

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
TOHUM BİLİMİ VE TEKNOLOJİSİ ANABİLİM DALI



BİOCHAR VE KADMİYUM UYGULAMALARININ
BUĞDAYIN (*Triticum aestivum*) GELİŞİMİNE VE BESİN
ELEMENTİ İÇERİĞİNE ETKİSİNİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DHAY ALİ GHALEB AL-NASERİ

TEZ DANIŞMANI

Doç. Dr. Ferit SÖNMEZ

BOLU, TEMMUZ - 2024

KABUL VE ONAY SAYFASI

Dhay Ali Ghaleb AL-NASERİ tarafından hazırlanan “**BİOCHAR VE KADMİYUM UYGULAMALARININ BUĞDAYIN (*Triticum aestivum*) GELİŞİMİNE VE BESİN ELEMENTİ İÇERİĞİNE ETKİSİNİN BELİRLENMESİ**” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Tohum Bilimi ve Teknolojisi Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliği kabul edilmiştir. 11/07/2024

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Doç. Dr. Ferit SÖNMEZ
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Doç. Dr. Fatih ÇIĞ
Siirt Üniversitesi

.....

Üye
Doç. Dr. Abdurrahim YILMAZ
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. İbrahim KÜRTÜL

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir,

aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Teze ilişkin Turnitin adlı programında enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı %30'u geçmemektedir.

.....

DHAY ALİ GHALEB AL-NASERİ

ÖZET

BİOCHAR VE KADMIYUM UYGULAMALARININ BUĞDAYIN (*Triticum aestivum*) GELİŞİMİNE VE BESİN ELEMENTİ İÇERİĞİNE ETKİSİNİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DHAY ALİ GHALEB AL-NASERİ

BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

TOHUM BİLİMİ VE TEKNOLOJİSİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. FERİT SÖNMEZ)

BOLU, TEMMUZ - 2024

XIII + 57

Bu araştırma, biochar ve kadmiyum uygulamalarının buğdayın gelişimi ve besin elementi kompozisyonuna etkilerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışma, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Bahçe Bitkileri Bölümü'ne ait iklim odasında, tesadüf parsellerinde faktöriyel deneme desenine göre ve üç tekerrürlü olarak yürütülmüştür. Denemede biochar %0, %2 ve %4 dozlarında, kadmiyum ise 0, 75 ve 150 mg Cd kg⁻¹ dozlarında uygulanmıştır.

Biochar uygulaması, toprağın pH ve elektriksel iletkenliğini (EC) artırmış, kök uzunluğu, bitki yaş ve kuru ağırlıkları, kök yaş ağırlığı, kardeş sayısı, potasyum (K), magnezyum (Mg), mangan (Mn), çinko (Zn), bakır (Cu), kadmiyum (Cd) ve nikel (Ni) değerlerinde artış sağlamıştır. Ancak, bitki boyu, kök kuru ağırlığı, fosfor (P), kalsiyum (Ca), demir (Fe) ve kurşun (Pb) değerlerinde azalma gözlenmiştir. Kadmiyum uygulamaları ise kök uzunluğu, Fe, Mn, Zn, Cu, Cd ve Ni değerlerini artırırken, pH, EC, bitki boyu, bitki yaş ve kuru ağırlıkları, kök yaş ve kuru ağırlıkları, kardeş sayısı, P, K, Ca, Mn ve Pb değerlerini azaltmıştır.

Biochar ve kadmiyumun interaksyonunda, kadmiyum kök uzunluğu, P, K, Fe, Mn, Zn, Cd ve Ni değerlerini artırıcı yönde etkilerken, diğer gelişim kriterleri ve element içeriklerini azaltıcı yönde etkilemiştir. Biochar uygulaması ise pH, EC, kök uzunluğu, bitki yaş ağırlığı, P, K, Mg, Mn, Zn, Cu ve Ni değerlerinde artış sağlarken, diğer kriterler ve element içeriklerinde azalma meydana getirmiştir.

Sonuç olarak, biochar uygulamalarının buğday bitkisinin gelişim kriterleri ve besin elementi içerikleri üzerinde olumlu etkileri olduğu, kadmiyumun ise gelişim kriterlerinde düşüslere ve bazı besin elementleri ile ağır metal içeriklerinde artışa neden olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, sürdürülebilir tarım uygulamaları ve çevresel kirlilik yönetimi açısından önemli bilgiler sunmaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: Biochar, Kadmiyum, Buğday, Besin Elementi, Toprak, Ağır Metal

ABSTRACT

DETERMINATION OF THE EFFECTS OF BIOCHAR AND CADMIUM APPLICATIONS ON THE DEVELOPMENT AND NUTRIENT CONTENT OF WHEAT (*Triticum aestivum*)

MSC THESIS

DHAY ALI GHALEB AL-NASERI

BOLU ABANT İZZET BAYSAL UNIVERSITY

INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

DEPARTMENT OF SEED SCIENCE AND TECHNOLOGY

(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. FERİT SÖNMEZ)

BOLU, JUNE 2024

XIII + 57

This study was conducted to determine the effects of biochar and cadmium applications on the growth and nutrient composition of wheat. The experiment was carried out in the climate chamber of the Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, at Bolu Abant İzzet Baysal University, using a factorial design with three replications in randomized plots. Biochar was applied at doses of 0%, 2%, and 4%, while cadmium was applied at doses of 0, 75, and 150 mg Cd kg⁻¹.

Biochar application increased soil pH and electrical conductivity (EC), root length, fresh and dry weights of the plant, root fresh weight, tiller number, and concentrations of potassium (K), magnesium (Mg), manganese (Mn), zinc (Zn), copper (Cu), cadmium (Cd), and nickel (Ni). However, it caused a decrease in plant height, root dry weight, phosphorus (P), calcium (Ca), iron (Fe), and lead (Pb) concentrations. Cadmium applications increased root length and concentrations of Fe, Mn, Zn, Cu, Cd, and Ni, while reducing pH, EC, plant height, fresh and dry weights of the plant, root fresh and dry weights, tiller number, and concentrations of P, K, Ca, Mn, and Pb.

In the interaction between biochar and cadmium, cadmium had a positive effect on root length and concentrations of P, K, Fe, Mn, Zn, Cd, and Ni, while negatively affecting other growth criteria and element contents. Biochar application, on the other hand, increased pH, EC, root length, plant fresh weight, and concentrations of P, K, Mg, Mn, Zn, Cu, and Ni, while causing a decrease in other criteria and element contents.

In conclusion, biochar applications generally had positive effects on the growth criteria and nutrient content of wheat plants, while cadmium led to decreases in growth criteria and increases in some nutrient and heavy metal contents. The results provide important insights for sustainable agriculture practices and environmental pollution management.

KEYWORDS: Biochar, Cadmium, Wheat, Nutrients, Soil, Heavy Metal

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL VE ONAY SAYFASI	iii
ETİK BEYAN	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	ix
FOTOĞRAF LİSTESİ	xi
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	xii
TEŞEKKÜR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETLERİ	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM	11
3.1 Materyal	11
3.2 Yöntem	11
3.2.1 Bünye.....	3
3.2.2 Eriyebilir Toplam Tuz	3
3.2.3 pH	3
3.2.4 Kireç	4
3.2.5 Fosfor.....	4
3.2.6 Ekstrakte Edilebilir K, Ca, Mg	4
3.2.7 Yarayışlı Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Cd ve Pb Analizleri	4
3.2.8 İstatistiksel Analiz	14
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	15
4.1 Uygulamaların Bitki Gelişim Kriterlerine Etkisi.....	15
4.2 Uygulamaların Bitkinin Makro Element İçeriğine Etkisi.....	24
4.3 Uygulamaların Bitkinin Mikro Element İçeriğine Etkisi	30
4.4 Uygulamaların Bitkinin Ağır Metal İçeriğine Etkisi	36
4.5 Uygulamaların Yetiştirme Ortamının pH ve EC Değerine Etkileri.....	42
4.6 Korelasyon Analiz Sonucu	45
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	48
6. KAYNAKLAR	49

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.1.1. CdxB interaksiyonunun bitki yaş ağırlığına etkisi.....	18
Şekil 4.1.2. CdxB interaksiyonunun kök yaş ağırlığına etkisi.....	21
Şekil 4.1.3. CdxB interaksiyonunun kök kuru ağırlığına etkisi.....	22
Şekil 4.2.1. CdxB interaksiyonunun fosfor içeriğine etkisi.....	23
Şekil 4.2.2. CdxB interaksiyonunun kalsiyum içeriğine etkisi	28
Şekil 4.2.3. CdxB interaksiyonunun magnezyum içeriğine etkisi.....	30
Şekil 4.3.1. CdxB interaksiyonunun demir içeriğine etkisi.....	31
Şekil 4.3.2. CdxB interaksiyonunun mangan içeriğine etkisi.....	33
Şekil 4.3.3. CdxB interaksiyonunun çinko içeriğine etkisi.....	34
Şekil 4.3.4. CdxB interaksiyonunun bakır içeriğine etkisi.....	36
Şekil 4.4.1. CdxB interaksiyonunun kadmiyum içeriğine etkisi.....	38
Şekil 4.4.2. CdxB interaksiyonunun nikel içeriğine etkisi.....	39
Şekil 4.4.3. CdxB interaksiyonunun kurşun içeriğine etkisi.....	41
Şekil 4.5.1. CdxB interaksiyonunun pH üzerine etkisi.....	43
Şekil 4.5.2. CdxB interaksiyonunun EC üzerine etkisi.....	44

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1.1. Deneme kullanılan toprak ve biochar ait bazı analiz sonuçları.....	11
Tablo 4.1.1. Uygulamaların bitki boyuna etkisine ait varyans analiz tablosu.....	15
Tablo 4.1.2. Uygulamaların bitki boyuna etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, cm.....	15
Tablo 4.1.3. Uygulamaların kök uzunluğuna etkisine ait varyans analiz tablosu.....	16
Tablo 4.1.4. Uygulamaların kök uzunluğuna etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, cm.....	17
Tablo 4.1.5. Uygulamaların bitki yaş ağırlığına etkisine ait varyans analiz tablosu.....	17
Tablo 4.1.6. Uygulamaların bitki yaş ağırlığına etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, g.....	18
Tablo 4.1.7. Uygulamaların bitki kuru ağırlığına etkisine ait varyans analiz tablosu.....	19
Tablo 4.1.8. Uygulamaların bitki kuru ağırlığına etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, g.....	19
Tablo 4.1.9. Uygulamaların kök yaş ağırlığına etkisine ait varyans analiz tablosu.....	20
Tablo 4.1.10. Uygulamaların kök yaş ağırlığına etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, g.....	21
Tablo 4.1.11. Uygulamaların kök kuru ağırlığına etkisine ait varyans analiz tablosu.....	21
Tablo 4.1.12. Uygulamaların kök kuru ağırlığına etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, g.....	22
Tablo 4.1.13. Uygulamaların kardeş sayısına etkisine ait varyans analiz tablosu.....	23
Tablo 4.1.14. Uygulamaların kardeş sayısına etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, adet.....	23
Tablo 4.2.1. Uygulamaların bitki fosfor içeriğine etkisine ait varyans analiz tablosu.....	24
Tablo 4.2.2. Uygulamaların bitki fosfor içeriğine etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, mg kg ⁻¹	25
Tablo 4.2.3. Uygulamaların bitki potasyum içeriğine etkisine ait varyans analiz tablosu.....	26
Tablo 4.2.4. Uygulamaların bitki potasyum içeriğine etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, %.....	26

Tablo 4.2.5.	Uygulamaların bitki kalsiyum içeriğine etkisine ait varyans analiz tablosu.....	27
Tablo 4.2.6.	Uygulamaların bitki kalsiyum içeriğine etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, %.....	27
Tablo 4.2.7.	Uygulamaların bitki magnezyum içeriğine etkisine ait varyans analiz tablosu	29
Tablo 4.2.8	Uygulamaların bitki magnezyum içeriğine etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, %.....	29
Tablo 4.3.1.	Uygulamaların bitki demir içeriğine etkisine ait varyans analiz tablosu.....	30
Tablo 4.3.2	Uygulamaların bitki demir içeriğine etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, mg kg ⁻¹	31
Tablo 4.3.3.	Uygulamaların bitki mangan içeriğine etkisine ait varyans analiz tablosu.....	32
Tablo 4.3.4	Uygulamaların bitki mangan içeriğine etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, mg kg ⁻¹	32
Tablo 4.3.5.	Uygulamaların bitki çinko içeriğine etkisine ait varyans analiz tablosu.....	33
Tablo 4.3.6.	Uygulamaların bitki çinko içeriğine etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, mg kg ⁻¹	33
Tablo 4.3.7.	Uygulamaların bitki bakır içeriğine etkisine ait varyans analiz tablosu.....	35
Tablo 4.3.8.	Uygulamaların bitki bakır içeriğine etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, mg kg ⁻¹	35
Tablo 4.4.1.	Uygulamaların bitki kadmiyum içeriğine etkisine ait varyans analiz tablosu.....	37
Tablo 4.4.2.	Uygulamaların bitki kadmiyum içeriğine etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, mg kg ⁻¹	37
Tablo 4.4.3.	Uygulamaların bitki nikel içeriğine etkisine ait varyans analiz tablosu	38
Tablo 4.4.4.	Uygulamaların bitki nikel içeriğine etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, mg kg ⁻¹	39
Tablo 4.4.5.	Uygulamaların bitki kurşun içeriğine etkisine ait varyans analiz tablosu.....	40
Tablo 4.4.6.	Uygulamaların bitki kurşun içeriğine etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, mg kg ⁻¹	40
Tablo 4.5.1.	Uygulamaların yetiştirme ortamının pH içeriğine etkisine ait varyans analiz tablosu.....	42
Tablo 4.5.2.	Uygulamaların yetiştirme ortamının pH içeriğine etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu.....	42
Tablo 4.5.3.	Uygulamaların yetiştirme ortamının EC değerine etkisine ait varyans analiz tablosu.....	43
Tablo 4.5.4.	Uygulamaların yetiştirme ortamının EC'sine etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, µs cm ⁻¹	44
Tablo 4.6.1.	Korelasyon tablosu.....	47

FOTOĞRAF LİSTESİ

Sayfa

Fotoğraf 3.1.1. Deneme kurulumu ve sonrasına ait iklim odası görüntüleri.....	12
Fotoğraf 3.1.2. Hasat zamanı uygulamaların bitki ve kök gelişimi üzerine etkilerine ait görüntüler.....	13



KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

%	: Yüzde
*	: İstatistiki olarak önemlidir.
°C	: Santigrat Derece
B	: Biochar
Ca	: Kalsiyum
CaCO₃	: Kalsiyum Karbonat
cc	: Santimetre küp
cm	: Santimetre
da	: Dekar
EC	: Elektriksel Kondüktivite
Fe	: Demir
g	: Gram
H₂O	: Su
ha	: Hektar
KDK	: Katyon Değişim Kapasitesi
kg	: Kilogram
KO	: Kareler Ortalaması
LSD	: Least Significance Difference
m	: Metre
mg	: Miligram
ml	: Mililitre
NaCl	: Sodyum Klorür
NH₄	: Amonyum
O.M.	: Organik Madde
öd	: İstatistiki olarak önemli değil.
P	: Fosfor
SD	: Serbestlik Derecesi
VK	: Varyasyon Katsayısı

TEŞEKKÜR

Öncelikle ve son olarak **Allah'a** Őükürler olsun diyerek başlamak istiyorum.

Yüksek lisans tezimin konusunu seçmemde, tezimin yürütülmesinde bana yardımcı olan ve her konuda yanımda olan hocam Sayın Dr. **Ferit SÖNMEZ**'e çok teşekkür ederim. Araştırmanın çalışma aşamaları süresince, zayıf dilime karşı gösterdiği sabır ve bana her zaman gösterdiği nazik muamele için çok teşekkür ederim.

Onların sayesinde Őu an bulunduğum noktaya gelmemde büyük emekleri olan **Anneme** ve **Babama** çok teşekkür ederim ve onların desteğı beni mümkün olan en iyi duruma getirdi. Allah sizi korusun.

Aileme, kardeşlerime **Secad'a**, **Muhammed'e**, **Ğalib'e**, **Hasenein'e** arkadaşım **Duőe'ye** ve araştırma yolculuğum boyunca bana yardımcı olan herkese teşekkür ederim.

İlk vatanım ve diğeryarıma **İslam'a** teşekkür etmek istiyorum, sizi çok seviyorum.

1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmenin önlenemez yükselişi ile çevre kirliliği de hızla artmaktadır. Bu kirlilik bağlamında özellikle ağır metal kirliliği öne çıkmaktadır. Nitekim, Dünder ve ark. (2012) yaptıkları araştırmada deri, tekstil, otomotiv yan ve metal kaplama endüstrilerinin atık sularında Cu, Zn, Cr, Pb ve Ni düzeylerini incelemişlerdir. Sonuç olarak deri sanayisi atıklarında kromun, kaplama sanayisi atıklarında krom ve kurşunun, otomotiv sanayisi atıklarında ise krom ve nikelin limit değerlerin üzerinde olduğunu bildirmişlerdir.

Konutlardan, sanayi-endüstri kuruluşlarından, enerji santrallerinden, tarım ve hayvancılık uygulamalarından kaynaklanan ve içinde toprak, bitki, hayvan ve insan sağlığı için zararlı biyolojik ve kimyasal maddeler bulunan atıkların kontrollü olarak kullanımı veya geri dönüştürülmesi gerekmektedir.

Özellikle organik atıkların bertarafında kompostlaştırma, biyometanizasyon, termal sistemler (yakma, piroliz ve gazifikasyon) ve düzenli depolama yöntemlerinden biri veya birkaçı uygulanmaktadır (Anonim, 2024).

Termal sistemler, son yıllarda elektrik enerjisine duyulan ihtiyacın artmasıyla ön plana çıkmıştır. Bu sistemlerde biyokütlelerden faydalanılmaktadır. Biyokütle, insan ömrü veya yüz yıllık bir süreçten daha kısa sürede kendini yenileyebilen, hidrokarbon içerikli, karada ve suda yetişen bitkiler, hayvan atıkları, gıda endüstrisi ve orman yan ürünleri ile kentsel atıkları içeren tüm organik maddeler olarak tanımlanmıştır (Avcı, 2016).

İnsan beslenmesinde önemli bir protein kaynağı olan beyaz et üretimi, yani kümes hayvanı yetiştiriciliği, beraberinde önemli bir problemi de getirmektedir. Kümeslerden açığa çıkan altlık atıkları çevresel problemlere neden olmaktadır. Bu bağlamda ya tavuk gübresine dönüştürülmekte ya çevreye gelişigüzel atılmakta ya da son dönemlerde elektrik enerjisi elde etmek için yakma veya gazlaştırma yöntemleri ile değerlendirilmektedir.

Gazlaştırma yöntemi ile bertaraf edilen kümes altlıkları bu işlem sonucunda Biochar'a dönüşmekte ve bu ürünün tarımsal üretim yapılan topraklarda kullanımı ile ilgili yaygın araştırmalar yapılmaktadır. Biochar, fonksiyonel gruplarca zengin karbonize materyal olup çok farklı uygulama alanlarına sahip değerli bir materyaldir (Akgül, 2017).

Biochar'ın uygulama alanlarından biri de toprak düzenleyici olarak kullanılmasıdır (Lehmann ve ark., 2011). Biochar, toprağın özelliklerinde iyileşme sağlayan farklı bir kompost veya hayvan gübresi benzeri materyal olmasının yanında, toprağın kalitesinin artırılması adına diğer organik katkı maddelerinden daha etkilidir (Günel ve Erdem, 2021). Bunun nedenleri arasında büyük yüzey alanı, yüksek yük yoğunluğu (Liang ve ark., 2006), yüksek besin elementi tutma kapasitesi (Lehman ve ark., 2003), spesifik kimyasal ve kolloidal yapısı (Baldock ve Smernik, 2002; Lehman ve ark., 2005) ve mikrobiyal parçalanmaya karşı direnci (Cheng ve ark., 2008) gibi fiziksel ve kimyasal özellikler bulunmaktadır. Biochar uygulamalarının toprağın kimyasal özelliklerini (pH, EC, organik karbon, alınabilir fosfor ve potasyum) iyileştirmesinin yanı sıra, biochar tipine ve dönemine bağlı olarak topraktaki mikrobiyal aktiviteleri de etkilediği Abdul-Aziz (2020) tarafından yapılan çalışma ile belirlenmiştir.

Çevre kirliliğinde ön plana çıkan ağır metallerden biri de kadmiyumdur. Kadmiyum, diğer metallerden daha fazla suda çözünebilirliğe ve hareketliliğe sahip olduğu için bitkiler tarafından daha kolay alınabilmektedir. Bu nedenle toprakta birikimi en tehlikeli ağır metal olarak kabul edilmektedir. Kadmiyum, bitki bünyesinde azot ve karbonhidrat metabolizmalarını değiştirmesi nedeniyle birçok fizyolojik değişikliğe neden olmaktadır. Proteinlerin -SH gruplarındaki enzimleri inaktive etmekte, stomaların kapanmasına, transpirasyon ile su kaybının azalmasına ve klorofil biyosentezinin bozulmasına neden olmaktadır (Sheoran ve ark., 1990). Asri ve ark. (2007)'nin bildirdiğine göre, kadmiyum ekosistemde en tehlikeli ağır metal kirleticilerinden biri olup canlı organizmalar için toksiktir. Fosforlu gübre ve arıtma çamurlarının uzun süreli kullanılması nedeniyle dünyanın birçok bölgesindeki tarım toprakları az veya orta düzeyde kadmiyum birikimine maruz kalmaktadır. Kadmiyum, toprak-bitki sistemindeki yüksek mobilitesi nedeniyle kolaylıkla besin zincirine dâhil olabilmekte, böylece bitki, hayvan ve insan sağlığı açısından tehlikeli hale gelebilmektedir.

Bitkiler tarafından alınan ve bitki bünyesinde biriktirilen kadmiyum, protein sentezi, azot ve karbonhidrat metabolizması, enzim (nitrat redüktaz) aktivasyonu, fotosentez ve klorofil sentezi gibi birçok metabolik aktivitenin bozulmasına neden olmaktadır. Kadmiyum, toprakta hareketli bir element olup bitkiler tarafından kolaylıkla alınabilmektedir. Bitkiler tarafından alındığında, besin zincirine girmesi ya da topraktan yıkanarak su ortamına ulaşma olasılığı önemli bir çevre sorunu

oluşturmaktadır. Ayrıca, kadmiyumun topraktaki şelatlayıcı ajanlarla aşağı taşınması hızlanmakta ve yeraltı suyuna karışarak içme ve sulama sularında kirliliğe neden olmaktadır (Köleli ve Kantar, 2005). İnsan faaliyetleriyle toprağa ulaşan kadmiyumun %54-58'i fosforlu gübrelerden, %39-41'i atmosferik depolanmadan, %2-5'i ise atık çamur ve çiftlik gübresi uygulamalarından kaynaklanmaktadır (Andresen ve Küpper, 2013; Cheng ve ark., 2014).

Biochar uygulamalarının topraktaki ağır metal etkinliği ile ilgili yapılan çalışmada biocharın %1 dozu uygulamasının toprakların alınabilir kadmiyum kapsamını azalttığı bildirilmiştir (Çağlar Eser, 2018). Liang ve ark. (2006), daha yüksek yüzey alanı, negatif yüzey yükü ve yük yoğunluğundan dolayı biocharın doğal organik maddeye oranla çok daha yüksek absorbe yeteneği olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle kadmiyum gibi ağır metal çalışmalarında biocharın uygun dozunun belirlenmesi için çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez çalışmasında kümes altlığı biocharı ile kadmiyum uygulamalarının ayrı ayrı ve birlikte yapılmasının buğdayın gelişimine ve besin elementi ile ağır metal içeriğine etkisi belirlenerek uygun dozun tespit edilmesi amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETLERİ

Alloway (1995), kadmiyumun insanlarda akciğer, karaciğer ve böbrek rahatsızlıklarına, görme problemlerine, anemiye ve yüksek tansiyona neden olan toplam on altı sağlık sorununa yol açtığını bildirmiştir. Dünya Sağlık Örgütü'ne göre, yetişkin bir insanın günlük tolere edilebilir kadmiyum miktarı 0.060-0.070 mg, haftalık ise 0.400-0.500 mg'dır. Beslenme kadmiyumun vücuda girmesindeki ana mekanizma olmasına rağmen, sigara içmenin de önemli bir kadmiyum kirliliği kaynağı olduğu belirtilmiştir; beslenme ile günlük ortalama 0.025-0.075 mg kadmiyum alınırken, sigara içenlerin buna ek olarak 0.020-0.035 mg kadmiyum daha aldıkları ifade edilmiştir.

Acir ve Erdem (2020), biochar ve kadmiyum uygulamalarının buğdayın gelişimine ve besin elementi içeriğine etkisini araştırdıkları çalışma sonucunda, toprağa artan düzeyde biochar ve kadmiyum uygulanması ile buğdayın bitki kuru ağırlığının kontrol uygulamalarına göre istatistiksel olarak önemli düzeyde azaldığını bildirmişlerdir.

Cui ve ark. (2012), yaptıkları iki yıllık çalışmada, buğday bitkisine dekara 0, 1, 2 ve 4 ton dozlarında biochar uygulaması ile bitkinin topraktan kaldırdığı kadmiyum konsantrasyonunun önemli oranda azaldığını bildirmişlerdir.

Clemens ve ark. (2013), toprakların pH değeri, redoks potansiyeli, katyon değişim kapasitesi (KDK), organik madde kapsamı, bitki türü ve gübre uygulamaları gibi birçok toprak ve bitki faktörünün bitkilerin kadmiyum alımı üzerine etkili olduğunu bildirmişlerdir.

Chintala ve ark. (2014), biochar uygulamalarının bir diğer avantajının, yüzeyinde bulunan çok sayıdaki anyonik yük nedeniyle, asidik veya alkali topraklara ilavesi sonucunda toprak KDK'sında artış sağlaması olduğunu bildirmişlerdir.

Chen ve ark. (2018), biochar uygulamaları ile kurak koşullar altında toprağın su tutma kapasitesinde artış belirlemişler ve bu artışın büyük ölçüde biocharın su bağlama kapasitesinin gücü ile ilişkili olduğunu bildirmişlerdir.

Demirbaş ve Çoşkan (2019), kadmiyum ve biochar uygulamalarının mısırın gelişimine ve besin elementi alımına etkisini araştırdıkları çalışmada, kadmiyum artışı ile bitki kuru madde ağırlığının azaldığını, ortamda biochar varken

kadmiyumun neden olduğu olumsuz etkinin giderildiğini, hatta en yüksek kuru ağırlığın %2 biochar ve 4 mg kg⁻¹ kadmiyum uygulamasında elde edildiğini bildirmişlerdir.

El-Naggar ve ark. (2018), biochar uygulanmış toprakların, biochar uygulanmamış topraklara göre daha az kadmiyum (Cd), bakır (Cu), nikel (Ni), çinko (Zn), demir (Fe), mangan (Mn), sülfat (SO₄²⁻) ve çözünmüş aromatik karbon konsantrasyonuna sahip olduğunu ve dolayısıyla biocharın ağır metallere kirlenmiş toprakların ıslahında kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Erdem ve ark. (2012), buğday çeşitlerinin kadmiyum biriktirme farklılıklarını belirlemiş ve makarnalık buğdayların ekmeklik buğdaylara göre daha fazla kadmiyum biriktirdiğini gözlemlemişlerdir.

Gnal ve Erdem (2022), biochar üretiminde piroliz esnasında organik materyalin içerdiği azotlu bileşiklerin önemli bir miktarının kaybolduğunu, ancak biocharın toprağa uygulanması ile azot döngüsünü ve azotun tutulmasını önemli düzeyde değiştirdiğini ve böylece azotun yararlılığını artırdığını bildirmişlerdir.

Gray ve ark. (2014), biocharın sahip olduğu gözeneklerin, elde edilen hammaddenin yapısına, sıcaklık derecesine ve piroliz süresine bağlı olarak farklı boyutlarda olabileceğini belirtmişlerdir.

Gnal ve ark. (2019), biochar üretiminde piroliz sıcaklığının artışı ile çeşitli bitkisel ve hayvansal kökenli hammaddelerden üretilen ürünlerin pH'sının hafif alkali (am talaşı, 7.89) ile çok güçlü alkali (altın ilek, 12.42) arasında değişebildiğini bildirmişlerdir.

Fergusson (1990) kimyasal fosforlu gübrelerin 300 mg kg⁻¹ üzerinde kadmiyum içerdiğini, azotlu ve potasyumlu gübrelerin ise genellikle 9 mg kg⁻¹'den daha az kadmiyum içerdiğini belirtmiştir.

Hossain ve ark. (2020), biocharın sahip olduğu element kompozisyonunun özellikle hayvan gübresi veya hayvansal üretim tesislerindeki atıklardan üretilen biocharların, tarımsal ürünlerin hasat artıkları ve odunsu bitkilerden elde edilenlere kıyasla çok daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir.

Hedlund ve ark. (1997) ticari olarak çinko endüstrisinin yan ürünü olarak üretilen kadmiyumun en önemli kullanım alanlarının boya, pil (Ni-Cd pilleri) ve plastik sanayisi olduğunu belirtmişlerdir. Günümüzde en çok tüketilen ürünler boya ve pil ürünleridir.

Houben ve ark. (2013), kadmiyum toksisitesi olan bir toprağa dört farklı dozda biochar (%0, %1, %5 ve %10) uygulaması yaparak kolza bitkisi yetiştirmişlerdir. Araştırma sonuçlarına göre, kolza bitkisinin yeşil aksam kadmiyum konsantrasyonunun kontrol uygulamasında 3.68 mg kg⁻¹ iken, diğer biochar uygulamalarında sırasıyla 3.15, 2.05 ve 1.08 mg kg⁻¹'e kadar düştüğünü bildirmişlerdir.

Lehmann (2007), biocharın kadmiyum iyonunu adsorbe ederek etkili bir şekilde bağladığını bildirmiştir.

Liu ve ark. (2018), biochar ve mikoriza uygulamalarının kıyaslandığı çalışmada, mikoriza aşılmasının kadmiyum stresini azalttığını, biochar ile birlikte mikoriza uygulamasının bitkinin kadmiyum alımını engellediğini ve enzim aktivitesini olumlu yönde artırdığını bildirmişlerdir.

Liang ve ark. (2023), biochar ve mikroorganizma kullanımının kadmiyumla kirletilmiş alanlardaki etkinliğini araştırdıkları çalışmada, biocharın topraktaki kadmiyum konsantrasyonunu azaltarak bitki biyokütlesini ve bitkilerdeki kadmiyum konsantrasyonunu etkileyebileceğini belirtmişlerdir. Biochar ve arbusküler mikoriza fungusunun (AMF) birlikte kullanımı, *Paspalum vaginatum*'un biyokütlesini %8.9-48.6 ve *Pennisetum alopecuroides*'in biyokütlesini %8.04-32.92 artırdığını, AMF veya biocharın tek başına kullanımına kıyasla kombinasyonlarının fitoremediasyon etkinliklerinin daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir.

Junior ve Guo (2023), biochar uygulamalarının toprak agregat stabilitesi ve bitki gelişimine etkisini araştırdıkları saksı çalışmasında, biochar uygulamalarının bitki gelişimini teşvik ettiğini ve toprak agregat stabilitesinde iyileşmeler sağladığını bildirmişlerdir.

Jiang ve ark. (2022), biochar uygulamalarının bitkilerin kadmiyum alımını azalttığını ve kadmiyumun toprak-bitki sistemindeki hareketi ve dönüşüm kapasitesini düşürdüğünü belirtmişlerdir. Ayrıca biochar uygulaması ile topraktaki azot (N), fosfor (P), potasyum (K) ve pH değerlerinin arttığını tespit etmişlerdir.

Kunene (2020), artan kurşun dozlarının marul bitkisinin kök kuru ağırlığında azalmaya neden olduğunu, kadmiyumun ise ıspanak ve marul bitkilerinin yaprak ve kök kuru ağırlık değerlerini azalttığını ve bu azalmanın ıspanak köklerinde daha belirgin olduğunu belirtmiştir.

Kobayashi (1978), 1960'lı yıllarda Japonya'nın Toyamo kentinde, yüksek dozda kadmiyum (Cd) içeren bir çinko (Zn) işletmesine ait akarsuların nehre karışması ve bu nehir suyunun çeltik tarlalarına girmesiyle İtai-İtai hastalığının ortaya çıktığını ve çok sayıda çiftçi ailesinde ölümlere varan hastalıkların görüldüğünü bildirmiştir. Bunun sonucunda kadmiyum kirliliğine özel bir önem verilmeye başlanmıştır.

McGrath ve Loveland (1992) dünya tarım topraklarının ortalama kadmiyum konsantrasyonunun 0.53 mg kg^{-1} olduğunu, en düşük değerin $0.06 \text{ mg Cd kg}^{-1}$, en yüksek değerin ise $1.1 \text{ mg Cd kg}^{-1}$ olduğunu bildirmişlerdir. Aynı çalışmada, İngiltere'nin tarım yapılan bölgelerinde en yüksek kadmiyum konsantrasyonlarının (ortalama 0.41 mg kg^{-1}) bulunduğunu rapor etmişlerdir.

Marschner (2008), kadmiyumun diğer ağır metaller arasında suda çözünürlüğü en fazla olan element olduğunu belirtmiş ve bu nedenle doğadaki yayılım hızının yüksek olduğunu, bitkiler tarafından Cd^{2+} halinde alındığını ve deniz canlıları tarafından biyolojik sistemlerine alınarak vücutlarında birikmesinin risk oluşturduğunu ifade etmiştir. Kadmiyum, insan yaşamı için gerekli bir element olmamasına rağmen, gıdalarda yüksek konsantrasyonlarda bulunduğu bitki, hayvan ve insanlara toksik etkisi olan bir elementtir.

Nguyen ve ark. (2023), pirincin kök, sürgün ve tanesinde kadmiyum birikimi üzerine artan biochar uygulamalarının etkisini araştırdıkları saksı çalışmasında, %5 biochar uygulamasının hem bitki gelişimini teşvik ettiğini hem de pirinç tanelerinde kadmiyum birikimini azalttığını bildirmişlerdir.

Namgay ve ark. (2010), kumlu bir toprakta yetiştirilen mısır bitkisine üç farklı biochar ve kadmiyum uygulaması yaparak bir deneme gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda, biochar uygulamasının mısır sürgünlerinde arsenik (As), kadmiyum (Cd) ve bakır (Cu) konsantrasyonlarını önemli ölçüde azalttığını, ancak sürgünlerdeki kurşun (Pb) ve çinko (Zn) konsantrasyonları üzerindeki etkilerinin önemsiz olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca, biochar uygulamasıyla topraktaki ekstrakte edilebilir As ve Zn konsantrasyonlarının arttığını, ekstrakte edilebilir Cu'nun değişmediğini, Pb'nun azaldığını ve Cd'nun değişkenlik gösterdiğini bildirmişlerdir.

Razzaghi ve ark. (2020), biochar uygulamalarının kum içeriği yüksek kaba bünyeli topraklara kıyasla kil içeriği yüksek ince bünyeli topraklarda daha az fayda sağlayabileceğini belirtmişlerdir.

Ren ve ark. (2021), kadmiyum uygulamalarının bitki gelişimini %10 daha fazla azalttığını, fotosentetik pigment ve fotosentetik özellikleri önemli ölçüde etkilediğini ve antioksidan enzim aktivitesinin arttığını, buna karşılık biochar uygulamalarının kadmiyumun bitki büyümesi üzerindeki olumsuz etkilerini etkili bir şekilde hafiflettiğini ve bu etkilerin yüksek kadmiyum konsantrasyonuna sahip bitkilerde daha belirgin olduğunu belirtmişlerdir.

Stolt ve ark. (2003), ekmeklik ve makarnalık buğday çeşitlerinin kadmiyum biriktirme ve gelişimlerine etkisini araştırmış ve kadmiyumun yüksek dozda uygulanması ile bitki gelişiminin önemli ölçüde gerilediğini, ancak çeşitler arasında bu bağlamda önemli bir fark olmadığını tespit etmişlerdir. Çeşitlerin kadmiyumu biriktirme durumlarını ise kökte gövdeye göre daha fazla kadmiyum biriktirdiklerini ve makarnalık buğdayın ekmeklik buğdaya göre daha fazla kadmiyum biriktirdiğini belirlemişlerdir.

Sun ve ark. (2020), biochar uygulamasıyla sebzelerin biyokütlesinin %16,9'dan %519,9'a önemli ölçüde arttığını, bitkilerin kadmiyum konsantrasyonunun ise %6,8'den %11,5'e ve %15,1'den %15,4'e azaldığını, kadmiyum kirlenmiş toprak profilindeki kadmiyumun üst topraktan (0-6 cm) alt toprağa (6-12 cm) aktarıldığını ve topraktaki değiştirilebilir, indirgenabilir ve oksitlenebilir gibi farklı fraksiyonlara sahip kadmiyum konsantrasyonlarının ve sebzelerin kadmiyum alımının azaldığını belirtmişlerdir.

Sobahan ve ark. (2023), kadmiyum stresi altındaki bitkilerde biochar uygulamasının toprağın pH'ını, yaprak alanını, SPAD değerini, salkım başına tane sayısını ve tane verimini artırdığını, ayrıca bitki kadmiyum konsantrasyonunu önemli ölçüde azalttığını bildirmişlerdir.

Tahir Abbas ve ark. (2018), tuz stresi altındaki bitkilerin kadmiyum (Cd) ve sodyum (Na) alımının arttığını, potasyum (K) ve çinko (Zn) alımının ise azaldığını bildirmişlerdir. Biochar uygulaması ile bitkinin büyümesi iyileşmiş ve daha yüksek biochar uygulamalarında ve tuz stresinde (%5 BC + 50 mM NaCl) kadmiyum ve sodyum alımının azaldığını belirtmişlerdir.

Taskin ve ark. (2019), alkali karakterdeki biocharın toprağa kireçleme materyali olarak uygulanabileceğini ve bu sayede asit karakterli toprakların pH'larını yükselterek besin elementlerinin yararlılığının artırılabilirliğini belirtmişlerdir..

Tomczyk ve ark. (2020), biyokütlenin pirolizi sırasında karboksil ve hidroksil grupları gibi çeşitli fonksiyonel grupların oluştuğunu ve bunlarla ilişkili olarak biocharların KDK'sinin tarım topraklarından daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir.

Veselov ve ark. (2003), buğday fidelerinin yetiştirildiği ortama kadmiyum ilave edilmesinin bitkilerin potasyum ve nitrat alımını azalttığını ve sürgün gelişimini engellediğini belirlemişlerdir.

Wang ve ark. (2014), biochar ilavesi ile toprakların pH değerinin arttığını ve bunun nedeni olarak biocharların yüzeyinde oluşan negatif yüklü karboksil, hidroksil ve fenolik fonksiyonel grupları gösterdiklerini bildirmişlerdir. Dolayısıyla, toprak çözeltilerindeki H⁺ konsantrasyonunun azalmasının bir sonucu olarak pH değerinde artış elde edilebileceğini ifade etmişlerdir.

Weber ve Quicker (2018), biocharın toprak özellikleri üzerine etkisinin sahip olduğu yüzey alanı, gözeneklilik yanı sıra yapısındaki aktif maddelerin miktarı ve kalitesi ile yüksek orandaki katyon değişim kapasitesi, su tutma kapasitesi ve adsorpsiyon kapasitesi gibi özelliklerden kaynaklandığını bildirmişlerdir. Biocharın pH'sının, piroliz sıcaklığına, işlemin hızına ve hammaddenin türüne bağlı olarak önemli düzeyde değişebildiğini ifade etmişlerdir.

Xu ve ark. (2014), buğday sapından elde edilen biochar ile domuz gübresinden elde edilen biocharın kadmiyum adsorpsiyon etkinliklerini araştırmışlardır. Sonuç olarak, domuz gübresi biocharının buğday sapı biocharına göre yaklaşık 10-15 kat daha fazla kadmiyumu adsorbe edebildiğini bildirmişlerdir.

Murtaza ve ark. (2015), tarım topraklarına kimyasal gübre yolu ile kadmiyum girişinin en önemli kaynağının kimyasal fosforlu gübreler olduğunu bildirmişlerdir.

Xu ve ark. (2016), biochar uygulanmış toprakların karbon içeriğindeki artış ile bitkinin kökündeki kadmiyum birikimi arasında negatif bir ilişki olduğunu, dolayısıyla düşük termal sıcaklıkta üretilen biochar uygulamasının topraklardaki kadmiyumun immobil hale getirilmesinde daha etkili olacağını belirtmişlerdir. Ayrıca, yüksek kadmiyum konsantrasyonuna sahip topraklarda biochar uygulamalarının her zaman kadmiyumun toksisitesini azaltamayacağını da ifade etmişlerdir.

Zhang ve ark. (2014), kadmiyumun bitkinin klorofil miktarını azalttığını, buna bağlı olarak fotosentez ve bitki ağırlığının azaldığını, ayrıca ağır metallerin

gövde su içeriğini azaltma veya artırma yönünde etki edebileceğini belirtmişlerdir. Kadmiyum uygulaması ile bitkinin kalsiyum (Ca) ve magnezyum (Mg) alımının artışının, çinko (Zn), bakır (Cu) ve demir (Fe) gibi elementlerle rekabet haline girebileceğini ve bu elementlerin alımının azalabileceğini ifade etmişlerdir. Bitkinin kadmiyum alımında çinko ve potasyum elementlerinin etkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Zhang ve ark. (2020), biochar uygulamalarının toprağın sadece besin elementi içeriğinde değil, aynı zamanda mikrobiyal popülasyon üzerinde de önemli ve olumlu etkileri olduğunu belirtmişlerdir.

Zhou ve ark. (2008), pamuk sapından elde edilen biocharın kadmiyumla kirlenmiş topraklarda daha fazla kadmiyumu tutma yeteneğine sahip olduğunu rapor etmişlerdir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Deneme Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tohum Bilimi ve Teknolojisi Bölümü'ne ait iklim odasında yürütülmüştür. Denemede, ekmeçlik buğday çeşidi olan Bozkır buğdayı kullanılmıştır. Bu çalışmada, Bolu ilinde elektrik enerjisi elde etmek amacıyla tavuk altlığı atıklarının gazlaştırma metodu ile oksijensiz ortamda yakılması sonucu elde edilen biochar kullanılmıştır. Denemede kullanılan toprak, fakülte deneme alanından alınmış, laboratuvar koşullarında kurutulmuş ve 2 mm'lik elekten geçirilerek kullanılmaya hazır hale getirilmiştir. Biochar ve toprağa ait bazı analiz sonuçları Tablo 3.1.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1.1. Denemede kullanılan toprak ve biochara ait bazı analiz sonuçları

Materyal	Tekstür	pH	Tuz	Kireç	O.M.	N	P	K	Ca	Fe	Mn	Zn	Cu
			%										
Toprak	Killi-Tın	8.05	0.883	3.1	0.58	0.06	2.5	233	2494	4.2	2.2	0.4	1.6
Biochar*	-	9.31	12.82	-	39.2	-	2321*	1450	14125	472	139	311	29

*; toplam element değerleri

3.2. Yöntem

Yaklaşık 2 kg toprak alan saksılarda tesadüf parsellerinde faktöriyel deneme desenine göre 3 tekerrürlü olarak çalışma yürütülmüştür. Temin edilen biochar, 2 mm'lik elekten elendikten sonra %0, %2 ve %4 oranlarında toprakla karıştırılarak saksılara doldurulmuştur. Biochar ve denemede kullanılan toprağa ait özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Çalışmada 0, 75 ve 150 mg kg⁻¹ kadmiyum olacak şekilde Cd₂SO₄.7H₂O kimyasalı tartılmış ve etiketlenen saksılara saf suda çözdürüldükten sonra tohum ekimi sonrası uygulanmıştır. Ayrıca, sabit dozda her saksıya 300 mg N kg⁻¹ ve 80 mg P₂O₅ kg⁻¹ dozları amonyum sülfat (%21 N) ve Diamonyum Fosfat (DAP, %18 N, %46 P₂O₅) gübrelerinden tartılarak tohum ekimi ile birlikte saf suda çözdürülerek uygulanmıştır. Deneme süresince saksılar, tarla kapasitesinde olacak şekilde saf su ile sulanmıştır. İklim odası 18 saat gündüz ve 7 saat gece, 24±1⁰C ve %70 nem düzeyinde olacak şekilde ayarlanmıştır. Deneme, 24 Ekim 2023 tarihinde başlamış ve 22 Aralık 2023 tarihinde sona ermiştir.

Çalışma sonunda elde edilen bitki örnekleri ile kökleri saksıdan dikkatlice çıkartılmış ve makasla kesilerek birbirlerinden ayrılmıştır. Ardından, bitki boyu ve kök uzunluğu cetvelle ölçülmüş; bitki yaş ve kuru ağırlıkları ile kök yaş ve kuru ağırlıkları 0.0001 g hassasiyetli analitik terazide tartılmış; kardeş sayıları gibi gelişim kriterleri de kaydedilmiştir. Bitki ve kök örnekleri önce normal su, ardından saf su ile iki kez yıkanmış ve etüvde 65⁰C’de sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. Kuruyan bitki örnekleri, bitki öğütme değirmeninde öğütülmüş ve Kacar ve İnal (2008)’ın belirttiği şekilde kuru yakma yöntemi ile hazırlanmıştır. Biochar örneği ise yaş yakma yöntemi ile ekstrakte edilmiştir. Elde edilen ekstraktlarda element analizleri, Van YYÜ Bilimsel Araştırma Merkezi laboratuvarında Atomik Absorbsiyon Spektrofotometresi ile belirlenmiştir.



Fotoğraf 3.1.1. Deneme kurulumu ve sonrasına ait iklim odası görüntüleri



Fotoğraf 3.1.2. Hasat zamanı uygulamaların bitki ve kök gelişimi üzerine etkilerine ait görüntüler

3.2.1. Bünye

Bouyoucos hidrometre yöntemine göre belirlenmiştir (Bouyoucos, 1951);

3.2.2. Eriyebilir toplam tuz

Richards (1954)'ın bildirdiği şekilde 1/2.5 toprak su süspansiyonunda elektriksel iletkenlik, masaüstü tipi elektrikli kondaktivimetre aleti ile belirlenmiştir.

3.2.3. pH

Jakson (1958)'in belirttiği toprak örnekleri değerleri saf su ile 1:2.5 oranında sulandırılarak belirlenmiştir.

3.3.4. Kireç

Kalsimetrik olarak belirlenmiştir (Allison ve Moodie, 1965).

3.3.5. Fosfor

Vanadamolibdo fosforik mavi renk yöntemine göre, sodyum bikarbonat ile çalkalanıp süzöldükten sonra elde edilen çözeltideki fosfor miktarı spektrofotometrik olarak belirlenmiştir. (Kacar, 1994).

3.3.6. Ekstrakte edilebilir K, Ca, Mg

Alınan toprak örnekleri 1 N amonyum asetat ile çalkalandıktan sonra elde edilen süzöklör Kacar, (1994)'a göre Atomik Absorpsiyon Spektrofotometrede belirlenmiştir.

3.3.7. Yarayışlı Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Cd ve Pb analizleri

Alınan toprak örnekleri pH'sı 7,3 +-2 olan 0.05M DTPA ile ekstrakte edildikten sonra elde edilen süzöklör Atomik Absorpsiyon Spektrofotometresi kullanılarak belirlenmiştir (Kacar, 1994).

3.4. İstatistiksel Analiz

Denemede elde edilen veriler 'CoStat' paket programından yararlanılarak analiz edilmiş, etkileri önemli bulunan uygulamalara ait tüm ortalamalar "Duncan çoklu karşılaştırma" testine göre gruplandırılmıştır (Düzgüneş ve ark., 1987).

4.BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Uygulamaların Bitki Gelişim Kriterlerine Etkisi

Kadmiyum ve biochar uygulamalarının bitki boyu, kök uzunluğu, bitki yaş ağırlığı, bitki kuru ağırlığı, kök yaş ağırlığı, kök kuru ağırlığı ve kardeş sayısı üzerine etkilerine ait varyans analiz sonuçları Tablo 4.1.1, Tablo 4.1.3, Tablo 4.1.5, Tablo 4.1.7, Tablo 4.1.9, Tablo 4.1.11 ve Tablo 4.1.13'te, ortalamalar ve Duncan harflendirmelere ait sonuçlar ise Tablo 4.1.2, Tablo 4.1.4, Tablo 4.1.6, Tablo 4.1.8, Tablo 4.1.10, Tablo 4.1.12 ve Tablo 4.1.14'te verilmiştir.

Tablo 4.1.1. Uygulamaların bitki boyuna etkisine ait varyans analiz tablosu

V.K.	S.D.	Bitki Boyu	
		KO	F değeri
Kadmiyum (Cd)	2	10.814	1.02 öd
Biochar (BioC)	2	36.592	3.47 *
CdxBioC	4	9.593	0.91 öd
Hata	18	10.556	

*, %5; öd, önemli değil

Tablo 4.1.1'de görüleceği üzere biochar uygulaması bitki boyu üzerine %5 düzeyinde etkide bulunmuşken, kadmiyum ve interaksiyonun etkisi önemsiz olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.1.2. Uygulamaların bitki boyuna etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, cm

Kadmiyum, mg kg ⁻¹	Biochar, %			
	0	2	4	Ortalama
0	37.7	33.3	34.0	35.0
75	36.3	35.0	33.0	34.8
150	34.3	35.3	29.3	33.0
Ortalama	36.1 A	34.6 AB	32.1 B	

A, B; aynı harf ile gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak fark yoktur

Biochar ortalamaları incelendiğinde en yüksek bitki boyu biochar uygulanmayan (%0 biochar) bitkilerde 36.1 cm olarak ölçülmüşken en düşük bitki boyu %4 biochar uygulanmış ortamda yetişen bitkilerde 32.1 cm olarak belirlenmiştir. Artan kadmiyum dozları ile bitki boyunda düşüş elde edilmekle beraber bu durum istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır. İnteraksiyonun etkisi

incelendiğinde bitki boyunda en belirgin azalış 150 mg Cd kg⁻¹ x %4 biochar uygulanmış ortamda yetişen bitkide 29.3 cm olarak ölçülmüştür. En yüksek bitki boyu biochar ve kadmiyum uygulanmayan ortamda (%0 biochar x 0 mg Cd kg⁻¹) 37.7 cm olarak ölçülmüştür (Tablo 4.1.2).

Biochar uygulama dozunun artışına bağlı olarak gözlenen bitki boyu azalışı biocharın sahip olduğu tuz içeriğinin yüksek olmasından (Tablo 3.1.1) kaynaklanmış olabilir. Nitekim Tablo 4.5.2’de görüleceği üzere deneme topraklarının EC değerlerinin yükseldiği görülmektedir. Bu bağlamda bitki boyu olumsuz etkilenmiş olabilir. Benzer olarak Devereux ve ark. (2012) yüksek dozda biochar (%5 biochar) uygulamalarının buğdayın bitki boyunda kontörle göre düşüşe neden olduğunu bildirmişlerdir. Albuquerque ve ark. (2013) iki farklı kaynaktan elde edilen biochar uygulamalarının buğdayın gelişimine saksı çalışması ile etkisini incelemişler ve sonuç olarak biochar uygulamalarının bitki gelişimini geriletmediğini bildirmişlerdir.

Çalışmamızda kadmiyum uygulamaları ortalamaları incelendiğinde bitki boyu üzerine belirgin etkisi belirlenmemiştir. Ancak ortamda biocharın olmadığı saksılardaki bitkilerin bitki boyu artan kadmiyum uygulamaları ile azalış göstermiş ancak bu azalış önemli olarak belirlenmemiştir. Benzer olarak Jalil ve ark. (1994) yaptıkları çalışmada kadmiyum uygulamalarının buğdayın gelişim kriterlerine belirgin etkisi olmadığını bildirmişlerdir. Bizim çalışmamıza benzer olarak Abbas ve ark., (2018) yaptıkları çalışmada kadmiyum stresi altındaki bitkilerin yetiştirme ortamına biochar uygulamasının bitki boyu ve gelişim kriterlerini olumlu yönde etkilediğini bildirmişlerdir.

Tablo 4.1.3. Uygulamaların kök uzunluğuna etkisine ait varyans analiz tablosu

V.K.	S.D.	Kök Uzunluğu	
		K.O	F değeri
Kadmiyum (Cd)	2	13.592	5.02*
Biochar (BioC)	2	57.481	21.26***
CdxBioC	4	5.593	2.07 öd
Hata	18	2.703	

*, %5; ***, %0.1; öd, önemli değil

Uygulamaların kök uzunluğu üzerine etkisi incelendiğinde kadmiyum %5 düzeyinde, biochar %0.1 düzeyinde önemli etkide bulunmuş, interaksiyonun etkisi önemsiz olarak belirlenmiştir (Tablo 4.1.3).

Tablo 4.1.4. Uygulamaların kök uzunluğuna etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, cm

Kadmiyum, mg kg ⁻¹	Biochar, %			Ortalama
	0	2	4	
0	13.7	19.3	14.7	15.9 AB
75	16.0	19.7	15.0	16.9 A
150	15.3	16.7	11.3	14.4 B
Ortalama	15.0 B	18.6 A	13.7 B	

A, B; aynı harf ile gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak fark yoktur

Biochar uygulama ortalamaları incelendiğinde %2 biochar uygulaması ile kök uzunluğunda en yüksek değer (18.6 cm) elde edilmişken %4 biochar uygulaması ile en düşük (13.7 cm) kök uzunluğu belirlenmiştir. Artan kadmiyum uygulaması ile önce bir miktar artış, sonra azalış elde edilmiştir. 75 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında 16.9 cm olarak ölçülen kök uzunluğu, 150 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında en düşük değeri (14.4 cm) vermiştir. İnteraksiyonun etkisi incelendiğinde en yüksek değer 75 mg Cd kg⁻¹ x %2 biochar uygulamasında 19.7 cm, en düşük değer ise 150 mg Cd kg⁻¹ x %4 biochar uygulamasında 11.3 cm olarak ölçülmüştür (Tablo 4.1.4).

Gerek biochar gerekse kadmiyum uygulamalarının ortalamaları incelendiğinde 2. dozların kök uzunluğunu artırdığı, sonraki dozda ise azalttığı görülmektedir. Bu durum hem kadmiyumun hem de biocharın belli bir dozun üstünde kök gelişimini olumsuz yönde etkilediğini ifade edebiliriz. Benzer olarak Amirjani (2012) ve Zhang ve ark. (2022) kadmiyum artışına bağlı olarak buğdayın kök uzamasının azaldığını bildirmişlerdir.

Tablo 4.1.5. Uygulamaların bitki yaş ağırlığına etkisine ait varyans analiz tablosu

V.K.	S.D.	Bitki Yaş Ağırlığı	
		KO	F değeri
Kadmiyum (Cd)	2	0.0493	3.22 *
Biochar (BioC)	2	0.2254	14.74 ***
CdxBioC	4	0.0456	2.98 *
Hata	18	0.0152	

*, %5; ***, %0.1

Tablo 4.1.5'te görüleceği üzere bitki yaş ağırlığı üzerine kadmiyum uygulaması ve interaksiyon %5 düzeyinde, biochar %0.1 düzeyinde önemli etkide bulunmuştur.

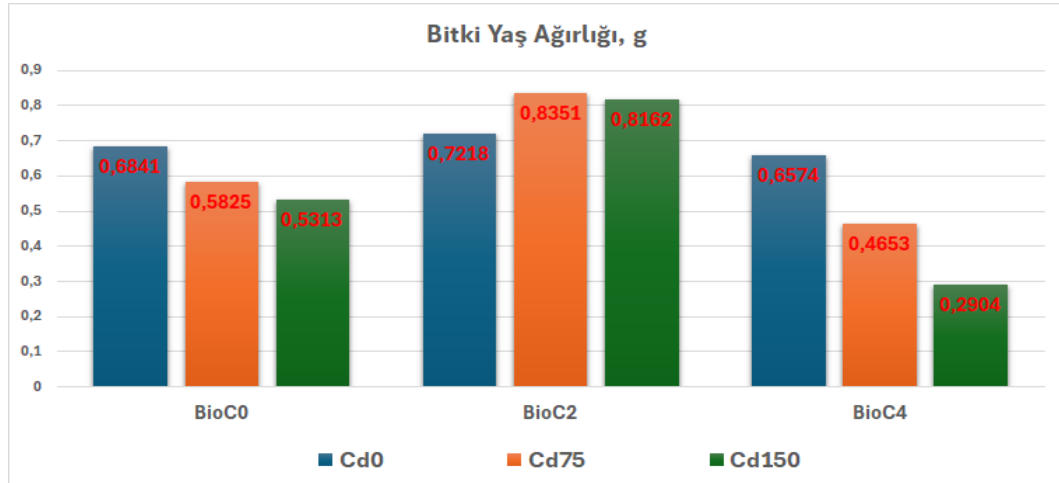
Tablo 4.1.6. Uygulamaların bitki yaş ağırlığına etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, g

Kadmiyum, mg kg ⁻¹	Biochar, %			Ortalama
	0	2	4	
0	0.6841 abc	0.7218 ab	0.6754 abc	0.6968 A
75	0.5825 bc	0.8351 a	0.4653 bc	0.6276 AB
150	0.5313 bc	0.8162 a	0.2904 d	0.5459 B
Ortalama	0.5993 B	0.7910 A	0.4770 B	

A, B; a, b, c, d; aynı harf ile gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak fark yoktur

Tablo 4.1.6'da görüleceği üzere biochar uygulama ortalamaları incelendiğinde bitki yaş ağırlığı önce artış göstermiş sonra azalmıştır. En yüksek bitki yaş ağırlığı %2 biochar uygulamasında, en düşük bitki yaş ağırlığı ise %4 biochar uygulamasında sırasıyla 0.7910 g ve 0.4770 g olarak belirlenmiştir. Kadmiyum ortalamaları incelendiğinde artan kadmiyum uygulamaları ile bitkinin yaş ağırlığı azalmış, en yüksek 0 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında, en düşük ise 150 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında sırasıyla 0.6968 g ve 0.5459 g olarak belirlenmiştir.

İnteraksiyonu incelediğimizde en düşük bitki yaş ağırlığı 0.2904 g ile %4 biochar x 150 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda, en yüksek bitki yaş ağırlığı 0.8351 g ile %2 biochar x 75 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda yetişen bitkilerde belirlenmiştir (Şekil 4.1.1).



Şekil 4.1.1. CdxBioC interaksiyonunun bitki yaş ağırlığına etkisi

Biochar uygulaması ile elde edilen bitki yaş ağırlığı artışı Abbas ve ark. (2018) yaptığı çalışma ile benzerlik göstermektedir. Ancak %4 biochar uygulaması ile bitki yaş ağırlığında düşüş belirlenmiş olup, muhtemelen biochar uygulaması ile toprak tuzluluğundaki artışa bağlı olarak gerçekleşen bir durum olduğu

düşünülmektedir. Tablo 4.5.'de görüleceği üzere en yüksek EC değerleri %4 biochar uygulanmış ortamlarda belirlenmiştir.

Tablo 4.1.7. Uygulamaların bitki kuru ağırlığına etkisine ait varyans analiz tablosu

V.K.	S.D.	Bitki Kuru Ağırlığı	
		K.O	F değeri
Kadmiyum (Cd)	2	0.0017	3.73*
Biochar (BioC)	2	0.0042	9.55**
CdxBioC	4	0.0009	2.08 öd
Hata	18	0.0004	

*, %5; **, %1; öd, önemli değil

Tablo 4.1.7'de görüleceği üzere bitki yaş ağırlığı üzerine kadmiyum ve biochar uygulamaları %5 ve %1 düzeyinde etki etmişken, interaksyonun etkisi önemsiz olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.1.8. Uygulamaların bitki kuru ağırlığına etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, g

Kadmiyum, mg kg ⁻¹	Biochar, %			
	0	2	4	Ortalama
0	0.1325	0.1261	0.1199	0.1261 A
75	0.1197	0.1432	0.0946	0.1191 AB
150	0.1177	0.1252	0.0570	0.0999 B
Ortalama	0.1232 A	0.1315 A	0.0905 B	

A, B; aynı harf ile gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak fark yoktur

Tablo 4.1.8'de görüleceği üzere biochar ortalamalarında en yüksek bitki kuru ağırlığı %2 biochar uygulamasında, en düşük bitki kuru ağırlığı ise %4 biochar uygulamasında sırasıyla 0.1423 g ve 0.0570 g olarak belirlenmiştir. Kadmiyum ortalamaları incelendiğinde artan kadmiyum uygulamaları ile bitkinin yaş ağırlığı azalmış, en yüksek 0 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında, en düşük ise 150 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında sırasıyla 0.1261 g ve 0.0999 g olarak belirlenmiştir. İnteraksiyonu incelediğimizde en düşük bitki yaş ağırlığı 0.0570 g ile %4 biochar x 150 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda, en yüksek bitki yaş ağırlığı 0.1432 g ile %2 biochar x 75 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda yetişen bitkilerde belirlenmiştir. Benzer olarak Albuquerque ark. (2013) yaptıkları saksı çalışmasında artan biochar uygulamalarının buğdayın kuru ağırlığında önce artış sonra azalışa neden olduğu bildirilmiştir. Bu durum muhtemelen biocharın neden olduğu tuzluluktan ileri gelmiş olabilir. Nitekim Tablo 4.54'te görüleceği üzere biochar uygulamaları toprağın tuzluluğunu kontrol uygulamalarına göre artırmıştır. Bizim bulgularımızın

aksine Mahmoud ve ark. (2017) tarla koşullarında yaptıkları çalışmada artan biochar uygulamaları ile buğdayın hem veriminin hemde kuru ağırlığının arttığını bildirmişlerdir. Sial ve ark. (2019) farklı orjinli biochar uygulamalarının kontrole göre buğdayın verimini ve kuru ağırlığını artırdığını bildirmişlerdir.

Kadmiyum uygulamaları ile bitkinin kuru ağırlığında belirlenen düşüş Halim ve ark. (2021) ve Samar ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmalar ile benzerlik göstermektedir. Bu durum kadmiyumun bitki büyümesi üzerindeki antagonistik etkisinden yani antioksidanları azaltarak ve lipit peroksidazı artırması ve bunun sonucunda biyokütlenin azalmasına neden olan fotosentezin azalması (Hassan ve ark., 2019; Kabir ve ark., 2021) ile sonuçlanmasından kaynaklanmış olabilir.

Tablo 4.1.9. Uygulamaların kök yaş ağırlığına etkisine ait varyans analiz tablosu

V.K.	S.D.	Kök Yaş Ağırlığı	
		K.O	F değeri
Kadmiyum (Cd)	2	0.0079	1.93 öd
Biochar (BioC)	2	0.0147	3.56*
CdxBioC	4	0.0143	3.48*
Hata	18	0.0041	

*, %5; öd, önemli değil

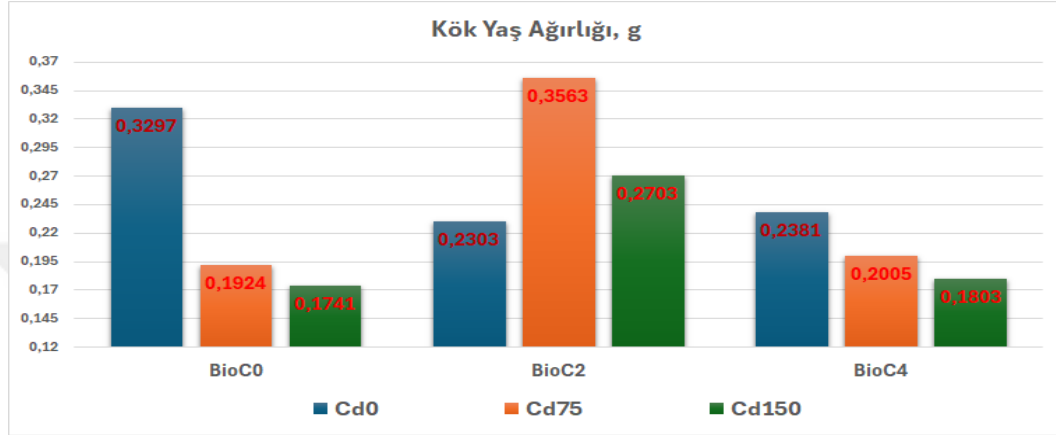
Tablo 4.1.9'da görüleceği üzere kök yaş ağırlığı üzerine kadmiyum uygulamasının etkisi önemsizken, biochar ve interaksiyonun etkisi %5 düzeyinde etki ettiği belirlenmiştir.

Biochar uygulamalarının ortalamalarında en yüksek kök yaş ağırlığı %2 biochar uygulamasında, en düşük kök yaş ağırlığı ise %0 biochar uygulamasında sırasıyla 0.2856 g ve 0.2063 g olarak belirlenmiştir. Kadmiyum ortalamaları incelendiğinde artan kadmiyum uygulamaları ile bitkinin kök yaş ağırlığı azalmış, en yüksek 0 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında, en düşük ise 150 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında sırasıyla 0.2660 g ve 0.2082 g olarak belirlenmiştir. İnteraksiyonun etkisini incelediğimizde en düşük kök yaş ağırlığı 0.1741 g ile %0 biochar x 150 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda, en yüksek kök yaş ağırlığı 0.3563 g ile %2 biochar x 75 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda yetişen bitkilerde belirlenmiştir (Tablo 4.10).

Tablo 4.1.10. Uygulamaların kök yaş ağırlığına etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, g

Kadmiyum, mg kg ⁻¹	Biochar, %			Ortalama
	0	2	4	
0	0.3297 ab	0.2303 bc	0.2381 abc	0.2660
75	0.1924 c	0.3563 a	0.2005 c	0.2497
150	0.1741 c	0.2703 abc	0.1803 c	0.2082
Ortalama	0.2320 AB	0.2856 A	0.2063 B	

A, B; a, b, c; aynı harf ile gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak fark yoktur



Şekil 4.1.2. CdxBioC interaksiyonunun kök yaş ağırlığına etkisi

Tablo 4.1.11’de görüleceği üzere kök kuru ağırlığı üzerine kadmiyum ve interaksiyon %5 düzeyinde etki etmişken, biochar %0.1 düzeyinde önemli düzeyde etki etmiştir.

Tablo 4.1.11. Uygulamaların kök kuru ağırlığına etkisine ait varyans analiz tablosu

V.K.	S.D.	Kök Kuru Ağırlığı	
		K.O	F değeri
Kadmiyum (Cd)	2	0.00023	3.47*
Biochar (BioC)	2	0.00083	12.49***
CdxBioC	4	0.00029	4.43*
Hata	18	0.00007	

*, %5; ***, %0.1;

Biochar uygulamalarının ortalamalarında en yüksek kök kuru ağırlığı %0 biochar uygulamasında, en düşük kök kuru ağırlığı ise %4 biochar uygulamasında sırasıyla 0.0462 g ve 0.0240 g olarak belirlenmiştir. Kadmiyum ortalamaları incelendiğinde artan kadmiyum uygulamaları ile bitkinin kök kuru ağırlığı azalmış, en yüksek 0 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında, en düşük ise 150 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında sırasıyla 0.0372 g ve 0.0271 g olarak belirlenmiştir. İnteraksiyonun etkisini incelediğimizde en yüksek kök kuru ağırlığı 0.0597 g ile %0 biochar x 0 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda, en düşük kök kuru ağırlığı 0.0209 g ile %4 biochar

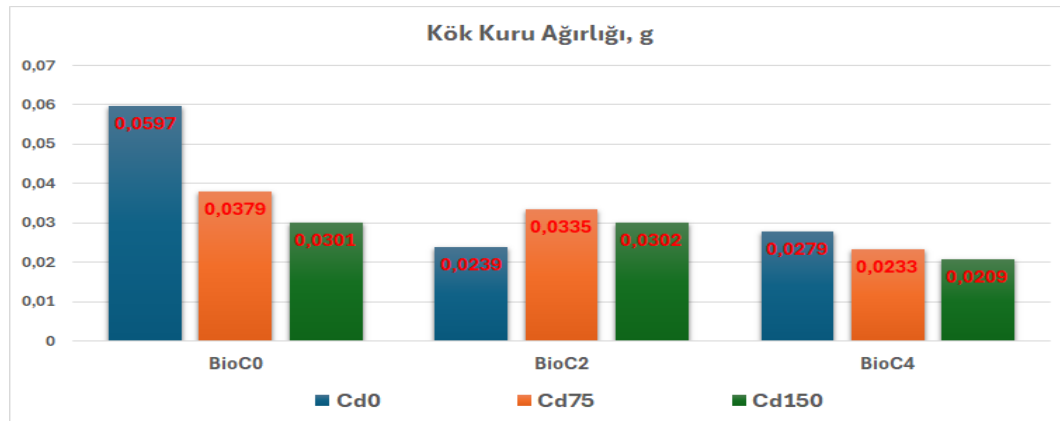
x 150 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda yetişen bitkilerde elde edilmiştir (Tablo 4.1.12).

Tablo 4.1.12. Uygulamaların kök kuru ağırlığına etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, g

Kadmiyum, mg kg ⁻¹	Biochar, %			
	0	2	4	Ortalama
0	0.0597 a	0.0239 bc	0.0279 bc	0.0372 A
75	0.0379 b	0.0335 bc	0.0233 bc	0.0316 AB
150	0.0301 bc	0.0302 bc	0.0209 c	0.0271 B
Ortalama	0.0462 A	0.0292 B	0.0240 B	

A, B; a, b, c; aynı harf ile gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak fark yoktur

Biochar ve kadmiyum uygulamaları ile kök kuru ağırlığında kontrole göre belirgin azalışlar elde edilmiştir. Bizim bulgularımızın aksine Çığ ve ark. (2021) yaptıkları çalışmada biochar uygulamalarının kontrole göre kök kuru ağırlığı ve diğer gelişim kriterleri kontrole göre arttığını bildirmişlerdir. Yine Aon ve ark. (2023) yaptıkları saksı çalışmasında artan biochar ile bitkinin kuru biyomas, kök kuru ağırlığı, tane verimi ve sap veriminde kontrole göre önemli artışlar olduğunu bildirmişlerdir. Biochar ve kadmiyum uygulamalarının birlikte etkisi incelendiğinde %2 biochar uygulamasında artan kadmiyum dozu bitki kök kuru ağırlığında artış sağladığı, ancak %0 ve %4 biochar uygulamalarında artan kadmiyum ile azalış belirlenmiştir. Bizim bulgularımızı aksine Anwar ve ark. (2023) kadmiyum uygulanmış ortamlarda artan biochar uygulamaları bitkinin ölçülen kriterlerinde önemi artışlar sağladığını bildirmişlerdir.



Şekil 4.1.3. CdxBioC interaksiyonunun kök kuru ağırlığına etkisi

Tablo 4.1.13’de görüleceği üzere kardeş sayısı üzerine kadmiyum uygulaması %5 düzeyinde etki etmişken, biochar %0.1 düzeyinde önemli düzeyde etki etmiş, interaksiyonun etkisi önemsiz olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.1.13. Uygulamaların kardeş sayısına etkisine ait varyans analiz tablosu

V.K.	S.D.	Kardeş Sayısı	
		KO	F değeri
Kadmiyum (Cd)	2	0.4513	3.31*
Biochar (BioC)	2	2.0118	14.78***
CdxBioC	4	0.2018	1.48 öd
Hata	18	0.1361	

*, %5; ***, %0.1; öd, önemli değil

Biochar uygulamalarının ortalamalarında en yüksek kardeş sayısı 2.47 adet ile %2 biochar uygulamasında, en düşük kardeş sayısı 1.53 adet ile %4 biochar uygulamasında elde edilmiştir. Kadmiyum ortalamaları incelendiğinde artan kadmiyum uygulamaları ile bitkinin kardeş sayısı azalmış, en yüksek 0 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında, en düşük ise 150 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında sırasıyla 2.14 adet ve 1.74 adet olarak belirlenmiştir. İnteraksiyonun etkisini incelediğimizde en yüksek kardeş sayısı 2.81 adet ile %2 biochar x 75 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda, en düşük kardeş sayısı 1.09 ile %4 biochar x 150 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda yetişen bitkilerde elde edilmiştir (Tablo 4.1.14).

Tablo 4.1.14. Uygulamaların kardeş sayısına etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, adet

Kadmiyum, mg kg ⁻¹	Biochar, %			
	0	2	4	Ortalama
0	2.05	2.48	1.89	2.14 A
75	1.93	2.81	1.60	2.12 A
150	2.00	2.13	1.09	1.74 B
Ortalama	1.99 B	2.47 A	1.53 C	

A, B, C; aynı harf ile gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak fark yoktur

Biochar uygulamaları kardeşlenme sayısını önce artırmış sonra azaltmıştır. Bu durum biocharın sahip olduğu yüksek orandaki, özellikle fosfor, besin elementi içeriğinin kardeşlenme sayısını artırmasında buğdaya destek olduğu, ancak sonraki dozda gözlenen azalış ise yine biocharın yüksek orandaki tuz içeriğinin (Tablo 3.1.1) getirmiş olduğu toprak tuzluluğundaki artıştan (Tablo 4.5.4) kaynaklanmış olabilir. Nitekim Hu ve ark. (2005) tuzluluğun artışı ile buğday çeşitlerinin kardeşlenme sayısının azaldığını bildirmişlerdir. Benzer olarak Khan ve ark. (2021)

yaptıkları çalışmada biochar uygulaması buğdayın kardeşlenme sayısını azalttığını ancak bu azalışın istatistiksel olarak önemli olmadığını bildirmişlerdir. Kadmiyumun artan miktarlarda uygulanması bitkinin kardeşlenme sayısını azaltmıştır. Benzer olarak Chen ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada kadmiyum uygulamalarının artışı ile kontrole göre buğdayın kardeş sayısında azalma olduğunu bildirmişlerdir. Bu durum kardeşlenme döneminde kadmiyumun hücre duvarlarına bağlanma afinitesindeki artışın (Harris ve ark., 2013) getirmiş olduğu kök aktivitesindeki düşüşle (Wolna-Maruwka ve ark., 2023) bağlantılı olarak bitki fizyolojisinde gerilemelerle ilişkili olduğu bildirilmektedir (Shi ve ark., 2019; Wang ve ark., 2024).

4.2. Uygulamaların Bitkinin Makro Element İçeriğine Etkisi

Kadmiyum ve biochar uygulamalarının bitkinin fosfor, potasyum, kalsiyum ve magnezyum içeriklerine ait varyans analiz sonuçları Tablo 4.2.1, Tablo 4.2.3, Tablo 4.2.5 ve Tablo 4.2.7’de, ortalamalar ve Duncan harflendirmelere ait sonuçlar ise Tablo 4.2.2, Tablo 4.2.4, Tablo 4.2.6 ve Tablo 4.2.8’de verilmiştir.

Tablo 4.2.1’de görüleceği üzere bitki fosfor içeriği üzerine kadmiyum uygulamasının etkisi önemli değilken, biochar uygulaması %0.1 düzeyinde ve interaksiyonun etkisi %5 düzeyinde etki etmiştir.

Tabl 4.2.1. Uygulamaların bitki fosfor içeriğine etkisine ait varyans analiz tablosu

V.K.	S.D.	Fosfor	
		KO	F değeri
Kadmiyum (Cd)	2	1162786	2.73 öd
Biochar (BioC)	2	6553974	15.43***
CdxBioC	4	1765492	4.23*
Hata	18	424788	

*, %5; ***, %0.1; öd, önemli değil

Biochar uygulamalarının ortalamalarında en yüksek fosfor içeriği 5107 mg kg⁻¹ ile %0 biochar uygulamasında, en düşük bitki fosfor içeriği 3587 mg kg⁻¹ ile %4 biochar uygulamasında elde edilmiştir. Kadmiyum ortalamaları incelendiğinde artan kadmiyum uygulamaları ile bitkinin fosfor içeriği azalmış, en yüksek 0 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında, en düşük ise 150 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında sırasıyla 4986 mg kg⁻¹ ve 4347 mg kg⁻¹ olarak belirlenmiştir. İnteraksiyonun etkisini incelediğimizde en yüksek bitki fosfor içeriği 5579 mg kg⁻¹ ile %2 biochar x 0 mg

Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda yetişen bitkide, en düşük bitki fosfor içeriği ise 2816 ile %4 biochar x 150 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda yetişen bitkilerde elde edilmiştir (Tablo 4.2.2).

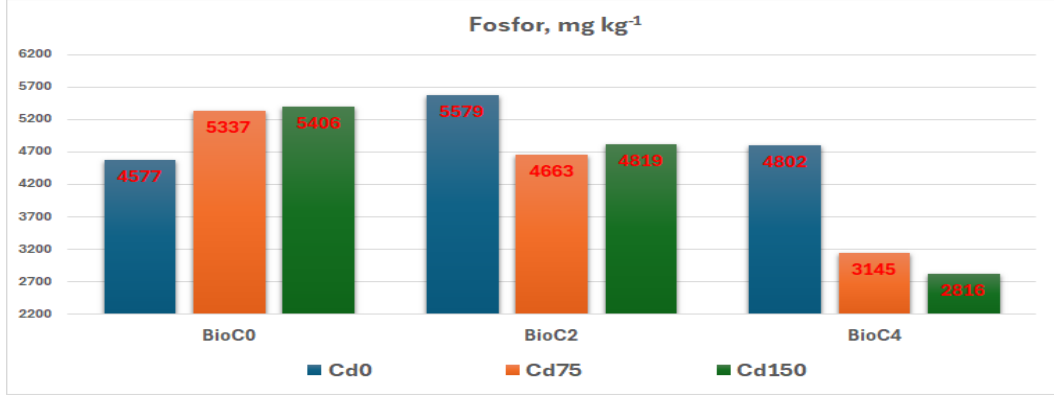
Tablo 4.2.2. Uygulamaların bitki fosfor içeriğine etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, mg kg⁻¹

Kadmiyum, mg kg ⁻¹	Biochar, %			
	0	2	4	Ortalama
0	4577 ab	5579 a	4802 a	4986
75	5337 a	4663 ab	3145 bc	4382
150	5406 a	4819 a	2816 c	4347
Ortalama	5107 A	5020 A	3587 B	

A, B; a, b, c; aynı harf ile gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak fark yoktur

Kadmiyum uygulanmayan koşullarda biocharın artan dozu bitki fosfor içeriğini kontrole göre artırmıştır (Tablo 4.2.2). Ancak 150 mg Cd kg⁻¹ kadmiyum uygulanmış ortamda biochar dozunun artışı ile bitkinin fosfor içeriğinde belirgin düşüş belirlenmiştir Benzer olarak DeLuca ve ark (2015), Mahmoud ve ark. (2018) ve Aon ve ak. (2023) yaptıkları çalışmada biochar uygulamasının bitkilerin fosfor içeriğini artırdığını bildirmişlerdir. Bu durum biocharın içermiş olduğu yüksek fosfor içeriğinden kaynaklanmış olabilir.

Ortamda biochar yokken artan kadmiyum uygulamaları bitkinin fosfor içeriğini arttırmıştır (Tablo 4.2.2). Ancak %4 biochar uygulanmış ortamda kadmiyum dozunun artışı ile bitkinin fosfor içeriğinde belirgin düşüş belirlenmiştir. Çataav ve ark. (2020) kadmiyum uygulamalarının artışı ile buğdayın gelişiminin gerilediği, antioksidatif enzim faaliyetinin arttığını bildirmişlerdir. Stres enzimlerinin artışı ile bitkinin daha fazla enerjiye ihtiyacı gerekecektir. Bu bağlamda bitkinin enerji kaynağı olan fosfor (Kacar ve Katkat, 2023) alımını da artacaktır. Yüksek doz biochar uygulamasında bitki kök uzunluğu, yaş ağırlığı ve kuru ağırlığındaki azalışlar bitkinin fosfor alımını da olumsuz etkilemiş olabilir.



Şekil 4.2.1. CdxBioC interaksiyonunun fosfor içeriğine etkisi

Tablo 4.2.3. Uygulamaların bitki potasyum içeriğine etkisine ait varyans analiz tablosu

V.K.	S.D.	Potasyum	
		KO	F değeri
Kadmiyum (Cd)	2	0.0131	0.06 öd
Biochar (BioC)	2	1.5377	7.67**
CdxBioC	4	0.2531	1.26 öd
Hata	18	0.2005	

*, %5; **, %1; ***, %0.1; öd, önemli değil

Tablo 4.2.3’de görüleceği üzere bitki potasyum içeriği üzerine kadmiyum ve interaksiyonun etkisi önemli değilken, biochar uygulaması %1 düzeyinde etki etmiştir.

Tablo 4.2.4. Uygulamaların bitki potasyum içeriğine etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, %

Kadmiyum, mg kg ⁻¹	Biochar, %			
	0	2	4	Ortalama
0	2.767 bc	3.592 ab	3.667 a	3.342
75	3.054 abc	3.592 ab	3.323 abc	3.323
150	2.712 c	3.186 abc	3.904 a	3.268
Ortalama	2.844 B	3.458 A	3.631 A	

A, B; a, b, c; aynı harf ile gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak fark yoktur

Biochar uygulamalarının ortalamalarında en yüksek potasyum içeriği %3.631 ile %4 biochar uygulamasında, en düşük bitki potasyum içeriği %2.844 ile %0 biochar uygulamasında elde edilmiştir. Kadmiyum ortalamaları incelendiğinde artan kadmiyum uygulamaları ile bitkinin potasyum içeriğinde önemsizde olsa azalmaya neden olmuş, en yüksek 0 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında, en düşük ise 150 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında sırasıyla %3.342 ve %3.268 olarak belirlenmiştir. İnteraksiyonun etkisini incelediğimizde en yüksek bitki potasyum içeriği %2.712

ile %0 biochar x 1500 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda yetişen bitkide, en düşük bitki potasyum içeriği ise %3.904 ile %4 biochar x 150 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda yetişen bitkilerde elde edilmiştir (Tablo 4.2.4).

Biochar uygulamaları ile bitkinin potasyum içeriğinde artış olduğu Aon ve ark. (2023) tarafından da bildirilmektedir. Bu durum biocharın sahip olduğu yüksek anyon değiştirme kapasitesinin uygulandığı toprağa kazandırdığı anyon tutabilme kapasitesindeki artış işle fosfat anyonlarından bitkilerin daha fazla yararlanmasını sağlamış olabilir (DeLuca ve ark., 2015). Ayrıca Potasyumun (K) bitkiler tarafından kullanılabilirliği esas olarak toprağın hidrolik iletkenliği, infiltrasyon hızı, kütle yoğunluğu ve toprak agregasyonu dahil olmak üzere fiziksel özelliklerinden etkilenir (Liang ve ark., 2021). Biochar uygulamalarının toprak düzenleyici görevi göstermesi ve toprağın organik madde durumunu artırarak toprağın fiziksel özelliklerini iyileştirmesi (DeLuca ve ark., 2015) potasyum alımını artırmada etki etmiş olabilir.

Tablo 4.2.5. Uygulamaların bitki kalsiyum içeriğine etkisine ait varyans analiz tablosu

V.K.	S.D.	Kalsiyum	
		KO	F değeri
Kadmiyum (Cd)	2	1.0886	5.26*
Biochar (BioC)	2	1.7703	8.56**
CdxBioC	4	0.8253	3.99*
Hata	18	0.2069	

*, %5; **, %1

Tablo 4.2.5’de görüleceği üzere bitki kalsiyum içeriği üzerine kadmiyum ve interaksiyonun etkisi %5 düzeyinde etki etmişken, biochar uygulaması %1 düzeyinde etki etmiştir.

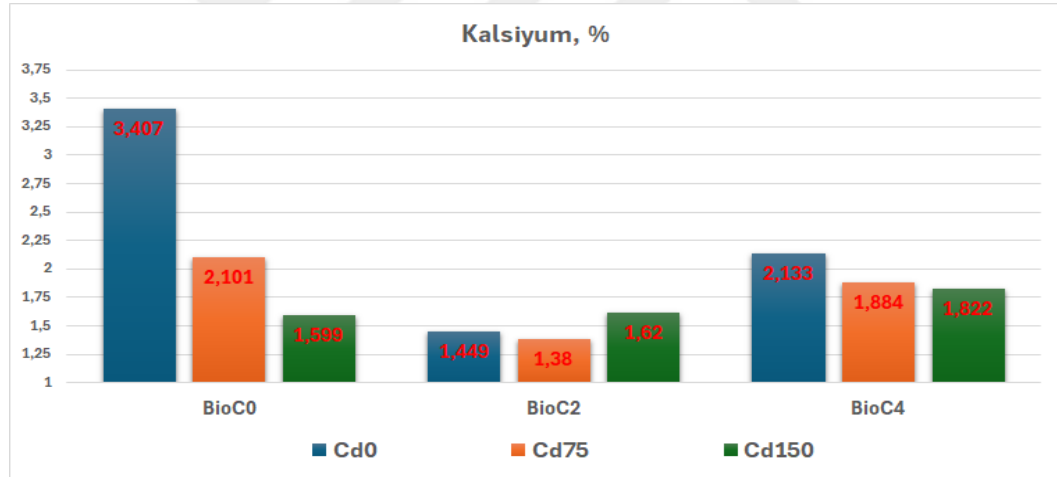
Tablo 4.2.6. Uygulamaların bitki kalsiyum içeriğine etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, %

Kadmiyum, mg kg ⁻¹	Biochar, %			
	0	2	4	Ortalama
0	3.407 a	1.449 b	2.133 b	2.329 A
75	2.101 b	1.380 b	1.884 b	1.788 B
150	1.599 b	1.620 b	1.822 b	1.681 B
Ortalama	2.369 A	1.483 B	1.946 A	

A, B; a, b; aynı harf ile gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak fark yoktur

Tablo 4.2.6’da görüleceği üzere biochar uygulamalarının ortalamalarında en yüksek kalsiyum içeriği %2.369 ile %0 biochar uygulamasında, en düşük bitki kalsiyum içeriği %1.483 ile %2 biochar uygulamasında elde edilmiştir. Kadmiyum uygulamalarının ortalamaları incelendiğinde artan kadmiyum uygulamaları ile bitkinin kalsiyum içeriğinde önemli düzeyde azalmaya neden olmuş, en yüksek 0 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında, en düşük ise 150 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında sırasıyla %2.329 ve %1.681 olarak belirlenmiştir. İnteraksiyonun etkisini incelediğimizde en yüksek bitki kalsiyum içeriği %3.407 ile %0 biochar x 0 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda yetişen bitkide, en düşük bitki kalsiyum içeriği ise %1.380 ile %2 biochar x 75 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda yetişen bitkilerde elde edilmiştir.

Biochar uygulanmayan ortamda yetişen bitkilere artan kadmiyum uygulamasında kalsiyum içeriğinde belirgin azalışlar olduğu görülmüştür (Tablo 4.2.6). Benzer olarak Çatav ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada kadmiyumun bitkinin kalsiyum içeriğini azalttığını bildirmişlerdir.



Şekil 4.2.2. CdxBioC interaksiyonunun kalsiyum içeriğine etkisi

Tablo 4.2.7’de görüleceği üzere bitki magnezyum içeriği üzerine kadmiyum uygulamasının etkisi önemsiz olarak belirlenmişken, biochar ve interaksiyonun etkisi %1 düzeyinde önemli etkide bulunmuştur.

Tablo 4.2.7. Uygulamaların bitki magnezyum içeriğine etkisine ait varyans analiz tablosu

V.K.	S.D.	Magnezyum	
		KO	F değeri
Kadmiyum (Cd)	2	0.0163	0.96 öd
Biochar (BioC)	2	0.2784	16.39***
CdxBioC	4	0.0813	2.78**
Hata	18	0.0169	

** , %1; *** , %0.1; öd, önemli değil

Tablo 4.2.8. Uygulamaların bitki magnezyum içeriğine etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, %

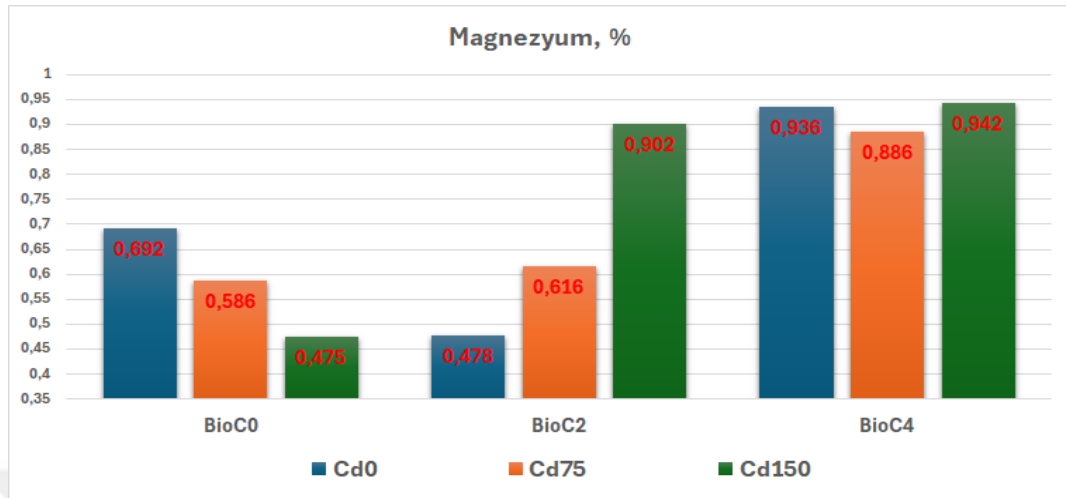
Kadmiyum, mg kg ⁻¹	Biochar, %			
	0	2	4	Ortalama
0	0.692 bc	0.478 c	0.936 a	0.702
75	0.586 c	0.616 c	0.886 ab	0.696
150	0.475 c	0.902 ab	0.942 a	0.773
Ortalama	0.584 B	0.665 B	0.921 A	

A, B; a, b, c; aynı harf ile gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak fark yoktur

Tablo 4.2.8’da görüleceği üzere biochar uygulamalarının ortalamalarında en yüksek magnezyum içeriği %0.921 ile %4 biochar uygulamasında, en düşük bitki magnezyum içeriği %0.584 ile %0 biochar uygulamasında elde edilmiştir. Kadmiyum uygulamalarının ortalamaları incelendiğinde artan kadmiyum uygulamaları ile bitkinin magnezyum içeriğinde önce azalma, sonra artış elde edilmiştir. Bu azalışın ve artışın önemsiz olduğu görülmektedir.

İnteraksiyonun etkisini incelediğimizde en yüksek bitki magnezyum içeriği %0.942 ile %4 biochar x 150 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda yetişen bitkide, en düşük bitki magnezyum içeriği ise %0.475 ile %0 biochar x 150 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda yetişen bitkilerde elde edilmiştir. Biochar uygulanmayan ortamlarda artan kadmiyum dozları bitkinin magnezyum içeriğini düşürmüştür. 0 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında %0.692 olan magnezyum içeriği 150 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında %0.475’a düşürmüştür. Kadmiyum uygulanmayan ortamlarda biocharın artan dozu bitkinin magnezyum içeriğini önce düşürmüş sonra artırmıştır. Biocharın %0 dozunda %0.692 olan magnezyum içeriği % doz uygulamasında %0.478’e düşmüş, %4 biochar uygulamasında %0.936’a yükselmiştir (Şekil 4.2.3). Miller (2010) yaptığı çalışmada biochar ve ahır gübresinin birlikte uygulanmasının kontrole göre buğdayın magnezyum içeriğini artırdığını bildirmiştir. Benzer olarak Major ve ark (2010) biochar uygulamaları ile bitkinin magnezyum içeriğinin arttığını ifade etmişlerdir. Kadmiyum ile magnezyum ilişkisi için yapılan

çalışmalarda kadmiyum uygulamalarının artışı ile bitkinin magnezyum içeriğinin azaldığı Nikolić ve ark (2014) tarafından da bildirilmiştir.



Şekil 4.2.3. CdxBioC interaksiyonunun magnezyum içeriğine etkisi

4.3. Uygulamaların Bitkinin Mikro Element İçeriğine Etkisi

Kadmiyum ve biochar uygulamalarının bitkinin demir, mangan, çinko ve bakır içerikleri üzerine etkisine ait varyans analiz sonuçları Tablo 4.3.1, Tablo 4.3.3, Tablo 4.3.5 ve Tablo 4.3.7’de, ortalamalar ve Duncan harflendirmelere ait sonuçlar Tablo 4.3.2, Tablo 4.3.4, Tablo 4.3.6 ve Tablo 4.3.8’de verilmiştir.

Tablo 4.3.1. Uygulamaların bitki demir içeriğine etkisine ait varyans analiz tablosu

V.K.	S.D.	Demir	
		KO	F değeri
Kadmiyum (Cd)	2	20199	7.15**
Biochar (BioC)	2	46151	16.35***
CdxBioC	4	10615	3.76*
Hata	18	2822	

*, %5; **, %1; ***, %0.1

Tablo 4.3.1’de görüleceği üzere bitki demir içeriği üzerine kadmiyum uygulamasının etkisi %1 düzeyin, biochar uygulaması %0.1 düzeyinde ve interaksiyonun etkisi %5 düzeyinde etkide bulunmuştur.

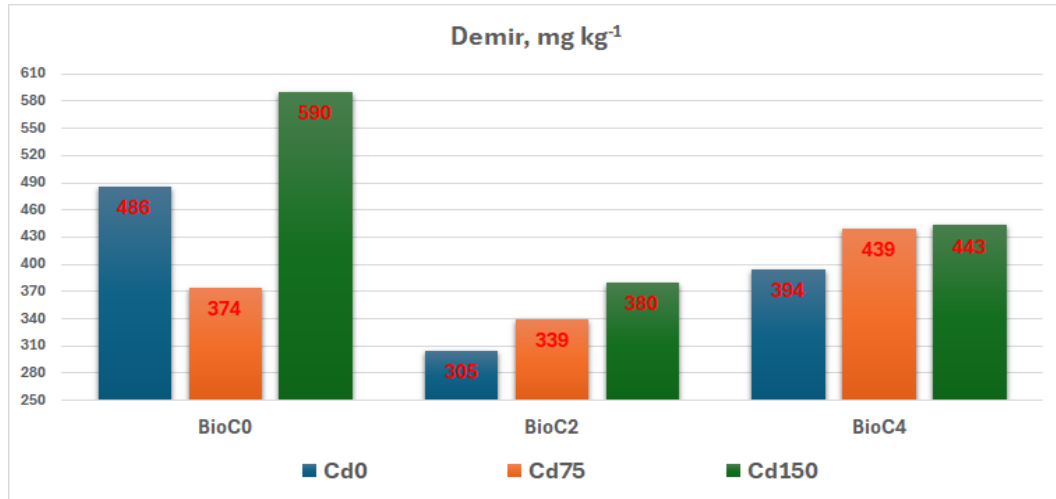
Tablo 4.3.2. Uygulamaların bitki demir içeriğine etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, mg kg⁻¹

Kadmiyum, mg kg ⁻¹	Biochar, %			Ortalama
	0	2	4	
0	486 b	305 d	394 bcd	395 B
75	374 cd	339 d	439 bc	384 B
150	590 a	380 cd	443 bc	471 A
Ortalama	483 A	341 C	425 A	

A, B, C; a, b, c, d; aynı harf ile gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak fark yoktur

Tablo 4.3.2’de görüleceği üzere biochar uygulamalarının ortalamalarında en yüksek demir içeriği 483 mg kg⁻¹ ile %0 biochar uygulamasında, en düşük bitki demir içeriği 341 mg kg⁻¹ ile %2 biochar uygulamasında elde edilmiştir. Kadmiyum uygulamalarının ortalamaları incelendiğinde artan kadmiyum uygulamaları ile bitkinin demir içeriğinde önemli düzeyde artışa neden olmuş, en yüksek 150 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında, en düşük ise 0 ve 75 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında sırasıyla 471 mg kg⁻¹, 395 mg kg⁻¹ ve 384 mg kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

İnteraksiyonun etkisini incelediğimizde en yüksek bitki demir içeriği 590 mg kg⁻¹ ile %0 biochar x 150 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda yetişen bitkide, en düşük bitki demir içeriği ise 305 mg kg⁻¹ ile %2 biochar x 0 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda yetişen bitkilerde elde edilmiştir (Şekil 4.3.1).



Şekil 4.3.1. CdxBioC interaksiyonunun demir içeriğine etkisi

Ortama biochar uygulanmadığı koşullarda bitkinin demir içeriği en yüksek seviyeye çıkarken biocharın mevcudiyetinde demir içeriğinin düştüğünü görmekteyiz (Şekil 4.3.1). Bu durum biocharın organik toprak düzenleyici vasfında olması (Bashir ve ark., 2020) ve içermiş olduğu humik asidin ağır metallerle

kompleks bileşikler oluşturarak (Lwin ve ark., 2018) onların alınımını dengelemesinden ileri gelmektedir. Ayrıca aşırı Cd, kök yüzeyindeki rekabet nedeniyle bitkilerin Zn, Mn ve Fe gibi önemli besin maddelerini alınımını olumsuz yönde etkilediği (Abedi ve Mojiri, 2020) bildirilmektedir.

Tablo 4.3.3. Uygulamaların bitki mangan içeriğine etkisine ait varyans analiz tablosu

V.K.	S.D.	Mangan	
		KO	F değeri
Kadmiyum (Cd)	2	2977	0.88 öd
Biochar (BioC)	2	24367	7.18 **
CdxBioC	4	14672	4.32 *
Hata	18	3392	

*, %5; **, %1; öd, önemli değil

Tablo 4.3.3'de görüleceği üzere bitki mangan içeriği üzerine kadmiyum uygulamasının etkisi önemsiz iken biochar uygulaması %1 düzeyinde ve interaksiyon %5 düzeyinde etkide bulunmuştur.

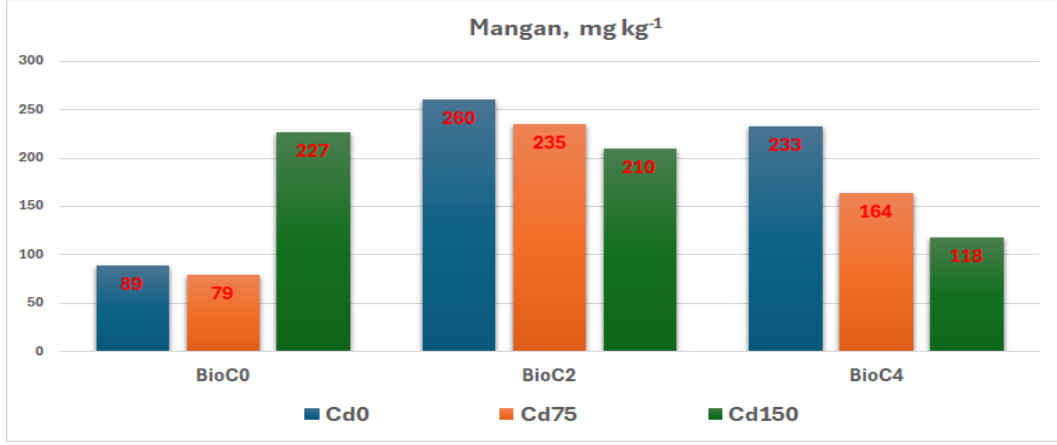
Tablo 4.3.4. Uygulamaların bitki mangan içeriğine etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, mg kg⁻¹

Kadmiyum, mg kg ⁻¹	Biochar, %			
	0	2	4	Ortalama
0	89.5 c	260.1 a	232.7 a	194.1
75	78.9 c	234.5 a	163.5 abc	158.9
150	226.5 a	209.7 ab	117.7 bc	184.6
Ortalama	131.6 B	234.8 A	171.3 B	

A, B, C; a, b, c, d; aynı harf ile gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak fark yoktur

Tablo 4.3.4'de görüleceği üzere biochar uygulamalarının ortalamalarında en yüksek mangan içeriği 234.8 mg kg⁻¹ ile %2 biochar uygulamasında, en düşük bitki mangan içeriği 131.6 mg kg⁻¹ ile %0 biochar uygulamasında elde edilmiştir. Kadmiyum uygulamalarının ortalamaları incelendiğinde artan kadmiyum uygulamaları ile bitkinin mangan içeriğinde önemsizde olsa azalmaya neden olmuş, en yüksek 0 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında, en düşük ise 75 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında sırasıyla 194.1 mg kg⁻¹ ve 158.9 mg kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

İnteraksiyonun etkisini incelediğimizde en yüksek bitki mangan içeriği 260.1 mg kg⁻¹ ile %2 biochar x 0 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda yetişen bitkide, en düşük bitki mangan içeriği ise 78.9 mg kg⁻¹ ile %0 biochar x 75 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda yetişen bitkilerde elde edilmiştir (Şekil 4.3.2).



Şekil 4.3.2. CdxBioC interaksiyonunun mangan içeriğine etkisi

Biocharın uygulanmadığı ortamlarda artan kadmiyum ile bitkinin mangan içeriği belirgin şekilde artış göstermiştir. Bu durum kadmiyum toksisitesinde bitkilerin elektrolit sızıntısı (EL) ve hidrojen peroksit (H₂O₂) ile malondialdehit içeriğinin aşırı üretimi (Abbas ve ark., 2017) gerçekleşmekte. Bu bağlamda özellikle hidrojen peroksitin parçalanmasında görev alan stres enzimlerinden olan MnSOD enziminin yapısında yer alması (Kacar ve Katkat, 2023) nedeniyle kadmiyum uygulama dozuna bağlı olarak bitkinin mangan içeriği de artmıştır.

Tablo 4.3.5. Uygulamaların bitki çinko içeriğine etkisine ait varyans analiz tablosu

V.K.	S.D.	Çinko	
		KO	F değeri
Kadmiyum (Cd)	2	1500.12	25.58***
Biochar (BioC)	2	584.094	9.96**
CdxBioC	4	3283.68	55.99***
Hata	18	58.6461	

** , %1; *** , %0.1

Tablo 4.3.5'te görüleceği üzere bitki çinko içeriği üzerine kadmiyum uygulamasının etkisi %0.1 düzeyinde, biochar uygulaması %1 düzeyinde ve interaksiyonun etkisi %0.1 düzeyinde önemli etkide bulunmuştur.

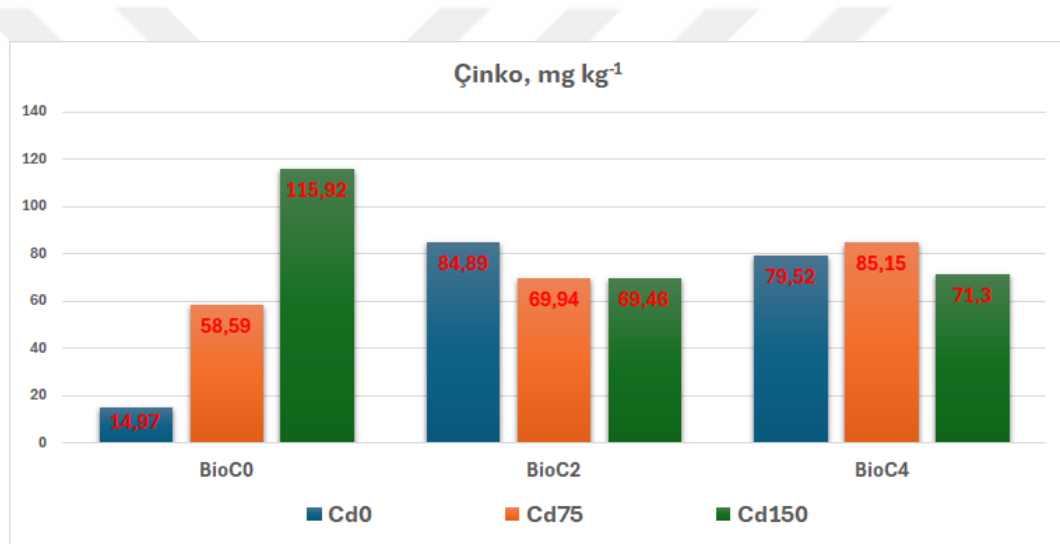
Tablo 4.3.6. Uygulamaların bitki çinko içeriğine etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, mg kg⁻¹

Kadmiyum, mg kg ⁻¹	Biochar, %			
	0	2	4	Ortalama
0	14.97 e	84.89 b	79.52 bc	59.79 C
75	58.59 d	69.94 cd	85.15 b	71.20 B
150	115.92 a	69.46 cd	71.30 bcd	85.56 A
Ortalama	63.16 B	74.73 A	78.66 A	

A, B, C; a, b, c, d; aynı harf ile gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak fark yoktur

Tablo 4.3.6’da görüleceği üzere biochar uygulamalarının ortalamalarında en yüksek çinko içeriği 78.66 mg kg^{-1} ile %4 biochar uygulamasında, en düşük bitki çinko içeriği 63.16 mg kg^{-1} ile %0 biochar uygulamasında elde edilmiştir. Kadmiyum uygulamalarının ortalamaları incelendiğinde artan kadmiyum uygulamaları ile bitkinin çinko içeriğinde önemli düzeyde artışa neden olmuş, en yüksek $150 \text{ mg Cd kg}^{-1}$ uygulamasında, en düşük ise 0 mg Cd kg^{-1} uygulamasında sırasıyla 85.56 mg kg^{-1} ve 59.79 mg kg^{-1} olarak belirlenmiştir.

İnteraksiyonun etkisini incelediğimizde en yüksek bitki çinko içeriği 115 mg kg^{-1} ile %0 biochar x $150 \text{ mg Cd kg}^{-1}$ uygulanmış ortamda yetişen bitkide, en düşük bitki çinko içeriği ise 14.97 mg kg^{-1} ile %0 biochar x 0 mg Cd kg^{-1} uygulanmış ortamda yetişen bitkilerde elde edilmiştir (Şekil 4.3.3).



Şekil 4.3.3. CdxBioC interaksiyonunun çinko içeriğine etkisi

Biochar uygulanmayan ortamlarda artan kadmiyum dozları ile bitkinin çinko içeriği belirgin şekilde artış göstermiştir (Şekil 4.3.3). Yapılan çalışmalarda çinko ile kadmiyum arasında antagonistik ilişki (Zaho ve ark. 2005) olduğu ifade edilmesine karşılık bizim çalışmamızda kadmiyumun artışı ile bitkinin çinko içeriği de artmıştır. Bu durum muhtemelen çinkonun antioksidant enzimlerin aktivatörü (Safifullah ve ark., 2016) olmasından ve aşırı kadmiyumun neden olabileceği oksidatif zararlanmayı engelleme yönünde bitkinin bir savunması olarak düşünülebilir.

Tablo 4.3.7. Uygulamaların bitki bakır içeriğine etkisine ait varyans analiz tablosu

V.K.	S.D.	Bakır	
		KO	F değeri
Kadmiyum (Cd)	2	0.6122	0.34 öd
Biochar (BioC)	2	223.75	125.77***
CdxBioC	4	64.349	36.17***
Hata	18	1.7789	

***, %0.1; öd, önemli değil

Tablo 4.3.7’de görüleceği üzere bitki bakır içeriği üzerine kadmiyum uygulamasının etkisi önemsiz olarak belirlenmişken biochar ve interaksyonun etkileri %0.1 düzeyinde önemli bulunmuştur.

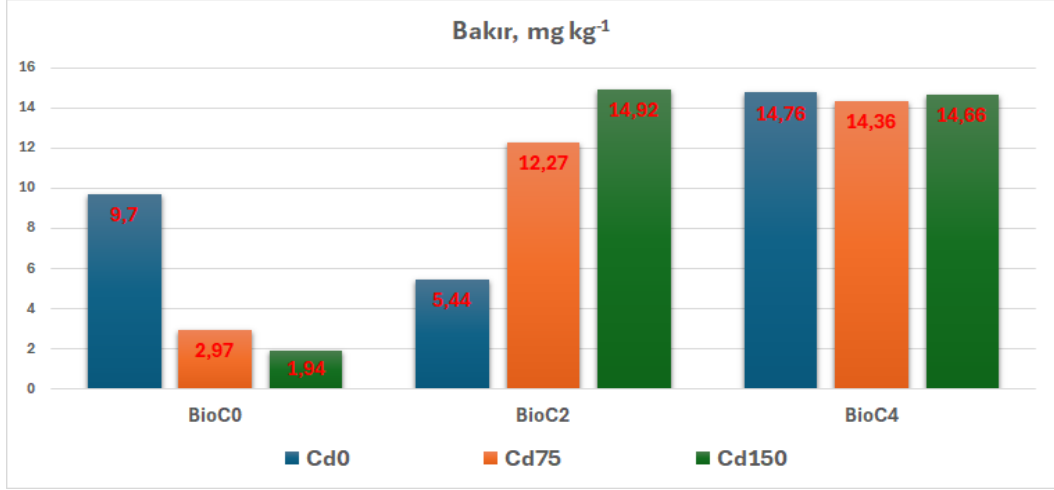
Tablo 4.3.8. Uygulamaların bitki bakır içeriğine etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, mg kg⁻¹

Kadmiyum, mg kg ⁻¹	Biochar, %			
	0	2	4	Ortalama
0	9.70 c	5.44 d	14.76 a	9.97
75	2.97 e	12.27 b	14.36 ab	9.86
150	1.49 e	14.92 a	14.66 ab	10.36
Ortalama	4.72 C	10.88 B	14.59 A	

A, B, C; a, b, c, d, e; aynı harf ile gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak fark yoktur

Tablo 4.3.8’de görüleceği üzere biochar uygulamalarının ortalamalarının bakır içeriğine etkisi incelendiğinde artan biochar ile bakır içeriği artmış ve en yüksek bakır içeriği 14.59 mg kg⁻¹ ile %4 biochar uygulamasında, en düşük bitki bakır içeriği 4.72 mg kg⁻¹ ile %0 biochar uygulamasında elde edilmiştir. Kadmiyum uygulamalarının ortalamaları incelendiğinde artan kadmiyum uygulamaları ile bitkinin bakır içeriğinde önemsiz de artışa neden olmuş ve en yüksek 150 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında, en düşük ise 0 ve 75 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında sırasıyla 10.36 mg kg⁻¹, 9.97 mg kg⁻¹ ve 9.86 mg kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

İnteraksiyonun etkisini incelediğimizde biochar olmayan ortamlarda kadmiyum uygulamaları bakır içeriğini azaltmıştır. Bu azalış eğilimi %2 biochar uygulamasında da elde edilmişken %4 biochar uygulamasında bakır içeriğinde azalış olmamakla beraber hatta artış elde edilmiştir. En yüksek bitki bakır içeriği 14.92 mg kg⁻¹ ile %2 biochar x 150 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda yetişen bitkide, en düşük bitki bakır içeriği ise 1.49 mg kg⁻¹ ile %0 biochar x150 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda yetişen bitkilerde elde edilmiştir (Şekil 4.3.4).



Şekil 4.3.4. CdxBioC interaksiyonunun bakır içeriğine etkisi

Kadmiyum dozunun artışı ile bakır içeriğinde görülen düşüş muhtemelen kadmiyum dozunun artışı ile bitkinin çinko, demir ve mangan içeriklerindeki artışın getirmiş olduğu bir durumdan kaynaklanmış olabilir. Nitekim bakır, demir, mangan ve çinko elementleri arasında antagonistik ilişki (Kacar ve Katkat, 2023) olduğu bildirilmektedir. Farklı bir bakış açısı olarak bakır elementinin, kalsiyuma kıyasla bitki hücre duvarlarından seçici olarak adsorbe edilir (Van Cutsem ve Gillet 1982) ve hücre duvarlarındaki poligalakturonik asitlere kalsiyumdan daha yüksek bir afiniteye sahiptir (Ernst ve ark. 1992). Bakır kök apoplastını geçtikten sonra muhtemelen Ca alımını da engelleyebilir veya plazmalemmadaki aynı alım bölgeleri için Ca ile rekabet edebilir (Clarkson ve Lüttge 1989, Piñeros ve Tester 1997, White 1998) olması nedeniyle çalışmamızda hem bakır hem de kalsiyum alımı düşmüştür (Şekil 4.2.2 ve Şekil 4.3.4). Yine kadmiyum içeriğindeki artış (Şekil 4.4.1) bakırın alımını azaltmış olabilir. Şekil 4.4.2’de görüleceği üzere nikel içeriğinin artışı bakırın alımını engellemiş olabilir. Kochian (1991)’nın bildirildiğine göre Cu^{2+} ve Zn^{2+} , Ni^{2+} alımını bir şekilde engellemekte çünkü bu üç çözünebilir metal iyonunun aynı taşıma sistemi tarafından bitkiye alımını gerçekleştirilmektedir.

4.4. Uygulamaların Bitkinin Ağır Metal İçeriğine Etkisi

Kadmiyum ve biochar uygulamalarının bitkinin kadmiyum, nikel ve kurşun ağır metal içerikleri üzerine etkisine ait varyans analiz sonuçları Tablo 4.4.1, Tablo

4.4.3 ve Tablo 4.4.5'te, ortalamalar ve Duncan harflendirmelerine ait sonuçlar Tablo 4.4.2, Tablo 4.4.4 ve Tablo 4.4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.4.1. Uygulamaların bitki kadmiyum içeriğine etkisine ait varyans analiz tablosu

V.K.	S.D.	Kadmiyum	
		KO	F değeri
Kadmiyum (Cd)	2	7697	415.31***
Biochar (BioC)	2	649.8	35.06***
CdxBioC	4	233.2	12.58***
Hata	18	18.53	

***, %0.1

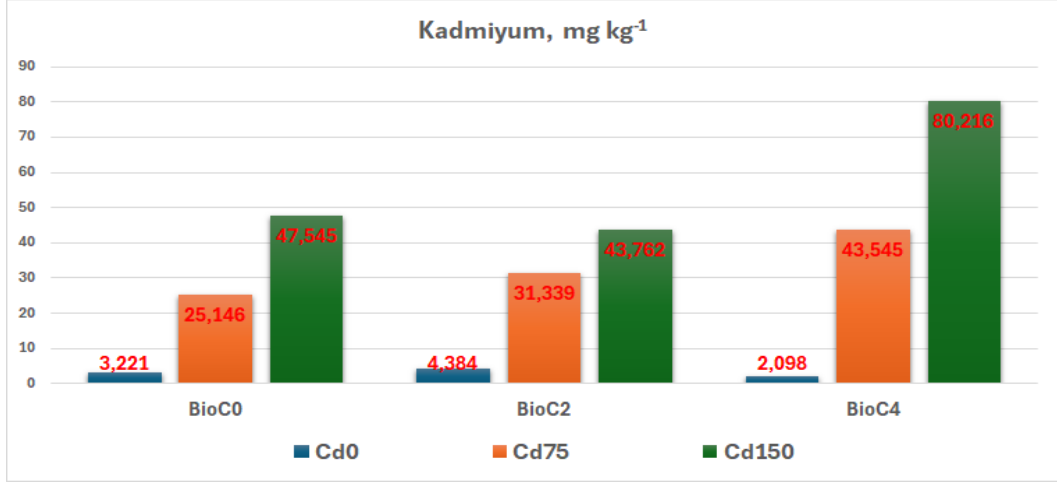
Tablo 4.4.1'de görüleceği üzere bitki kadmiyum içeriği üzerine kadmiyum, biochar ve interaksiyonun %0.1 düzeyinde çok önemli etkilerde bulunmuşlardır.

Tablo 4.4.2. Uygulamaların bitki kadmiyum içeriğine etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, mg kg⁻¹

Kadmiyum, mg kg ⁻¹	Biochar, %			
	0	2	4	Ortalama
0	3.221 e	4.384 e	2.098 e	3.235 C
75	25.146 d	31.339 d	43.545 c	33.416 B
150	47.545 c	43.762 c	80.216 a	61.714 A
Ortalama	25.545 C	31.035 B	42.025 A	

A, B, C; a, b, c, d, e; aynı harf ile gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak fark yoktur

Tablo 4.4.2'de görüleceği üzere biochar uygulamalarının artışı ile bitkinin kadmiyum içeriği artmış ve en yüksek kadmiyum içeriği 42.025 mg kg⁻¹ ile %4 biochar uygulamasında, en düşük bitki kadmiyum içeriği 25.545 mg kg⁻¹ ile %0 biochar uygulamasında elde edilmiştir. Kadmiyum uygulamalarının artışı ile belirgin bir artış elde edilmiş ve en yüksek 150 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında, en düşük ise 0 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında sırasıyla 61.714 mg kg⁻¹ ve 3.235 mg kg⁻¹ olarak belirlenmiştir. İnteraksiyonun etkisini incelediğimizde en yüksek bitki kadmiyum içeriği 80.216 mg kg⁻¹ ile %4 biochar x 150 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda yetişen bitkide, en düşük bitki kadmiyum içeriği ise 3.221 mg kg⁻¹ ile %0 biochar x 0 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda yetişen bitkilerde elde edilmiştir.



Şekil 4.4.1. CdxBioC interaksiyonunun kadmiyum içeriğine etkisi

Gerek kadmiyum gerekse biochar uygulamalarının artışı ile bitkinin kadmiyum içeriğinde belirgin artışlar elde edilmiştir. Bu durum biocharın muhtemelen kadmiyum içeriğinin yüksek oluşundan kaynaklanmış olabilir. Ayrıca suda çözünür formda kadmiyum uygulaması da bitkinin kadmiyum alımını arttırmıştır. Kadmiyum hem apoplastik hemde simplastik yollar ile kök, gövde ve yapraklara taşınabilmektedir (Lux ve ark., 2011). Benzer olarak yapılan çalışmalarda kadmiyum ilavesi ile bitkinin kadmiyum alımının arttığı bildirilmektedir (Koleva ve ark., 2008; Lu ve ark., 2020; Halim ve ark., 2021; Özyiğit ve ark., 2021; Liu ve ark., 2023).

Tablo 4.4.3. Uygulamaların bitki nikel içeriğine etkisine ait varyans analiz tablosu

V.K.	S.D.	Nikel	
		KO	F değeri
Kadmiyum (Cd)	2	43.106	26.39***
Biochar (BioC)	2	88.346	54.11***
CdxBioC	4	18.414	11.28***
Hata	18	1.633	

***, %0.1

Tablo 4.4.3'te görüleceği üzere bitki nikel içeriği üzerine kadmiyum, biochar ve interaksiyonun %0.1 düzeyinde çok önemli etkilerde bulunmuşlardır.

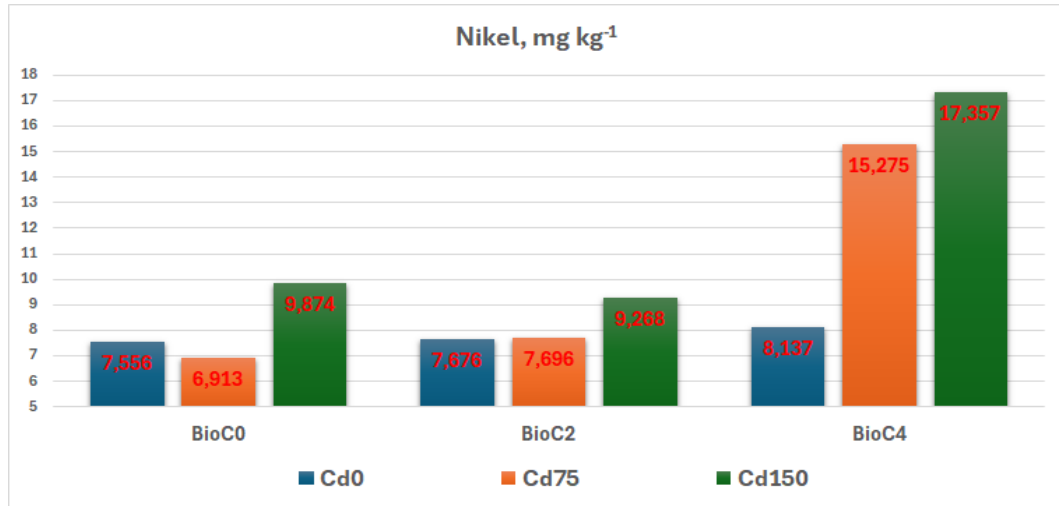
Tablo 4.4.4. Uygulamaların bitki nikel içeriğine etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, mg kg⁻¹

Kadmiyum, mg kg ⁻¹	Biochar, %			Ortalama
	0	2	4	
0	7.556 bc	7.676 bc	8.137 bc	7.789 C
75	6.913 c	7.696 bc	15.275 a	9.961 B
150	9.874 b	9.268 bc	17.357 a	12.167 A
Ortalama	8.115 B	8.213 B	13.589 A	

A, B, C; a, b, c, d; aynı harf ile gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak fark yoktur

Tablo 4.4.4’de görüleceği üzere biochar uygulamalarının artışı ile bitki nikel içeriği artış göstermiştir. Biochar ortalamaları incelendiğinde en yüksek nikel içeriği 13.589 mg kg⁻¹ ile %4 biochar uygulamasında, en düşük bitki nikel içeriği 8.115 mg kg⁻¹ ile %0 biochar uygulamasında elde edilmiştir. Kadmiyum uygulamaları ile nikel içeriği artış göstermiştir. Kadmiyum ortalamaları incelendiğinde en yüksek nikel içeriği 150 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında, en düşük nikel içeriği ise 0 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında sırasıyla 12.167 mg kg⁻¹ ve 7.789 mg kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

İnteraksiyonun etkisini incelediğimizde en yüksek bitki nikel içeriği 17.357 mg kg⁻¹ ile %4 biochar x 150 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda yetişen bitkide, en düşük bitki nikel içeriği ise 6.913 mg kg⁻¹ ile %0 biochar x 75 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda yetişen bitkilerde elde edilmiştir (Şekil 4.4.2).



Şekil 4.4.2. CdxBioC interaksiyonunun nikel içeriğine etkisi

Biochar uygulanmayan ortamlarda kadmiyum 0 mg kg⁻¹ dozuna göre 150 mg kg⁻¹ dozunda bir miktar artış elde edilmişken, %4 biochar uygulanmış ortamlarda 150 mg kg⁻¹ kadmiyum uygulaması en yüksek nikel içeriğine

ulaştırmıştır (Şekil 4.4.2). Bulgularımızın aksine biochar uygulamaları ağır metallerin biocharın aktif bölgelerine bağlanarak topraktaki hareketliliğini ve bitkilere biyoyararlılığını önemli ölçüde azalttığı (Machida ve ark., 2005) bildirilmektedir. Çalışmamızda kadmiyum uygulanmış ortamlarda biocharın artan dozu ile bitkinin nikel içeriği artmıştır. Fiala ve ark. (2015) yaptıkları araştırmada hem kadmiyum hemde nikelin birlikte uygulanmasının bir sonucu olarak bitki kök hücrelerinin süperoksit üretiminin arttığı ve hücre ölümlerinin gerçekleştiğini bildirmişlerdir. Bu bağlamda bitkinin üst organlarına daha fazla ağır metal taşınımı gerçekleştiğini ifade edebiliriz.

Tablo 4.4.5. Uygulamaların bitki kurşun içeriğine etkisine ait varyans analiz tablosu

V.K.	S.D.	Kurşun	
		KO	F değeri
Kadmiyum (Cd)	2	15.025	6.36**
Biochar (BioC)	2	15.173	6.42**
CdxBioC	4	16.669	7.05**
Hata	18	2.363	

**,%1

Tablo 4.4.5'te görüleceği üzere bitki kurşun içeriği üzerine kadmiyum, biochar ve interaksiyonun etkileri %1 düzeyinde önemli bulunmuştur.

Tablo 4.4.6. Uygulamaların bitki kurşun içeriğine etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, mg kg⁻¹

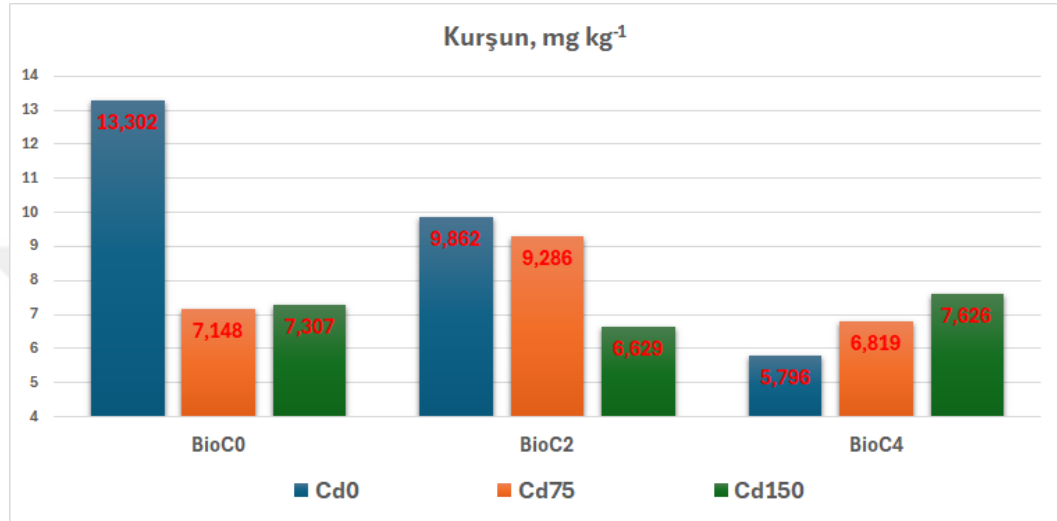
Kadmiyum, mg kg ⁻¹	Biochar, %			
	0	2	4	Ortalama
0	13.302 a	9.862 ab	5.796 b	9.653 A
75	7.148 b	9.286 ab	6.819 b	7.751 B
150	7.307 b	6.629 b	7.626 b	7.187 B
Ortalama	9.252 A	8.592 A	6.747B	

A, B; a, b; aynı harf ile gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak fark yoktur

Tablo 4.4.6'da görüleceği üzere biochar uygulamalarının ortalamaları incelendiğinde uygulanan biochar miktarının artışı ile bitki kurşun içeriği azalmıştır. En yüksek kurşun içeriği 9.252 mg kg⁻¹ ile %0 biochar uygulamasında, en düşük bitki kurşun içeriği 6.747 mg kg⁻¹ ile %4 biochar uygulamasında elde edilmiştir. Kadmiyum uygulamalarının ortalamaları incelendiğinde artan kadmiyum uygulamaları ile bitkinin kurşun içeriğinde önemli düzeyde azalışa

neden olmuş ve en yüksek 0 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında, en düşük ise 150 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında sırasıyla 9.653 mg kg⁻¹ ve 7.187 mg kg⁻¹ olarak belirlenmiştir.

İnteraksiyonun etkisini incelediğimizde en yüksek bitki kurşun içeriği 13.302 mg kg⁻¹ ile %0 biochar x 0 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda yetişen bitkide, en düşük bitki kurşun içeriği ise 9.653 mg kg⁻¹ ile %4 biochar x 0 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamda yetişen bitkilerde elde edilmiştir (Şekil 4.4.3).



Şekil 4.4.3. CdxBioC interaksiyonunun kurşun içeriğine etkisi

Kadmiyum dozunun artışına bağlı olarak kurşun içeriğinde azalışlar hem %0 hem de %2 biochar uygulanmış ortamlarda belirlenmişken %4 biochar uygulamasında artış şeklinde bir sonuç elde edilmiştir. Aprile ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada buğday çeşitlerine kadmiyum ve kurşun uygulamaları yapmışlar. Kadmiyum uygulamalarının bitkinin kurşun içeriğini azalttığını, bunun nedeni olarak kadmiyum uygulamaları ile buğday bitkilerinin nikotinamin ve mugineik asit gibi metal şelatıcılarını salgılama miktarlarının arttığı ve böylece kadmiyum daha fazla alınımın gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. Ağır metallerin bitkilerde taşınmasında önemli bir rol oynayan ağır metal ATP'az (HMA's)'ları ağır metallerin simplasttan ksileme yüklenmesini gerçekleştirirler (Maccaferri ve ark., 2019). Hem Cd hem de Pb tek uygulamalarının ağır metal ATP'az (HMA's) miktarını artırdığı Aprile ve ark (2019) tarafından bildirilmiştir. Dolayısıyla %4 biochar uygulamasında belirlenen kurşun içeriğindeki artış bu durumdan kaynaklanmış olabilir.

4.5. Uygulamaların Yetiştirme Ortamının pH ve EC Değerine Etkileri

Kadmiyum ve biochar uygulamalarının yetiştirme ortamının pH ve EC değerleri üzerine etkisine ait varyans analiz sonuçları Tablo 4.5.1 ve Tablo 4.4.3'te, ortalamalar ve Duncan harflendirmelerine ait sonuçlar Tablo 4.5.2 ve Tablo 4.5.4'te verilmiştir.

Tablo 4.5.1. Uygulamaların yetiştirme ortamının pH içeriğine etkisine ait varyans analiz tablosu

V.K.	S.D.	Nikel	
		KO	F değeri
Kadmiyum (Cd)	2	0.02389	28.93***
Biochar (BioC)	2	0.15512	187.82***
CdxBioC	4	0.00685	8.30***
Hata	18	8.2592x10 ⁻⁴	

***, %0.1

Tablo 4.5.1'de görüleceği üzere kadmiyum, biochar ve interaksiyon yetiştirme ortamının pH'sı üzerine %0.1 düzeyinde çok önemli etkilerde bulunmuşlardır.

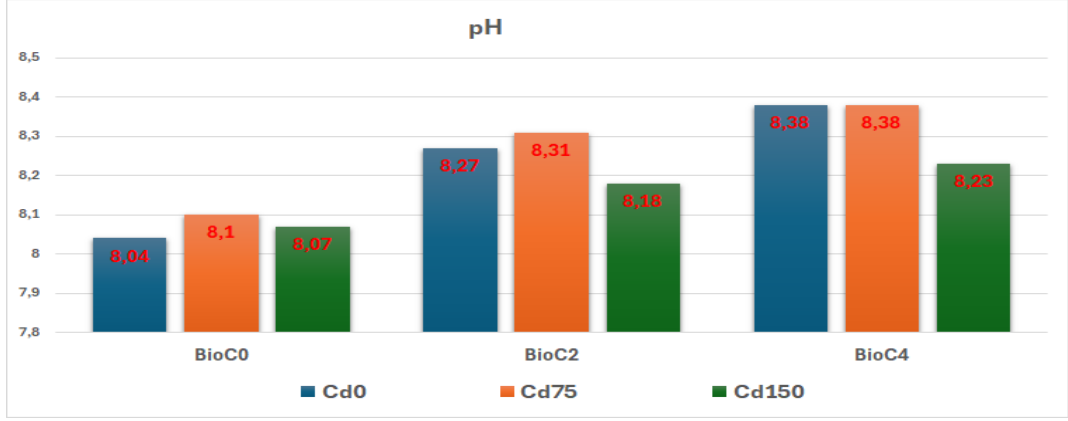
Tablo 4.5.2. Uygulamaların yetiştirme ortamının pH içeriğine etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu

Kadmiyum, mg kg ⁻¹	Biochar, %			
	0	2	4	Ortalama
0	8.04 f	8.27 bc	8.38 a	8.23 B
75	8.10 e	8.31b	8.38 a	8.26 A
150	8.07 ef	8.18 d	8.23 c	8.16 C
Ortalama	8.07 C	8.25 B	8.33 A	

A, B, C; a, b, c, d, e, f; aynı harf ile gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak fark yoktur

Tablo 4.5.2'de görüleceği üzere biochar uygulamalarının artışı ile yetiştirme ortamının pH'sında artış elde edilmiştir. Biochar ortalamaları incelendiğinde en yüksek pH değeri 8.33 ile %4 biochar uygulamasında, en düşük 8.07 ile %0 biochar uygulamasında elde edilmiştir. Kadmiyum uygulamaları ile pH değerinde önce artış sonra düşüş belirlenmiştir. Kadmiyum ortalamaları incelendiğinde en yüksek pH değeri 75 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında, en düşük pH değeri ise 150 mg Cd kg⁻¹ uygulamasında sırasıyla 8.26 ve 8.16 olarak belirlenmiştir.

İnteraksiyonun etkisini incelediğimizde en yüksek pH değeri 8.38 ile %4 biochar x 0 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış ortamında, en pH değeri ise 8.04 ile %0 biochar x 0 mg Cd kg⁻¹ uygulanmış yetiştirme ortamında belirlenmiştir (Şekil 4.5.1).



Şekil 4.5.1. CdxBioC interaksyonunun pH üzerine etkisi

Biochar uygulamaları ile yetiştirme ortamının pH'sında önemli artış elde edilmiştir. Bu durumun bir sebebi biocharın içermiş olduğu yüksek değişebilir kation içeriğinden (Zhang ve ark., 2015) ileri geldiği düşünülmektedir. Nitekim birçok araştırmacı (Jeffrey ve ark., 2009; Zheng ve ark., 2010; Peng ve ark., 2011; Bai ve ark., 2022) biochar uygulamalarının toprak pH'sını artırdığı, bir kısım araştırmacı ise pH'yı düşürdüğünü (Cheng ve ark., 2006; Abdulwahhab ve Şeker, 2021) bildirmişlerdir. Bu durum bir sebebi de biocharın yüzeyindeki -COO- ve -O- gibi organik fonksiyonel gruplar ve karbonatlar biocharın alkaliliğinin ana formlarını oluşturmasından kaynaklanmaktadır (Hafshejani ve ark., 2016).

Tablo 4.5.3. Uygulamaların yetiştirme ortamının EC değerine etkisine ait varyans analiz tablosu

V.K.	S.D.	Kurşun	
		KO	F değeri
Kadmiyum (Cd)	2	42806	7.78**
Biochar (BioC)	2	1991761	362.21***
CdxBioC	4	26621	4.84**
Hata	18	5498	

,%1,*,%0.1

Tablo 4.5.3'te görüleceği üzere kadmiyum ve interaksyonun yetiştirme ortamının EC değerlerine etkileri %1 düzeyinde önemli iken, biochar uygulaması %0.1 düzeyinde önemli etkide bulunmuştur.

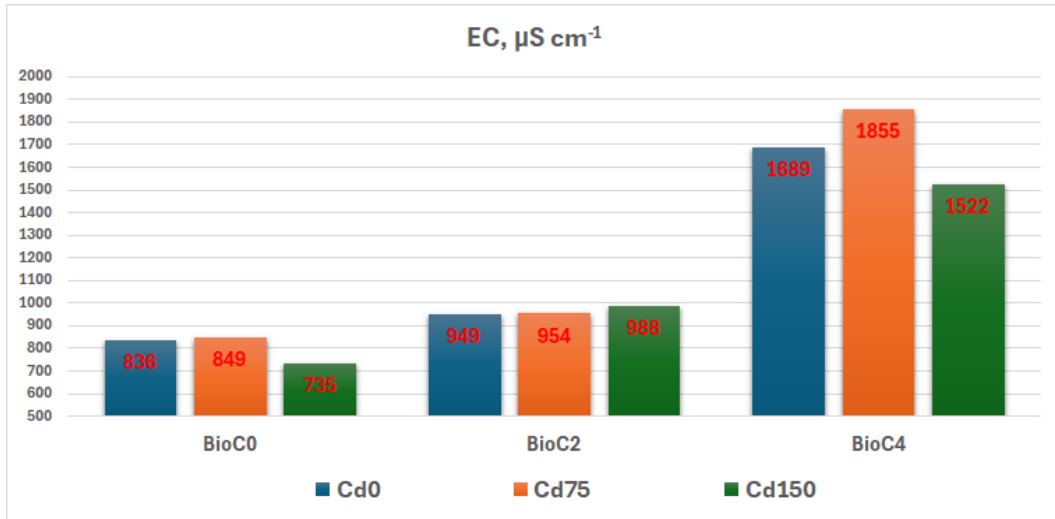
Tablo 4.5.4. Uygulamaların yetiştirme ortamının EC'sine etkisine ait ortalamalar ve Duncan harflendirme tablosu, $\mu\text{S cm}^{-1}$

Kadmiyum, mg kg^{-1}	Biochar, %			Ortalama
	0	2	4	
0	836 ef	949 de	1689 b	1158 A
75	849 ef	954 de	1855 a	1219 A
150	735 f	988 d	1522 c	1082 B
Ortalama	807 C	964 B	1689 A	

A, B; a, b, c, d, e, f; aynı harf ile gösterilen ortalamalar arasında istatistiksel olarak fark yoktur

Tablo 4.5.4.'de görüleceği üzere biochar uygulamalarının ortalamaları incelendiğinde uygulanan biochar miktarının artışı ile yetiştirme ortamının EC değeri artış göstermiştir. En yüksek EC değeri $1689 \mu\text{S cm}^{-1}$ ile %4 biochar uygulamasında, en düşük EC değeri $807 \mu\text{S cm}^{-1}$ ile %0 biochar uygulamasında elde edilmiştir. Kadmiyum uygulamalarının ortalamaları incelendiğinde artan kadmiyum uygulamaları ile EC değerinde önemli düzeyde azalış elde edilmiş ve en yüksek 0 mg Cd kg^{-1} uygulamasında, en düşük ise $150 \text{ mg Cd kg}^{-1}$ uygulamasında sırasıyla $1158 \mu\text{S cm}^{-1}$ ve $1082 \mu\text{S cm}^{-1}$ olarak belirlenmiştir.

İnteraksiyonun etkisini incelediğimizde en yüksek EC değeri $1855 \mu\text{S cm}^{-1}$ ile %4 biochar x 75 mg Cd kg^{-1} uygulanmış ortamda, en düşük ise $735 \mu\text{S cm}^{-1}$ ile %0 biochar x $150 \text{ mg Cd kg}^{-1}$ uygulanmış ortamda elde edilmiştir (Şekil 4.5.2).



Şekil 4.5.2. CdxBioC interaksiyonunun EC üzerine etkisi

Biochar uygulama dozlarının artışı ile toprak EC değeri artış göstermiştir. Bu sonuçlarımız Lehmann ve Joseph (2009) ve Tasneem ve Zahir (2017) ile uyumludur. Toprak EC'sinde belirlenen artış biocharın yapısında yer alan ve zayıf bağlı besin maddelerinin toprak çözeltisine çok kolay salınmasından kaynaklanmış

olabilir (Chintala ve ark. 2014). Çalışmamızda kullanılan biochar, tavuk altlığı atıklarının elektrik üretimi amacıyla gazlaştırma ve ORC yöntemi ile üretilmiş olup oldukça yüksek sıcaklıkta (yaklaşık 800⁰C) piroliz işlemine maruz bırakılmıştır. Dolayısıyla yüksek piroliz sıcaklıklarında üretilen biocharlar genellikle daha yüksek EC değerlerine sahiptir (Cantrell ve ark. 2012; Claoston ve ark. 2014; Rehrah ve ark. 2014). Bu etki, piroliz sırasında uçucu madde kaybının sonucunda kalıntı veya kül konsantrasyonunun artışından kaynaklanmaktadır (Cantrell ve ark. 2012). Bunun sonucunda uygulandıkları toprakların EC değerlerini artırması beklenebilir.

4.6. Korelasyon Analiz Sonucu

Tablo 4.6.1’de görüleceği üzere pH ile EC (0.799***), Cu, (0.568**), Fe(-0.409*), Mg (0.412), Mn (0.412*) ve kök kuru ağırlığı (-0.621***) arasında önemli ilişkiler belirlenmiştir. EC ile P (-0.617***), Cu (0.687***), Mg (0.659***), Ni (0.584**), bitki yaş ağırlığı (-0.381*), bitki kuru ağırlığı (-0.477*) ve kardeş sayısı (0.439*) arasında önemli ilişkiler belirlenmiştir. P ile Cd (-0.505**), Cu (-0.588**), Mg (0.430*), Pb (0.491*), kök uzunluğu (0.498**), bitki yaş ağırlığı (0.443*) ve bitki kuru ağırlığı (0.479*) arasında önemli ilişkiler belirlenmiştir. Ca ile K (0.456*), Mg (0.659***) ve Ni (0.584**) arasında önemli ilişkiler belirlenmiştir. Cd ile Ni (0.679***), bitki yaş ağırlığı (-0.423***), bitki kuru ağırlığı (-0.546**) ve kardeş sayısı (-0.447*) arasında önemli ilişkiler belirlenmiştir. Cu ile Mg (0.752***), arasında önemli ilişki belirlenmiştir. Fe ile kök uzunluğu (-0.563**), kök yaş ağırlığı (-0.394*) ve kardeş sayısı (-0.479*) arasında önemli ilişkiler belirlenmiştir. K ile Mg (0.436*) arasında önemli ilişki belirlenmiştir. Mg ile Ni (0.484*), kök uzunluğu (-0.440*) ve kardeş sayısı (-0.471*) arasında önemli ilişkiler belirlenmiştir. Mn ile kök kuru ağırlığı (-0.425*) arasında önemli ilişki belirlenmiştir. Ni ile bitki boyu (-0.476*), bitki yaş ağırlığı (-0.669***), bitki kuru ağırlığı (-0.695***), kök yaş ağırlığı (-0.442*), kök kuru ağırlığı (-0.561**) ve kardeş sayısı (-0.667***) arasında önemli ilişkiler belirlenmiştir. Pb ile Zn (-0.401*) arasında önemli ilişki belirlenmiştir. Bitki boyu ile bitki yaş ağırlığı (0.510**), bitki kuru ağırlığı (0.603***) ve kök kuru ağırlığı (0.450*) arasında önemli ilişkiler belirlenmiştir. Kök uzunluğu ile bitki yaş ağırlığı (0.576**), bitki kuru ağırlığı (0.590**) ve kardeş sayısı (-0.721***) arasında önemli ilişkiler

belirlenmiştir. Bitki yaş ağırlığı ile bitki kuru ağırlığı (0.746***), kök yaş ağırlığı (0.659***) ve kardeş sayısı (0.828***) arasında önemli ilişkiler belirlenmiştir. Bitki kuru ağırlığı ile kök yaş ağırlığı (0.585**), kök kuru ağırlığı (0.451*) ve kardeş sayısı (0.774***) arasında önemli ilişkiler belirlenmiştir. Kök yaş ağırlığı ile kök kuru ağırlığı (0.628***) ve kardeş sayısı (0.662***) arasında önemli ilişkiler belirlenmiştir.



Tablo 4.6.1. Korelasyon tablosu

	pH	EC	P	Ca	Cd	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Ni	Pb	Zn	BB	KU	BYA	BKA	KYA	KKA
pH	-																		
EC	0.749***	-																	
P	-0.313	-0.617***	-																
Ca	-0.229	-0.058	-0.061	-															
Cd	-0.036	0.179	-0.505**	-0.190	-														
Cu	0.568**	0.687***	-0.588**	0.072	0.216	-													
Fe	-0.409*	-0.074	-0.043	0.152	0.264	-0.227	-												
K	0.234	0.213	-0.314	0.456*	-0.102	0.343	-0.233	-											
Mg	0.389*	0.659***	-0.631***	0.430*	0.287	0.752***	-0.069	0.436*	-										
Mn	0.412*	0.006	0.329	-0.319	-0.102	0.048	-0.058	-0.014	-0.214	-									
Ni	0.315	0.584**	-0.731***	0.091	0.679***	0.355	0.229	0.197	0.484*	-0.103	-								
Pb	-0.211	-0.348	0.179	0.491**	-0.286	-0.179	0.119	0.338	-0.176	-0.091	-0.094	-							
Zn	0.211	0.111	-0.157	0.317	-0.078	0.121	0.182	0.214	0.144	0.152	0.251	0.401*	-						
BB	-0.343	-0.351	0.179	0.236	-0.353	-0.169	-0.019	0.115	-0.015	-0.114	-0.476*	0.185	0.013	-					
KU	0.208	-0.365	0.498**	-0.275	-0.339	-0.261	-0.563**	-0.132	-0.440*	0.358	-0.453	0.101	0.162	0.201	-				
BYA	-0.002	-0.381*	0.443*	-0.081	-0.423*	0.055	-0.419*	0.023	-0.227	0.360	-0.669***	0.071	0.034	0.510**	0.576**	-			
BKA	-0.178	-0.477*	0.479*	0.079	-0.546**	-0.214	-0.313	0.047	-0.288	0.092	-0.695***	0.118	0.066	0.603***	0.590**	0.746***	-		
KYA	-0.043	-0.226	-0.022	-0.091	-0.284	0.292	-0.394*	0.057	-0.113	-0.042	-0.442*	0.068	0.128	0.335	0.335	0.659***	0.585**	-	
KKA	-0.621***	-0.441*	0.205	0.139	-0.069	-0.131	0.078	-0.122	-0.268	-0.425*	-0.561**	0.208	-0.169	0.450*	-0.067	0.329	0.451*	0.628***	-
KS	-0.043	-0.469*	0.439*	-0.298	-0.447*	-0.201	-0.479*	-0.057	-0.471*	0.319	-0.667***	-0.009	-0.011	0.360	-0.721***	0.828***	0.774***	0.662***	0.356

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan araştırmada, biochar ve kadmiyumun buğdayın gelişim kriterleri ile besin elementleri ve ağır metal içeri ile toprak pH ve EC değerlerine etkisi incelenmiştir. Çalışma, biochar kullanımının, kadmiyum toksisitesinin çevre üzerindeki etkilerini azaltmada etkili bir rol oynayabileceğini göstermiştir. Biochar uygulandıktan sonra bitkinin kadmiyum içeriğinde önemli bir azalma gözlenmiştir. Bu durum, biocharın toprak kalitesini iyileştirme ve zararlı elementlerin varlığını azaltma yeteneğini göstermektedir.

Buna ek olarak, biocharın kısmen toprak pH'ını düzenleme yeteneği nedeniyle bitkilerin kadmiyum stresine karşı toleransını arttırdığı görülmüştür. Ayrıca biochar, bitkilerin besin alımını artırırken zararlı kadmiyum alımını da azaltmaktadır. Bu bulgular, biocharın kadmiyum kirliliğiyle mücadelede ve bitkileri zararlı etkilerinden korumada etkili bir araç olarak kullanılması fikrini desteklemektedir. Ancak, bu etkinin farklı toprak koşullarında ve çeşitli bitki grupları üzerindeki sonuçlarını daha iyi anlamak için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Bu, kadmiyum kirliliğinin etkilerini azaltmak ve genel toprak kalitesini iyileştirmek için daha etkili stratejilerin geliştirilmesine katkıda bulunabilir.

6. KAYNAKLAR

(Bu tez çalışmasında APA atıf sistemi kullanılmıştır.)

- Abbas, T., Rizwan, M., Ali, S., Adrees, M., Mahmood, A., Zia-ur-Rehman, M., ... & Qayyum, M. F. (2018). Biochar application increased the growth and yield and reduced cadmium in drought stressed wheat grown in an aged contaminated soil. *Ecotoxicology and environmental safety*, 148, 825-833.
- Abbas, T., Rizwan, M., Ali, S., Zia-ur-Rehman, M., Qayyum, M. F., Abbas, F., ... & Ok, Y. S. (2017). Effect of biochar on cadmium bioavailability and uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in a soil with aged contamination. *Ecotoxicology and environmental safety*, 140, 37-47.
- Abdul-Aziz, A. L. (2021). Biyokömürün toprağın biyolojik özellikleri üzerine etkilerinin incelenmesi.
- Abdulwahhab, Q. R., & Şeker, C. (2021). Short-Term Impacts of Biochar Applications on Physico-Mechanic and Chemical Properties of Two Contrasting Textured Soils. *Selçuk Journal of Agriculture and Food Sciences*, 35(2), 83-90.
- Abedi, T., & Mojiri, A. (2020). Cadmium uptake by wheat (*Triticum aestivum* L.): An overview. *Plants*, 9(4), 500.
- Acir, Y., & Erdem, H. (2020). Biochar uygulamalarının ekmeklik buğdayın kadmiyum (Cd) alımına etkisi. *Akademik Ziraat Dergisi*, 9(2), 327-336.
- Akgül, G. (2017). BİYOKÖMÜR: ÜRETİMİ ve KULLANIM ALANLARI. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(4), 485-499.
- Albuquerque, J. A., Salazar, P., Barrón, V., Torrent, J., del Campillo, M. D. C., Gallardo, A., & Villar, R. (2013). Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels. *Agronomy for sustainable development*, 33, 475-484.
- Alloway, B. J. (1995). Cadmium. In Alloway, B. J. (2.ed.) Heavy metals in soils. Blackie, London. pp. 122-152.
- Amirjani, M. (2012). Effects of cadmium on wheat growth and some physiological factors. *International Journal of Forest, Soil and Erosion (IJFSE)*, 2(1), 50-58.
- Andresen, E., & Küpper, H. (2013). Cadmium toxicity in plants. *Cadmium: from toxicity to essentiality*, 395-413.
- Anonim, (2024). https://webdosya.csb.gov.tr/db/destek/icerikler/10_at-kler_brosur-20191128080759.pdf (erişim tarihi: 16.05.2024)

- Aprile, A., Sabella, E., Francia, E., Milc, J., Ronga, D., Pecchioni, N., ... & De Bellis, L. (2019). Combined effect of cadmium and lead on durum wheat. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(23), 5891.
- Asri, F. Ö., Sönmez, S., & Çıtak, S. (2007). Kadmiyumun çevre ve insan sağlığı üzerine etkileri. *Derim*, 24(1), 32-39.
- Anwar, T., Shehzadi, A., Qureshi, H., Shah, M. N., Danish, S., Salmen, S. H., & Ansari, M. J. (2023). Alleviation of cadmium and drought stress in wheat by improving growth and chlorophyll contents amended with GA3 enriched deashed biochar. *Scientific Reports*, 13(1), 18503.
- Aon, M., Aslam, Z., Hussain, S., Bashir, M. A., Shaaban, M., Masood, S., ... & Hatamleh, A. A. (2023). Wheat straw biochar produced at a low temperature enhanced maize growth and yield by influencing soil properties of typic calciargid. *Sustainability*, 15(12), 9488.
- Avcı, F. (2016). Belediye Katı Atıklarının Termal Yöntemlerle Bertarafı Teknolojik ve Ekonomik İncelenmesi.
- Bai, S. H., Omidvar, N., Gallart, M., Kämper, W., Tahmasbian, I., Farrar, M. B., ... & van Zwieten, L. (2022). Combined effects of biochar and fertilizer applications on yield: A review and meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 808, 152073.
- Baldock, J. A., & Smernik, R. J. (2002). Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red pine) wood. *Organic Geochemistry*, 33(9), 1093-1109.
- Bashir, A., Rizwan, M., ur Rehman, M. Z., Zubair, M., Riaz, M., Qayyum, M. F., ... & Ali, S. (2020). Application of co-composted farm manure and biochar increased the wheat growth and decreased cadmium accumulation in plants under different water regimes. *Chemosphere*, 246, 125809.
- Cantrell, K. B., Hunt, P. G., Uchimiya, M., Novak, J. M., & Ro, K. S. (2012). Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource technology*, 107, 419-428.
- Chintala, R., Mollinedo, J., Schumacher, T. E., Malo, D. D., & Julson, J. L. (2014). Effect of biochar on chemical properties of acidic soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60(3), 393-404.
- Chintala, R., Schumacher, T. E., McDonald, L. M., Clay, D. E., Malo, D. D., Papiernik, S. K., ... & Julson, J. L. (2014). Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/B iochar mixtures. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 42(5), 626-634.

- Clarkson, D. T., & Lüttge, U. (1989). Mineral nutrition: divalent cations, transport and compartmentation. *Progress in botany*, 93-112.
- Claoston, N., Samsuri, A. W., Ahmad Husni, M. H., & Mohd Amran, M. S. (2014). Effects of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of empty fruit bunch and rice husk biochars. *Waste Management & Research*, 32(4), 331-339.
- Clemens, S., Aarts, M. G., Thomine, S., & Verbruggen, N. (2013). Plant science: the key to preventing slow cadmium poisoning. *Trends in plant science*, 18(2), 92-99.
- Chen, C., Wang, R., Shang, J., Liu, K., Irshad, M. K., Hu, K., & Arthur, E. (2018). Effect of biochar application on hydraulic properties of sandy soil under dry and wet conditions. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 1-8.
- Cheng, K., Tian, H. Z., Zhao, D., Lu, L., Wang, Y., Chen, J., ... & Huang, Z. (2014). Atmospheric emission inventory of cadmium from anthropogenic sources. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11, 605-616.
- Chen, Z. S., Zhang, H. Y., Guo, W., Zhang, L. Y., Tian, Y. L., & Wei, X. F. (2012). Cadmium stress on wheat morphology: germination and growth. *Advanced Materials Research*, 356, 1075-1078.
- Cheng, C. H., Lehmann, J., Thies, J. E., Burton, S. D., & Engelhard, M. H. (2006). Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. *Organic geochemistry*, 37(11), 1477-1488.
- Cheng, C. H., Lehmann, J., Thies, J. E., & Burton, S. D. (2008). Stability of black carbon in soils across a climatic gradient. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113(G2).
- Cui LiQiang, C. L., Pan GenXing, P. G., Li LianQing, L. L., Yan JinLong, Y. J., Zhang AFeng, Z. A., Bian RongJun, B. R., & Chang, A. (2012). The reduction of wheat Cd uptake in contaminated soil via biochar amendment: a two-year field experiment.
- Çağlar Eser, S. (2018). Farklı kadmiyum kaynakları ile biochar uygulamasının tütünde kadmiyum alımına etkileri. (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü). Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Ana Bilim Dalı, Tokat.
- Çatav, Ş. S., Genç, T. O., Oktay, M. K., & Küçükakyüz, K. (2020). Cadmium toxicity in wheat: impacts on element contents, antioxidant enzyme activities, oxidative stress,

- and genotoxicity. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 104, 71-77.
- Çığ, F., Erman, M., & Ceritoğlu, M. (2021). Combined application of microbial inoculation and biochar to mitigate drought stress in wheat. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(özel sayı), 3528-3538.
- DeLuca, T. H., Gundale, M. J., MacKenzie, M. D., & Jones, D. L. (2015). Biochar effects on soil nutrient transformations. In *Biochar for environmental management* (pp. 421-454). Routledge.
- Demirbaş, A., & Coşkan, A. (2019). The effects of biochar and cadmium applications on yield and nutrient uptake of maize plant.
- Devereux, R. C., Sturrock, C. J., & Mooney, S. J. (2012). The effects of biochar on soil physical properties and winter wheat growth. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 103(1), 13-18.
- Dündar, M. Ş., Altundağ, H., Kaygaldurak, S., Şar, V., & Acar, A. (2012). Çeşitli endüstriyel atık sularında ağır metal düzeylerinin belirlenmesi. *Sakarya University Journal of Science*, 16(1), 6-12.
- El-Naggar, A., Shaheen, S. M., Ok, Y. S., Rinklebe, J. (2018). Biochar affects the dissolved and colloidal concentrations of Cd, Cu, Ni, and Zn and their phytoavailability and potential mobility in a mining soil under dynamic redox-conditions. *Science of the total environment*, 624, 1059-1071.
- Erdem, H., Tosun, Y.K., Öztürk, M., (2012). Effect of cadmium zinc interactions on growth and Cd-Zn concentration in durum and bread wheats. *Fresenius Environmental Bulletin*, Vol. 21(5): 1046-1051.
- Ernst, W.H.O., Verkleij, J.A.C., Schat, H. (1992). Metal tolerance in plants. - *Acta bot. neerl.* 41: 229-248,
- Fergusson, J. E. (1990). The heavy elements: chemistry, environmental impact and health effects. (*No Title*).
- Fiala, R., Repka, V., Čiamporová, M., Martinka, M., Pavlovkin, J. (2015). The effect of cadmium-nickel interactions on superoxide production, cell viability and membrane potential (E M) in roots of two maize cultivars. *Acta Biologica Hungarica*. 66(2), 192-204.
- Gray, M., Johnson, M. G., Dragila, M. I., Kleber, M. (2014). Water uptake in biochars: The roles of porosity and hydrophobicity. *Biomass and Bioenergy*, 61, 196-205.

- Günel, H., Bayram, Ö., Günel, E., Erdem, H. (2019). Characterization of soil amendment potential of 18 different biochar types produced by slow pyrolysis. *Eurasian Journal of Soil Science*, 8(4), 329-339.
- Günel, E., Erdem, H. (2022). Effects of three different biochars enriched with dairy effluent on wheat growth. *Levantine Journal of Applied Sciences*, 1:1-15. <http://dx.doi.org/10.56917/ljoas.1>
- Günel, E., Erdem, H. (2021). Sürdürülebilir çevre yönetiminde biyoçar. *Sürdürülebilir Çevre Dergisi*. 1(1), 7-17.
- Hafshejani, L.D., Hooshmand, A., Naseri, A.A., Mohammadi, A.S., Abbasi, F., Bhatnagar, A. (2016). Removal of nitrate from aqueous solution by modified sugarcane bagasse biochar. *Ecological Engineering*. 95, 101-111.
- Halim, M.A., Rahman, M.M., Mondal, D., Megharaj, M., Naidu, R. (2021). Bioaccumulation and tolerance indices of cadmium in wheat plants grown in cadmium-spiked soil: health risk assessment. *Frontiers in Environmental Science*. 9, 779588.
- Harris, N.S., Taylor, G.J. (2013). Cadmium uptake and partitioning in durum wheat during grain filling. *BMC plant biology*, 13, 1-16.
- Hassan, M.U., Chattha, M.U., Khan, I., Chattha, M.B., Aamer, M., Nawaz, M. (2019). Nickel toxicity in plants: reasons, toxic effects, tolerance mechanisms, and remediation possibilities-a review. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 26, 12673–12688. doi:10.1007/s11356-019-04892-x
- Hedlund, B., Eriksson, J. ve Petersson-Grawé, K., och Öborn, I. (1997). Kadmium-tillstånd och trender. *Naturvårdsverket, Rapport*, 4759.
- Hossain, M. Z., Bahar, M. M., Sarkar, B., Donne, S. W., Ok, Y. S., Palansooriya, K. N., Kirkham, M. B., Chowdhury, S., Bolan, N. (2020). Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant. *Biochar*, 2(4), 379-420.
- Houben, D., Evrard, L. ve Sonnet, P., (2013). Mobility, bioavailability and pH-dependent leaching of cadmium, zinc and lead in a contaminated soil amended with biochar. *Chemosphere*. 92(11), 1450-1457.
- Hu, Y., El-Hendawy, S., & Schmidhalter, U. (2005). What role does tillering play in wheat tolerance to salinity?. In *Plant nutrition for food security, human health and environmental protection* (pp. 578-579). Tsinghua University Press..

- Jalil, A., Selles, F., Clarke, J. M. (1994). Effect of cadmium on growth and the uptake of cadmium and other elements by durum wheat. *Journal of Plant Nutrition*. 7(11), 1839-1858.
- Jeffrey, M.N., Warren, J.B., David, L. Mohammed, A, Don, W.W., Mohamed A.S.N (2009). Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain. *Soil Soil Science* (2) 174. 105-112.
- Junior, A., Guo, M. (2023). Efficacy of sewage sludge derived biochar on enhancing soil health and crop productivity in strongly acidic soil. *Frontiers in Soil Science*. 3, 1066547.
- Jiang, W., Xu, L., Liu, Y., Su, W., Yan, J., Xu, D. (2022). Effect of biochar on the growth, photosynthesis, antioxidant system and cadmium content of *Mentha piperita* ‘Chocolate’ and *Mentha spicata* in cadmium-contaminated soil. *Agronomy*, 12(11), 2737.
- Kabir, A. H., Akther, M. S., Skalicky, M., Das, U., Gohari, G., Brestic, M., & Hossain, M. M. (2021). Downregulation of Zn-transporters along with Fe and redox imbalance causes growth and photosynthetic disturbance in Zn-deficient tomato. *Scientific Reports*, 11(1), 6040.
- Kacar, B., Katkat, V., (2023). Bitki Besleme, Nobel Yayınları, No:1119, Fen Bilimleri: 34, 9. Baskı, IISN no:978-605-320-121-2, Ankara.
- Khan, Z., Rahman, M.H.U., Haider, G., Amir, R., Ikram, R.M., Ahmad, S., Danish, S. (2021). Chemical and biological enhancement effects of biochar on wheat growth and yield under arid field conditions. *Sustainability*, 13(11), 5890.
- Kunene, S. S. (2020). *Kadmiyum ve Kurşun Kirliliği Olan Toprağa Artan Miktarlarda Uygulanan Tavuk Gübresinin İspanak ve marul bitkisinin gelişimi ve kimi besin elementi içeriği üzerine etkisi* (Master's thesis, Bursa Uludag University (Turkey)).
- Kobayashi, J., 1(978). Pollution by cadmium and the itai-itai disease in Japon. *In Toxicity of Heavy metals in the Environment*. pp 199-260. Marcel dekker Inc. New York.
- Kochian, L. V. (1991). Mechanisms of micronutrient uptake and translocation in plants. *Micronutrients in agriculture*, 4, 229-296.
- Koleva, L., Staneva, D. O. N. K. A., Yordanova, I. V. A. N. K. A., Bineva, T. S. V. E. T. A. N. K. A., Vassilev, A. N. D. O. N. (2008). Characterization of cadmium uptake by roots of durum wheat plants. *Journal of Central European Agriculture*, 9(3), 533-537.

- Köleli, N., Kantar, Ç. (2005). Fosfat kayası, fosforik asit ve fosforlu gübrelerdeki toksik Ağır Metal (Cd, Pb, Ni, As) konsantrasyonu. *Ekoloji Dergisi*, 14(55)
- Lehmann, J., Rilling, M.C., Thies, J., Masiello, C.A., Hockaday, W.C., Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota-A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43: 1812-1836.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). Biochar for environmental management: an introduction. In *Biochar for environmental management* (pp. 1-13). Routledge.
- Lehmann, J. (2007). Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(7), 381-387.
- Lehmann, J., Liang, B., Solomon, D., Lerotic, M., Luizão, F., Kinyangi, J., ... & Jacobsen, C. (2005). Near-edge X-ray absorption fine structure (NEXAFS) spectroscopy for mapping nano-scale distribution of organic carbon forms in soil: Application to black carbon particles. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(1).
- Lehmann, J., Pereira da Silva, J., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W., & Glaser, B. (2003). Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and soil*, 249, 343-357.
- Liang, J., Chang, J., Xie, J., Yang, L., Sheteiwy, M. S., Moustafa, A. R. A., ... & Ren, H. (2023). Microorganisms and Biochar Improve the Remediation Efficiency of *Paspalum vaginatum* and *Pennisetum alopecuroides* on Cadmium-Contaminated Soil. *Toxics*, 11(7), 582.
- Liang, J., Li, Y., Si, B., Wang, Y., Chen, X., Wang, X., ... & Biswas, A. (2021). Optimizing biochar application to improve soil physical and hydraulic properties in saline-alkali soils. *Science of the Total Environment*, 771, 144802.
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B. J. O. J. F. J. J. E. G., ... & Neves, E. G. (2006). Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil science society of America journal*, 70(5), 1719-1730.
- Liu, P., Li, L., Ippolito, J. A., Xing, W., Wang, Y., Wang, Y., ... & Qiu, K. (2023). Heavy metal distribution in wheat plant components following foliar Cd application. *Chemosphere*, 322, 138177.
- Liu, L., Li, J., Yue, F., Yan, X., Wang, F., Bloszies, S., & Wang, Y. (2018). Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation and biochar amendment on maize growth, cadmium uptake and soil cadmium speciation in Cd-contaminated soil. *Chemosphere*, 194, 495-503.

- Lu, M., Cao, X., Pan, J., Li, T., Khan, M. B., Gurajala, H. K., ... & Yang, X. (2020). Identification of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes for food safety on two different cadmium contaminated soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 7943-7956.
- Lux, A., Martinka, M., Vaculík, M., & White, P. J. (2011). Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review. *Journal of experimental botany*, 62(1), 21-37.
- Lwin, C. S., Seo, B. H., Kim, H. U., Owens, G., & Kim, K. R. (2018). Application of soil amendments to contaminated soils for heavy metal immobilization and improved soil quality—A critical review. *Soil science and plant nutrition*, 64(2), 156-167.
- Maccaferri, M., Harris, N. S., Twardziok, S. O., Pasam, R. K., Gundlach, H., Spannagl, M., ... & Cattivelli, L. (2019). Durum wheat genome highlights past domestication signatures and future improvement targets. *Nature genetics*, 51(5), 885-895.
- Pessentheiner, A. R., Pelzmann, H. J., Walenta, E., Schweiger, M., Groschner, L. N., Graier, W. F., ... & Bogner-Strauss, J. G. (2013). NAT8L (N-acetyltransferase 8-like) accelerates lipid turnover and increases energy expenditure in brown adipocytes. *Journal of Biological Chemistry*, 288(50), 36040-36051.
- Mahmoud, E., Ibrahim, M., El-Rahman, A., Lamyaa, A., & Khader, A. (2018). EFFECT OF BIOCHAR WITH AND WITHOUT PHOSPHORUS FERTILIZERS ON PHOSPHORUS FRACTIONS, WHEAT YIELD AND MICROBAL BIOMASS CARBON IN ALKALINE SOIL. *Menoufia Journal of Soil Science*, 3(5), 225-239.
- Mahmoud, E. K., El-Beshbeshy, T. R., Abd El-Kader, N. E., El Shal, R., & Khalafallah, N. (2017). Biochar impacts on physical properties and wheat yield of salt affected soils. *International Journal of Research and Science Publication*, 2(1), 1-10.
- Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S. J., & Lehmann, J. (2010). Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and soil*, 333, 117-128.
- Marschner, H. (2008). *Mieral nutrition of higher plants*. Academic Press, Second Edition. London, UK., 889p
- McGrath, S. P., & Loveland, P. J. (1992). Soil geochemical atlas of England and Wales.
- Miller, S. L. (2010). Using ancient practices to fix modern problems: The effect of biochar on einkorn wheat and soil quality" (2017). *Senior Honors Projects-current*. 293.
- Murtaza, G., Javed, W., Hussain, A., Wahid, A., Murtaza, B., & Owens, G. (2015). Metal uptake via phosphate fertilizer and city sewage in cereal and legume crops in Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 9136-9147.

- Namgay, T., Singh, B., & Singh, B. P. (2010). Influence of biochar application to soil on the availability of As, Cd, Cu, Pb, and Zn to maize (*Zea mays* L.). *Soil Research*, 48(7), 638-647.
- Nguyen, T. N. D., Vu, K. T., Nguyen, T. H. N., Nguyen, T. P., Pham, N. K., Nguyen, T. G., ... & Nguyen, L. V. (2024). Effects of biochar and rice straw application on rice (*Oryza Sativa* L.) growth, yield, and cadmium accumulation in contaminated soil. *Vegetos*, 37(1), 404-411.
- Nikolić, N., Borišev, M., Pajević, S., Župunski, M., Topić, M., Arsenov, D. (2014). Responses of wheat (*Triticum aestivum* L.) and maize (*Zea mays* L.) plants to cadmium toxicity in relation to magnesium nutrition. *Acta Botanica Croatica*, 73(2), 359-373.
- Özyiğit, İ. İ., Baktibekova, D., Hocaoglu-özyiğit, A., Kurmanbekova, G., Chekirov, K., & Yalçın, İ. E. (2021). The effects of cadmium on growth, some anatomical and physiological parameters of wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Life Sciences and Biotechnology*, 4(2), 235-253.
- Peng, X. Y. L. L., Ye, L. L., Wang, C. H., Zhou, H., & Sun, B. (2011). Temperature-and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China. *Soil and tillage research*, 112(2), 159-166.
- Piñeros, M., & Tester, M. (1997). Calcium channels in higher plant cells: selectivity, regulation and pharmacology. *Journal of Experimental Botany*, 551-577.
- Razzaghi, F., Obour, P. B., & Arthur, E. (2020). Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. *Geoderma*, 361, 114055.
- Ren, T., Chen, N., Mahari, W. A. W., Xu, C., Feng, H., Ji, X., Lam, S. S. (2021). Biochar for cadmium pollution mitigation and stress resistance in tobacco growth. *Environmental research*, 192, 110273.
- Rehrah, D., Reddy, M.R., Novak, J.M., Bansode. R.R., Schimmel, K.A., Yu, J., Watts, D.W., Ahmedna, M. (2014). Production and characterization of biochars from agricultural byproducts for use in soil quality enhancement. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 108, 301.
- Saifullah, A., Javed, H., Naeem, A., Rengel, Z., Dahlawi, S. (2016). Timing of foliar Zn application plays a vital role in minimizing Cd accumulation in wheat. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 23, 16432–16439

- Saleh, S. R., Kandeel, M. M., Ghareeb, D., Ghoneim, T. M., Talha, N. I., Alaoui-Sossé, B., Abdel-Daim, M. M. (2020). Wheat biological responses to stress caused by cadmium, nickel and lead. *Science of the total environment*, 706, 136013.
- Sheoran, I.S., Singal, H.R ve Singh, R., (1990). Effect of cadmium and nickel on photosynthesis and enzymes of the photosynthetic carbon reduction cycle in pigeon pea (*Cajanus cajan* L.). *Photosynthesis Research*, 23, 345-351.
- Shi, G.L., Li, D.J., Wang, Y.F., Liu, C.H., Hu, Z.B., Lou, L.Q., Cai, Q.S. (2019). Accumulation and distribution of arsenic and cadmium in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) at different developmental stages. *Science of the total environment*. 667, 532-539.
- Sial, T. A., Lan, Z., Wang, L., Zhao, Y., Zhang, J., Kumbhar, F., Shah, A. N. (2019). Effects of different biochars on wheat growth parameters, yield and soil fertility status in a silty clay loam soil. *Molecules*, 24(9), 1798.
- Sun, J., Fan, Q., Ma, J., Cui, L., Quan, G., Yan, J., Wang, H. (2020). Effects of biochar on cadmium (Cd) uptake in vegetables and its natural downward movement in saline-alkali soil. *Environmental pollutants and bioavailability*. 32(1), 36-46.
- Sobahan, M. A., Akter, N., & Hossain, M. F. (2023). The role of wood-based biochar on growth, yield, and cadmium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) grown under cadmium stress. *Thai Journal of Agricultural Science*, 56(1), 47-60.
- Stolt, J. P., Sneller, F. E. C., Bryngelsson, T., Lundborg, T., & Schat, H. (2003). Phytochelatin and cadmium accumulation in wheat. *Environmental and Experimental Botany*, 49(1), 21-28.
- Sheoran, I.S., Singal, H.R Singh, R. (1990). Effect of cadmium and nickel on photosynthesis and enzymes of the photosynthetic carbon reduction cycle in pigeon pea (*Cajanus cajan* L.). *Photosynthesis Research*, 23, 345-351.
- Abbas, T., Rizwan, M., Ali, S., Adrees, M., Zia-ur-Rehman, M., Qayyum, M. F., ... & Murtaza, G. (2018). Effect of biochar on alleviation of cadmium toxicity in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown on Cd-contaminated saline soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 25668-25680..
- Taskin, E., de Castro Bueno, C., Allegretta, I., Terzano, R., Rosa, A. H., Loffredo, E. (2019). Multi analytical characterization of biochar and hydrochar produced from waste biomasses for environmental and agricultural applications. *Chemosphere*, 233, 422-430. *Chemosphere*, 233, 422-430.

- Tasneem, S., Zahir, S. (2017). Soil respiration, pH and EC as influenced by biochar. *Soil and Environment* 36 (1): 77-83.
- Tomczyk, A., Sokołowska, Z., Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19(1), 191-215
- Van Cutsem, P., Gillet, C. (1982). Activity coefficients and selectivity values of Cu⁺⁺, Zn⁺⁺ and Ca⁺⁺ ions adsorbed in the *Nitella flexilis* L. cell wall during triangular ion exchanges. *J. exp. Bot.* 33: 847-853,.
- Veselov, D., Kudoyarova, G., Symonyan, M., & 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.
- Wang, J., Zhang, T., Gao, J., Li, B., Han, L., Ge, W., & Wang, Z. (2024). The accumulation of cadmium and lead in wheat grains is primarily determined by the soil-reducible cadmium level during wheat tillering. *Chemosphere*, 142509..
- Wang, L., Butterly, C.R., Wang, Y., Herath, H.M.S.K., Xi, Y.G., Xiao, X.J. (2014). Effect of crop residue biochar on soil acidity amelioration in strongly acidic tea garden soils. *Soil use and management*, 30(1), 119-128.
- Weber, K., Quicker, P. (2018). Properties of biochar. *Fuel*, 217, 240-261.
- White, P.J., (1998). Calcium channels in the plasma membrane of roots cells. - *Ann. Bot.* 81: 173-183.
- Xu, D., Zhao, Y., Zhou, H., Gao, B. (2016). Effects of biochar amendment on relieving cadmium stress and reducing cadmium accumulation in pepper. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 12323-12331.
- Xu, D., Zhao, Y., Sun, K., Gao, B., Wang, Z., Jin, J., Wu, F. (2014). Cadmium adsorption on plant-and manure-derived biochar and biochar-amended sandy soils: impact of bulk and surface properties. *Chemosphere*, 111, 320-326.
- Zhang, D., Zhou, H., Shao, L., Wang, H., Zhang, Y., Zhu, T., Ma, L. (2022). Root characteristics critical for cadmium tolerance and reduced accumulation in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Environmental Management*. 305, 114365.
- Zhang, Z., Dong, X., Wang, S., Pu, X. (2020). Benefits of organic manure combined with biochar amendments to cotton root growth and yield under continuous cropping systems in Xinjiang, China. *Scientific reports*, 10(1), 1-10

- Zhang, H., Voroney, R. P., & Price, G. W. (2015). Effects of temperature and processing conditions on biochar chemical properties and their influence on soil C and N transformations. *Soil Biology and Biochemistry*, 83, 19-28.
- Zhang, X., Gao, B., & Xia, H. (2014). Effect of cadmium on growth, photosynthesis, mineral nutrition and metal accumulation of bana grass and vetiver grass. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 106, 102-108.
- Zhao, Z. Q., Zhu, Y. G., Smith, F. A., & Smith, S. E. (2005). Cadmium uptake by winter wheat seedlings in response to interactions between phosphorus and zinc supply in soils. *Journal of plant nutrition*, 28(9), 1569-1580.
- Zheng, W., Sharma, B. K., & Rajagopalan, N. (2010). Using biochar as a soil amendment for sustainable agriculture. *Waste utilization--Biochar*.
- Zhou, J. B., Deng, C. J., Chen, J. L., & Zhang, Q. S. (2008). Remediation effects of cotton stalk carbon on cadmium (Cd) contaminated soil. *Ecol Environ*, 17, 1857-1860.
- Wolna-Maruwka, A., Grzyb, A., Łukowiak, R., Ceglarek, J., Niewiadomska, A., & Kayzer, D. (2023). Spatial-temporal differentiation of soil biochemical parameters and their relationship with nitrogen resources during the vegetation period of selected crops. *Agriculture*, 13(10), 2034.