriği Si₃₀₀ uygulamasında en yüksek Mn içeriği (144,73 mg kg⁻¹) ise Si₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Uygulanan Cd dozlarının artmasıyla kökte Mn içeriği düşüş göstermiştir. En düşük (75,25 ve 82,37 mg kg⁻¹) Mn içeriği Cd₁₀ ve Cd₂₀ uygulamalarında en yüksek Mn içeriği (168,36 mg kg⁻¹) ise Cd₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Kökte, Cd*Si interaksyonu sonucunda en az Mn içeriği (59,33 mg kg⁻¹) Cd₂₀Si₀ uygulamasında iken en fazla Mn içeriği (304,41 mg kg⁻¹) Cd₀Si₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının gövdedeki Mn konsantrasyonuna (mg kg⁻¹) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.21’de verilmiştir.

Tablo 4. 21. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, gövdedeki Mn içeriklerine (mg kg⁻¹) etkisi ve oluşan ortalamalar

Gövdede Mn konsantrasyonu (mg kg ⁻¹)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd₀	77,88 ^{bc**}	62,58 ^c	66,76 ^c	82,46 ^{bc}	72,41^{B**}
Cd₁₀	62,08 ^c	97,68 ^{bc}	103,72 ^{abc}	88,36 ^{bc}	87,96^B
Cd₂₀	72,11 ^c	85,85 ^{bc}	147,79 ^a	125,57 ^{ab}	107,83^A
Ortalama	70,70^{C**}	82,03^{BC}	106,09^A	98,80^{AB}	

** : p<0,01 önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksyon gruplarını göstermektedir.

Gövdede en düşük Mn konsantrasyonu (70,70 mg kg⁻¹) Si₀ uygulamasında iken en yüksek Mn konsantrasyonu (106,09 mg kg⁻¹) Si₂₀₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Gövdede Cd uygulaması sonucunda en düşük Mn konsantrasyonu (72,41 ve 87,96 mg kg⁻¹) Cd₀ ve Cd₁₀ uygulamalarında iken en yüksek Mn konsantrasyonu (107,83 mg kg⁻¹) Cd₂₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Gövdede, Cd*Si interaksyonu sonucunda en düşük Mn konsantrasyonu (62,08, 62,58, 66,76 ve 72,11 mg kg⁻¹) Cd₁₀Si₀, Cd₀Si₁₀₀, Cd₀Si₂₀₀ ve Cd₂₀Si₀ uygulamalarında en yüksek Mn konsantrasyonu (147,79 mg kg⁻¹) ise Cd₂₀Si₂₀₀ uygulamasında ölçülmüştür.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının yapraklardaki Mn konsantrasyonuna (mg kg⁻¹) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.22’de verilmiştir.

Tablo 4. 22. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, yapraklardaki, Mn içeriklerine (mg kg^{-1}) etkisi ve oluşan ortalamalar

Yaprakta Mn konsantrasyonu (mg kg^{-1})					
Uygulamalar (mg kg^{-1})	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd ₀	120,56 ^{ab*}	117,10 ^{ab}	135,84 ^a	133,12 ^a	126,65 ^{A**}
Cd ₁₀	78,92 ^d	85,08 ^{cd}	113,06 ^{abc}	126,53 ^{ab}	100,90 ^B
Cd ₂₀	74,64 ^d	98,78 ^{bcd}	127,07 ^{ab}	133,43 ^a	108,48 ^B
Ortalama	91,38 ^{B**}	100,32 ^B	125,32 ^A	131,03 ^A	

** : $p < 0,01$, * : $p < 0,05$ önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Si uygulamalarındaki doz artışına paralel olarak yaprakta belirlenen Mn konsantrasyonu da artmıştır ve iki farklı ortalama grubu oluşmuştur. En düşük Mn konsantrasyonları (91,38 ve 100,32 mg kg^{-1}) Si₀ ve Si₁₀₀ uygulamalarında, en yüksek Mn konsantrasyonları (125,32 ve 131,03 mg kg^{-1}) Si₂₀₀ ve Si₃₀₀ uygulamalarında bulunmuştur.

Yaprakta Cd uygulaması sonucunda Mn konsantrasyonu düşmüştür. En düşük Mn konsantrasyonu (100,90 ve 108,48 mg kg^{-1}) Cd₁₀ ve Cd₂₀ uygulamalarında iken en yüksek Mn konsantrasyonu (126,65 mg kg^{-1}) Cd₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Yapraklarda Cd*Si interaksiyonu sonucunda Mn içeriği en düşük (74,64 ve 78,92 mg kg^{-1}) Cd₁₀Si₀ Cd₂₀Si₀ uygulamalarında, en yüksek (133,12, 133,43 ve 135,84 mg kg^{-1}) ise Cd₀Si₃₀₀, Cd₂₀Si₃₀₀ ve Cd₀Si₂₀₀ uygulamalarında belirlenmiştir.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının salkımlardaki Mn konsantrasyonuna (mg kg^{-1}) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.23’de verilmiştir.

Tablo 4. 23. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımlardaki Mn içeriklerine (mg kg^{-1}) etkisi ve oluşan ortalamalar

Salkımda Mn konsantrasyonu (mg kg^{-1})					
Uygulamalar (mg kg^{-1})	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd ₀	96,06 ^{öd}	89,32	101,14	86,07	93,15 ^{A**}
Cd ₁₀	106,64	93,99	96,81	89,28	96,68 ^A

Tablo 4. 23. (Devam) Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımlardaki Mn içeriklerine (mg kg⁻¹) etkisi ve oluşan ortalamalar

Cd₂₀	66,34	72,06	69,72	53,86	65,50^B
Ortalama	89,68^{öd}	85,12	89,22	76,40	

**₁: p<0,01 önemli, öd: önemli değil. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Silisyum (Si) uygulamasının salkımdaki Mn konsantrasyonu üzerine etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

Uygulanan Cd dozları salkımda Mn içeriğinin azalmasına neden olmuştur. En düşük Mn içeriği (65,50 mg kg⁻¹) Cd₂₀ uygulamasında en yüksek Mn içeriği (93,15 ve 96,68 mg kg⁻¹) ise Cd₀ ve Cd₁₀ uygulamalarında elde edilmiştir.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) salkımdaki Mn konsantrasyonu istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur.

Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki Mn içeriğine ve ortalamalarına etkisi Tablo 4.24'te gösterilmiştir.

Tablo 4. 24. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki Mn içeriğine (mg kg⁻¹) ve ortalamalarına etkisi

Uygulamalar	Kök	Gövde	Yaprak	Salkım	Ortalama
Cd₀ Si₀	304,41 ^{a**}	77,88 ^{bc**}	120,56 ^{ab**}	96,06 ^{ab*}	149,73^{A**}
Cd₀ Si₁₀₀	144,63 ^b	62,58 ^c	117,09 ^{ab}	89,32 ^{ab}	103,41^{AB}
Cd₀ Si₂₀₀	135,49 ^b	66,76 ^c	135,84 ^a	101,14 ^{ab}	109,81^{AB}
Cd₀ Si₃₀₀	88,90 ^{cd}	82,46 ^{bc}	133,12 ^a	86,07 ^{ab}	97,64^B
Cd₁₀ Si₀	70,45 ^{de}	62,08 ^c	78,92 ^d	106,64 ^a	79,52^B
Cd₁₀ Si₁₀₀	85,30 ^{cd}	97,68 ^{bc}	85,08 ^{cd}	93,99 ^{ab}	90,51^B
Cd₁₀ Si₂₀₀	98,31 ^c	103,72 ^{abc}	113,06 ^{abc}	96,81 ^{ab}	102,98^{AB}
Cd₁₀ Si₃₀₀	75,44 ^{cde}	88,36 ^{bc}	126,53 ^{ab}	89,28 ^{ab}	94,90^B
Cd₂₀ Si₀	59,33 ^e	72,11 ^c	74,64 ^d	66,34 ^{ab}	68,11^B
Cd₂₀ Si₁₀₀	79,79 ^{cde}	85,85 ^{bc}	98,78 ^{bcd}	72,06 ^{ab}	84,12^B
Cd₂₀ Si₂₀₀	70,73 ^{de}	147,78 ^a	127,07 ^{ab}	69,72 ^{ab}	103,83^{AB}
Cd₂₀ Si₃₀₀	91,13 ^{cd}	125,57 ^{ab}	133,43 ^a	53,86 ^b	101,00^B
Ortalama	108,66^{AB**}	89,40^{BC}	112,01^A	85,11^C	

**₁: p<0,01 önemli.

Bitki organları arasında en yüksek Mn içeriği ($112,01 \text{ mg kg}^{-1}$) bitkinin yapraklarında en düşük Mn içeriği ($85,11$ ve $89,40 \text{ mg kg}^{-1}$) bitkinin salkım ve gövdesinde belirlenmiştir.

Bitkide en yüksek Mn konsantrasyonu $149,73 \text{ mg kg}^{-1}$ ile Cd_0Si_0 uygulamasında belirlenirken diğer uygulamalarda en düşük Mn konsantrasyonu $68,11$ - $109,81 \text{ mg kg}^{-1}$ $\text{Cd}_{20}\text{Si}_0$, $\text{Cd}_0\text{Si}_{200}$ arasında değişim göstererek 2 farklı ortalama grubu oluşturmuştur.

Kadmiyum (Cd) uygulaması kökte, yaprakta ve salkımda Mn konsantrasyonunu azaltmıştır. Sun vd. (2022) Mn ve Cd arasındaki ters etkileşimi *Salvia miltiorrhiza* bitkisine Mn eklenmesinin topraktaki kadmiyumun etkinliğini azalttığını ve bitkiler tarafından kadmiyumun alımını ve bitki içindeki hareketini azalttığını ifade etmişlerdir. Silisyum dozlarının artışı ile Mn konsantrasyonu kökte azalmış yaprakta artmıştır. Buğdayda Mn genellikle köklerden ziyade bitki sürgünlerinde birikme eğilimindedir (Page ve Feller, 2005). Vlamis ve Williams (1967) bazı buğdaygillerde (buğday, arpa, yulaf, çavdar, çeltik) silisyumun dokularda Mn içeriğini azaltmada etkisinin olduğu bildirmiş ve köklerin Mn içeriğini, durumun tersine döndüğü çeltik hariç (çeltik sürgünlerinin Mn içeriği köklerden biraz daha yüksek bulunmuştur) tüm bitkilerde sürgünlerinkinden daha yüksek bulmuşlardır. Yaprakların normal Mn içerikleri türler arasında büyük farklılıklar gösterir (30 - 500 mg kg^{-1}) Mn kuru kütle, Clarkson, 1988; Millaleo vd. (2010). Bitki organları arasında en az Mn salkımlarda belirlenmiştir. Buğdayın olgunluk aşamasında köklerden tanelere Mn taşınmasının sıklıkla yetersiz olduğu bildirilmiştir (Rengel, 2001).

4.1.5. Bitkide Zn Konsantrasyonu

Farklı dozlarda Cd ve Si uygulamalarının bitki organlarındaki Zn konsantrasyonlarına etkisine ait varyans analizi sonucu Tablo 4.25'te verilmiştir. Kök, gövde ve yapraklarda belirlenen Zn konsantrasyonunda Cd uygulaması, Si uygulaması ve Cd*Si interaksyonu çok önemli ($p<0,01$) bulunurken salkımda belirlenen Zn konsantrasyonunda Cd uygulaması ve Cd*Si interaksyonu çok önemli ($p<0,01$) bulunmuştur.

Tablo 4. 25. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun kök, gövde, yaprak ve salkımlarındaki Zn içeriklerine ait varyans analizi

Kaynak	SD	Kök				Gövde			
		KO		F değeri		KO		F değeri	
Cd	2	776,81		511,87**		85,55		18,87**	
Si	3	199,93		131,75**		91,78		20,25**	
Cd*Si	6	129,86		85,57**		35,98		7,94**	
Tekerrür	2	1,23		0,81		23,72		5,23	
Hata	22	1,52				4,53			
Genel	35								
		R ²	0,99	DK	%9,09	R ²	0,88	DK	%16,91
		Yaprak				Salkım			
		KO		F değeri		KO		F değeri	
Cd	2	31,43		47,89**		1269,07		30,26**	
Si	3	14,07		21,45**		59,87		1,43	
Cd*Si	6	17,18		26,18**		328,92		7,84**	
Tekerrür	2	0,379		0,60		27,24		0,65	
Hata	22	0,66				41,94			
Genel	35								
		R ²	0,94	DK	%15,00	R ²	0,84	DK	%18,31

** : P<0,01, SD: Serbestlik derecesi, R²: Belirtme katsayısı, DK: Değişim katsayısı (%).

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının köklerdeki Zn konsantrasyonuna (mg kg⁻¹) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.26’da verilmiştir.

Tablo 4. 26. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, köklerdeki Zn içeriklerine (mg kg⁻¹) etkisi ve oluşan ortalamalar

Kökte Zn konsantrasyonu (mg kg ⁻¹)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd₀	36,94 ^{a**}	26,73 ^b	16,66 ^c	10,31 ^{def}	22,66^{A**}
Cd₁₀	12,02 ^{de}	13,21 ^{cd}	7,03 ^{fg}	9,48 ^{ef}	10,43^B
Cd₂₀	5,03 ^g	10,90 ^{de}	9,22 ^{ef}	4,78 ^g	7,48^C
Ortalama	18,00^{A**}	16,94^A	10,97^B	8,19^C	

** : p<0,01 önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Uygulanan Si dozlarının artışı kökte Zn konsantrasyonunun azalmasına neden olmuştur. En düşük Zn içeriği (8,19 mg kg⁻¹) Si₃₀₀ uygulamasında en yüksek Zn içeriği (16,94 ve 18,00 mg kg⁻¹) Si₁₀₀ ve Si₀ uygulamalarında görülmüştür.

Kadmiyum dozlarının artışı yine Zn içeriğinin azalışına neden olmuştur. En düşük Zn içeriği (7,48 mg kg⁻¹) Cd₂₀ uygulamasında en yüksek Zn içeriği (22,66 mg kg⁻¹) Cd₀ uygulamasında görülmüştür.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) kökteki Zn konsantrasyonunda en düşük değer (4,78 ve 5,03mg kg⁻¹) Cd₂₀Si₃₀₀ ve Cd₂₀Si₀ uygulamalarında en yüksek değer (39,94 mg kg⁻¹) Cd₀Si₀ uygulamasında görülmüştür.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının gövdedeki Zn konsantrasyonuna (mg kg⁻¹) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.27’de verilmiştir.

Tablo 4. 27. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, gövdedeki Zn içeriklerine (mg kg⁻¹) etkisi ve oluşan ortalamalar

Gövdede Zn konsantrasyonu (mg kg ⁻¹)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd₀	15,23 ^{ab**}	13,02 ^{a-d}	12,60 ^{bcd}	15,18 ^{ab}	14,01^{A**}
Cd₁₀	15,56 ^{ab}	19,17 ^a	13,73 ^{abc}	8,51 ^{cde}	14,24^A
Cd₂₀	15,18 ^{ab}	13,25 ^{abc}	6,81 ^{de}	2,78 ^e	9,50^B
Ortalama	15,33^{A**}	15,14^A	11,05^B	8,82^B	

** : p<0,01 önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Gövdede Si uygulamaları sonucunda Zn konsantrasyonu iki farklı ortalama grubunu oluşturmuştur. En düşük Zn içeriği (8,82 ve 11,05 mg kg⁻¹) Si₃₀₀ ve Si₂₀₀ uygulamalarında en yüksek Zn içeriği (15,14 ve 15,33 mg kg⁻¹) Si₁₀₀ ve Si₀ uygulamalarında görülmüştür. Kadmiyum dozlarının artışı yine Zn içeriğinin azalışına neden olmuştur. En düşük Zn içeriği (9,50 mg kg⁻¹) Cd₂₀ uygulamasında en yüksek Zn içeriği (14,01 ve 14,24 mg kg⁻¹) Cd₀ ve Cd₁₀ uygulamalarında görülmüştür.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) kökteki Zn konsantrasyonunda en düşük değer (2,78 mg kg⁻¹) Cd₂₀Si₃₀₀ uygulamasında en yüksek değer (19,17 mg kg⁻¹) Cd₁₀Si₁₀₀ uygulamalarında görülmüştür.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının yapraklardaki Zn konsantrasyonuna (mg kg⁻¹) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.28’de verilmiştir.

Tablo 4. 28. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, yapraklardaki Zn içeriklerine (mg kg^{-1} etkisi ve oluşan ortalamalar

Yaprakta Zn konsantrasyonu (mg kg^{-1})					
Uygulamalar (mg kg^{-1})	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd ₀	7,67 ^{ab**}	3,62 ^{ef}	6,16 ^{bcd}	6,80 ^{a-d}	6,06^{A**}
Cd ₁₀	4,45 ^{de}	5,21 ^{cde}	1,05 ^g	3,53 ^{ef}	3,56^B
Cd ₂₀	8,90 ^a	8,22 ^{ab}	7,22 ^{abc}	1,99 ^{fg}	6,58^A
Ortalama	7,01^{A**}	5,68^B	4,81^{BC}	4,11^C	

** $p < 0,01$ önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Yaprakta Si uygulamaları sonucunda Zn konsantrasyonu düşmüştür. En düşük Zn içeriği ($4,11 \text{ mg kg}^{-1}$) Si₃₀₀, en yüksek Zn içeriği ($7,01 \text{ mg kg}^{-1}$) Si₀ uygulamalarında görülmüştür. Yaprakta Zn konsantrasyonu Cd uygulamaları sonucunda iki farklı ortalama grubunu oluşturmuştur. En düşük Zn içeriği ($3,56 \text{ mg kg}^{-1}$) Cd₁₀ uygulamasında en yüksek Zn içeriği ($6,06$ ve $6,58 \text{ mg kg}^{-1}$) Cd₀ ve Cd₂₀ uygulamalarında görülmüştür.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) yapraktaki Zn konsantrasyonunda en düşük değer ($1,05 \text{ mg kg}^{-1}$) Cd₁₀Si₂₀₀ uygulamasında en yüksek değer ($8,90 \text{ mg kg}^{-1}$) Cd₂₀Si₀ uygulamalarında görülmüştür.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının salkımlardaki Zn konsantrasyonuna (mg kg^{-1}) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.29’da verilmiştir.

Tablo 4. 29. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımlardaki Zn içeriklerine (mg kg^{-1}) etkisi ve oluşan ortalamalar

Salkımda Zn konsantrasyonu (mg kg^{-1})					
Uygulamalar (mg kg^{-1})	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd ₀	32,52 ^{b-e**}	48,23 ^{abc}	49,16 ^{ab}	45,83 ^{a-d}	43,94^{A**}
Cd ₁₀	56,02 ^a	28,21 ^{de}	37,88 ^{a-e}	31,00 ^{b-e}	38,28^A
Cd ₂₀	25,34 ^e	29,92 ^{cde}	21,93 ^e	18,74 ^e	23,98^B
Ortalama	37,96^{öd}	35,45	36,32	31,86	

** $p < 0,01$ önemli ve öd: önemli değil. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Uygulanan Si dozlarının salkımdaki Zn konsantrasyonu üzerine etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

Uygulanan Cd dozlarının artışına paralel olarak salkımdaki Zn konsantrasyonu azalış göstermiştir. En düşük Zn konsantrasyonu ($23,98 \text{ mg kg}^{-1}$) Cd_{20} , en yüksek Zn konsantrasyonu ($43,94 \text{ mg kg}^{-1}$) Cd_0 ve Cd_{10} uygulamalarında görülmüştür. Salkımdaki Zn konsantrasyonunda Cd*Si interaksyonu sonucunda en düşük değerler ($18,74$, $21,93$ ve $25,34 \text{ mg kg}^{-1}$) $\text{Cd}_{20}\text{Si}_{300}$, $\text{Cd}_{20}\text{Si}_{200}$ ve $\text{Cd}_{20}\text{Si}_0$ uygulamalarında, en yüksek değer ($56,02 \text{ mg kg}^{-1}$) ise $\text{Cd}_{10}\text{Si}_0$ uygulamasında belirlenmiştir.

Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki Zn içeriğine ve ortalamalarına etkisi Tablo 4.30'da gösterilmiştir.

Tablo 4. 30. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki Zn içeriğine (mg kg^{-1}) ve ortalamalarına etkisi

Uygulamalar	Kök	Gövde	Yaprak	Salkım	Ortalama
$\text{Cd}_0 \text{ Si}_0$	$36,94^{a**}$	$15,23^{ab**}$	$7,67^{ab**}$	$32,52^{cd**}$	$23,09^{A**}$
$\text{Cd}_0 \text{ Si}_{100}$	$26,73^b$	$13,02^{a-d}$	$3,62^{ef}$	$48,23^{ab}$	$22,90^A$
$\text{Cd}_0 \text{ Si}_{200}$	$16,66^c$	$12,60^{bcd}$	$6,16^{bcd}$	$49,16^a$	$21,15^{AB}$
$\text{Cd}_0 \text{ Si}_{300}$	$10,31^{def}$	$15,18^{ab}$	$6,80^{a-d}$	$45,83^{ab}$	$19,53^{ABC}$
$\text{Cd}_{10} \text{ Si}_0$	$12,02^{de}$	$15,56^{ab}$	$4,45^{de}$	$56,02^a$	$22,01^{AB}$
$\text{Cd}_{10} \text{ Si}_{100}$	$13,21^{cd}$	$19,17^a$	$5,21^{cde}$	$28,21^{c-f}$	$16,45^{ABC}$
$\text{Cd}_{10} \text{ Si}_{200}$	$7,03^{fg}$	$13,73^{abc}$	$1,04^g$	$37,88^{bc}$	$14,92^{A-D}$
$\text{Cd}_{10} \text{ Si}_{300}$	$9,48^{ef}$	$8,51^{cde}$	$3,53^{ef}$	$31,00^{cde}$	$13,13^{BCD}$
$\text{Cd}_{20} \text{ Si}_0$	$5,03^g$	$15,18^{ab}$	$8,90^a$	$25,34^{def}$	$13,61^{BCD}$
$\text{Cd}_{20} \text{ Si}_{100}$	$10,90^{de}$	$13,25^{abc}$	$8,22^{ab}$	$29,92^{cde}$	$15,57^{A-D}$
$\text{Cd}_{20} \text{ Si}_{200}$	$9,22^{ef}$	$6,81^{de}$	$7,22^{abc}$	$21,93^{ef}$	$11,29^{CD}$
$\text{Cd}_{20} \text{ Si}_{300}$	$4,78^g$	$2,78^e$	$1,99^{fg}$	$18,74^f$	$7,08^D$
Ortalama	$13,53^{B**}$	$12,59^B$	$5,40^C$	$35,40^A$	

** $p < 0,01$ önemli.

Bitki organları arasında en düşük Zn içeriği ($5,40 \text{ mg kg}^{-1}$) yaprakta, en yüksek Zn içeriği ($35,40 \text{ mg kg}^{-1}$) bitkinin salkımlarında belirlenmiştir. Bitkide en düşük Zn içeriği ($7,08 \text{ mg kg}^{-1}$) $\text{Cd}_{20}\text{Si}_{300}$ uygulamasında en yüksek Zn konsantrasyonu ($23,09$ ve $22,90 \text{ mg kg}^{-1}$) Cd_0Si_0 ve $\text{Cd}_0\text{Si}_{100}$ uygulamalarında belirlenmiştir.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamaları genel olarak kökte, gövdede, yaprakta ve salkımda Zn konsantrasyonunun azalması ile sonuçlanmıştır. Silisyumun, pirinç (Nwugo ve Huerta, 2008) ve mısır (Liang vd. 2005) gibi çeşitli bitki türlerinde Zn alımını engellediği bildirilmiştir (Dresler vd. 2015). Kadmiyum ve Mn, Zn, Cu ve Fe dahil olmak üzere çeşitli mikro elementler, bitkiye alımı ve taşınmasında antagonistik ve sinerjik olarak etkileşime girerler (Shahzad vd. 2025). Ancak çoğunlukla Cd ve Zn arasındaki etkileşim antagonistiktir; marul, ıspanak, buğday, hindiba ve mısır bitkilerinde Zn ve Cd konsantrasyonları incelenmiş ve normal etkileşimli model antagonistik olarak belirlenmiştir, Cd bitkinin Zn alımını azaltmıştır ve bunun tersi daha az görülmüştür (Smilde vd. 1992).

Bitki kısımlarında Zn dağılımı genellikle şu şekildedir: kök> yaprak> dal> gövde ve tahıl tanelerindeki Zn için ortalama değerler buğday ve yulafta sırasıyla 24 ila 33 mg kg⁻¹ arasında değişmektedir (Kabata- Pendias, 2011). Çalışmamızda Zn en çok salkımda daha sonra kökte belirlenmiştir. Bu durumun, Cd uygulaması yapıldığı için bitki öncelikli olarak kadmiyumu kök dokularında tutmaya ve akümüle etmeye çalışmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir çünkü en fazla Cd konsantrasyonu bitki organları arasında kökte belirlenmiştir (Tablo 4.6).

4.2. Kadmiyum (Cd) ve Silisyum (Si) Uygulamalarının Sorgumun Yem Kalite Özelliklerine Etkisi

4.2.1. Gövde, Yaprak ve Salkımlarda P (%) İçeriği

Farklı dozlarda Cd ve Si uygulamalarının bitki organlarının (gövde, yaprak ve salkım) P içeriklerine etkisine ait varyans analizi sonucu Tablo 4.31’de verilmiştir. İstatistiksel olarak gövdede Cd ve Cd*Si interaksyonu çok önemli ($p<0,01$) Si uygulaması önemsiz, yapraklarda Si ve Cd*Si interaksyonu çok önemli ($p<0,01$), Cd uygulaması önemsiz ve salkımlarda Cd*Si interaksyonu önemli ($p<0,05$), Cd ve Si uygulamaları ise önemsiz bulunmuştur.

Tablo 4. 31. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun gövde, yaprak ve salkımlarındaki P içeriklerine ait varyans analizi

Kaynak	SD	Gövde		Yaprak		Salkım	
		KO	F değeri	KO	F değeri	KO	F değeri
Cd	2	0,01	10,23**	0,00	1,65	0,00	3,32
Si	3	0,00	2,92	0,00	5,47**	0,00	0,17
Cd*Si	6	0,01	8,08**	0,00	8,37**	0,00	3,57*
Tekerrür	2	0,00	1,62	0,00	0,87	0,00	2,37
Hata	22	0,00		0,00		0,00	
Genel	35						
		R ²	0,79	DK	%12	R ²	0,77
						DK	%5,00
		R ²	0,60	DK	%8,33		

** : P<0,01, * : p<0,05, SD: Serbestlik derecesi, R²: Belirtme katsayısı, DK: Değişim katsayısı (%).

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının gövdenin P içeriğine (%) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.32’de verilmiştir.

Tablo 4. 32. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, gövdenin P içeriğine (%) etkisi ve oluşan ortalamalar

Gövdede P konsantrasyonu (%)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd₀	0,23 ^{cd**}	0,25 ^{bc}	0,24 ^{cd}	0,20 ^d	0,23^{B**}
Cd₁₀	0,23 ^{cd}	0,20 ^d	0,25 ^{bc}	0,34 ^a	0,26^A
Cd₂₀	0,27 ^{bc}	0,29 ^b	0,27 ^{bc}	0,28 ^b	0,28^A
Ortalama	0,24^{öd}	0,25	0,25	0,27	

** : p<0,01, öd: önemli değil. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Gövdedeki P içeriği üzerine Si uygulamalarının etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

Uygulanan Cd dozlarının artışı gövdede P içeriğinin de artmasına neden olmuştur. En düşük P içeriği (%0,23) Cd₀ uygulamasında iken en yüksek P içeriği (%0,26 ve %0,28) Cd₁₀ ve Cd₂₀ uygulamalarında görülmüştür.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) gövdede en düşük P içeriği (%0,20) Cd₀Si₃₀₀ ve Cd₁₀Si₁₀₀ uygulamalarında en yüksek P içeriği (%0,34) Cd₁₀Si₃₀₀ uygulamalarında görülmüştür.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının yapraklardaki P içeriklerine (%) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.33'te verilmiştir.

Tablo 4. 33. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, yapraklardaki P içeriğine (%) etkisi ve oluşan ortalamalar

Yaprakta P konsantrasyonu (%)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd₀	0,25 ^{aböd}	0,25 ^{ab}	0,25 ^{ab}	0,21 ^c	0,24^{öd}
Cd₁₀	0,22 ^{bc}	0,25 ^{ab}	0,26 ^a	0,26 ^a	0,25
Cd₂₀	0,24 ^{abc}	0,23 ^{abc}	0,25 ^{ab}	0,26 ^a	0,25
Ortalama	0,24^{B**}	0,25^{AB}	0,26^A	0,24^{AB}	

** : p<0,01 önemli ve öd: önemli değil. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Yapraktaki en düşük P içeriği (%0,24) Si₀ uygulamasında iken en yüksek P içeriği (%0,26) Si₂₀₀ uygulamasında görülmüştür.

Yapraktaki P içeriği üzerine Cd uygulamalarının etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) yaprakta P içeriği üzerine etkisinde en yüksek P içeriği Cd₁₀Si_{200,300} uygulamalarında en düşük ise Cd₀Si₃₀₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının salkımlardaki P içeriklerine (%) etkisine ait ortalamalar ve grupları Tablo 4.34'te verilmiştir.

Tablo 4. 34. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımlardaki P içeriğine (%) etkisi ve oluşan ortalamalar

Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Salkımda P konsantrasyonu (%)				Ortalama
	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	
Cd₀	0,26 ^{ab*}	0,26 ^{ab}	0,24 ^{ab}	0,25 ^{ab}	0,25^{öd}
Cd₁₀	0,22 ^{ab}	0,27 ^a	0,24 ^{ab}	0,26 ^{ab}	0,25
Cd₂₀	0,25 ^{ab}	0,20 ^b	0,24 ^{ab}	0,23 ^{ab}	0,23
Ortalama	0,24^{öd}	0,24	0,24	0,25	

*:p<0,05 önemli ve öd: önemli değil. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Salkımdaki P içeriği üzerine Si uygulamalarının etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

Salkımlardaki P içeriği üzerine Cd uygulamalarının etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) salkımda en düşük P içeriği (%0,20) Cd₂₀Si₁₀₀ uygulamasında en yüksek P içeriği (%0,27) Cd₁₀Si₁₀₀ uygulamalarında görülmüştür.

Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki P içeriğine ve ortalamalarına etkisi Tablo 4.35'te gösterilmiştir.

Tablo 4. 35. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki P içeriğine (%) ve ortalamalarına etkisi

Uygulamalar	Gövde	Yaprak	Salkım	Ortalama
Cd₀ Si₀	0,23 ^{bc**}	0,25 ^{ab**}	0,26 ^{ab*}	0,25^{AB**}
Cd₀ Si₁₀₀	0,25 ^{bc}	0,25 ^{ab}	0,26 ^{ab}	0,25^{AB}
Cd₀ Si₂₀₀	0,24 ^{bc}	0,25 ^{ab}	0,24 ^{ab}	0,25^{AB}
Cd₀ Si₃₀₀	0,20 ^c	0,21 ^c	0,25 ^{ab}	0,22^B
Cd₁₀ Si₀	0,23 ^{bc}	0,22 ^{bc}	0,22 ^{ab}	0,23^B
Cd₁₀ Si₁₀₀	0,20 ^c	0,25 ^{ab}	0,27 ^a	0,24^B
Cd₁₀ Si₂₀₀	0,25 ^{bc}	0,26 ^a	0,24 ^{ab}	0,25^{AB}
Cd₁₀ Si₃₀₀	0,34 ^a	0,26 ^a	0,26 ^{ab}	0,29^A
Cd₂₀ Si₀	0,27 ^{bc}	0,24 ^{abc}	0,25 ^{ab}	0,25^{AB}
Cd₂₀ Si₁₀₀	0,29 ^{ab}	0,23 ^{abc}	0,20 ^b	0,24^B
Cd₂₀ Si₂₀₀	0,27 ^{abc}	0,25 ^{ab}	0,24 ^{ab}	0,25^{AB}

Tablo 4. 35. (Devam) Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki P içeriğine (%) ve ortalamalarına etkisi

Cd₂₀ Si₃₀₀	0,28 ^{ab}	0,26 ^a	0,23 ^{ab}	0,26^{AB}
Ortalama	0,25^{öd}	0,25	0,24	

**: p<0,01, *:p<0,05 önemli ve öd: önemli değil.

Bitki organları arasında P (%) içeriği istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

Bitkide en yüksek P (%) içeriği %0,29 ile Cd₁₀Si₃₀₀ uygulamasında belirlenirken diğer uygulamalarda P (%) içeriği 0,22-0,26 arasında değişim göstererek 2 farklı ortalama grubu oluşturmuştur.

Kadmiyum dozlarının artışı ile gövdede P konsantrasyonunda artış gözlemlenmiştir. Bitkiler tarafından Cd alımı üzerindeki P etkilerinde Cd-P etkileşimleri sergilenmektedir. Fosfat muamelesi altında Cd içeriğinin hem arttığı hem de azaldığı rapor edilmiştir (Kabata- Pendias, 2011). Yapraklarda Si dozlarının artmasıyla P içeriği de artış göstermiştir. Çeltik ve şeker pancarıyla yapılan çalışmalarda toprağa uygulanan Si'nin çözünabilir ve değişebilir fosforu arttırdığı bildirilmiştir (Ma ve Takahashi, 1990).

Geviş getiren hayvanlar için yemlerde P oranının en az %0.21 (Kidambi vd. 1989) olması gerekmektedir (Mut vd. 2020) ve tüm uygulamalarda benzer sonuçlar elde edilmiştir.

4.2.2. Gövde, Yaprak ve Salkımlarda K (%) İçeriği

Farklı dozlarda Cd ve Si uygulamalarının bitki organlarının (gövde, yaprak ve salkım) K içeriklerine etkisine ait varyans analizi sonucu Tablo 4.36' da verilmiştir. İstatistiksel olarak gövdede Cd uygulaması çok önemli (p<0.01), Si uygulaması ve Cd*Si interaksyonu önemli (p<0.05), yapraklarda Si ve Cd*Si interaksyonu çok önemli (p<0.01), Cd uygulaması önemsiz ve salkımlarda Cd, Si ve Cd*Si interaksyonu çok önemli (p<0.01) bulunmuştur.

Tablo 4. 36. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun gövde, yaprak ve salkımlarındaki K içeriklerine ait varyans analizi

Kaynak	SD	Gövde		Yaprak		Salkım	
		KO	F değeri	KO	F değeri	KO	F değeri
Cd	2	3,96	91,78**	0,00	0,07	0,64	153,98**
Si	3	0,17	3,92*	0,18	33,16**	0,76	182,27**
Cd*Si	6	0,12	2,87*	0,03	6,14**	0,04	9,53**
Tekerrür	2	0,00	0,04	0,05	8,38	0,00	0,29
Hata	22	0,04		0,01		0,00	
Genel	35						
		R ² 0,91	DK %19,63	R ² 0,87	DK %4,19	R ² 0,98	DK %8,33

** : P<0,01, * : p<0,05 önemli. SD: Serbestlik derecesi, R²: Belirtme katsayısı, DK: Değişim katsayısı (%).

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının gövdenin K içeriğine (%) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.37’de verilmiştir.

Tablo 4. 37. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, gövdenin K içeriğine (%) etkisi ve oluşan ortalamalar

Gövdede K konsantrasyonu (%)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd₀	1,76 ^{a*}	1,67 ^{ab}	1,74 ^a	1,58 ^{ab}	1,67^{A**}
Cd₁₀	1,07 ^{bc}	0,47 ^{cde}	0,35 ^{de}	0,33 ^e	0,96^B
Cd₂₀	0,95 ^{cb}	0,86 ^{cde}	1,09 ^{bc}	0,93 ^{cde}	0,55^C
Ortalama	1,26^{A*}	1,00^{AB}	1,06^{AB}	0,95^B	

** : p<0,01, * : p<0,05 önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Gövdede Si uygulaması sonucu K içeriği azalma göstermiştir. En düşük K içeriği (%0,95) Si₃₀₀ uygulamasında iken en yüksek K içeriği (%1,26) Si₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Uygulanan Cd dozlarının artışı gövdede K içeriğinin azalmasına neden olmuştur. En düşük K içeriği (%0,55) Cd₂₀ uygulamasında iken en yüksek K içeriği (%1,67) Cd₀ uygulamasında görülmüştür.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) gövdede en düşük K içeriği (%0,33) Cd₁₀Si₃₀₀ uygulamasında en yüksek K içeriği (%1,74 ve %1,76) Cd₀Si₂₀₀ ve Cd₀Si₀ uygulamalarında görülmüştür.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının yapraklardaki K içeriklerine (%) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.38’de verilmiştir.

Tablo 4. 38. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, yaprağın K içeriğine (%) etkisi ve oluşan ortalamalar

Yaprakta K konsantrasyonu (%)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd₀	1,45 ^{d**}	1,86 ^a	1,74 ^{ab}	1,67 ^{abc}	1,68^{öd}
Cd₁₀	1,52 ^{cd}	1,55 ^{bcd}	1,83 ^a	1,77 ^{ab}	1,67
Cd₂₀	1,42 ^d	1,75 ^{ab}	1,74 ^{ab}	1,76 ^{ab}	1,67
Ortalama	1,47^{B**}	1,72^A	1,77^A	1,73^A	

** : p<0,01 önemli ve öd: önemli değil. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Si uygulaması yaprakta K içeriğinin artışına neden olmuş ve iki farklı ortalama grubu oluşturmuştur. En düşük P içeriği (%1,47) Si₀ uygulamasında iken Si_{100,200,300} uygulamaları diğer (%1,72-%1,77) ortalama grubunu oluşturmuştur.

Gövdedeki K içeriği üzerine Cd uygulamalarının etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

İnteraksiyonu sonucunda (Cd*Si) yaprakta en düşük K içeriği (%1,42 ve 1,45) Cd₂₀Si₀ ve Cd₀Si₀ uygulamalarında en yüksek K içeriği (%1,83) Cd₁₀Si₂₀₀ uygulamasında görülmüştür.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının salkımlardaki K içeriklerine (%) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.39’da verilmiştir.

Tablo 4. 39. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımlardaki K içeriğine (%) etkisi ve oluşan ortalamalar

Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Salkımda K konsantrasyonu (%)				Ortalama
	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	
Cd₀	0,80 ^{cd**}	0,78 ^{cd}	0,90 ^{bc}	1,41 ^a	0,97^{A**}
Cd₁₀	0,46 ^f	0,55 ^{ef}	0,69 ^{de}	1,02 ^b	0,68^B
Cd₂₀	0,17 ^g	0,22 ^g	0,74 ^{cde}	0,90 ^{bc}	0,51^C
Ortalama	0,48^{C**}	0,52^C	0,77^B	1,11^A	

*:p<0,05 önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Silisyum uygulaması salkımda K içeriğinin artışına neden olmuştur. En düşük K içeriği (%0,48 ve %0,52) Si₀ ve Si₁₀₀ uygulamasında iken en yüksek K içeriği (%1,11) Si₃₀₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Salkımdaki P içeriği üzerine Cd uygulaması olumsuz etki göstermiş ve azalmaya neden olmuştur. En düşük K içeriği (%0,51) Cd₂₀ uygulamasında en yüksek K içeriği (%0,97) Cd₀ uygulamasında belirlenmiştir.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) salkımda en düşük K içeriği (%0,17 ve %0,22) Cd₂₀Si₀ ve Cd₂₀Si₁₀₀ uygulamalarında en yüksek K içeriği (%1,41) Cd₀Si₃₀₀ uygulamalarında görülmüştür.

Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki K içeriğine ve ortalamalarına etkisi Tablo 4.40'da gösterilmiştir.

Tablo 4. 40. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki K içeriğine (%) ve ortalamalarına etkisi

Uygulamalar	Gövde	Yaprak	Salkım	Ortalama
Cd₀ Si₀	1,76 ^{a**}	1,45 ^{d**}	0,80 ^{cd**}	1,34^{A-D**}
Cd₀ Si₁₀₀	1,67 ^{ab}	1,86 ^a	0,78 ^{cd}	1,43^{ABC}
Cd₀ Si₂₀₀	1,74 ^a	1,74 ^{ab}	0,90 ^{bc}	1,46^{AB}
Cd₀ Si₃₀₀	1,58 ^{ab}	1,67 ^{abc}	1,41 ^a	1,55^A
Cd₁₀ Si₀	1,07 ^{bc}	1,52 ^{cd}	0,46 ^f	1,02^{BCD}
Cd₁₀ Si₁₀₀	0,47 ^{cde}	1,55 ^{bcd}	0,55 ^{ef}	0,86^D
Cd₁₀ Si₂₀₀	0,35 ^{de}	1,83 ^a	0,69 ^{de}	0,95^{CD}

Tablo 4. 40. (Devam) Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki K içeriğine (%) ve ortalamalarına etkisi

Cd₁₀ Si₃₀₀	0,33 ^e	1,77 ^{ab}	1,02 ^b	1,04^{BCD}
Cd₂₀ Si₀	0,95 ^{cd}	1,42 ^d	0,17 ^g	0,85^D
Cd₂₀ Si₁₀₀	0,86 ^{cde}	1,75 ^{ab}	0,22 ^g	0,95^{CD}
Cd₂₀ Si₂₀₀	1,09 ^{bc}	1,74 ^{ab}	0,74 ^{cde}	1,19^{A-D}
Cd₂₀ Si₃₀₀	0,93 ^{cde}	1,76 ^{ab}	0,90 ^{bc}	1,20^{A-D}
Ortalama	1,07^{B**}	1,67^A	0,72^C	

** : p<0,01 önemli.

Bitki organları arasında K (%) içeriği en düşük (%0,72) salkımda en yüksek (%1,67) yapraklarda belirlenmiştir.

Uygulamalar arasında K (%) içeriği en yüksek (%1,55) Cd₀Si₃₀₀ uygulamasında en düşük (%0,85 ve %0,86) Cd₂₀Si₀ ve Cd₁₀Si₁₀₀ uygulamalarında belirlenmiştir.

Bitki organları arasında K konsantrasyonu %0,72-1,67 arasında değişmiş ve yaprak>gövde>salkım şeklinde sıralanmıştır. Stiles (2006) tarafından yapılan çalışmada mısırdaki K içeriği %0,46-1,48 arasında değişmiş ve bitki organları arasında K içeriğini yaprak>gövde>koçan şeklinde sıralamıştır.

Gövde ve salkımda artan Cd dozları ile K içeriği azalmıştır. Cd stresi altındaki buğday ve kolza bitkilerinde, köklerde ve üst kısımlarda belirgin şekilde K konsantrasyonu düşmüştür (Zembala vd. 2010). Veselov vd. (2003) Cd bulunan ortamda buğday fidelerinin potasyum (K) alımının azaldığını belirtmişlerdir.

Yapraklarda ve salkımlarda Si uygulaması K içeriği arttırmıştır. Soya fasulyesinde ve bazı yem bitkilerinde (*Panicum maximum* ve *Brachiaria ruziziensis* × *Brachiaria brizanth*), Si takviyesi yapraklarda daha yüksek K konsantrasyonuna neden olmuştur (Miao vd. 2010; Buchelt vd. 2020; Pavlovic vd. 2021).

Geviş getiren hayvanlar için yemlerde K içeriğinin en az %0,8 olması (Tejeda vd. 1985) gerektiği (Mut vd. 2020) bildirilmiş ve tüm uygulamalarda ve organlarda (gövde, yaprak ve salkım ortamları) bu oran ve üzeri elde edilmiştir (Tablo 4.40).

4.2.3. Gövde, Yaprak ve Salkımlarda Ca (%) İçeriği

Farklı dozlarda Cd ve Si uygulamalarının bitki organlarının (gövde, yaprak ve salkım) Ca içeriklerine etkisine ait varyans analizi sonucu Tablo 4.41’ de verilmiştir. İstatistiksel olarak gövdede ve yapraklarda Cd ve Si uygulaması çok önemli ($p<0,01$), Cd*Si interaksyonu önemli ($p<0,05$), salkımlarda Si ve Cd*Si interaksyonu çok önemli ($p<0,01$), Cd önemli ($p<0,05$) bulunmuştur.

Tablo 4. 41. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun gövde, yaprak ve salkımlarındaki Ca içeriklerine ait varyans analizi

Kaynak	SD	Gövde		Yaprak		Salkım	
		KO	F değeri	KO	F değeri	KO	F değeri
Cd	2	0,35	46,79**	0,03	20,94**	0,01	3,73*
Si	3	0,04	5,62**	0,02	18,86**	0,07	18,22**
Cd*Si	6	0,02	3,03*	0,00	2,55*	0,04	10,73**
Tekerrür	2	0,01	0,62	0,00	0,88	0,00	0,32
Hata	22	0,01		0,00		0,00	
Genel	35						
		R ² 0,86	DK %13,64	R ² 0,84	DK %3,90	R ² 0,85	DK %13,04

** : $P<0,01$, * : $p<0,05$ önemli. SD: Serbestlik derecesi, R²: Belirtme katsayısı, DK: Değişim katsayısı (%).

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının gövdenin Ca içeriğine (%) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.42’de verilmiştir.

Tablo 4. 42. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, gövdenin Ca içeriğine (%) etkisi ve oluşan ortalamalar

Gövdede Ca konsantrasyonu (%)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd ₀	0,80 ^{ab*}	0,80 ^{ab}	0,79 ^{ab}	0,88 ^a	0,82 ^{A**}
Cd ₁₀	0,87 ^a	0,64 ^{abc}	0,61 ^{bcd}	0,57 ^{bcd}	0,67 ^B
Cd ₂₀	0,59 ^{bcd}	0,52 ^{cd}	0,44 ^{cd}	0,38 ^d	0,48 ^C
Ortalama	0,76 ^{A**}	0,65 ^{AB}	0,61 ^B	0,60 ^B	

** : $p<0,01$, * : $p<0,05$ önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksyon gruplarını göstermektedir.

Uygulanan Si dozlarının artması gövdede Ca içeriğinin azalmasına neden olmuştur. En düşük Ca oranı (%0,60 ve %0,61) Si₃₀₀ ve Si₂₀₀ uygulamalarında en yüksek Ca oranı (%0,76) Si₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Uygulanan Cd dozlarının artışı gövdede Ca oranının azalmasına neden olmuştur. En düşük Ca oranı (%0,48) Cd₂₀ uygulamasında en yüksek Ca oranı (%0,82) Cd₀ uygulamasında belirlenmiştir.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) gövdede en az Ca içeriği (%0,38) Cd₂₀Si₃₀₀ uygulamasında en yüksek Ca içeriği (%0,87 ve %0,88) Cd₁₀Si₀ ve Cd₀Si₃₀₀ uygulamalarında görülmüştür.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının yaprakların Ca içeriğine (%) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.43'te verilmiştir.

Tablo 4. 43. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, yaprağın Ca içeriğine (%) etkisi ve oluşan ortalamalar

Yaprakta Ca konsantrasyonu (%)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd₀	0,85 ^{a*}	0,80 ^{abc}	0,79 ^{a-d}	0,82 ^{ab}	0,82^{A**}
Cd₁₀	0,86 ^a	0,78 ^{a-d}	0,73 ^{b-e}	0,70 ^{cde}	0,77^B
Cd₂₀	0,80 ^{abc}	0,74 ^{b-e}	0,69 ^{de}	0,67 ^e	0,73^C
Ortalama	0,84^{A**}	0,78^B	0,74^B	0,73^B	

** : p<0,01, * : p<0,05 önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Uygulanan Si dozlarının artması yaprakta Ca içeriğinin azalmasına neden olmuştur. En düşük Ca oranı (%0,73, %0,74 ve %0,78) Si₁₀₀, Si₂₀₀ ve Si₃₀₀ uygulamalarında en yüksek Ca oranı (%0,84) Si₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Uygulanan Cd dozlarının artışı yaprakta Ca oranının azalmasına neden olmuştur. En düşük Ca oranı (%0,73) Cd₂₀ uygulamasında en yüksek Ca oranı (%0,82) Cd₀ uygulamasında belirlenmiştir.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) yapraklarda en az Ca içeriği (%0,67) Cd₂₀Si₃₀₀ uygulamasında en yüksek Ca içeriği (%0,85 ve %0,86) Cd₀Si₀ ve Cd₁₀Si₀ uygulamalarında görülmüştür.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının salkımın Ca içeriğine (%) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.44'te verilmiştir.

Tablo 4. 44. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımın Ca içeriğine (%) etkisi ve oluşan ortalamalar

Salkımda Ca konsantrasyonu (%)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd₀	0,36 ^{de}	0,57 ^{abc}	0,49 ^{bcd}	0,28 ^e	0,42^{B*}
Cd₁₀	0,64 ^{ab}	0,41 ^{cde}	0,45 ^{cde}	0,44 ^{cde}	0,49^A
Cd₂₀	0,50 ^{a-d}	0,67 ^a	0,43 ^{cde}	0,32 ^{de}	0,48^A
Ortalama	0,50^{AB**}	0,55^A	0,45^B	0,35^C	

** : p<0,01, * : p<0,05 önemli ve öd : önemli değil. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Silisyum (Si) uygulaması ile salkımda en düşük Ca oranı (%0,35) Si₃₀₀ uygulamasında en yüksek Ca oranı (%0,55) Si₁₀₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Uygulanan Cd dozlarının artışı salkımda Ca oranının artmasına neden olmuştur. En düşük Ca oranı (%0,42) Cd₀ uygulamasında en yüksek Ca oranı (%0,48 ve %49) Cd₂₀ ve Cd₁₀ uygulamalarında belirlenmiştir.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) salkımlarda en az Ca içeriği (%0,28) Cd₀Si₃₀₀ uygulamasında en yüksek Ca içeriği (%0,67) Cd₂₀Si₁₀₀ ve Cd₁₀Si₀ uygulamasında görülmüştür.

Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki Ca içeriğine ve ortalamalarına etkisi Tablo 4.45'te gösterilmiştir.

Tablo 4. 45. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki Ca içeriğine (%) ve ortalamalarına etkisi

Uygulamalar	Gövde	Yaprak	Salkım	Ortalama
Cd₀ Si₀	0,80 ^{ab**}	0,85 ^{a**}	0,36 ^{de**}	0,67^{ABC**}
Cd₀ Si₁₀₀	0,80 ^{ab}	0,80 ^{abc}	0,57 ^{abc}	0,73^{AB}
Cd₀ Si₂₀₀	0,79 ^{ab}	0,79 ^{a-d}	0,49 ^{bcd}	0,69^{AB}
Cd₀ Si₃₀₀	0,88 ^a	0,82 ^{ab}	0,28 ^e	0,66^{ABC}
Cd₁₀ Si₀	0,87 ^a	0,86 ^a	0,64 ^{ab}	0,79^A

Tablo 4. 45. (Devam) Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki Ca içeriğine (%) ve ortalamalarına etkisi

Cd₁₀ Si₁₀₀	0,64 ^{abc}	0,78 ^{a-d}	0,41 ^{cde}	0,61^{BCD}
Cd₁₀ Si₂₀₀	0,61 ^{bcd}	0,73 ^{b-e}	0,45 ^{cde}	0,60^{BCD}
Cd₁₀ Si₃₀₀	0,57 ^{bcd}	0,70 ^{cde}	0,44 ^{cde}	0,57^{BCD}
Cd₂₀ Si₀	0,59 ^{bcd}	0,80 ^{abc}	0,50 ^{a-d}	0,63^{ABC}
Cd₂₀ Si₁₀₀	0,52 ^{cd}	0,74 ^{b-e}	0,67 ^a	0,64^{ABC}
Cd₂₀ Si₂₀₀	0,44 ^{cd}	0,69 ^{de}	0,43 ^{cde}	0,52^{CD}
Cd₂₀ Si₃₀₀	0,38 ^d	0,67 ^e	0,32 ^{de}	0,46^D
Ortalama	0,66^{B**}	0,77^A	0,46^C	

** : p<0,01, * : p<0,05 önemli.

Bitki organları arasında Ca (%) içeriği en düşük (%0,46) salkımlarda en yüksek (%0,77) yapraklarda belirlenmiştir.

Bitkide en düşük Ca (%) %0,46 ile Cd₂₀Si₃₀₀ uygulamasında en yüksek Ca (%) %0,79 ile Cd₁₀Si₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Uygulanan Cd dozlarının yükselişi gövde ve yaprakta Ca içeriğinin azalışına fakat salkımda artışına neden olmuştur. Kalsiyumun Cd birikimi üzerindeki etkileri farklı bitki organlarında değişiklik gösterebilir (Hayakawa vd. 2011). Kalsiyumun Cd alımı ve taşınımı üzerindeki etkileri esas olarak Ca ve Cd arasındaki rekabete atfedilebilir. İki değerlikli bir katyon olan Ca, Cd ile birçok taşıyıcı, taşıma kanalı ve bağlanma bölgesini paylaşır ve bu nedenle bitkilerde Cd birikimini ve taşınımını kolaylaştırır veya baskılar (Rodriguez-Hernandez vd. 2015). Uygulanan Si dozlarının artışı ile gövde, yaprak ve salkımda Ca içeriği düşmüştür. Literatürde her ne kadar genel doğrultu Si uygulamasının Ca içeriğini arttırması yönünde bildirilmiş olsa da bu çalışmada olduğu gibi Si uygulamasının Ca içeriğini azaltması yönünde çalışmalar mevcuttur. Pirinç ve kamışta (*Phragmites australis*) artan Si uygulaması ile doku Ca birikiminde kademeli bir düşüş olduğu gösterilmiştir (Brackhage vd. 2013; Jang vd. 2018).

Bitki organları arasında Ca konsantrasyonu %0,46-0,77 arasında değişmiş ve yaprak>gövde>salkım şeklinde sıralanmıştır. Stiles (2006)'in yaptığı çalışmada mısırdaki Ca içeriği %0,02-0,47 arasında değişmiş ve bitki organları arasında Ca içeriği yaprak>gövde>koçan şeklinde sıralanmıştır. Benzer sıralama yaprak>gövde>salkım bu

çalışmada belirlenmekle beraber oranlarımız Stiles (2006)'in sonuçlarından daha yüksektir. Bu durum farklı bitkiler olan mısır ve sorgumdan kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Ruminant sağlığı açısından kaliteli kaba yemlerde Ca içeriğinin %0,18–0,44 arasında olması istenir (Kidambi vd. 1989; Burgu ve Mut, 2023). Tüm uygulamalarda Ca içeriği bu seviyelerin üzerinde belirlenmiştir.

4.2.4. Gövde, Yaprak ve Salkımlarda Mg (%) İçeriği

Farklı dozlarda Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarının (gövde, yaprak ve salkım) Mg içeriklerine etkisine ait varyans analizi sonucu Tablo 4.46'da verilmiştir. İstatistiksel olarak gövde ve salkımlarda Cd uygulaması, Si uygulaması ve Cd*Si interaksyonu çok önemli ($p<0,01$), yapraklarda ise Cd ve Si uygulaması çok önemli ($p<0,01$), Cd*Si interaksyonu önemli ($p<0,05$) bulunmuştur.

Tablo 4. 46. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun gövde, yaprak ve salkımlarındaki Ca içeriklerine ait varyans analizi

Kaynak	SD	Gövde		Yaprak		Salkım	
		KO	F değeri	KO	F değeri	KO	F değeri
Cd	2	0,11	47,57**	0,01	28,37**	0,01	23,68**
Si	3	0,02	7,75**	0,01	25,33**	0,02	31,10**
Cd*Si	6	0,01	4,31**	0,00	3,71*	0,01	16,05**
Tekerrür	2	0,00	0,07	0,00	0,71	0,01	4,82
Hata	22	0,00		0,00		0,00	
Genel	35						
		R ² 0,87	DK %13,16	R ² 0,88	DK %4,17	R ² 0,92	DK %7,69

** : $P<0,01$, * : $p<0,05$ SD: Serbestlik derecesi, R²: Belirtme katsayısı, DK: Değişim katsayısı (%).

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının gövdenin Mg içeriğine (%) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.47'de verilmiştir.

Tablo 4. 47. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, gövdenin Mg içeriğine (%) etkisi ve oluşan ortalamalar

Gövdede Mg konsantrasyonu (%)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd₀	0,47 ^{ab**}	0,47 ^{ab}	0,47 ^{ab}	0,53 ^a	0,49^{A**}
Cd₁₀	0,44 ^{abc}	0,38 ^{b-e}	0,32 ^{c-f}	0,29 ^{def}	0,36^B
Cd₂₀	0,42 ^{a-d}	0,30 ^{def}	0,27 ^{ef}	0,23 ^f	0,30^C
Ortalama	0,44^{A**}	0,38^B	0,36^B	0,35^B	

** : p<0,01, * : p<0,05 önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Uygulanan Si dozlarının artması gövdede Mg içeriğinin azalmasına neden olmuştur. En düşük Mg oranı (%0,38, %0,36 ve %0,35) Si₁₀₀, Si₂₀₀ ve Si₃₀₀ uygulamalarında en yüksek Mg oranı (%0,44) Si₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Uygulanan Cd dozlarının artışı gövdede Mg oranının azalmasına neden olmuştur. En düşük Mg oranı (%0,30) Cd₂₀ uygulamasında en yüksek Mg oranı (%0,49) Cd₀ uygulamasında belirlenmiştir.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) gövdede en az Mg içeriği (%0,23) Cd₂₀Si₃₀₀ uygulamasında en yüksek Mg içeriği (%0,53) Cd₀Si₃₀₀ uygulamasında görülmüştür.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının yaprakların Mg içeriğine (%) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.48’de verilmiştir.

Tablo 4. 48. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, yaprağın Mg içeriğine (%) etkisi ve oluşan ortalamalar

Yaprakta Mg konsantrasyonu (%)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd₀	0,29 ^{a*}	0,26 ^{ab}	0,25 ^{abc}	0,27 ^{ab}	0,27^{A**}
Cd₁₀	0,28 ^a	0,25 ^{abc}	0,23 ^{bcd}	0,20 ^d	0,24^B
Cd₂₀	0,26 ^{ab}	0,21 ^{cd}	0,21 ^{cd}	0,19 ^d	0,22^C
Ortalama	0,28^{A**}	0,24^B	0,23^{BC}	0,22^C	

** : p<0,01, * : p<0,05 önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Uygulanan Si dozlarının artması yaprakta Mg içeriğinin azalmasına neden olmuştur. En düşük Mg oranı (%0,22) Si₃₀₀ uygulamasında en yüksek Mg oranı (%0,28) Si₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Uygulanan Cd dozlarının artışı yaprakta Mg oranının azalmasına neden olmuştur. En düşük Mg oranı (%0,22) Cd₂₀ uygulamasında en yüksek Mg oranı (%0,27) Cd₀ uygulamasında belirlenmiştir.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) yapraklarda en az Mg içeriği (%0,19 ve %20) Cd₂₀Si₃₀₀ ve Cd₁₀Si₃₀₀ uygulamalarında en yüksek Mg içeriği (%0,28 ve %0,29) Cd₁₀Si₀ ve Cd₀Si₀ uygulamalarında görülmüştür.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının salkımın Mg içeriğine (%) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.49'da verilmiştir.

Tablo 4. 49. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımın Mg içeriğine (%) etkisi ve oluşan ortalamalar

Salkımda Mg konsantrasyonu (%)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd₀	0,25 ^{b-e**}	0,27 ^{bcd}	0,24 ^{b-e}	0,19 ^e	0,24^{B**}
Cd₁₀	0,43 ^a	0,30 ^b	0,23 ^{cde}	0,23 ^{cde}	0,30^A
Cd₂₀	0,23 ^{cde}	0,29 ^{bc}	0,25 ^{b-e}	0,21 ^{de}	0,25^B
Ortalama	0,30^{A**}	0,29^A	0,24^B	0,21^C	

** : p<0,01 önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Uygulanan Si dozlarının artması salkımda Mg içeriğinin azalmasına neden olmuştur. En düşük Mg oranı (%0,21) Si₃₀₀ uygulamasında en yüksek Mg oranı (%0,29 ve %0,30) Si₁₀₀ ve Si₀ uygulamalarında belirlenmiştir.

Uygulanan Cd dozları sonucunda en düşük Mg oranı (%0,24) Cd₀ uygulamasında en yüksek Mg oranı (%0,30) Cd₁₀ uygulamasında belirlenmiştir.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) yapraklarda en az Mg içeriği (%0,19) Cd₀Si₃₀₀ uygulamasında en yüksek Mg içeriği (%0,43) Cd₁₀Si₀ uygulamasında görülmüştür.

Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarındaki Mg içeriğine ve ortalamalarına etkisi Tablo 4.50’de gösterilmiştir.

Tablo 4. 50. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarının Mg (%) içeriklerine ve ortalamalarına etkisi

Uygulamalar	Gövde	Yaprak	Salkım	Ortalama
Cd₀ Si₀	0,47 ^{ab**}	0,29 ^{a**}	0,25 ^{b-e**}	0,34^{AB**}
Cd₀ Si₁₀₀	0,47 ^{ab}	0,26 ^{ab}	0,27 ^{bcd}	0,33^{ABC}
Cd₀ Si₂₀₀	0,47 ^{ab}	0,25 ^{abc}	0,24 ^{b-e}	0,32^{A-D}
Cd₀ Si₃₀₀	0,53 ^a	0,27 ^{ab}	0,19 ^e	0,33^{ABC}
Cd₁₀ Si₀	0,44 ^{abc}	0,28 ^a	0,43 ^a	0,38^A
Cd₁₀ Si₁₀₀	0,38 ^{b-e}	0,25 ^{abc}	0,30 ^b	0,31^{A-D}
Cd₁₀ Si₂₀₀	0,32 ^{c-f}	0,23 ^{bcd}	0,23 ^{cde}	0,26^{B-E}
Cd₁₀ Si₃₀₀	0,29 ^{def}	0,20 ^d	0,23 ^{cde}	0,24^{DE}
Cd₂₀ Si₀	0,42 ^{a-d}	0,26 ^{ab}	0,23 ^{cde}	0,30^{A-D}
Cd₂₀ Si₁₀₀	0,30 ^{def}	0,21 ^{cd}	0,29 ^{bc}	0,27^{B-E}
Cd₂₀ Si₂₀₀	0,27 ^{ef}	0,21 ^{cd}	0,25 ^{b-e}	0,25^{CDE}
Cd₂₀ Si₃₀₀	0,23 ^f	0,19 ^d	0,21 ^{de}	0,21^E
Ortalama	0,38^{A**}	0,24^B	0,26^B	

** : p<0,01, * : p<0,05 önemli.

Bitki organları arasında Mg (%) içeriği en düşük (%0,24 ve %0,26) yaprak ve salkımlarda en yüksek (%0,38) sorgumun gövdesinde belirlenmiştir.

Bitkide en düşük Mg oranı %0,21 ile Cd₂₀Si₃₀₀ uygulamasında en yüksek oranı Mg %0,38 ile Cd₁₀Si₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Uygulanan Cd dozlarının artması gövde ve yapraklarda Mg içeriğinin azalmasına neden olmuştur. Cd ve besin maddeleri (Se, Ca, Mg) arasındaki negatif korelasyonlar, bu besin maddelerinin pirinç bitkilerinde emilim ve translokasyon yolları için Cd ile rekabet ettiğini göstermektedir (Arinzechi vd. 2024). Bitki organları arasında Mg konsantrasyonu %0,24-0,38 arasında bulunmuştur. Sağlıklı bir hayvan yetiştiriciliği için yemlerde magnezyum içeriğinin %0,12 ile %0,20 aralığında olması gerektiği bildirilmiştir (Anonim, 1980; Başbağ vd. 2018). Jones vd. (1991) mısır bitkisinde %0,15-0,45 Mg içeriğinin yeterli olduğunu belirtmiştir.

Silisyum uygulaması sorgumda Mg içeriğinin azalmasına neden olmuştur. Greger vd. (2018) bitkilerdeki Mg içeriğinin genelde Si uygulaması ile artmakta olduğunu ancak tuz stresinde Mg içeriğinin Si ile azaldığını bildirmiştir. Çalışmamızda Si uygulaması tek başına olmayıp Cd stresinde gerçekleştiği için benzer durumun etkisinin gerçekleşmiş olabildiği düşünülmektedir.

4.2.5. Gövde, Yaprak ve Salkımlarda ADF (%) Oranı

Farklı dozlarda Cd ve Si uygulamalarının bitki organlarının (gövde, yaprak ve salkım) ADF oranlarına etkisine ait varyans analizi sonucu Tablo 4.51’ de verilmiştir. Gövdede Cd uygulaması, Si uygulaması ve Cd*Si interaksyonu çok önemli ($p<0,01$) bulunurken, yaprakta Cd ve Si uygulamaları çok önemli ($p<0,01$), Cd*Si interaksyonu önemsiz, salkımlarda Cd ve Si uygulaması çok önemli ($p<0,01$), Cd*Si interaksyonu ise önemli ($p<0,05$) bulunmuştur.

Tablo 4. 51. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun gövde, yaprak ve salkımlarındaki ADF oranlarına ait varyans analizi

Kaynak	SD	Gövde		Yaprak		Salkım	
		KO	F değeri	KO	F değeri	KO	F değeri
Cd	2	153,83	155,26**	5,22	10,34**	172,34	14,94**
Si	3	49,45	49,91**	30,04	59,57**	135,48	11,74**
Cd*Si	6	5,27	5,32**	0,52	1,04	39,81	3,45*
Tekerrür	2	2,67	2,69	2,35	4,65	141,31	12,25
Hata	22	0,99		0,50		11,54	
Genel	35						
		R ² 0,96	DK %3,01	R ² 0,91	DK %2,08	R ² 0,83	DK %10,29

** : $P<0,01$ * : $p<0,05$ önemli. SD: Serbestlik derecesi, R²: Belirtme katsayısı, DK: Değişim katsayısı (%).

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının gövdenin ADF oranına (%) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.52’de verilmiştir.

Tablo 4. 52. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, gövdenin ADF oranına (%) etkisi ve oluşan ortalamalar

Gövdede ADF oranı (%)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd ₀	27,97 ^{g**}	29,13 ^{fg}	29,55 ^{fg}	31,35 ^{ef}	29,50 ^{C**}
Cd ₁₀	30,86 ^{efg}	32,51 ^{de}	34,76 ^{cd}	36,47 ^{bc}	33,65 ^B
Cd ₂₀	31,76 ^{ef}	38,00 ^{ab}	36,95 ^{abc}	39,80 ^a	36,63 ^A
Ortalama	30,20 ^{C**}	33,21 ^B	33,75 ^B	35,88 ^A	

** : p<0,01 önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Gövdede Si uygulaması sonucu ADF oranı artış göstermiştir. En düşük ADF oranı (%30,20) Si₀ uygulamasında iken en yüksek ADF oranı (%35,88) Si₃₀₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Uygulanan Cd dozlarının artışı gövdede ADF oranının artmasına neden olmuştur. En düşük ADF oranı (%29,50) Cd₀ uygulamasında iken en yüksek ADF oranı (%36,63) Cd₂₀ uygulamasında görülmüştür.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) gövdede en düşük ADF oranı (%27,97) Cd₀Si₀ uygulamasında en yüksek ADF oranı (%39,80) Cd₂₀Si₃₀₀ uygulamasında görülmüştür.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının yapraklardaki ADF oranına (%) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.53'te verilmiştir.

Tablo 4. 53. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, yaprağın ADF oranına (%) etkisi ve oluşan ortalamalar

Yaprakta ADF oranı (%)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd ₀	32,33 ^{öd}	32,93	33,95	36,27	33,87 ^{B**}
Cd ₁₀	31,56	32,63	33,90	36,23	33,58 ^B
Cd ₂₀	32,52	34,38	35,69	36,77	34,84 ^A
Ortalama	32,14 ^{D**}	33,31 ^C	34,51 ^B	36,42 ^A	

** : p<0,01 önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Yapraklarda Si uygulaması sonucu ADF oranı artış göstermiştir. En düşük ADF oranı (%32,14) Si₀ uygulamasında iken en yüksek ADF oranı (%36,42) Si₃₀₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Uygulanan Cd dozlarının artışı yaprakta ADF oranının artmasına neden olmuştur. En düşük ADF oranı (%33,58 ve %33,87) Cd₀ ve Cd₁₀ uygulamalarında iken en yüksek ADF oranı (%34,84) Cd₂₀ uygulamasında görülmüştür.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) gövdede ADF oranı istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının salkımdaki ADF oranına (%) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.54’de verilmiştir.

Tablo 4. 54. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımın ADF oranına (%) etkisi ve oluşan ortalamalar

Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Salkımda ADF oranı (%)				Ortalama
	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	
Cd₀	32,10 ^{*bc}	30,64 ^{bc}	30,02 ^{bc}	24,96 ^c	29,43^{B**}
Cd₁₀	47,79 ^a	36,21 ^b	32,10 ^{bc}	31,83 ^{bc}	36,98^A
Cd₂₀	33,72 ^{bc}	35,48 ^b	31,71 ^{bc}	29,74 ^{bc}	32,67^B
Ortalama	37,87^{A**}	34,11^{AB}	31,28^{BC}	28,85^C	

** : p<0,01 önemli, * : p<0,05 önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Salkımlarda Si uygulaması sonucu ADF oranı azalış göstermiştir. En düşük ADF oranı (%28,85) Si₃₀₀ uygulamasında iken en yüksek ADF oranı (%37,87) Si₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Uygulanan Cd dozları ile salkımda en düşük ADF oranı (%29,43 ve %32,67) Cd₀ ve Cd₂₀ uygulamalarında iken en yüksek ADF oranı (%36,98) Cd₁₀ uygulamasında görülmüştür.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) salkımda en düşük ADF oranı (%24,96) Cd₀Si₃₀₀ uygulamasında iken en yüksek ADF oranı (%47,79) Cd₁₀Si₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarının ADF (%) oranlarına ve ortalamalarına etkisi Tablo 4.55'te gösterilmiştir.

Tablo 4. 55. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarının ADF (%) oranlarına ve ortalamalarına etkisi

Uygulamalar	Gövde	Yaprak	Salkım	Ortalama
Cd₀ Si₀	27,97 ^{g**}	32,33 ^{de**}	32,09 ^{bc**}	30,80^{B*}
Cd₀ Si₁₀₀	29,13 ^{fg}	32,93 ^{de}	30,64 ^{bc}	30,90^B
Cd₀ Si₂₀₀	29,55 ^{fg}	33,95 ^{cd}	30,02 ^{bc}	31,17^B
Cd₀ Si₃₀₀	31,35 ^{ef}	36,27 ^{ab}	24,96 ^c	30,86^B
Cd₁₀ Si₀	30,86 ^{efg}	31,56 ^e	47,79 ^a	36,74^A
Cd₁₀ Si₁₀₀	32,51 ^{de}	32,63 ^{de}	36,21 ^b	33,78^A
Cd₁₀ Si₂₀₀	34,76 ^{cd}	33,89 ^{cd}	32,10 ^{bc}	33,59^A
Cd₁₀ Si₃₀₀	36,47 ^{bc}	36,23 ^{ab}	31,83 ^{bc}	34,84^A
Cd₂₀ Si₀	31,76 ^{ef}	32,52 ^{de}	33,72 ^{bc}	32,67^A
Cd₂₀ Si₁₀₀	38,00 ^{ab}	34,38 ^{bcd}	35,48 ^b	35,95^A
Cd₂₀ Si₂₀₀	36,95 ^{abc}	35,69 ^{abc}	31,71 ^{bc}	34,78^A
Cd₂₀ Si₃₀₀	39,80 ^a	36,77 ^a	29,74 ^{bc}	35,44^A
Ortalama	33,26^{öd}	34,09	33,03	

** : p<0,01, * : p<0,05 önemli ve öd: önemli değil.

Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarının ADF (%) oranlarına etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

Bitkide ADF oranları %30,80-36,74 arasında değişim göstermiştir. Uygulamalar sonucunda iki farklı ortalama grubu oluşmuş, Cd'nin 0 mg kg⁻¹ (Cd₀) olduğu tüm Si grupları (Si₀, 100, 200, 300) bir ortalama grubunda yer alırken diğer uygulamalar daha yüksek ADF oranları ile diğer ortalama grubunu oluşturmuştur.

Bitkisel karbonhidratlar (yapısal) içerisinde hücre duvarı bileşenlerinden olan selüloz ve lignin ADF'yi, selüloz, lignin ve hemiselüloz ise NDF'yi oluşturur (Balthrop, 2011). Gövde ve yapraklarda Cd ve Si uygulaması ile birlikte ADF oranları artmıştır. Verilen Si, [Si-duvar matrisi] Cd kompleksleşmesinin bir sonucu olarak hücre duvarında Cd ile birlikte biriktirilebilir (Liu vd. 2013). Silisyum hücre duvarlarında değişikliklere neden olur ve polisakkaritlerle çapraz bağlanma (He vd. 2015) dahil olmak üzere mekanik ve kimyasal özelliklerini iyileştirir, bu da ikincil hücre duvarı bileşenlerinin sentezini arttırır ve metabolizmasını uyarır (Yamamoto vd. 2012). Salkımlarda ADF oranının yaprak ve

gövdenin aksine düştüğü gözlemlenmiştir bu durumun yukarıda bahsedilen (Liu vd. 2013) Cd-Si kompleksleşmesinin salkımlarda olmayışından kaynaklı olabileceği düşünülmektedir; çünkü bitki organları arasında en düşük Cd konsantrasyonu (Tablo 4.6) salkımlarda belirlenmiştir.

Wahyono vd. (2021) iki farklı sorgum genotipi ile yaptıkları çalışmada ADF oranlarını gövdede %27,56- 35,17 bulurken yapraklarda %29,83-32,11 ve salkımlarda %18,42-34,99 bulmuşlardır.

Çalışma sonucunda belirlenen gövde, yaprak ve salkımlardaki ADF oranları (%33,03-34,09) ile benzerlik içerisinde.

4.2.6. Gövde, Yaprak ve Salkımlarda NDF (%) Oranı

Farklı dozlarda Cd ve Si uygulamalarının bitki organlarının (gövde, yaprak ve salkım) NDF oranlarına etkisine ait varyans analizi sonucu Tablo 4.56' da verilmiştir. Gövdede Cd uygulaması, Si uygulaması ve Cd*Si interaksyonu çok önemli ($p<0,01$) bulunurken, yaprakta Cd ve Si uygulamaları çok önemli ($p<0,01$), Cd*Si interaksyonu önemsiz, salkımlarda ise Si uygulaması ve Cd*Si interaksyonu çok önemli ($p<0,01$), Cd uygulaması önemsiz bulunmuştur.

Tablo 4. 56. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun gövde, yaprak ve salkımlarındaki NDF oranlarına ait varyans analizi

Kaynak	SD	Gövde		Yaprak		Salkım	
		KO	F değeri	KO	F değeri	KO	F değeri
Cd	2	93,61	90,31**	26,29	43,04**	55,37	1,07
Si	3	24,57	23,71**	2,97	4,86**	347,69	6,72**
Cd*Si	6	15,47	14,92**	1,27	2,08	132,81	2,57*
Tekerrür	2	2,82	2,71	2,19	3,58	51,8	1,00
Hata	22	1,04		0,61		51,70	
Genel	35						
		R ² 0,94	DK %1,62	R ² 0,85	DK %1,18	R ² 0,64	DK %11,02

** : $P<0,01$ * : $p<0,05$ önemli. SD: Serbestlik derecesi, R²: Belirtme katsayısı, DK: Değişim katsayısı (%).

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının gövdenin NDF oranına (%) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.57'de verilmiştir.

Tablo 4. 57. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, gövdenin NDF oranına (%) etkisi ve oluşan ortalamalar

Gövdede NDF oranı (%)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd ₀	58,34 ^{f**}	59,06 ^{ef}	60,47 ^{def}	64,01 ^{bc}	60,47^{C**}
Cd ₁₀	63,52 ^{bc}	62,21 ^{bcd}	61,85 ^{cde}	63,16 ^{bcd}	62,69^B
Cd ₂₀	61,73 ^{cde}	69,31 ^a	64,96 ^b	68,09 ^a	66,02^A
Ortalama	61,20^{C**}	63,52^B	62,4^{BC}	65,09^A	

** : p<0,01 önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Gövdede Si uygulaması sonucu NDF oranı genel olarak artış eğilimi göstermiştir. En düşük NDF oranı (%61,20) Si₀ uygulamasında iken en yüksek NDF oranı (%65,09) Si₃₀₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Uygulanan Cd dozlarının artışı gövdede NDF oranının artmasına neden olmuştur. En düşük NDF oranı (%60,47) Cd₀ uygulamasında iken en yüksek NDF oranı (%66,02) Cd₂₀ uygulamasında görülmüştür.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) gövdede en düşük NDF oranı (%58,34) Cd₀Si₀ uygulamasında en yüksek NDF oranı (%68,09 ve %69,31) Cd₂₀Si₃₀₀ ve Cd₂₀Si₁₀₀ uygulamalarında görülmüştür.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının yapraklardaki NDF oranına (%) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.58’de verilmiştir.

Tablo 4. 58. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, yaprağın NDF oranına (%) etkisi ve oluşan ortalamalar

Yaprakta NDF oranı (%)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd ₀	63,50 ^{öd}	64,82	65,09	64,91	64,58^{C**}
Cd ₁₀	64,95	65,28	65,70	66,37	65,57^B
Cd ₂₀	66,66	68,86	67,42	67,03	67,49^A
Ortalama	65,03^B	66,32^A	66,07^A	66,10^A	

** : p<0,01 önemli, öd: önemli değil. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Yapraklarda Si uygulaması sonucu NDF oranı artış göstermiştir. En düşük NDF oranı (%65,09) Si₀ uygulamasında iken en yüksek NDF oranı (%66,07, %66,10 ve %66,32) Si₁₀₀, 200, 300 uygulamalarında belirlenmiştir.

Uygulanan Cd dozlarının artışı yaprakta NDF oranının artmasına neden olmuştur. En düşük NDF oranı (%64,58) Cd₀ uygulamasında iken en yüksek NDF oranı (%67,49) Cd₂₀ uygulamasında görülmüştür.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) gövdede NDF oranı istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının salkımdaki NDF oranına (%) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.59'da verilmiştir.

Tablo 4. 59. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımın NDF oranına (%) etkisi ve oluşan ortalamalar

Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Salkımda NDF oranı (%)				Ortalama
	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	
Cd₀	68,11 ^{abc}	69,31 ^{abc}	65,52 ^{abc}	54,06 ^{bc}	64,25^{öd}
Cd₁₀	49,47 ^c	72,43 ^{ab}	68,55 ^{abc}	64,87 ^{abc}	63,83
Cd₂₀	65,14 ^{abc}	77,93 ^a	67,44 ^{abc}	60,46 ^{abc}	67,74
Ortalama	60,91^{B**}	72,23^A	67,17^{AB}	59,79^B	

** : p<0,01 önemli, öd: önemli değil. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Salkımlarda Si uygulaması sonucu NDF oranı önce artış sonra azalış göstermiştir. En düşük NDF oranı (%59,79) Si₃₀₀ uygulamasında iken en yüksek NDF oranı (%72,23) Si₁₀₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Uygulanan Cd dozlarının salkımın NDF oranı üzerine etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) salkımda en düşük NDF oranı (%49,47) Cd₁₀Si₀ uygulamasında iken en yüksek NDF oranı (%77,93) Cd₂₀Si₁₀₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarının NDF (%) oranlarına ve ortalamalarına etkisi Tablo 4.60'da gösterilmiştir.

Tablo 4. 60. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarının NDF (%) oranlarına ve ortalamalarına etkisi

Uygulamalar	Gövde	Yaprak	Salkım	Ortalama
Cd₀ Si₀	58,34 ^{f**}	63,50 ^{d**}	68,11 ^{abc**}	63,32^{B**}
Cd₀ Si₁₀₀	59,06 ^{ef}	64,82 ^{cd}	69,31 ^{abc}	64,40^{AB}
Cd₀ Si₂₀₀	60,47 ^{def}	65,09 ^{cd}	65,52 ^{abc}	63,69^{AB}
Cd₀ Si₃₀₀	64,01 ^{bc}	64,91 ^{cd}	54, ^{bc}	61,00^B
Cd₁₀ Si₀	63,52 ^{bc}	64,95 ^{cd}	49,47 ^c	59,31^B
Cd₁₀ Si₁₀₀	62,85 ^{bcd}	65,28 ^{bcd}	72,43 ^{ab}	66,64^{AB}
Cd₁₀ Si₂₀₀	61,85 ^{cde}	65,70 ^{bcd}	68,55 ^{abc}	65,36^{AB}
Cd₁₀ Si₃₀₀	63,16 ^{bcd}	66,37 ^{bc}	64,87 ^{abc}	64,80^{AB}
Cd₂₀ Si₀	61,73 ^{cde}	66,66 ^{abc}	65,14 ^{abc}	64,51^{AB}
Cd₂₀ Si₁₀₀	69,30 ^a	68,86 ^a	77,93 ^a	72,03^A
Cd₂₀ Si₂₀₀	64,96 ^b	67,42 ^{ab}	67,44 ^{abc}	66,61^{AB}
Cd₂₀ Si₃₀₀	68,09 ^a	67,03 ^{abc}	60,46 ^{abc}	65,19^{AB}
Ortalama	63,06^{öd}	65,88	65,27	

** : p<0,01, öd: önemli değil.

Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarının NDF (%) oranlarına etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

Bitkide NDF oranları %59,31-72,03 arasında değişim göstermiştir. En düşük NDF oranları %59,31, %61,00 ve %63,32 ile Cd₁₀Si₀, Cd₀Si₃₀₀ ve Cd₀Si₀ uygulamalarında görülürken en yüksek NDF %72,03 ile Cd₂₀Si₁₀₀ uygulamasında görülmüştür.

Bitkisel karbonhidratlar (yapısal) içerisinde hücre duvarı bileşenlerinden olan selüloz ve lignin ADF'yi, selüloz, lignin ve hemiselüloz ise NDF'yi oluşturur (Balthrop, 2011). Gövde ve yapraklarda Cd ve Si uygulaması ile birlikte NDF oranları artmıştır. Verilen Si, [Si-duvar matrisi] Cd kompleksleşmesinin bir sonucu olarak hücre duvarında Cd ile birlikte biriktirilebilir (Liu vd. 2013). Silisyum hücre duvarlarında değişikliklere neden olur ve polisakaritlerle çapraz bağlanma (He vd. 2015) dahil olmak üzere mekanik ve kimyasal özelliklerini iyileştirir, bu da ikincil hücre duvarı bileşenlerinin sentezini artırır ve metabolizmasını uyarır (Yamamoto vd. 2012). Salkımlarda NDF oranının yaprak ve gövdenin aksine düştüğü gözlemlenmiştir bu durumun yukarıda bahsedilen Cd-Si

kompleksleşmesinin salkımlarda olmayışından kaynaklı olabileceği düşünülmektedir çünkü bitki organları arasında en düşük Cd konsantrasyonu (Tablo 4.6) salkımlarda belirlenmiştir.

Vietor vd. (2010) sorgumun gövde ve yapraklardaki NDF fraksiyonunun sırasıyla %48,0-49,8 ve %61,0-63,4 olduğunu bildirmişlerdir. Çalışmamızda belirlenen gövde, yaprak ve salkımlardaki NDF oranlarına (%63,06-65,88) ait sonuçlar Vietor vd. (2015) sonuçları ile yakınlık göstermektedir.

4.2.7. Gövde, Yaprak ve Salkımlarda Ham Protein (HP) (%) Oranı

Farklı dozlarda Cd ve Si uygulamalarının bitki organlarının (gövde, yaprak ve salkım) ham protein (HP) oranlarına etkisine ait varyans analizi sonucu Tablo 4.61'de verilmiştir. Gövdede Cd ve Si uygulamaları çok önemli ($p<0,01$), Cd*Si interaksyonu önemsiz, yapraklarda Cd ve Si uygulamaları çok önemli ($p<0,01$), Cd*Si interaksyonu önemli ($p<0,05$), salkımlarda ise Cd uygulaması, Si uygulaması ve Cd*Si interaksyonu önemsiz bulunmuştur.

Tablo 4. 61. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun gövde, yaprak ve salkımlarındaki ham kül (HK) oranlarına ait varyans analizi

Kaynak	SD	Gövde		Yaprak		Salkım	
		KO	F değeri	KO	F değeri	KO	F değeri
Cd	2	15,64	25,00**	3,34	14,10**	4,93	2,11
Si	3	11,59	18,52**	6,22	26,29**	5,01	2,14
Cd*Si	6	1,45	2,32	0,65	2,74*	1,95	0,84
Tekerrür	2	2,26	3,61	0,03	0,10	0,02	0,01
Hata	22	0,63		0,24		2,34	
Genel	35						
		R ² 0,85	DK %11,92	R ² 0,85	DK %7,26	R ² 0,42	DK %15,97

** : $P<0,01$, SD: Serbestlik derecesi, R²: Belirtme katsayısı, DK: Değişim katsayısı (%).

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının gövdenin ham protein (HP) oranına (%) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.62'de verilmiştir.

Tablo 4. 62. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, gövdenin ham protein (HP) oranına (%) etkisi ve oluşan ortalamalar

Gövde Ham protein (%)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd ₀	7,58 ^{öd}	6,72	6,23	6,15	6,67 ^{B**}
Cd ₁₀	8,53	8,61	7,30	6,56	7,75 ^A
Cd ₂₀	7,49	6,57	4,02	3,78	5,47 ^C
Ortalama	7,86 ^{A**}	7,30 ^A	5,85 ^B	5,50 ^B	

** : p<0,01 önemli, öd: önemli değil. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Gövdede Si uygulaması sonucu ham protein (HP) oranı azalış göstermiştir. En düşük ham protein (HP) oranı (%5,85 ve %5,50) Si₃₀₀ ve Si₂₀₀ uygulamalarında iken en yüksek ham protein (HP) oranı (%7,30 ve %7,86) Si₁₀₀ ve Si₀ uygulamalarında belirlenmiştir.

Uygulanan Cd dozları ile en düşük ham protein (HP) oranı (%5,47) Cd₀ uygulamasında iken en yüksek ham protein (HP) oranı (%7,75) Cd₁₀ uygulamasında görülmüştür.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) gövdede ham protein (HP) oranı istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının yapraklardaki ham protein (HP) oranına (%) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.63'te verilmiştir.

Tablo 4. 63. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, yaprağın ham protein (HP) oranına (%) etkisi ve oluşan ortalamalar

Yaprakta Ham Protein (%)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd ₀	7,48 ^{a*}	7,32 ^a	6,89 ^{ab}	6,83 ^{ab}	7,13 ^{A**}
Cd ₁₀	7,94 ^a	7,71 ^a	6,67 ^{ab}	5,54 ^{bc}	6,97 ^A
Cd ₂₀	7,27 ^a	6,79 ^{ab}	5,70 ^{bc}	4,83 ^c	6,15 ^B
Ortalama	7,56 ^{A**}	7,27 ^A	6,42 ^B	5,73 ^C	

** : p<0,01, * : p<0,05 önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Yapraklarda Si uygulaması sonucu ham protein (HP) oranı azalış göstermiştir. En düşük ham protein (HP) oranı (%5,73) Si₃₀₀ uygulamasında iken en yüksek ham protein (HP) oranı (%7,27 ve %7,56) Si₁₀₀ ve Si₀ uygulamalarında belirlenmiştir.

Uygulanan Cd dozlarının artışı yaprakta ham protein (HP) oranının azalmasına neden olmuştur. En düşük ham protein (HP) oranı (%6,15) Cd₂₀ uygulamasında iken en yüksek ham protein (HP) oranı (%7,13 ve %6,97) Cd₀ ve Cd₁₀ uygulamasında görülmüştür.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) yapraklarda en düşük ham protein (HP) oranı %4,83 ile Cd₂₀Si₃₀₀ uygulamasında iken en yüksek ham protein (HP) oranı %7,27-7,94 arasında değişim göstererek Cd₀Si₀, 100, Cd₁₀Si₀, 100 ve Cd₂₀Si₀ uygulamalarında görülmüştür.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının salkımdaki ham protein (HP) oranına (%) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.64'te verilmiştir.

Tablo 4. 64. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımın ham protein (HP) oranına (%) etkisi ve oluşan ortalamalar

Salkımda Ham protein (%)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd₀	9,35 ^{öd}	9,25	10,12	12,52	10,31^{öd}
Cd₁₀	9,32	8,22	9,49	9,43	9,12
Cd₂₀	9,84	8,65	9,14	9,63	9,31
Ortalama	9,50^{öd}	8,70	9,58	10,53	

** : p<0,01, öd: önemli değil. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Salkımların ham protein (HP) oranı üzerine Si uygulamasının, Cd uygulamasının ve Cd*Si interaksiyonunun etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarının ham protein (HP) oranlarına ve ortalamalarına etkisi Tablo 4.65'te gösterilmiştir.

Tablo 4. 65. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarının ham protein (HP) (%) oranlarına ve ortalamalarına etkisi

Uygulamalar	Gövde	Yaprak	Salkım	Ortalama
Cd₀ Si₀	7,58 ^{abc**}	7,48 ^{a**}	9,35 ^{öd}	8,13^{AB**}
Cd₀ Si₁₀₀	6,72 ^{abc}	7,32 ^a	9,25	7,76^{ABC}
Cd₀ Si₂₀₀	6,23 ^{bcd}	6,89 ^{ab}	10,12	7,75^{ABC}
Cd₀ Si₃₀₀	6,15 ^{cd}	6,83 ^{ab}	12,52	8,50^A
Cd₁₀ Si₀	8,53 ^{ab}	7,94 ^a	9,32	8,60^A
Cd₁₀ Si₁₀₀	8,61 ^a	7,71 ^a	8,22	8,18^{AB}
Cd₁₀ Si₂₀₀	7,30 ^{abc}	6,67 ^{ab}	9,49	7,82^{ABC}
Cd₁₀ Si₃₀₀	6,55 ^{abc}	5,54 ^{bc}	9,43	7,18^{ABC}
Cd₂₀ Si₀	7,49 ^{abc}	7,27 ^a	9,84	8,20^{AB}
Cd₂₀ Si₁₀₀	6,57 ^{abc}	6,79 ^{ab}	8,65	7,33^{ABC}
Cd₂₀ Si₂₀₀	4,02 ^{de}	5,70 ^{bc}	9,14	6,28^{BC}
Cd₂₀ Si₃₀₀	3,78 ^e	4,83 ^c	9,63	6,08^C
Ortalama	6,63^{B**}	6,75^B	9,58^A	

** : p<0,01, * : p<0,05 önemli ve öd: önemli değil.

Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarının ham protein (HP) (%) oranlarına etkisi incelendiğinde en düşük ham protein (HP) oranı %6,63 ve %6,75 ile gövde ve yapraklarda en yüksek ise %9,58 ile salkımlarda belirlenmiştir.

Bitkide en düşük ham protein (HP) oranı %6,08 ile Cd₂₀Si₃₀₀ uygulamasında en yüksek ise %8,50 ve %8,60 ile Cd₀Si₃₀₀ ve Cd₁₀Si₀ uygulamalarında belirlenmiştir.

Gövde ve yapraklarda ham protein oranı Cd ve Si uygulaması ile azalış göstermiştir. Silisyumun tek başına uygulandığında bitkide N kullanım etkinliğini arttırdığını belirten çalışmalar vardır (Buchelt vd. 2021). Ancak bu çalışmada olduğu gibi Cd stresıyla uygulandığında durum tersi yönde gelişme göstermiştir. Sheoran vd. (1990) Cd'nin bitki bünyesinde azot ve karbonhidrat metabolizmalarını bozduğunu ifade etmişlerdir. Bitki organları arasında en fazla ham protein salkımlarda belirlenmiştir. Kır ve Temel (2017), bitkilerin tohumlarındaki ham protein oranlarını bitki saplarından daha fazla olduğunu ifade etmiştir.

4.2.8. Gövde, Yaprak ve Salkımlarda Ham Kül (HK) (%) Oranı

Farklı dozlarda Cd ve Si uygulamalarının bitki organlarının (gövde, yaprak ve salkım) ham kül (HK) oranlarına etkisine ait varyans analizi sonucu Tablo 4.66’ da verilmiştir. Gövdede Cd uygulaması ve Cd*Si interaksyonu çok önemli ($p<0,01$), Si uygulaması önemli ($p<0,05$), yapraklarda Si çok önemli ($p<0,01$), Cd önemli ($p<0,05$), Cd*Si interaksyonu önemsiz, salkımlarda ise Cd ve Cd*Si interaksyonu önemsiz, Si uygulaması önemli ($p<0,05$) bulunmuştur.

Tablo 4. 66. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun gövde, yaprak ve salkımlarındaki ham kül (HK) oranlarına ait varyans analizi

Kaynak	SD	Gövde		Yaprak		Salkım	
		KO	F değeri	KO	F değeri	KO	F değeri
Cd	2	3,38	22,56**	0,09	3,52*	0,04	0,32
Si	3	0,56	3,74*	0,40	16,20**	0,56	4,76*
Cd*Si	6	0,75	4,99**	0,06	2,44	0,20	1,71
Tekerrür	2	0,08	0,52	0,00	0,04	0,03	0,19
Hata	22	0,15		0,02		0,12	
Genel	35						
		R ²	0,80	DK	%4,67	R ²	0,76
						DK	%1,92
						R ²	0,54
						DK	%4,20

** : $P<0,01$, * : $p<0,05$ önemli. SD: Serbestlik derecesi, R²: Belirtme katsayısı, DK: Değişim katsayısı (%).

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının gövdenin ham kül (HK) oranına (%) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.67’de verilmiştir.

Tablo 4. 67. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, gövdenin ham kül (HK) oranına (%) etkisi ve oluşan ortalamalar

Gövdede Ham Kül Oranı (%)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd ₀	7,58 ^{d*}	8,23 ^{a-d}	7,69 ^{bcd}	7,54 ^d	7,76 ^{B**}
Cd ₁₀	7,61 ^{cd}	8,23 ^{a-d}	8,78 ^{ab}	9,35 ^a	8,49 ^A
Cd ₂₀	8,79 ^{ab}	9,00 ^a	8,62 ^{a-d}	8,75 ^{abc}	8,79 ^A
Ortalama	7,99 ^{B*}	8,49 ^{AB}	8,37 ^{AB}	8,55 ^A	

** : $p<0,01$, * : $p<0,05$ önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksyon gruplarını göstermektedir.

Gövdede Si uygulaması sonucu ham kül (HK) oranı artış göstermiştir. En düşük ham kül (HK) oranı (%7,99) Si₀ uygulamasında iken en yüksek ham kül (HK) oranı (%8,55) Si₃₀₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Uygulanan Cd dozlarının artışı gövdede ham kül (HK) oranının artmasına neden olmuştur. En düşük ham kül (HK) oranı (%7,76) Cd₀ uygulamasında iken en yüksek ham kül (HK) oranı (%8,49 ve %8,79) Cd₁₀ ve Cd₂₀ uygulamalarında görülmüştür.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) gövdede en düşük ham kül (HK) oranı (%7,54 ve %7,58) Cd₀Si₃₀₀ ve Cd₀Si₀ uygulamalarında en yüksek ham kül (HK) oranı (%9,00 ve %9,35) Cd₂₀Si₁₀₀ ve Cd₁₀Si₃₀₀ uygulamalarında görülmüştür.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının yapraklardaki ham kül (HK) oranına (%) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.68’de verilmiştir.

Tablo 4. 68. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, yaprağın ham kül (HK) oranına (%) etkisi ve oluşan ortalamalar

Yaprakta Ham Kül Oranı (%)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd ₀	8,19	8,03	8,53	8,32	8,27 ^{B*}
Cd ₁₀	7,99	8,20	8,48	8,70	8,34 ^{AB}
Cd ₂₀	8,36	8,24	8,49	8,68	8,44 ^A
Ortalama	8,18 ^{B**}	8,16 ^B	8,50 ^A	8,56 ^A	

** : p<0,01 önemli *:p<0,05 önemli. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Yapraklarda Si uygulaması sonucu ham kül (HK) oranı artış göstermiştir. En düşük ham kül (HK) oranı (%8,16 ve %8,18) Si₁₀₀ ve Si₀ uygulamalarında iken en yüksek ham kül (HK) oranı (%8,50 ve %8,56) Si₂₀₀ ve Si₃₀₀ uygulamalarında belirlenmiştir.

Uygulanan Cd dozlarının artışı yaprakta ham kül (HK) oranının artmasına neden olmuştur. En düşük ham kül (HK) oranı (%8,27) Cd₀ uygulamasında iken en yüksek ham kül (HK) oranı (%8,44) Cd₂₀ uygulamasında görülmüştür.

İnteraksiyonu sonucunda (Cd*Si) yapraklarda ham kül (HK) oranı istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur.

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının salkımdaki ham kül (HK) oranına (%) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.69'da verilmiştir.

Tablo 4. 69. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, salkımın ham kül (HK) oranına (%) etkisi ve oluşan ortalamalar

Salkımda Ham Kül Oranı (%)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd ₀	8,06 ^{öd}	8,24	8,10	7,89	8,07 ^{öd}
Cd ₁₀	8,66	7,85	8,44	7,70	8,16
Cd ₂₀	8,42	7,73	8,16	7,95	8,06
Ortalama	8,38 ^{A*}	7,94 ^{AB}	8,23 ^{AB}	7,85 ^B	

**: p<0,01 önemli, öd: önemli değil. Büyük harfler ortalama gruplarını göstermektedir.

Salkımlarda Si uygulaması sonucu ham kül (HK) oranı genel olarak azalış göstermiştir. En düşük ham kül (HK) oranı (%7,85) Si₃₀₀ uygulamasında iken en yüksek ham kül (HK) oranı (%8,38) Si₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Uygulanan Cd dozlarının salkımın ham kül (HK) oranı üzerine etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

İnteraksiyon sonucunda (Cd*Si) salkımda ham kül (HK) oranı istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur.

Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarının ham kül (HK) (%) oranlarına ve ortalamalarına etkisi Tablo 4.70'de gösterilmiştir.

Tablo 4. 70. Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarının ham kül (HK) (%) oranlarına ve ortalamalarına etkisi

Uygulamalar	Gövde	Yaprak	Salkım	Ortalama
Cd ₀ Si ₀	7,58 ^{d**}	8,19 ^{bcd**}	8,06 ^{a*}	7,94 ^{B**}
Cd ₀ Si ₁₀₀	8,23 ^{a-d}	8,03 ^{cd}	8,24 ^a	8,17 ^A
Cd ₀ Si ₂₀₀	7,69 ^{bcd}	8,53 ^{ab}	8,10 ^a	8,11 ^A
Cd ₀ Si ₃₀₀	7,54 ^d	8,32 ^{a-d}	7,89 ^a	7,92 ^B

Tablo 4. 70. (Devam) Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarının ham kül (HK) (%) oranlarına ve ortalamalarına etkisi

Cd₁₀ Si₀	7,61 ^{cd}	8,00 ^d	8,66 ^a	8,09^A
Cd₁₀ Si₁₀₀	8,23 ^{a-d}	8,21 ^{bcd}	7,85 ^a	8,10^A
Cd₁₀ Si₂₀₀	8,78 ^{ab}	8,48 ^{abc}	8,44 ^a	8,57^A
Cd₁₀ Si₃₀₀	9,35 ^a	8,70 ^a	7,70 ^b	8,58^A
Cd₂₀ Si₀	8,79 ^{ab}	8,36 ^{a-d}	8,42 ^a	8,52^A
Cd₂₀ Si₁₀₀	9,00 ^a	8,24 ^{a-d}	7,73 ^b	8,32^A
Cd₂₀ Si₂₀₀	8,62 ^{a-d}	8,49 ^{abc}	8,16 ^a	8,43^A
Cd₂₀ Si₃₀₀	8,75 ^{abc}	8,68 ^a	7,95 ^a	8,46^A
Ortalama	8,35^{A*}	8,35^A	8,10^B	

**: p<0,01, *:p<0,05 önemli ve öd: önemli değil.

Farklı dozlardaki Cd ve Si uygulamalarının, bitki organlarının ham kül (HK) (%) oranlarına etkisi incelendiğinde en düşük ham kül (HK) oranı %8,10 ile salkımlarda en yüksek %8,35 ile gövde yaprakta belirlenmiştir.

Bitkide ham kül (HK) oranları %7,92-8,58 arasında değişim göstermiştir. Tüm uygulamalarda iki farklı ortalama grubu oluşmuştur.

Genel olarak Cd ve Si uygulamaları ham kül oranlarının artmasına neden olmuştur. Silisyumun bitkilerde her zaman mevcut olduğu ve kül bileşenlerinin önemli bir bölümünü oluşturduğu iyi bilinmektedir (Sreenivasan, 1934). Nacu vd. (2020) farklı yem bitkisi türleri ile yaptıkları çalışmada 2 farklı sistemde (ekolojik ve konvansiyonel) yetiştirilen bitkilerden Cd konsantrasyonunun fazla olduğu sistemde bitkilerin ham kül içeriklerinin de daha fazla olduğunu belirlemişlerdir.

Bitki organları arasında kül içeriği gövde ve yaprakta aynı iken (%8,35) salkımda daha düşük (%8,10) bulunmuştur. Wahyono vd. (2021) sorgumda yapraklarda kül içeriğini ortalama %9,79 bulurken salkımlarda %5,03 bulmuştur. Monti vd. (2008) sorgumun yaprak (%8,2) ve salkımlarının (%5,8) kül içeriği bakımından gövdeden (%5) daha zengin olduğunu gözlemlemişlerdir. Ancak biyokütledeki kül içeriği, Singh vd. (2012) tarafından bildirildiği gibi uygulamalardan ve çevresel koşullardan etkilenebilir.

4.3. Kadmiyum (Cd) ve Silisyum (Si) Uygulamalarının Sorgumun Morfolojik Özelliklerine Etkisi

4.3.1. Bitki Boyu (cm)

Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun bitki boyuna etkisine ait varyans analizi Tablo 4.71’de verilmiştir. İstatistiksel olarak bitki boyu üzerine Cd uygulaması, Si uygulaması ve Cd*Si interaksyonu önemsiz bulunmuştur.

Tablo 4. 71. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun bitki boyuna ait varyans analizi

Kaynak	SD	Bitki boyu	
		KO	F değeri
Cd	2	73,70	2,15
Si	3	23,19	0,68
Cd*Si	6	19,32	0,56
Tekerrür	2	23,70	0,69
Hata	22	34,33	
Genel	35		
		R ²	0,33
		DK	%5,51

**: P<0,01, SD: Serbestlik derecesi, R²: Belirtme katsayısı, DK: Değişim katsayısı (%).

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının bitki boyu (cm) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.72’de verilmiştir.

Tablo 4. 72. Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının sorgumun bitki boyuna (cm) etkisi ve oluşan ortalamalar

Bitki boyu (cm)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd₀	111,33 ^{öd}	103,67	105,33	102,66	105,75^{öd}
Cd₁₀	108,00	108,00	108,67	110,33	108,75
Cd₂₀	106,00	105,00	103,00	101,33	103,83
Ortalama	108,44^{öd}	105,56	105,67	104,78	

**: p<0,01, öd: önemli değil. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksyon gruplarını göstermektedir.

Sorgumun bitki boyu üzerine Si uygulaması, Cd uygulaması ve Cd*Si interaksyonunun etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

4.3.2. Bitki Gövde Çapı (mm)

Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun gövde çapına etkisine ait varyans analizi Tablo 4.73'te verilmiştir. İstatistiksel olarak gövde çapı üzerine Cd uygulaması çok önemli ($p<0,01$), Si uygulaması ve Cd*Si interaksyonu önemsiz bulunmuştur.

Tablo 4. 73. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun gövde çapına ait varyans analizi

Kaynak	SD	Bitki gövde çapı	
		KO	F değeri
Cd	2	18,97	15,47**
Si	3	3,35	2,73
Cd*Si	6	2,14	1,74
Tekerrür	2	0,06	0,05
Hata	22	1,23	
Genel	35		
		R ²	0,69
		DK	%5,58

** : $P<0,01$, SD: Serbestlik derecesi, R²: Belirtme katsayısı, DK: Değişim katsayısı (%).

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının gövde çapı (mm) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.74'de verilmiştir.

Tablo 4. 74. Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının sorgumun gövde çapına (mm) etkisi ve oluşan ortalamalar

Bitki gövde çapı (mm)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd ₀	19,00 ^{öd}	18,68	18,62	17,72	18,51 ^{B**}
Cd ₁₀	18,85	20,50	21,00	20,47	20,20 ^A
Cd ₂₀	19,29	22,00	21,19	21,36	20,96 ^A
Ortalama	19,04 ^{öd}	20,39	20,27	19,85	

** : $p<0,01$, öd: önemli değil. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksyon gruplarını göstermektedir.

Sorgumun gövde çapı (mm) üzerine Si uygulamasının etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

Kadmiyum (Cd) uygulaması sorgumun gövde çapında artışa neden olmuştur. En ince gövde kalınlığı (18,51 mm) Cd₀ uygulamasında en kalın gövde çapı (20,20 mm ve 20,96 mm) Cd₁₀ ve Cd₂₀ uygulamalarında belirlenmiştir.

Sorgumun gövde çapı üzerine Cd*Si interaksiyonunun etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

Kadmiyum uygulamasının bitki gövde çapı gelişimine olumlu etki ettiği gözlemlenmiştir. Bazı çalışmalarda Cd uygulamasının bitki gelişimine beklenin aksine olumlu etki ettiği bildirilmiştir. Kadmiyum uygulamaları, tütün biyokütlesini artırmıştır (Liu vd. 2011). Zhang vd. (2002) buğdaylarda fide döneminde değişen dozlarda bitkilere Cd uygulamış, kadmiyumun düşük dozlarında büyüme ve KM birikimi olumlu etkilediğini bildirmişlerdir. Carvalho vd. (2018) kadmiyumla kontamine toprakta yetiştirilen domateste meyve çapının eksojen Cd uygulamasından dolayı artışa sebep olduğunu bildirmiştir.

4.3.3. Salkım Uzunluğu (cm)

Farklı Cd ve Si dozlarının, salkım uzunluğu üzerine Cd uygulaması, Si uygulaması ve Cd*Si interaksiyonu önemsiz bulunmuştur.

Tablo 4. 75. Farklı Cd ve Si dozlarının, sorgumun salkım uzunluğuna ait varyans analizi

Kaynak	SD	Salkım uzunluğu	
		KO	F değeri
Cd	2	1,03	0,35
Si	3	3,14	1,06
Cd*Si	6	1,47	0,50
Tekerrür	2	10,11	3,42
Hata	22	2,96	
Genel	35		
		R ²	0,38
		DK	%12,12

**: P<0,01, SD: Serbestlik derecesi, R²: Belirtme katsayısı, DK: Değişim katsayısı (%).

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının salkım uzunluğu (cm) etkisi sonucu ve oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.76'da verilmiştir.

Tablo 4. 76. Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının sorgumun salkım uzunluğuna (cm) etkisi ve oluşan ortalamalar

Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Salkım uzunluğu				Ortalama
	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	
Cd₀	15,33 ^{öd}	14,67	13,00	13,66	14,17^{öd}
Cd₁₀	14,00	14,66	13,68	13,31	13,92
Cd₂₀	14,00	15,33	15,00	13,67	14,50
Ortalama	14,44^{öd}	14,89	13,88	13,56	

*: p<0,05 önemli ve öd: önemli değil. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksyon gruplarını göstermektedir.

Sorgumun salkım uzunluğu (cm) üzerine Si uygulaması, Cd uygulaması ve Cd*Si interaksyonunun etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

4.3.4. Kuru Kök Ağırlığı (g)

Farklı Cd ve Si dozlarının, kuru kök ağırlığı üzerine Cd uygulaması çok önemli (p<0,01), Si uygulaması önemli (p<0,05) ve Cd*Si interaksyonu önemsiz bulunmuştur.

Tablo 4. 77. Farklı Cd ve Si dozlarının, kuru kök ağırlığına ait varyans analizi

Kaynak	SD	Kuru kök ağırlığı	
		KO	F değeri
Cd	2	68,59	11,74**
Si	3	21,87	3,74*
Cd*Si	6	4,47	0,77
Tekerrür	2	0,32	0,05
Hata	22	5,84	
Genel	35		
		R ²	0,64
		DK	%18,16

** : P<0,01, * : p<0,05 önemli. SD: Serbestlik derecesi, R²: Belirtme katsayısı, DK: Değişim katsayısı (%).

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının kuru kök ağırlığına (g) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.78’de verilmiştir.

Tablo 4. 78. Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının sorgumun kuru kök ağırlığına (g) etkisi ve oluşan ortalamalar

Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Kuru kök ağırlığı				Ortalama
	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	
Cd₀	15,63 ^{öd}	15,80	16,23	16,67	16,08^{A**}
Cd₁₀	9,50	9,43	13,27	14,90	11,78^B
Cd₂₀	10,10	11,83	12,77	13,83	12,13^B
Ortalama	11,74^{B*}	12,36^{AB}	14,09^{AB}	15,13^A	

** : P<0,01, * : p<0,05 önemli ve öd: önemli değil. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksyon gruplarını göstermektedir.

Sorgumun kuru kök ağırlığı üzerine Si uygulaması olumlu etki göstermiş ve artışa neden olmuştur. En düşük kuru kök ağırlığı (11,74 g) Si₀ uygulamasında en yüksek kuru kök ağırlığı (15,13 g) Si₃₀₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Kadmiyum (Cd) uygulaması sorgumun kuru kök ağırlığı üzerine negatif etki göstererek düşüşe neden olmuştur. En düşük kuru kök ağırlığı (11,78 g ve 12,13 g) Cd₁₀ ve Cd₂₀ uygulamalarında en yüksek kuru kök ağırlığı (16,08 g) Cd₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Sorgumun kuru kök ağırlığı (g) üzerine Cd*Si interaksyonunun etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

4.3.5. Kuru Sap Ağırlığı (g)

Farklı Cd ve Si dozlarının, kuru sap ağırlığı üzerine Si uygulaması çok önemli (p<0.01), Cd uygulaması ve Cd*Si interaksyonu önemsiz bulunmuştur.

Tablo 4. 79. Farklı Cd ve Si dozlarının, kuru kök ağırlığına ait varyans analizi

Kaynak	SD	Kuru sap ağırlığı	
		KO	F değeri
Cd	2	211,21	2,93
Si	3	354,18	4,91 ^{**}
Cd*Si	6	26,55	0,37
Tekerrür	2	0,97	0,01
Hata	22	72,08	
Genel	35		
		R ²	0,51
		DK	%16,10

** : P<0,01, SD: Serbestlik derecesi, R²: Belirtme katsayısı, DK: Değişim katsayısı (%).

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının kuru sap ağırlığına (g) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.80’de verilmiştir.

Tablo 4. 80. Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının sorgumun kuru sap ağırlığına (g) etkisi ve oluşan ortalamalar

Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Kuru sap ağırlığı				Ortalama
	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	
Cd₀	43,90 ^{öd}	46,23	53,10	52,60	48,96^{öd}
Cd₁₀	49,73	56,30	60,17	62,80	57,25
Cd₂₀	43,47	46,13	54,90	63,47	51,99
Ortalama	45,70^{B**}	49,56^{AB}	56,06^{AB}	59,62^A	

*: p<0,05 önemli ve öd: önemli değil. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Sorgumun kuru sap ağırlığı üzerine Si uygulaması pozitif etki göstermiş ve artışa neden olmuştur. En düşük kuru sap ağırlığı (45,70 g) Si₀ uygulamasında en yüksek kuru sap ağırlığı (59,62 g) Si₃₀₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Kadmiyum (Cd) uygulamasının sorgumun kuru kök ağırlığı üzerine etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

Sorgumun kuru sap ağırlığı (g) üzerine Cd*Si interaksiyonunun etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

4.3.6. Kuru Yaprak Ağırlığı (g)

Farklı Cd ve Si dozlarının, kuru yaprak ağırlığı üzerine Si ve Cd*Si interaksiyonu çok önemli (p<0,01) bulunurken Cd uygulaması önemsiz bulunmuştur.

Tablo 4. 81. Farklı Cd ve Si dozlarının, kuru yaprak ağırlığına ait varyans analizi

Kaynak	SD	Kuru yaprak ağırlığı	
		KO	F değeri
Cd	2	10,81	3,42
Si	3	103,62	32,82**
Cd*Si	6	17,98	5,69**
Tekerrür	2	14,89	4,72
Hata	22	3,16	
Genel	35		
		R ²	0,87
		DK	%8,32

** : P<0,01, SD: Serbestlik derecesi, R²: Belirtme katsayısı, DK: Değişim katsayısı (%).

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının kuru yaprak ağırlığı (g) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.82’de verilmiştir.

Tablo 4. 82. Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının sorgumun kuru yaprak ağırlığına (g) etkisi ve oluşan ortalamalar

Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Kuru yaprak ağırlığı				Ortalama
	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	
Cd₀	20,17 ^{c-e**}	19,90 ^{de}	20,67 ^{b-e}	22,27 ^{a-d}	20,75^{öd}
Cd₁₀	15,63 ^e	19,17 ^{de}	23,63 ^{a-d}	25,43 ^{abc}	20,97
Cd₂₀	15,70 ^e	21,53 ^{a-d}	26,80 ^a	25,93 ^{ab}	22,49
Ortalama	17,17^{C**}	20,20^B	23,70^A	24,54^A	

** : P<0,01, öd: önemli değil. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Sorgumun kuru yaprak ağırlığı üzerine Si uygulaması pozitif etki göstermiş ve artışa neden olmuştur. En düşük kuru yaprak ağırlığı (17,17 g) Si₀ uygulamasında iken en yüksek kuru yaprak ağırlığı (24,54 g) Si₃₀₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Kadmiyum (Cd) uygulamasının sorgumun kuru yaprak ağırlığı üzerine etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

Sorgumun kuru yaprak ağırlığı (g) üzerine Cd*Si interaksiyonunun etkisi incelendiğinde en düşük kuru yaprak ağırlığı (15,63 g ve 15,73 g) Cd₁₀Si₀ ve Cd₂₀Si₀ uygulamalarında, en yüksek kuru yaprak ağırlığı (26,80 g) Cd₂₀Si₂₀₀ uygulamasında belirlenmiştir.

4.3.7. Kuru Salkım Ağırlığı (g)

Farklı Cd ve Si dozlarının, kuru salkım ağırlığı üzerine Cd uygulaması, Si uygulaması ve Cd*Si interaksiyonu çok önemli (p<0,01) bulunmuştur.

Tablo 4. 83. Farklı Cd ve Si dozlarının, kuru salkım ağırlığına ait varyans analizi

Kaynak	SD	Kuru salkım ağırlığı	
		KO	F değeri
Cd	2	34,83	56,49**
Si	3	5,66	9,18**
Cd*Si	6	5,08	8,23**
Tekerrür	2	0,53	0,86
Hata	22	0,62	
Genel	35		
		R ²	0,90
		DK	%12,06

** : P<0,01, SD: Serbestlik derecesi, R²: Belirtme katsayısı, DK: Değişim katsayısı (%).

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının kuru salkım ağırlığı (g) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.84'te verilmiştir.

Tablo 4. 84. Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının sorgumun kuru salkım ağırlığına (g) etkisi ve oluşan ortalamalar

Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Kuru salkım ağırlığı				Ortalama
	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	
Cd₀	6,37 ^{bcd}	7,70 ^{bc}	8,33 ^b	11,60 ^a	8,50^{A**}
Cd₁₀	5,87 ^{cd}	5,00 ^d	4,83 ^d	5,70 ^{cd}	5,35^B
Cd₂₀	5,67 ^{cd}	5,57 ^{cd}	6,17 ^{bcd}	5,80 ^{cd}	5,80^B
Ortalama	5,97^{B**}	6,09^B	6,44^B	7,70^A	

*: p<0,05 önemli ve öd: önemli değil. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksiyon gruplarını göstermektedir.

Sorgumun kuru salkım ağırlığı üzerine Si uygulaması olumlu etki göstererek artmış ve iki farklı ortalama grubu oluşmuştur. En düşük kuru salkım ağırlıkları (5,97, 6,09 ve 6,44 g) Si₀, Si₁₀₀ ve Si₂₀₀ uygulamalarında iken en yüksek kuru salkım ağırlığı (7,70 g) Si₃₀₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Kadmiyum (Cd) uygulaması kuru salkım ağırlığının azalışına neden olmuştur. En düşük kuru salkım ağırlıkları (5,35 ve 5,80 g) Cd₁₀ ve Si₂₀₀ uygulamalarında iken en yüksek kuru salkım ağırlığı (8,50 g) Cd₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Sorgumun kuru salkım ağırlığı (g) üzerine Cd*Si interaksiyonunun etkisi incelendiğinde en düşük kuru salkım ağırlığı (4,83 g ve 5,00 g) ile Cd₁₀Si₁₀₀ uygulamalarında, en yüksek kuru yaprak ağırlığı (11,60 g) Cd₀Si₃₀₀ uygulamasında belirlenmiştir.

4.3.8. Tüm Bitki Ağırlığı (g)

Farklı Cd ve Si dozlarının, tüm bitki ağırlığı üzerine Si uygulaması çok önemli ($p<0,01$) bulunurken Cd uygulaması ve Cd*Si interaksyonu önemsiz bulunmuştur.

Tablo 4. 85. Farklı Cd ve Si dozlarının, kuru salkım ağırlığına ait varyans analizi

Kaynak	SD	Tüm bitki ağırlığı	
		KO	F değeri
Cd	2	80,86	0,96
Si	3	933,56	11,13**
Cd*Si	6	29,97	0,36
Tekerrür	2	29,08	0,35
Hata	22	83,89	
Genel	35		
		R ²	0,63
		DK	%11,34

** : $P<0,01$, SD: Serbestlik derecesi, R²: Belirtme katsayısı, DK: Değişim katsayısı (%).

Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının tüm bitki ağırlığı (g) etkisi sonucu oluşan ortalamalar ve grupları Tablo 4.86’da verilmiştir.

Tablo 4. 86. Kadmiyum (Cd) ve Si uygulamalarının sorgumun tüm bitki ağırlığına (g) etkisi ve oluşan ortalamalar

Tüm bitki ağırlığı (g)					
Uygulamalar (mg kg ⁻¹)	Si ₀	Si ₁₀₀	Si ₂₀₀	Si ₃₀₀	Ortalama
Cd₀	70,43 ^{öd}	73,83	82,10	86,47	78,21^{öd}
Cd₁₀	70,90	80,47	88,30	93,93	83,40
Cd₂₀	65,93	73,90	88,20	95,20	80,81
Ortalama	69,09^{C**}	76,07^{BC}	86,20^{AB}	91,87^A	

** : $P<0,01$, öd: önemli değil. Büyük harfler ortalama gruplarını, küçük harfler interaksyon gruplarını göstermektedir.

Sorgumun tüm bitki ağırlığı üzerine Si uygulaması pozitif etkide bulunmuş ve artış göstermiştir. En düşük tüm bitki ağırlığı (69,09 g) Si₀ uygulamasında iken en yüksek tüm bitki ağırlığı (97,87g) Si₃₀₀ uygulamasında belirlenmiştir.

Kadmiyum (Cd) uygulamasının sorgumun tüm bitki ağırlığı üzerine etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

Sorgumun tüm bitki ağırlığı (g) üzerine Cd*Si interaksiyonunun etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır.

Silisyum uygulaması ile bitkinin kuru kök, kuru gövde, kuru yaprak, kuru salkım ve tüm bitki ağırlığı artış göstermiştir. Cai vd. (2020) yaptıkları çalışmada farklı büyüme evrelerinde uygulanan Si'nin pirinç bitkisinin biyokütlesi ve verimi üzerine olumlu etkilerini gözlemişlerdir. Liang vd. (2005) ve da Cunha ve do Nascimento (2009) yaptıkları çalışmalarda Cd uygulanmış topraklarda yetiştirilen mısır bitkilerine Si uygulaması ile bitkilerin biyokütlesinde bir artışa yol açıldığını bildirmişlerdir (Liang vd. 2005; da Cunha ve do Nascimento, 2009). Eksojen Si uygulaması Cd stresi altındaki tütün bitkilerinin kök, gövde ve yapraklarının biyokütlesini artırmıştır (Yingang vd. 2018).

Kuru kök ve kuru salkım ağırlıkları Cd uygulaması ile azalmıştır. Nwugo ve Huerta (2008) pirinçte Cd uygulamasının genel olarak büyümeyi engellediğini ifade etmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kadmiyum stresi altındaki sorgum bitkisinde Si uygulamasının etkileri bitki organlarında Cd akümülyasyonu, sorgumun yem kalite özellikleri ve sorgumun morfolojik özelliklerinde olan değişim ana başlıkları altında incelenmiştir:

1. Kadmiyum en fazla sorgum bitkisinin diğer organlarına göre köklerinde birikmiştir ve bitki organlarındaki yoğunluğu, kök>gövde>yaprak=salkım şeklinde sıralanmıştır. Silisyum uygulaması bitki dokularında Si içeriğinin artmasına neden olmuş fakat özellikle salkımlarda köklerden ve gövdeden daha fazla Si birikimi gerçekleşmiştir. Uygulamalar (Cd*Si) kökte Fe, Mn ve Zn içeriğinin, gövde ve yapraklarda Ca ve Mg oranının azalmasına neden olmuştur.
2. Uygulamalar (Cd*Si) gövde ve yapraklarda ADF, NDF ve HK oranlarının artmasına, yapraklarda ham protein oranının azalmasına neden olmuş fakat salkımlarda HP oranını etkilememiştir.
3. Silisyum uygulamasının kuru yaprak, kuru salkım ve tüm bitki ağırlığını arttırdığı belirlenmiştir.

Sonuç olarak kökte Cd konsantrasyonunu en çok azaltan (%38) Cd₁₀Si₂₀₀ uygulaması, gövdede (%28,9), yapraklarda (%30,9) ve salkımlarda (%86,6) Cd konsantrasyonunu en çok azaltan ise Cd₁₀Si₃₀₀ uygulaması olmuştur.

Uygulanan 20 mg kg⁻¹ Cd dozunda, bitkide gerçekleşen Cd akümülyasyonun hafifletilmesinde 3 farklı Si dozunda etkili olamadığı görülebilmektedir.

10 mg kg⁻¹ Cd varlığında 300 mg kg⁻¹ Si uygulamasının salkımlara Cd taşınımını engellemekte güçlü bir potansiyele sahip olduğu görülmüştür. Bu çalışmada kullanılan toprağa benzer özelliklerdeki kontamine alanlarda (<10 mg kg⁻¹), 300 mg kg⁻¹ silisyumun Cd taşınımını engellemekte umut vaad edeceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Allison, L. E. and Moodie, C. D. (1965). Carbonate. In A. G. Norman (Ed). Methods of Soil Analysis:Part 2 Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy. (p. 1379-1396). doi:10.2134/agronmonogr9.2.c40

Alloway, B. J. (1995). Heavy Metals in Soils, (2nd edn), Blackie Academic and Professional, London, p. 386

Alyoshin, N. E., Avakyan, E. R., Lebedev, E. V. and Alyoshin, E. P. (1988). Influence of silicon and its antagonists on rice mitochondria, International Rice Research Newsletter (Philippines). Vol. 13, No. 3, 9-10

Alyoshin, N. E., Avakyan, E. R., Lebedev, E. V., Lebedev, V. E., and Alyoshin, E. P. (1989). External budding in rice aleurone grains. Vol. 14, No. 6, 4-5

An, T., Gao, Y., Kuang, Q., Wu, Y., Zaman, Q. U., Zhang, Y., ... and Chen, Y. (2022). Effect of silicon on morpho-physiological attributes, yield and cadmium accumulation in two maize genotypes with contrasting root system size and health risk assessment. Plant and Soil, 477(1), 117-134.

Anonim. (1980). The Nutrients Requirements of Ruminant Livestock. 4th ed. 73-310. CAB International, Wallingford.

Anonim. (2024). Tarım ve Orman Bakanlığı Bitkisel Üretim Genel Müdürlüğü erişim linki: <https://www.tarimorman.gov.tr>. erişim tarihi 06.01.2024

Aravind, P. and Prasad, M. N. V. (2004). Zinc protects chloroplasts and associated photochemical functions in cadmium exposed *Ceratophyllum demersum* L., a freshwater macrophyte. Plant Science, 166(5), 1321-1327.

Arinzechi, C., Dong, C., Huang, P., Zhao, P., Liao, Q., Li, Q. and Yang, Z. (2024). Synergistic mitigation of cadmium stress in rice (*Oryza sativa* L.) through combined selenium, calcium, and magnesium supplementation. Environmental Geochemistry and Health, 46(11), 435.

Asgher, M., Khan, M. I. R., Anjum, N. A. and Khan, N. A. (2015). Minimising toxicity of cadmium in plants—role of plant growth regulators. Protoplasma, 252, 399-413.

Bakshe, P. and Jugade, R. (2023). Phytostabilization and rhizofiltration of toxic heavy metals by heavy metal accumulator plants for sustainable management of contaminated industrial sites: A comprehensive review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 10, 100293.

Balali-Mood, M., Naseri, K., Tahergorabi, Z., Khazdair, M. R. and Sadeghi, M. (2021). Toxic mechanisms of five heavy metals: mercury, lead, chromium, cadmium, and arsenic. *Frontiers in pharmacology*, 12, 643972.

Balthrop, J. B. Brand, R. A. Cowie, J. Danier, J. De Boever, L. de Jonge, F. Jackson, H. P. S. Makkar, and C. Piotrowski. (2011). Quality assurance for animal feed analysis laboratories. *FAO Animal Production and Health Manual No. 14*. Food and Agriculture Organization (FAO), Rome, Italy.

Barcelo, J., Guevara, P. and Poschenrieder, C. (1993). Silicon amelioration of aluminium toxicity in teosinte (*Zea mays* L. ssp. *mexicana*). *Plant and Soil*, 154, 249-255.

Bhat, J. A., Shivaraj, S. M., Singh, P., Navadagi, D. B., Tripathi, D. K., Dash, P. K., ... and Deshmukh, R. (2019). Role of silicon in mitigation of heavy metal stresses in crop plants. *Plants*, 8(3), 71.

Bityutskii, N., Pavlovic, J., Yakkonen, K., Maksimović, V. and Nikolic, M. (2014). Contrasting effect of silicon on iron, zinc and manganese status and accumulation of metal-mobilizing compounds in micronutrient-deficient cucumber. *Plant physiology and Biochemistry*, 74, 205-211.

Brackhage, C., Schaller, J., Bäucker, E. and Dudel, E. G. (2013). Silicon availability affects the stoichiometry and content of calcium and micro nutrients in the leaves of common reed. *Silicon*, 5, 199-204.

Buchelt, A. C., de Mello Prado, R., Caione, G., de Almeida Carneiro, M. and Litter, F. A. (2021). Effects of silicon fertigation on dry matter production and crude protein contents of a pasture. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21, 3402-3413.

Buchelt, A. C., Teixeira, G. C. M., Oliveira, K. S., Rocha, A. M. S., de Mello Prado, R. and Caione, G. (2020). Silicon contribution via nutrient solution in forage plants to mitigate nitrogen, potassium, calcium, magnesium, and sulfur deficiency. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20, 1532-1548.

Burgu, L. and Mut, H. (2023). İkinci ürün olarak yetiştirilen silajlık mısır çeşitlerinin silaj verimi ve bazı kalite özellikleri. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 20(1), 12-24.

Cai Y., Pan B., Liu B., Cai K., Tian J., Wang W. (2022). The cd sequestration effects of rice roots affected by different Si management in cd-contaminated paddy soil, *Sci. Total Environ.* 849, 157718. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157718

Cai, Y., Zhang, S., Cai, K., Huang, F., Pan, B. and Wang, W. (2020). Cd accumulation, biomass and yield of rice are varied with silicon application at different growth phases under high concentration cadmium-contaminated soil. *Chemosphere*, 242, 125128.

Carlisle, E. M., McKeague, J. A., Siever, R. and van Soest, P. J. (1974). Silicon, in *Geochemistry and the Environment*, Vol. 2, Hopps, H. C., ed., N.A.S., Washington, D.C., 54

Carvalho, M. E., Piotto, F. A., Gaziola, S. A., Jacomino, A. P., Jozefczak, M., Cuypers, A. and Azevedo, R. A. (2018). New insights about cadmium impacts on tomato: plant acclimation, nutritional changes, fruit quality and yield. *Food and Energy Security*, 7(2), e00131.

Chaney R. L. and Hornick S. B. (1977). Accumulation and effects of cadmium on crops, paper presented at Int. Cadmium Conf. San Francisco, January 31, p.125

Chen, D., Chen, D., Xue, R., Long, J., Lin, X., Lin, Y., ... and Song, Y. (2019). Effects of boron, silicon and their interactions on cadmium accumulation and toxicity in rice plants. *Journal of hazardous materials*, 367, 447-455.

Clarkson, D. T. (1988). The uptake and translocation of manganese by plant roots. In *Manganese in Soils and Plants: Proceedings of the International Symposium on 'Manganese in Soils and Plants' held at the Waite Agricultural Research Institute, The University of Adelaide, Glen Osmond, South Australia, August 22–26, 1988 as an Australian Bicentennial Event*. Dordrecht: Springer Netherlands. p.101-111.

Cooke, J. and Leishman, M. R. (2016). Consistent alleviation of abiotic stress with silicon addition: a meta-analysis. *Functional Ecology*, 30(8), 1340-1357.

Cunha, K. P. V. and Nascimento, C. W. A., (2009). Silicon effects on metal tolerance and structural changes in maize (*Zea mays* L.) grown on a cadmium and zinc enriched soil, *Water Air Soil Pollut.*, vol. 197, p. 323–330.

Çelik, Y. (2016). Kavunda tuz stresi koşullarında silisyum uygulamalarının fide gelişimi ve bazı besin elementi içeriklerine etkileri. Selçuk Üniversitesi. Yüksek Lisans Tezi. 54s.

da Cunha, K. P. V. and do Nascimento, C. W. A. (2009). Silicon effects on metal tolerance and structural changes in maize (*Zea mays* L.) grown on a cadmium and zinc enriched soil. *Water, air, and soil pollution*, 197, 323-330.

Datnoff, L., Brecht, M., Kucharek, T., Trenholm, L., Nagata, R., Synder, G., ... and Cisar, J. (2005). Influence of silicon (Si) on controlling gray leaf spot and more in St. Augustine grass in Florida. *TPI Turf News*, 3(2), 30-32.

Degryse F., Smolders E., Merckx R. (2006). Labile cd complexes increase cd availability to plants, *Environ. Sci. Technol.* 40, 830–836. doi: 10.1021/es050894t.

Demiralay, İ. (1993). Toprak fiziksel analizleri. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, 143, 13-19.

Deshmukh, R. K., Ma, J. F. and Bélanger, R. R. (2017). Role of silicon in plants. *Frontiers in plant science*, 8, 1858.

Ding, T. P., Ma, G. R., Shui, M. X., Wan, D. F. and Li, R. H. (2005). Silicon isotope study on rice plants from the Zhejiang province, China. *Chemical Geology*, 218(1-2), 41-50.

Dresler, S., Wójcik, M., Bednarek, W., Hanaka, A. and Tukiendorf, A. (2015). The effect of silicon on maize growth under cadmium stress. *Russian journal of plant physiology*, 62, 86-92.

Duffus, J. H. (2001). Heavy metals—A meaningless term. *Chemistry International--Newsmagazine for IUPAC*, 23(6), 163-167.

Ennoury, A., Nhhala, N., Kchikich, A., Roussi, Z., Asri, S. E., Zouaoui, Z. and Nhiri, M. (2023). Saltbush extract: A bio-solution for cadmium stress sorghum plants in germination and maturation. *Biometals*, 36(5), 997-1012.

Epstein, E. (1994). The anomaly of silicon in plant biology. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 91(1), 11-17.

Epstein, E. 1999. Silicon, *Annual review of plant biology*, 50(1), 641-664.

FAO. (2020) Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/en/#home>

FAO. (2024) Food and Agriculture Organization of the United Nations. www.fao.com

Feng, J., Yamaji, N. and Mitani-Ueno, N. (2011). Transport of silicon from roots to panicles in plants. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 87(7), 377-385.

Foy, C. D., Chaney, R. T. and White, M. C. (1978). The physiology of metal toxicity in plants. *Annual review of plant physiology*, 29(1), 511-566.

Fu, Y.Q, Shen, H., Wu D.M. and Cai, K. Z. (2012) Silicon-mediated amelioration of Fe²⁺ toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) roots. *Pedosphere* 22(6), 795–802.

Gheshlaghpour, J., Asghari, B., Khademian, R. and Sedaghati, B. (2021). Silicon alleviates cadmium stress in basil (*Ocimum basilicum* L.) through alteration of phytochemical and physiological characteristics. *Industrial Crops and Products*, 163, 113338.

Goussias, C., Boussac, A. and Rutherford, A. W. (2002). Photosystem II and photosynthetic oxidation of water: an overview. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 357(1426), 1369-1381.

Govindaraju, K. (1994). 1994 compilation of working values and sample description for 383 geostandards. *Geostandards newsletter*, 18, 1-158.

Greger, M., Landberg, T. and Vaculík, M. (2018). Silicon influences soil availability and accumulation of mineral nutrients in various plant species. *Plants*, 7(2), 41.

Gu, X., Wen, X., Yi, N., Liu, Y., Wu, J., Li, H. and Liu, G. (2022). Effect of foliar application of silicon, selenium and zinc on heavy metal accumulation in wheat grains in field studies. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 34(1), 246-252.

Guerriero G., Hausman J. and Legay S. (2016). Silicon and the plant extracellular matrix, *Front. Plant Sci.* 7. doi: 10.3389/fpls.2016.00463

Guo, J., Ye, D., Zhang, X., Huang, H., Wang, Y., Zheng, Z., ... and Yu, H. (2022). Characterization of cadmium accumulation in the cell walls of leaves in a low-cadmium rice line and strengthening by foliar silicon application. *Chemosphere*, 287, 132374.

Haiyan, W. and Stuanes, A. O. (2003). Heavy metal pollution in air-water-soil-plant system of Zhuzhou City, Hunan Province, China. *Water, Air, and Soil Pollution*, 147, 79-107.

Haktanır, K. (1987). Çevre kirliliği, AÜ Ziraat Fakültesi Ders Notu.

Hamman, L., Dhuyvetter, K. C. and Boland, M. (2001). Economic issues with grain sorghum. Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service, Kansas State University.

Hayakawa, N., Tomioka, R. and Takenaka, C. (2011). Effects of calcium on cadmium uptake and transport in the tree species *Gamblea innovans*. *Soil science and plant nutrition*, 57(5), 691-695.

He, C., Ma, J. and Wang, L. (2015). A hemicellulose-bound form of silicon with potential to improve the mechanical properties and regeneration of the cell wall of rice. *New Phytologist*, 206(3), 1051-1062.

He, C., Wang, L., Liu, J., Liu, X., Li, X., Ma, J., ... and Xu, F. (2013). Evidence for silicon within the cell walls of suspension-cultured rice cells. *New Phytologist*, 200(3), 700-709.

Helmke, P. A. and Sparks, D. L. (1996). Lithium, sodium, potassium, rubidium, and cesium. *Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods*, 5, 551-574.

Henriet, C., Draye, X., Oppitz, I., Swennen, R. and Delvaux, B. (2006). Effects, distribution and uptake of silicon in banana (*Musa spp.*) under controlled conditions. *Plant and soil*, 287, 359-374.

Hodson, M. J., White, P. J., Mead, A. and Broadley, M. R. (2005). Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. *Annals of botany*, 96(6), 1027-1046.

Horst, W. J. and Marschner, H. (1978). Effect of silicon on manganese tolerance of bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.), *Plant and soil*, 50, 287-303.

Horuz, A. (2018). The effects of silicon on plant development, *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*, 6(2), 151-163.

Horuz, A., Akınoğlu, G., ve Korkmaz, A. (2017). Abiyotik ve Biyotik Stres Şartlarında Silisyumun Rolü, *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Journal of Agricultural Sciences (YYU J Agr Sci)*, 27(4).

IARC, Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. 1993. Beryllium, cadmium, mercury, and exposures in the glass manufacturing industry, International Agency for Research on Cancer.

Jalil, S., Nazir, M. M., Al-Huqail, A. A., Ali, B., Al-Qthanin, R. N., Asad, M. A., ... and Jin, X. (2023). Silicon nanoparticles alleviate cadmium toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) by modulating the nutritional profile and triggering stress-responsive genetic mechanisms. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 268, 115699.

Jang, S. W., Kim, Y., Khan, A. L., Na, C. I., and Lee, I. J. (2018). Exogenous short-term silicon application regulates macro-nutrients, endogenous phytohormones, and protein expression in *Oryza sativa* L. *BMC Plant Biology*, 18, 1-12.

Jawad Hassan, M., Ali Raza, M., Ur Rehman, S., Ansar, M., Gitari, H., Khan, I., ... and Li, Z. (2020). Effect of cadmium toxicity on growth, oxidative damage, antioxidant defense system and cadmium accumulation in two sorghum cultivars. *Plants*, 9(11), 1575.

JMP., (2018). Statistical Discovery from SAS, USA.

Jones, J. B., Wolf, B. and Mills, H. A. (1991). *Plant Analysis Handbook*. Micro–Macro Publishing. Inc., USA, 213p.

Jones, R. L. and Dreher, G. B. (1996). Silicon. *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*, 5, 627-637.

Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace elements in soils and plants*, 4th edn. CRC Press, Boca Raton.

Kabir A. H., Hossain M. M., Khatun M. A., Mandal A. and Haider S. A. (2016). Role of silicon counteracting cadmium toxicity in alfalfa (*Medicago sativa* L.) , Front. Plant Sci. 7, 1117–1129. doi: 10.3389/fpls.2016.01117.

Kahvecioğlu, Ö., Kartal, G., Güven, A., ve Timur, S. (2003). Metallerin çevresel etkileri-I. Metalurji dergisi, 136, 47-53.

Kaufman, P. B., Bigelow, W. C., Petering, L. B. and Drogosz, F. B. (1969). Silica in developing epidermal cells of *Avena* internodes: electron microprobe analysis. Science, 166(3908), 1015-1017.

Kaya, C., Tuna, A. L., Guneri, M. and Ashraf, M. (2011). Mitigation effects of silicon on tomato plants bearing fruit grown at high boron levels. Journal of Plant Nutrition, 34(13), 1985-1994.

Kır, A. E., ve Temel, S. (2017). Sulu koşullarda farklı kinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotiplerinin tohum verimi ile bazı tarımsal özelliklerinin belirlenmesi. Journal of the Institute of Science and Technology, 7(1), 353-361.

Kidambi, S. P., Matches, A. G. and Griggs, T. C. (1989). Variability for Ca, Mg, K, Cu, Zn, and K/(Ca+ Mg) ratio among 3 wheatgrasses and sainfoin on the southern high plains. Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives, 42(4), 316-322.

Kidd, P. S., Llugany, M., Poschenrieder, C. H., Gunse, B. and Barcelo, J. (2001). The role of root exudates in aluminium resistance and silicon-induced amelioration of aluminium toxicity in three varieties of maize (*Zea mays* L.). Journal of experimental botany, 52(359), 1339-1352.

Krauskopf, K. B., (1959). The geochemistry of silica in sedimentary environments. In: Ireland, H.A. (Ed.), Silica in sediments. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Special Publication, p. 4–19 7.

Kreszies T., Schreiber L. and Ranathunge K. (2018). Suberized transport barriers in arabidopsis, barley and rice roots: From the model plant to crop species, J. Plant Physiol. 227, 75–83. doi: 10.1016/j.jplph.2018.02.002

Kubier, A., Wilkin, R. T. and Pichler, T. (2019). Cadmium in soils and groundwater: A review. Applied geochemistry, 108, 104388.

Liang, Y., Wong, J. W. C. and Wei, L. (2005). Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil. Chemosphere, 58(4), 475-483.

Lin, H., Fang, C., Li, Y., Lin, W., He, J., Lin, R. and Lin, W. (2017). Cadmium-stress mitigation through gene expression of rice and silicon addition. *Plant Growth Regulation*, 81, 91-101.

Lindsay, W. L. and Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of American Proceeding*, 42, 421-428. doi:10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x

Liu, H., Zhang, C., Wang, J., Zhou, C., Feng, H., Mahajan, M. D. and Han, X. (2017). Influence and interaction of iron and cadmium on photosynthesis and antioxidative enzymes in two rice cultivars. *Chemosphere*, 171, 240-247.

Liu, J., Ma, J., He, C., Li, X., Zhang, W., Xu, F., ... and Wang, L. (2013). Inhibition of cadmium ion uptake in rice (*Oryza sativa*) cells by a wall-bound form of silicon. *New Phytologist*, 200(3), 691-699.

Liu, L., Li, Y., Tang, J., Hu, L. and Chen, X. (2011). Plant coexistence can enhance phytoextraction of cadmium by tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) in contaminated soil. *Journal of environmental Sciences*, 23(3), 453-460.

Liu, X., Yin, L., Deng, X., Gong, D., Du, S., Wang, S. and Zhang, Z. (2020). Combined application of silicon and nitric oxide jointly alleviated cadmium accumulation and toxicity in maize. *Journal of Hazardous Materials*, 395, 122679.

Lukačová, Z., Avubová, R., Kohanová, J. and Lux A. (2013). Silicon mitigates the Cd toxicity in maize in relation to cadmium translocation, cell distribution, antioxidant enzymes stimulation and enhanced endodermal apoplastic barrier development, *Plant Growth Regul.* 70, 89–103. doi: 10.1007/s10725-012-9781-4.

Lux, A., Lukačová, Z., Vaculík, M., Švubová, R., Kohanová, J., Soukup, M., ... and Bokor, B. (2020). Silicification of root tissues. *Plants*, 9(1), 111.

Luyckx M., Hausman J., Lutts S. and Guerriero G. (2017). Silicon and plants: current knowledge and technological perspectives, *Front. Plant Sci.* 8. doi: 10.3389/fpls.2017.00411.

Ma, C., Ci, K., Zhu, J., Sun, Z., Liu, Z., Li, X., ... and Liu, Z. (2021). Impacts of exogenous mineral silicon on cadmium migration and transformation in the soil-rice system and on soil health. *Science of the Total Environment*, 759, 143501.

Ma, J. and Takahashi, E. (1990). The effect of silicic acid on rice in a P-deficient soil. *Plant and Soil*, 126, 121-125.

Ma, J., Cai, H., He, C., Zhang, W. and Wang, L. (2015). A hemicellulose-bound form of silicon inhibits cadmium ion uptake in rice (*Oryza sativa*) cells. *New Phytologist*, 206(3), 1063-1074.

Ma, Q., Scanlan, C., Bell, R. and Brennan, R. (2013). The dynamics of potassium uptake and use, leaf gas exchange and root growth throughout plant phenological development and its effects on seed yield in wheat (*Triticum aestivum*) on a low-K sandy soil. *Plant and Soil*, 373, 373-384.

Memari-Tabrizi, E. F., Yousefpour-Dokhanieh, A. and Babashpour-Asl, M. (2021). Foliar-applied silicon nanoparticles mitigate cadmium stress through physio-chemical changes to improve growth, antioxidant capacity, and essential oil profile of summer savory (*Satureja hortensis* L.). *Plant physiology and biochemistry*, 165, 71-79.

Meng, X., Zang, G., Li, R., Fan, L., Liu, J. and Wang, Z. (2018). Study of the disparity of noninvasive and invasive blood pressure measured by the Philips Intellivue MP50 monitor in surgeries inducing gall cardiac reflex under general anesthesia. *Blood pressure monitoring*, 23(1), 19-23.

Miao, B. H., Han, X. G. and Zhang, W. H. (2010). The ameliorative effect of silicon on soybean seedlings grown in potassium-deficient medium. *Annals of Botany*, 105(6), 967-973.

Millaleo, R., Reyes-Díaz, M., Ivanov, A. G., Mora, M. L. and Alberdi, M. (2010). Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanisms. *Journal of soil science and plant nutrition*, 10(4), 470-481.

Miller, R. O. (1998). Microwave digestion of plant tissue in a closed vessel. In Y. P. Kalra (Ed.), *Handbook of reference Methods for plant analysis* (2nd ed., p. 69-73). CRC Press Inc. Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9781420049398.ch8>

Miyake, Y. and Takahashi, E. (1978). Silicon deficiency of tomato plant. *Soil Science and Plant Nutrition*, 24(2), 175-189.

Monti, A., Di Virgilio, N. and Venturi, G. (2008). Mineral composition and ash content of six major energy crops. *Biomass and bioenergy*, 32(3), 216-223.

Mut, H., Gülümser, E., Doğrusöz, M. Ç. ve Başaran, U. (2020). Koca fiğ ile İtalyan çimi karışımlarının silaj kalitesinin belirlenmesi. *ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 8(2), 391-396.

Nacu, G., Aioanei, N., Pop, I. M., Simeanu, D., Boișteanu, P. C., Vintilă, V., ... and Avarvarei, B. V. (2020). Research Regarding Crude Chemical Composition and Heavy Metal Content of Some Ecological Forages Utilised in Dairy Cows Nourishment. *Revista de Chimie*, 71 (3), 2020, 405-415

Naeem, A., Saifullah, Ghafoor, A. and Farooq, M. (2015). 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(12), 2467-2472.

Nelson, D. W. and Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon and organic matter. In D. L. Sparks (Ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods*, Madison. doi:10.2136/sssabookser5.3.c34

Nesbitt, M. E. (2023). *Exploring Factors Preventing the Popularization of Sorghum Grain for Human Consumption in the United States*. Texas Tech University, Matthew Nesbitt, Yüksek Lisans Tezi, May 2023.

Ngugi, M. M., Gitari, H. I., Muui, C. W. and Gweyi-Onyango, J. P. (2022). Growth tolerance, concentration, and uptake of heavy metals as ameliorated by silicon application in vegetables. *International Journal of Phytoremediation*, 24(14), 1543-1556.

Nwugo, C. C. and Huerta, A. J. (2008). Effects of silicon nutrition on cadmium uptake, growth and photosynthesis of rice plants exposed to low-level cadmium. *Plant and soil*, 311, 73-86.

Ogo, Y., Kakei, Y., Itai, R. N., Kobayashi, T., Nakanishi, H., Takahashi, H., ... and Nishizawa, N. K. (2014). Spatial transcriptomes of iron-deficient and cadmium-stressed rice. *New Phytologist*, 201(3), 781-794.

Olsen, S. R. and Sommers, E. L. (1982). Phosphorus Soluble in Sodium Bicarbonate. In *Methods of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties* (p. 404- 430).

Owino-Gerroh, C. and Gascho, G. J. (2004). Effect of silicon on low pH soil phosphorus sorption and on uptake and growth of maize. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35.

Page, V. and Feller, U. R. S. (2005). Selective transport of zinc, manganese, nickel, cobalt and cadmium in the root system and transfer to the leaves in young wheat plants. *Annals of botany*, 96(3), 425-434.

Patrícia Vieira da Cunha, K., Williams Araújo do Nascimento, C., and José da Silva, A. (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(6), 849-853.

Pavlovic, J., Kostic, L., Bosnic, P., Kirkby, E. A. and Nikolic, M. (2021). Interactions of silicon with essential and beneficial elements in plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, 697592.

Rahman, S., Ahmad, I. and Nafees, M. (2023). Mitigation of heavy metal stress in maize (*Zea mays* L.) through application of silicon nanoparticles. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 50, 102757.

Rai, R., Agrawal, M. and Agrawal, S. B. (2016). Impact of heavy metals on physiological processes of plants: with special reference to photosynthetic system. In *Plant responses to xenobiotics* (p. 127-140). Springer, Singapore.

Rajabi Dehnavi, A., Zahedi, M., Ludwiczak, A., Cardenas Perez, S. and Piernik, A. (2020). Effect of salinity on seed germination and seedling development of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) genotypes. *Agronomy*, 10(6), 859.

Rasoolizadeh, A., Labbé, C., Sonah, H., Deshmukh, R. K., Belzile, F., Menzies, J. G. and Bélanger, R. R. (2018). Silicon protects soybean plants against *Phytophthora sojae* by interfering with effector-receptor expression. *BMC Plant Biology*, 18, 1-13.

Raven, J. A. (2003). Cycling silicon: the role of accumulation in plants. *New Phytologist*, 419-421.

Redjala T., Sterckeman T., Morel J. L. (2009). Cadmium uptake by roots: Contribution of apoplast and of high- and low-affinity membrane transport systems, *Environ. Exp. Bot.* 67, 235–242. doi: 10.1016/j.envexpbot.2009.05.012

Reimann, C., De Caritat, P. (1998). *Chemical Elements in the Environment*. Springer Science and Business, Media Springer-Verlag, Berlin.

Rengel, Z. (2001). Xylem and phloem transport of micronutrients. *Plant Nutrition: Food security and sustainability of agro-ecosystems through basic and applied research*, 628-629.

Rhoades, J. D. (1996). Salinity: Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids. in: Sparks, D.L., Page, P.A., Helmke, R.H., Loeppert, P.N., Soltanpour, M. A., Tabatabai, C. T., Johnston, M. E. Sumner. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods*. doi:10.2136/sssabookser5.3.c14

Riaz, M., Kamran, M., Fahad, S., Wang, X. (2022). Nano-silicon mediated alleviation of cd toxicity by cell wall adsorption and antioxidant defense system in rice seedlings, *Plant Soil* 2022, 1–15. doi: 10.1007/s11104-022-05588-x

Richmond, K. E. and Sussman, M. (2003). Got silicon? The non-essential beneficial plant nutrient. *Current opinion in plant biology*, 6(3), 268-272.

Rizwan, M., Ali, S., Adrees, M., Rizvi, H., Zia-ur-Rehman, M., Hannan, F., ... and Ok, Y. S. (2016). Cadmium stress in rice: toxic effects, tolerance mechanisms, and management: a critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 17859-17879.

Rodrigues, F. A., Vale, F. X. R., Korndörfer, G. H., Prabhu, A. S., Datnoff, L. E., Oliveira, A. M. A. and Zambolim, L. (2003). Influence of silicon on sheath blight of rice in Brazil. *Crop Protection*, 22(1), 23-29.

Rodriguez-Hernandez, M. C., Bonifas, I., Alfaro-De la Torre, M. C., Flores-Flores, J. L., Bañuelos-Hernández, B., and Patiño-Rodríguez, O. (2015). Increased accumulation of cadmium and lead under Ca and Fe deficiency in *Typha latifolia*: A study of two pore channel (TPC1) gene responses. *Environmental and Experimental Botany*, 115, 38-48.

Roussi, Z., Ben Mrid, R., Ennoury, A., Nhhala, N., Zouaoui, Z., El Omari, R. and Nhiri, M. (2022). Insight into *Cistus salviifolius* extract for potential biostimulant effects in modulating cadmium-induced stress in sorghum plant. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 28(6), 1323-1334.

Roy, A. K. (1996). Innovative methods to manage sheath blight of rice, *J. Mycopathol. Res.* 34:13–19.

Roy, S. K., Cho, S. W., Kwon, S. J., Kamal, A. H. M., Kim, S. W., Oh, M. W., ... and Woo, S. H. (2016). Morpho-physiological and proteome level responses to cadmium stress in sorghum. *PLoS One*, 11(2), e0150431.

Römheld, V. and Marschner, H. (1981). Iron deficiency stress induced morphological and physiological changes in root tips of sunflower. *Physiologia Plantarum*, 53(3), 354-360.

Rush, M. C., Lee F. N. (1992). Sheath blight. In: *Compendium of Rice Diseases*, eds. R.K. Webster, P.S. Gunnell, 22–23, Am. Can. Phytopath. Soc., St Paul, MN.

Savant, N. K., Korndörfer, G. H., Datnoff, L. E. and Snyder, G. H. (1999). Silicon nutrition and sugarcane production: a review. *Journal of plant nutrition*, 22(12), 1853-1903.

Sayar, M. S., Başbağ, M., ve Çaçan, E. (2018). Bazı buğdaygil bitki türlerinin yem kalite değerlerinin belirlenmesi ve biplot analiz yöntemi ile özelliklerarası ilişkilerin değerlendirilmesi. *Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 27(2), 92-101.

Seebold, K. W., Kucharek, T. A., Datnoff, L. A., Correa-Victoria, F. J. and Marchetti, M. A. (2001). The influence of silicon on components of resistance to blast in susceptible, partially resistant, and resistant cultivars of rice. *Phytopathology*, 91(1), 63-69.

Shafiei Darabi, S. S., Almodares, A. and Ebrahimi, M. (2016). Phytoremediation efficiency of *Sorghum bicolor* (L.) moench in removing cadmium, lead and arsenic. *Open Journal of Environmental Biology*, 1(1), 001-006.

Shahzad, M., Bibi, A., Khan, A., Shahzad, A., Xu, Z., Maruza, T. M. and Zhang, G. (2025). Utilization of Antagonistic Interactions Between Micronutrients and Cadmium (Cd) to Alleviate Cd Toxicity and Accumulation in Crops. *Plants*, 14(5), 707.

Sharma, S. S., Kaul, S., Metwally, A., Goyal, K. C., Finkemeier, I. and Dietz, K. J. (2004). Cadmium toxicity to barley (*Hordeum vulgare*) as affected by varying Fe nutritional status. *Plant science*, 166(5), 1287-1295.

Shi X., Zhang C., Wang H., Zhang F. (2005). Effect of Si on the distribution of cd in rice seedlings. *Plant Soil*. 272, 53–60. doi: 10.1007/s11104-004-3920-2.

Simmons, R. W., Pongsakul, P., Chaney, R. L., Saiyasitpanich, D., Klinphoklap, S. and Nobuntou, W. (2003). The relative exclusion of zinc and iron from rice grain in relation to

rice grain cadmium as compared to soybean: Implications for human health. *Plant and Soil*, 257, 163-170.

Singh, A., Parihar, S. and Shekhawat, G. S. (2024). Cd-induced cytotoxicity and its HO-1 and ROS quenching enzyme-mediated regulation in 2–3 leaf stage seedlings of *Sorghum bicolor*: An important millet crop of the arid and semi-arid regions. *Journal of Trace Elements and Minerals*, 9, 100165.

Singh, M. P., Erickson, J. E., Sollenberger, L. E., Woodard, K. R., Vendramini, J. M. B. and Fedenko, J. R. (2012). Mineral composition and biomass partitioning of sweet sorghum grown for bioenergy in the southeastern USA. *Biomass and bioenergy*, 47, 1-8.

Singh, S., Singh, V. P., Prasad, S. M., Sharma, S., Ramawat, N., Dubey, N. K., ... and Chauhan, D. K. (2019). Interactive effect of silicon (Si) and salicylic acid (SA) in maize seedlings and their mechanisms of cadmium (Cd) toxicity alleviation. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38, 1587-1597.

Smilde, K. W., Van Luit, B. and Van Driel, W. (1992). The extraction by soil and absorption by plants of applied zinc and cadmium. *Plant and soil*, 143, 233-238.

Snyder, G. H. (2001). Methods for silicon analysis in plants, soils, and fertilizers. In *Studies in plant science* (Vol. 8, p. 185-196). Elsevier.

Solti, Á., Sárvári, É., Tóth, B., Basa, B., Lévai, L. and Fodor, F. (2011). Cd affects the translocation of some metals either Fe-like or Ca-like way in poplar. *Plant Physiology and Biochemistry*, 49(5), 494-498.

Song Y., Jin L., Wang X. (2017). Cadmium absorption and transportation pathways in plants, *Int. J. Phytorem.* 19, 133–141. doi: 10.1080/15226514.2016.1207598

Song, A., Li, P., Li, Z., Fan, F., Nikolic, M. and Liang, Y. (2011). The alleviation of zinc toxicity by silicon is related to zinc transport and antioxidative reactions in rice. *Plant and Soil*, 344, 319-333.

Song, A., Li, Z., Wang, E., Xu, D., Wang, S., Bi, J., ... and Fan, F. (2021). Supplying silicon alters microbial community and reduces soil cadmium bioavailability to promote health wheat growth and yield. *Science of the Total Environment*, 796, 148797.

Sönmez, O, Kılıç, F. N (2021). Toprakta Ağır Metal Kirliliği ve Giderim Yöntemleri *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research (TURKAGER)*, 2(2): 493-507.

Sreenivasan, A. (1934). The Role of silicon in plant nutrition. *Current Science*, 3(5), 193-197.

Stiles, W. (2006). *Principles of plant physiology*. Discovery Publishing House. ISBN:81-7141-247-5, New Delhi.

Sun, Y., Li, X., Najeeb, U., Hou, Z., Buttar, N. A., Yang, Z., ... and Xu, L. (2022). Soil applied silicon and manganese combined with foliar application of 5-aminolevulinic acid mediate photosynthetic recovery in Cd-stressed *Salvia miltiorrhiza* by regulating Cd-transporter genes. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1011872.

Takeda, A., Kimura, K. and Yamasaki, S. I. (2004). Analysis of 57 elements in Japanese soils, with special reference to soil group and agricultural use. *Geoderma*, 119(3-4), 291-307.

Tao, Q., Jupa, R., Liu, Y., Luo, J., Li, J., Kováč, J., ... and Li, T. (2019). Absciscic acid-mediated modifications of radial apoplastic transport pathway play a key role in cadmium uptake in hyperaccumulator *Sedum alfredii*. *Plant, cell and environment*, 42(5), 1425-1440.

Tejada, R., McDowell, L. R., Martin, F. G. and Conrad, J. H. (1985). Mineral element analyses of various tropical forages in Guatemala and their relationship to soil concentrations.

TÜİK (2024), Türkiye İstatistik Kurumu, erişim linki: <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=92&locale=tr>

Vaculík, M., Landberg, T., Greger, M., Luxová, M., Stoláriková, M. and Lux, A. (2012). Silicon modifies root anatomy, and uptake and subcellular distribution of cadmium in young maize plants. *Annals of Botany*, 110(2), 433-443.

Vert, G., Grotz, N., Dédaldéchamp, F., Gaymard, F., Guerinot, M. L., Briat, J. F. and Curie, C. (2002). IRT1, an Arabidopsis transporter essential for iron uptake from the soil and for plant growth. *The Plant Cell*, 14(6), 1223-1233.

Veselov, D., Kudoyarova, G., Symonyan, M. and Veselov, S. T. (2003). Effect of cadmium on ion uptake, transpiration and cytokinin content in wheat seedlings. *Bulg J Plant Physiol*, 29(3-4), 353-359.

Vietor, D. M., Rhodes, G. A. and Rooney, W. L. (2010). Relationship of phenotypic variation in sorghum to nutritive value of crop residues. *Field Crops Research*, 118(3), 243-250.

Vlams, J. and Williams, D. E. (1967). Manganese and silicon interaction in the gramineae. *Plant and Soil*, 131-140.

Wahyono, T., Indiratama, W. M. and Human, S. (2021, June). White Midrib (WMR) vs Brown Midrib (BMR) sorghum: perspective of nutrient value for ruminant forage. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 788, No. 1, p. 012164). IOP Publishing.

Wallace, A. 1971 . Regulation of the Micronutrient Status of Plants by Chelating Agents and Other Factors Edited by: Wallace , A. Los Angeles, CA

Wan, Y., Huang, Q., Camara, A. Y., Wang, Q. and Li, H. (2019). Water management impacts on the solubility of Cd, Pb, As, and Cr and their uptake by rice in two contaminated paddy soils. *Chemosphere*, 228, 360-369.

Wang, H., Yu, J., Zhu, B., Gu, L., Wang, H., Du, X., ... and Tang, H. (2023). The sbbhlh041–sbexpa11 module enhances cadmium accumulation and rescues biomass by increasing photosynthetic efficiency in sorghum. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(17), 13061.

Wang, L., Wang, Y., Chen, Q., Cao, W., Li, M. and Zhang, F. (2000). Silicon induced cadmium tolerance of rice seedlings. *Journal of plant nutrition*, 23(10), 1397-1406.

Wang, S., Huang, D. Y., Zhu, Q. H., Li, B. Z., Xu, C., Zhu, H. H. and Zhang, Q. (2021). Agronomic traits and ionomics influence on Cd accumulation in various sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) genotypes. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 214, 112019.

Wei, X., Liu, Y., Zhan, Q., Zhang, P., Zhao, D., Xu, B., ... and Matichenkov, V. (2018). Effect of Si soil amendments on As, Cd, and Pb bioavailability in contaminated paddy soils. *Paddy and Water Environment*, 16, 173-181.

WHO/FAO (2007). Joint FAO/WHO Food Standard Programme Codex Alimentarius Commission 13th Session. Report of the Thirty-Eight Session of the Codex Committee on Food Hygiene, Houston, United States of America (07/30/13).

Wu, J., Mock, H. P., Giehl, R. F., Pitann, B. and Mühling, K. H. (2019). Silicon decreases cadmium concentrations by modulating root endodermal suberin development in wheat plants. *Journal of Hazardous Materials*, 364, 581-590.

Xu, S. S., Lin, S. Z. and Lai, Z. X. (2015). Cadmium impairs iron homeostasis in *Arabidopsis thaliana* by increasing the polysaccharide contents and the iron-binding capacity of root cell walls. *Plant and Soil*, 392, 71-85.

Yamaguchi, N., Ishikawa, S., Abe, T., Baba, K., Arao, T. and Terada, Y. (2012). Role of the node in controlling traffic of cadmium, zinc, and manganese in rice. *Journal of Experimental Botany*, 63(7), 2729-2737.

Yamamoto, T., Nakamura, A., Iwai, H., Ishii, T., Ma, J. F., Yokoyama, R., ... and Furukawa, J. (2012). Effect of silicon deficiency on secondary cell wall synthesis in rice leaf. *Journal of plant research*, 125, 771-779.

Ye J., Yan C., Liu J., Lu H., Liu T., Song Z. (2012). Effects of silicon on the distribution of cadmium compartmentation in root tips of *kandelia obovata* (p., l.) yong, *Environ. pollut.* 162, 369–373. doi: 10.1016/j.envpol.2011.12.002

Yi, L. P. and Wang, Z. W. (2017). Effects of different types of halophytes on the concentration of cadmium in coastal saline soil. *Acta Ecologica Sinica*, 37(14), 4656-4662.

Yingang, L. U., Jun, M. A., Ying, T. E. N. G., Junyu, H. E., Christie, P., Lingjia, Z. H. U., ... and Shiping, D. E. N. G. (2018). Effect of silicon on growth, physiology, and cadmium translocation of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) in cadmium-contaminated soil. *Pedosphere*, 28(4), 680-689.

Yoshihara, T., Hodoshima, H., Miyano, Y., Shoji, K., Shimada, H. and Goto, F. (2006). Cadmium inducible Fe deficiency responses observed from macro and molecular views in tobacco plants. *Plant Cell Reports*, 25, 365-373.

Zembala, M., Filek, M., Walas, S., Mrowiec, H., Kornaś, A., Miszalski, Z. and Hartikainen, H. (2010). Effect of selenium on macro-and microelement distribution and physiological parameters of rape and wheat seedlings exposed to cadmium stress. *Plant and Soil*, 329, 457-468.

Zhang, G., Fukami, M. and Sekimoto, H. (2002). Difference between two wheat cultivars in Cd and mineral nutrient uptake under different Cd levels. *Ying yong sheng tai xue bao= The journal of applied ecology*, 13(4), 454-458.

Zhang, Q., Yan, C., Liu, J., Lu, H., Duan, H., Du, J. and Wang, W. (2014). Silicon alleviation of cadmium toxicity in mangrove (*Avicennia marina*) in relation to cadmium compartmentation. *Journal of Plant Growth Regulation*, 33, 233-242.

Zhu, T., Li, L., Duan, Q., Liu, X. and Chen, M. (2021). Progress in our understanding of plant responses to the stress of heavy metal cadmium. *Plant Signaling and Behavior*, 16(1), 1836884.