



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**NANO BOYUTLU BİYOKÖMÜR ELDESİ VE
BAZI TOPRAK ENZİM AKTİVİTELERİ
ÜZERİNE ETKİLERİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Asena Ayyüce Mutlu

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Biyoteknoloji Anabilim Dalı

**Ocak-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Asena Ayyüce MUTLU tarafından hazırlanan “NANO BOYUTLU BİYOKÖMÜR ELDESİ VE BAZI TOPRAK ENZİM AKTİVİTELERİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ” adlı tez çalışması .../.../... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyoteknoloji Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Erdal KOCABAŞ

.....

Danışman

Prof. Dr. Mustafa YÖNTEM

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Egemen FOTO

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Asena Ayyüce MUTLU

26.12.2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NANO BOYUTLU BİYOKÖMÜR ELDESİ VE BAZI TOPRAK ENZİM AKTİVİTELERİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Asena Ayyüce MUTLU

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Biyoteknoloji Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mustafa YÖNTEM
İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Vildan ERCİ

2025, 64 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mustafa YÖNTEM
Prof. Dr. Erdal KOCABAŞ
Dr. Öğr. Üyesi Egemen FOTO

Her geçen gün artan insan nüfusuna bağlı olarak çevre kirliliği, gıda güvenliği, kaynak ve enerji kıtlığı gibi sorunlar artış göstermekte olup çözüm olarak sürdürülebilir, verimli, çevre dostu ve ekonomik çözümler üretmek zorunlu hale gelmektedir. Küresel tarımdaki en önemli sorunlardan biri ise toprak bozulması olarak ortaya çıkmış olup özellikle de verimlilikte meydana gelen düşüş ve erozyon önemli olmaktadır. Nanoteknoloji, nanomalzemelerin benzersiz özellikleri nedeniyle çevre, tarım, gıda ve enerji sektörlerinde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Son yıllarda nano-biyokömür, biyokömürün fiziksel, kimyasal ve yapısal özelliklerini iyileştirmek ve böylece sınırlarını aşmak için bir teknik olarak ortaya çıkmış olup toprak ıslahı, kirlletici iyileştirme ve atık su arıtımı için kullanımına yönelik çalışmalara ilgi artmıştır. Nano-biyokömür eldesinde tarımsal atıkların kullanılması sürdürülebilir bir çevre açısından da önem arz etmektedir. Bu tez çalışmasında Konya ilinde bulunan mısır artıkları biyokömür ve nano-biyokömürler eldesinde kullanılmıştır. Önce, 2 saat 450 °C piroliz sıcaklığına maruz bırakılan mısır saplarından elde edilen biyokömürler (BK) bilyalı öğütme tekniği ile nano boyuta indirgenerek nano-biyokömürlere (NBK) dönüştürüldü. Elde edilen BK ve NBK'lar Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ve enerji dağılımı x-ışını spektroskopisi (EDX) ile karakterize edildi. Biyokömür ve nano-biyokömürler farklı oranlarda toprak örneklerine uygulanarak 30 gün ve 60 gün süre ile inkübasyona bırakıldıktan sonra toprağın pH, EC, kireç, organik madde (OM), agregat stabilitesi (AS), tarla kapasitesi (TK), solma noktası (SN) ve faydalı su kapasitesi (FS) üzerine etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca uygulamaların toprak dehidrogenaz ve alkalin fosfataz enzim aktivitesine olan etkisi incelenmiştir. NBK'nın pH ve EC değerlerinin BK'ya göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. FTIR analizleri, NBK ve BK'nın benzer piklere sahip olduğunu, ancak bazı pik şiddetlerinde farklılıklar olduğunu göstermiştir. FE-SEM analizi, BK'nın düzensiz ve makro gözenekli yapıda olduğunu, NBK'nın ise daha homojen bir dağılım gösterdiğini ortaya koymuştur. Partikül boyut analizi sonucunda, NBK'nın ortalama boyutunun 732 nm olduğu belirlenmiştir. Toprak pH ve EC değerlerinin NBK uygulama dozu arttıkça yükseldiğini, ancak toprak kireç değerinde kontrol ile uygulamalar arasında anlamlı bir fark bulunmadığını göstermiştir. Her iki inkübasyon süresinde de toprak organik maddesi ve agregat stabilitesinin en yüksek %5'lik NBK uygulamasında gözlemlendiği belirlenmiştir. Dehidrogenaz enzim aktivitesi, BK ve NBK uygulamalarında %1 ve üzeri dozlarda artış göstermiştir. NBK uygulamasında en yüksek aktivite %2 dozunda gözlemlenmiş, %5 dozunun etkinliği ise %2'den anlamlı bir fark göstermemiştir. 60 günlük inkübasyon sonucunda, her iki uygulamanın da alkalin fosfataz enzim aktivitesi üzerinde olumlu etkileri olduğu görülmüştür. Bu bulgular, biyokömür ve nano-biyokömürün toprak özellikleri ve enzim aktiviteleri üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bilyalı öğütme, Biyokömür, Enzim aktivitesi, Nano-biyokömür, Piroliz

ABSTRACT

MS

PRODUCTION OF NANO-SIZED BIOCHAR AND EVALUATION OF ITS EFFECTS ON SOME SOIL ENZYME ACTIVITIES

Asena Ayyüce MUTLU

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN BIOTECHNOLOGY

Advisor: Prof. Dr. Mustafa YÖNTEM
2nd Advisor: Assist. Prof. Dr. Vildan ERCİ

2025, 64 Pages

Jury

Prof. Dr. Mustafa YÖNTEM
Prof. Dr. Erdal KOCABAŞ
Assist. Prof. Dr. Egemen FOTO

The increasing human population has led to a rise in environmental issues such as pollution, food security challenges, and resource and energy scarcity. Consequently, there is an urgent need to develop sustainable, efficient, environmentally friendly, and economically viable solutions. One of the most important problems in global agriculture is soil degradation, especially the decline in productivity and erosion. Nanotechnology has a wide range of applications in the environment, agriculture, food and energy sectors due to the unique properties of nanomaterials. In recent years, nano-biochar has emerged as a technique to improve the physical, chemical and structural properties of biochar and thus overcome its limitations, and there has been increased interest in its use for soil remediation, pollutant remediation and wastewater treatment. The use of agricultural wastes in the production of nano-biochar is also important for a sustainable environment. In this thesis, corn residues were used to produce biochar and nano-biochar in Konya province. First, biochar (BC) obtained from corn stalks exposed to 450 °C pyrolysis temperature for 2 hours was reduced to nano size by ball milling technique and converted into nano-biochar (NBC). Characterization of the produced biochar and nano-biochar was performed using Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), field emission scanning electron microscopy (FE-SEM), and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX). The effects of both biochar and nano-biochar on soil properties were evaluated by applying them to soil samples at varying ratios and incubating them for 30 and 60 days. Parameters such as pH, electrical conductivity (EC), lime content, organic matter (OM), aggregate stability (AS), field capacity (FC), wilting point (WP), and available water capacity (AWC) were assessed. Additionally, the impact of these amendments on soil enzyme activities, specifically dehydrogenase and alkaline phosphatase, was also investigated. The findings revealed that the pH and EC values were significantly higher in NBC treatments compared to BC. FTIR analysis indicated that both BC and NBC exhibited similar peaks, although variations in peak intensities were noted. FESEM analysis showed that BC had an irregular and macro-porous structure, while NBC displayed a more homogeneous distribution. Particle size analysis confirmed that the average size of NBC was approximately 732 nm. As the application rate of NBC increased, both soil pH and EC values rose; however, no significant difference was observed in soil lime content between control and treated samples. The highest levels of soil organic matter and aggregate stability were recorded with the 5% NBC application across both incubation periods. Dehydrogenase enzyme activity increased with doses of 1% and above for both BC and NBC, with the highest activity observed at a 2% dose, while the 5% dose did not show a significant difference from the 2% dose. After 60 days of incubation, both amendments positively influenced alkaline phosphatase enzyme activity. These results underscore the beneficial effects of biochar and nano-biochar on soil properties and enzyme activities, highlighting their potential as effective soil amendments in agricultural practices.

Keywords: Ball milling, Biochar, Enzyme activity, Nano-biochar, Pyrolysis

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez süreci boyunca bendenengin bilgi ve deneyimini esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Mustafa YÖNTEM'e sonsuz saygı ve şükranlarımı sunuyorum.

Tez çalışmamı gerçekleştirmemde yardımlarını ve tecrübelerini benden esirgemeyen Selçuk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü Öğretim Üyesi Dr. Öğr. Üyesi Vildan ERCİ hocama teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca tez çalışmamı gerçekleştirmeyi mümkün kılan Fen Fakültesi Dekanlığına, Biyoteknoloji bölümü değerli öğretim üyelerine ve asistanlarına, yaşadığım her türlü zorluğa karşı benden desteğini esirgemeyen sevgili aileme ve her konuda benden desteğini esirgemeyen çalışkanlığını, özgüvenini ve disiplinini örnek aldığım sevgili eşim Yavuz Selim MUTLU'ya tüm içtenliğimle teşekkürü bir borç bilirim.

Asena Ayyüce MUTLU
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLO DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
2.1. Toprak Düzenleyicisi Olarak Biyokömür ve Nano-biyokömür	3
2.2. Nano-Biyokömür (NBK) Üretimi	4
2.3. Nanobiyokömürlerin Özellikleri ve Karakterizasyonu	6
2.4. Sürdürülebilir Tarım İçin Nano-biyokömür	7
2.5. Önceki Çalışmalar	9
3. MATERYAL VE YÖNTEM	13
3.1. Çalışma Alanı ve Özellikleri	13
3.2. Toprak Örneklerinin Alınması ve Analize Hazır Hale Getirilmesi.....	13
3.3. Toprak Örneklerinde Yapılan Bazı Fiziksel- Kimyasal Analizler ve Yöntemleri ...	14
3.3.1. Fiziksel Analizler	14
3.3.2. Kimyasal Analizler.....	14
3.3.3. Biyolojik Analizler	15
3.4. Çalışmada Kullanılması Planlanan Biyokömür ve Nano-biyokömürlerin Elde Edilmesi, Karakterizasyonu ve Çalışma Topraklarına Uygulanma Dozları	16
3.4.1. Biyokömür Üretimi	16
3.4.2. Bilyalı Öğütme Yöntemi ile Nano-biyokömür Eldesi.....	16
3.4.3. Biyokömür ve Nano-biyokömürlerin Karakterizasyonu.....	17
3.5. Biyokömür ve Nano-biyokömürlerin Topraklara Uygulanması	17
3.6. İstatistik Analizler	18
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	19
4.1. Çalışmada Kullanılan Toprakların Bazı Özellikleri.....	19

4.2.	Biyokömür ve Nano-biyokömür Karakterizasyonu	19
4.3.	Biyokömür ve Nano-Biyokömür Uygulamalarının Toprakların Özelliklerine Olan Etkileri	24
4.3.1.	Toprak pH'ına Olan Etkisi	24
4.3.2.	Toprak Elektriksel İletkenliğine (EC) Olan Etkisi	25
4.3.3.	Toprak Kirecine Olan Etkisi.....	26
4.3.4.	Toprak Organik Maddesine Olan Etkisi.....	27
4.3.5.	Toprak Agregat Stabilitesine Olan Etkisi.....	28
4.3.6.	Yapılan Uygulamaların Toprak Tarla Kapasitesine, Solma Noktasına ve Faydalı Su Kapasitesine Olan Etkisi.....	29
4.3.8.	Toprak Dehidrogenaz Enzim Aktivitesine Olan Etkisi.....	35
4.3.9.	Toprak Alkalen Fosfataz Enzim Aktivitesine Olan Etkisi	37
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	39
5.1.	Sonuçlar.....	39
5.2.	Öneriler.....	40
6.	KAYNAKLAR	41

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Yığın biyokömürden nano-biyokömür üretim metodları (Jiang vd., 2023)	6
Şekil 3.1	Çalışma alanının konumu	13
Şekil 3.2	Toprak örneklerinde tarla kapasitesi ve solma noktasının belirlenmesi	14
Şekil 3.3	Toprak örneklerinde pH, EC ve kireç miktarının belirlenmesi.....	14
Şekil 3.4	Toprak örneklerinde organik madde, dehidrogenaz enzim aktivitesi ve alkalin fosfataz enzim aktivitesi miktarlarının belirlenmesi	15
Şekil 3.5	Mısır artıklarından 450°C’de piroliz sonrası biyokömür eldesi.....	16
Şekil 3.6	Mısır biyokömüründen bilyalı öğütme yaklaşımı ile nano-biyokömür eldesi.....	17
Şekil 3.7	Biyokömür ve nano-biyokömür uygulaması sonrası inkübasyon.....	18
Şekil 3.8	Biyokömür ve nano-biyokömür uygulaması sonrası örneklerde meydana gelen renk değişimi	18
Şekil 4.1	Biyokömür ve nano-biyokömürlerin FTIR görüntüleri	21
Şekil 4.2	Biyokömür ve nano-biyokömürlerin FE-SEM görüntüleri	22
Şekil 4.3	Biyokömür EDX görüntüsü	23
Şekil 4.4	Nano-biyokömürün EDX görüntüsü.....	23
Şekil 4.5	Nano-biyokömürün partikül boyut dağılımı	24
Şekil 4.6	Biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarının toprak pH’sına olan etkisi	25
Şekil 4.7	Biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarının toprak EC’sine olan etkisi.....	26
Şekil 4.8	Biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarının toprak kirecine etkisi.....	26
Şekil 4.9	Biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarının toprak organik maddeye etkisi ...	27
Şekil 4.10	Biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarının toprak agregat stabilitesine etkisi	29
Şekil 4.11	Biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarının toprak tarla kapasitesine etkisi .	31
Şekil 4.12	Biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarının toprak solma noktasına etkisi...	31
Şekil 4.13	Biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarının toprak faydalı su kapasitesine etkisi	32
Şekil 4.14	Biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarının toprak TK-SN ve FS kapasitesine olan etkisinin bir arada gösterimi	32
Şekil 4.15	Toprak uygulamalarının 30 gün inkübasyon sonrası toprak özellikleri arasındaki korelasyon grafiği.....	34
Şekil 4.16	Toprak uygulamalarının 60 gün inkübasyon sonrası toprak özellikleri arasındaki korelasyon grafiği.....	35
Şekil 4.17	Biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarının toprak dehidrogenaz enzim aktivitesine etkisi.....	36
Şekil 4.18	Biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarının toprak alkalin fosfataz enzim aktivitesine etkisi.....	37

TABLO DİZİNİ

Tablo 3.1 Biyokömür ve nano-biyokömür materyallerinin topraklara uygulanma oranları (%w/w)	18
Tablo 4.1 Toprak örneklerinin bazı fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları	19
Tablo 4.2 Toprak örneklerinin bazı biyolojik analiz sonuçları	19
Tablo 4.3 Biyokömür ve nano-biyokömürün bazı fizikokimyasal özellikleri.....	20



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

nm	Nanometre
μ g	Mikrogram
mL	Mililitre
kg	Kilogram
cm	Santimetre
kV	Kilo volt
mA	Mili amper
mm	Milimetre
g	Gram
M	Molar
$^{\circ}$ C	Santigrat
h	Saat
μ S	Mikro simens
%	Yüzde
rpm	Dakika başına devir
dk	Dakika
w	Ağırlık
C	Karbon
N	Azot
O	Oksijen
OH	Hidroksil
COOH	Karboksil grubu
H	Hidrojen

Kısaltmalar

BK	Biyokömür
NBK	Nano-biyokömür
TK	Tarla kapasitesi
SN	Solma noktası
FS	Faydalı su
AS	Agregat stabilitesi
EC	Elektriki iletkenlik
OM	Organik madde
EDX	Enerji dağılımı X-ışını spektroskopisi
FE-SEM	Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu
FTIR	Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
DHA	Dehidrogenaz enzim aktivitesi
ALP	Alkale fosfat enzim aktivitesi
SiCL	Siltli killi tın
CaCO ₃	Kireç
TTC	2,3,5-trifeniltetrazolium
TPF	Trifenilformazan
MUB	Modifiye universal tampon
CaCl ₂	Kalsiyum klorür
FKT	Fırın kuru toprak
THAM-NaOH	Tris hidroksimetil aminometan sodyum hidroksit

1. GİRİŞ

Tarım sektöründe, büyüyen nüfusun taleplerini karşılayabilmek ve ürün verimini arttırabilmek için çeşitli pestisitlerden faydalanmak kaçınılmaz hale gelmiştir (Boonupara vd., 2023). Bu bağlamda zamanla, pestisit kullanımı, özellikle de gelişmekte olan ülkelerde önemli ölçüde artış göstermiştir. Fakat son yıllarda pestisitlerin gıda güvenliğinin sağlanabilmesindeki kritik rolüne rağmen, çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle kullanımlarının azaltılması konusunda giderek artan bir küresel fikir birliği bulunmaktadır (Bilias, 2024). Tarım sektöründe uygulanan pestisitlerin %80'i amaçlanan zararlı hedeflerine ulaşamamakta, bunun aksine toprağı, suyu ve havayı kirleterek endişe verecek derecede zararlı etkilere yol açmaktadırlar (Jacquet vd., 2022).

Bu zorluklar göz önüne alındığında, etkili iyileştirme teknikleri kullanılarak topraktaki kalıntı pestisit konsantrasyonlarının azaltılması ve toprakların sürdürülebilirliğinin sağlanabilmesi mecburidir. Topraktaki pestisit kirliliğinin etkisinin azaltılabilmesi için geleneksel yöntemler mevcut olsa da bunlar genellikle önemli sınırlamalarla karşı karşıyadır. Bunlar arasında yüksek bakım maliyetleri, verimlilik kaybı, besin sızıntısı, toprak erozyonu ve uygulama sonrasında yeni sorunların ortaya çıkma potansiyelinin yer alması olarak sıralanabilir (Yang vd., 2024).

Özellikle, tam olarak test edilmiş ve güvenilir iyileştirme teknolojilerinin eksikliği göz önüne alındığında, bu sorunun üstesinden gelebilmek için çevre dostu ve sürdürülebilir bir yaklaşıma duyulan ihtiyaç oldukça açıktır. Geline bu noktada kirlenmiş topraklara yapılacak olan yerinde iyileştirme uygulaması, basit, uygun maliyetli ve enerji açısından verimli sayılabilecek özelliklere sahip olmalıdır (Liu, Almatrafi, vd., 2022). Bu bağlamda yapılan son çalışmalarda toprak düzenleyicileri ile yerinde iyileştirme, toprak özelliklerini geliştirme, bitki büyümesine ve verimliliğe önemli katkılarda bulunma noktasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Baragaño vd., 2021). Özellikle de organik düzenleyiciler; artan nüfus baskısı, küresel iklim değişikliği gibi sorunlar nedeniyle tarım topraklarda meydana gelen mevcut birçok problemin çözümünde yer almanın yanı sıra toprakların sürdürülebilirliğinin arttırılmasında da elzem hale gelmektedir.

Organik düzenleyiciler arasında en kolay erişime ve ucuz ham madde olanağına sahip olan seçeneklerden birisi tarımsal artıklardır (Ashokkumar vd., 2022). Bu nedenle tarımsal artık biyokütlenin sürdürülebilir teknolojiler kullanılarak doğaya geri kazandırılması ve bu sayede var olan mevcut tarım topraklarının korunabilmesinin sağlanması önem teşkil etmektedir. Tarımsal artıkların topraklara direk olarak düzenleyici materyal olarak uygulanmasının

mümkün olmasının yanı sıra etkinliğinin artırılarak topraklara uygulamalarının yapılması son yıllarda tercih edilen seçeneklerden biridir (Fu vd., 2021).

Birçok çalışma da yer verilen çeşitli artık dönüştürme teknolojilerinden biri pirolizdir (Rajput vd., 2022). Piroliz, tarımsal biyokütle, endüstri sonrası ticari ve tüketici atıkları ve selülozik etanol dönüşüm platformlarından gelen yüksek ligninli atıkları kullanmak için çok uygundur. Pirolizin birincil amacı rafine edilebilir yağları elde etmek olsa da süreç sonucunda biyokömür olarak bilinen karbonlu bir yan ürün üretmektedir.

Biyokömür (BK), iki amaca hizmet edebilen katı, kömür benzeri bir madde olup yanma yoluyla alternatif bir enerji kaynağı olarak kullanılabilir veya bir bertaraf aracı olarak toprağa uygulanabilir. Biyokömür hem ekonomik hem de agronomik faydalar sağlayan kendine özgü fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olan bir malzeme olup toprağa dahil edilmesinin en büyük avantajları arasında toprak verimliliğini ve tarımsal üretkenliği artırması yer almaktadır (Medyńska-Juraszek vd., 2021; Rex vd., 2023; Uusitalo & Leino, 2019).

Araştırmalar, biyokömürün içerdiği karbonun yarı ömrünün 1.000 yıldan fazla olduğunu tahmin etmektedir. Sonuç olarak, Orta Batı Amerika Birleşik Devletleri'ndeki verimli toprakların (özellikle de çayır toprakları olarak nitelendirilenlerin) %5 ile %15'inin tarihi çayır yangınlarından kalan kömür kalıntılarından oluştuğu varsayılmaktadır (Laird vd., 2010). Biyokömürdeki karbon bileşiklerinin bu uzun vadeli kararlılığı, onu karbon tutma stratejileri için uygun bir aday olarak konumlandırmaktadır (Glaser vd., 2002).

Ayrıca, çok sayıda çalışma biyokömürün çeşitli toprak özellikleri üzerindeki faydalı etkilerini belgelemiştir. Özellikle, biyokömürün toprakta su tutma kapasitesini artırdığını (Kinney vd., 2012), toprak asitliğini iyileştirebilen kireçleme etkileri sergilediğini (Laird vd., 2010) ve besin kullanılabilirliğini artırarak daha iyi bitki büyümesini teşvik ettiğini (Schulz & Glaser, 2012) göstermiştir.

Nanoteknolojideki gelişmeler yakından incelendiğinde nano boyuta indirgenen materyallerin fiziksel, biyolojik ve kimyasal özelliklerinde eşsiz özellikler meydana geldiği literatürce görülmektedir (Joudeh & Linke, 2022). Bu bağlamda biyokömür yapılarının nano boyuta indirgenerek toprak özellikleri üzerinde meydana getireceği değişimlerin belirlenmesi sürdürülebilir tarım toprakları için önem arz etmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar bu konuda yetersizdir. Planlanan bu çalışma ile mevcut soruna çözüm bulunması ve literatürdeki eksikliğe katkı sağlanması hedeflenmektedir.

Yapılan bu çalışma mısır bitkisinden 450°C'de piroliz sonucu biyokömürlerin (BK) elde edilmesini ve bunlardan bilyalı öğütme metodu ile nano-biyokömürlerin (NBK) üretilmesini içermektedir. Ayrıca elde edilen BK ve NBK'lerin topraklara uygulanması sonucu toprakların

fiziksel-kimyasal ve biyolojik özelliklerinde meydana gelebilecek değişimlerin incelenmesi bu çalışmanın nihai amacı oluşturmaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Toprak Düzenleyicisi Olarak Biyokömür ve Nano-biyokömür

Biyokömür, biyokütlenin pirolizi (oksijen yokluğunda veya sınırlı koşullarında ısıtılması) yoluyla üretilen katı, karbon bakımından zengin bir malzeme olarak tanımlanmaktadır (Sajjadi vd., 2018). Biyokömürün özellikleri biyokütle hammaddesine, piroliz sıcaklık ve süresi gibi koşullara bağlıdır (Bilias vd., 2024). Biyokömür, toprak ıslahı, karbon tutulumu ve su filtreleme dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamaları ile literatürde birçok çalışmaya konu olmaktadır (Jiang vd., 2020). Biyokömür, toprak kalitesini ve verimliliğini artırma kabiliyeti nedeniyle sürdürülebilir tarım için umut verici bir malzeme olarak kabul edilmektedir (Agegehu vd., 2017). Toprağa biyokömür eklenmesi ile toprakların su tutma kapasitesinin, besin tutma kapasitesinin ve mikrobiyal aktivitesinin artarak mahsul verimliliğinin arttığı literatürce bilinmektedir (Khan vd., 2024). Biyokömür ayrıca topraktaki karbonu tutarak sera gazı emisyonlarının azaltılmasına da yardımcı olmaktadır (Chun vd., 2021).

Biyokömürün, artan verim ve iyileştirilmiş besin kullanım verimliliği dahil olmak üzere çeşitli ürünler üzerinde olumlu etkileri olduğu gösterilmektedir. Ancak, biyokömürün mahsul verimliliği üzerindeki spesifik etkileri toprak tipi, iklim ve biyokömür özellikleri gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir (Zhang vd., 2022). Biyokömürün faydalarını optimize etmek için uygun uygulama oranları ve diğer toprak yönetimi uygulamalarıyla entegrasyonu çok önemlidir (Regmi vd., 2022).

Tarımsal uygulamalara ek olarak, biyokömür çok farklı kullanım alanlarına sahiptir (Azzi vd., 2022). Biyokömür araştırma ve geliştirme çalışmaları, üretim teknolojilerindeki ilerlemeler, biyokömür özelliklerinin karakterizasyonu ve çeşitli uygulamalarının anlaşılmasıyla son yıllarda önemli ölçüde ilerleme kaydedilmesini sağlamaktadır kaydedilmektedir (Prochnow vd., 2024)

Sürdürülebilir biyokütle üretiminin geleceğinde karşılaşılan en önemli zorluk, bir yandan gıda ve yem üretiminin artırılması, diğer yandan da biyoenerji ürünlerine yönelik artan ihtiyacın karşılanması yönündeki rekabetçi taleplerdir. Biyokömür, gıda üretiminden ödün vermeden biyo-enerji mahsullerinin üretiminin artmasını sağlayarak bu benzersiz çevresel ikilemi çözebilecek bir materyaldir ((Kumar & Bhattacharya, 2021). Biyokömür bu soruna uyum sağlayabilir ve tarımsal ekim alanlarını iyileştirerek enerji için gıdadan ödün vermeden

gelecekteki biyo-enerji mahsullerinin üretimini artmasını sağlayabilecektir. Piroliz, toprak sağlığını iyileştirirken (biyokömür ilavesi yoluyla) enerji üreten ve böylece daha fazla biyokütle ve daha fazla enerji üretme kabiliyetini artıran pozitif bir geri besleme döngüsü üretmenin anahtarı olabilecek bu tür teknolojilerden biridir (Singh Yadav vd., 2023). Biyokömür üretim teknolojileri, yavaş piroliz, hızlı piroliz ve hidrotermal karbonizasyon dahil olmak üzere, her biri farklı avantaj ve dezavantajlar sunan çeşitli yöntemleri kapsamaktadır. Belirli bir üretim tekniğinin seçimi, kullanılan hammadde türü, elde edilen biyokömürün istenen özellikleri, amaçlanan uygulamaları ve üretim ölçeği dahil olmak üzere birçok faktörden etkilenir (Phadtare & Kalbande, 2022)

Pirolizin gerçekleştiği koşullara bağlı olarak biyokömürün partikül boyutunda önemli farklılıklar gözlenmektedir (Muzyka vd., 2023) Tipik olarak, dökme biyokömürün partikül çapı 0,04 mm ile 20 mm arasında değişir. Buna ek olarak piroliz, 1000 nm'yi aşan biyokömür partikülleri ve nano gibi diğer partikül boyutlarını da ortaya çıkarabilir.

Dahası, çok sayıda çalışma biyokömürün ayırt edici özelliklerinin gelişmekte olan nanoteknolojinin uygulanmasıyla daha da geliştirilebileceğini göstermektedir (Chausali vd., 2021; Song vd., 2022). Bu gelişme, nano-biyokömürün adsorpsiyon, kataliz ve kirleticiler veya besinlerle etkileşime elverişli daha aktif bir yüzey alanı sağlayan benzersiz özelliklerine bağlanmaktadır (Bhandari vd., 2023; Chaubey vd., 2024). Bu tür gelişmeler, nano-biyokömürün çevresel zorlukları ele alma ve tarımsal uygulamaları iyileştirme potansiyelinin altını çizmektedir.

2.2. Nano-Biyokömür (NBK) Üretimi

Sentezlenen nano-biyokömürlerin fizyokimyasal özellikleri genellikle ham materyalden etkilenmektedir. Föhr vd., (2017)'e göre lignin içeriği yüksek materyallerden elde edilen nano biyokömürler büyük agregasyon yeteneğine sahipken (Föhr vd., 2017); yüksek hemiselüloz içeriğine sahip ham maddeden elde edilen nano-biyokömürlerin karbon içeriğinin düşük ve oksijen içeriğinin ise yüksek olduğu literatürce bildirilmektedir (Hasany vd., 2025).

Nano materyalleri oluşturmak için yukarıdan aşağıya veya aşağıdan yukarıya üretim prosesleri kullanılmaktadır. Aşağıdan yukarıya üretim prosesi atomik seviyeden nano materyal üretimine dayanmaktadır (Abid vd., 2021). Nano-biyokömür üretimi ise farklı yukarıdan aşağıya yaklaşımlara dayanmakta olup fiziksel bozunma yoluyla yığın biyokömürlerden sentezlenmektedir (Saraugi & Routray, 2024).

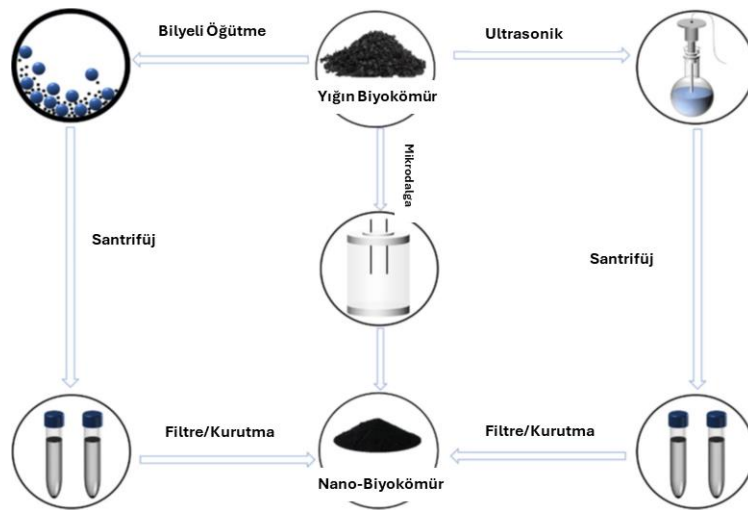
Nano-biyokömür, mekanik öğütme, ultrasonikasyon ve mikrodalga piroliz dahil olmak üzere çeşitli yukarıdan aşağıya tekniklerle etkili bir şekilde üretilebilir (Saraugi & Routray,

2024). Yığın biyokömürden nano-biyokömür üretimi için kullanılan methodlar Şekil 2.1’de gösterilmektedir. Bu yöntemler arasında bilyalı öğütme, orijinal malzemenin kristal yapısını korurken gelişmiş özelliklere sahip nano-biyokömür üretme kabiliyetiyle de öne çıkmaktadır (Xu vd., 2024).

Nano-biyokömür üretmek için kullanılan bir diğer teknik de çift diskli öğütmedir; ancak bu yöntem genellikle yüksek işletme maliyetleriyle ilişkilendirilir ve bu da büyük ölçekli üretim için pratikliğini sınırlayabilir. Bilyalı öğütmenin özel bir türü olan titreşimli disk öğütmenin, tutarlı boyut ve şekle sahip daha fazla miktarda nano-biyokömür ürettiği ve endüstriyel uygulamalar için daha avantajlı bir seçenek olduğu literatürce desteklenmektedir (Karinkanta vd., 2018). Ek olarak, sonikasyon tekniği, askıdaki biyokömürün yüksek enerjili ultrasonik radyasyon uygulanarak nano-biyokömüre parçalandığı uygun bir üretim yöntemidir. Bu teknik sadece partikül boyutunu küçültmekle kalmaz, aynı zamanda nano-biyokömürün çeşitli matrislerde dağılımını artırarak işlevsel özelliklerini de geliştirir (Xu vd., 2024).

Bu üretim proseslerinden bilyalı öğütme; düşük üretim maliyetleri, düşük enerji gereksinimleri, çevre dostu olması ve geniş uygulama yelpazesine sahip olması nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmektedir (Prasad Yadav vd., 2012). Bilyalı öğütme, malzemelerin parçacık boyutunu küçülten ve böylece yüzey alanlarını ve reaktivitelerini artıran mekanik bir işlemdir. Bu işlem, özellikle yığın halindeki biyokömürün, toprak ıslahı için avantajlı olan gelişmiş fizikokimyasal özellikler sergileyen nano boyutlu partiküllere dönüştürülmesinde etkilidir (Liu vd., 2019).

Pan vd., (2019)’da yaptıkları çalışma da bilyeli öğütme ile NBK elde etmek için üretim proses parametrelerini optimize etmek amacıyla öğütme süresini, dönme hızını ve bilye-toz kütle oranını ayarlamışlardır (Pan vd., 2019). Bilyalı öğütme teknikleriyle üretilen nano-biyokömürlerin (NBK) toprak uygulamaları sonucunda özellikle toprak özellikleri ve tarımsal verimlilik üzerindeki faydalı etkileri nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Her şeyden önce, nanobiyokömür formlarının bitkilerin ve sebzelerin verim ve besin özellikleri üzerindeki fizyolojik etkilerine ilişkin sınırlı sayıda çalışma mevcuttur (Khaliq vd., 2024)



Şekil 2.1 Yığın biyokömürden nano-biyokömür üretim metodları (Jiang vd., 2023)

Ayrıca, NBK kullanımının çevresel faydaları toprak iyileştirmenin ötesine uzanmaktadır. Bilyalı öğütme yoluyla NBK üretimi, artık malzemeleri (biyokömür) kullandığı ve kimyasal katkı maddelerine olan ihtiyacı en aza indirdiği için yeşil bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Naghdi vd., 2017). Bu, kimyasal girdileri azaltmayı ve toprak sağlığını iyileştirmeyi amaçlayan sürdürülebilir tarım uygulamalarıyla uyumludur (Khaliq vd., 2024)

Özetle, bilyalı öğütme yoluyla üretilen nano-biyokömürün toprak yönetimi uygulamalarına dahil edilmesi, toprak sağlığını ve tarımsal verimliliği iyileştirmek için çok yönlü bir yaklaşım sunmaktadır. Geliştirilmiş fiziksel ve kimyasal özellikleri, onu çeşitli toprak türlerinde besin tutma, su yönetimi ve kirletici iyileştirme konularını ele almak için umut verici bir değişiklik haline getirmektedir.

2.3. Nanobiyokömürlerin Özellikleri ve Karakterizasyonu

Nano-biyokömürler (NBK), nano ölçekte tasarlanmış, tipik olarak küçük partikül boyutu, yüksek yüzey alanı ve gelişmiş fizikokimyasal özellikleri ile karakterize edilen yeni bir biyokömür malzeme sınıfını temsil eder (Oleszczuk vd., 2016). Bu özellikler nano-biyokömürleri tarım, çevresel iyileştirme ve malzeme bilimi dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için özellikle etkili kılmaktadır. Nano-biyokömürlerin en önemli doğal özelliklerinden biri, reaktivite ve adsorpsiyon yeteneklerini arttırmak için kritik olan yüksek yüzey alanı ve gözenekliliğidir (Sani vd., 2023). Parçacık boyutunun nano ölçeğe indirgenmesi yüzey-hacim oranını önemli ölçüde artırarak besin maddeleri ve kirleticiler için gelişmiş adsorpsiyon potansiyeline yol açar. Bu özellik, nano-biyokömürlerin besin tutma ve kullanılabilirliğini artırarak toprak verimliliğini artırabileceği ve böylece bitki büyümesini

teşvik edebileceği tarımsal ortamlarda özellikle faydalıdır (Nagaraju vd., 2023). Nano-biyokömürlerin benzersiz morfolojisi ve tek tip gözenek dağılımı, sürdürülebilir tarım uygulamaları için gerekli olan toprak matrisi içinde su ve besin maddelerinin verimli bir şekilde taşınmasını kolaylaştırır (Rashid vd., 2023)

Nano-biyokömürlerin bir diğer kritik yönü de pH seviyelerinden etkilenebilen yüzey yükü özellikleridir. Çalışmalar, nano-biyokömürlerin zeta potansiyelinin pH ile önemli ölçüde değişebileceğini, stabiliteelerini ve toprak bileşenleriyle etkileşimlerini etkileyebileceğini göstermiştir (Faizan vd., 2024). Örneğin, pH arttıkça, belirli nano-biyokömürlerin zeta potansiyeli daha negatif hale gelir ve bu da pozitif yüklü iyonları ve kirleticileri adsorbe etme yeteneklerini artırabilir (Servin vd., 2017) Bu özellik, nano-biyokömürlerin ağır metalleri ve diğer toksik maddeleri etkili bir şekilde bağlayabildiği ve böylece çevresel etkilerini azaltabildiği kirlenmiş toprak ortamlarında özellikle avantajlıdır (Bhandari vd., 2023; Jiang vd., 2020)

Nano-biyokömürler için sentez yöntemleri de özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bilyalı öğütme, hidrotermal sentez ve kimyasal modifikasyon gibi teknikler, Nano-biyokömürlerin özelliklerini belirli uygulamalara göre uyarlamak için kullanılabilir (Chaubey vd., 2024; Ramanayaka vd., 2020). Örneğin, biyokömürün bilyalı öğütme yoluyla mekanik olarak işlenmesi yalnızca partikül boyutunu küçültmekle kalmaz, aynı zamanda malzemenin adsorpsiyon süreçleri için hayati önem taşıyan fonksiyonel gruplarını da geliştirebilir (Naghdi vd., 2017). Ayrıca, nanobiyokömürlerin diğer malzemelerle kompozit haline getirilebilmesi, biyoremediasyon ve kataliz gibi alanlarda uygulanabilirliklerini daha da artırabilir (Chausali vd., 2021).

Özetle, nano-biyokömürlerin yüksek yüzey alanı, gözeneklilik, yüzey yükü özellikleri ve sentez yöntemlerinin çok yönlülüğü gibi doğal özellikleri, onları çeşitli uygulamalar için umut verici bir malzeme haline getirmektedir. Eşsiz özellikleri sadece toprak sağlığını ve verimliliğini iyileştirmedeki etkinliklerini artırmakla kalmaz, aynı zamanda onları çevresel iyileştirme çabalarında değerli ajanlar olarak konumlandırır.

2.4. Sürdürülebilir Tarım İçin Nano-biyokömür

Nano-biyokömürün (NBK) toprak ortamı üzerindeki etkileri çok yönlüdür ve toprak sağlığı, besin kullanılabilirliği, mikrobiyal aktivite ve kirletici maddelerin iyileştirilmesini kapsar. Biyokömürün rafine bir formu olan NBC, azaltılmış partikül boyutu nedeniyle gelişmiş fizikokimyasal özellikler sergiler ve bu da toprak matrisi içindeki etkileşimlerini önemli ölçüde etkiler.

NBK'nin en dikkate değer etkilerinden biri, toprak mikrobiyal biyokütlesini ve aktivitesini iyileştirme kabiliyetidir. Araştırmalar, NBK uygulamasının mikrobiyal biyokütleyi önemli ölçüde artırabileceğini ve mikrobiyal büyüme ve aktivite için daha elverişli bir ortam yaratabileceğini göstermektedir (Liu vd., 2019). Bu artış, NBK'nin artan yüzey alanı ve gözenekliliği içeren, nem ve besin maddelerinin daha iyi tutulmasını sağlayan ve böylece mikrobiyal kolonizasyon ve büyümeyi destekleyen benzersiz özelliklerine bağlanmaktadır (Khader vd., 2023). Ayrıca, BK'nin toprak mikroorganizmaları için bir besin kaynağı sağladığı, besin döngüsünü kolaylaştırdığı ve genel toprak verimliliğini artırdığı gösterilmiştir (Ameloot vd., 2013).

NBK, mikrobiyal sağlığı desteklemenin yanı sıra topraktaki besin kullanılabilirliğini artırmada da önemli bir rol oynar. Çalışmalar, NBK'nin bitki büyümesi için kritik olan azot ve fosfor gibi temel besin maddelerinin kullanılabilirliğini sinerjik olarak artırabildiğini göstermiştir (Rashid vd., 2023). NBK'nin topraktaki varlığı, besin maddelerinin adsorpsiyonunu iyileştirebilir ve besin sızıntısını azaltabilir, böylece gübre kullanımının verimliliğini artırabilir (Nagaraju vd., 2023). Ayrıca, NBK'nin topraktan amonyak emisyonlarını azaltma kabiliyeti belgelenmiştir, bu da azot kayıplarını azaltmak ve bitkiler tarafından besin alımını iyileştirmek için hayati önem taşımaktadır (Rashid vd., 2023).

NBK ayrıca, özellikle kirlenmiş topraklarda çevresel iyileştirme için önemli bir potansiyel sergilemektedir. Yüksek yüzey alanı ve reaktif fonksiyonel grupları, NBK'nin ağır metalleri ve organik kirleticileri etkili bir şekilde adsorbe etmesini sağlayarak biyoyararlanımlarını ve toksisitelerini azaltır (Jiang vd., 2020). Örneğin, NBK kadmiyumla kirlenmiş toprakları iyileştirmek için kullanılmış, fitotoksisiteyi azaltmada ve toprak kalitesini iyileştirmede etkinliğini göstermiştir (Liu vd., 2019). Bu kirletici adsorpsiyon kapasitesi yalnızca toprak sağlığını iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda kirlenmeden etkilenen ekosistemlerin restorasyonuna da katkıda bulunur.

Ayrıca, NBK uygulaması, su tutma ve havalandırma gibi toprağın fiziksel özelliklerini olumlu yönde etkileyebilir. NBK'nin toprağa dahil edilmesinin yapısını iyileştirdiği, su tutma kapasitesinin artmasına ve erozyonun azalmasına yol açtığı gösterilmiştir (Khader vd., 2023). Bu, özellikle toprak neminin tutulmasının sürdürülebilir tarım uygulamaları için kritik önem taşıdığı kurak ve yarı kurak bölgelerde faydalıdır.

Bu faydalara rağmen, NBK kullanımıyla ilişkili potansiyel riskleri göz önünde bulundurmak önemlidir. Nanopartiküllerin toprak ortamındaki hareketliliği, toprak biyotası ve su kalitesi üzerindeki istenmeyen sonuçları hakkında endişeleri artırmaktadır (Sharma vd., 2023). Bu nedenle, NBK'nin toprak ekosistemleri üzerindeki uzun vadeli etkilerini tam olarak

anlamak ve tarımsal uygulamalarda güvenli bir şekilde uygulanmasına yönelik kılavuzlar oluşturmak için devam eden araştırmalar gereklidir.

Özetle, nano-biyokömür toprak sağlığını iyileştirmek, besin kullanılabilirliğini artırmak ve kirlenmiş toprakları iyileştirmek için önemli avantajlar sunmaktadır. Benzersiz özellikleri onu sürdürülebilir tarım ve çevre yönetiminde değerli bir araç haline getirmektedir, ancak etkili kullanımı için çevresel etkilerinin dikkatle değerlendirilmesi şarttır.

2.5. Önceki Çalışmalar

Biyokömür ilavesinin, topraklarda besin döngüsü ve organik madde ayrışması için hayati önem taşıyan mikrobiyal aktiviteyi artırdığı gösterilmiştir. Paetsch vd., (2018) tarafından yapılan araştırma, biyokömür değişikliklerinin kuraklık koşulları altında mikrobiyal karbon kullanım verimliliğini artırdığını göstermiştir, bu da biyokömürün zorlu ortamlarda bile mikrobiyal toplulukları destekleyebileceğini düşündürmektedir (Paetsch vd., 2018).

Ayrıca, dehidrogenaz ve alkalın fosfataz gibi enzim aktiviteleri, toprak mikrobiyal aktivitesinin ve besin döngüsünün göstergeleridir. Hseu vd., (2014) tarafından yapılan araştırma, biyokömür uygulamasının tarım topraklarında enzim aktivitelerini artırdığını, bunun da mikrobiyal aktivitenin ve besin kullanılabilirliğinin arttığını gösterdiğini ortaya koymuştur (Hseu vd., 2014). Enzim aktivitesindeki bu artış, toprak verimliliğini artırmak ve bitki büyümesini teşvik etmek için gereklidir.

Bir çalışmada yavaş piroliz yolu ile mısır ve ağaç artıklarından üretilen biyokömürlerin zenginleştirilmiş Bennington silt balçığı üzerine olan etkisi incelenmiştir. 120 günlük inkübasyon sonrası toprakların saprofit mantar, bakteri ve enzim aktiviteleri üzerine olan etkinlikleri çalışma kapsamında belirlenmiştir. İnkübasyon sonrasında elde edilen toprak örneklerinde kontrole kıyasla saprofit mantar veya bakteri miktarında önemli bir fark görülmemiştir. Bununla birlikte, mısır biyokömürü ile inkübe edilen topraklarda, ağaç kabuğu biyokömürüne kıyasla önemli ölçüde ($P < .05$) aktinobakteri miktarı belirlenmiştir. Ayrıca, β -glukozidaz aktivitesi her iki biyokömürle inkübe edilen topraklarda kontrole kıyasla önemli ölçüde daha yüksek çıktığı belirtilmiştir ($P < .05$) (Pérez-Guzmán vd., 2020).

Bir başka çalışma da farklı iki piroliz sıcaklığında elde edilen domuz gübresi biyokömürünün farklı dozajlarının çay bahçesi toprak fonksiyonları üzerindeki etkileri incelenmiştir. 350 °C'de pirolize edilen %2 domuz gübresi biyokömürünün toprağa ilavesi sonrası toprakların karbon ve azot içeriklerinde artışın meydana geldiği bildirilmiştir. Kontrole karşılaştırıldığında, %2 domuz gübresi biyokömürünün toprağa eklenmesi sonrasında sukraz,

fosfataz, katalaz ve üreaz aktivitelerinde sırasıyla %63,3, %23,2, %50,3 ve %27,9 oranında artış gözlemlenmiştir göstermiştir (Jiang vd., 2021).

Üç farklı hammaddeden (domuz gübresi, odun ve mutfak atığı) üretilen biyokömürlerin granit artık toprağının erozyonu üzerindeki etkisini araştıran bir başka çalışma da toprak erozyonu, yüzey akışı ve yüzey sızmasını ölçmek ve analiz etmek için kanal deneyleri yürütülmüştür. Çalışma kapsamında mutfak artığı biyokömürü örneklerinin yüzey akışı ve toprak erozyonunu sırasıyla %17,7 ve %21,7 oranında azalttığı gözlemlenirken; odun biyokömürü ve domuz gübresi biyokömürünün yüzey akışını ve toprak erozyonunu artırdığı bildirilmiştir (Huang vd., 2021).

Toprak agregatlarının stabilitesi, erozyonun önlenmesi ve toprak yapısının korunması için hayati önem taşır. Zachovalova ve diğerleri (2022) tarafından yapılan araştırma, biyokömür uygulamasının Dystric Cambisol'un fiziksel özelliklerini olumlu yönde etkileyerek agregat stabilitesini artırdığını göstermiştir (Zachovalova vd., 2022). Agregat stabilitesindeki bu gelişme, biyokömür ve toprak partikülleri arasındaki etkileşim nedeniyle stabil agregatların oluşmasına bağlanmaktadır.

Yapılan birçok araştırmada topraklara biyokömür ilavesinin toprak agregat yapısında iyileşmelere neden olduğu bildirilmektedir. Blanco-Canqui (2017), yaptıkları bir çalışmada farklı tekstüre sahip 34 toprak örneğine biyokömür uygulaması yaparak toprakların agregat stabilitelelerinde meydana getirdikleri değişimleri incelemiştir. Uygulama yapılan toprakların 24'ünde agregat stabilitesininin %21-%226 arasında değişen oranlarda artışlar meydana getirdiği gözlemlenirken geriye kalan 10 toprakta ise bir değişimin görülmediği bildirilmiştir (Blanco-Canqui, 2017).

Bir çalışmada, toprağa uygulanan mısır samanı biyokömürünün toprak özelliklerinde meydana getirdiği etkiler incelenmiştir. 6 ve 12 kg m⁻² biyokömür ilave uygulamalarında toprağın doymuş su içeriğinin sırasıyla %24,17 ve %42,91, tarla kapasitesinin ise sırasıyla %32,44 ve %51,30 oranında arttığı belirtilmiştir. Biyokömür uygulama oranındaki artışa paralel olarak işlem görmemiş örneklere kıyasla yüzey akışta hafifçe azalmalar gözlemlenmiş olup toprak erozyonunu ise önemli ölçüde azalttığı belirtilmiştir (Yu vd., 2021).

Başka bir çalışmada; üretilen iki tip biyokömürün erozyona yatkın farklı iki tip (kumlu ve tınlı) toprağa uygulanması sonucu topraklarda meydana getireceği fiziksel ve kimyasal özelliklerdeki değişimler incelenmiştir. Çalışma topraklara biyokömür ilavesinin, toprakların

hidrolik iletkenlik, organik karbon içeriği ve toprak agregat stabilitesi gibi önemli toprak özelliklerinde iyileşmelere neden olduğunu göstermiştir (Wei vd., 2024).

Biyokömür ilavesi, stabil agregatların oluşumunu teşvik ederek toprak yapısını geliştirebilir. Toprak yapısındaki bu iyileşme su infiltrasyonu, kök büyümesi ve genel toprak sağlığı için gereklidir. Çalışmalar, biyokömürün toprak agregatlarının gelişimini kolaylaştırarak toprağın havalanmasını ve drenajını iyileştirdiğini göstermiştir (Bonanomi vd., 2017).

Biyokömür, birçok organik maddeye kıyasla daha yüksek bir katyon değişim kapasitesine sahiptir ve bu da topraklarda besin maddesi tutulmasını artırabilir. Uzoma ve diğerleri (2011) biyokömür uygulamasının kumlu toprakların CEC'sini artırarak bitkiler için daha iyi besin kullanılabilirliği sağladığını bildirmiştir (Uzoma vd., 2011). Bu özellik, katyon tutmanın bitki büyümesi için kritik olduğu besin açısından fakir topraklarda özellikle faydalıdır.

Topraklara biyokömür ilavesi ile toprakların organik karbon içeriklerinde değişimler gözlemlenmiştir. Bir çalışmada topraklara yapılan biyokömür ilavesinin toprak organik karbon içeriğinde %18 ila %26 arasında bir değişime neden olduğu bildirilmiştir (Van Zwieten vd., 2010). Benzer şekilde, Amoakwah vd., (2017) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise toprağa biyokömür ilavesinin toprak organik karbonunda %28 ile %66 arasında bir değişme neden olduğu vurgulanmıştır (Amoakwah vd., 2017).

Liu vd., (2022) organik ve inorganik gübrelerle birlikte biyokömür uygulamasının toprak organik madde içeriğini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Biyokömürün yüksek karbon içeriği, topraktaki genel organik maddeye katkıda bulunarak verimliliğini ve yapısını artırır (Liu vd., 2022). Benzer şekilde, Huang ve arkadaşları (2021) biyokömür uygulamasının topraklardaki organik karbon içeriğini iyileştirdiğini, bunun da toprak sağlığını ve verimliliğini korumak için çok önemli olduğunu bildirmiştir (Huang vd., 2021) .

Biyokömürün tarla kapasitesi üzerindeki etkisi incelendiğinde; laboratuvar koşullarında kumlu topraklarda su tutmayı artırabileceğibildirilmiştir (Rabbi vd., 2021). Ayrıca, toprağın hidrolik iletkenliği, su hareketi ve tutulması için çok önemlidir. Hseu vd., (2018) biyokömür uygulamasının kumlu toprakların hidrolik özelliklerini iyileştirerek su sızma ve tutma kabiliyetlerini artırdığını bulmuştur (Hseu vd., 2014). Bu iyileşme, toprak matrisi boyunca daha iyi su hareketini kolaylaştıran biyokömürün artan gözenekliliğine ve yüzey alanına bağlanmaktadır.

Biyokömürün toprak pH ve EC'sini olumlu yönde etkilediği gösterilmiştir. Koide vd., (2014), biyokömür değişikliklerinin toprak pH'ını artırdığını, bunun da besin kullanılabilirliğini ve mikrobiyal aktiviteyi artırabileceğini bildirmiştir (Koide vd., 2015). Ek olarak, biyokömür ile değiştirilen toprakların elektriksel iletkenliği daha yüksek bulunmuştur, bu da iyon değişim kapasitesinin ve besin tutma özelliğinin arttığının bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir (Rozari vd., 2018).

Islam vd., (2021) ve Omondi vd., (2016)'de yaptıkları bir çalışmada topraklara yapılan biyokömür uygulamalarının uygulama dozlarına paralel olarak toprak agregat stabilitelerinde artışa neden olduğunu tespit etmişlerdir (Islam vd., 2021; Omondi vd., 2016) .

Yapılan bazı çalışmalarda biyokömürün kumlu, kumlu tınlı, tınlı kumlu tekstür sınıfındaki toprakların hidrolik iletkenliklerini düşürdüğü (Castellini vd., 2015; Lim vd., 2016), siltli tın, siltli kil, killi tın, kil tekstür sınıfındaki toprakların hidrolik iletkenliklerini ise artırdığı (Ouyang vd., 2013; Xiao vd., 2016) ifade edilmektedir. Hidrolik iletkenliklerin %25-%328 arasında değişen oranlarda arttığı ve %7-%91 arasında değişen oranlarda azaldığı belirtilmektedir (Blanco-Canqui, 2017)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Çalışma Alanı ve Özellikleri

Bu çalışma Sarıcalar, Konya bölgesinde Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Deneme İstasyonu (38°05'49"N 32°37'41"E) alanından alınan toprak örnekleri (Şekil 3.1) ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanının toprak yapısı siltli killi tın (SiCL) tekstüre sahip olup aynı zamanda bu bölge yarı kurak iklim özellikleri göstermektedir. Yıllık ortalama sıcaklık 11.4 °C ve yıllık yağış miktarı 323.6 mm'dir. Bu bölge %60'lık bir ortalama nispi nem ve 1172.6 mm ortalama yıllık buharlaşma göstermektedir.



Şekil 3.1 Çalışma alanının konumu

3.2. Toprak Örneklerinin Alınması ve Analize Hazır Hale Getirilmesi

Bu çalışmada, bozulmuş toprak örnekleri uygun nemde bir toprakçı küreği aracılığı ile 0- 30 cm derinlikten ve 8-10 farklı noktadan alınıp toprak örnekleri karıştırılarak laboratuvara getirilmiştir. Bir kısım örnek +4 dereceye konularak biyolojik analizler için depolanmıştır. Kalan toprak örnekleri ise gölgede hava kuru hale getirilerek planlanan çalışma için depolanmıştır.

3.3. Toprak Örneklerinde Yapılan Bazı Fiziksel- Kimyasal Analizler ve Yöntemleri

Tez kapsamında kullanılan toprak örneklerimizin temel özellikleri aşağıdaki yöntemler aracılığı ile belirlenmiştir.

3.3.1. Fiziksel Analizler

Fiziksel analizler olarak tekstür tayini (Gee & Bauder, 2018), tarla kapasitesi (Klute, 1986), solma noktası (Klute, 1986), faydalı su ve agregat stabilitesi (Gugino vd., 2009) ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2 Toprak örneklerinde tarla kapasitesi ve solma noktasının belirlenmesi

3.3.2. Kimyasal Analizler

Cam elektrotlu, dijital göstergeli pH metre ile 1:1 toprak-saf su karışımında pH ölçülmüştür (Kacar, 2009). Elektriki İletkenlik (EC) ölçümü ise, 1:1 toprak-saf su karışımında elektrik iletkenlik aleti kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Kacar, 2009). Örneklerin kireç (CaCO_3) içerikleri “Scheibler Kalsimetresi” ile hacimsel olarak belirlenmiştir (Nelson, 1982).



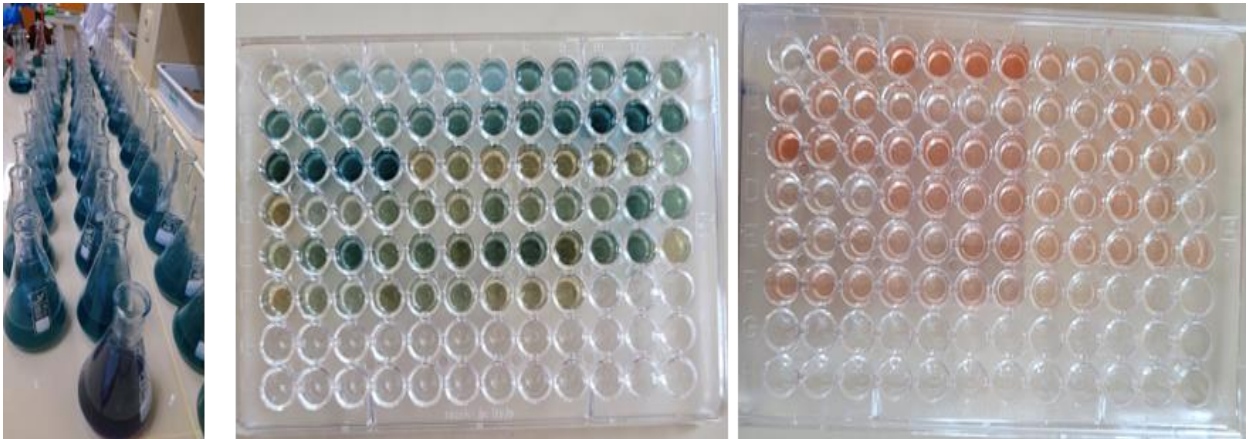
Şekil 3.3 Toprak örneklerinde pH, EC ve kireç miktarının belirlenmesi

3.3.3. Biyolojik Analizler

Organik madde içeriği Smith-Weldon yöntemine göre belirlenmiştir (Nelson & Sommers, 1982).

Dehidrogenaz aktivitesi (DHA): Toprak örneklerinden 6 g alınarak 50 mL'lik falkon tüplere konulup üzerine 1mL %3'lük TTC (2,3,5-trifeniltetrazolium) ve 2.5mL %1.2'lik glikoz çözeltisi eklendi. Örnekler 24 saat 25 °C'de inkübasyona bırakıldıktan sonra 10 mL metanol ilavesi ile filtre kâğıdından geçirilerek süzme işlemine tabi tutuldu. Bu işlemden sonra, falkon tüpleri son hacim 50mL olacak şekilde metanol ile tamamlandı. TPF çözeltisinden (trifenilformazan) standart eğrinin oluşturuldu. En son örneklerin optik densiteleri 485 nm dalga boyunda spektrofotometre ile ölçülerek $\mu\text{gTPF g}^{-1}$ (kuru toprak) 24h^{-1} olarak ifade edildi. Tüm çalışmalar 3 tekrarlı gerçekleştirildi (Thalman, 1968).

Alkalin fosfataz aktivitesi (ALP): Bu çalışma hidrolitik parçalanma ürünlerinin ekstraksiyonu ile yapıldı (Tabatabai & Bremner, 1969). Toprak örneklerinden 1 g alınarak üzerine 4 mL modifiye universal tampon (MUB, pH 11) ve 1 mL 0.025 M p-nitrofenil fosfat eklendi. Daha sonra, örnekler 37 °C'de 1 saat inkübasyona bırakıldıktan sonra 3500 rpm'de 15 dakika santrifüj işlemine tabi tutuldu. Bu işlemi takiben, süzülen örneklerin üzerine 1 mL 0.5 M kalsiyum klorür (CaCl_2) ve 4 mL tris (hidroksimetil) aminometan- sodyum hidroksit (THAMNaOH) çözeltisi ilave edilip örneklerin optik densiteleri 410 nm'de standart p-nitrofenol çözeltilerine karşılık gelecek şekilde spektrofotometrede ölçülerek $\mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1}$ kuru toprak cinsinden ifade edildi.



Şekil 3.4 Toprak örneklerinde organik madde, dehidrogenaz enzim aktivitesi ve alkalin fosfataz enzim aktivitesi miktarlarının belirlenmesi

3.4. Çalışmada Kullanılması Planlanan Biyokömür ve Nano-biyokömürlerin Elde Edilmesi, Karakterizasyonu ve Çalışma Topraklarına Uygulanma Dozları

3.4.1. Biyokömür Üretimi

Çalışma da biyokömür ve nano-biyokömür elde edilmesinde ham madde olarak mısır sapı artıkları tercih edildi. Artık mısır sapsarı, 4-5 cm boyuta gelecek şekilde küçültüldükten sonra, 60°C etüvde %10'dan daha az nem içerecek biçimde 24 saat kurutuldu. Etüvde nem oranı düşürülen artık mısır sapsarı oksijensiz bir ortam oluşturulduktan sonra kül fırınına yerleştirildi. Biyokömür materyali 450 °C'de "yavaş piroliz" işlemi ile elde edildi. Biyokömür üretiminde fırın sıcaklığı 10 °C dk-1 arttırılarak ve 2 saat 450 °C de tutuldu. Pirolizden sonra, elde edilen biyokömür (BK) Şekil 3.5.'te gösterilmiştir. Biyokömür materyali daha sonra 0.25 mm'den elenerek karakteristiklerinin belirlenmesi için homojen hale getirildi. Üretilen biyokömür karakterizasyon, toprak uygulaması ve nano boyuta indirgenmek üzere depolandı.



Şekil 3.5 Mısır artıklarından 450°C'de piroliz sonrası biyokömür eldesi

3.4.2. Bilyalı Öğütme Yöntemi ile Nano-biyokömür Eldesi

Biyokömürler (BK) gezegen tipi bir bilyalı değirmen kullanılarak nano boyutlu biyokömürlere dönüştürüldü. Nano boyutlu biyokömür elde edilirken kullanılan gezegen tipi değirmende yer alan 500 mL sertleştirilmiş çelik kapların içerisine BK'ler ve çelik bilyalar 1:30 (w:w) oranında olacak şekilde yerleştirildi. 30 dk boyunca öğütme işlemine tabi tutulan biyokömürler işlem sonrasında yapılacak uygulamalar için depolandı. Nano-biyokömür üretiminde ortamın aşırı ısınmasını önlemek için farklı zaman aralıklarında durdurma ve başlatma işlemleri uygulandı. Elde edilen nano-biyokömürler karakterizasyon ve topraklara uygulanabilmek üzere depolandı (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Mısır biyokömüründen bilyalı öğütme yaklaşımı ile nano-biyokömür eldesi

3.4.3. Biyokömür ve Nano-biyokömürlerin Karakterizasyonu

Biyokömürün fonksiyonel grupları $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ bölgesinde Fourier Transform Infrared Spectrometer spektrumu ile kaydedildi. Örneklerin şekilsel karakterizasyonu FE-SEM ile yapıldı. Bir tutam örnek karbon şeritin üzerine kaplandı ve analiz edildi. Elementel içeriği FE-SEM' e bağlı EDX ile belirlendi. Örneklerin ayrıca boyut analizleri partikül boyut analiz cihazı ile gerçekleştirildi.

3.5. Biyokömür ve Nano-biyokömürlerin Topraklara Uygulanması

Çalışma sahasından alınan toprak örnekleri 1'er kg olacak şekilde saksılara yerleştirildi. Çalışma kapsamında üretilen biyokömür ve nano-biyokömür örnekleri belirlenen uygulama oranlarında (%0,5, %1, %2 ve %5) (Tablo 3.1) tartıldıktan sonra saf su içerisine konularak süspansiyonlar elde edildi. Süspansiyonlar 30 dakika boyunca 5°C 'lik bir su banyosunda ultrasonik homojenizatör yardımı ile hazırlandı. Elde edilen biyokömür ve nano-biyokömür süspansiyonları saksılara yerleştirilmiş toprak örneklerine sırası ile uygulandı. Deneme 3 tekrarlı olacak şekilde tasarlandı (Şekil 3.7). Her bir saksı örneği, deiyonize su kullanılarak tarla kapasitesinde olacak şekilde ayarlandı ve inkübasyona bırakıldı. Toprağın tarla kapasitesini belirlemek için bir basınç plakası aparatı kullanıldı. Uygulama yapılmış toprak karışımları sabit sıcaklıkta 28°C 'de inkübe edildi ve sabit nemi koruması için düzenli olarak saksılar tartılarak, aradaki azalan su miktarı saf su olarak saksılara ilave edildi. Fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri belirlemek için toprak örnekleme 30 günlük aralıklarla toplam 60 günlük kuluçka süresi için yapıldı. Her numune alma zaman aralığında, numunelerin bir kısmı 105°C 'de fırında kurularak bir kısmı ise biyolojik analizler için $+4^{\circ}\text{C}$ 'de yapılacak analizler için depolandı.

Tablo 3.1 Biyokömür ve nano-biyokömür materyallerinin topraklara uygulanma oranları (%w/w)

Piroliz sıcaklığı	Toprak Düzenleyicisi	%w/w
450°C	Biyokömür (BK)	K(0) 0,5 1
	Nano-biyokömür (NBK)	2 5

**Şekil 3.7** Biyokömür ve nano-biyokömür uygulaması sonrası inkübasyon**Şekil 3.8** Biyokömür ve nano-biyokömür uygulaması sonrası örneklerde meydana gelen renk değişimi

3.6. İstatistiksel Analizler

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar TUKEY çoklu karşılaştırma testi ile MİNİTAB (Sür. 10.5) paket programında gerçekleştirilmiştir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Çalışmada Kullanılan Toprakların Bazı Özellikleri

Sarıcalar'dan 0-30 cm derinlikten alınan toprak örneklerinin bazı fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları Tablo 4.1' de verilmiştir. Yapılan fiziksel analizlere sonucunda Sarıcalar toprak örneğinin tekstür sınıfı siltli killi tın (SiCL) olarak hesaplanmıştır. Toprak örneklerinin agregat stabilitesi %15,1 olarak ölçülmüştür. Tarla kapasitesi, solma noktası ve faydalı su içerikleri 0.28 g g⁻¹, 0.15g g⁻¹ ve 0.13g g⁻¹ olarak bulunmuştur. Sarıcalar toprak örneklerinin kimyasal analiz sonuçlarına göre pH, EC, kireç değerleri sırasıyla 7.92 (hafif alkalın), 243µS cm⁻¹ (düşük) ve %22,87 olarak ölçülmüştür (Tablo 4.1). Bu sonuçlar örneklerin kum içeriğinin ve agregat stabilitesinin düşük olduğunu ve bununla birlikte organik madde kapsamının düşük olması Sarıcalar bölgesinin toprak erozyonuna hassas bi bölge olduğunu göstermektedir. Toprak örneklerinin bazı biyolojik analiz sonuçları Tablo 4.2' de verilmiştir. Yapılan biyolojik analizlere göre; Sarıcalar toprak örneğinin organik madde, dehidrogenaz enzim aktivitesi ve alkalin fosfataz enzim aktivitesi değerleri sırasıyla; %1,42, 8,21 µgTPF g⁻¹ FKT 24h⁻¹, 26,20 µg p-nitrofenol g⁻¹ FKT olarak ölçülmüştür.

Tablo 4.1 Toprak örneklerinin bazı fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları

İnkübasyon Süreçleri	Tekstür	pH 1:2.5 Toprak:S u	EC 1:2.5, Toprak:Su (µS/cm)	CaCO ₃ (%)	TK (%)	SN (%)	FS (%)	AS (%)
Sarıcalar	SiCL	7,92	243	22,87	28	16	12	15,1

Tablo 4.2 Toprak örneklerinin bazı biyolojik analiz sonuçları

Sarıcalar	OM (%)	DHA µgTPF g ⁻¹ FKT 24h ⁻¹	ALP µg p-nitrofenol g ⁻¹ FKT
Sarıcalar	1,42	8,21	26,20

4.2. Biyokömür ve Nano-biyokömür Karakterizasyonu

Biyokömür ve nano-biyokömürün bazı fizikokimyasal özellikleri ise Tablo 4.3'te verilmiştir. Nano-biyokömürün pH ve EC değerlerinin biyokömüre kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Biyokömürün pH değişimi ile alakalı olarak literatürde yapılan birçok çalışma mevcuttur. Yapılan bir çalışma da tarımsal artık ve gübre kaynaklı üretilen biyokömürlerin pH ve EC değerlerinin oldukça yüksek olduğu bildirilmiştir (pH 10.0-10.4) (Zhao vd., 2016). Buna

karşın makro, mikro ve nano ölçeklerde arıtma çamurundan elde edilen biyokömürün pH değerlerinde herhangi bir farklılık olmadığı gözlemlenmiştir (Song vd., 2019).

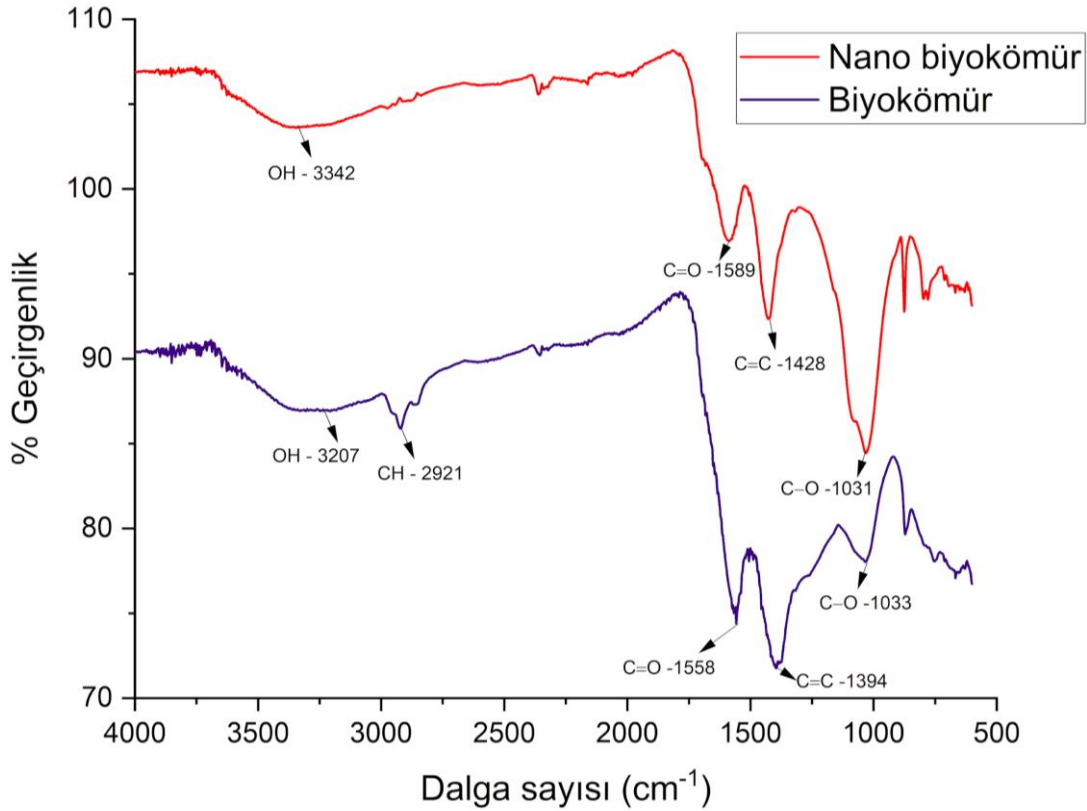
Ham biyokütlenin kimyasal bileşimi, biyokömür üretiminde öncelikle karbona dönüştürülür. Makro ölçekten nano ölçeğe doğru azalan parçacık boyutu ile birlikte, karbon içeriğinde belirgin bir azalma gözlemlenmiştir bu azalma öğütme süresi ve partikül boyutu ile alakalıdır. Partikül boyutu küçüldükçe C, N dolayısı ile C/N oranında azalma görülmektedir. Yapılan bir çalışmada odun yongası kaynaklı üretilen biyokömürlerin, makro, mikro ve nano ölçeklerdeki karbon içerikleri sırasıyla %81,2, %63 ve %17,7 olarak belirtilmiştir (Song vd., 2019).

Tablo 4.3 Biyokömür ve nano-biyokömürün bazı fizikokimyasal özellikleri

	Biyokömür	Nano-biyokömür
pH (toprak:Su; 1:10)	9,37	10,86
EC (Toprak: Su; 1:10)(dscm⁻¹)	7,94	9,13
%C	65,24	58,16
%N	2,13	1,07
C/N	30,63	54,35

Biyokömür (BK), karbonlu bileşimi ile tanınmaktadır ve yüzeyinde karboksilik (–COOH) ve hidroksil (–OH) grupları gibi çeşitli oksijen içeren fonksiyonel grupların varlığı ile karakterize edilmektedir. Bu gruplar, BK'nin yüzeyinde dağılmış bir şekilde bulunmaktadır. Oksijen fonksiyonel gruplarının varlığı, BK'nin kimyasal özelliklerini ve reaktivitesini önemli ölçüde etkileyebilir (Park vd., 2014). 700–880 cm⁻¹ arasındaki bant yoğunluğu, biyokömür (BK)/nano-biyokömür (NBK) yüzeylerindeki aromatik benzen halkalarına karşılık gelen aromatik C–H bağlarının varlığını önermektedir (Binh vd., 2022). 1394 ve 1428 cm⁻¹ aralığında gözlemlenen pikler, aromatik halkalardaki çift C = C bağlarının gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. 1558 ve 1589 cm⁻¹ aralığında bulunan, ketonlar, karboksilik asitler ve esterler gibi organik moleküllerde bulunan karbonil grubudur (C = O). Bu fonksiyonel gruplar ayrıca H-bağlanma etkileşimlerini de göstermektedir. Biyokömürde görülen 2921 cm⁻¹ tepe noktası, alkil gruplarının varlığını gösteren –CH gerilmesini ifade etmektedir. Bu pikin nanobiyokömürde şiddetinin oldukça düştüğü gözlemlendi. Ayrıca, 3207 ve 3342 cm⁻¹ tepe noktaları, BK/NBK yüzeylerinde yüzey –OH gruplarının varlığını göstermekte olup, önemli H-bağlanma etkileşimlerini temsil etmektedir. NBK ve BK'nin benzer piklere sahip olduğu

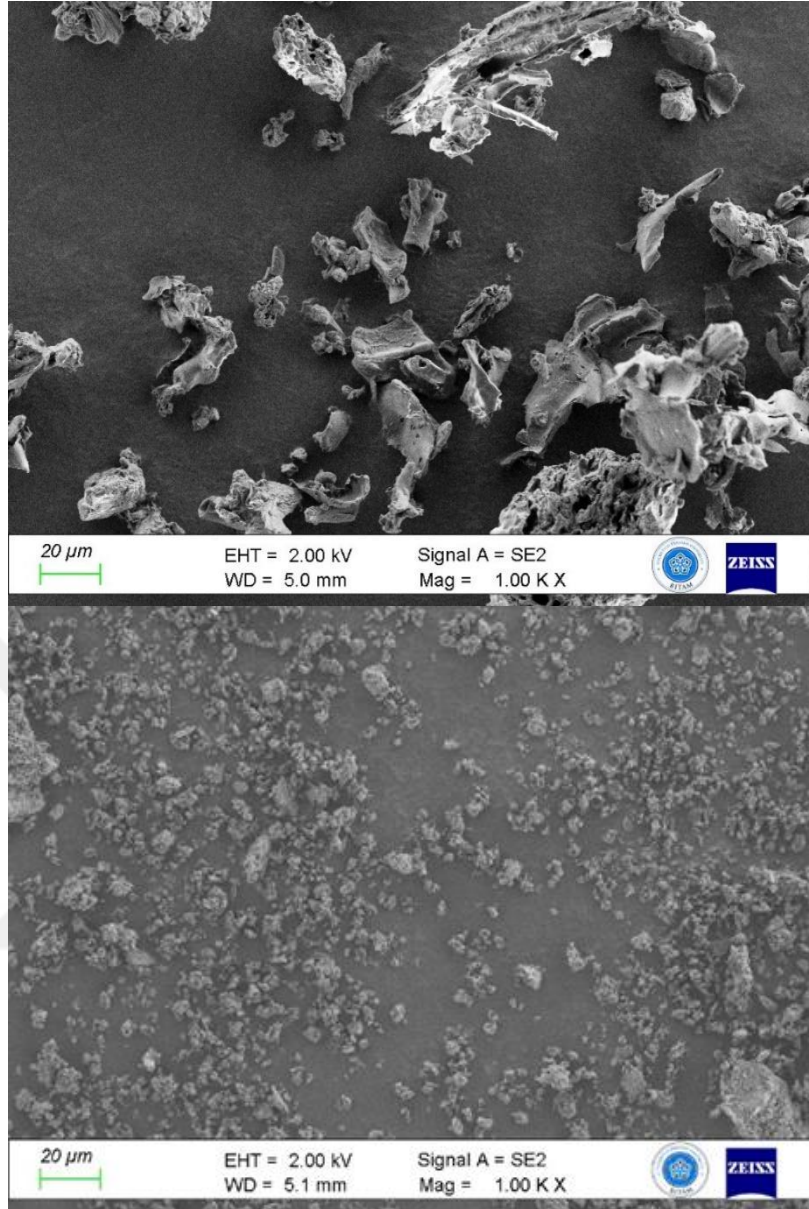
gözlemlenmesine rağmen bazı pik şiddetlerinde farklılıklar gözlemlenmiştir (Şekil 4.1). Bu sonuçlar literatürle benzerlik göstermektedir (Chandi vd., 2024).



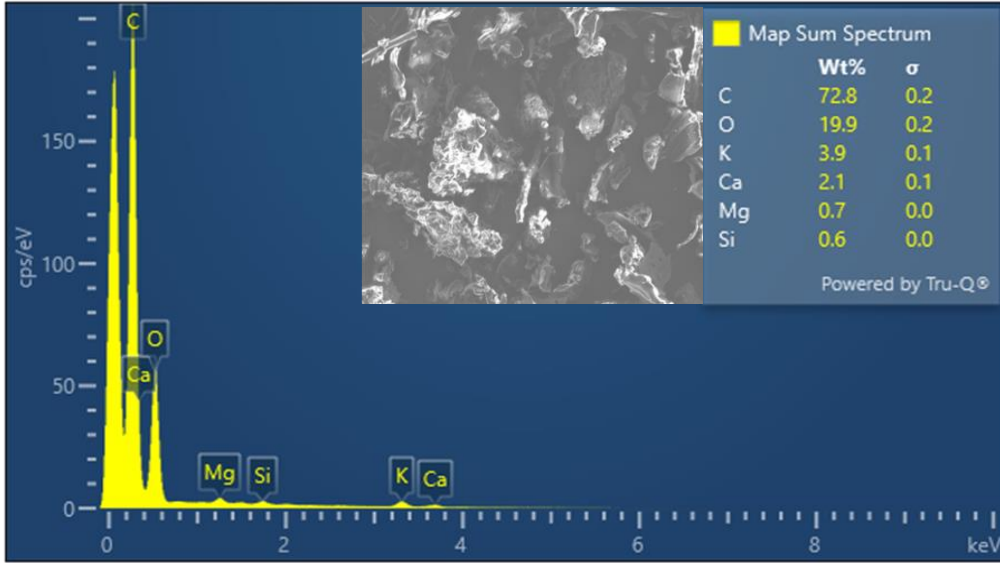
Şekil 4.1 Biyokömür ve nano-biyokömürlerin FTIR görüntüleri

Çalışmada piroliz sonucu elde edilen biyokömür ve bilyalı öğütme yöntemi kullanılarak elde edilen nano-biyokömürlerin FE-SEM görüntüleri Şekil 4.2’de verilmiştir. FE-SEM taraması biyokömürün yüzey taramalarının düzensiz ve makro gözenekli yapısını kanıtlar niteliktedir. Mekanik öğütme yöntemi ile elde edilen nano-biyokömürlerin yüzey taramalarında ise mikro boyuttaki biyokömüre kıyasla büyüklük yönünden daha homojen dağılım görüldüğü ve daha küçük boyutlara indirildiği görülmektedir (Şekil 4.2).

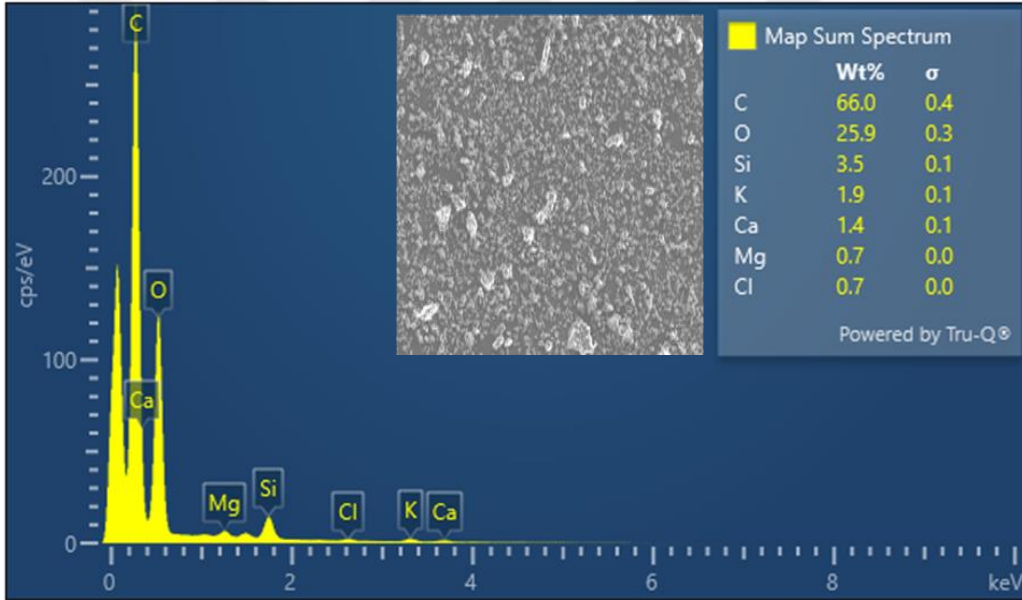
Organik malzemelerin mikroyapısı ve kimyasal bileşimi EDX analizi ile birlikte FE-SEM kullanılarak incelenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu analizi organik malzemelerin dış ve iç yapısını göstermektedir. Biyokömür C ve O açısından zengin EDX analizinde K, Ca, Mg ve Si minerallerinin konsantrasyonları daha düşük gözlemlenmiştir (Şekil 4.3). Ayrıca, EDX spektrumları nano-biyokömürün biyokömüre kıyasla daha düşük C içerdiğini göstermektedir. O ve Si içeriğinin biyokömüre kıyasla daha yüksek olduğu görülürken Cl içeriği de nano-biyokömürde açığa çıkmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.2 Biyokömür ve nano-biyokömürlerin FE-SEM görüntüleri

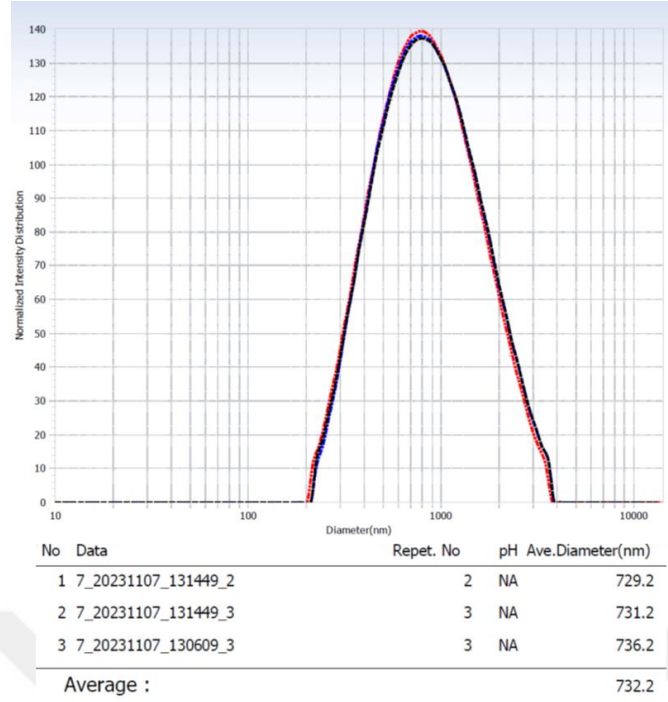


Şekil 4.3 Biyokömür EDX görüntüsü



Şekil 4.4 Nano-biyokömürün EDX görüntüsü

Mekanik öğütmenin partikül boyutu dağılımı üzerindeki etkisine ilişkin detaylı analizimiz Şekil 4.5'te özetlenmiştir. Mekanik öğütme öncesi biyokömür partikül boyut çapı ortalama 0,25mm'dir. 30 dakikalık bilyalı öğütmeden sonra biyokömürün çapı yaklaşık ortalama 732 nm olarak belirlenmiştir. 3 tekrarlı yapılan bu analizde partikül boyut çaplarının birbirine oldukça yakın çıkması dağılımın homojen olduğunu göstermektedir.



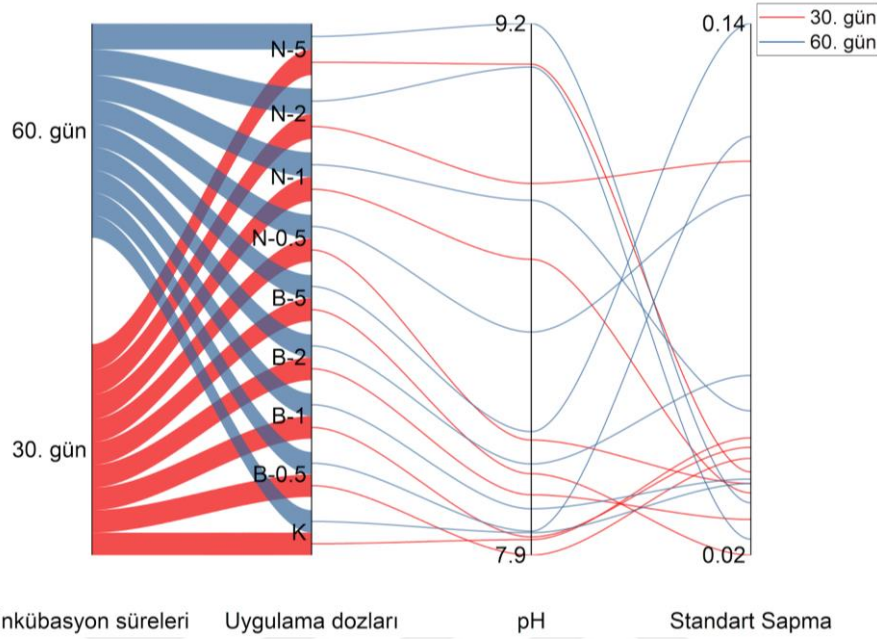
Şekil 4.5 Nano-biyokömürün partikül boyut dağılımı

4.3. Biyokömür ve Nano-Biyokömür Uygulamalarının Toprakların Özelliklerine Olan Etkileri

4.3.1. Toprak pH'ına Olan Etkisi

Topraklara uygulanan biyokömür ve nano-biyokömürün pH üzerine etkisi Şekil 4.6'da görülmektedir. Yapılan uygulamanın ilk 30 günlük inkübasyonu sonucunda kontrole kıyasla pH değerini en fazla arttıran uygulamanın nano-biyokömür uygulamasının %5'lik dozu olduğu görülmektedir. 60 günlük inkübasyon sonucunda ise biyokömür uygulamalarının kontrole kıyasla etkinliklerini kaybettiği görülürken nano-biyokömür uygulamalarının ise %2 ve 5 dozlarında pH değerinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarının toprak pH'ında meydana getirdiği değişimlerin biyokömür ham materyaline ve toprakların tekstür sınıfına bağlı olduğu literatürce bildirilmektedir. Yapılan bir çalışma da asit topraklara yapılan biyokömür uygulamalarında pH seviyesinin bir miktar arttığı ve mahsul verimini olumlu yönde etkilediği gözlemlenmektedir (S. Zhang vd., 2023). Alkalin bir toprak denemesinde 25°C'de 65 günlük bir inkübasyondan sonra, biyokömür uygulamasının toprak pH'ını ve değiştirilebilir katyon miktarını önemli ölçüde ($P < 0,05$) arttırdığı bildirilmiştir (W. Zhao vd., 2020). Bu durum, biyokömürün alkali doğası ve biyokömür yüzeyinde toprak çözeltilisinden H^+ bağlayan negatif yüklü fonksiyonel grupların varlığı sonucu biyokömür uygulamasını takiben pH'ın yükselmesine neden olabileceğini göstermektedir (Cheng vd., 2020). Aynı durum nano-biyokömür uygulamalarında da gözlemlenmiş olmakla birlikte farklı

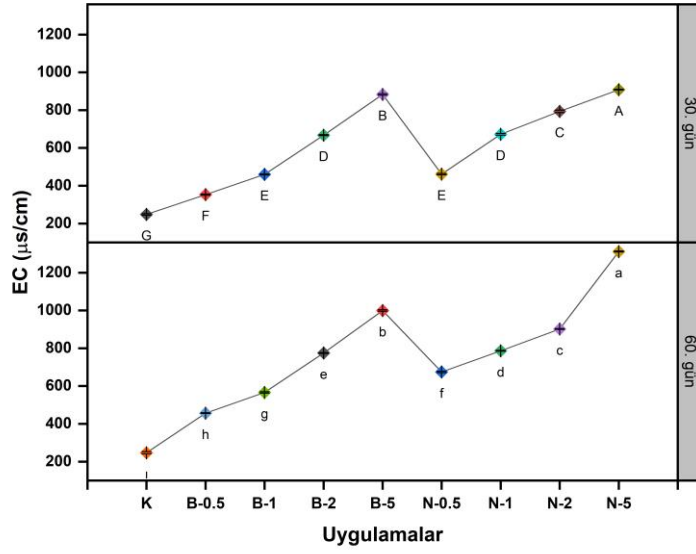
yüzey alanları nedeniyle biyokömüre kıyasla toprak pH'ını arttırmada daha etkili olduğu yapılan bu çalışmada görülmektedir.



Şekil 4.6 Biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarının toprak pH'sına olan etkisi

4.3.2. Toprak Elektriksel İletkenliğine (EC) Olan Etkisi

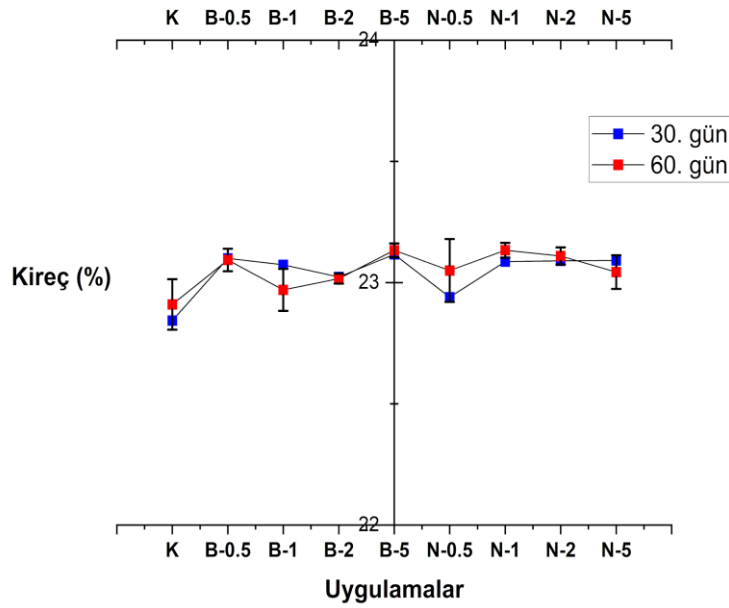
Topraklara uygulanan biyokömür ve nano-biyokömürün EC üzerine etkisi Şekil 4.7'de görülmektedir. Her iki inkübasyon süresinde hem biyokömür uygulamasında hem de nano-biyokömür uygulamasında doza bağımlı bir artış EC'de gözlemlenmiştir. Biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarında her iki inkübasyon periyodunda da en yüksek EC'nin %5 uygulamasında ortaya çıktığı belirlenmiştir. Tüm uygulamaların kontrole göre istatistiksel anlamlı farklılık ($P < 0.05$) gösterdiği tespit edilmiştir. Literatür çalışmaları biyokömür uygulamasının toprak elektriksel iletkenliğinde (EC) ve pH'ında artışa yol açtığı, biyokömürün alkali topraklarda EC dahil olmak üzere toprak özellikleri üzerinde potansiyel bir etkisi olduğunu ortaya koymuştur (Salem vd., 2019). Elde ettiğimiz EC değerindeki artışa benzer olarak, Rashid vd., (2023) yaptıkları bir çalışma da hindistan cevizi biyokömür ve nanobiyokömür uygulamalarının toprak elektrik iletkenliği (EC) değerini önemli ölçüde artırdığını ve nano yapıdaki biyokömürlerin toprak EC'sini doz artışına paralel olarak biyokömüre kıyasla daha fazla etkilediğini tespit etmişlerdir (Rashid vd., 2023).



Şekil 4.7 Biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarının toprak EC'sine olan etkisi

4.3.3. Toprak Kirecine Olan Etkisi

Topraklara uygulanan biyokömür ve nano-biyokömürün kireç üzerine etkisi Şekil 4.8'de görülmektedir. Yapılan uygulamaların toprak kireç düzeyi üzerine 30 günlük ve 60 günlük inkübasyon sonrasında etkisinin kontrole kıyasla istatistiksel anlamlı bir fark sergilemediği ortaya çıkmıştır.

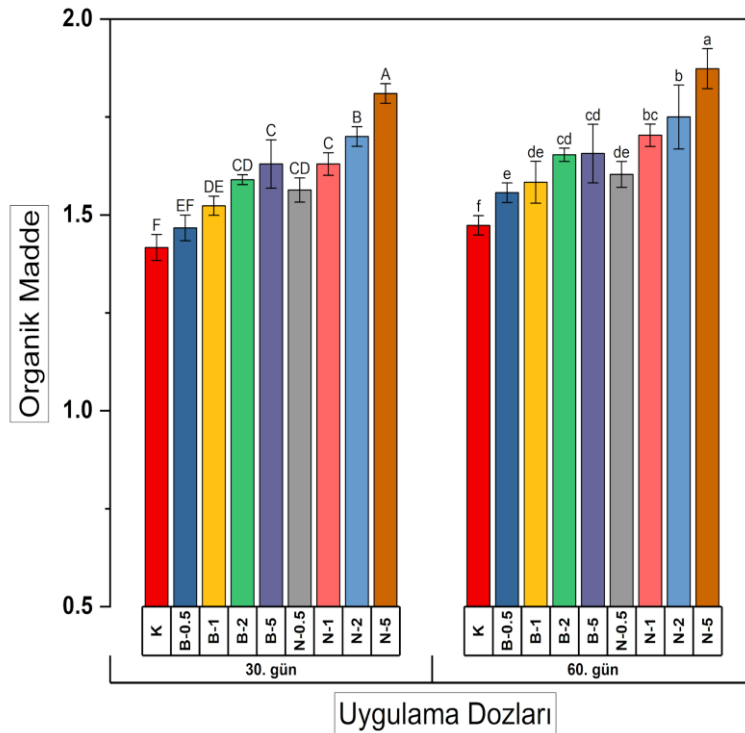


Şekil 4.8 Biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarının toprak kirecine etkisi

4.3.4. Toprak Organik Maddesine Olan Etkisi

Topraklara uygulanan biyokömür ve nano-biyokömürün toprak organik maddesi üzerine olan etkisi Şekil 4.9’da görülmektedir. Her iki inkübasyon periyodunda kontrole kıyasla organik madde içeriğinde uygulama dozuna paralel olarak artış gözlemlenmiştir. En yüksek organik madde içeriğinin nano-biyokömür uygulamasının %5’lik uygulama dozunda görüldüğü belirlenmiştir. Tüm uygulamaların kontrole kıyasla istatistiksel anlamlı farklılık ($P < 0.05$) gösterdiği tespit edilmiştir.

Yapılan bir çalışma da yüksek karbon içeriği nedeniyle biyokömürün toprak verimliliğini ve toprakların organik madde içeriğini arttırdığını vurgulamışlardır (Lorenz & Lal, 2014). Ayrıca biyokömür, ağır metallerin sudan ve topraktan uzaklaştırılmasına yardımcı olarak toprağın organik maddesini artırmadaki rolünü daha da vurgulamaktadır. Bir başka çalışma da biyokömür uygulamasının toprak organik karbon içeriğinde bir artışa yol açtığını ve toprak organik materyali üzerinde olumlu bir etkiye işaret ettiğini gösterilmiştir. Çalışma ayrıca artan biyokömür oranlarıyla toprak pH’ında ve absorpsiyon özelliklerinde iyileşmeler olduğunu da bildirmiştir (Dong vd., 2016).



Şekil 4.9 Biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarının toprak organik maddeye etkisi

4.3.5. Toprak Agregat Stabilitesine Olan Etkisi

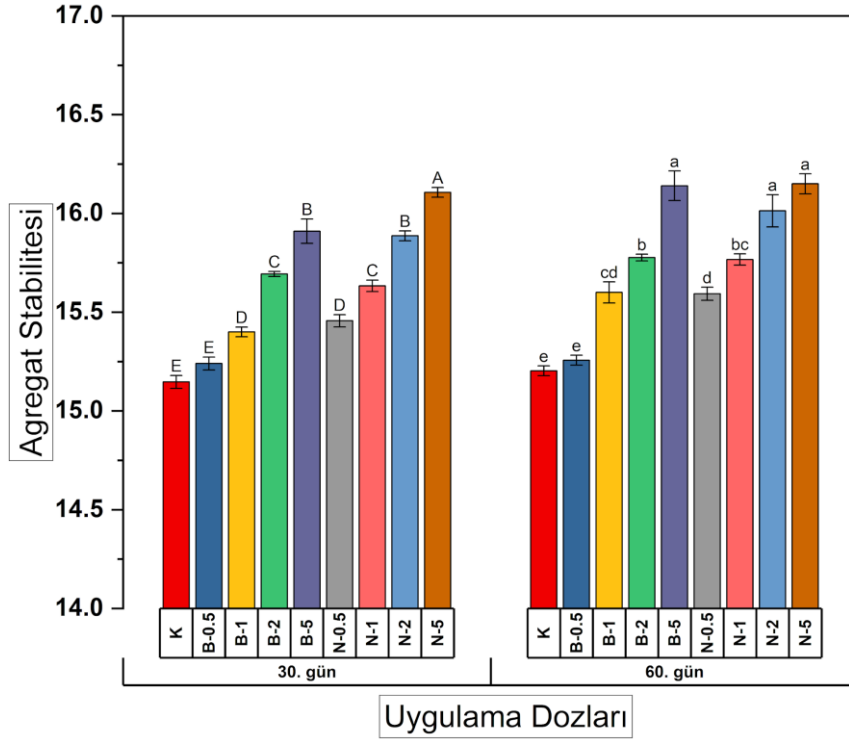
Topraklara uygulanan biyokömür ve nano-biyokömürün toprak agregat stabilitesi üzerine olan etkisi Şekil 4.10'da verilmiştir. Topraklara uygulanan biyokömür ve nano-biyokömür materyallerinin toprak agregat stabilitesi üzerine etkisi detaylı olarak incelendiğinde; 30 günlük inkübasyon periyodu sonunda biyokömür uygulamasının %0.5'lik uygulama dozu hariç diğer bütün uygulama ve dozlarının kontrole kıyasla istatistiksel anlamlı farklılık ($P < 0.05$) oluşturduğu belirlenmiştir. En yüksek etkinin nano-biyokömür uygulamasının %5 uygulama dozunda görüldüğü belirlenirken; %2 nano-biyokömür ve %5 biyokömür uygulamasının agregat stabilitesi üzerine etkisinin kontrole kıyasla benzer olduğu tespit edilmiştir.

60 gün inkübasyon periyodu sonunda alınan toprak örneklerinde yapılan agregat stabilitesi analizleri değerlendirildiğinde ise biyokömür uygulamasının %0.5 uygulama dozu hariç bütün uygulama ve dozlarının kontrole kıyasla istatistiksel olarak anlamlı ($p < 0.05$) olduğu görülmüştür. Biyokömür %5 uygulama dozu ile nano-biyokömür %2 ve %5 uygulama dozlarının kontrole kıyasla istatistiksel olarak benzer etki gösterdiği belirlenmiştir.

Biyokömür uygulaması gözenekliliği, organik maddeyi, katyon değişim kapasitesini ve agregat stabilitesini artırarak toprak özelliklerini geliştirir (Sun & Lu, 2013). Yapılan bazı çalışmalarda, biyokömür uygulamasının makro agregat fraksiyonlarının oranını arttırarak toprak agregatlarının stabilitesini iyileştirdiği, bunun da toprak agregat dağılımını ve stabilitesini olumlu yönde etkilediğini göstermiştir (Sun vd., 2021). Ek olarak, araştırmalar kuraklık stresi koşulları altında biyokömür katkılı toprakta agregat stabilitesinde önemli bir artışa neden olduğunu göstermiştir (Ali vd., 2021). Ayrıca, biyokömür uygulamasının topraklarda suya dayanıklı agregat içeriğini artırdığı gösterilmiştir, bu da toprak agregat stabilitesi üzerinde olumlu bir etkiye işaret etmektedir (Teutscherova vd., 2020).

Yapılan bir başka çalışma da organik maddenin toprağa uygulanması, gözenek dağılımı ve hidrolik iletkenlikle ilişkili olan agregat oluşumunu olumlu yönde etkilediği ve böylece toprakların su tutma ve havalanma kapasitesini artırdığı bildirilmiştir (Soenne vd., 2023). Ayrıca, Nano-biyokömür uygulamasının toprağın suya dayanıklı agregatları üzerindeki etkisine bir çalışma ile bakılmış olup, topraktaki nano-biyokömür içeriğinin artmasıyla, $< 0,25$ mm partikül boyutuna sahip toprak agregatlarının düşüşe geçtiği, > 2 mm partikül boyutuna sahip toprak agregatlarının ise yükseldiği tespit edilmiştir. Partikül boyutu > 2 mm olan toprak agregatlarının içeriği, nano-biyokömür uygulamasıyla en büyük artışa sahip olmuştur ve bu da nano-biyokömürün toprak agregasyonunu iyileştirme yeteneğini net bir şekilde ortaya koymaktadır (Yang vd., 2024). Çeşitli moleküler boyutlara ve kimyasal özelliklere sahip farklı

materyaller (örn. mineraller, organik maddeler) nano-biyokömür yüzeylerine bağlanır ve bu durumda nano biyokömürün yüzey alanını moleküler ölçekte azaltır, böylece toprak agregatlarının oluşumu ve stabilitesi için bağlayıcı maddeler olarak hizmet ederler (Fan vd., 2023).



Şekil 4.10 Biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarının toprak agregat stabilitesine etkisi

4.3.6. Yapılan Uygulamaların Toprak Tarla Kapasitesine, Solma Noktasına ve Faydalı Su Kapasitesine Olan Etkisi

Topraklara uygulanan biyokömür ve nano-biyokömürün toprak tarla kapasitesi, solma noktası ve faydalı su kapasitesi üzerine olan etkinlikleri sırasıyla Şekil 4.11-12-13'te görülmektedir. Biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarının tarla kapasitesine etkisi farklı iki inkübasyon periyodu için yakından incelendiğinde; her iki inkübasyon süresinde biyokömür'ün %5 uygulama dozu ile nano-biyokömür'ün %2 ve %5 uygulama dozlarının kontrole kıyasla benzer etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca tüm uygulamaların kontrole göre istatistiksel anlamlı farklılık ($P < 0.05$) gösterdiği tespit edilmiştir.

Yapılan uygulamaların solma noktası üzerine etkisi incelendiğinde inkübasyon periyodu fark etmeksizin kontrole kıyasla istatistiksel olarak bir anlam ifade etmediği belirlenmiştir.

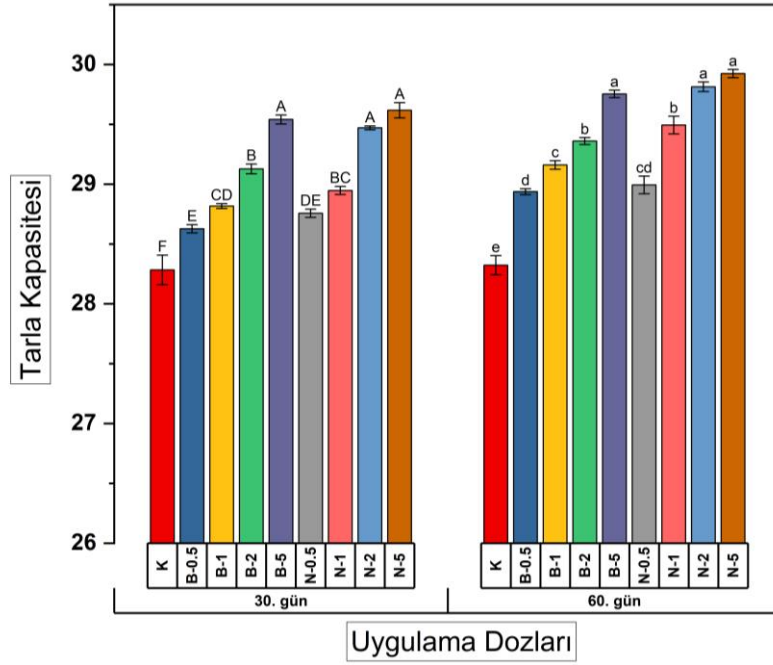
Faydalı su kapasitesi üzerine biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarının her iki inkübasyon periyodundaki etkisi incelendiğinde kontrole kıyasla tüm uygulamaların istatistiksel anlamlı farklılık ($p<0.05$) gösterdiği belirlenmiştir. 30 günlük inkübasyon sonunda biyokömürün %5 uygulama dozu ile nano-biyokömürün %2 ve %5 uygulama dozlarının faydalı su kapasitesi üzerine olan etkilerinin kontrole kıyasla benzer olduğu tespit edilmiştir. 60 günlük inkübasyon sonunda ise nano-biyokömürün %2 ve %5 uygulama dozlarının tüm uygulamalara kıyasla etkin olduğu belirlenmiştir.

Yapılan bir çalışma da belirli koşullar altında toprağın biyokömür ile zenginleştirilmesinin tarla kapasitesini ve bitki tarafından kullanılabilir suyu artırabileceği vurgulamaktadır. Bu, biyokömür uygulamalarının tarla kapasitesi de dahil olmak üzere toprağın su tutma özelliklerini olumlu yönde etkileyebileceğini göstermektedir. Yu vd., (2021) tarafından yapılan bir çalışma da biyokömür uygulamasının topraklarda su depolanması için gerekli olan orta ve büyük agregatlarda artışa yol açtığını göstermiştir (Yu vd., 2021). Benzer şekilde, Ulyett vd., (2013) yaptıkları bir çalışma da topraklara biyokömür ilavesinin, kurak dönemlerde bitkinin nem stresini hafifletebilen ve böylece bitki verimliliğini olumlu yönde etkileyen gelişmiş su tutma kapasitesi ile sonuçlandığını belirtmiştir (Ulyett vd., 2014). Ayrıca, bir başka çalışma biyokömürün toprağın su tutmasını artırmadaki etkinliğinin toprağın partikül boyutu dağılımından ve biyokömürün bireysel fizikokimyasal özelliklerinden kaynaklandığını vurgulamıştır (Wang vd., 2014)

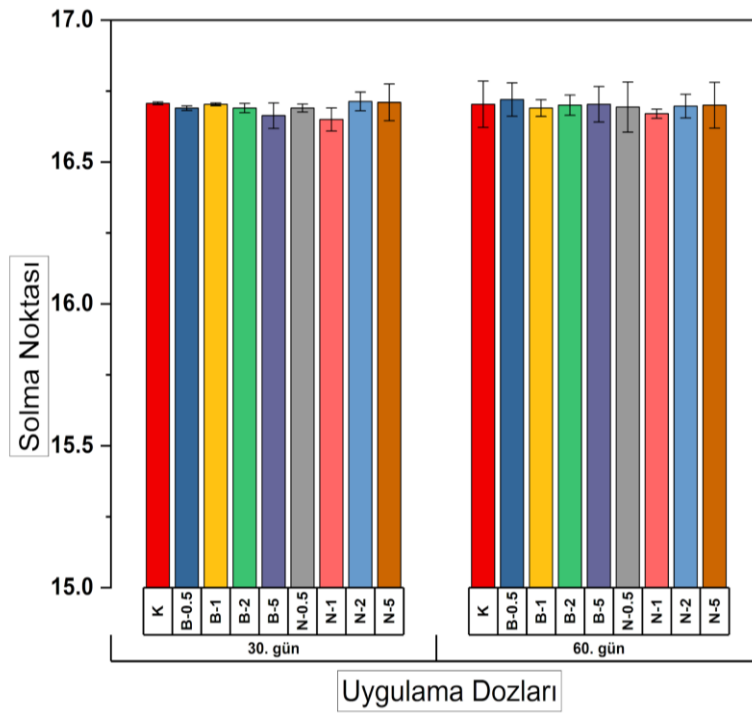
Rabbi vd., (2021) tarafından yapılan bir çalışma da ise bir saksı deneyi gerçekleştirmiş ve hektar başına 50 ila 100 ton biyokömür uygulamasının toprağın tarla kapasitesini artırdığını bulmuşlardır. Bu durum, biyokömür uygulamasının toprağın tarla kapasitesinde su tutma kabiliyetinde bir artışa yol açabileceğini göstermektedir. Nanobiyokömür uygulamasının, yüksek kation değişim kapasitesi ve su tutma kapasitesi nedeniyle besin kullanılabilirliğini ve gübre kullanım verimliliğini artırabileceğini bu sayede potansiyel olarak toprak tarla kapasitesini olumlu yönde etkileyebileceğini öne sürmektedir (Rabbi vd., 2021). Bu değişkenlik, biyokömürün genel olarak su tutmayı artırırken, solma noktası üzerindeki etkisinin farklı toprak türlerinde aynı olmayabileceğini göstermektedir.

Ayrıca, tarla kapasitesi ile solma noktası arasındaki fark olarak tanımlanan faydalı su kapasitesi biyokömürden olumlu etkilenmektedir. Örneğin, Esmaelnejad vd., (2016), biyokömürün kumlu tınlı topraklara dahil edilmesinin fiziksel ve hidrolojik özelliklerini önemli ölçüde geliştirdiğini ve bunun da su tutma kapasitesini artırdığını bildirmiştir (Esmaelnejad vd., 2016). Bu durum, biyokömür değişikliklerinin kumlu toprakların su tutma kapasitesini

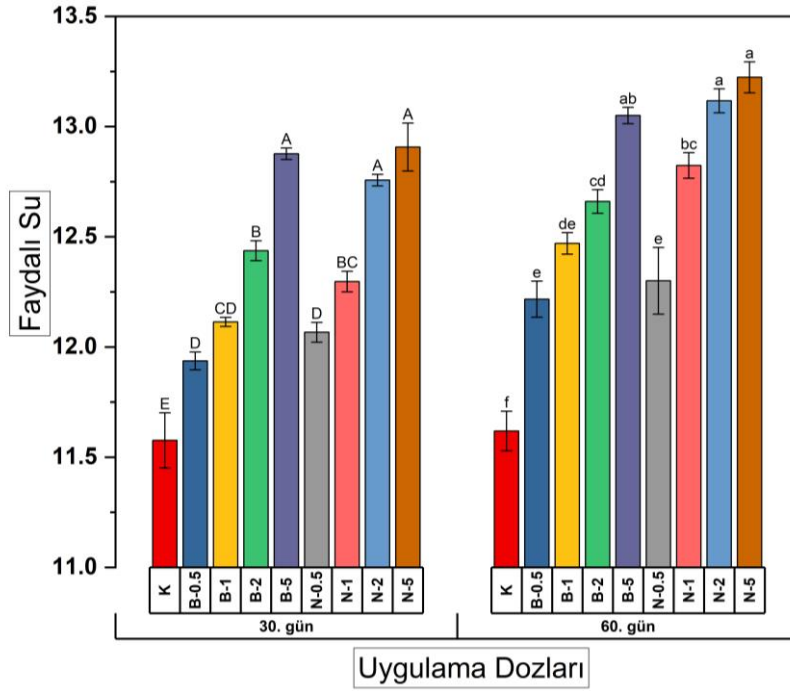
artırdığını ve böylece bitkisel üretim için genel faydalarını geliştirdiğini gözlemleyen Basso vd., (2012) yaptıkları çalışma ile desteklenmektedir (Basso vd., 2013).



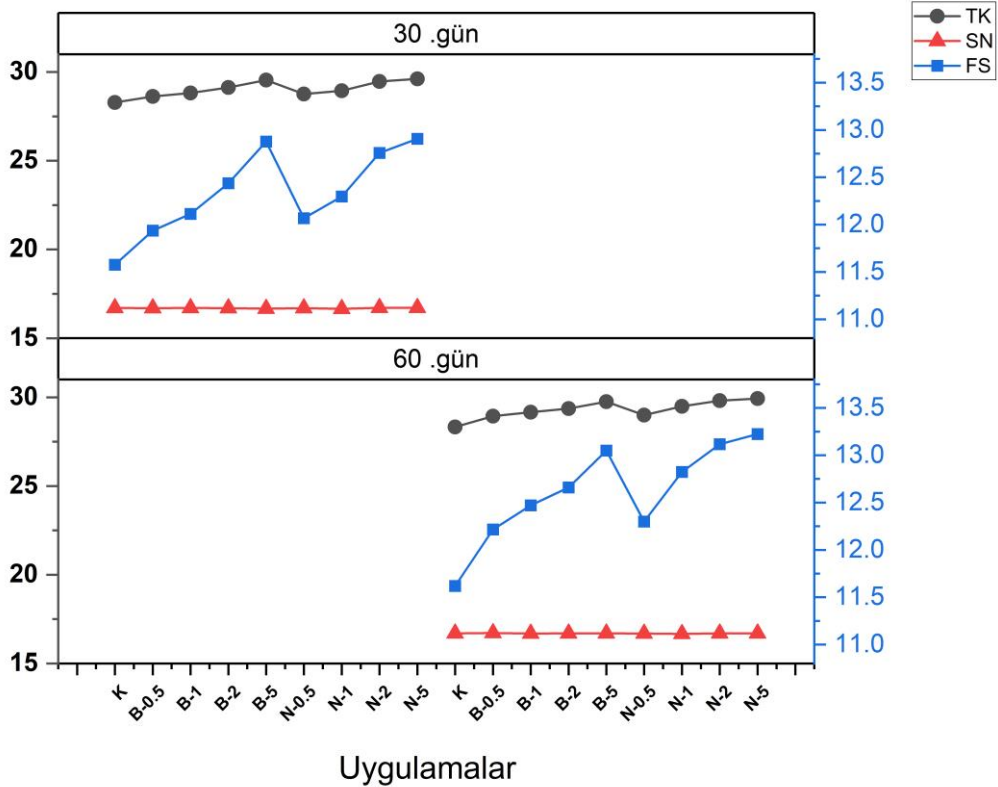
Şekil 4.11 Biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarının toprak tarla kapasitesine etkisi



Şekil 4.12 Biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarının toprak solma noktasına etkisi



Şekil 4.13 Biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarının toprak faydalı su kapasitesine etkisi

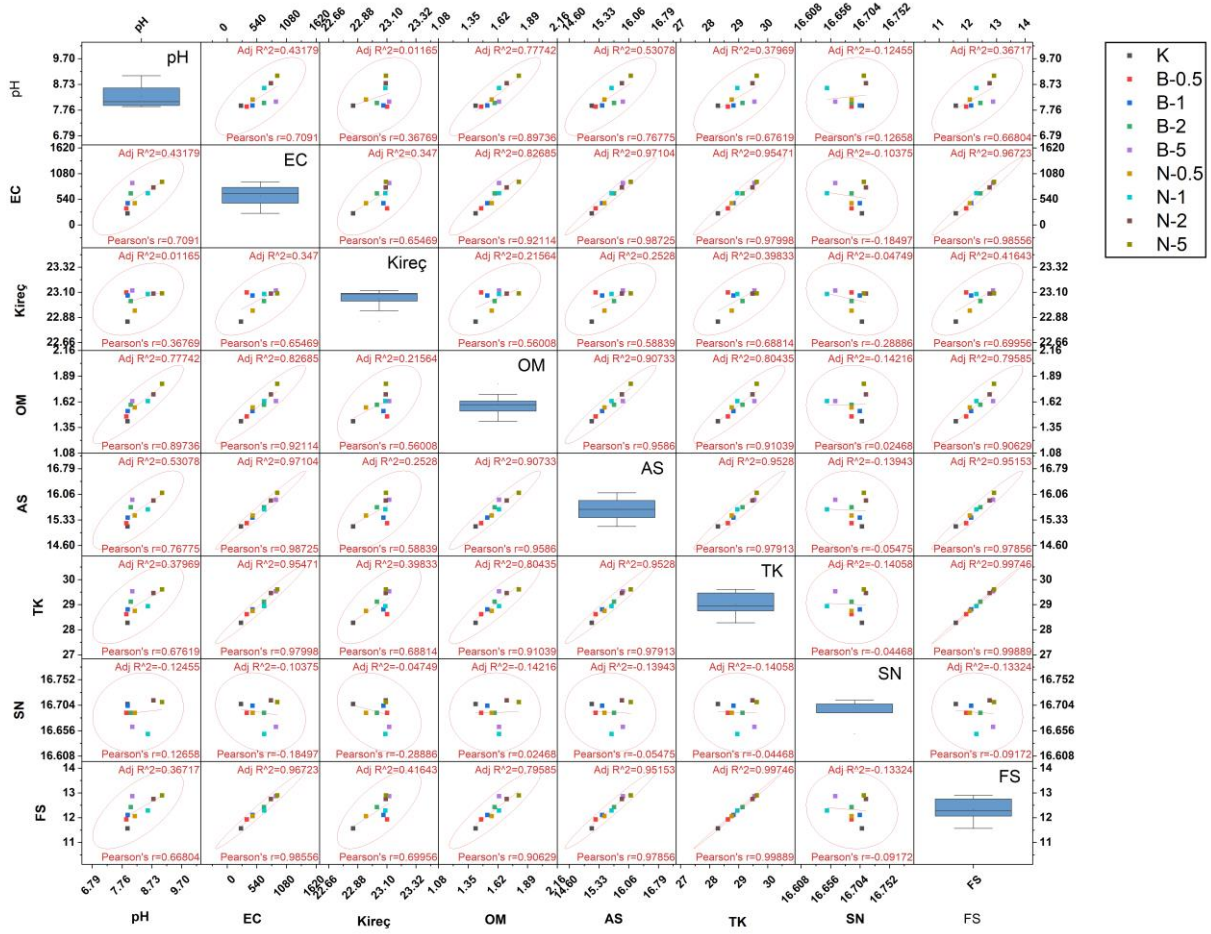


Şekil 4.14 Biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarının toprak TK-SN ve FS kapasitesine olan etkisinin bir arada gösterimi

4.3.7. Yapılan Uygulamaların Toprak Özelliklerine Olan Etkinliklerinin Korelasyonu

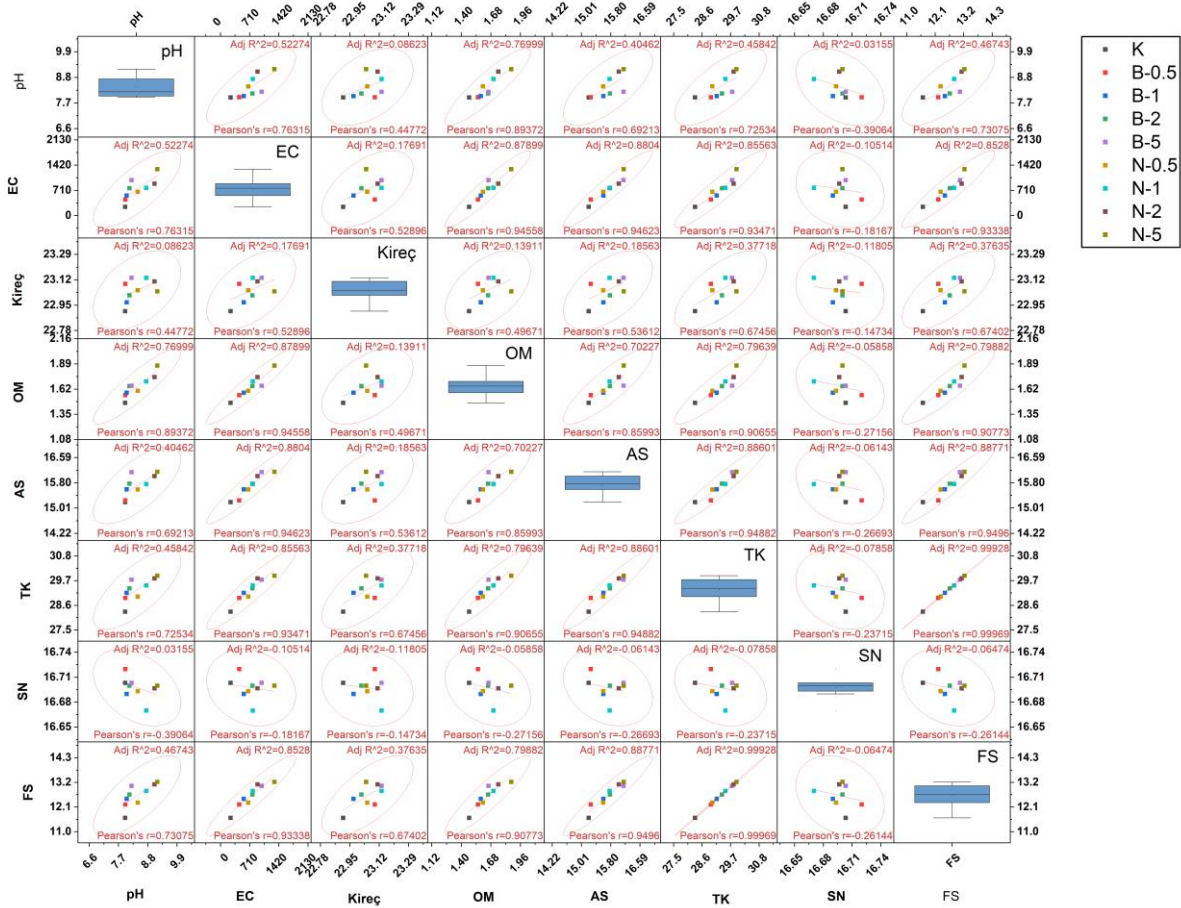
Korelasyon temelde iki değişkenin birlikte değişme derecesini ölçen istatistiksel bir ölçüdür (Arıcı, 2004). Pearson Momentler Çarpımı Korelasyon Katsayısı ağırlıklı olarak iki sürekli ve normal dağılımlı değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi değerlendirmek için kullanılır. Bu yöntem, değişkenler arasındaki ilişkileri anlamının araştırma ve analiz için çok önemli olduğu fen ve sosyal bilimler gibi çeşitli alanlarda özellikle kullanımı yaygındır (Allison vd., 2022; Schober vd., 2018).

Korelasyon katsayısının yorumlanması iki farklı aşamada gerçekleşir. İlk olarak, ilişkinin yönünü belirlemek için katsayının işareti analiz edilir. Pozitif yönlü korelasyon, bir değişken arttıkça diğerinin de artma eğiliminde olduğunu gösterirken, negatif yönlü korelasyon ise bir değişken arttıkça diğerinin azaldığını göstermektedir (Alsaqr, 2021; Ho, 2012). Bunu takiben, ilişkinin gücünü (kuvvetini) yansıtan korelasyon katsayısının büyüklüğü incelenir. Korelasyon katsayısının değerleri “-1” ile “+1” arasında değişir; “+1” katsayısı kuvvetli olumlu ilişkinin bulunduğunu, “-1” katsayısı ise kuvvetli olumsuz ilişkinin bulunduğunu göstermektedir. “0” değeri değişkenler arasında doğrusal bir ilişki olmadığını göstermektedir (Runge, 2013). Korelasyon katsayılarının yorumlanması nüanslıdır; örneğin +1 veya -1'e yakın bir korelasyon katsayısı güçlü bir ilişkiye işaret ederken, 0'a yakın değerler zayıf bir ilişkiye işaret etmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda toprak özelliklerinin 30 günlük inkübasyon sonucunda meydana getirdiği değişimlerin korelasyon grafiği şekil 4.15'te yer almaktadır. Korelasyon grafiği incelendiğinde tarla kapasitesi ve faydalı su kapasitesi arasında kuvvetli olumlu ilişkinin bulunduğu görülmektedir (Pearson's $r=0.99889$). Solma noktası ve kireç arasında ise kuvvetli olumsuz bir ilişkinin görüldüğü tespit edilmiştir (Pearson's $r=-0,28886$). Organik madde ve solma noktası arasında ise en az doğrusal ilişkinin olduğu görülmektedir (Pearson's $r=0,02468$).



Şekil 4.15 Toprak uygulamalarının 30 gün inkübasyon sonrası toprak özellikleri arasındaki korelasyon grafiği

Topraklara yapılan biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarının 60 günlük inkübasyon sonrası toprak özelliklerinde meydana getirdiği değişimlerin korelasyon grafiği şekil 4.16'da yer almaktadır. Korelasyon grafiği incelendiğinde tarla kapasitesi ve faydalı su kapasitesi arasında 30 günlük inkübasyona benzer şekilde kuvvetli olumlu ilişkinin bulunduğu görülmektedir (Pearson's $r=0.99969$). Solma noktası ile pH arasında kuvvetli olumsuz ilişkinin görüldüğü tespit edilmiştir (Pearson's $r=-0,39064$). Kireç ve solma noktası arasında ise zayıf bir ilişki olduğu olduğu görülmektedir (Pearson's $r=-0,14734$).



Şekil 4.16 Toprak uygulamalarının 60 gün inkübasyon sonrası toprak özellikleri arasındaki korelasyon grafiği

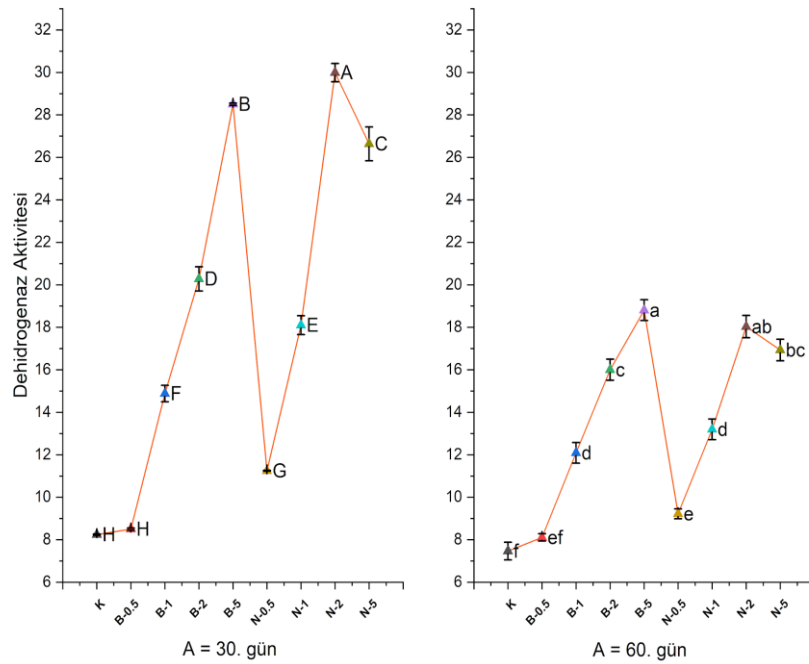
4.3.8. Toprak Dehidrogenaz Enzim Aktivitesine Olan Etkisi

Topraklara uygulanan biyokömür ve nano-biyokömürün topraktaki dehidrogenaz enzim aktivitesi üzerine olan etkinliği Şekil 4.17'de görülmektedir. Yapılan uygulamaların ilk 30 günlük inkübasyon sonucunu inceleyecek olursak kontrole kıyasla toprak dehidrogenaz enzim aktivitesi hem biyokömür için hem de nano-biyokömür %0.5 uygulama dozlarında anlamlı bulunmamıştır. Topraklara biyokömür uygulaması %1 ve üzeri uygulamalarda kontrole kıyasla doz artışına paralel olarak dehidrogenaz enzim aktivitesinde artışa neden olduğu görülmektedir. Nano-biyokömür uygulamasında ise en yüksek dehidrogenaz aktivitesi %2 uygulama dozunda görülmüş olup %5 uygulama dozunun etkinliğinin %2'den anlamlı bir fark sunmadığı görülmektedir. %0.5 biyokömür uygulaması hariç tüm uygulamaların kontrole göre istatistiksel anlamlı farklılık ($P < 0.05$) gösterdiği tespit edilmiştir.

60 günlük inkübasyon sonucunda ise biyokömür uygulamasının doz artışına paralel olarak dehidrogenaz enzim aktivitesi üzerinde olumlu bir etki yaptığı ve kontrole kıyasla tüm uygulama dozlarının istatistiksel anlamlı farklılık ($P < 0.05$) gösterdiği tespit edilmiştir. Nano-

biyokömür uygulamasının %2'lik doz uygulaması ise kontrole kıyasla en yüksek etkinliği göstermiştir. %5 uygulama dozunun ise dehidrojenaz enzim aktivitesi üzerine etkinliğinin anlamlı bir şekilde düştüğü görülmektedir. %5 biyokömür uygulama dozunun dehidrojenaz enzim aktivitesi üzerindeki etkisi nano-biyokömürün %2'lik uygulama dozuna paralel olduğu görülmektedir.

Biyokömür ve nano-biyokömür uygulamasının topraktaki enzim aktivitesini, özellikle de topraktaki genel mikrobiyal aktivitenin bir göstergesi olan dehidrojenaz aktivitesini önemli ölçüde etkilediği gösterilmiştir. Birçok çalışma, toprağa biyokömür eklenmesinin dehidrojenaz aktivitesini artırabileceğini bildirmiştir. Örneğin, Siles vd., (2022), kuru zeytin kalıntısından elde edilen %5 biyokömür ile toprak ıslahının, %2 uygulama oranına kıyasla dehidrojenaz aktivitesini önemli ölçüde artırdığını bulmuştur (Siles vd., 2022). Bu, toprak enzim aktivitelerinin biyokömür uygulamasına enzim türüne, biyokömüre, uygulama oranına ve toprak özelliklerine bağlı olarak çeşitli şekillerde yanıt verdiğini gösteren diğer çalışmalarla uyumludur.



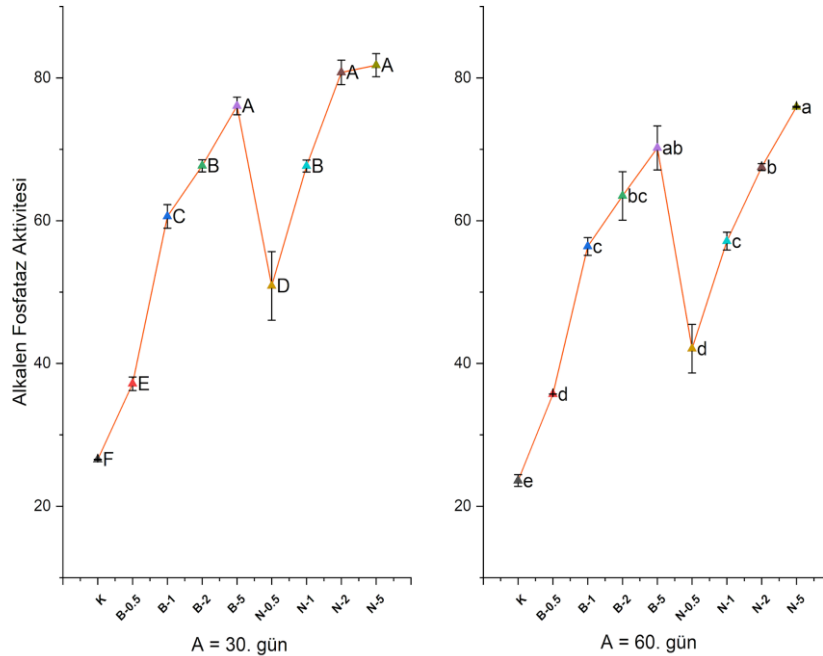
Şekil 4.17 Biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarının toprak dehidrojenaz enzim aktivitesine etkisi

Biyokömürün dehidrojenaz aktivitesini artırabileceği mekanizmalar çok yönlüdür. Biyokömür, toprağı belirli besin maddeleri ve substratlarla zenginleştirebilir, bu da mikrobiyal aktiviteyi ve enzim üretimini teşvik edebilir (M. Zhang vd., 2024) Ayrıca, biyokömür pH, su

tutma kapasitesi ve katyon değişim kapasitesi gibi toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirerek mikrobiyal büyüme ve enzim aktivitesi için daha uygun koşullar yaratabilir (Cordovil vd., 2019).

4.3.9. Toprak Alkalen Fosfataz Enzim Aktivitesine Olan Etkisi

Topraklara uygulanan biyokömür ve nano-biyokömürün topraktaki alkalen fosfataz enzim aktivitesi üzerine olan etkinliği Şekil 4.18’de görölmektedir. Yapılan uygulamaların ilk 30 günlük inkübasyon sonucunu inceleyecek olursak kontrole kıyasla toprak alkalen fosfataz enzim aktivitesi biyokömür için uygulama dozuna paralel olarak artış görölmektedir. Nano-biyokömür uygulamasında ise %2 ve üstü uygulama dozlarının kontrole kıyasla benzer anlam ifade ettiği görölmektedir. Biyokömüre kıyasla nano-biyokömür uygulamalarının alkalen fosfataz enzim aktivitesinin artışında daha etkin olduğu ve ayrıca biyokömürün en yüksek uygulama dozuna karşılık %2 uygulama dozu ile nano-biyokömürün daha etkin olduğu görölmektedir. Tüm uygulamaların kontrole göre istatistiksel anlamlı farklılık ($P < 0.05$) gösterdiği tespit edilmiştir. 60 günlük inkübasyon sonucunda ise hem biyokömür hem de nano-biyokömür uygulamasının kontrole kıyasla doz artışına paralel olarak alkalen fosfataz enzim aktivitesi üzerine istatistiksel anlamlı farklılık ($P < 0.05$) gösterdiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.18 Biyokömür ve nano-biyokömür uygulamalarının toprak alkalen fosfataz enzim aktivitesine etkisi

Biyokömür ve nano-biyokömürün topraklara uygulanmasının, topraklarda fosfor döngüsü ve kullanılabilirliği için kritik bir enzim olan alkalın fosfataz aktivitesini etkilediği gösterilmiştir. Alkali fosfataz aktivitesi, fosforun bitki büyümesi için sınırlayıcı bir besin maddesi olduğu topraklarda özellikle önemlidir ve aktivitesi toprak pH'ı, organik madde içeriği ve mikrobiyal topluluk dinamikleri dahil olmak üzere çeşitli faktörlerden etkilenebilir. Araştırmalar, biyokömürün belirli bağlamlarda alkalın fosfataz aktivitesini artırabileceğini göstermektedir. Örneğin, bir çalışma da biyokömür uygulamasının kadmiyumla kirlenmiş tarım arazisi toprağında alkalın fosfataz, üreaz ve katalaz aktivitelerini artırdığını bildirerek, biyokömürün stresli ortamlarda bile enzim aktivitesini iyileştirebileceğini öne (Zhu vd., 2021). Benzer şekilde bir başka çalışma da biyokömür değişikliklerinin alkalın fosfataz aktivitesinde artışa yol açabileceğini, ancak etkilerin biyokömürün türüne ve toprak substratlarıyla etkileşimlerine bağlı olarak değişken olduğunu belirtmiştir (Case vd., 2014). Bu değişkenlik, toprak enzim aktiviteleri üzerindeki etkilerini optimize etmek için biyokömür türlerinin dikkatli bir şekilde seçilmesi gerektiğini vurguladığı için çok önemlidir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Mısır artıklarından piroliz yöntemi ile biyokömür üretimi, bilyeli öğütme yöntemi ile nano-biyokömür üretimi ve karakterizasyonlarının gerçekleştirildiği ayrıca üretilen bu materyallerin belirlenen dozlarda topraklara uygulanması sonucunda toprak özelliklerinde ve enzim aktivitelerinde meydana getirdiği değişimler bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Yapılan uygulamaların toprak özelliklerinde anlamlı birçok değişikliğe neden olduğu görülmektedir. Biyokömür uygulamalarının toprak özelliklerinde başarılı sonuçlar vermesi literatürde bilinen bir gerçek olmasının yanı sıra bu çalışma ile de desteklenmiştir. Nano-biyokömür uygulamalarının toprak özellikleri üzerine etkisi konulu çalışmaların henüz yeterli seviyeye ulaşmaması bu çalışmanın önemini göstermektedir. Yapılan uygulamalardan nano-biyokömürün, biyokömüre kıyasla daha etkin olduğu yapılan bu çalışma ile ortaya konmaktadır. Bunun nedeni partikül çapının azalması ve yüzey alan miktarının artması olarak özetle değerlendirilebilir.

Biyokömür toprak yapısını iyileştirir, gözenekliliği artırır ve su tutma özelliğini geliştirir, bu da toplu olarak mikrobiyal aktivite için daha elverişli bir ortama katkıda bulunur. Bu mikrobiyal çoğalma, topraklarda fosfor döngüsü ve kullanılabilirliğinde hayati bir rol oynayan alkalın fosfataz da dahil olmak üzere enzim aktivitelerinin artırılması için çok önemlidir. Ayrıca, birçok biyokömürün alkali yapısı, enzim aktivitesini etkileyen kritik bir faktör olan toprak pH'ını değiştirebilir. Dolayısıyla biyokömürün eklenmesi, alkalın fosfataz aktivitesini destekleyen koşullar yaratarak toprağın bitki alımı için fosforu mobilize etme kabiliyetini artırabilir.

Enzim aktivitesini iyileştirmenin yanı sıra, biyokömür uygulaması, mikrobiyal aktiviteyi ve enzim üretimini daha da destekleyen artan toprak organik karbon içeriği ile ilişkilendirilmiştir. Enzim aktivitesindeki bu artış, organik maddenin parçalanmasını ve temel besin maddelerinin döngüsünü kolaylaştırdığı için toprak sağlığını ve verimliliğini korumak için kritik öneme sahiptir.

Bununla birlikte, biyokömürün enzim aktivitesi üzerindeki etkileri karmaşık olabilir ve biyokömürün türü, uygulama oranı ve belirli toprak koşulları dahil olmak üzere çeşitli faktörlerden etkilenebilir. Aşırı biyokömür uygulaması, substrat doygunluğu veya mikrobiyal topluluk dinamiklerindeki değişiklikler nedeniyle enzim aktivitesini engelleyebilir. Sonuç olarak, biyokömür ve nano-biyokömür uygulaması toprağın tarla kapasitesini önemli ölçüde artırmakta ve faydalı su kapasitesini artırmaktadır. Ayrıca topraktaki enzim aktivitelerini,

özellikle de alkalın fosfatı geliştirmektedir. Bu gelişmeler, toprak yapısındaki fiziksel değişikliklere, artan agregat oluşumuna ve nano-biyokömürün daha iyi su tutmayı kolaylaştıran benzersiz özelliklerine bağlanmaktadır. Gelecekteki araştırmalar, sürdürülebilir tarım uygulamalarına yönelik uygulamayı optimize edebilmek amacıyla biyokömür ve nano-biyokömür materyalleri ile çeşitli toprak türleri arasındaki etkileşimleri keşfetmeye devam etmelidir.

5.2. Öneriler

Mısır artıklarından elde edilen biyokömür ve nano-biyokömürün toprak özellikleri ve enzim aktiviteleri üzerindeki etkilerine ilişkin bulgulara dayanarak, gelecekteki araştırmalar için çeşitli yollar önerilebilir. Bu öneriler, biyokömürün toprak sağlığındaki rolü ve sürdürülebilir tarımdaki potansiyel uygulamaları hakkındaki anlayışımızı derinleştirmeyi amaçlamaktadır.

Güncel birçok çalışma biyokömür ve nano-biyokömür uygulamasının kısa vadeli etkilerine odaklanmış olsa da toprak sağlığı, mikrobiyal topluluklar ve enzim aktiviteleri üzerindeki kalıcı etkilerini değerlendirmek için uzun vadeli tarla denemeleri gereklidir. Uzun vadeli çalışmalar, biyokömür ve nano-biyokömür değişikliklerinin toprak organik karbon stabilizasyonunu ve besin döngüsünü zaman içinde nasıl etkilediğini açıklığa kavuştırmaya yardımcı olacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Abid, N., Khan, A. M., Shujait, S., Chaudhary, K., Ikram, M., Imran, M., Haider, J., Khan, M., Khan, Q., & Maqbool, M. (2021). Synthesis of nanomaterials using various top-down and bottom-up approaches, influencing factors, advantages, and disadvantages: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 300, 102597. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102597>
- Agegehu, G., Srivastava, A., & Bird, M. I. (2017). The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review. *Applied Soil Ecology*, 119, 156–170. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.008>
- Ali, L., Manzoor, N., Li, X., Naveed, M., Nadeem, S. M., Waqas, M. R., Khalid, M., Abbas, A., Ahmed, T., Li, B., & Yan, J. (2021). Impact of Corn Cob-Derived Biochar in Altering Soil Quality, Biochemical Status and Improving Maize Growth under Drought Stress. *Agronomy*, 11(11), 2300. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112300>
- Allison, J. S., Santana, L., & (Jaco) Visagie, I. J. H. (2022). A primer on simple measures of association taught at undergraduate level. *Teaching Statistics*, 44(3), 96-103. <https://doi.org/10.1111/test.12307>
- Alsaqr, A. M. (2021). Remarks on the use of Pearson's and Spearman's correlation coefficients in assessing relationships in ophthalmic data. *African Vision and Eye Health*, 80(1). <https://doi.org/10.4102/aveh.v80i1.612>
- Ameloot, N., Graber, E. R., Verheijen, F. G. A., & 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>
- Amoakwah, E., Frimpong, K. A., & Arthur, E. (2017). Corn Cob Biochar Improves Aggregate Characteristics of a Tropical Sandy Loam. *Soil Science Society of America Journal*, 81(5), 1054-1063. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.04.0112>
- Arıcı, H. (2004). İstatistik: Yöntemler ve uygulama. . Hacettepe Üniversitesi Basımevi.
- Ashokkumar, V., Flora, G., Venkatkarthick, R., SenthilKannan, K., Kuppam, C., Mary Stephy, G., Kamyab, H., Chen, W.-H., Thomas, J., & Ngamcharussrivichai, C. (2022). Advanced technologies on the sustainable approaches for conversion of organic waste to valuable bioproducts: Emerging circular bioeconomy perspective. *Fuel*, 324, 124313. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124313>
- Azzi, E. S., Karlton, E., & Sundberg, C. (2022). Life cycle assessment of urban uses of biochar and case study in Uppsala, Sweden. *Biochar*, 4(1), 18. [https://doi.org/10.1007/s42773-022-00144-](https://doi.org/10.1007/s42773-022-00144-3)

- Baragaño, D., R. Gallego, J. L., & Forján, R. (2021). Short-term experiment for the in situ stabilization of a polluted soil using mining and biomass waste. *Journal of Environmental Management*, 296, 113179. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113179>
- Basso, A. S., Miguez, F. E., Laird, D. A., Horton, R., & 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>
- Bhandari, G., Gangola, S., Dhasmana, A., Rajput, V., Gupta, S., Malik, S., & Slama, P. (2023). Nano-biochar: recent progress, challenges, and opportunities for sustainable environmental remediation. *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1214870>
- Bilias, F., Sewu, D. D., Woo, S. H., Anastopoulos, I., Verheijen, F., Lehmann, J., Teixeira, W. G., Gasparatos, D., Draper, K., & Kalderis, D. (2024). Glossary of terms used in biochar research (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 96(11), 1541-1572. <https://doi.org/10.1515/pac-2021-0106>
- Binh, Q. A., Nguyen, V.-H., & Kajitvichyanukul, P. (2022). Influence of pyrolysis conditions of modified corn cob bio-waste sorbents on adsorption mechanism of atrazine in contaminated water. *Environmental Technology & Innovation*, 26, 102381. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102381>
- Blanco-Canqui, H. (2017). Biochar and Soil Physical Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 81(4), 687-711. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017>
- Bonanomi, G., Ippolito, F., Cesarano, G., Nanni, B., Lombardi, N., Rita, A., Saracino, A., & Scala, F. (2017). Biochar As Plant Growth Promoter: Better Off Alone or Mixed with Organic Amendments? *Frontiers in Plant Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01570>
- Boonupara, T., Udomkun, P., Khan, E., & Kajitvichyanukul, P. (2023). Airborne Pesticides from Agricultural Practices: A Critical Review of Pathways, Influencing Factors, and Human Health Implications. *Toxics*, 11(10), 858. <https://doi.org/10.3390/toxics11100858>
- Case, S. D. C., McNamara, N. P., Reay, D. S., & Whitaker, J. (2014). Can biochar reduce soil greenhouse gas emissions from a *Miscanthus* bioenergy crop? *GCB Bioenergy*, 6(1), 76-89. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12052>
- Castellini, M., Giglio, L., Niedda, M., Palumbo, A. D., & Ventrella, D. (2015). Impact of biochar addition on the physical and hydraulic properties of a clay soil. *Soil and Tillage Research*, 154, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.06.016>
- Chandi, K., Udomkun, P., Boonupara, T., & Kaewlom, P. (2024). Enhancing soil health, microbial count, and hydrophilic methomyl and hydrophobic lambda-cyhalothrin remediation with

- biochar and nano-biochar. *Scientific Reports*, 14(1), 19551. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70515-2>
- Chaubey, A. K., Pratap, T., Preetiva, B., Patel, M., Singait, J. S., Pittman, C. U., & Mohan, D. (2024a). Definitive Review of Nanobiochar. *ACS Omega*. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07804>
- Chausali, N., Saxena, J., & Prasad, R. (2021). Nanobiochar and biochar based nanocomposites: Advances and applications. *Journal of Agriculture and Food Research*, 5, 100191. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100191>
- Cheng, S., Chen, T., Xu, W., Huang, J., Jiang, S., & Yan, B. (2020). Application Research of Biochar for the Remediation of Soil Heavy Metals Contamination: A Review. *Molecules*, 25(14), 3167. <https://doi.org/10.3390/molecules25143167>
- Chun, Y., Lee, S. K., Yoo, H. Y., & Kim, S. W. (2021). Recent advancements in biochar production according to feedstock classification, pyrolysis conditions, and applications: A review. *BioResources*, 16(3), 6512-6547. <https://doi.org/10.15376/biores.16.3.Chun>
- Cordovil, C. M. d S., Pinto, R., Silva, B., Sas-Paszt, L., Sakrabani, R., & Skiba, U. M. (2019). The Impact of Woody Biochar on Microbial Processes in Conventionally and Organically Managed Arable soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(12), 1387-1402. <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1614609>
- D. Phadtare, P., & R. Kalbande, S. (2022). Biochar Production Technologies from Agricultural Waste, Its Utilization in Agriculture and Current Global Biochar Market: A Comprehensive Review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 1010-1031. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2022/v12i1131078>
- D Phadtare, P., & R Kalbande, S. (2022). Biochar production technologies from agricultural waste, its utilization in agriculture and current global biochar market: a comprehensive review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 12(11), 1010-1031.
- de Rozari, P., Greenway, M., & El Hanandeh, A. (2018). Nitrogen removal from sewage and septage in constructed wetland mesocosms using sand media amended with biochar. *Ecological Engineering*, 111, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.11.002>
- Dong, X., Guan, T., Li, G., Lin, Q., & Zhao, X. (2016). Long-term effects of biochar amount on the content and composition of organic matter in soil aggregates under field conditions. *Journal of Soils and Sediments*, 16(5), 1481-1497. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1338-5>
- Esmaelnejad, L., Shorafa, M., Gorji, M., & Hosseini, S. M. (2016). Enhancement of physical and hydrological properties of a sandy loam soil via application of different biochar particle sizes

- during incubation period. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 14(2), e1103. <https://doi.org/10.5424/sjar/2016142-9190>
- Faizan, M., Alam, P., Kumari, A., Suresh, G., Sharma, P., Karabulut, F., Soysal, S., Djalovic, I., Trivan, G., Adil, M. F., Sehar, S., Rajput, V. D., & Hayat, S. (2024). Unraveling the nano-biochar mediated regulation of heavy metal stress tolerance for sustaining plant health. *Plant Stress*, 14, 100615. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100615>
- Fan, C., Cui, Y., Zhang, Q., Yin, N., Cai, X., Yuan, X., Senadheera, S., Cho, Y., & 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). <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00278-y>
- Föhr, J., Ranta, T., Suikki, J., & Soininen, H. (2017). Manufacturing of torrefied pellets without a binder from different raw wood materials in the pilot plant. *Wood Res*, 62(3), 481-494.
- Fu, B., Chen, L., Huang, H., Qu, P., & Wei, Z. (2021). Impacts of crop residues on soil health: a review. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 33(1), 164-173. <https://doi.org/10.1080/26395940.2021.1948354>
- Gee, G. W., & Bauder, J. W. (2018). *Particle-size Analysis* (ss. 383-411). <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>
- Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - a review. *Biology and Fertility of Soils*, 35(4), 219-230. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0466-4>
- Gugino, B. K., Abawi, G. S., Idowu, O. J., Schindelbeck, R. R., Smith, L. L., Thies, J. E., Wolfe, D. W., & Van Es, H. M. (2009). *Cornell soil health assessment training manual*. Cornell University College of Agriculture and Life Sciences.
- Hasany, S. F., Alam, T., & Mohammed, G. (2025). Nano-Porous Materials from Rice Husk and Rice Husk Ash for Adsorptive Biomedical Applications (ss. 213-233). https://doi.org/10.1007/978-981-96-1082-2_12
- Ho, K. M. (2012). Ten Caveats of Interpreting Correlation Coefficient in Anaesthesia and Intensive Care Research. *Anaesthesia and Intensive Care*, 40(4), 595-597. <https://doi.org/10.1177/0310057X1204000403>
- Hseu, Z.-Y., Jien, S.-H., Chien, W.-H., & Liou, R.-C. (2014). Impacts of Biochar on Physical Properties and Erosion Potential of a Mudstone Slope Soil. *The Scientific World Journal*, 2014, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2014/602197>
- Huang, H., Reddy, N. G., Huang, X., Chen, P., Wang, P., Zhang, Y., Huang, Y., Lin, P., & Garg, A. (2021). Effects of pyrolysis temperature, feedstock type and compaction on water retention of

- biochar amended soil. *Scientific Reports*, 11(1), 7419. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86701-5>
- Huang, X., Niu, R., Huang, X., An, Y., Li, J., Li, M., Huang, H., & Garg, A. (2021). Influence of Sustainable Biochars Produced from Kitchen Waste, Pig Manure, and Wood on Soil Erosion. *Water*, 13(16), 2296. <https://doi.org/10.3390/w13162296>
- Islam, M. U., Jiang, F., Guo, Z., & Peng, X. (2021). Does biochar application improve soil aggregation? A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 209, 104926. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104926>
- Jacquet, F., Jeuffroy, M.-H., Jouan, J., Le Cadre, E., Litrico, I., Malausa, T., Reboud, X., & Huyghe, C. (2022). Pesticide-free agriculture as a new paradigm for research. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(1), 8. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00742-8>
- Jiang, M., He, L., Niazi, N. K., Wang, H., Gustave, W., Vithanage, M., Geng, K., Shang, H., Zhang, X., & Wang, Z. (2023). Nanobiochar for the remediation of contaminated soil and water: challenges and opportunities. *Biochar*, 5(1), 2. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00201-x>
- Jiang, Y., Wang, X., Zhao, Y., Zhang, C., Jin, Z., Shan, S., & Ping, L. (2021). Effects of Biochar Application on Enzyme Activities in Tea Garden Soil. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.728530>
- Jiang, Z., Lian, F., Wang, Z., & Xing, B. (2020). The role of biochars in sustainable crop production and soil resiliency. *Journal of Experimental Botany*, 71(2), 520-542. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz301>
- Joudeh, N., & Linke, D. (2022). Nanoparticle classification, physicochemical properties, characterization, and applications: a comprehensive review for biologists. *Journal of Nanobiotechnology*, 20(1), 262. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01477-8>
- Kacar, B. (2009). *Toprak analizleri*. Nobel Yayın Dağıtım Ankara.
- Karinkanta, P., Ämmälä, A., Illikainen, M., & Niinimäki, J. (2018). Fine grinding of wood – Overview from wood breakage to applications. *Biomass and Bioenergy*, 113, 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.03.007>
- Khader, A., Ibrahim, M., Alkathami, F., Elsayy, H., El-Kader, N. A., Shaker, E., Sedky, A., & Mahmoud, E. (2023). Properties of Nano-Amendments and Their Effect on Some Soil Properties and Root-Knot Nematode and Yield Attributes of Tomato Plant. *Agriculture*, 13(2), 366. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020366>

- Khaliq, H., Baerom, A. A., Hasnain, M., Saira, A., Aftab, A., Shahzad, F., & Ullah, A. (2024). Use of Biochar Derived from Soybean Stover, Wood Bark, and Rice Straw for Lead Immobilization in Polluted Soil by Maize Crops. *OALib*, *11*(11), 1-23. <https://doi.org/10.4236/oalib.1112443>
- Khan, S., Irshad, S., Mehmood, K., Hasnain, Z., Nawaz, M., Rais, A., Gul, S., Wahid, M. A., Hashem, A., Abd_Allah, E. F., & Ibrar, D. (2024). Biochar production and characteristics, its impacts on soil health, crop production, and yield enhancement: a review. *Plants*, *13*(2), 166. <https://doi.org/10.3390/plants13020166>
- Kinney, T. J., Masiello, C. A., Dugan, B., Hockaday, W. C., Dean, M. R., Zygourakis, K., & Barnes, R. T. (2012). Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures. *Biomass and Bioenergy*, *41*, 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.01.033>
- Klute, A. (1986). Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods. Agronomy Monograph No. 9. *Amer. Soc. Agronomy and Soil Sci. Soc. Amer., Madison, Wisconsin*.
- Koide, R. T., Nguyen, B. T., Skinner, R. H., Dell, C. J., Peoples, M. S., Adler, P. R., & Drohan, P. J. (2015). Biochar amendment of soil improves resilience to climate change. *GCB Bioenergy*, *7*(5), 1084-1091. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12191>
- Kumar, A., & Bhattacharya, T. (2021). Biochar: a sustainable solution. *Environment, Development and Sustainability*, *23*(5), 6642-6680. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00970-0>
- Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R., & Karlen, D. (2010). Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, *158*(3-4), 436-442. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.05.012>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). Biochar for environmental management: an introduction. *Içinde Biochar for environmental management* (ss. 1-13). Routledge.
- Lim, T. J., Spokas, K. A., Feyereisen, G., & Novak, J. M. (2016). Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. *Chemosphere*, *142*, 136-144. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.06.069>
- Liu, M., Almatrafi, E., Zhang, Y., Xu, P., Song, B., Zhou, C., Zeng, G., & Zhu, Y. (2022). A critical review of biochar-based materials for the remediation of heavy metal contaminated environment: Applications and practical evaluations. *Science of The Total Environment*, *806*, 150531. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150531>
- Liu, M., Linna, C., Ma, S., Ma, Q., Song, W., Shen, M., Song, L., Cui, K., Zhou, Y., & Wang, L. (2022). Biochar combined with organic and inorganic fertilizers promoted the rapeseed nutrient uptake and improved the purple soil quality. *Frontiers in Nutrition*, *9*. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.997151>

- Liu, X., Tang, J., Wang, L., Liu, Q., & Liu, R. (2019). A comparative analysis of ball-milled biochar, graphene oxide, and multi-walled carbon nanotubes with respect to toxicity induction in *Streptomyces*. *Journal of Environmental Management*, 243, 308-317. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.034>
- Lorenz, K., & Lal, R. (2014). Biochar application to soil for climate change mitigation by soil organic carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(5), 651-670. <https://doi.org/10.1002/jpln.201400058>
- Medyńska-Juraszek, A., Latawiec, A., Królczyk, J., Bogacz, A., Kawałko, D., Bednik, M., & Dudek, M. (2021). Biochar Improves Maize Growth but Has a Limited Effect on Soil Properties: Evidence from a Three-Year Field Experiment. *Sustainability*, 13(7), 3617. <https://doi.org/10.3390/su13073617>
- Muzyka, R., Misztal, E., Hrabak, J., Banks, S. W., & Sajdak, M. (2023). Various biomass pyrolysis conditions influence the porosity and pore size distribution of biochar. *Energy*, 263, 126128. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126128>
- Nagaraju, K., Prasad, T. N. V. K. V., Naidu, M. V. S., Chari, M. S., Ramu, Y. R., & Murthy, B. R. (2023). Exploring the Benefits of Rice Husk Waste: Synthesis and Characterization of Biochar and Nanobiochar for Agricultural and Environmental Sustainability. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(9), 715-725. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i92292>
- Naghdi, M., Taheran, M., Brar, S. K., Kermanshahi-pour, A., Verma, M., & Surampalli, R. Y. (2017). Immobilized laccase on oxygen functionalized nanobiochars through mineral acids treatment for removal of carbamazepine. *Science of The Total Environment*, 584-585, 393-401. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.021>
- Naghdi, M., Taheran, M., Brar, S. K., Rouissi, T., Verma, M., Surampalli, R. Y., & Valero, J. R. (2017). A green method for production of nanobiochar by ball milling- optimization and characterization. *Journal of Cleaner Production*, 164, 1394-1405. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.084>
- Nelson, D. W., & Sommers, L. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter 1. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties, methods of soil analysis 2*, 539-579.
- Nelson, R. E. (1982). *Carbonate and Gypsum. Methods of soil analysis. Part II. Chemical and microbiological properties (Page, AL, RH Miller and DR Keeney eds)*. ASA SSSA Publisher, Agronomy.

- Oleszczuk, P., Ćwikła-Bundyra, W., Bogusz, A., Skwarek, E., & Ok, Y. S. (2016). Characterization of nanoparticles of biochars from different biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 121, 165-172. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.07.017>
- Omondi, M. O., Xia, X., Nahayo, A., Liu, X., Korai, P. K., & Pan, G. (2016). Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data. *Geoderma*, 274, 28-34. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.03.029>
- Ouyang, L., Wang, F., Tang, J., Yu, L., & Zhang, R. (2013). Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties. *Journal of soil science and plant nutrition, ahead*, 0-0. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162013005000078>
- Paetsch, L., Mueller, C. W., Kögel-Knabner, I., von Lützow, M., Girardin, C., & Rumpel, C. (2018). Effect of in-situ aged and fresh biochar on soil hydraulic conditions and microbial C use under drought conditions. *Scientific Reports*, 8(1), 6852. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25039-x>
- Pan, J., Ma, J., Zhai, L., Luo, T., Mei, Z., & Liu, H. (2019). Achievements of biochar application for enhanced anaerobic digestion: A review. *Bioresource Technology*, 292, 122058. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122058>
- Park, J., Lee, Y., Ryu, C., & Park, Y.-K. (2014). Slow pyrolysis of rice straw: Analysis of products properties, carbon and energy yields. *Bioresource Technology*, 155, 63-70. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.084>
- Pérez-Guzmán, L., Lower, B. H., & Dick, R. P. (2020). Corn and hardwood biochars affected soil microbial community and enzyme activities. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 3(1). <https://doi.org/10.1002/agg2.20082>
- Prasad Yadav, T., Manohar Yadav, R., & Pratap Singh, D. (2012). Mechanical Milling: a Top Down Approach for the Synthesis of Nanomaterials and Nanocomposites. *Nanoscience and Nanotechnology*, 2(3), 22-48. <https://doi.org/10.5923/j.nn.20120203.01>
- Prochnow, F. D., Cavali, M., Dresch, A. P., Belli, I. M., Libardi, N., & de Castilhos, A. B. (2024). Biochar: From Laboratory to Industry Scale—An Overview of Scientific and Industrial Advances, Opportunities in the Brazilian Context, and Contributions to Sustainable Development. *Processes*, 12(5), 1006. <https://doi.org/10.3390/pr12051006>
- Rabbi, S. M. F., Minasny, B., Salami, S. T., McBratney, Alex. B., & Young, I. M. (2021). Greater, but not necessarily better: The influence of biochar on soil hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, 72(5), 2033-2048. <https://doi.org/10.1111/ejss.13105>
- Rajput, V. D., Minkina, T., Ahmed, B., Singh, V. K., Mandzhieva, S., Sushkova, S., Bauer, T., Verma, K. K., Shan, S., van Hullebusch, E. D., & Wang, B. (2022). Nano-biochar: A novel

- solution for sustainable agriculture and environmental remediation. *Environmental Research*, 210, 112891. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112891>
- Ramanayaka, S., Vithanage, M., Alessi, D. S., Liu, W.-J., Jayasundera, A. C. A., & Ok, Y. S. (2020). Nanobiochar: production, properties, and multifunctional applications. *Environmental Science: Nano*, 7(11), 3279-3302. <https://doi.org/10.1039/D0EN00486C>
- Rashid, M., Hussain, Q., Hayat, R., Ahmad, M., Azeem, M., Alvi, S., Chaudhry, A. N., Masood, S., Khalid, R., Jehan, S., & Rehman, O. ur. (2023). Deashed biochar as N-carrier extended the N-release by inhibiting N-losses in calcareous soils. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(11), 9549-9564. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04250-5>
- Rashid, M. I., Shah, G. A., Sadiq, M., Amin, N. ul, Ali, A. M., Ondrasek, G., & Shahzad, K. (2023). Nanobiochar and Copper Oxide Nanoparticles Mixture Synergistically Increases Soil Nutrient Availability and Improves Wheat Production. *Plants*, 12(6), 1312. <https://doi.org/10.3390/plants12061312>
- Regmi, A., Singh, S., Moustaid-Moussa, N., Coldren, C., & Simpson, C. (2022). The Negative Effects of High Rates of Biochar on Violas Can Be Counteracted with Fertilizer. *Plants*, 11(4), 491. <https://doi.org/10.3390/plants11040491>
- Rex, P., Mohammed Ismail, K., Meenakshisundaram, N., Barmavatu, P., & Sai Bharadwaj, A. (2023). Agricultural Biomass Waste to Biochar: A Review on Biochar Applications Using Machine Learning Approach and Circular Economy. *ChemEngineering*, 7(3), 50. <https://doi.org/10.3390/chemengineering7030050>
- Runge, J. (2013). On the graph-theoretical interpretation of Pearson correlations in a multivariate process and a novel partial correlation measure.
- Sajjadi, B., Chen, W., & Egiebor, N. O. (2018). A comprehensive review on physical activation of biochar for energy and environmental applications. *Reviews in Chemical Engineering*, 35(6), 735–776. <https://doi.org/10.1515/revce-2017-0113>
- Salem, T. M., Refaie, K. M., Sherif, A. E.-H. E.-G. A. E.-L., & Eid, M. A. M. (2019). Biochar application in alkaline soil and its effect on soil and plant. *Acta agriculturae Slovenica*, 114(1). <https://doi.org/10.14720/aas.2019.114.1.10>
- Sani, Md. N. H., Amin, M., Siddique, A. B., Nasif, S. O., Ghaley, B. B., Ge, L., Wang, F., & Yong, J. W. H. (2023). Waste-derived nanobiochar: A new avenue towards sustainable agriculture, environment, and circular bioeconomy. *Science of The Total Environment*, 905, 166881. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166881>

- Saraugi, S. S., & Routray, W. (2024). Advances in sustainable production and applications of nano-biochar. *Science of The Total Environment*, 955, 176883. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176883>
- Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation. *Anesthesia & Analgesia*, 126(5), 1763-1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
- Schulz, H., & Glaser, B. (2012). Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175(3), 410-422. <https://doi.org/10.1002/jpln.201100143>
- Servin, A. D., De la Torre-Roche, R., Castillo-Michel, H., Pagano, L., Hawthorne, J., Musante, C., Pignatello, J., Uchimiya, M., & White, J. C. (2017). Exposure of agricultural crops to nanoparticle CeO₂ in biochar-amended soil. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 147-157. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.06.003>
- Sharma, P. K., Singh, R. K., Kumar, R., Kumar, N., Ghosh, A., Sharma, P., Kumar, A., Bhattacharya, P., & Kar, M. (2023). Adsorptive behavior of Fe/Zn-modified nanobiochar for arsenic removal from naturally contaminated groundwater. *Groundwater for Sustainable Development*, 23, 101011. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101011>
- Siles, J. A., García-Romera, I., Cajthaml, T., Belloc, J., Silva-Castro, G., Szaková, J., Tlustos, P., & Garcia-Sanchez, M. (2022). Application of dry olive residue-based biochar in combination with arbuscular mycorrhizal fungi enhances the microbial status of metal contaminated soils. *Scientific Reports*, 12(1), 12690. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17075-5>
- Singh Yadav, S. P., Bhandari, S., Bhatta, D., Poudel, A., Bhattarai, S., Yadav, P., Ghimire, N., Paudel, P., Paudel, P., Shrestha, J., & Oli, B. (2023). Biochar application: A sustainable approach to improve soil health. *Journal of Agriculture and Food Research*, 11, 100498. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100498>
- Soinne, H., Keskinen, R., Tähtikarhu, M., Kuva, J., & Hyväluoma, J. (2023). Effects of organic carbon and clay contents on structure-related properties of arable soils with high clay content. *European Journal of Soil Science*, 74(5). <https://doi.org/10.1111/ejss.13424>
- Song, B., Chen, M., Zhao, L., Qiu, H., & Cao, X. (2019). Physicochemical property and colloidal stability of micron- and nano-particle biochar derived from a variety of feedstock sources. *Science of The Total Environment*, 661, 685-695. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.193>

- Song, B., Cao, X., Gao, W., Aziz, S., Gao, S., Lam, C.-H., & Lin, R. (2022). Preparation of nano-biochar from conventional biorefineries for high-value applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112057. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112057>
- Sun, F., & Lu, S. (2013). Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(1), 26–33. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200639>
- Sun, Q., Meng, J., Lan, Y., Shi, G., Yang, X., Cao, D., Chen, W., & Han, X. (2021). Long-term effects of biochar amendment on soil aggregate stability and biological binding agents in brown earth. *CATENA*, 205, 105460. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105460>
- Tabatabai, M. A., & Bremner, J. M. (1969). Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 1(4), 301-307. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-0717\(69\)90012-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0038-0717(69)90012-1)
- Teutscherova, N., Lojka, B., Benito, M., Masaguer, A., & Vázquez, E. (2020). Biochar Reduces the Stability of Soil Aggregates during Intensive Leaching Experiment. *Agronomy*, 10(12), 1910. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121910>
- Thalmann, A. (1968). A procedure for the determination of dehydrogenase activity in the soil by means of triphenyltetrazolium chloride (TTC). *Landwirt Forsch*, 21, 249-258.
- Ulyett, J., Sakrabani, R., Kibblewhite, M., & Hann, M. (2014). Impact of biochar addition on water retention, nitrification and carbon dioxide evolution from two sandy loam soils. *European Journal of Soil Science*, 65(1), 96-104. <https://doi.org/10.1111/ejss.12081>
- Uusitalo, V., & Leino, M. (2019). Neutralizing global warming impacts of crop production using biochar from side flows and buffer zones: A case study of oat production in the boreal climate zone. *Journal of Cleaner Production*, 227, 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.175>
- Uzoma, K. C., Inoue, M., Andry, H., Fujimaki, H., Zahoor, A., & Nishihara, E. (2011). Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. *Soil Use and Management*, 27(2), 205-212. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00340.x>
- Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Chan, K. Y., Downie, A., Rust, J., Joseph, S., & Cowie, A. (2010). Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, 327(1-2), 235-246. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0050-x>
- Wang, D. Y., Yan, D. H., Song, X. S., & Wang, H. (2014). Impact of Biochar on Water Holding Capacity of Two Chinese Agricultural Soil. *Advanced Materials Research*, 941-944, 952-955. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.941-944.952>

- Weber, K., & Quicker, P. (2018). Properties of biochar. *Fuel*, 217, 240-261. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054>
- Wei, L., Li, F., Cai, D., Liu, Y., Luo, D., & Wen, Y. (2024). Studying the Effectiveness of Biochar Suspension in Improving the Physicochemical Characteristics of Soil Sensitive to Erosion. *World Journal of Environmental Biosciences*, 13(1), 1-7. <https://doi.org/10.51847/XG9lxsgsqY>
- Xiao, Q., Zhu, L., Shen, Y., & Li, S. (2016). Sensitivity of soil water retention and availability to biochar addition in rainfed semi-arid farmland during a three-year field experiment. *Field Crops Research*, 196, 284-293. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.014>
- Xu, J., Xie, Y., Yao, Q., Lv, L., & Chu, H. (2024). Advances in sustainable nano-biochar: precursors, synthesis methods and applications. *Nanoscale*, 16(32), 15009-15032. <https://doi.org/10.1039/D4NR01694G>
- Yang, W., Wang, Z., Zhao, H., Li, D., Jia, H., & Xu, W. (2024). Biochar application influences the stability of soil aggregates and wheat yields. *Plant Soil and Environment*, 70(3), 125–141. <https://doi.org/10.17221/199/2023-pse>
- Yang, Y., Wang, X., Wang, Y., Saleem, M., Mu, Y., Zheng, Y., & Zhang, Q. (2024). Pesticide contamination remediation by biochar-immobilized microorganisms: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(2), 2225-2238. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05204-0>
- Yu, P., Li, T., Fu, Q., Liu, D., Hou, R., & Zhao, H. (2021a). Effect of Biochar on Soil and Water Loss on Sloping Farmland in the Black Soil Region of Northeast China during the Spring Thawing Period. *Sustainability*, 13(3), 1460. <https://doi.org/10.3390/su13031460>
- Zachovalova, M., Simeckova, J., Vlcek, V., Hejduk, S., & Jandak, J. (2022). Effect of Biochar Application Rate on Physical and Hydro-physical Properties of A Dystric Cambisol. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 70(1), 19-29. <https://doi.org/10.11118/actaun.2022.002>
- Zhang, L., Wu, Z., Zhou, J., Zhou, L., Lu, Y., Xiang, Y., Zhang, R., Deng, Q., & Wu, W. (2022). Meta-Analysis of the Response of the Productivity of Different Crops to Parameters and Processes in Soil Nitrogen Cycle under Biochar Addition. *Agronomy*, 12(8), 1857. <https://doi.org/10.3390/agronomy12081857>
- Zhang, M., Cui, J., Mi, M., Jin, Z., Wong, M. H., Shan, S., & Ping, L. (2024). Persistent effects of swine manure biochar and biogas slurry application on soil nitrogen content and quality of lotus root. *Frontiers in Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1359911>
- Zhang, S., Zhu, Q., de Vries, W., Ros, G. H., Chen, X., Muneer, M. A., Zhang, F., & Wu, L. (2023). Effects of soil amendments on soil acidity and crop yields in acidic soils: A world-wide meta-

analysis. *Journal of Environmental Management*, 345, 118531.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118531>

Zhao, W., Zhou, Q., Tian, Z., Cui, Y., Liang, Y., & Wang, H. (2020). Apply biochar to ameliorate soda saline-alkali land, improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain. *Science of The Total Environment*, 722, 137428.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137428>

Zhao, Y., Feng, D., Zhang, Y., Huang, Y., & Sun, S. (2016). Effect of pyrolysis temperature on char structure and chemical speciation of alkali and alkaline earth metallic species in biochar. *Fuel Processing Technology*, 141, 54-60. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.06.029>

Zhu, Y., Tian, T., Wang, J., Song, J., Shi, X., Wang, H., & Lv, X. (2021). *Effects of modifiers on soil enzyme activity and microbial community diversity in cadmium-contaminated farmland soil*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-397455/v1>