



T.C.

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**BUĞDAY BİTKİSİNDE BOR (B) TOKSİSİTESİNİN OLUMSUZ
ETKİSİNİN AZALTILMASINA YÖNELİK BİYOKÖMÜR
UYGULAMALARININ ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Özge ULUSOY ÖZ

Danışman: Doç. Dr. Halil ERDEM

TOKAT- 2025



Bu çalışma, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (TOGÜBAP) tarafından 2024/102 proje numarası ile desteklenmiştir.

ETİK SÖZLEŞME

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Halil ERDEM danışmanlığında hazırlamış olduğum “Buğday Bitkisinde Bor (B) Toksisitesinin Olumsuz Etkisinin Azaltılmasına Yönelik Biyokömür Uygulamalarının Araştırılması” adlı Yüksek Lisans tezinin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

16/12/2025

Özge ULUSOY ÖZ

JÜRİ KABUL VE ONAY SAYFASI

Özge ULUSOY ÖZ tarafından hazırlanan “**Buğday Bitkisinde Bor (B) Toksisitesinin Olumsuz Etkisinin Azaltılmasına Yönelik Biyokömür Uygulamalarının Araştırılması**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 16.12.2025 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen Jüri tarafından Oy Birliği ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı Soyadı)

İmzası

Üye (Danışman): Doç. Dr. Halil ERDEM

.....

Üye (Başkan): Prof. Dr. Mahmut TEPECİK

.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Seda ÇAĞLAR

.....

ONAY

...../...../.....

Prof. Dr. Ercan ÇAÇAN

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın başlangıcından bitimine kadar değerli katkılarını ve yardımlarını esirgemeyen Danışman Hocam Sayın Doç. Dr. Halil ERDEM’e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen Dr. Cabir Çağrı GENCE’ye teşekkür ederim.

Beni her zaman destekleyen anneme, varlığını hep yanımda hissettiğim babama, kardeşlerime ve kıymetli eşim Veli ÖZ’e çok teşekkür ederim.

16/12/2025

Özge ULUSOY ÖZ

ÖZET

BUĞDAY BİTKİSİNDE BOR (B) TOKSİSİTESİNİN OLUMSUZ ETKİSİNİN AZALTILMASINA YÖNELİK BİYOKÖMÜR UYGULAMALARININ ARAŞTIRILMASI

Ulusoy Öz, Özge

Yüksek lisans, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Halil ERDEM

Aralık 2025, xi + 58 sayfa

Bu çalışma, artan bor (B) toksisitesi koşullarında çeltik kavuzu biyokömürünün (BC), buğday (*Triticum aestivum* L. cv. Basilio) bitkisinde büyüme ve besin elementi alımı üzerine etkilerini değerlendirmek amacıyla yürütülmüştür. İklim odası koşullarında gerçekleştirilen çalışmada, üç farklı bor dozu (0, 5 ve 10 mg B kg⁻¹) ile üç farklı biyokömür düzeyi (%0, %1 ve %2) kombinasyonları uygulanmıştır. Çalışmada kök ve yeşil aksam kuru madde verimleri ile B, N, P, K, Zn ve Fe konsantrasyonları belirlenmiş; elde edilen veriler tek yönlü varyans analizi (ANOVA) ve Duncan çoklu karşılaştırma testi ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, artan bor dozlarının buğday bitkisinde kök ve sürgün gelişimini baskıladığını, ancak biyokömür uygulamalarının bu olumsuz etkileri önemli ölçüde hafiflettiğini göstermiştir. Özellikle %2 biyokömür uygulaması, bor toksisitesi altında kök kuru madde verimini %33, yeşil aksam verimini ise %18 oranında artırmıştır. Ayrıca biyokömür, kök ve yeşil aksamda B konsantrasyonlarını sırasıyla %37 ve %65 oranında azaltarak toksik bor birikimini sınırlandırmıştır. Biyokömürün bu iyileştirici etkisi, yüksek yüzey alanı, negatif yüklü fonksiyonel grupları, pH tamponlama kapasitesi, antioksidatif savunma sistemlerinin aktivasyonu ve rizosfer biyotasının desteklenmesi gibi fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerine dayandırılmıştır. Sonuç olarak, çeltik kavuzu biyokömürü, bor toksisitesinin yaygın olduğu tarım alanlarında sürdürülebilir bir iyileştirici organik materyal olarak önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Biyokömür, Bor, Ekmekli Buğday, Stres, Toksikite

ABSTRACT

INVESTIGATION OF BIOCHAR APPLICATIONS TO REDUCE ADVERSE EFFECTS OF BORON (B) TOXICITY IN WHEAT PLANTS

Ulusoy Öz, Özge

Master's Thesis, Division of Soil Science and Plant Nutrition

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Halil ERDEM

December 2025, xi + 58 pages

This study was conducted to evaluate the effects of rice husk biochar (BC) on growth and nutrient uptake of wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Basilio) under increasing boron (B) toxicity conditions. The experiment was carried out under climate chamber conditions using a factorial combination of three boron doses (0, 5 and 10 mg B kg⁻¹) and three biochar levels (0%, 1%, and 2%). Root and shoot dry matter yields, as well as B, N, P, K, Zn, and Fe concentrations, were determined, and the data were analyzed using one-way analysis of variance (ANOVA) and Duncan's multiple range test. The results revealed that increasing boron doses inhibited root and shoot growth in wheat plants, whereas biochar applications significantly alleviated these adverse effects. In particular, the 2% biochar treatment increased root dry matter by 33% and shoot dry matter by 18% under boron toxicity. Moreover, biochar reduced B concentrations in roots and shoots by 37% and 65%, respectively, thereby limiting toxic boron accumulation. The ameliorative effect of biochar was attributed to its high surface area, negatively charged functional groups, pH buffering capacity, activation of antioxidative defense systems, and stimulation of rhizosphere biota. Overall, rice husk biochar demonstrates substantial potential as a sustainable organic amendment for mitigating boron toxicity in agricultural soils.

Keywords: Biochar, Boron, Bread Wheat, Stress, Toxicity

İÇİNDEKİLER

ETİK SÖZLEŞME.....	ii
JÜRİ KABUL VE ONAY SAYFASI.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ÖZET	v
ABSTRACT.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
SİMGE ve KISALTMALAR LİSTESİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETLERİ.....	4
2.1. Bor Kaynakları, Dağılımı ve Toprakta B	4
2.2. Bitkilerde Bor Alımı ve Taşınma Mekanizmaları	6
2.3. Bitkilerde Bor Toksisitesi.....	9
2.4. Bitkide Bor Alımını Azaltma Stratejileri	12
2.4.1. İyon etkileşimleri.....	12
2.4.2. Hücre zarının korunması	13
2.5. Toprakta Bor Alımını Azaltma Stratejileri	15
2.5.1. Yıkama	15
2.5.2. Toprak pH'sını düzenleme	16
2.5.3. Organik madde uygulamaları	17
2.6. Biyokömür	17
2.7. Biyokömür – Bor Etkileşimi	22
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	24
3.1. Materyal	24
3.1.1. Sera denemesinde kullanılan bitki materyali.....	24
3.1.2. Sera denemesinde kullanılan toprak materyali.....	24
3.1.3. Biyokömür üretimi ve özellikleri	25
3.2. Metot	26
3.2.1. Denemenin kurulması ve yürütülmesi.....	26

3.2.2. Bitki analizleri	27
3.2.3. İstatistiksel analizler	28
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	29
4.1. Kök ve Yeşil Aksam Kuru Madde Verimi.....	29
4.2. Kök ve Yeşil Aksam B Konsantrasyonu	34
4.3. Kök ve Yeşil Aksam Besin Elementi Konsantrasyonları	37
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	41
6. KAYNAKÇA	43
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.



ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge No	Sayfa
Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan toprağın bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri	24
Çizelge 4.1. BC ve B uygulamalarının kök ve yeşil aksam B konsantrasyonu üzerine etkisi	35
Çizelge 4.2. BC ve B uygulamalarının kök besin elementi konsantrasyonları üzerine etkisi	38
Çizelge 4.3. BC ve B uygulamalarının yeşil aksam besin elementi konsantrasyonları üzerine etkisi.....	39

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil No	Sayfa
Şekil 2.1. Çalışmamızda bor toksisitesi semptomu gösteren buğday bitkisi yaprağı (10 ppm B uygulaması).....	10
Şekil 3.1. Biyokömür üretim cihazının şeması	25
Şekil 3.2. Piroliz için hazırlanmış kabın kül fırını içerisine yerleştirilmesi	25
Şekil 3.3. Biyokütlenin biyokömüre dönüşüm süreçleri.....	26
Şekil 4.1. Bor toksisitesinin bitkinin kök gelişimi üzerine etkisi	29
Şekil 4.2. Bor toksisitesinin bitkinin yeşil aksam gelişimi üzerine etkisi.....	30
Şekil 4.3. B toksisitesine karşı BC uygulamalarının kök kuru madde verimi üzerine etkisi	31
Şekil 4.4. Biyokömürün bitkinin yeşil aksam gelişimi üzerine etkisi	31
Şekil 4.5. B toksisitesine karşı BC uygulamalarının yeşil aksam kuru madde verimi üzerine etkisi.....	32
Şekil 4.6. Biyokömürün bitki köklerindeki bor toksisitesini azaltıcı etkisi.....	33
Şekil 4.7. Bor toksisitesi koşullarında biyokömürün bitki yeşil aksamındaki bor toksisitesini azaltıcı etkisi.....	34

SİMGE ve KISALTMALAR LİSTESİ

Simge	Açıklama
%	Yüzde
°C	Santigrat derece
cm ³	Santimetreküp
g	Gram
kg	Kilogram
km	Kilometre
L	Litre
pH	Asitlik derecesi
ppm	Milyonda bir parça
s	Saniye

Kısaltma	Açıklama
ATP	Adenozin Trifosfat
NADH	Nikotinamid Adenin Dinukleotid Hidrid
NADPH	Nikotinamid Adenin Dinükleotid Fosfat
RNA	Ribonükleik Asid
SOD	Süperoksit Dismutaz
POX	Peroksidaz
APOX	Askorbat Peroksidaz
CAT	Katalaz
GR	Glutasyon Redüktaz
MDA	Malondialdehit
ROS	Reaktif Oksijen Türleri

1. GİRİŞ

Canlılar, doğal ortamlarında meydana gelen çevresel değişimlere karşı çeşitli içsel ve mekanik tepkiler göstermektedirler. Bitkilerde herhangi bir stres faktörü ile karşılaşıldığında biyokimyasal ve fizyolojik tepkiler oluşmakta; bu tepkiler genlerin fizyolojik etkileri ile hücresel metabolizma değişimlerine, büyüme oranları ve ürün miktarlarının değişimine kadar geniş bir yelpazede zararlara neden olabilmektedir. Bu stres faktörlerinin en önemlilerinden biri, besin elementlerinin noksanlığı veya toksisitesidir ve bu durum metabolizmanın işlevini engelleyerek bitkide ciddi hasarlara yol açabilmektedir (Brđar-Jokanović, 2020). Bor (B), bitkiler tarafından eser miktarda gereksinim duyulan, ancak eksikliği ve toksisite sınırı birbirine en yakın olan stratejik bir elementtir. Tarımsal açıdan bakıldığında, borun toprakta yetersiz olması noksanlığa neden olurken, fazla olması bitkilerde şiddetli zararlara yol açabilecek özelliklere sahiptir (Reguera ve Camacho-Cristóbal, 2023).

Bor toksisitesinin temel mekanizmaları üç ana başlıkta incelenmiştir: ilki hücre çeperinde oluşan hasarlar; ikincisi ATP, NADH ve NADPH gibi önemli bileşenlerin riboz kısımlarında meydana gelen metabolik bozukluklar; üçüncüsü ise RNA, serbest şekerler veya riboz bağları aracılığıyla bölünen ve gelişen hücrelerde ortaya çıkan hasardır. Bu hasarlara ek olarak, transpirasyon akımı yönünde yapraklarda yüksek miktarda biriken borun ozmotik düzeni bozması da dördüncü bir etki olarak ifade edilmektedir. Bor toksisitesi, genellikle mevcut borun önemli miktarda sitoplazmada birikmesiyle kendini göstermektedir. Ancak, borun tahribatının azaltılması için borun hücre çeperinde veya vakuolde yoğunlaşması gerektiği de belirtilmiştir (Gülüt, 2024; Yoshinari ve Takano, 2017).

Bor toksisitesi, dünyanın hemen her yerinde kurak ve yarı kurak bölgelerin tarım topraklarında bitki yetiştiriciliğini sınırlayan önemli bir beslenme sorunudur (Brđar-Jokanović, 2020). Toksisite doğal olarak topraklarda oluşabildiği gibi, yüksek B içeren suların veya kompost gübrelerinin kullanılması ya da linyit kömürü kullanan termik santrallerin civarında yetiştiricilik yapılması sonucunda da yaygın olarak ortaya çıkabilmektedir. Dünya'nın en yüksek bor rezervine sahip olan ülkemizde, Orta Anadolu Platosu gibi bazı alanlarda bor toksisitesinin önemli bir problem olabileceği

belirtilmektedir (Elevli ve ark., 2022). Orta-Güney Anadolu bölgesindeki tarım topraklarında yapılan analiz sonuçları, toprakların %18'inin borca toksik ($>3.0 \text{ mg kg}^{-1}$) düzeyde olduğunu göstermiştir (Gülmezoğlu ve ark., 2017).

Bitkiler, diğer stres koşullarında olduğu gibi, borla baş edebilmek için çeşitli biyokimyasal ve moleküler mekanizmalar geliştirmişlerdir (Yang ve ark., 2022). Bu stratejiler arasında seçici iyon birikimi veya dışlanması, iyonların köklerle alınımının kontrolü ve yapraklara taşınımı, hücre düzeyinde iyonların dağılımı ve antioksidant enzimlerin (SOD, POX, APOX, CAT, GR) indüksiyonu gibi mekanizmalar sayılabilir (Pandey ve ark., 2019; Zhao ve ark., 2024). Bununla birlikte, bitki çeşitleri arasında bor toksisitesine duyarlılık bakımından genetik farklılıklar bulunmakta; dayanıklı çeşitler yüksek bor konsantrasyonlarına adapte olabilmek için bünyelerinde daha az bor biriktirmektedirler. Toprakta aşırı bor yoğunluğu olduğu koşullarda, bitkilerin yapraklarında $700\text{-}1000 \text{ mg B kg}^{-1}$ kuru ağırlık arasında bor birikimi görülebilmektedir (Arredondo ve Bonomelli, 2023; Zhao ve ark., 2024). Bu derece yüksek birikimin sebep olduğu zararı azaltmak ve toprak kalitesini iyileştirmek amacıyla yeni toprak düzenleyici materyallere ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu bağlamda, son yıllarda tarım ve çevre amenajmanında önemi giderek artan ve biyokütlenin kapalı bir ortamda (kısıtlı veya oksijensiz) ısıtılmasıyla (piroliz) elde edilen karbon bakımından zengin materyallere biyokömür adı verilmektedir. Biyokömür, kısıtlı miktarda oksijenin olduğu ve düşük sıcaklıklarda ($<700^{\circ}\text{C}$) organik materyallerin termokimyasal bozunması ile üretilen katı materyaldir (Khater ve ark., 2024). Üretim materyali olarak odunsu ve otsu türler, hayvan gübresi, tarımsal ve endüstriyel atıklar gibi karbonhidratlı her türlü materyal kullanılabilir. Literatürde, biyokömür terimi toprak özelliklerinin iyileştirilmesi amacı ile kullanılan kömürleştirilmiş organik maddeyi ifade etmekte ve bu özelliği ile ısıtma yakıtı olarak kullanılan kömürden veya filtreleme amacıyla üretilen aktif karbondan ayrılmaktadır (Hornung ve ark., 2024).

Biyokömürün, toprak kalitesinin artırılması adına diğer organik katkı maddelerinin tamamından daha etkin bir materyal olduğu kabul edilmektedir (Kabir ve ark., 2023; Khan ve ark., 2024). Bu üstünlüğü, yüksek yük yoğunluğu, yüksek besin elementi tutma kapasitesi, spesifik kimyasal ve kolloidal yapısı ve mikrobiyal parçalanmaya karşı olan

direnci gibi sahip olduğu benzersiz fiziksel ve kimyasal özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Ameloot ve ark., 2013; Hossain ve ark., 2020; Jílková, 2023). Biyokömür, bu özellikleri sayesinde toksinlerin nötralize edilmesine ve toprağın su tutma kapasitesi ile adsorpsiyon kapasitesinin iyileştirilmesine önemli katkılar sağlamaktadır. Araştırmacılar, bu iyileşmeleri biyokömürün oldukça gözenekli olan yapısından kaynaklandığını rapor etmişlerdir (Hagemann ve ark., 2017; Shyam ve ark., 2025). Ayrıca, biyokömür yüksek sorbe etme kapasitesine sahip olduğu için besin elementlerince zengin çözeltilerden bu elementlerin uzaklaştırılması adına oldukça değerlidir.

Bu özellikler ışığında, biyokömür uygulamaları, çevresel amenajman ve toprağın iyileştirilmesi hedeflerine yönelik yapılmaktadır. Biyokömürün yüksek adsorpsiyon kapasitesi, yüzey akışı ile uzaklaşabilen besin elementlerinin tutulması (Lehmann ve ark., 2003) ve toksinlerin nötralize edilmesi gibi etkileri, bor gibi yüksek konsantrasyonlarda toksik etki gösteren elementlerin toprak çözeltisindeki hareketliliğini ve bitkiler tarafından alımını kontrol etme potansiyelini gündeme getirmektedir. Bor toksisitesinin yaygın olduğu tarım alanlarında biyokömür uygulamalarının, toprağın fiziksel ve kimyasal koşullarını düzelterek bitki üzerindeki bor stresini azaltabileceği düşünülmektedir. Bu araştırmanın amacı, yüksek bor konsantrasyonlarının neden olduğu toksisiteye karşı biyokömür uygulamalarının etkilerini ve toksisiteyi azaltma mekanizmalarını bitkisel ve topraksal parametreler üzerinden detaylı bir şekilde incelemektir.

2. LİTERATÜR ÖZETLERİ

Bitkiler normal büyüme ve gelişme için temel makro ve mikro besin maddelerine ihtiyaç duyar. Bir besin elementinin yetersiz veya dengesiz tedariki ister eksiklik ister toksisite şeklinde ortaya çıksın, bitkilerin fizyolojik süreçlerini olumsuz yönde etkileyerek büyüme ve gelişmeyi sınırlar; bu durum tarımsal üretimde hem verim düşüşlerine hem de ürün kalitesinde belirgin kayıplara yol açmaktadır. Bor (B), normal bitki büyümesi ve gelişimi için gerekli olan temel bir mikro besindir. Bor (B), periyodik element sisteminin 13. grubuna ait bir kimyasal elementtir. Bitki kökleri tarafından çoğunlukla hücre duvarının fosfolipit çift tabakasından geçerek hücreye kolayca giren küçük, yüksüz borik asit molekülleri şeklinde alınır (Brown ve ark., 2002; Dordas ve ark., 2000). Bor bir bitki mikro besindir, yani normal büyüme ve gelişme için 1 mg g⁻¹ kadar küçük miktarlarda gereklidir (Brđar-Jokanović, 2020).

2.1. Bor Kaynakları, Dağılımı ve Toprakta B

Düşük konsantrasyonlarda bulunmasına rağmen bor, hidrosfer ve litosferde geniş bir dağılıma sahiptir ve hem doğal süreçler hem de antropojenik faaliyetler sonucunda çevreye girebilmektedir. Doğal kaynaklar arasında borosilikat minerali turmalin, volkanik gaz çıkışları, jeotermal akışlar, yeraltı suları ve deniz suyu başta gelmektedir. Kararlı bir mineral olan turmalin, özellikle tortul kayalarda birikme eğilimi göstermektedir. Silikat yapıları kayalarda bağlı formda bulunan bor, pedosferdeki ayrışma süreçlerinden önce bitkiler tarafından doğrudan kullanılamaz. Ayrışma ve bozunma ile serbest kalan bor, bitkiler tarafından alınabilir hâle dönüşerek genellikle borik asit formunda bulunur. Nitekim küresel ölçekte deniz suyundaki bor konsantrasyonunun yaklaşık 4,6 mg L⁻¹ olduğu, deniz kökenli evaporitlerin etkisiyle oluşan tuzlu topraklarda ise bor seviyelerinin daha yüksek olduğu bildirilmektedir (Liu ve ark., 2022; Park ve Schlesinger, 2002).

Doğal döngülerin yanı sıra son yıllarda insan faaliyetleri bor kirliliğinde önemli bir artış yaratmıştır. Bor, özellikle fiberglas, cam, seramik, deterjan ve pestisit üretimi gibi endüstrilerde yoğun olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bor bileşikleri tarımsal üretimde mikro besin elementi olarak gübrelere de ilave edilmektedir. Madencilik ve

cevher işleme tesislerinden kaynaklanan atıksular ($0.64 - 1.36 \text{ mg kg}^{-1}$), kanalizasyon suları ile sulama, gübre kaynaklı yüzey akışı ($0.15 - 0.96 \text{ mg L}^{-1}$) ve belediye atık depolama sahalarından sızıntılar bor kirliliğinin temel antropojenik kaynakları arasında yer almaktadır. Özellikle borca zengin sulama suyunun kullanıldığı tarımsal alanlarda toprakta bor birikimi gözlemlenmekte ve bu durum uzun vadede tarımsal verimliliği olumsuz etkileyebilmektedir (Rerkasem ve ark., 2020). Günümüzde birçok ekosistemde antropojenik bor girdilerinin doğal kaynakları aştığı rapor edilmektedir. Bu nedenle bor kirliliğinin etkin yönetimi, endüstriyel emisyonların kontrol edilmesini ve sulama sularının arıtımının sağlanmasını gerektirmektedir (Bolan ve ark., 2023).

Borun konsantrasyonu ve kimyasal türleşmesi, kaynak materyali, iklim ve antropojenik girdilere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Küresel ölçekte topraklarda toplam bor düzeyi $1 - 1000 \text{ mg kg}^{-1}$ arasında olup ortalama 30 mg kg^{-1} 'dir (Bolan ve ark., 2023). Bor eksikliği ile toksisite arasındaki aralık oldukça dardır ve bu aralık herhangi başka bir elementten daha dardır (Chen ve ark., 2023). Genel olarak, sıcak suyla ekstrakte edilebilen bor miktarı 0.5 mg kg^{-1} 'in altında olan topraklar eksik kabul edilir, oysa birkaç mg kg^{-1} fazla olduğunda toksisiteye yol açabilir (Yau ve ark., 1994). Allison'a göre (Richards, 1954), 0.7 mg kg^{-1} optimal, 1.5 mg kg^{-1} 'den yüksek değerler ise hassas bitki türleri için toksik kabul edilir. Abreu ve ark. (2005), kendi araştırmalarını ve diğer yazarların bulgularını (Van Raij ve ark., 1997) özetleyerek şu ölçeği önermiştir: $0.0-0.2 \text{ mg kg}^{-1}$ düşük, $0.21 - 0.6 \text{ mg kg}^{-1}$ orta, $0.61 - 1.1 \text{ mg kg}^{-1}$ yüksek, $1.2 - 3.0 \text{ mg kg}^{-1}$ çok yüksek ve $>3.0 \text{ mg kg}^{-1}$ toksik toprak boru konsantrasyonu. Başka bir öneriye göre (Sun ve ark., 2019), $0.5 - 2.0 \text{ mg kg}^{-1}$ optimal toprak bor aralığıdır; daha düşük veya daha yüksek değerler eksiklik ve toksisiteyi gösterir. Bu nedenle bor beslenmesindeki bozukluklar oldukça yaygındır. Koşullara bağlı olarak, aynı bölgede hem eksiklik hem de toksisite görülebilir (Gupta, 1980), hatta aynı gelişme sezonunda (Reisenauer ve ark., 1977). Bor dağılımı; ana materyal, iklim koşulları ve biyolojik döngüler tarafından kontrol edilir. Denizel sedimanların ve volkanik faaliyetlerin yaygın olduğu kurak bölgelerde daha yüksek konsantrasyonlar gözlenir. Topraktaki borun yalnızca küçük bir kısmı ($<2\%$) çözünür ve bitkiler tarafından alınabilir formda olup, normal pH koşullarında genellikle borik asit (H_3BO_3) halinde bulunur. Sularda bor konsantrasyonu $< 0.3 - 100 \text{ mg L}^{-1}$ arasında değişirken, deniz suyunda ortalama 4.6 mg L^{-1} 'dir (Hattori

ve ark., 2020). Volkanik bölgelerdeki yeraltı suları veya endüstriyel atıklarla kirlenen akiferler daha yüksek bor seviyeleri gösterebilir. Bor türlenmesi pH, tuzluluk ve konsantrasyonla ilişkilidir. Yüzey ve yeraltı sularında baskın türler borik asit, $B(OH)_3$, ve borat iyonu, $B(OH)_4^-$ 'dur. Yüksek pH ve yüksek bor konsantrasyonlarında $B_3O_3(OH)_4^-$ gibi poliborik türler oluşabilir (Hattori ve ark., 2020). Toprak-su-biyota sistemlerinde borun dağılımının ve kimyasal fraksiyonlarının anlaşılması, kirlilik risklerinin yönetimi ve verimli kullanım için kritiktir.

Toprakta bor; çözeltide, değişebilir, organik bağlı ve mineral bağlı fraksiyonlar hâlinde bulunur (Das ve Purkait, 2020). Toprak organik maddesinin ayrışmasıyla serbest kalan bor, organik bileşiklerle bağlanarak bitkilerce kullanılabilirliğini artırır (Kohli ve ark., 2023). Gübre ya da sulama suyu ile sağlanan bor girdileri de topraktaki bor miktarını yükseltebilir. Volkanik ve jeotermal kaynaklar ise yeraltı suyunun bor içeriğini artırabilmektedir (Bolan ve ark., 2023). Toprak ve su ortamlarında pH, bor türleşmesi ve toprak partiküllerine adsorpsiyonu üzerinde belirleyici bir etmendir. Artan pH, bitkilerce alınabilir borik asidi adsorpsiyona daha yatkın borat anyonuna dönüştürerek kullanım etkinliğini azaltır (Das ve Purkait, 2020). Toprak dokusu da bor tutulumunu belirler; ince dokulu topraklar daha yüksek yüzey alanları nedeniyle kaba dokulu topraklara kıyasla daha fazla bor adsorpsiyon kapasitesine sahiptir (Bolan ve ark., 2023). Toprakta bor tutulumu; kil tipleri, kil üzerindeki mineral kaplamalar, organik madde içeriği, değişebilir iyon bileşimi, kation değişim kapasitesi, pH ve bor konsantrasyonu gibi faktörlerden etkilenmektedir (Rahman ve ark., 2021).

2.2. Bitkilerde Bor Alımı ve Taşınma Mekanizmaları

Bor, periyodik tablonun 13. grubunda yer alan ve hem metalik hem de ametalik özellikler sergileyen bir element olup, bitkiler tarafından esas olarak küçük ve yüksüz borik asit molekülleri formunda alınmaktadır. Bu moleküller, hücre duvarındaki fosfolipit çift tabakasından pasif difüzyon yoluyla kolaylıkla geçebilmektedir. Mikro besin elementi sınıfında yer alan bor, normal bitki büyümesi ve gelişimi için mikrogram – miligram düzeylerinde gereklidir (Brown ve ark., 2002; Dordas ve ark., 2000; Marschner, 1995).

Bitki dokularında bor varlığı 19. yüzyılın ortalarında rapor edilmiştir (Ploquin, 1966) ve daha sonra buğday da dâhil olmak üzere çeşitli bitki türlerinde doğrulanmıştır (Agulhon, 1988). Bunu takiben borun monokotil ve dikotil türlerde, ibrelilerde, eğrelti otlarında ve fitoplanktonlarda esansiyel olduğu kanıtlanmış; tarımsal bitkiler için temel bir besin elementi olarak önemi ortaya çıkmıştır (Sommer ve Lipman, 1926; Warington, 1937).

Bitkilerde bor alımı, uzun yıllar boyunca tartışmalı bir araştırma konusu olmuştur. Bu durumun temel sebepleri arasında; farklı bitki türleri üzerinde çalışılması, deneysel ortamlarda kullanılan bor konsantrasyonlarının geniş bir aralıkta değişmesi ve analiz yöntemlerindeki teknik farklılıklar yer almaktadır (Hu ve Brown, 1997). Bor, bitkiler tarafından kök sistemi aracılığıyla ve büyük ölçüde borik asit formunda alınmaktadır. Küçük, çözünür, iyonlaşmamış ve yüksüz yapısı sayesinde borik asit, plazma zarının fosfolipit çift tabakasını pasif olarak geçebilmektedir. Bu bağlamda bor, topraktan iyonik formda değil, tamamen moleküler formda alınan tek element olarak dikkat çekmektedir.

Bor arzının yeterli olduğu koşullarda bu elementin hücrelere taşınması, herhangi bir taşıyıcı protein ya da enerji girdisine ihtiyaç duyulmaksızın, pasif difüzyon mekanizması ile gerçekleşmektedir. Hücre zarının bora karşı yüksek geçirgenlik göstermesi, borun transpirasyon akışı boyunca taşınması ve yaprak uçlarında karakteristik bir birikim düzeni sergilemesi, uzun yıllar boyunca pasif difüzyonun tek taşınım mekanizması olduğu varsayımını desteklemiştir (Marschner, 1995; Nable, 1988; Raven, 1980). Benzer şekilde, dış ortam bor konsantrasyonundaki artışa paralel olarak bitki dokularındaki bor miktarının doğrusal artış göstermesi (Nable ve ark., 1990) ve metabolik inhibitörlerin ya da 2 – 42°C aralığındaki aşırı sıcaklık değişimlerinin bor birikimini engellememesi (Brown ve Hu, 1994), bu görüşü güçlendiren önemli bulgular arasında yer almıştır.

Ancak sonraki çalışmalar, borun hücre içine yalnızca pasif difüzyonla girmediğini, aynı zamanda akvaporinler ve cıvaya duyarlı belirli protein kanalları aracılığıyla da taşındığını ortaya koymuştur (Dordas ve ark., 2000). Böylece bor alımının, çevresel bor seviyesine ve bitkinin beslenme durumuna bağlı olarak hem pasif difüzyon hem de kanal aracılı taşınım süreçleriyle gerçekleşebildiği anlaşılmıştır.

Bor, cis-hidroksil grupları içeren moleküllerle kompleks oluşturarak özellikle hücre duvarı yapısında kritik görev üstlenir. Rhamnogalakturonan II (RGII) molekülleri arasında ester bağları oluşturarak hücre duvarının stabilitesi ve bütünlüğünü sağlar. Monokotil bitkiler, hücre duvarlarında daha az pektin içermeleri nedeniyle dikotillere göre daha düşük bor gereksinimine sahiptir ve aşırı bora karşı daha duyarlıdır (Berger, 1949; Chormova ve Fry, 2016).

Borun metabolik rolleri çok yönlüdür. Plazma zarındaki glikoproteinler ve glikolipitlerle cis-diol kompleksleri oluşturarak zar bütünlüğünü korur ve iyonlar, metabolitler ve hormonların taşınımını düzenler (Blevins ve Lukaszewski, 1998; Dordas ve ark., 2000; Goldbach ve Wimmer, 2007). Ayrıca şeker taşınımı, lignin ve flavonoid biyosentezi, auksin metabolizması, azot ve fenolik bileşik metabolizması gibi süreçlerde rol oynar (Gauch ve Dugger, 1953; Power ve Woods, 1997; Seth ve Aery, 2017). Bor, enzimlerin aktivitesini düzenleyebilir, stabilizasyon sağlayabilir veya inhibitör etki gösterebilir.

Bor eksikliği, hücre bölünmesi ve DNA sentezinin aksamasına yol açarak özellikle apikal meristemlerde büyümenin durmasına neden olur (Goldbach ve Wimmer, 2007; Liu ve ark., 2015; Wang ve ark., 2015). Eksiklik koşullarında bitkilerde fotosentetik performans azalmakta, stomatal iletkenlik ve CO₂ asimilasyonu düşmektedir. Karbon dengesini sürdürebilmek amacıyla yapraklarda respirasyon, organik asit ve amino asit metabolizması artarken, kök dokusunda bu süreçler baskılanmaktadır (Goldbach ve Wimmer, 2007; Liu ve ark., 2015; Wang ve ark., 2015). Ayrıca fenolik bileşiklerin birikimi hem kök hem yaprakta artış göstermektedir. Antioksidan enzim aktivitesi sürse de oksidatif hasarı tamamen engellemekte yetersiz kalabilmektedir (Han ve ark., 2008).

Anatomik düzeyde bor eksikliği apikal meristemlerde hücre bölünmesinin kesintiye uğramasına, kök büyümesinin yavaşlamasına veya durmasına yol açar. Reprodüktif gelişim de olumsuz etkilenir; mikrosporogenez, polen çimlenmesi ve polen tüpü uzaması bozulur, bu da erkek fertilitesinde azalmaya neden olur. Döllenme sonrasında embriyogenez sekteye uğrar; tohumlar zayıf gelişir veya embriyo oluşumu tamamlanamaz (Cheng ve Rerkasem, 1993; Dell ve Huang, 1997; Lovatt, 1985).

Bor yalnızca bitkiler için değil, hayvan ve insan metabolizmasında da önemli roller üstlenir; Ca, P ve Mg metabolizmasını, karbonhidrat ve lipid metabolizmasını ve antioksidan sistemleri etkiler. İnsanlar için önerilen günlük alım miktarı 1 – 13 mg olup, başlıca kaynakları meyve, sebze, kuruyemiş ve baklagillerdir (Nielsen, 1997, 2000).

Sonuç olarak, bor bitki büyümesi ve üremesi için hayati işlevlere sahip olup, hücre duvarı bütünlüğü, membran stabilitesi, metabolik süreçler, hormon dengesi ve reproduktif gelişim üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

2.3. Bitkilerde Bor Toksisitesi

Bor toksisitesine bağlı fizyolojik ve morfolojik belirtiler, bitki türlerinin floemde bor taşıma kapasitesine bağlı olarak belirgin şekilde çeşitlilik göstermektedir. Floemde taşınamayan türlerde bor, ksilem yoluyla taşınır ve transpirasyon akımının sonlandığı bölgelerde birikir. Bu nedenle buğday ve arpada görülen toksisite semptomları genellikle yaprak uçlarında başlayan kloroz ve nekroz olarak ortaya çıkar; kahverengi nekrotik lezyonlar zamanla kenarlardan tüm yaprak yüzeyine yayılır ve başlangıçta yaşlı yapraklarda görülür (Şekil 2.1). Toksisite ilerlediğinde yaprak kınları, sap, başak ve kılçıklarda da benzer lezyonlar gelişebilir. Ayrıca çıkış ve yapraklanmada gecikme, kısalmış gövde boyu, kuru madde birikiminin azalması, bin tane ağırlığında düşüş, bitki başına başak sayısının azalması ve genel verim kaybı bildirilmiştir (Bañuelos ve ark., 1999; Paull ve ark., 1988; Rehman ve ark., 2006). Bu semptomlar genellikle arpada buğdaya göre daha erken ve şiddetli görülmektedir (Yau ve ark., 1994). Toprak profilinde borun derinlikle artış gösterdiği alanlarda toksisite belirtileri gecikmekte ve verim kaybı daha sınırlı olmaktadır (Brennan ve Adcock, 2004).



Şekil 2.1. Çalışmamızda bor toksisitesi semptomu gösteren buğday bitkisi yaprağı (10 ppm B uygulaması)

Genotipler arasında toksisite şiddeti önemli ölçüde değişmekte; bazı genotiplerde bor uygulaması sonrası kuru madde üretimi azalırken, bazılarında değişmemekte veya artabilmektedir (Torun ve ark., 2006). Hem görsel semptomlar hem de verim kaybı bakımından buğday ve arpa genotipleri arasında geniş varyasyon rapor edilmiştir (Yau ve ark., 1997; Yau ve Saxena, 1997). Bazı genotiplerin yüksek sürgün bor konsantrasyonlarına rağmen verimlerini sürdürebilmesi, tolerans mekanizmalarının yalnızca bor alımının sınırlandırılmasına dayanmadığını göstermektedir (Avcı ve Akar, 2005).

Bitkilerde belirlenen bor düzeylerindeki farklılıklar; tür, organ, gelişme evresi, uygulanan bor dozu, genotip ve deneysel yöntemlere bağlıdır. Örneğin buğdayda bayrak yaprak bor konsantrasyonu tanedekine kıyasla yaklaşık on kat daha yüksektir ve yaşlı bitkiler daha fazla bor içerir (Moody ve ark., 1988). Genel olarak, buğdayda borun yaklaşık %68'i yapraklarda, %16'sı köklerde, %10'u başakta ve %6'sı sap dokusunda birikmektedir (Subedi ve ark., 1999).

Kritik sürgün bor konsantrasyonları buğday ve arpada genellikle 10 – 16 mg kg⁻¹ aralığında bildirilmektedir (Gupta, 1971; Mengel ve Kirkby, 1987), ancak farklı

denemelerde bu değerlerin 10 – 130 mg kg⁻¹ arasında değiştiği de rapor edilmiştir (Nable ve ark., 1997). Kontrollü koşullarda kritik seviyeler 60 mg kg⁻¹ (Gupta ve ark., 1976) ve 80 mg kg⁻¹ (Davis ve ark., 1978; Nable, 1988) olarak belirlenmiş, bazı buğday genotiplerinde ise bu değerler 44 – 318 mg kg⁻¹ aralığında bulunmuştur (Furlani ve ark., 2003). Aşırı bor uygulanan makarnalık buğdayda 324 – 648 mg kg⁻¹ seviyelerine ulaşılabilmektedir (Torun ve ark., 2006). Tarla koşullarında toksik eşik genellikle 10 – 30 mg kg⁻¹ olsa da, arpada 68 – 323 mg kg⁻¹ aralığına kadar çıkabilmektedir (Cartwright ve ark., 1986). Başka bir çalışmada arpada kritik sürgün konsantrasyonları 4 – 76 mg kg⁻¹, bayrak yaprağında ise 273 mg kg⁻¹ olarak belirlenmiştir (Brennan ve Adcock, 2004).

Floemde taşınımı sınırlı olan arpada yaprak uçlarında bor birikimi yaprak tabanına göre 10 – 50 kat daha yüksektir; bu durum, yaprak yapısına bağlı olarak borun u bölgelerde yoğunlaştığını göstermektedir. Transpirasyon, bor birikimini güçlü biçimde etkilemekte; artan su kullanımı yaprak uçlarında bor konsantrasyonunu artırmaktadır (Nable ve ark., 1990). Arabidopsis'te aşırı bor varlığının transpirasyon ve su taşınımını azaltarak tolerans mekanizması geliştirdiği ne srlmştur (Macho-Rivero ve ark., 2018). Ayrıca bor yağışla yapraktan kolayca yıkanabilir (Reid ve Fitzpatrick, 2009a; Reid ve Fitzpatrick, 2009b). Bu nedenle farklı türler ve çevresel koşullar dikkate alındığında evrensel bir kritik bor sınırı belirlemek oldukça güçtür.

Yaygın kabul gören görüş, tolerant buğday ve arpa genotiplerinin tüm dokularda daha düşük bor biriktirdiği yönündedir (Ghaffari Nejad ve ark., 2015; Paull ve ark., 1988). Bununla birlikte, bazı tolerant genotiplerin yksekk doku bor konsantrasyonlarına rağmen zarar görmediği de bildirilmiştir (Torun ve ark., 2006; Yau ve ark., 1994). Bu bulgu, tolerans mekanizmalarının hem bor alımının sınırlanmasına hem de hücresel düzeyde borun detoksifikasyonuna dayandığını göstermektedir.

Bor toksisitesi, çoğunlukla sıcak ve kurak (<250 mm) veya yarı kurak (250 – 450 mm) bölgelerde gözlenmekle birlikte (Nable ve ark., 1997; Paull ve ark., 1991), düşük sıcaklıklı ve düşük nemli ortamlarda da görülebilir (Mahalakshmi ve ark., 1995). Soğuk ve kuru dönemlerde kök büyümesi sınırlanır ve bitki, uygun su ve sıcaklık koşullarında alabileceği bor miktarını aldığı için toksisite belirtileri vejetasyonun erken evrelerinde ortaya çıkar.

Toprak profilinde borun derinliğe bağlı dağılımı da toksisiteyi şekillendirir. Örneğin Avustralya topraklarının çoğunda bor yüzeyden yaklaşık 1 m derinlikte maksimuma ulaşmaktadır (Brennan ve Adcock, 2004; Cartwright ve ark., 1986). Bu koşullarda toksisite belirtileri bitkinin ileri büyüme dönemlerine ertelenebilir. Kuraklık durumunda köklerin daha derinlere inmesi, daha yüksek bor seviyeleriyle karşılaşmalarına ve toksisitenin artmasına neden olur. Kontrollü koşullarda ise bor genellikle ekim sırasında uygulanmakta, bu da toksisite etkilerinin tarlaya kıyasla daha belirgin olmasına yol açmaktadır (Brennan ve Adcock, 2004; Yau ve Saxena, 1997).

2.4. Bitkide Bor Alımını Azaltma Stratejileri

2.4.1. İyon etkileşimleri

Bitkilerde bor (B) alımı, bazı anyonlarla benzer taşıma mekanizmalarına sahip olduğundan, belirli iyonlarla rekabet yoluyla azaltılabilmektedir (Goldberg ve ark., 1996). Özellikle nitrat, sülfat, molibdat ve fosfat iyonlarının B alımını sınırlayabildiği bildirilmiştir. Bu bağlamda fosfor-bor etkileşimi dikkat çekicidir. Çilekte (May ve Pritts, 1993) ve mısır genotiplerinde (Günes ve Alpaslan, 2000) P uygulamasının B alımını azalttığı rapor edilmiştir. Bu antagonizmanın, fosfat (PO_4^{3-}) ve borat (BO_3^{3-}) iyonlarının aynı taşıma sistemleriyle alınmasından kaynaklandığı öne sürülmektedir (Bergmann, 1992). Bununla birlikte, Goldberg ve ark. (1996), rekabetçi anyonların B adsorpsiyonu üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu ve B bağlanma bölgelerinin oldukça spesifik olabileceğini belirtmiştir. Dolayısıyla P uygulaması sonrası bitki dokusunda görülen B azalmasının, iyon rekabetinden ziyade P'nin biyokütleyi artırarak seyreltme etkisi yaratmasıyla ilişkili olabileceği düşünülmektedir (Kaya ve ark., 2009).

Makro besinler içinde azot (N), bitkilerde B alımını en fazla etkileyen elementlerden biri olarak bildirilmektedir (Koohkan ve Maftoun, 2016). Seralarda yürütülen çalışmalarda, 50 mg kg⁻¹ ve üzeri N uygulamasının arpa ve buğdayda B alımını azalttığı ve toksisite belirtilerini hafiflettiği tespit edilmiştir (Gupta ve ark., 1976). Marulda yüksek N seviyeleri ile B toksisitesinin azaldığı ve bu etkinin N-B iyon rekabetiyle ilişkilendirilebileceği bildirilmiştir (Ouzounidou ve ark., 2013). Benzer şekilde, pirinç tohumlarında artan N seviyeleri ile B konsantrasyonlarının düştüğü belirlenmiştir

(Koohkan ve Maftoun, 2015). Ancak birçok araştırmacı, bu azaltıcı etkinin esasen N uygulamasıyla artan büyüme sonucu oluşan biyokütle seyreltmesinden kaynaklanabileceğini vurgulamaktadır (Koohkan ve Maftoun, 2016; Reynolds ve ark., 1987).

Silisyum da B alımını azaltabilen bir diğer önemli elementtir. Bu etki genellikle B-silikat komplekslerinin oluşumu veya köklerde lignifiye/suberinize eksodermisin gelişmesi ile açıklanmaktadır (Inal ve ark., 2009; Metwally ve ark., 2018). Ayrıca Si'nin B taşıyıcılarını düzenlediği ve yüksek B koşullarında taşıma sistemlerinde rekabet yarattığı da rapor edilmiştir (Celikkol Akcay ve Erkan, 2016). Buna karşın bazı çalışmalar, arpa genotiplerinde Si ile B arasında belirgin bir rekabet ilişkisi olmadığını bildirmiştir (Nable ve ark., 1990), bu da tür veya genotip bazlı farklı mekanizmalar olabileceğini göstermektedir.

Bor ile metal iyonları arasındaki etkileşimler de araştırılmıştır. Örneğin bakır (Cu) varlığının membran bütünlüğünü koruyarak B alımını azalttığı bildirilmiştir; ancak mekanizması tam olarak açıklanamamıştır (Li ve ark., 2019). Alüminyumun (Al) B ile antagonistik etkileşimleri gözlemlense de, *Citrus grandis* fidelerinde Al ile B arasında doğrudan alım rekabeti tespit edilmemiştir (Jiang ve ark., 2009).

Genel olarak, bazı besin elementleri ve iyonların B alımını azaltabildiği görülmekle birlikte, bu etkinin çoğu zaman iyon rekabetinden ziyade büyüme artışı kaynaklı seyreltme mekanizmasına bağlı olabileceği değerlendirilmektedir. Bu nedenle, B toksisitesinin kontrolünde besin yönetimi stratejilerinin bitki türü, genotip, iyon etkileşimleri ve büyüme yanıtları dikkate alınarak planlanması gerekmektedir.

2.4.2. Hücre zarının korunması

Aşırı B maruziyeti, bitki hücre zarlarında lipid peroksidasyonuna yol açarak membran geçirgenliğini artırmakta ve bu durum pasif taşınım ile gerçekleşen B alımını hızlandırabilmektedir (Cervilla ve ark., 2009b). Doku elektrolit sızıntısı ölçümleriyle yapılan çalışmalar, yüksek B koşullarında membran geçirgenliğinin arttığını ve silisyum (Si) uygulamasının bu artışı azalttığını göstermiştir (Eraslan ve ark., 2008; Gunes ve ark.,

2007). Si'nin bu koruyucu etkisi, hücre duvarında amorf silika ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) tabakasının oluşumu (Exley, 2015) ve H_2O_2 üretimi ile malondialdehit düzeylerinin azalması gibi antioksidatif mekanizmalarla ilişkilendirilmiştir (Soylemezoglu ve ark., 2009). Ayrıca Si, lignifiye/suberinize kök eksodermisini kalınlaştırarak B girişini fiziksel olarak geciktirebilmektedir (Fleck ve ark., 2011; Ma ve Yamaji, 2006).

Kalsiyum (Ca), membran bütünlüğü ve iyon taşınımının düzenlenmesinde kritik rol oynar (Cramer ve ark., 1985). Ca uygulamaları, kivi, buğday, turp ve kanolada B alımını ve membran hasarını azaltmıştır (Siddiqui ve ark., 2013; Turan ve ark., 2009). Bu etki, Ca'nın pektinlerle bağlanarak hücre duvarında Ca-pektat kompleksleri oluşturması ve böylece B'yi duvar matriksinde stabilize etmesiyle açıklanmaktadır.

Çinko (Zn), kök membran bütünlüğünün korunmasında ve oksidatif stresin azaltılmasında önemli bir mikro elementtir (Cakmak, 2000; Güneş ve ark., 1999). Zn eksikliği, arpada toksik düzeyde B birikimine yol açmıştır (Graham ve ark., 1987). Zn'nin membran proteinlerine bağlanması ve ROS temizleyici rolü sayesinde B stresine karşı koruma sağladığı bildirilmiştir (Tavallali, 2017). Nitekim $5 - 10 \text{ mg kg}^{-1}$ Zn uygulaması antepfıstığında elektrolit sızıntısı ve MDA düzeylerini azaltmış, ancak daha yüksek dozlar etkisiz kalmıştır (Tavallali ve Karimi, 2017).

Azot monoksit (NO) da hücre zarının korunmasında önemli bir sinyal molekülüdür. NO uygulamalarının B toksisitesi altında artan membran geçirgenliğini ve MDA düzeylerini azalttığı; dolayısıyla ROS temizleyici ve membran stabilize edici işlev gördüğü bildirilmiştir (Aftab ve ark., 2012; Kaya ve Ashraf, 2015).

Bununla birlikte bazı çalışmalarda B kaynaklı membran hasarına ilişkin bulguların yetersiz olduğu, bazı bitkilerde ROS ve lipid peroksidasyonu artışının gözlenmediği bildirilmiştir (Cervilla ve ark., 2009b; Karabal ve ark., 2003). Ayrıca bazı durumlarda N ve Si uygulamaları iyon sızıntısında anlamlı değişiklik oluşturmamıştır (Celikkol Akcay ve Erkan, 2016). Bu nedenle, farklı bitki türlerinde membran koruyucu uygulamaların etkisi, tür/genotip ve çevresel koşullara göre dikkatle değerlendirilmelidir.

2.5. Toprakta Bor Alımını Azaltma Stratejileri

2.5.1. Yıkama

Topraktan bor uzaklaştırmanın en doğrudan ve en basit yöntemlerinden biri yıkamadır. Genel olarak, sulama yoluyla (taşkın sulama veya yağmurlama) üst toprakta çözünür halde bulunan bor kolaylıkla uzaklaştırılabilir. Yeterli miktarda su uygulandığında toprakta alınabilir bor düzeyi düşer ve bu durum yüksek bor koşullarında bitki büyümesini destekler. Örneğin Onthong ve ark. (2011), 167.5 mm (tarla kapasitesi) su uygulamasının 0 – 15 cm toprak katmanındaki boru 11.1 mg kg^{-1} 'dan, toksik olmayan 2.83 mg kg^{-1} seviyesine kadar düşürdüğünü bildirmiştir. Ancak yalnızca üst toprağın yıkanması çoğu bitki için yeterli değildir; çünkü bor derin toprak katmanlarında birikerek derin köklü bitkilerde zarara yol açabilir. Bu nedenle subsoylarda borun tutulmasını önlemek için daha fazla suya ihtiyaç duyulur. Ayrıca alkalın topraklarda bor hareketliliği düşük olduğundan, toprak asitleştirilmesi (ör. H_2SO_4 uygulaması) bor fiksasyonunu azaltır ve ardından yapılan yıkama işlemi borun uzaklaştırılmasını daha etkili hâle getirir (Prather, 1977).

Her ne kadar etkili ve uygulanabilir bir yöntem olsa da yıkamanın bazı sınırlılıkları vardır. İlk olarak, yüksek su ihtiyacı nedeniyle kurak ve yarı kurak bölgelerde uygulaması güçtür (Bañuelos ve ark., 1993; Stiles ve ark., 2010). İkinci olarak, yöntemin etkinliği toprak tipine bağlıdır; örneğin kumlu topraklarda bor yıkaması, siltli kil veya kireçli kil topraklara göre daha yüksektir (Dhassi ve ark., 2019). Üçüncü olarak, düşük adsorpsiyon kapasitesine sahip bor fraksiyonları kolayca yıkanabilirken, kil mineralleri, magnezyum hidroksit, organik madde, Al/Fe oksitleri ve kalsiyum karbonat gibi yüzeylere güçlü şekilde bağlı bor toprakta kalabilir ve zamanla tekrar bitkilerce alınabilir (Goldberg, 1997; Sharma ve ark., 2006). Dördüncü olarak, yıkanan bor, buharlaşma veya bitki transpirasyonu ile yeniden yüzeye taşınabilir (Onthong ve ark., 2011). Bu nedenlerle, bor bakımından zengin topraklarda yıkama uygulanmadan önce toprak özelliklerinin değerlendirilmesi ve kullanılacak su miktarının dikkatle planlanması gereklidir.

2.5.2. Toprak pH'sını düzenleme

Toprak çözeltisinin pH'sı, bor adsorpsiyonunu ve bitkiler tarafından kullanılabilirliğini önemli ölçüde etkilemektedir (Smith ve ark., 2013). Nötr pH koşullarında bor, bitkiler için erişilebilir form olan çözünür ve iyonlaşmamış borik asit (H_3BO_3) şeklinde bulunmaktadır (Güneş ve ark., 1999). Borik asit zayıf bir asit olup düşük iyonlaşma sabitine ve yüksek pK değerine sahiptir. Toprak pH'sının yükselmesiyle birlikte borik asidin yaklaşık %10'u tetraborat anyonuna $[B(OH)_4^-]$ dönüşür ve bu form kil mineralleri tarafından kolayca adsorbe edilir (Hutchinson ve Viets, 1969). Buna bağlı olarak, artan pH düzeylerinde adsorbe olan $B(OH)_4^-$ miktarı artmakta, çözünür bor azalmakta ve dolayısıyla H_3BO_3 formunda bor mevcudluğu düşmektedir. Bu durum, bor fazlalığını azaltmak amacıyla kireçleme yoluyla toprak pH'sının yükseltilmesini etkili bir yöntem hâline getirmektedir (Tsadilas ve ark., 2005). Kireçleme aynı zamanda, kireçli topraklarda önemli bir bor adsorpsiyon yüzeyi olan kalsiyum karbonat miktarını da artırarak bor bağlanmasını teşvik etmektedir (Goldberg, 1997). Nitekim Tsadilas ve ark. (2005) tarafından yapılan çalışmada kireçlemenin toprak pH'sını yükselttiği, bunun da toprakta alınabilir bor ve tütün yapraklarındaki bor birikimini azalttığı rapor edilmiştir.

Bununla birlikte, kireçleme uygulamalarının bazı olumsuz etkileri de bulunmaktadır. Özellikle kireçli ve yüksek pH'lı topraklarda kireç uygulaması mikro besin noksanlıklarına yol açabilmektedir (Çelik ve ark., 2010). Asidik topraklarda ise kireçleme, organik maddenin mikrobiyal ayrışmasını hızlandırarak organik komplekslerden bor salınımını artırabilmekte ve dolayısıyla alınabilir boru yükseltebilmektedir (Mandai ve ark., 1993). Ayrıca kireçleme, değişebilir Fe ve Al'in oksit veya hidroksit formuna çökmesine neden olarak bor adsorpsiyon yüzeylerini artırmakta ve toprakta ekstrakte edilebilir bor miktarını yükseltebilmektedir (Sarkar et al., 2015). pH < 5 koşullarında yapılan çalışmalarda, Citrus sinensis bitkisinin kök, gövde ve yaprak dokularındaki bor konsantrasyonlarının toprak pH'sının artışıyla birlikte yükseldiği bildirilmiştir (Long ve ark., 2017; Yang ve ark., 2019). Bu bulgular, asidik topraklarda bor toksisitesinin giderilmesinde kireçlemenin uygun bir strateji olmayabileceğini göstermektedir.

2.5.3. Organik madde uygulamaları

Bitkiler tarafından bor alımı, topraktaki toplam bor miktarından ziyade toprak çözeltisinde bulunan bor konsantrasyonu tarafından belirlenmektedir (Yermiyahu ve ark., 2001). Toprak organik maddesi, boru adsorbe edebilen önemli bir bileşen olup, toprak çözeltisindeki bor konsantrasyonunu ve bitkiler tarafından alınabilirliğini etkiler (Goldberg ve Suarez, 2012). Literatürde farklı sonuçlar bulunmakla birlikte, çalışmaların büyük çoğunluğu organik madde ilavesinin toprakta bor adsorpsiyonunu artırdığını göstermektedir (Meyer ve Bloom, 1997; Sarkar ve ark., 2014). Örneğin Stiles ve ark. (2011), turba yosunu ilavesiyle toprak organik maddesinin %25 ve %50 artırılması sonucunda çözünebilir bor düzeyinin sırasıyla yaklaşık %40 ve %70 oranında azaldığını bildirmiştir. Bu azalma, bitki sürgünlerinde bor birikiminin belirgin şekilde düşmesi ile paralel seyretmiştir. Çözünebilir bor konsantrasyonunun azalması iki mekanizma ile açıklanmaktadır: (i) organik maddenin oluşturduğu seyreltme etkisi ve (ii) bor–organik komplekslerinin oluşumu ile toprak katı faz yüzey alanının artması (Diana ve ark., 2010).

Bununla birlikte, organik madde tarafından tutulan borun bitkiler tarafından hemen kullanılmadığı, ancak organik maddenin ayrışmasıyla ilerleyen dönemlerde bitki için önemli bir bor kaynağı hâline gelebileceği rapor edilmiştir (Gupta ve ark., 1985). Dolayısıyla, organik madde uygulaması kısa vadede bor kullanılabilirliğini azaltarak toksisite riskini azaltmakta, uzun vadede ise ayrışma yoluyla kontrollü bir bor kaynağı sağlayabilmektedir.

2.6. Biyokömür

Biyokömür kavramı, toprak yönetimi ve karbon (C) zenginleştirme stratejilerine olan ilginin artmasıyla literatürde yer bulmuş yeni bir terimdir (Lehmann ve ark., 2006). Biyokömür, odunsu materyaller, hayvan gübresi veya yaprak gibi organik biyokütlenin oksijenin bulunmadığı ya da çok sınırlı olduğu kapalı sistemlerde ısıtılması sonucunda elde edilen karbon açısından zengin bir üründür. Daha teknik bir ifadeyle, organik materyallerin nispeten düşük sıcaklıklarda (<700°C) ve sınırlı oksijen koşullarında termokimyasal dönüşüme (piroliz) uğratılmasıyla oluşan katı karbon yapı biyokömür olarak tanımlanmaktadır (Lehmann ve Joseph, 2015).

Piroliz, organik maddenin oksijensiz ortamda yüksek sıcaklıkta termo-kimyasal bozunması olup, oksijen yokluğu materyalin yanarak külleşmesini engeller. Bu süreç hem fiziksel hem de kimyasal özelliklerde geri dönüşü olmayan değişimlere yol açar. Piroliz sonucunda katı biyokömürün yanı sıra sıvı biyo-yaglar ve gaz fazında yanıcı sentetik gazlar (singaz) oluşur. Elde edilen ürünlerin oranı uygulanan sıcaklığa bağlıdır: örneğin 400 – 500°C gibi daha düşük sıcaklıklarda biyokömür verimi yüksek iken, 700°C üzerindeki sıcaklıklarda gaz ve sıvı ürünlerin oranı artar. Hızlı pirolizde tipik ürün dağılımı yaklaşık %60 biyo-yag, %20 biyokömür ve %20 gaz iken, yavaş piroliz işlemleri biyokömür verimini %50 seviyelerine kadar çıkarabilmektedir (Winsley, 2007).

Enerji açısından değerlendirildiğinde, kuru biyokütlenin hızlı pirolizi için gerekli enerji, sistemin sağladığı toplam enerjinin yalnızca yaklaşık %15'ine karşılık gelmektedir. Modern piroliz sistemleri, süreçte açığa çıkan singazın yeniden kullanımını sağlayarak sistemin enerji ihtiyacını kendi kendine karşılayacak şekilde tasarlanmaktadır (Laird, 2008).

Biyokütle; odunsu ve otsu bitkiler, odun artıkları, enerji bitkileri, küspe, tarımsal ve endüstriyel yan ürünler, atık kâğıtlar, kentsel katı atıklar, talaş, biyo-katılar, çim artıkları, ürün işleme atıkları, hayvansal atıklar, su bitkileri ve algler gibi çok çeşitli doğal kaynaklardan elde edilen organik materyalleri kapsamaktadır (Yaman, 2004). Karbonhidrat yapısında karbon, hidrojen, oksijen ve azot içeren her türlü organik materyal potansiyel bir biyokütle kaynağı olarak değerlendirilebilmektedir. Bununla birlikte bazı biyokütle türlerinin önemli miktarlarda inorganik bileşen içerdiği de bildirilmektedir. Örneğin, odunsu materyallerde inorganik madde oranı yaklaşık %1 gibi düşük düzeylerde iken, tarımsal atıklarda ve otsu biyokütlerde bu oran %15'e kadar ulaşabilmektedir (Yaman, 2004). Biyokütlenin önemli organik bileşenleri selüloz, hemiselüloz ve lignindir (Klass, 1998).

Biyokütlenin oksijenli ortamda yanması durumunda organik bileşenlerin büyük kısmı kaybolmakta ve geriye çoğunlukla kalsiyum, magnezyum ve inorganik karbonatların hâkim olduğu kül kalmaktadır. Doğal yangınlarda dahi oksijenin sınırlı olduğu durumlarda materyalin bir kısmının kömürleşmesi, Biyokömür oluşumunun doğal bir süreç olarak da gerçekleşebildiğini göstermektedir.

Biyokömür üretimi geniş bir hammadde yelpazesi ve farklı piroliz koşulları altında gerçekleştirildiğinden, kimyasal yapısına dair tek bir tanım yapmak zordur. Bununla birlikte biyokömürün temel özellikleri arasında; yüksek karbon içeriği, aromatik karbon halkaları içeren yapısı ve oksijen ile hidrojen oranının oldukça düşük olması yer almaktadır (Lehmann ve Joseph, 2015). Bu özellikler, biyokömürü uzun süre toprakta stabil kalan ve karbon depolama potansiyeline sahip stratejik bir toprak iyileştiricisi hâline getirmektedir.

Literatürde kömür (charcoal) ve biyokömür kavramları çoğu zaman birbirine yakın görünse de, kullanım amaçları ve işlevleri bakımından önemli farklılıklar bulunmaktadır. Biyokömür temel olarak toprak özelliklerini iyileştirmek ve karbon depolama kapasitesini artırmak amacıyla üretilirken, kömür genellikle ısınma yakıtı, metalürji ve kimya endüstrisinde indirgeme ajanı veya filtre materyali olarak kullanılmaktadır. Tarımsal kömür (agrichar) terimi kimi kaynaklarda biyokömür ile benzer anlamda kullanılsa da, güncel bilimsel yazında “biyokömür” ifadesi daha yaygın olarak tercih edilmektedir. Bunun temel nedeni biyokömürün yalnızca tarımsal amaçlarla değil, aynı zamanda çevresel remediasyon, atık yönetimi ve karbon sekestrasyonu gibi farklı ekosistem hizmetlerinde de kullanılabilmesidir. Ayrıca biyokömür terimi, hammaddenin biyolojik kökenini vurgulamakta ve plastik ya da sentetik materyallerden elde edilen karbonlu ürünlerden ayrılmasını sağlamaktadır (Lehmann ve Joseph, 2015).

Aktif karbon ise biyokömür ile benzerlik taşısa da yoğunlukla endüstriyel filtrasyon uygulamaları için üretilir ve su buharı veya kimyasal ajanlarla 700°C üzerinde işlenerek yüksek yüzey alanına sahip hâle getirilir (Boehm, 1994; Lehmann ve Joseph, 2015). Dolayısıyla aktif karbon üretiminde amaç, adsorpsiyon kapasitesini artırmaktır.

Biyokömür yalnızca kompost veya çiftlik gübresi benzeri bir organik katkı maddesi değil, toprak kalitesini artırmada çoğu organik materyalden daha etkili bir iyileştirici olarak değerlendirilmektedir. Bu üstünlüğü; yüksek yüzey yük yoğunluğu (Liang ve ark., 2006), buna bağlı olarak yüksek besin tutma kapasitesi (Lehmann ve ark., 2003), özgün kimyasal yapısı (Baldock ve Smernik, 2002), kolloidal özellikleri (Lehmann ve ark., 2005) ve mikrobiyal parçalanmaya karşı yüksek direnç göstermesinden kaynaklanmaktadır (Cheng ve ark., 2008). Bu özellikler, biyokömürün toprakta uzun süreli stabilite sağlamasını ve

sürdürülebilir toprak iyileştirme uygulamalarında kritik bir araç olmasını mümkün kılmaktadır.

Biyokömür uygulamaları genel olarak dört ana hedefe dayanmaktadır: (i) çevre yönetimi, (ii) toprak iyileştirme ve buna bağlı olarak tarımsal üretimin artırılması ile toprak kirliliğinin azaltılması, (iii) atık yönetimi ve geri kazanımı, (iv) iklim değişikliği ile mücadele ve enerji üretimi. Bu uygulama alanlarının her birinin sosyal, ekonomik veya sosyo-ekonomik faydalar sağlaması beklenmektedir (Lehmann ve Joseph, 2015).

Konvansiyonel biyokütle yakma yöntemleri ve doğal ayrışma süreçleri, atmosfere önemli miktarda CO₂ salımına neden olmaktadır. Buna karşın, biyokütlenin piroliz yoluyla biyoçara dönüştürülmesi, karbonun uzun süre toprakta tutulmasını sağlayarak atmosferik sera gazı konsantrasyonlarının azaltılmasına katkıda bulunur. Farklı biyokütle tiplerinin (örneğin okaliptus odunu ve yaprakları, kağıt endüstrisi çamuru, tavuk gübresi, büyükbaş gübresi vb.) iki farklı sıcaklıkta pirolize edildiği bir çalışmada, elde edilen biyokömürlerin toprakta kalma sürelerinin 90 ila 1600 yıl arasında değişebileceği bildirilmiştir (Joseph ve ark., 2010). Özellikle daha yoğun aromatik yapı içeren biyoçarların yüzlerce yıl bozunmadan toprakta kalabildiği belirtilmektedir. Bu durum uzun vadede atmosferik CO₂'nin stabilize edilmesi ve kademeli olarak azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır.

Biyokömür toprak sistemlerinde bulunması; su kalitesinin iyileştirilmesi, toprak verimliliğinin artırılması, tarımsal üretkenliğin yükselmesi (Laird, 2008) ve tarım alanları üzerindeki baskıların azaltılması gibi çok yönlü ekosistem hizmetleri sunmaktadır. Bu nedenle biyokömür, hem sürdürülebilir toprak yönetiminde hem de iklim dostu tarımsal sistemlerin oluşturulmasında stratejik bir araç olarak değerlendirilmektedir.

Besin elementleri açısından düşük içeriğe sahip olmasına rağmen, biyokömür uygulamalarının pek çok çalışmada olumlu sonuçlar verdiği bildirilmiştir. Bu olumlu etkiler; toksik bileşiklerin nötralizasyonu (Wardle ve ark., 1998), toprak fiziksel özelliklerinin özellikle su tutma kapasitesi ve agregat stabilitesinin iyileştirilmesi (Lustosa Carvalho ve ark., 2020) ile toprak sıkışmasının azaltılması (Chan ve ark., 2007) gibi mekanizmalarla ilişkilendirilmektedir. Elektron mikroskobu analizleri, biyokömürün

bu etkilerinin büyük ölçüde yüksek poroziteye sahip mikroyapısından kaynaklandığını ortaya koymaktadır (Ogawa ve ark., 2006; Yu ve ark., 2006).

Kumlu topraklarda yürütülen çalışmalarda, biyokömür ilavesinin toprak hacim ağırlığını düşürdüğü, toplam gözenekliliği artırdığı ve solma noktasında tutulan su miktarını yükselterek tarla kapasitesi ile solma noktası arasındaki yarayışlı su miktarını önemli ölçüde iyileştirdiği bildirilmiştir (Abel ve ark., 2013). Biyokömürün hacim ağırlığı üretim hammaddesi ve piroliz koşullarına bağlı olarak 0.08 g cm^{-3} (Gundale ve DeLuca, 2006) ile 1.7 g cm^{-3} (Oberlin, 2002) arasında değişmektedir. Toprak hacim ağırlığının genellikle $1.3\text{--}2.0 \text{ g cm}^{-3}$ aralığında olduğu dikkate alındığında, biyokömür ilavesinin toprak yoğunluğunu anlamlı ölçüde azaltması beklenen bir durumdur. Nitekim farklı çalışmalarda biyokömür dozu arttıkça toprak hacim ağırlığının azaldığı rapor edilmiştir (Laird ve ark., 2010; Pereira ve ark., 2012).

Biyokömür ayrıca gübre kullanım etkinliğini artırarak besin elementlerinin yıkanma kayıplarını sınırlamaktadır. Bu durum, biyokömürün yüksek yüzey yükü, porozitesi ve geniş yüzey alanına bağlanmaktadır (Lehmann ve ark., 2003). Nitekim Lehmann (2007), yalnızca 40 mg L^{-1} fosfor içeren bir çözeltiden biyokömürün $>3000 \text{ mg kg}^{-1} \text{ PO}_4^{3-}$ adsorbe edebildiğini, aynı koşullarda doğal düşük fosforlu toprağın ise yaklaşık $600 \text{ mg kg}^{-1} \text{ PO}_4^{3-}$ adsorbe ettiğini bildirmiştir. Benzer şekilde Ghezzehei ve ark. (2014), 1 g biyokömürün 5 mg NH_4^+ ve 0.2 mg PO_4^{3-} 'dan daha fazlasını adsorbe edebildiğini belirtmişlerdir. Bu şekilde besin elementlerini tutan biyokömür, bitkiler için yavaş salımlı bir besin kaynağı olarak işlev görebilmektedir (Biederman ve Harpole, 2013; Spokas ve ark., 2012).

Ghezzehei ve ark. (2014) ise 300°C 'de üretilen biyokömürün, süt sığırcılığı işletmelerinden elde edilen sıvı gübredeki NH_4^+ 'un %20–43'ünü ve fosforun %19 – 65'ini sorbe edebildiğini belirlemişlerdir. Bu sonuçlar, biyokömürün hem besin geri kazanımı hem de çevresel kayıpların azaltılması açısından stratejik bir materyal olduğunu göstermektedir.

Biyokömürün toprak sistemlerine uygulanmasını takiben etkilerinin zaman içerisinde belirgin biçimde güçlendiği çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur. Cheng ve Lehmann

(2009), 12 aylık aerobik inkübasyon çalışmasında meşe odunundan üretilen biyokömürün yüzey özelliklerinde anlamlı değişimler meydana geldiğini bildirmiştir. Özellikle yüzeydeki fonksiyonel grupların, asitlik derecesinin ve negatif yük yoğunluğunun zamanla arttığı belirlenmiştir. Bu bulgular, tarla koşullarında önceki yıllarda uygulanan biyokömür örneklerinin incelendiği çalışmalarda elde edilen sonuçlarla da uyumludur. Nitekim Joseph ve ark. (2010), arazi koşullarında yaşlanmış biyokömürlerin, taze biyokömlere kıyasla daha yüksek negatif yüzey yükü ve daha yoğun fonksiyonel grup içerdiğini rapor etmiş ve bu değişimlerin biyokömür yüzeyinde organo-mineral agregatlaşmayı teşvik ettiğini belirtmiştir.

Biyokömürün toprak ortamında uzun süre bozulmadan kalabilmesi ve etkilerinin zamana bağlı olarak artış göstermesi, tarımsal üretimde sürdürülebilirliğin sağlanmasında stratejik bir avantaj oluşturmaktadır. Bu özellik, biyokömürü yalnızca kısa vadeli bir toprak düzenleyici değil, aynı zamanda karbon depolama ve ekosistem dayanıklılığını artırmaya yönelik uzun vadeli bir yönetim aracı hâline getirmektedir.

Ayrıca, kolaylıkla temin edilebilen tarımsal ve organik atıkların piroliz yoluyla biyokömüre dönüştürülmesi; bu materyallerin ayrışma sürecinde açığa çıkabilecek besin elementlerinin yüzey akışıyla kaybını önlemekte, toprak fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirerek verimliliği artırmakta ve uzun süreli karbon depolanmasını mümkün kılmaktadır (Ghezehei ve ark., 2014). Tarımsal atıkların biyokömüre dönüştürülerek tarlalara uygulanması; karbonun toprakta tutulmasını sağlayarak iklim değişikliği ile mücadeleye katkı sunmakta, toksik maddeleri adsorbe ederek kirliliği azaltmakta ve toprak verimliliğini uzun vadede destekleyen sürdürülebilir bir toprak iyileştirme stratejisi sunmaktadır.

2.7. Biyokömür – Bor Etkileşimi

Bor adsorpsiyon mekanizması, biyokömür yüzeyinde yer alan oksijen içeren fonksiyonel grupların (örneğin $-OH$, $-COOH$ ve fenolik $-OH$) borik asit molekülleriyle kurduğu özgün kimyasal etkileşimlere dayanmaktadır. Bu süreçte borun yüzeye bağlanması başlıca hidrojen bağları ve yüzey kompleksleşme reaksiyonları aracılığıyla gerçekleşmekte; böylece biyokömür matriksi üzerinde kararlı bor komplekslerinin

oluşumu sağlanmaktadır. (Wang ve ark., 2024). Borik asit, zayıf Lewis asidi karakteri nedeniyle biyokömür yüzeyindeki hidroksil gruplarıyla etkileşime girerek monodentat veya bidentat borat kompleksleri oluşturabilmektedir; bu durum, borun biyokömür matriksine kovalent benzeri koordinasyon bağları ile bağlanmasını kolaylaştırmaktadır (Liao ve ark., 2024; Su ve Suarez, 1995).

Ayrıca, biyokömürün π -elektron yoğun aromatik yapıları ve yüksek özgül yüzey alanı, bor moleküllerinin π - π etkileşimleri ve van der Waals kuvvetleri ile immobilizasyonunu desteklemektedir (Ambaye ve ark., 2021). Termokimyasal piroliz esnasında hemiselüloz ve ligninin termal parçalanması sonucu açığa çıkan mikrogözenekli yapı ve yüzey oksijen fonksiyonelliği, bor adsorpsiyon kapasitesini anlamlı düzeyde artırmaktadır. Özellikle hemiselüloza ait amorf fraksiyonların daha kolay depolimerize olması, aktif fonksiyonel grup yoğunluğunu artırarak borun yüzeyle etkileşimini güçlendirmektedir (Fang ve ark., 2014; Jiang ve ark., 2024). Ek olarak, biyokömürün pH tamponlama kapasitesi ve yüzey yük özellikleri, çözeltilerdeki borik türleşmeyi ($B(OH)_3 \leftrightarrow B(OH)_4^-$) yönlendirerek elektrostatik çekim mekanizmalarını tetiklemektedir. Özellikle biyokömür yüzeyinde negatif yük dağılımının baskın olduğu alkali koşullarda $B(OH)_4^-$ iyonlarının adsorpsiyonu, elektrostatik cazibe ve ligand değişimi mekanizmalarıyla gerçekleşmektedir (Amirshekari ve ark., 2025; Chisté ve ark., 2024; Van Eynde ve ark., 2020). Bu bulgular, lignoselülozik kökenli biyokömürlerin bor çevrimi ve bor kirliliğinin kontrolünde yüksek potansiyel taşıdığını göstermekte olup, bor sorpsiyonunun hem yapısal mikro-gözeneklilik hem de yüzey kimyası tarafından ortaklaşa belirlendiğini ortaya koymaktadır.

Çalışmanın temel amacı, bor toksisitesine karşı artan dozlarda uygulanan biyokömürün buğday (*Triticum aestivum* L.) bitkisindeki etkilerini sistematik olarak değerlendirmektir. Bu kapsamda, biyokömür uygulamalarının bor toksisitesini azaltma potansiyelinin belirlenmesi, buğday bitkisinin bor alımı üzerindeki düzenleyici etkilerinin ortaya konulması ve bor stresinin hafifletilmesinde en etkili biyokömür dozunun tespit edilmesi hedeflenmektedir. Bu araştırma, borla kirlenmiş tarım topraklarında biyokömür kullanımına yönelik etkin ve sürdürülebilir bir strateji geliştirilmesine bilimsel katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çalışma; Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü iklim odası koşullarında, yapay ışık altında gerçekleştirilmiştir.

3.1. Materyal

3.1.1. Sera denemesinde kullanılan bitki materyali

Çalışmada bitki materyali olarak Basilio ekmeklik buğday çeşidi (*Triticum aestivum* L.) kullanılmıştır. Basilio ekmeklik buğday çeşidi alternatif kışlık karakterli olup, bitki boyu 80 – 110 cm, dane rengi kırmızı sert taneli, protein oranı %12 – 16, hektolitre ağırlığı ise 78 – 86 g arasındadır. Kuru tarım verimi 300 – 520, sulu tarım verimi ise 800 – 1200 kg'dır (Anonim, 2025).

3.1.2. Sera denemesinde kullanılan toprak materyali

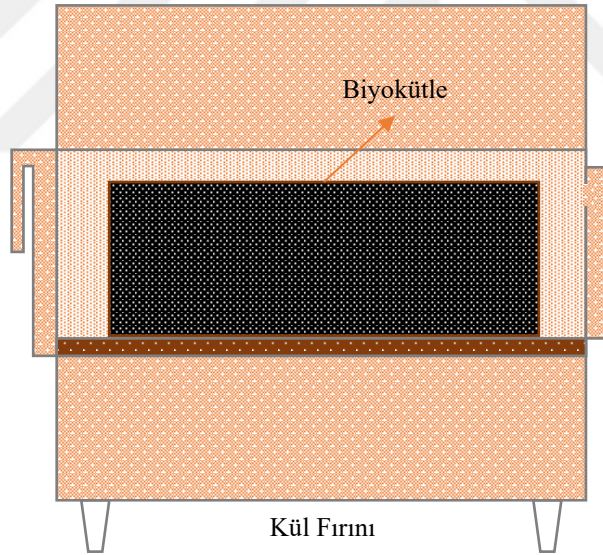
Denemede bitkiye yararışlı B konsantrasyonu düşük (0.21 mg kg^{-1}), pH'sı 7.10, kireç içeriği yüksek (%11.6), organik madde bakımından az (%1,02), tınlı bir toprak kullanılmıştır. Deneme toprağının bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan toprağın bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri

Parametre	Birim	Değer
pH	-	7,10
Tuz	dS/m	0,14
Organik Madde	%	1,02
Kireç	%	11,6
Tekstür	-	Tın
P	kg da^{-1}	10,1
K	kg da^{-1}	88
Zn	mg kg^{-1}	0,48
Fe	mg kg^{-1}	2,32
B	mg kg^{-1}	0,21

3.1.3. Biyokömür üretimi ve özellikleri

Çalışmada kullanılan biyokömür materyali çeltik kavuzu biyokütlesinden elde edilmiştir. Biyokütle, öncelikle nem içeriklerinin tamamen uzaklaştırılması amacıyla 70 °C’de 48 saat süreyle etüvde kurutularak sabit ağırlığa ulaşmaya kadar işlem görmüştür. Biyokömür üretim süreci (Şekil 3.3), Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, $40 \times 25 \times 20 \text{ cm}^3$ (şekil 3.2) boyutlarında özel olarak tasarlanmış biyokömür üretim reaktörü (Şekil 3.1) kullanılmıştır. Çeltik kavuzu, 500°C sıcaklıkta, kontrollü koşullar altında yavaş piroliz işlemine tabi tutulmuş ve kül fırınında (Şekil 3.2) karbonizasyon işlemi tamamlanarak biyokömüre dönüştürülmüştür (Şekil 3.3). Piroliz işlemi sırasında açığa çıkan singaz ve katran fraksiyonları herhangi bir toplama veya depolama işlemine tabi tutulmamış; yalnızca katı faz ürün olan biyokömür elde edilmiştir (Erdem, 2021).



Şekil 3.1. Biyokömür üretim cihazının şeması



Şekil 3.2. Piroliz için hazırlanmış kabın kül fırını içerisine yerleştirilmesi



Şekil 3.3. Biyokütlenin biyokömüre dönüşüm süreçleri

Çalışmada kullanılan çeltik kavuzu biyokömürü, kimyasal özellikleri bakımından yüksek karbon içerikli bir materyal olup, C/N oranı 124/1 olarak belirlenmiştir. Biyokömürün pH değeri 10.2 olup, bu durum materyalin belirgin şekilde alkali karakter sergilediğini göstermektedir. Ayrıca, toplam besin elementi konsantrasyonları sırasıyla P için %0.01, K için %0.34 ve B için 16 mg kg⁻¹ olarak tespit edilmiştir. Bu değerler, çeltik kavuzu biyokömürünün özellikle potasyum açısından nispeten zengin bir matrise sahip olduğunu, fosfor içeriğinin ise düşük düzeyde bulunduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, biyokömürün özgül yüzey alanı (SYA) 122.35 m² g⁻¹ olarak ölçülmüş olup, bu yüksek yüzey alanı değerinin biyokömürün adsorpsiyon kapasitesi ve toprak iyileştirme potansiyeli açısından önemli bir avantaj sunduğu değerlendirilmektedir.

3.2. Metot

3.2.1. Denemenin kurulması ve yürütülmesi

Deneme, tesadüf parselleri deneme desenine göre üç tekerrürlü olarak kurulmuştur. Denemede plastik saksılar kullanılmış olup, her bir saksıya hava kuru ve 4 mm elekten geçirilmiş 2250 g toprak konulmuştur. Temel gübreleme kapsamında tüm saksılara, 200 mg kg⁻¹ N (Ca(NO₃)₂ formunda), 100 mg kg⁻¹ P (KH₂PO₄ formunda), 2 mg kg⁻¹ Fe (Fe-EDTA formunda) ve 2 mg kg⁻¹ Zn (ZnSO₄·7H₂O formunda) homojen bir şekilde toprağa karıştırılmıştır.

Deneme faktörleri kapsamında bor uygulaması 0, 5 ve 10 mg kg⁻¹ dozlarında H₃BO₃ formunda yapılmış; biyokömür uygulaması ise %0, %1 ve %2 (w/w) seviyelerinde saksılara eklenmiştir. Biyokömür ve bor uygulamaları, deneme kurulumu esnasında diğer gübrelerle birlikte homojen bir şekilde toprağa karıştırılarak tamamlanmıştır.

Her saksıya 12 adet buğday tohumu ekilmiş, çıkış sonrası fide sayısı 6 bitkiye düşürülmüştür. Bitkilerin sulaması, günlük su ihtiyacına göre saf su kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bitkilerde bor toksisitesi belirtileri (Şekil 2.1), yeşil aksam büyüme performansı ve vegetatif gelişim evresi dikkate alınarak, 66. günde sapa kalkma dönemi başlangıcında (Zadoks 30) kök ve yeşil aksam olarak şekilde hasat edilmiştir (Zadoks ve ark., 1974).

3.2.2. Bitki analizleri

Yeşil Aksam ve Kök Kuru Madde Verimi: Hasat edilen kök örnekleri, 1 mM CaCl₂ ve 1 mM EDTA çözeltileri ile yıkanmış (Çakmak ve ark., 2009), ardından saf su ile durulanmıştır. Yıkama işlemi sonrası kök örnekleri, 70°C’de etüvde sabit ağırlığa ulaşmaya kadar kurutulmuştur. Yeşil aksam örnekleri de saf su ile yıkanmış ve aynı şekilde 70°C’de kurutulmuştur. Kurutulan kök ve yeşil aksam örnekleri hassas terazide tartılmış ve bitki başına yeşil aksam ve kök kuru madde verimi (g bitki⁻¹ veya mg bitki⁻¹) hesaplanmıştır.

Mineral Element Analizleri: Kuru ağırlıkları belirlenen yeşil aksam ve kök örnekleri agat değirmeninde öğütüldükten sonra bitki örnekleri yaş yakma yöntemine göre H₂O₂-HNO₃ asit karışımı kullanılarak mikrodalga cihazında (CEM Mars 6) yakılmıştır (Kacar ve İnal, 2008). Yakma işlemi sonrasında elde edilen süzüklerde B, P, K, Zn ve Fe elementlerinin konsantrasyonları ICP-OES (Varian Vista Pro) cihazı ile belirlenmiştir. Azot konsantrasyonları ise Kjeldahl distilasyon yöntemine göre belirlenmiştir (Bremner, 1965).

3.2.3. İstatistiksel analizler

Uygulanan her bir bor dozunda, kök ve yeşil aksam kuru madde verimi ile besin elementi konsantrasyonları üzerine biyokömür uygulamalarının etkileri, tek yönlü varyans analizi (ANOVA) ile değerlendirilmiştir. Biyokömür uygulamaları arasında yeşil aksam kuru madde verimi ve besin elementi konsantrasyonları bakımından oluşan farklılıkların istatistiksel olarak anlamlı bulunması durumunda, benzer grupların belirlenmesinde DUNCAN çoklu karşılaştırma testi kullanılmıştır. Tüm istatistiksel analizler JMP 18 paket programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



4. BULGULAR ve TARTIŞMA

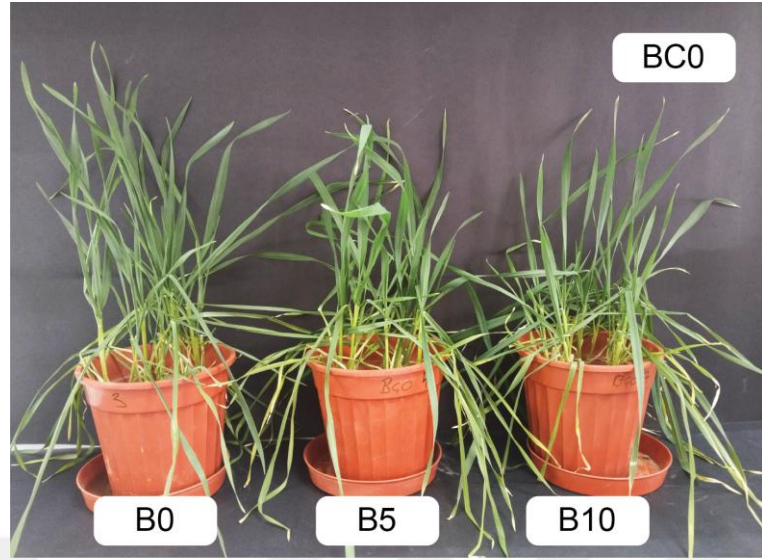
4.1. Kök ve Yeşil Aksam Kuru Madde Verimi

Artan bor uygulamaları buğday bitkisinin yeşil aksam ve kök kuru madde veriminde istatistiksel olarak ($p < 0.001$) önemli düzeyde kayıplara neden olmuştur (Şekil 4.1, Şekil 4.2). BC0 koşullarında kök kuru madde B0'da $0.11 \text{ g bitki}^{-1}$ iken B10'da $0.09 \text{ g bitki}^{-1}$ 'e düşmüş olup yaklaşık %18'lik bir azalmaya neden olmuştur (Şekil 4.1).



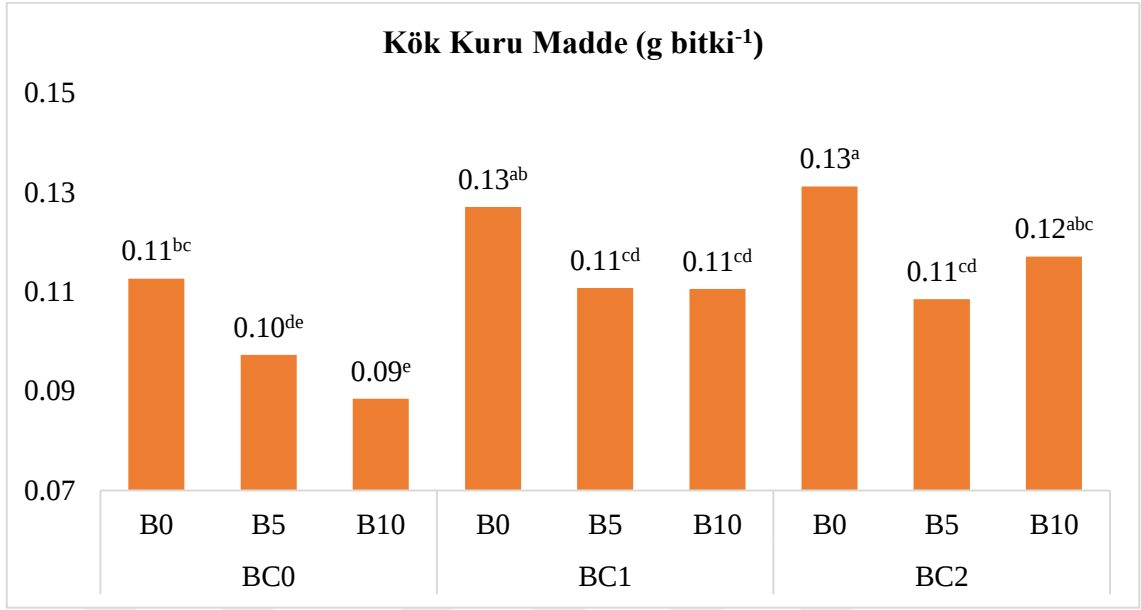
Şekil 4.1. Bor toksisitesinin bitkinin kök gelişimi üzerine etkisi

Yeşil aksam kuru madde ise aynı koşullarda 0.74 'ten $0.60 \text{ g bitki}^{-1}$ 'e gerileyerek %19 düzeyinde azalma görülmüştür (Şekil 4.2, Şekil 4.4).



Şekil 4.2. Bor toksisitesinin bitkinin yeşil aksam gelişimi üzerine etkisi

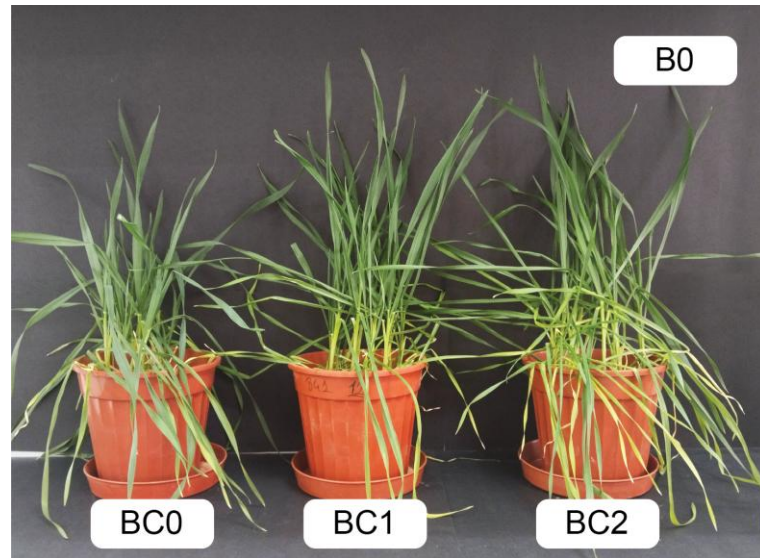
Bu durum, yüksek bor yükünün hücresel membran stabilitesini bozması, reaktif oksijen türleri birikimini artırması ve fotosentetik karbon sabitleme kapasitesini azaltmasıyla ilişkilendirilmektedir (Zhao ve ark., 2024). Literatürdeki bulgular da bor fazlalığının klorofil içeriğini azalttığını, stomatal iletkenliği sınırladığını ve dolayısıyla karbon asimilasyonunu düşürerek biyokütle üretimini olumsuz etkilediğini göstermektedir (Oikonomou ve ark., 2019). Nitekim Ghaffari Nejad ve ark. (2015), sera koşullarında yürüttükleri çalışmada on farklı buğday çeşidine artan düzeylerde bor uygulaması (0, 2.5, 5.0, 10.0, 20.0 ve 40.0 mg B kg⁻¹) sonucunda tüm çeşitlerde kuru madde verimlerinde anlamlı düşüşler meydana geldiğini bildirmiştir. Benzer şekilde Ammarah Hasnain ve ark. (2011), yüksek bor birikiminin özellikle fotosentetik organlarda doku hasarına yol açtığını, bunun sonucunda fotosentez ürünlerinin azalmasıyla bitki biyokütle veriminin belirgin şekilde gerilediğini belirtmiştir.



Şekil 4.3. B toksisitesine karşı BC uygulamalarının kök kuru madde verimi üzerine etkisi

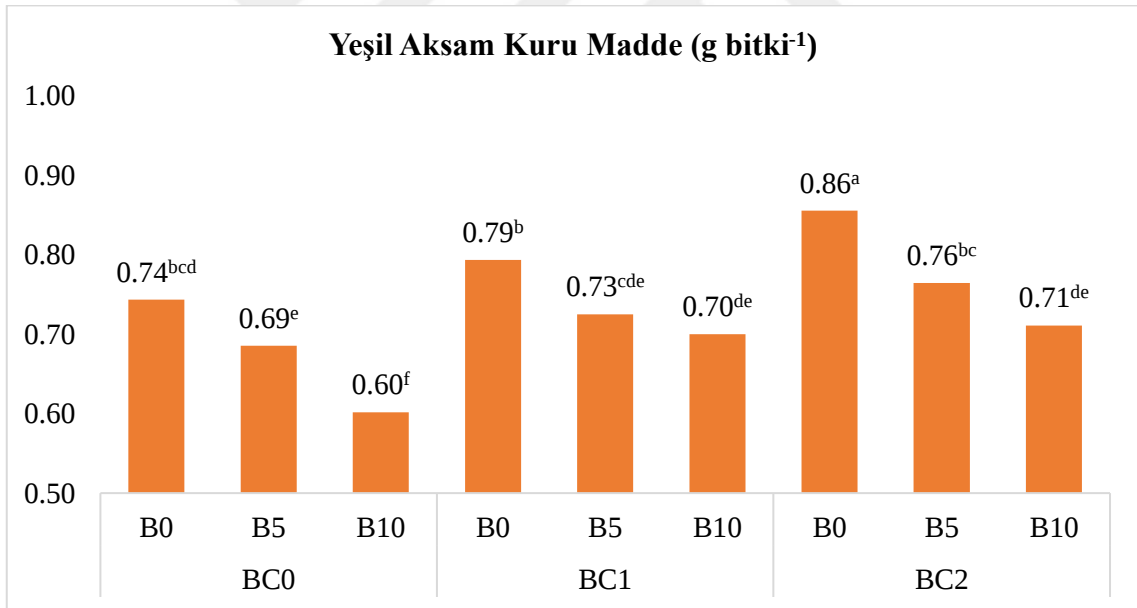
Bor uygulamalarında bağımsız olarak sonuçlar değerlendirildiğinde, biyokömür uygulamaları hem kök hem de yeşil aksam kuru madde verimi istatistiksel olarak ($p < 0.001$) önemli düzeyde artışa neden olmuştur (Şekil 4.3, Şekil 4.5).

B0 koşulunda BC0'a göre BC2 uygulaması kök kuru maddesini 0.11'den 0.13 g bitki⁻¹'e yükselterek yaklaşık %18'lik artış sağlamış; yeşil aksam kuru madde verimi ise 0.74'ten 0.86 g bitki⁻¹'e çıkmış ve %16'lık bir artış gözlenmiştir (Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5).



Şekil 4.4. Biyokömürün bitkinin yeşil aksam gelişimi üzerine etkisi

Bu iyileşme, biyokömürün toprak su tutma kapasitesini ve katyon değişim kapasitesini artırması, besin elementlerinin yıkanmasını azaltması ve rizosfer mikrobiyal aktivitesini desteklemesiyle ilişkilidir (Khan ve ark., 2024; Zhu ve ark., 2025). Dolayısıyla biyokömür, stres olmayan koşullarda dahi bitki büyümesini optimize eden bir toprak iyileştiricisi olarak öne çıkmıştır. Son çalışmalar, biyokömürün hem doğrudan hem de dolaylı etki mekanizmaları aracılığıyla bitki büyümesini artırabildiğini göstermektedir (Alkharabsheh ve ark., 2021). Biyokömür uygulaması altında gözlenen doğrudan büyüme teşviki, bitkilere kalsiyum, magnezyum, fosfor, potasyum, kükürt vb. temel mineral besin elementlerinin sağlanmasını içermektedir (Aubertin ve ark., 2021; Cheng ve ark., 2018). Öte yandan, dolaylı mekanizma, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin iyileştirilmesini kapsamaktadır (Akhtar ve ark., 2015; Basso ve ark., 2013).



Şekil 4.5. B toksisitesine karşı BC uygulamalarının yeşil aksam kuru madde verimi üzerine etkisi

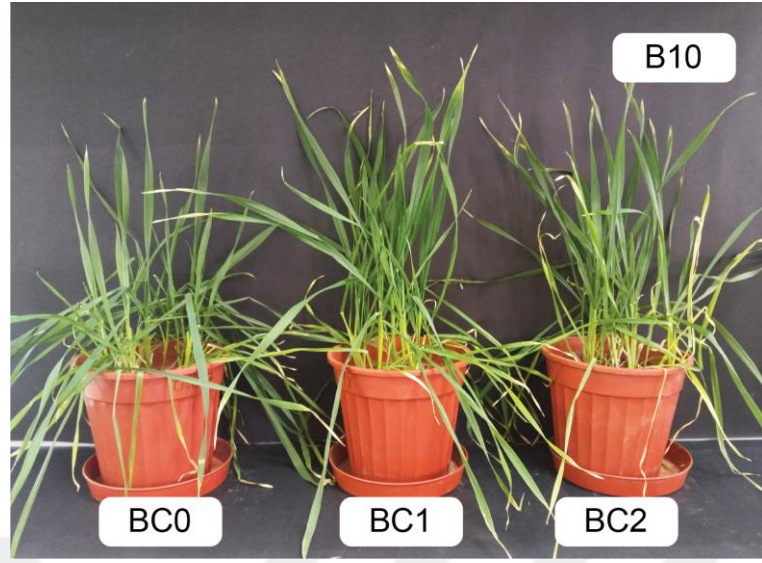
Bor toksisitesi altında biyokömür uygulaması bitki büyümesini istatistiksel olarak ($p < 0.05$) artışa neden olmuştur. BC0B10 uygulamasında kök kuru madde verimi 0.09 g bitki⁻¹ iken, BC2B10 uygulamasında %33'lük bir artışa neden olarak 0.12 g bitki⁻¹'e yükselmiştir (Şekil 4.3, Şekil 4.6). Kök kuru madde verimindeki eğilime benzer şekilde yeşil aksam kuru madde verimi de BC0B10 uygulamasında 0.60 g bitki⁻¹ olan kuru madde

verimi $0.71 \text{ g bitki}^{-1}$ 'e çıkarak %18 düzeyinde artışa neden olmuştur (Şekil 4.5, Şekil 4.7). Bu sonuçlar, biyokömürün bor kaynaklı hücresel ve fizyolojik stres tepkilerini hafifleterek büyüme performansını desteklediğini göstermektedir.



Şekil 4.6. Biyokömürün bitki köklerindeki bor toksisitesini azaltıcı etkisi

Bu iyileştirici etkinin temelinde, biyokömürün toprak-bitki sisteminde birden fazla sinerjistik mekanizmayı eşzamanlı aktive ettiği görülmektedir. Öncelikle, biyokömürün yüzey fonksiyonel grupları ve yüksek spesifik yüzey alanı, bor iyonlarının yüzeye adsorpsiyonunu artırarak bitkinin alabileceği fitotoksik bor fraksiyonunu sınırlandırmaktadır (Amirshakari ve ark., 2025; Liao ve ark., 2024). Ek olarak, biyokömürün pH tamponlama kapasitesi ve anyon değişim davranışı, topraktan çözünebilir bor salınımını modüle etmekte ve borun toprak çözeltisindeki aktivitesini azaltmaktadır (Chisté ve ark., 2024; Ghorbani ve ark., 2024).



Şekil 4.7. Bor toksisitesi koşullarında biyokömürün bitki yeşil aksamındaki bor toksisitesini azaltıcı etkisi

Fizyolojik açıdan bakıldığında, biyokömür uygulaması, bor stresinin indüklediği oksidatif yükü azaltarak bitkide antioksidatif enzim faaliyetlerinin (SOD, CAT, POD) yeniden dengelenmesine katkı sağlamaktadır (Hussain ve ark., 2022). Son yıllarda yapılan çalışmalar, biyokömürün glutatyon, askorbat ve fenolik bileşikler gibi düşük molekül ağırlıklı antioksidanların birikimini de teşvik ettiğini ve buna bağlı olarak hücre zarının peroksidatif hasardan korunduğunu göstermiştir (Anteh ve ark., 2023; Machado ve ark., 2025). Bu, bor toksisiteli koşullarda yaygın olarak raporlanan lipid peroksidasyonu, membran geçirgenliği artışı ve kloroplast yapısal bozulmalarının önlenmesi açısından önemlidir. Ayrıca biyokömürün rhizosfer biyotasını aktive ederek bitki büyümesini destekleyen mikrobiyal toplulukların (PGPR, mikorizal mantarlar) artışına yol açtığı bilinmektedir (Malik ve ark., 2022). Bu mikrobiyal aktivite artışı, kök yüzeyinde mukopolisakkarit üretimi ve rizosferde humik benzeri maddelerin birikimi ile bor bağlama kapasitesini daha da artırabilir. Böylece biyokömür sadece kimyasal değil, biyolojik tampon etkisi de oluşturmaktadır.

4.2. Kök ve Yeşil Aksam B Konsantrasyonu

Bor uygulaması hem kök hem de yeşil aksamdaki B konsantrasyonlarını istatistiksel olarak önemli düzeyde artırmıştır ($p < 0.001$) (Çizelge 4.1). BC0 koşulunda kök dokularda bulunan B konsantrasyonu B0 dozunda 14.1 mg kg^{-1} iken, B10 dozunda 47.4 mg kg^{-1}

yükselmiştir (%236 artış). Aynı durum BC1 (%266) ve BC2 (%174) uygulamalarında da devam etmiştir. Benzer durum yeşil aksam bor konsantrasyonlarında da görülmüş, BC0B0 (19.2 mg kg⁻¹) uygulamasına göre BC0B10 (452 mg kg⁻¹) uygulamasıyla yeşil aksam bor konsantrasyonunda yaklaşık 23 katlık bir artış meydana gelmiştir (Çizelge 4.1). Bu bulgular, artan bor dozunun hem kök hem de sürgün dokularında birikime yol açtığını, ancak translokasyonun sürgün lehine gerçekleştiğini göstermektedir. Nitekim yapraktaki yüksek B birikimi, ksilem üzerinden aktif taşınımın artmasıyla ilişkilidir (Dannel ve ark., 2002). Bu durum, B'nin floem hareketliliği sınırlı olmasına karşın, ksilem akışıyla hızlı bir şekilde üst organlara taşındığını ve toksik birikimlerin genellikle yeşil aksamalarda görüldüğünü doğrulamaktadır (Pereira ve ark., 2021; Stangoulis ve ark., 2010). Ayrıca, kök B konsantrasyonunun düşük kalması, bitkinin aşırı boru rizosferden uzaklaştırma veya kök duvarında kompleksleme mekanizmasıyla sınırlandırma eğilimine işaret etmektedir.

Çizelge 4.1. BC ve B uygulamalarının kök ve yeşil aksam B konsantrasyonu üzerine etkisi

BC Dozu (%)	B Dozu (mg kg ⁻¹)	Kök	Yeşil Aksam
		B (mg kg ⁻¹)	
BC0	B0	14.1 ^f	19.2 ^f
	B5	26.3 ^d	202 ^c
	B10	47.4 ^a	452 ^a
BC1	B0	12.0 ^f	16.4 ^f
	B5	24.3 ^d	151 ^d
	B10	43.9 ^b	291 ^b
BC2	B0	10.9 ^f	13.8 ^f
	B5	19.5 ^e	122 ^e
	B10	29.9 ^c	156 ^d
BC		***	***
B		***	***
BC x B		***	***

Sütunlardaki aynı harfe sahip ortalamalar, Duncan Çoklu Karşılaştırma Testine göre $p < 0.05$ düzeyinde anlamlı farklılık göstermemektedir. *: $p < 0.05$; **: $p < 0.01$; ***: $p < 0.001$; ns: anlamsız (istatistiksel olarak anlamlı değil).

Bor uygulamalarından bağımsız olarak biyokömür dozunun artışı hem kök hem de yeşil aksamda bor konsantrasyonunu istatistiksel olarak önemli düzeyde azaltmıştır ($p<0.001$) (Çizelge 4.1). Ortalama kök B konsantrasyonu BC0 uygulamasında 29.2 mg kg^{-1} iken BC2 uygulamasında 20.1 mg kg^{-1} 'e düşerek %31'lik bir azalmaya neden olmuştur. Yeşil aksamda bu azalma daha belirgin olup, BC0 uygulamasında ortalama B konsantrasyonu 224 mg kg^{-1} 'den BC2 uygulamasında 97 mg kg^{-1} düşerek %57'lik azalmaya neden olmuştur (Çizelge 4.1). Bu durum, biyokömürün yüksek yüzey alanı ve negatif yüklü fonksiyonel gruplarının bor adsorpsiyon kapasitesini artırarak, toprak çözeltisindeki aktif bor fraksiyonunu azaltmasından kaynaklanmaktadır (Ambaye ve ark., 2021; Wang ve ark., 2024). Ayrıca, biyokömürün pH tamponlama etkisi ve su tutma kapasitesini artırması, borun kök yüzeyinde difüzyon hızını sınırlandırarak bitki alımını azaltabilir.

Biyokömür ve bor interaksiyonu bakımından elde edilen verilere göre biyokömür uygulaması borun toksik etkisini azaltması bakımından istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0.001$). Biyokömür uygulaması özellikle en yüksek bor uygulaması koşullarında (B10) bitkideki borun toksik birikimi baskıladığı ortaya çıkmıştır. BC0B10 uygulamasında 47.4 mg kg^{-1} olan kök B konsantrasyonu, BC2B10 uygulamasında %37 oranında azalarak 29.9 mg kg^{-1} 'e düşmüştür. Benzer bir şekilde yeşil aksam B konsantrasyonu BC0B10 uygulamasında 452 mg kg^{-1} iken BC2B10 uygulamasında 156 mg kg^{-1} 'e düşerek %65 düzeyinde bir azalmaya neden olmuştur (Çizelge 4.1). Bu belirgin azalma, biyokömürün bor elementini fiziksel adsorpsiyon, iyon değişimi ve yüzey kompleksi mekanizmaları yoluyla bağlama kapasitesine sahip olmasından kaynaklanmaktadır (Lou ve ark., 2024). Toprağa organik materyal olarak eklenen biyokömür, yüksek yüzey alanı ve hem negatif hem de pozitif yüklü değişim bölgeleri sayesinde, bor iyonlarının bu yüzey komplekslerinde tutulmasını kolaylaştırarak bitki tarafından alımını sınırlamış olabilir (Chisté ve ark., 2024). Ayrıca biyokömürün toprak mikrobiyal aktivitesini artırması ve rizosferin redoks potansiyelini düzenlemesi, borun çözeltideki biyoyararlanabilir fraksiyonunu azaltarak toksik düzeydeki birikimleri engellemiştir (Fan ve ark., 2023; Zhao ve ark., 2022). Bu bulgular, biyokömürün hem kimyasal hem de biyolojik süreçler üzerinden borun hareketliliğini ve bitki alımını baskılayan çift yönlü bir tampon görevi üstlendiğini göstermektedir.

Genel olarak, biyokömürün bor toksisitesine karşı etkisi kök düzeyinde absorptif tamponlama, yeşil aksam düzeyinde ise translokasyon engelleme ve metabolik detoksifikasyon mekanizmalarıyla ilişkilendirilebilir. Bu çalışma, biyokömürün özellikle BC2 dozu altında hem rizosfer hem de doku düzeyinde bor birikimini azaltarak bitki fizyolojisinde toksisite belirtilerini önemli ölçüde hafiflettiğini göstermektedir.

4.3. Kök ve Yeşil Aksam Besin Elementi Konsantrasyonları

Artan bor dozları, bitkide besin elementlerinin alımını ve taşınımını bazı elementler (P, Zn ve Fe) bakımından istatistiksel olarak önemli düzeyde etkilemiştir. Kök dokusunda B artışı ile, özellikle N, P ve Fe alımını kısmen engellediği görülmüştür. BC0 uygulamasında N konsantrasyonu B0'da %1.65 iken B5'te %1.04'e düşmüş, B10'da ise %1.35'e yükselmiştir; bu dalgalanma borun kök metabolizmasında enzimatik süreçleri geçici olarak baskıladığını göstermektedir. Fe konsantrasyonu ise B artışına duyarlı bir şekilde değişmiş, B0'da 3888 mg kg⁻¹'den B10'da 4582 mg kg⁻¹'e yükselmiştir. Bu durum, bor stresinin kök sisteminde demir birikimine yol açtığını, muhtemelen Fe redoks dönüşümünü etkileyen oksidatif koşulların artmasından kaynaklandığını düşündürmektedir (Alvarez-Tinaut ve ark., 1980; Vera-Maldonado ve ark., 2024).

Yeşil aksamda bor toksisitesi özellikle N konsantrasyonunda dalgalanmaya neden olmuştur. BC1'de B0'a kıyasla B10 uygulamasıyla N içeriği %25 azalmış (%4.20 → %3.14). Bu azalma, bor toksisitesinin bitkilerde nitrat redüktaz aktivitesini baskılaması ve amino asit metabolizmasının düzenini bozmasıyla ilişkilendirilmektedir (Cervilla ve ark., 2009a). Literatürde bor toksisitesinin azot metabolizması üzerindeki etkisine dair farklı sonuçlar rapor edilmiştir. Örneğin, Hussain ve ark. (2001) ile Inal ve Tarakcioglu (2001), toprağa yüksek düzeyde bor uygulanmasının bazı bitkilerde N alımını artırabildiğini bildirmiştir. Buna karşın Chatzissavvidis ve Therios (2010), zeytin bitkilerinde artan bor seviyelerinin gövde ve yaprak dokularında azot konsantrasyonlarını düşürdüğünü belirlemiştir. Bu bulgular, borun bitkide azot asimilasyonuna ve protein sentezine katılan enzimatik süreçleri olumsuz etkileyerek metabolik dengenin bozulmasına yol açtığını göstermektedir. Nitekim Marschner (1995) de bor toksisitesinin, özellikle nitrat redüktaz ve glutamin sentetaz gibi azot metabolizmasında görevli temel enzimlerin aktivitesini azaltarak, bitkinin toplam azot kullanma verimliliğini

düşürdüğünü vurgulamaktadır. Dolayısıyla mevcut bulgular, bor toksisitesinin bitkilerde azot metabolizmasının düzenlenmesinde kritik rol oynayan fizyolojik mekanizmaları doğrudan etkileyebileceğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.2. BC ve B uygulamalarının kök besin elementi konsantrasyonları üzerine etkisi

BC Dozu (%)	B Dozu (mg kg ⁻¹)	N (%)	K (%)	P (%)	Zn (mg kg ⁻¹)	Fe (mg kg ⁻¹)
BC0	B0	1.65 ^a	0.66 ^a	0.28 ^b	182 ^a	3888 ^{bc}
	B5	1.04 ^{ab}	0.67 ^a	0.27 ^b	145 ^a	4072 ^b
	B10	1.35 ^{ab}	0.82 ^a	0.26 ^b	149 ^a	4582 ^{ab}
BC1	B0	1.32 ^{ab}	1.03 ^a	0.30 ^b	163 ^a	4312 ^{ab}
	B5	0.55 ^b	0.73 ^a	0.31 ^{ab}	158 ^a	4966 ^a
	B10	0.90 ^{ab}	0.63 ^a	0.28 ^b	154 ^a	4614 ^{ab}
BC2	B0	1.21 ^{ab}	0.77 ^a	0.35 ^{ab}	183 ^a	4702 ^{ab}
	B5	0.89 ^{ab}	0.74 ^a	0.35 ^{ab}	177 ^a	4238 ^{ab}
	B10	1.31 ^{ab}	1.05 ^a	0.43 ^a	90.3 ^b	3106 ^c
BC		ns	ns	ns	**	ns
B		ns	ns	*	ns	*
BC x B		ns	ns	ns	*	**

Sütunlardaki aynı harfe sahip ortalamalar, Duncan Çoklu Karşılaştırma Testine göre $p < 0.05$ düzeyinde anlamlı farklılık göstermemektedir. *: $p < 0.05$; **: $p < 0.01$; ***: $p < 0.001$; ns: anlamsız (istatistiksel olarak anlamlı değil).

Bor uygulamalarından bağımsız olarak biyokömür, kök ve yeşil aksam besin elementleri konsantrasyonlarında artış ve azalışlara neden olmuştur (Çizelge 4.2, Çizelge 4.3). BC0B0 uygulamasında kök P konsantrasyonu %0.28 iken, bu durum BC2B0 uygulamasında %0.35'e çıkarak %25'lik bir artışa neden olmuştur (Çizelge 4.2). Yeşil aksamda ise BC uygulaması N ve K düzeylerini anlamlı biçimde artırmıştır ($p < 0.05$). BC2B0 uygulamasında K içeriği %5.33'e yükselmiş ve BC0B0 uygulamasına kıyasla %14'lük bir artış göstermiştir. N içeriğinde de benzer bir artış gözlenmiştir (%3.67 → %4.54). Ayrıca BC uygulaması ile yeşil aksamda Fe düzeyi anlamlı biçimde artmış ($p < 0.001$) ve ortalama olarak 99 mg kg⁻¹'den 119 mg kg⁻¹'e yükselmiştir (Çizelge 4.3). Biyokömür uygulamalarının bir diğer önemli etkisi, gübrelerle verilen besin elementlerinin yıkanmasını azaltarak gübre kullanım etkinliğini artırmasıdır. Bu etki, biyokömürün yüksek yüzey alanı, toplam gözenekliliği ve yüzey yüküyle yakından ilişkilidir. Lehmann (2007), biyokömürün 40 mg L⁻¹ gibi düşük derişimli bir çözeltiden dahi 3000 mg kg⁻¹'den fazla PO₄³⁻ adsorbe edebildiğini, buna karşılık biyokömür ilavesi

yapılmamış ve doğal olarak düşük fosfor içeriğine sahip bir toprağın yalnızca yaklaşık 600 mg kg⁻¹ PO₄³⁻ tutabildiğini bildirmiştir. Bu yüksek adsorpsiyon kapasitesi, biyokömürün fosforca zengin çözeltilerden besin elementlerini uzaklaştırma ve aynı zamanda toprakta daha uzun süre tutma potansiyelini göstermektedir. Benzer şekilde, Ghezzehei ve ark. (2014), biyokömürün bir gramının 5 mg NH₄⁺ ve 0.2 mg PO₄³⁻’ten daha fazlasını adsorbe edebildiğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, biyokömürün besin elementlerinin yavaş salınımını sağlayarak bitkiler tarafından daha verimli kullanılmasına olanak tanıdığını desteklemektedir. Nitekim Spokas ve ark. (2012) ile Biederman ve Harpole (2013), biyokömürle birlikte yapılan gübre uygulamalarının besin kayıplarını azalttığını, toprakta besin tutulumunu güçlendirdiğini ve böylece bitki besin kullanım etkinliğini önemli ölçüde artırdığını rapor etmişlerdir.

Çizelge 4.3. BC ve B uygulamalarının yeşil aksam besin elementi konsantrasyonları üzerine etkisi

BC Dozu (%)	B Dozu (mg kg ⁻¹)	N (%)	K (%)	P (%)	Zn (mg kg ⁻¹)	Fe (mg kg ⁻¹)
BC0	B0	3.67 ^{bcd}	4.66 ^b	0.35 ^b	34.8 ^{abc}	94.7 ^e
	B5	4.54 ^a	4.87 ^{ab}	0.37 ^{ab}	36.3 ^a	99.2 ^{cde}
	B10	4.42 ^{ab}	4.95 ^{ab}	0.37 ^{ab}	34.2 ^{abcd}	92.8 ^e
BC1	B0	4.20 ^{abc}	5.09 ^{ab}	0.38 ^{ab}	34.5 ^{abc}	121 ^a
	B5	4.29 ^{ab}	5.14 ^{ab}	0.38 ^{ab}	31.1 ^{bcd}	109 ^{bc}
	B10	3.14 ^d	4.85 ^{ab}	0.36 ^b	29.5 ^d	99.5 ^{cde}
BC2	B0	3.45 ^{cd}	5.33 ^a	0.40 ^a	32.6 ^{abcd}	119 ^{ab}
	B5	3.42 ^{cd}	5.21 ^a	0.38 ^{ab}	30.9 ^{cd}	107 ^{cd}
	B10	3.63 ^{bcd}	5.30 ^a	0.39 ^{ab}	36.0 ^{ab}	97.1 ^{de}
BC		*	*	ns	ns	***
B		ns	ns	ns	ns	***
BC x B		*	ns	ns	ns	ns

Sütunlardaki aynı harfe sahip ortalamalar, Duncan Çoklu Karşılaştırma Testine göre $p < 0.05$ düzeyinde anlamlı farklılık göstermemektedir. *: $p < 0.05$; **: $p < 0.01$; ***: $p < 0.001$; ns: anlamsız (istatistiksel olarak anlamlı değil).

Biyokömürün bor toksisitesine karşı etkisi bakımından kök ve yeşil aksam N, P, K, Zn ve Fe konsantrasyonlarında artış ve azalışlara neden olmuş, bu değişimler kök Zn konsantrasyonlarında $p < 0.05$, Fe konsantrasyonlarında $p < 0.01$, yeşil aksam N konsantrasyonlarında $p < 0.05$ düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıklara neden olmuştur.

Yeşil aksamda BC uygulaması yüksek bor koşullarında besin dengesini korumuştur. Özellikle BC2B10 uygulamasında N içeriği %3.63 ile BC1B10 uygulamasındaki (%3.14) değere kıyasla %16 daha yüksek bulunmuştur. BC dozu artışı ile yeşil aksam K konsantrasyonlarında da artış meydana gelmiştir. Örneğin BC0B10 uygulamasında %4.95 olan K konsantrasyonu BC2B10 uygulamasında %5.30 çıkmıştır. Yapılan çalışmalarda biyokömürlerin yarıyışlı potasyum içeriğinin yüksek olduğu ve uygulama ile birlikte potasyum alımının arttığı bildirilmiştir (Lehmann ve ark., 2003).



5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışma, artan bor (B) toksisitesi koşullarında buğday bitkisinin büyüme ve beslenme performansı üzerine çeltik kavuzu biyokömürü (BC) uygulamasının etkilerini değerlendirmek amacıyla yürütülmüştür. Deneme, kontrollü iklim odası koşullarında ve tesadüf parselleri deneme deseninde gerçekleştirilmiş; farklı düzeylerde uygulanan bor (0, 5 ve 10 mg B kg⁻¹) ve biyokömür (%0, %1 ve %2) kombinasyonlarının kök ve yeşil aksam büyümesi ile besin elementi alımı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Araştırma sonuçlarına göre, artan bor dozları, buğday bitkisinde belirgin şekilde toksisiteye yol açarak hem kök hem de yeşil aksam kuru madde veriminde önemli azalmalar meydana getirmiştir. Özellikle 10 mg kg⁻¹ düzeyinde uygulanan bor, yeşil aksamda %19, kök sisteminde ise %18 oranında verim kaybına neden olmuştur. Bu toksik etki, hücresel membran stabilitesinin bozulması, reaktif oksijen türlerinin birikimi ve fotosentetik karbon sabitleme kapasitesinin azalması gibi fizyolojik mekanizmalarla ilişkilendirilmiştir. Ayrıca bor fazlalığı, yeşil aksamda klorofil içeriğinin düşmesine ve stomatal iletkenliğin kısıtlanmasına bağlı olarak karbon asimilasyonunu azaltmış, bu da toplam biyokütle üretimini sınırlandırmıştır.

Biyokömür uygulamaları ise hem normal hem de stres koşullarında bitki büyümesini teşvik edici etkiler göstermiştir. %2 biyokömür uygulaması, B0 koşulunda yeşil aksam kuru madde verimini %16, kök kuru madde verimini ise %18 oranında artırmıştır. Bor toksisitesinin en yoğun yaşandığı B10 koşulunda dahi biyokömür uygulaması, kök ve sürgün gelişiminde sırasıyla %33 ve %18'lik artışlar sağlamış; bu durum biyokömürün borun zararlı etkilerini hafifletici rolünü ortaya koymuştur.

Biyokömürün bu olumlu etkileri, yüzeyinde bulunan fonksiyonel gruplar, yüksek spesifik yüzey alanı, pH tamponlama kapasitesi ve anyon değişim davranışı gibi fizikokimyasal özelliklerine dayanmaktadır. Bor adsorpsiyon kapasitesinin artması, çözeltideki aktif bor fraksiyonunun azaltılması ve borun bitki tarafından alınabilirliğinin sınırlandırılması bu mekanizmaların başında gelmektedir.

Beslenme açısından değerlendirildiğinde, bor uygulamaları bazı besin elementlerinin (özellikle N ve P) kök alımını sınırlarken, biyokömür uygulaması bu olumsuz etkileri dengelemiştir. BC uygulaması, bor toksisitesine bağlı olarak dalgalanan azot metabolizmasını stabilize etmiş; yeşil aksamda N ve K konsantrasyonlarında anlamlı artışlara neden olmuştur. Özellikle BC2B10 uygulamasında, BC1B10 uygulamasına göre yeşil aksamda %16 daha yüksek azot konsantrasyonu gözlenmiştir. Bu durum, biyokömürün azot metabolizması üzerindeki koruyucu etkisini ve borun inhibe edici etkilerini hafifletici rolünü ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, biyokömürlerin yarayışı potasyum içeriğinin yüksek olması nedeniyle potasyum alımı da artmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma çeltik kavuzu biyokömürünün, bor toksisitesine karşı buğday bitkisinde hem büyüme hem de beslenme parametreleri bakımından iyileştirici etkiler sunduğunu ortaya koymuştur. Özellikle %2 biyokömür uygulaması, borun zararlı etkilerini baskılayarak hem fizyolojik hem de biyokimyasal düzeyde bitkiyi korumuş; verim kayıplarını önemli ölçüde sınırlamıştır. Bu sonuçlar, tarımsal üretimde bor toksisitesinin yaygın olduğu bölgelerde, biyokömürün sürdürülebilir ve çevre dostu bir toprak düzenleyici olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca bu çalışma, biyokömür uygulamalarının yalnızca bor gibi spesifik stres etmenlerine karşı değil, aynı zamanda genel toprak verimliliğini artırıcı potansiyele sahip olduğunu da ortaya koymaktadır.

6. KAYNAKÇA

- Abel, S., Peters, A., Trinks, S., Schonsky, H., Facklam, M. ve Wessolek, G., 2013. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma*, 202-203, 183–191. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.03.003>
- Abreu, C.A.d., van Raij, B., Abreu, M.F.d. ve González, A.P., 2005. Routine soil testing to monitor heavy metals and boron. *Scientia Agricola*, 62, 564–571.
- Aftab, T., Khan, M.M.A., Naeem, M., Idrees, M., Moinuddin, Teixeira da Silva, J.A. ve Ram, M., 2012. Exogenous nitric oxide donor protects *Artemisia annua* from oxidative stress generated by boron and aluminium toxicity. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 80, 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.02.007>
- Agulhon, P.A.R.H., 1988. Présence et utilité du bore chez les végétaux. *Nutrition Reviews*, 46(10), 353–355. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.1988.tb05361.x>
- Akhtar, S.S., Andersen, M.N. ve Liu, F., 2015. Residual effects of biochar on improving growth, physiology and yield of wheat under salt stress. *Agricultural Water Management*, 158, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.04.010>
- Alkharabsheh, H.M., Seleiman, M.F., Battaglia, M.L., Shami, A., Jalal, R.S., Alhammad, B.A., Almutairi, K.F. ve Al-Saif, A.M., 2021. Biochar and its broad impacts in soil quality and fertility, nutrient leaching and crop productivity: A review. *Agronomy*, 11(5).
- Alvarez-Tinaut, M.C., Leal, A. ve Martínez, L.R., 1980. Iron-manganese interaction and its relation to boron levels in tomato plants. *Plant and Soil*, 55(3), 377–388. <https://doi.org/10.1007/BF02182698>
- Ambaye, T.G., Vaccari, M., van Hullebusch, E.D., Amrane, A. ve Rtimi, S., 2021. Mechanisms and adsorption capacities of biochar for the removal of organic and inorganic pollutants from industrial wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(10), 3273–3294. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-03060-w>
- Ameloot, N., Graber, E.R., Verheijen, F.G.A. ve De Neve, S., 2013. Interactions between biochar stability and soil organisms: review and research needs. *European Journal of Soil Science*, 64(4), 379–390. <https://doi.org/10.1111/ejss.12064>
- Amirshekari, S., Shafiei, S., Zahedifar, M. ve Shekofteh, H., 2025. Development of functionalized biochar composites for enhanced boron adsorption from aqueous solutions. *Heliyon*, 11(2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41720>
- Ammarah Hasnain, A.H., Seema Mahmood, S.M., Saeed Akhtar, S.A., Malik, S.A. ve Nahidah Bashir, N.B., 2011. Tolerance and toxicity levels of boron in mung bean (*Vigna radiata* (L.) Wilczek) cultivars at early growth stages [Journal article]. *Pakistan Journal of Botany*, 43(2), 1119–1125.
- Anonim. 2025. Basilio flyer. <https://www.axereal.hr/en/our-products/wheat/basilio> (06.11.2025).
- Anteh, J.D., Almugrabi, E., Mostyakova, A. ve Timofeeva, O., 2023. Biochar influences on phytochemical composition and expression genes of curly kale at different treatment times. *Turkish Journal of Botany*, 47(6), 529–540.
- Arredondo, G. ve Bonomelli, C., 2023. Effect of three boron concentrations in soil on growth and physiology in sweet cherry trees. *Plants*, 12(6).

- Aubertin, M.-L., Girardin, C., Houot, S., Nobile, C., Houben, D., Bena, S., Brech, Y.L. ve Rumpel, C., 2021. Biochar-compost interactions as affected by weathering: Effects on biological stability and plant growth. *Agronomy*, 11(2).
- Avci, M. ve Akar, T., 2005. Severity and spatial distribution of boron toxicity in barley cultivated areas of Central Anatolia and transitional zones. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 29(5), 377–382.
- Baldock, J.A. ve Smernik, R.J., 2002. Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red pine) wood. *Organic Geochemistry*, 33(9), 1093–1109. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00062-1](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00062-1)
- Bañuelos, G.S., Ajwa, H.A., Caceres, L. ve Dyer, D., 1999. Germination responses and boron accumulation in germplasm from chile and the united states grown with boron-enriched water. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 43(1), 62–67. <https://doi.org/10.1006/eesa.1999.1765>
- Bañuelos, G.S., Cardon, G.E., Phene, C.J., Wu, L., Akohoue, S. ve Zambruski, S., 1993. Soil boron and selenium removal by three plant species. *Plant and Soil*, 148(2), 253–263. <https://doi.org/10.1007/BF00012862>
- Basso, A.S., Miguez, F.E., Laird, D.A., Horton, R. ve Westgate, M., 2013. Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils. *GCB Bioenergy*, 5(2), 132–143. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12026>
- Berger, K.C., 1949. Boron in soils and crops. In A.G. Norman (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 1, pp. 321–351). Academic Press. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60752-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60752-X)
- Bergmann, W., 1992. Nutritional disorders of plants: development, visual and analytical diagnosis [Book]. Gustav Fischer Verlag.
- Biederman, L.A. ve Harpole, W.S., 2013. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *GCB Bioenergy*, 5(2), 202–214. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12037>
- Blevins, D.G. ve Lukaszewski, K.M., 1998. Boron in plant structure and function. *Annual Review of Plant Biology*, 49(Volume 49, 1998), 481–500. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.49.1.481>
- Boehm, H.P., 1994. Some aspects of the surface chemistry of carbon blacks and other carbons. *Carbon*, 32(5), 759–769. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(94\)90031-0](https://doi.org/10.1016/0008-6223(94)90031-0)
- Bolan, S., Wijesekara, H., Amarasiri, D., Zhang, T., Ragályi, P., Brdar-Jokanović, M., Rékási, M., Lin, J.-Y., Padhye, L.P., Zhao, H., Wang, L., Rinklebe, J., Wang, H., Siddique, K.H.M., Kirkham, M.B. ve Bolan, N., 2023. Boron contamination and its risk management in terrestrial and aquatic environmental settings. *Science of The Total Environment*, 894, 164744. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164744>
- Brdar-Jokanović, M., 2020. Boron toxicity and deficiency in agricultural plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(4).
- Bremner, J.M., 1965. Total nitrogen. In *Methods of Soil Analysis* (pp. 1149–1178). <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.c32>
- Brennan, R.F. ve Adcock, K.G., 2004. Incidence of boron toxicity in spring barley in Southwestern Australia. *Journal of Plant Nutrition*, 27(3), 411–425. <https://doi.org/10.1081/PLN-120028870>
- Brown, P.H., Bellaloui, N., Wimmer, M.A., Bassil, E.S., Ruiz, J., Hu, H., Pfeffer, H., Dannel, F. ve Römhild, V., 2002. Boron in Plant Biology. *Plant Biology*, 4(2), 205–223. <https://doi.org/10.1055/s-2002-25740>

- Brown, P.H. ve Hu, H., 1994. Boron uptake by sunflower, squash and cultured tobacco cells. *Physiologia Plantarum*, 91(3), 435–441. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1994.tb02971.x>
- Cakmak, I., 2000. Tansley Review No. 111 - Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. *New Phytologist*, 146(2), 185–205. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00630.x>
- Cartwright, B., Zarcinas, B.A. ve Spouncer, L.R., 1986. Boron toxicity in South Australian barley crops. *Australian Journal of Agricultural Research*, 37(4), 351–359. <https://doi.org/10.1071/AR9860351>
- Celikkol Akcay, U. ve Erkan, I.E., 2016. Silicon induced antioxidative responses and expression of BOR2 and two PIP family aquaporin genes in barley grown under boron toxicity. *Plant Molecular Biology Reporter*, 34(1), 318–326. <https://doi.org/10.1007/s11105-015-0923-5>
- Cervilla, L.M., Blasco, B., Ríos, J.J., Rosales, M.A., Rubio-Wilhelmi, M.M., Sánchez-Rodríguez, E., Romero, L. ve Ruiz, J.M., 2009a. Response of nitrogen metabolism to boron toxicity in tomato plants. *Plant Biology*, 11(5), 671–677. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2008.00167.x>
- Cervilla, L.M., Rosales, M.A., Rubio-Wilhelmi, M.M., Sánchez-Rodríguez, E., Blasco, B., Ríos, J.J., Romero, L. ve Ruiz, J.M., 2009b. Involvement of lignification and membrane permeability in the tomato root response to boron toxicity. *Plant Science*, 176(4), 545–552. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2009.01.008>
- Chan, K.Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A. ve Joseph, S., 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research*, 45(8), 629–634. <https://doi.org/10.1071/SR07109>
- Chatzissavvidis, C. ve Therios, I., 2010. Response of four olive (*Olea europaea* L.) cultivars to six B concentrations: Growth performance, nutrient status and gas exchange parameters. *Scientia Horticulturae*, 127(1), 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.09.008>
- Chen, X., Smith, S.M., Shabala, S. ve Yu, M., 2023. Phytohormones in plant responses to boron deficiency and toxicity. *Journal of Experimental Botany*, 74(3), 743–754. <https://doi.org/10.1093/jxb/erac443>
- Cheng, C.-H. ve Lehmann, J., 2009. Ageing of black carbon along a temperature gradient. *Chemosphere*, 75(8), 1021–1027. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.01.045>
- Cheng, C.-H., Lehmann, J., Thies, J.E. ve Burton, S.D., 2008. Stability of black carbon in soils across a climatic gradient. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113(G2). <https://doi.org/10.1029/2007JG000642>
- Cheng, C. ve Rerkasem, B., 1993. Effects of boron on pollen viability in wheat. *Plant and Soil*, 155(1), 313–315. <https://doi.org/10.1007/BF00025045>
- Cheng, H., Jones, D.L., Hill, P., Bastami, M.S. ve Tu, C.L., 2018. Influence of biochar produced from different pyrolysis temperature on nutrient retention and leaching. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(6), 850–859. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1384545>
- Chisté, L., Melo, L.C.A., Jindo, K. ve Silva, C.A., 2024. Biochar-boron composites: synthesis, properties and agronomic effectiveness for eucalyptus seedlings. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 11(1), 154. <https://doi.org/10.1186/s40538-024-00645-2>

- Chormova, D. ve Fry, S.C., 2016. Boron bridging of rhamnogalacturonan-II is promoted in vitro by cationic chaperones, including polyhistidine and wall glycoproteins. *New Phytologist*, 209(1), 241–251. <https://doi.org/10.1111/nph.13596>
- Cramer, G.R., Läuchli, A. ve Polito, V.S., 1985. Displacement of Ca^{2+} by Na^+ from the plasmalemma of root cells 1: A primary response to salt stress? *Plant Physiology*, 79(1), 207–211. <https://doi.org/10.1104/pp.79.1.207>
- Çelik, H., Katkat, A.V., Aşık, B.B. ve Turan, M.A., 2010. Effect of foliar-applied humic acid to dry weight and mineral nutrient uptake of maize under calcareous soil conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42(1), 29–38. <https://doi.org/10.1080/00103624.2011.528490>
- Dannel, F., Pfeffer, H. ve Römheld, V., 2002. Update on boron in higher plants - uptake, primary translocation and compartmentation. *Plant Biology*, 4(2), 193–204. <https://doi.org/10.1055/s-2002-25730>
- Das, A.K. ve Purkait, A., 2020. Boron dynamics in soil: classification, sources, factors, fractions, and kinetics. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(22), 2778–2790. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1849261>
- Davis, R.D., Beckett, P.H.T. ve Wollan, E., 1978. Critical levels of twenty potentially toxic elements in young spring barley. *Plant and Soil*, 49(2), 395–408. <https://doi.org/10.1007/BF02149747>
- Dell, B. ve Huang, L., 1997. Physiological response of plants to low boron. *Plant and Soil*, 193(1), 103–120. <https://doi.org/10.1023/A:1004264009230>
- Dhassi, K., Drissi, S., Makroum, K., Er-Rezza, H., Amlal, F. ve Aït Houssa, A., 2019. Soil boron migration as influenced by leaching rate and soil characteristics: A column study. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(14), 1663–1670. <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1631333>
- Diana, G., Beni, C. ve Marconi, S., 2010. Comparison of adsorption isotherm equations to describe boron behavior in soils affected by organic and mineral fertilization. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 41(9), 1112–1128. <https://doi.org/10.1080/00103621003688404>
- Dordas, C., Chrispeels, M.J. ve Brown, P.H., 2000. Permeability and Channel-Mediated Transport of Boric Acid across Membrane Vesicles Isolated from Squash Roots1. *Plant Physiology*, 124(3), 1349–1362. <https://doi.org/10.1104/pp.124.3.1349>
- Elevli, B., Yaman, İ. ve Laratte, B., 2022. Estimation of the Turkish boron exportation to Europe. *Mining*, 2(2), 155–169.
- Eraslan, F., Inal, A., Pilbeam, D.J. ve Gunes, A., 2008. Interactive effects of salicylic acid and silicon on oxidative damage and antioxidant activity in spinach (*Spinacia oleracea* L. cv. Matador) grown under boron toxicity and salinity. *Plant Growth Regulation*, 55(3), 207–219. <https://doi.org/10.1007/s10725-008-9277-4>
- Exley, C., 2015. A possible mechanism of biological silicification in plants [Hypothesis and Theory]. *Frontiers in Plant Science*, Volume 6 - 2015. <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2015.00853>
- Fan, C., Cui, Y., Zhang, Q., Yin, N., Cai, X., Yuan, X., Senadheera, S., Cho, Y. ve Ok, Y.S., 2023. A critical review of the interactions between rhizosphere and biochar during the remediation of metal(loid) contaminated soils. *Biochar*, 5(1), 87. <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00278-y>
- Fang, Q., Chen, B., Lin, Y. ve Guan, Y., 2014. Aromatic and hydrophobic surfaces of wood-derived biochar enhance perchlorate adsorption via hydrogen bonding to

- oxygen-containing organic groups. *Environmental Science & Technology*, 48(1), 279–288. <https://doi.org/10.1021/es403711y>
- Fleck, A.T., Nye, T., Repenning, C., Stahl, F., Zahn, M. ve Schenk, M.K., 2011. Silicon enhances suberization and lignification in roots of rice (*Oryza sativa*). *Journal of Experimental Botany*, 62(6), 2001–2011. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq392>
- Furlani, Â.M.C., Carvalho, C.P., Freitas, J.G.d. ve Verdial, M.F., 2003. Wheat cultivar tolerance to boron deficiency and toxicity in nutrient solution. *Scientia Agricola*, 60, 359–370.
- Gauch, H.G. ve Dugger, W.M., Jr., 1953. The Role of Boron in the Translocation of Sucrose 1. *Plant Physiology*, 28(3), 457–466. <https://doi.org/10.1104/pp.28.3.457>
- Ghaffari Nejad, S.A., Savaghebi, G.R., Farahbakhsh, M., Maali Amiri, R. ve Rezaei, H., 2015. Tolerance of some wheat varieties to boron toxicity. *Cereal Research Communications* *Cereal Research Communications*, 43(3), 384–393. <https://doi.org/10.1556/0806.43.2015.009>
- Ghezzehei, T.A., Sarkhot, D.V. ve Berhe, A.A., 2014. Biochar can be used to capture essential nutrients from dairy wastewater and improve soil physico-chemical properties. *Solid Earth*, 5(2), 953–962. <https://doi.org/10.5194/se-5-953-2014>
- Ghorbani, M., Amirahmadi, E., Bernas, J. ve Konvalina, P., 2024. Testing biochar's ability to moderate extremely acidic soils in tea-growing areas. *Agronomy*, 14(3).
- Goldbach, H.E. ve Wimmer, M.A., 2007. Boron in plants and animals: Is there a role beyond cell-wall structure? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 170(1), 39–48. <https://doi.org/10.1002/jpln.200625161>
- Goldberg, S., 1997. Reactions of boron with soils. *Plant and Soil*, 193(1), 35–48. <https://doi.org/10.1023/A:1004203723343>
- Goldberg, S., Forster, H.S., Lesch, S.M. ve Heick, E.L., 1996. Influence of anion competition on boron adsorption by clays and soils. *Soil Science*, 161(2). https://journals.lww.com/soilsci/fulltext/1996/02000/influence_of_anion_competition_on_boron_adsorption.3.aspx
- Goldberg, S. ve Suarez, D.L., 2012. Role of organic matter on boron adsorption-desorption hysteresis of soils. *Soil Science*, 177(7). https://journals.lww.com/soilsci/fulltext/2012/07000/role_of_organic_matter_on_boron.1.aspx
- Graham, R.D., Welch, R.M., Grunes, D.L., Cary, E.E. ve Norvell, W.A., 1987. Effect of zinc deficiency on the accumulation of boron and other mineral nutrients in barley. *Soil Science Society of America Journal*, 51(3), 652–657. <https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100030018x>
- Gundale, M.J. ve DeLuca, T.H., 2006. Temperature and source material influence ecological attributes of ponderosa pine and Douglas-fir charcoal. *Forest Ecology and Management*, 231(1), 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.05.004>
- Gunes, A., Inal, A., Bagci, E.G., Coban, S. ve Pilbeam, D.J., 2007. Silicon mediates changes to some physiological and enzymatic parameters symptomatic for oxidative stress in spinach (*Spinacia oleracea* L.) grown under B toxicity. *Scientia Horticulturae*, 113(2), 113–119. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.03.009>
- Gupta, U.C., 1971. Boron and molybdenum nutrition of wheat, barley and oats grown in prince edward island soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 51(3), 415–422. <https://doi.org/10.4141/cjss71-056>

- Gupta, U.C., 1980. Boron nutrition of crops. In N.C. Brady (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 31, pp. 273–307). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60142-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60142-X)
- Gupta, U.C., Jame, Y.W., Campbell, C.A., Leyshon, A.J. ve Nicholaichuk, W., 1985. Boron toxicity and deficiency: A review. *Canadian Journal of Soil Science*, 65(3), 381–409. <https://doi.org/10.4141/cjss85-044>
- Gupta, U.C., MacLeod, J.A. ve Sterling, J.D.E., 1976. Effects of boron and nitrogen on grain yield and boron and nitrogen concentrations of barley and wheat. *Soil Science Society of America Journal*, 40(5), 723–726. <https://doi.org/10.2136/sssaj1976.03615995004000050032x>
- Gülmezoğlu, N., Aytaç, Z., Kutlu, I., Kulan, E.G. ve Gözükar, G., 2017. Mapping boron and beneficial heavy metal ions for wheat-cultivating soils in turkey's boronmining zone. *Applied Ecology and Environmental Research*, 15(3), 1119–1130. https://doi.org/10.15666/aer/1503_11191130
- Gülüt, K.Y., 2024. A comprehensive review on exploring the mechanisms of boron toxicity in plants. *MAS Journal of Applied Sciences*, 9(2), 279–289.
- Günes, A. ve Alpaslan, M., 2000. Boron uptake and toxicity in maize genotypes in relation to boron and phosphorus supply. *Journal of Plant Nutrition*, 23(4), 541–550. <https://doi.org/10.1080/01904160009382038>
- Güneş, A., Alpaslan, M., Çikili, Y. ve Özcan, H., 1999. Effect of zinc on the alleviation of boron toxicity in tomato. *Journal of Plant Nutrition*, 22(7), 1061–1068. <https://doi.org/10.1080/01904169909365695>
- Hagemann, N., Joseph, S., Schmidt, H.-P., Kammann, C.I., Harter, J., Borch, T., Young, R.B., Varga, K., Taherymoosavi, S., Elliott, K.W., McKenna, A., Albu, M., Mayrhofer, C., Obst, M., Conte, P., Dieguez-Alonso, A., Orsetti, S., Subdiaga, E., Behrens, S. ve Kappler, A., 2017. Organic coating on biochar explains its nutrient retention and stimulation of soil fertility. *Nature Communications*, 8(1), 1089. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01123-0>
- Han, S., Chen, L.-S., Jiang, H.-X., Smith, B.R., Yang, L.-T. ve Xie, C.-Y., 2008. Boron deficiency decreases growth and photosynthesis, and increases starch and hexoses in leaves of citrus seedlings. *Journal of Plant Physiology*, 165(13), 1331–1341. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2007.11.002>
- Hattori, S., Kikawada, Y. ve Oi, T., 2020. Boron isotope fractionation accompanying formation of calcium borate minerals at 25°C. *Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan*, 74(3), 176–183. https://doi.org/10.11457/swsj.74.3_176
- Hornung, A., Stenzel, F. ve Grunwald, J., 2024. Biochar—just a black matter is not enough. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(5), 5889–5900. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01284-5>
- Hossain, M.Z., Bahar, M.M., Sarkar, B., Donne, S.W., Ok, Y.S., Palansooriya, K.N., Kirkham, M.B., Chowdhury, S. ve Bolan, N., 2020. Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant. *Biochar*, 2(4), 379–420. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00065-z>
- Hu, H. ve Brown, P.H., 1997. Absorption of boron by plant roots. *Plant and Soil*, 193(1), 49–58. <https://doi.org/10.1023/A:1004255707413>
- Hussain, I., Raschid, L., Hanjra, M.A., Marikar, F. ve Van Der Hoek, W., 2001. A framework for analyzing socioeconomic, health and environmental impacts of wastewater use in agriculture in developing countries (Vol. 26). IWMI.

- Hussain, S., Irfan, M., Sattar, A., Hussain, S., Ullah, S., Abbas, T., Ur-Rehman, H., Nawaz, F., Al-Hashimi, A., Elshikh, M.S., Cheema, M. ve Yang, J., 2022. Alleviation of cadmium stress in wheat through the combined application of boron and biochar via regulating morpho-physiological and antioxidant defense mechanisms. *Agronomy*, 12(2).
- Hutchinson, G.L. ve Viets, F.G.J., 1969. Detoxication of boron in plants with triisopropanolamine. *Soil Science*, 108(3). https://journals.lww.com/soilsci/fulltext/1969/09000/detoxication_of_boron_in_plants_with.11.aspx
- Inal, A., Pilbeam, D.J. ve Gunes, A., 2009. Silicon increases tolerance to boron toxicity and reduces oxidative damage in barley. *Journal of Plant Nutrition*, 32(1), 112–128. <https://doi.org/10.1080/01904160802533767>
- Inal, A. ve Tarakcioglu, C., 2001. Effects of nitrogen forms on growth, nitrate accumulation, membrane permeability, and nitrogen use efficiency of hydroponically grown bunch onion under boron deficiency and toxicity. *Journal of Plant Nutrition*, 24(10), 1521–1534. <https://doi.org/10.1081/PLN-100106018>
- Jiang, H.-X., Tang, N., Zheng, J.-G. ve Chen, L.-S., 2009. Antagonistic actions of boron against inhibitory effects of aluminum toxicity on growth, CO₂ assimilation, ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase, and photosynthetic electron transport probed by the JIP-test, of Citrus grandis seedlings. *BMC Plant Biology*, 9(1), 102. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-9-102>
- Jiang, T.-J., Morgan, H.M., Tsai, W.-T., Chien, H., Yen, T.-B. ve Lee, Y.-R., 2024. Thermochemical conversion of biomass into biochar: Enhancing adsorption kinetics and pore properties for environmental sustainability. *Sustainability*, 16(15).
- Jílková, V., 2023. Biochar-application rate and method affect nutrient availability and retention in a coarse-textured, temperate agricultural Cambisol in a microcosm experiment. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 186(2), 209–216. <https://doi.org/10.1002/jpln.202200331>
- Joseph, S.D., Camps-Arbestain, M., Lin, Y., Munroe, P., Chia, C.H., Hook, J., van Zwieten, L., Kimber, S., Cowie, A., Singh, B.P., Lehmann, J., Foidl, N., Smernik, R.J. ve Amonette, J.E., 2010. An investigation into the reactions of biochar in soil. *Australian Journal of Soil Research*, 48(7), 501–515. <https://doi.org/10.1071/SR10009>
- Kabir, E., Kim, K.-H. ve Kwon, E.E., 2023. Biochar as a tool for the improvement of soil and environment [Review]. *Frontiers in Environmental Science*, Volume 11 - 2023. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1324533>
- Kacar, B. ve İnal, A., 2008. Bitki Analizleri. Nobel Yayın Dağıtım.
- Karabal, E., Yücel, M. ve Öktem, H.A., 2003. Antioxidant responses of tolerant and sensitive barley cultivars to boron toxicity. *Plant Science*, 164(6), 925–933. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(03\)00067-0](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(03)00067-0)
- Kaya, C. ve Ashraf, M., 2015. Exogenous application of nitric oxide promotes growth and oxidative defense system in highly boron stressed tomato plants bearing fruit. *Scientia Horticulturae*, 185, 43–47. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.01.009>
- Kaya, C., Tuna, A.L., Dikilitas, M., Ashraf, M., Koskeroglu, S. ve Guneri, M., 2009. Supplementary phosphorus can alleviate boron toxicity in tomato. *Scientia Horticulturae*, 121(3), 284–288. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.02.011>

- Khan, S., Irshad, S., Mehmood, K., Hasnain, Z., Nawaz, M., Rais, A., Gul, S., Wahid, M.A., Hashem, A., Abd_Allah, E.F. ve Ibrar, D., 2024. Biochar production and characteristics, its impacts on soil health, crop production, and yield enhancement: A review. *Plants*, 13(2).
- Khater, E.-S., Bahnasawy, A., Hamouda, R., Sabahy, A., Abbas, W. ve Morsy, O.M., 2024. Biochar production under different pyrolysis temperatures with different types of agricultural wastes. *Scientific Reports*, 14(1), 2625. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52336-5>
- Klass, D.L., 1998. Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals. Elsevier.
- Kohli, S.K., Kaur, H., Khanna, K., Handa, N., Bhardwaj, R., Rinklebe, J. ve Ahmad, P., 2023. Boron in plants: uptake, deficiency and biological potential. *Plant Growth Regulation*, 100(2), 267–282. <https://doi.org/10.1007/s10725-022-00844-7>
- Koohkan, H. ve Maftoun, M., 2015. Effect of nitrogen on the alleviation of boron toxicity in rice (*Oryza Sativa* L.). *Journal of Plant Nutrition*, 38(9), 1323–1335. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.991035>
- Koohkan, H. ve Maftoun, M., 2016. Effect of nitrogen–boron interaction on plant growth and tissue nutrient concentration of canola (*Brassica napus* L.). *Journal of Plant Nutrition*, 39(7), 922–931. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1143492>
- Laird, D.A., 2008. The charcoal vision: A win–win–win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. *Agronomy Journal*, 100(1), 178–181. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0161>
- Laird, D.A., Fleming, P., Davis, D.D., Horton, R., Wang, B. ve Karlen, D.L., 2010. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158(3), 443–449. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.05.013>
- Lehmann, J., 2007. Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(7), 381–387. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2007\)5\[381:BITB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[381:BITB]2.0.CO;2)
- Lehmann, J., Gaunt, J. ve Rondon, M., 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – A Review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11(2), 403–427. <https://doi.org/10.1007/s11027-005-9006-5>
- Lehmann, J. ve Joseph, S., 2015. Biochar for environmental management: An introduction. In *Biochar for Environmental Management* (pp. 1–13). Routledge.
- Lehmann, J., Liang, B., Solomon, D., Lerotic, M., Luizão, F., Kinyangi, J., Schäfer, T., Wirick, S. ve 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). <https://doi.org/10.1029/2004GB002435>
- Lehmann, J., Pereira da Silva, J., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W. ve 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(2), 343–357. <https://doi.org/10.1023/A:1022833116184>
- Li, Q., Chen, H.-H., Qi, Y.-P., Ye, X., Yang, L.-T., Huang, Z.-R. ve Chen, L.-S., 2019. Excess copper effects on growth, uptake of water and nutrients, carbohydrates, and PSII photochemistry revealed by OJIP transients in *Citrus* seedlings. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(29), 30188–30205. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06170-2>

- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B., Skjemstad, J.O., Thies, J., Luizão, F.J., Petersen, J. ve Neves, E.G., 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1719–1730. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0383>
- Liao, L., Chen, H., He, C., Doddiba, G. ve Fujita, T., 2024. Boron removal in aqueous solutions using adsorption with sugarcane bagasse biochar and ammonia nanobubbles. *Materials*, 17(19).
- Liu, G., Dong, X., Liu, L., Wu, L., Peng, S.a. ve Jiang, C., 2015. Metabolic profiling reveals altered pattern of central metabolism in navel orange plants as a result of boron deficiency. *Physiologia Plantarum*, 153(4), 513–524. <https://doi.org/10.1111/ppl.12279>
- Liu, X., Xu, C., Chen, P., Li, K., Zhou, Q., Ye, M., Zhang, L. ve Lu, Y., 2022. Advances in technologies for boron removal from water: A comprehensive review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(17).
- Long, A., Zhang, J., Yang, L.-T., Ye, X., Lai, N.-W., Tan, L.-L., Lin, D. ve Chen, L.-S., 2017. Effects of low pH on photosynthesis, related physiological parameters, and nutrient profiles of citrus [Original Research]. *Frontiers in Plant Science*, Volume 8 - 2017. <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2017.00185>
- Lou, X.-Y., Yohai, L., Boada, R., Resina-Gallego, M., Han, D. ve Valiente, M., 2024. Effective removal of boron from aqueous solutions by inorganic adsorbents: A review. *Molecules*, 29(1).
- Lovatt, C.J., 1985. Evolution of xylem resulted in a requirement for boron in the apical meristems of vascular plants. *New Phytologist*, 99(4), 509–522. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1985.tb03679.x>
- Lustosa Carvalho, M., Tuzzin de Moraes, M., Cerri, C.E.P. ve Cherubin, M.R., 2020. Biochar amendment enhances water retention in a tropical sandy soil. *Agriculture*, 10(3).
- Ma, J.F. ve Yamaji, N., 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science*, 11(8), 392–397. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007>
- Machado, R.M.A., Alves-Pereira, I., Velez, D., Grilo, A., Veríssimo, I. ve Ferreira, R., 2025. Exploring sustainable fertilization strategies involving biochar, compost, and inorganic nitrogen: impact on nutrient uptake, yield, phytochemical accumulation, and antioxidant responses in turnips. *Plants*, 14(4).
- Macho-Rivero, M.A., Herrera-Rodríguez, M.B., Brejcha, R., Schäffner, A.R., Tanaka, N., Fujiwara, T., González-Fontes, A. ve Camacho-Cristóbal, J.J., 2018. Boron toxicity reduces water transport from root to shoot in arabidopsis plants. evidence for a reduced transpiration rate and expression of major PIP aquaporin genes. *Plant and Cell Physiology*, 59(4), 841–849. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcy026>
- Mahalakshmi, V., Yau, S.K., Ryan, J. ve Peacock, J.M., 1995. Boron toxicity in barley (*Hordeum vulgare* L.) seedlings in relation to soil temperature. *Plant and Soil*, 177(2), 151–156. <https://doi.org/10.1007/BF00010121>
- Malik, L., Sanaullah, M., Mahmood, F., Hussain, S., Siddique, M.H., Anwar, F. ve Shahzad, T., 2022. Unlocking the potential of co-applied biochar and plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) for sustainable agriculture under stress conditions. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(1), 58. <https://doi.org/10.1186/s40538-022-00327-x>

- Mandai, B., Adhikari, T.K. ve De, D.K., 1993. Effect of lime and organic matter application on the availability of added boron in acidic alluvial soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 24(15-16), 1925–1935. <https://doi.org/10.1080/00103629309368927>
- Marschner, H., 1995. Mineral nutrition of higher plants 2nd edition. Academic, Great Britain.
- May, G.M. ve Pritts, M.P., 1993. Phosphorus, zinc, and boron influence yield components in 'Earliglow' strawberry. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 118(1), 43–49. <https://doi.org/10.21273/JASHS.118.1.43>
- Mengel, K. ve Kirkby, E., 1987. Principles of plant nutrition. International Potash Institute, Worblaufen-Bern, Switzerland.
- Metwally, A.M., Radi, A.A., El-Shazoly, R.M. ve Hamada, A.M., 2018. The role of calcium, silicon and salicylic acid treatment in protection of canola plants against boron toxicity stress. *Journal of Plant Research*, 131(6), 1015–1028. <https://doi.org/10.1007/s10265-018-1008-y>
- Meyer, M.L. ve Bloom, P.R., 1997. Boric and silicic acid adsorption and desorption by a humic acid. *Journal of Environmental Quality*, 26(1), 63–69. <https://doi.org/10.2134/jeq1997.00472425002600010010x>
- Moody, D., Rathjen, A., Cartwright, B., Paull, J. ve Lewis, J., 1988. Genetic diversity and geographical distribution of tolerance to high levels of soil boron. *Proceedings of the 7th International Wheat Genetics Symposium*,
- Nable, R.O., 1988. Resistance to boron toxicity amongst several barley and wheat cultivars: A preliminary examination of the resistance mechanism. *Plant and Soil*, 112(1), 45–52. <https://doi.org/10.1007/BF02181751>
- Nable, R.O., Bañuelos, G.S. ve Paull, J.G., 1997. Boron toxicity. *Plant and Soil*, 193(1), 181–198. <https://doi.org/10.1023/A:1004272227886>
- Nable, R.O., Lance, R.C.M. ve Cartwright, B., 1990. Uptake of boron and silicon by barley genotypes with differing susceptibilities to boron toxicity. *Annals of Botany*, 66(1), 83–90. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a088003>
- Nielsen, F.H., 1997. Boron in human and animal nutrition. *Plant and Soil*, 193(1), 199–208. <https://doi.org/10.1023/A:1004276311956>
- Nielsen, F.H., 2000. The emergence of boron as nutritionally important throughout the life cycle. *Nutrition*, 16(7), 512–514. [https://doi.org/10.1016/S0899-9007\(00\)00324-5](https://doi.org/10.1016/S0899-9007(00)00324-5)
- Oberlin, A., 2002. Pyrocarbons. *Carbon*, 40(1), 7–24. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(01\)00138-5](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(01)00138-5)
- Ogawa, M., Okimori, Y. ve Takahashi, F., 2006. Carbon sequestration by carbonization of biomass and forestation: Three case studies. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11(2), 429–444. <https://doi.org/10.1007/s11027-005-9007-4>
- Oikonomou, A., Ladikou, E.-V., Chatziperou, G., Margaritopoulou, T., Landi, M., Sotiropoulos, T., Araniti, F. ve Papadakis, I.E., 2019. Boron excess imbalances root/shoot allometry, photosynthetic and chlorophyll fluorescence parameters and sugar metabolism in apple plants. *Agronomy*, 9(11).
- Onthong, J., Yoajui, N. ve Kaewsichan, L., 2011. Alleviation of plant boron toxicity by using water to leach boron from soil contaminated by wastewater from rubber wood factories. *Science Asia*, 37, 314–319.

- Ouzounidou, G., Paschalidis, C., Petropoulos, D., Koriki, A., Zamanidis, P. ve Petridis, A., 2013. Interaction of soil moisture and excess of boron and nitrogen on lettuce growth and quality. *Horticultural Science*, 40(3), 119–125. <https://doi.org/10.17221/15/2013-HORTSCI>
- Pandey, A., Khan, M.K., Hakki, E.E., Gezgin, S. ve Hamurcu, M., 2019. Combined boron toxicity and salinity stress—An insight into its interaction in plants. *Plants*, 8(10).
- Park, H. ve Schlesinger, W.H., 2002. Global biogeochemical cycle of boron. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(4), 20–21–20–11. <https://doi.org/10.1029/2001GB001766>
- Paull, J.G., Cartwright, B. ve Rathjen, A.J., 1988. Responses of wheat and barley genotypes to toxic concentrations of soil boron. *Euphytica*, 39(2), 137–144. <https://doi.org/10.1007/BF00039866>
- Paull, J.G., Rathjen, A.J. ve Cartwright, B., 1991. Major gene control of tolerance of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) to high concentrations of soil boron. *Euphytica*, 55(3), 217–228. <https://doi.org/10.1007/BF00021242>
- Pereira, G.L., Siqueira, J.A., Batista-Silva, W., Cardoso, F.B., Nunes-Nesi, A. ve Araújo, W.L., 2021. Boron: More than an essential element for land plants? [Review]. *Frontiers in Plant Science*, Volume 11 - 2020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.610307>
- Pereira, R.G., Heinemann, A.B., Madari, B.E., Carvalho, M.T.d.M., Kliemann, H.J. ve Santos, A.P.d., 2012. Transpiration response of upland rice to water deficit changed by different levels of eucalyptus biochar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47, 716–721.
- Ploquin, J., 1966. Boron in foods. *Bulletin de l'Academie Nationale de Medecine*, 150(24), 509–512. (Le bore dans l'alimentation.)
- Power, P.P. ve Woods, W.G., 1997. The chemistry of boron and its speciation in plants. *Plant and Soil*, 193(1), 1–13. <https://doi.org/10.1023/A:1004231922434>
- Prather, R.J., 1977. Sulfuric acid as an amendment for reclaiming soils high in boron. *Soil Science Society of America Journal*, 41(6), 1098–1101. <https://doi.org/10.2136/sssaj1977.03615995004100060016x>
- Rahman, M., Tushar, M.A.N., Zahid, A., Ahmed, K.M.U., Siddique, M.A.M. ve Mustafa, M.G., 2021. Spatiotemporal distribution of boron in the groundwater and human health risk assessment from the coastal region of Bangladesh. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(17), 21964–21977. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11682-3>
- Raven, J.A., 1980. Short- and long-distance transport of boric acid in plants. *New Phytologist*, 84(2), 231–249. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1980.tb04424.x>
- Reguera, M. ve Camacho-Cristóbal, J.J., 2023. Molecular, Metabolic and Physiological Responses to Boron Stress in Higher Plants. *Plants*, 12(11).
- Rehman, S., Park, T.I., Kim, Y.J., Seo, Y.W. ve Yun, S.J., 2006. Inverse relationship between boron toxicity tolerance and boron contents of barley seed and root. *Journal of Plant Nutrition*, 29(10), 1779–1789. <https://doi.org/10.1080/01904160600897521>
- Reid, R. ve Fitzpatrick, K., 2009a. Influence of leaf tolerance mechanisms and rain on boron toxicity in barley and wheat. *Plant Physiology*, 151(1), 413–420. <https://doi.org/10.1104/pp.109.141069>

- Reid, R. ve Fitzpatrick, K.L., 2009b. Redistribution of boron in leaves reduces boron toxicity. *Plant Signaling & Behavior*, 4(11), 1091–1093. <https://doi.org/10.4161/psb.4.11.9798>
- Reisenauer, H.M., Walsh, L.M. ve Hoeft, R.G., 1977. Testing soils for sulphur, boron, molybdenum, and chlorine [Miscellaneous]. *Soil Testing and Plant Analysis*, 173–200.
- Rerkasem, B., Jamjod, S. ve Pusadee, T., 2020. Productivity limiting impacts of boron deficiency, A review. *Plant and Soil*, 455(1), 23–40. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04676-0>
- Reynolds, S.B., Scaife, A. ve Turner, M.K., 1987. Effect of nitrogen form on boron uptake by cauliflower. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 18(10), 1143–1154. <https://doi.org/10.1080/00103628709367889>
- Richards, L.A., 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. US Government Printing Office.
- Sarkar, D., De, D.K., Das, R. ve Mandal, B., 2014. Removal of organic matter and oxides of iron and manganese from soil influences boron adsorption in soil. *Geoderma*, 214–215, 213–216. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.09.009>
- Seth, K. ve Aery, N.C., 2017. Boron induced changes in biochemical constituents, enzymatic activities, and growth performance of wheat. *Acta Physiologiae Plantarum*, 39(11), 244. <https://doi.org/10.1007/s11738-017-2541-3>
- Sharma, K.R., Srivastava, P.C., Srivastava, P. ve Singh, V.P., 2006. Effect of farmyard manure application on boron adsorption–desorption characteristics of some soils. *Chemosphere*, 65(5), 769–777. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.03.053>
- Shyam, S., Ahmed, S., Joshi, S.J. ve Sarma, H., 2025. Biochar as a soil amendment: implications for soil health, carbon sequestration, and climate resilience. *Discover Soil*, 2(1), 18. <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00041-8>
- Siddiqui, M.H., Al-Whaibi, M.H., Sakran, A.M., Ali, H.M., Basalah, M.O., Faisal, M., Alatar, A. ve Al-Amri, A.A., 2013. Calcium-induced amelioration of boron toxicity in radish. *Journal of Plant Growth Regulation*, 32(1), 61–71. <https://doi.org/10.1007/s00344-012-9276-6>
- Smith, T.E., Grattan, S.R., Grieve, C.M., Poss, J.A., Läuchli, A.E. ve Suarez, D.L., 2013. pH dependent salinity-boron interactions impact yield, biomass, evapotranspiration and boron uptake in broccoli (*Brassica oleracea* L.). *Plant and Soil*, 370(1), 541–554. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1653-9>
- Sommer, A.L. ve Lipman, C.B., 1926. Evidence on the indispensable nature of zinc and boron for higher green plants. *Plant Physiology*, 1(3), 231–249. <https://doi.org/10.1104/pp.1.3.231>
- Soylomezoglu, G., Demir, K., Inal, A. ve Gunes, A., 2009. Effect of silicon on antioxidant and stomatal response of two grapevine (*Vitis vinifera* L.) rootstocks grown in boron toxic, saline and boron toxic-saline soil. *Scientia Horticulturae*, 123(2), 240–246. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.09.005>
- Spokas, K.A., Cantrell, K.B., Novak, J.M., Archer, D.W., Ippolito, J.A., Collins, H.P., Boateng, A.A., Lima, I.M., Lamb, M.C., McAloon, A.J., Lentz, R.D. ve Nichols, K.A., 2012. Biochar: A synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration. *Journal of Environmental Quality*, 41(4), 973–989. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0069>

- Stangoulis, J., Tate, M., Graham, R., Bucknall, M., Palmer, L., Boughton, B. ve Reid, R., 2010. The mechanism of boron mobility in wheat and canola phloem. *Plant Physiology*, 153(2), 876–881. <https://doi.org/10.1104/pp.110.155655>
- Stiles, A.R., Bautista, D., Atalay, E., Babaoğlu, M. ve Terry, N., 2010. Mechanisms of boron tolerance and accumulation in plants: A physiological comparison of the extremely boron-tolerant plant species, *Puccinellia distans*, with the moderately boron-tolerant *Gypsophila arrostil*. *Environmental Science & Technology*, 44(18), 7089–7095. <https://doi.org/10.1021/es1016334>
- Stiles, A.R., Liu, C., Kayama, Y., Wong, J., Doner, H., Funston, R. ve Terry, N., 2011. Evaluation of the boron tolerant grass, *Puccinellia distans*, as an initial vegetative cover for the phytoremediation of a boron-contaminated mining site in Southern California. *Environmental Science & Technology*, 45(20), 8922–8927. <https://doi.org/10.1021/es200879a>
- Su, C. ve Suarez, D.L., 1995. Coordination of adsorbed boron: A FTIR spectroscopic study. *Environmental Science & Technology*, 29(2), 302–311. <https://doi.org/10.1021/es00002a005>
- Subedi, K.D., Gregory, P.J. ve Gooding, M.J., 1999. Boron accumulation and partitioning in wheat cultivars with contrasting tolerance to boron deficiency. *Plant and Soil*, 214(1), 141–152. <https://doi.org/10.1023/A:1004792221715>
- Sun, A., Gou, D., Dong, Y., Xu, Q. ve Cao, G., 2019. Extraction and analysis of available boron isotopes in soil using multicollector inductively coupled plasma mass spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(25), 7183–7189. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b01455>
- Tavallali, V., 2017. Interactive effects of zinc and boron on growth, photosynthesis, and water relations in pistachio. *Journal of Plant Nutrition*, 40(11), 1588–1603. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1270308>
- Tavallali, V. ve Karimi, S., 2017. Green synthesized zinc-glycine chelate enhances antioxidant protection of pistachio under different soil boron levels. *International Journal of Fruit Science*, 17(4), 423–439. <https://doi.org/10.1080/15538362.2017.1354246>
- Torun, A.A., Yazıcı, A., Erdem, H. ve ÇAKMAK, İ., 2006. Genotypic variation in tolerance to boron toxicity in 70 durum wheat genotypes. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 30(1), 49–58.
- Tsadilas, C.D., Kassioti, T. ve Mitsios, I.K., 2005. Influence of liming and nitrogen forms on boron uptake by tobacco. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36(4-6), 701–708. <https://doi.org/10.1081/CSS-200043348>
- Turan, M.A., Taban, N. ve Taban, S., 2009. Effect of calcium on the alleviation of boron toxicity and localization of boron and calcium in cell wall of wheat. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 37(2), 99–103. <https://doi.org/10.15835/nbha3723241>
- Van Eynde, E., Mendez, J.C., Hiemstra, T. ve Comans, R.N.J., 2020. Boron adsorption to ferrihydrite with implications for surface speciation in soils: experiments and modeling. *ACS Earth and Space Chemistry*, 4(8), 1269–1280. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.0c00078>
- Van Raij, B., Quaggio, J., Cantarella, H. ve Abreu, C., 1997. Interpretação de resultados de análise de solo. *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*, 2, 1–13.

- Vera-Maldonado, P., Aquea, F., Reyes-Díaz, M., Cárcamo-Fincheira, P., Soto-Cerda, B., Nunes-Nesi, A. ve Inostroza-Blancheteau, C., 2024. Role of boron and its interaction with other elements in plants [Review]. *Frontiers in Plant Science*, Volume 15 - 2024. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1332459>
- Wang, N., Yang, C., Pan, Z., Liu, Y. ve Peng, S.a., 2015. Boron deficiency in woody plants: various responses and tolerance mechanisms [Review]. *Frontiers in Plant Science*, Volume 6 - 2015. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00916>
- Wang, Y., Chen, L., Zhu, Y., Fang, W., Tan, Y., He, Z. ve Liao, H., 2024. Research status, trends, and mechanisms of biochar adsorption for wastewater treatment: a scientometric review. *Environmental Sciences Europe*, 36(1), 25. <https://doi.org/10.1186/s12302-024-00859-z>
- Wardle, D.A., Zackrisson, O. ve Nilsson, M.C., 1998. The charcoal effect in Boreal forests: mechanisms and ecological consequences. *Oecologia*, 115(3), 419–426. <https://doi.org/10.1007/s004420050536>
- Warington, K., 1937. Boron in agriculture. *Nature*, 140(3554), 1016–1016. <https://doi.org/10.1038/1401016b0>
- Winsley, P., 2007. Biochar and bioenergy production for climate change mitigation. *New Zealand Science Review*, 64(1), 5–10.
- Yaman, S., 2004. Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. *Energy Conversion and Management*, 45(5), 651–671. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00177-8](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00177-8)
- Yang, L.-T., Pan, J.-F., Hu, N.-J., Chen, H.-H., Jiang, H.-X., Lu, Y.-B. ve Chen, L.-S., 2022. Citrus physiological and molecular response to boron stresses. *Plants*, 11(1).
- Yang, T.-Y., Cai, L.-Y., Qi, Y.-P., Yang, L.-T., Lai, N.-W. ve Chen, L.-S., 2019. Increasing Nutrient solution pH alleviated aluminum-induced inhibition of growth and impairment of photosynthetic electron transport chain in *Citrus sinensis* seedlings. *BioMed Research International*, 2019(1), 9058715. <https://doi.org/10.1155/2019/9058715>
- Yau, S.K., Hamblin, J. ve Ryan, J., 1994. Phenotypic variation in boron toxicity tolerance in barley, durum and bread wheat [Journal article]. *Rachis*, 13(1/2), 20–25.
- Yau, S.K., Nachit, M. ve Ryan, J., 1997. Variation in growth, development, and yield of durum wheat in response to high soil boron. II. Differences between genotypes. *Australian Journal of Agricultural Research*, 48(7), 951–958. <https://doi.org/10.1071/A96145>
- Yau, S.K. ve Saxena, M.C., 1997. Variation in growth, development, and yield of durum wheat in response to high soil boron. I. Average effects. *Australian Journal of Agricultural Research*, 48(7), 945–950. <https://doi.org/10.1071/A96144>
- Yermiyahu, U., Keren, R. ve Chen, Y., 2001. Effect of composted organic matter on boron uptake by plants. *Soil Science Society of America Journal*, 65(5), 1436–1441. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6551436x>
- Yoshinari, A. ve Takano, J., 2017. Insights into the mechanisms underlying boron homeostasis in plants [Mini Review]. *Frontiers in Plant Science*, Volume 8 - 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01951>
- Yu, X.-Y., Ying, G.-G. ve Kookana, R.S., 2006. Sorption and desorption behaviors of diuron in soils amended with charcoal. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(22), 8545–8550. <https://doi.org/10.1021/jf061354y>

- Zadoks, J.C., Chang, T.T. ve Konzak, C.F., 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14(6), 415–421. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>
- Zhao, S., Huq, M.E., Fahad, S., Kamran, M. ve Riaz, M., 2024. Boron toxicity in plants: understanding mechanisms and developing coping strategies; a review. *Plant Cell Reports*, 43(10), 238. <https://doi.org/10.1007/s00299-024-03317-5>
- Zhao, Y., Wang, X., Yao, G., Lin, Z., Xu, L., Jiang, Y., Jin, Z., Shan, S. ve Ping, L., 2022. Advances in the effects of biochar on microbial ecological function in soil and crop quality. *Sustainability*, 14(16).
- Zhu, Z., Zhang, Y., Tao, W., Zhang, X., Xu, Z. ve Xu, C., 2025. The biological effects of biochar on soil's physical and chemical characteristics: A Review. *Sustainability*, 17(5).

