



**BİYOKÖMÜRÜN FARKLI TEKSTÜRDEKİ
TOPRAKLARIN KIVAM LİMİTLERİ VE PROCTOR
SIKIŞMA TESTİ PARAMETRELERİ ÜZERİNE
ETKİLERİ**

Abdullah BAKAN

Danışman: Prof. Dr. Ekrem Lütfi AKSAKAL

Yüksek Lisans Tezi

Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Ana Bilim Dalı

2026

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME ANA BİLİM DALI

**BİYOKÖMÜRÜN FARKLI TEKSTÜRDEKİ TOPRAKLARIN KIVAM
LİMİTLERİ VE PROCTOR SIKIŞMA TESTİ PARAMETRELERİ
ÜZERİNE ETKİLERİ**

(Effects of Biochar on Consistency Limits and Proctor Compaction Test Parameters of Soil
with Different Textures)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdullah BAKAN

Danışman: Prof. Dr. Ekrem Lütü AKSAKAL

Erzurum
Ocak, 2026

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Abdullah BAKAN tarafından hazırlanan “Biyokömürün Farklı Tekstürdeki Toprakların Kıvam Limitleri ve Proctor Sıkışma Testi Parametreleri Üzerine Etkileri” başlıklı çalışması 06/01/2026 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Ana Bilim Dalı Toprak Bilimi Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Mustafa Yıldırım CANBOLAT <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Ekrem Lütfi AKSAKAL <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Serdar SARI <i>Iğdır Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır

Enstitü Yönetim Kurulunun
... / ... / tarih ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Aslı ıslak imzalıdır

Prof. Dr. Alper NUHOĞLU

Enstitü Müdürü

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

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Prof. Dr. Ekrem Lütfi AKSAKAL danışmanlığında sunulan “Biyokömürün Farklı Tekstürdeki Toprakların Kıvam Limitleri ve Proctor Sıkışma Testi Parametreleri Üzerine Etkileri” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	8	30
Kuramsal Temeller	5	30
Materyal ve Metot	19	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	10	20
Sonuçlar	3	20
Tezin Geneli	11	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Abdullah BAKAN	Prof. Dr. Ekrem Lütfi AKSAKAL
7.1.2026	7.1.2026
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın her aşamasında birikim ve tecrübeleriyle yol gösteren, danışmanım Sayın Prof. Dr. Ekrem Lütfi AKSAKAL'a ve çalışmama sunduğu katkılarından dolayı Sayın Prof. Dr. İlker ANGIN'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Aynı zamanda, tez çalışmam süresince sağladıkları destek ve katkılardan dolayı Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü öğretim üyelerine ve personeline teşekkür ederim. Ayrıca, bıraktığı izler ve kazandırdığı değerlerle yolumu şekillendiren babam Arslan BAKAN'a, desteği ve sabrı ile her koşulda yanımda olarak bana güç veren annem Leyla BAKAN'a ve bu süreçte motivasyon kaynağım olan kardeşlerim Zeynep BAKAN ve Alper Osman BAKAN'a teşekkür ederim.

Abdullah BAKAN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİYOKÖMÜRÜN FARKLI TEKSTÜRDEKİ TOPRAKLARIN KIVAM LİMİTLERİ VE PROCTOR SIKIŞMA TESTİ PARAMETRELERİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Abdullah BAKAN

Danışman: Prof. Dr. Ekrem Lütfi AKSAKAL

Amaç: Araştırmada, farklı tekstürlerdeki topraklara uygulanan biyokömürün kıvam limitleri ile Proctor sıkışma testi parametreleri üzerindeki etkilerini ortaya koymak amaçlanmıştır.

Yöntem: Çalışmada, kil, tın ve kumlu tın tekstür sınıfındaki topraklara ağırlık cinsinden farklı dozlarda (%0, %0.5, %1, %2, %4) biyokömür uygulanmış ve toprak×biyokömür karışımları laboratuvarında yaklaşık tarla kapasitesi nem seviyesinde on iki ay inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon sonrasında toprak örneklerinin organik karbon (OC), agregat stabilitesi (AS), likit limit (LL), plastik limit (PL), plastiklik indeksi (PI), büzülme limiti (BL), ufalanabilirlik indeksi (FI) değerleri ve Proctor sıkışma testi parametreleri belirlenmiştir.

Bulgular: Biyokömür uygulaması sonrasında toprakların OC miktarlarında ve AS'lerinde önemli düzeyde artışlar olmuş ve en yüksek değerler %4 dozda belirlenmiştir. Genel ortalama kontrol grubuna göre %0.5, %1, %2 ve %4 doz uygulamaları sonrasında OC'da %10.96, %23.29, %50.68 ve %91.78 oranlarında, AS'de %25.98, %40.47, %53.26 ve %70.61 oranlarında artışlar belirlenmiştir. Biyokömür uygulaması LL, PL, BL, FI değerlerini önemli düzeyde artırmış, en yüksek değerler %4 dozunda elde edilmiş ve kontrolüne göre oransal olarak en fazla artış kumlu tınlı toprakta meydana gelmiştir. Biyokömür uygulaması Proctor testi optimum nem içeriğini (OMC) önemli düzeyde artırırken, maksimum hacim ağırlığını (MBD) önemli düzeyde düşürmüştür. Genel ortalama kontrolde OMC %20.56 iken %4 dozda %31.15'e yükselmiş, kontrole kıyasla %51.51 oranında artış hesaplanmıştır. Kontrolde MBD 1.71 gcm^{-3} iken %4 dozda 1.54 gcm^{-3} 'e düşmüş ve kontrole kıyasla %9.94 oranında azalma hesaplanmıştır.

Sonuç: Biyokömür uygulaması toprakların fiziksel ve mekaniksel özelliklerine olumlu etkiler yapmış, toprağın sıkışma eğilimini azaltmıştır. Toprağın daha yüksek nem koşullarında degradasyona/deformasyona uğramadan daha kolay işlenebileceğini ve daha yüksek işlenebilirlik aralığı sağlayabileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, biyokömür sürdürülebilir toprak yönetiminde toprak üretkenliğini artırıcı materyal olarak önerilebilir.

Anahtar Kelimeler: biyokömür, organik karbon, agregat stabilitesi, kıvam limitleri, toprak sıkışması, toprak işleme

Ocak 2026, 53 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

EFFECTS OF BIOCHAR ON CONSISTENCY LIMITS AND PROCTOR COMPACTION TEST PARAMETERS OF SOIL WITH DIFFERENT TEXTURES

Abdullah BAKAN

Supervisor: Prof. Dr. Ekrem Lütü AKSAKAL

Purpose: The study aims to investigate the effects of biochar application on the consistency limits and Proctor compaction test parameters of soils with different textures.

Method: In the study, biochar was applied at different rates by weight (0% 0.5%, 1%, 2%, and 4%) to soils with clay, loam and sandy loam textures. The soil×biochar mixtures were incubated in the laboratory for twelve months at approximately field capacity moisture level. Following incubation, the organic carbon (OC), aggregate stability (AS), liquid limit (LL), plastic limit (PL), plasticity index (PI), shrinkage limit (SL), friability index (FI) values, and Proctor compaction test parameters of the soil samples were determined.

Findings: Following biochar application, significant increases were observed in the organic carbon (OC) content and aggregate stability (AS) of the soils, with the highest values recorded at the 4% application rate. Compared to the control, the overall mean increases in OC were 10.96%, 23.29%, 50.68%, and 91.78% for the 0.5%, 1%, 2%, and 4% biochar doses, respectively, while AS increased by 25.98%, 40.47%, 53.26%, and 70.61% at the same rates. Biochar application significantly increased LL, PL, SL, and FI values, with the highest values obtained at the 4% dose, and the most pronounced proportional increases were observed in the sandy loam soil. Biochar application also significantly increased the optimum moisture content (OMC) in the Proctor test, while it significantly reduced the maximum bulk density (MBD). On average, OMC increased from 20.56% in the control to 31.15% at the 4% dose, corresponding to a 51.51% increase compared to the control. Conversely, MBD decreased from 1.71 g cm^{-3} in the control to 1.54 g cm^{-3} at the 4% dose, representing a 9.94% reduction.

Results: Biochar application positively influenced the physical and mechanical properties of the soils and reduced their susceptibility to compaction. The findings indicate that soils amended with biochar can be cultivated more easily under higher moisture conditions without undergoing degradation or deformation, thereby providing a wider workability range. Consequently, biochar can be recommended as a soil amendment material that enhances soil productivity within the framework of sustainable soil management practices.

Keywords: biochar, organic carbon, aggregate stability, consistency limits, soil compaction, soil tillage

January 2026, 53 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLolar DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	ix
GİRİŞ	1
KURAMSAL TEMELLER	3
MATERYAL VE METOT	7
Materyal	7
Araştırmada kullanılan toprak örnekleri ve örneklerin analize hazırlanması	7
Örneklerin alındığı ilin coğrafi konumu ve iklim özellikleri	7
Biyokömür	8
Yöntemler	8
Laboratuvar analiz yöntemleri	8
Biyokömür inkübasyon denemesinin kurulması ve yürütülmesi	11
İstatistiksel Değerlendirme	12
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	13
Araştırmada Kullanılan Toprakların Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	13
Biyokömürün Toprak Organik Karbon (OC) İçeriğine Etkisi	15
Biyokömürün Agregat Stabilesi (AS) Üzerine Etkisi	17
Biyokömürün Likit Limit (LL) Değerleri Üzerine Etkisi	18
Biyokömürün Plastik Limit (PL) Değerleri Üzerine Etkisi	19
Biyokömürün Plastik İndeksi (PI) Değerleri Üzerine Etkisi	20
Biyokömürün Büzülme Limiti (BL) Değerleri Üzerine Etkisi	24
Biyokömürün Ufalanabilirlik (Gevreklik) İndeksi (FI) Değerleri Üzerine Etkisi	25
Proctor Sıkışma Testi Sonuçları	26
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	34
KAYNAKLAR	35
ÖZGEÇMİŞ	43

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Araştırmada Kullanılan Deneme Topraklarının ve Biyokömürün Bazı Tanımlayıcı Özellikleri	13
Tablo 2. Toprakların Organik Karbon (OC), Agregat Stabilitesi (AS), Likit Limit (LL), Plastik Limit (PL), Plastiklik İndeksi (PI), Büzülme Limiti (BL) ve Ufalanabilirlik İndeksi (FI) Değerleri Üzerine Biyokömürün Etkileri	16
Tablo 3. İncelenen Parametreler Arasındaki Pearson Korelasyon Katsayıları	17
Tablo 4. Toprakların Proctor Sıkışma Testi Parametreleri Optimum Nem İçeriği (OMC) ve Maksimum Hacim Ağırlığı (MBD) Üzerine Biyokömürün Etkileri	28

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Biyokömür uygulaması ile LL, PL, PI arasındaki ilişkiler ve kontrole göre değişim oranları (Toprak I).....	22
Şekil 2. Biyokömür uygulaması ile LL, PL, PI arasındaki ilişkiler ve kontrole göre değişim oranları (Toprak II).	23
Şekil 3. Biyokömür uygulaması ile LL, PL, PI arasındaki ilişkiler ve kontrole göre değişim oranları (Toprak III)	24
Şekil 4. Araştırma topraklarının Proctor sıkışma testi eğrileri	30
Şekil 5. Biyokömür uygulaması ile OMC ve MBD arasındaki ilişkiler	31
Şekil 6. Biyokömür uygulamasıyla araştırma topraklarının OMC ve MBD değerlerinde kontrole göre meydana gelen değişimler	32

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

AS	: Agregat Stabilitesi
BK	: Biyokömür
BL	: Büzülme Limiti
FI	: Ufalanabilirlik (Gevreklik/Dağılabilirlik) İndeksi
KDK	: Katyon Değişim Kapasitesi
HA	: Hacim Ağırlığı
LL	: Likit Limit
MBD	: Maksimum Hacim Ağırlığı
OC	: Organik Karbon
OM	: Organik Madde
OMC	: Optimum Nem İçeriği
PI	: Plastiklik İndeksi
PL	: Plastik Limit

GİRİŞ

Toprak; iklim koşulları, biyotik unsurlar ve topografik yapıların etkisi altında, ana materyal üzerinde çok uzun pedolojik süreçler sonucunda oluşmuş; insanlara, bitkilere, hayvanlara ve mikroorganizmalara hem yaşam ortamı hem de besin sağlayan bir sistemdir. Küresel nüfusun hızlı artışı, göçler ve doğal afetler gıda ve barınma gibi temel gereksinimlere yönelik talebin de aynı doğrultuda artmasına neden olmakta ve bu artış, tarım alanları, meralar ve orman ekosistemleri gibi zaten sınırlı olan doğal üretim kaynakları üzerindeki baskıyı her geçen gün artırmaktadır. Dolayısıyla, toprak kaynaklarının korunması ve sürdürülebilir biçimde kullanılması, yönetilmesi gerekliliği açıkça ortaya çıkmaktadır. Yenilenemeyen ve yaşamın devamı için vazgeçilmez bir doğal kaynak olması ve ikamesinin olmaması nedeniyle toprağın korunması, hem ekolojik denge hem de ekonomik sürdürülebilirlik açısından kritik öneme sahiptir.

Ekosistemler, canlı ve cansız unsurların sürekli etkileşim içinde bulunduğu karmaşık ve dinamik sistemler olup, bu sistemler içerisinde karşılıklı etkileşimlerin en yoğun şekilde gerçekleştiği bileşen ise tartışmasız topraktır. İnsan yaşamının sürdürülebilirliği, ekonomik kalkınma ve çevresel istikrar açısından vazgeçilmez bir kaynak olan toprak, uygun yönetim uygulamaları, koruma stratejileri ve amenajman planlamaları ile sürdürülebilirliği etkin biçimde kullanılmalıdır. Toprağın verimliliğinin/üretkenliğinin korunması, özelliklerinin bozulmasının önlenmesi ve kalite parametrelerinin iyileştirilmesi, tarımsal faaliyetler ile üretimin sürekliliği için temel bir gereksinimdir. Tarım arazilerinde yapılan yoğun tarımsal faaliyetler ve yoğun toprak işleme toprak organik madde içeriğinin azalmasına neden olurken, hem toprak verimliliğini/üretkenliğini hem de strüktürel özellikleri olumsuz yönde etkilemektedir. Ekim, dikim, bakım ve hasat işlemlerinde ağır tarım alet-ekipmanlarının kullanımı, aşırı tarla trafiği, aşırı toprak işleme, aşırı kimyasal gübre ve tarım ilacı kullanımı, monokültür tarım ve anız yakma gibi yanlış arazi kullanım faaliyetleri ve toprak yönetim uygulamaları toprakların fiziksel, mekaniksel, kimyasal ve biyolojik dengelerini bozarak verimlilik/üretkenlik özelliklerini zayıflatmakta, degradasyonuna neden olmaktadır. Özellikle toprağın fiziksel ve mekaniksel özelliklerini tahrip edecek tarzdaki arazi kullanımı ve toprak yönetim uygulamaları toprağın gözenekliliğinin azalmasına, hacim ağırlığının artmasına, infiltrasyon hız ve miktarının azalmasına, yüzey akış ve erozyonun artmasına neden olarak toprak üretkenliğinin azalmasına neden olmaktadır. Toprağın fiziksel ve mekaniksel özellikleri; erozyon kontrolü, su ve hava geçirgenliği, kök gelişimi ve degradasyona uğramadan

işlenebilirlik gibi birçok üretkenlik parametresini doğrudan etkilemektedir. Daha önceden yapılmış olan araştırmalar incelendiğinde, organik maddelerin ve organik orjinli materyallerin belirli oranlarda toprağa eklenerek toprağın organik karbon ile organik madde içeriğinin artırılmasının toprağın fiziksel, mekaniksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini geliştirerek verimlilik ve üretkenlik parametrelerinde önemli düzeyde olumlu etkiler, değişimler meydana getirdiği belirlenmiştir. Bu doğrultuda, biyokütlelerin pirolizi ile elde edilen yüksek organik karbon içeriğine sahip biyokömür gibi organik orjinli materyallerin toprak düzenleyicisi olarak kullanımı, hem tarımsal verimliliği/üretkenliği artırmakta hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkı sunmaktadır. Ayrıca, organik atık ve artıkların biyokömüre dönüştürülerek tarımsal uygulamalarda değerlendirilmesi, kullanılması, atıkların geri kazanımı yoluyla çevresel kirliliğin azaltılmasına ve doğal kaynakların korunmasına destek olmaktadır. Toprak özelliklerini iyileştirmek için sıfır atık yaklaşımı kapsamında geliştirilen çevre dostu yöntemlerle organik atıklardan elde edilen biyokömür gibi materyallerin toprak düzenleyici olarak kullanılması, hem ekonomik hem çevresel hem de ekolojik açıdan sürdürülebilir bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

Biyokömürün toprakların mekanik davranışları ve sıkışabilirlik özellikleri üzerindeki etkilerine yönelik araştırmalar henüz sınırlı sayıdadır. Bu çalışmada, farklı tekstürel özelliklere sahip topraklara uygulanan değişen dozlardaki biyokömürün, toprağın mekanik özellikleri ile Proctor sıkışma testi parametreleri üzerindeki etkilerini belirlemek amaçlanmıştır. Böylece, biyokömür uygulamasının toprakların fiziksel dayanımı ve işlenebilirliği üzerindeki potansiyel katkıları ortaya konulmaya çalışılmıştır.

KURAMSAL TEMELLER

Toprak, ekosistemin en önemli ana bileşenlerinden biri ve yeryüzündeki yaşamın temelini oluşturan en kıymetli doğal bir kaynaktır. Toprak oluşumu uzun jeolojik zaman dilimlerinde iklim, topoğrafya ve biyolojik faaliyetlerin ana kayaçlar üzerindeki etkisiyle gerçekleşen yavaş bir süreçtir. Bu nedenle, insanlığın en temel sorumluluğu; oluşumu bin yıllar/milyon yıllar süren, ekosistemin ana bileşeni ve yaşamın devamlılığı için doğal kaynak olan toprağı korumak ve sürdürülebilirliğini temin etmek olmalıdır (European Commission 2021). Bu doğal kaynağın korunmaması/korunamaması yalnızca gıda üretimini değil, gelecek nesilleri de telafisi mümkün olmayan bir yola sokacaktır. Toprak, bitkisel üretim için gerekli olan besin elementleri, mikroorganizmalar ve su gibi temel bileşenleri bünyesinde barındırır ve dolayısıyla besin zincirinin en temel halkasını oluşturur. Toprak yalnızca üretim aracı değil, aynı zamanda karbon depolama, su döngüsünü düzenleme ve biyolojik çeşitliliğe ev sahipliği yapma gibi çok yönlü ekosistem hizmetleriyle de çevresel dengenin sağlanmasında önemli bir rol üstlenmektedir (Stockmann *et al.* 2013; Ma *et al.* 2023; Eftimiou 2025).

Toprak verimliliği ile üretkenliğinin devamlılığı ve sürdürülebilirliği büyük ölçüde topraktaki organik madde (OM) ve organik karbon (OC) düzeyine bağlıdır (Chivenge *et al.* 2007; Lal 2020; Shumba *et al.* 2024; Li *et al.* 2024; Koushika *et al.* 2024). Organik madde ve organik karbon, toprakların fiziksel yapısını güçlendirirken aynı zamanda kimyasal ve mikrobiyolojik özelliklerinin iyileştirilmesinde uzun vadede hem verimlilik hem de üretkenlik açısından önemli düzeyde pozitif etkiler sağlamaktadır. Ancak, yoğun tarımsal faaliyetler ve yanlış arazi kullanımları, özellikle sürekli toprak işleme uygulamaları, zamanla topraklardaki bu değerleri tahrip ederek, hacim ağırlığı, porozite, agregasyon, su tutma kapasitesi gibi toprak strüktürel özelliklerini olumsuz yönde etkilemekte ve üretkenlik fonksiyonlarının degrade olmasına neden olmaktadır (Lal 2016; Babu *et al.* 2023; Liu *et al.* 2024; Meng *et al.* 2024). Bu gibi olumsuzlukları gidermek amacıyla, topraklara organik madde ve organik karbon kazandırabilecek çeşitli materyallerin eklenmesi önerilmektedir. Bunların başında hayvansal kaynaklı çiftlik gübreleri gelirken, yeşil gübreler, bitkisel atıklar ve ürün kalıntıları da potansiyel kaynaklar arasında yer almaktadır (Dündar 1987; Taban vd 2013; İrget ve Cengiz 2018). Bu bağlamda, farklı organik atık ve artık kaynaklı biyokütlelerin; 350 °C ile 1000 °C arasındaki sıcaklıklarda kontrollü ve oksijensiz ortamda piroliz edilmesiyle elde edilen biyokömür, organik karbon açısından zengin bir malzeme olarak öne çıkmaktadır (Lehmann and Joseph 2009; Nepal *et al.* 2023; EBC (European Biochar Certificate) 2025; Luo *et al.* 2025).

Söz konusu materyallerin toprağa yıllar içinde düzenli olarak uygulanması, yalnızca verimlilik ve üretkenlik açısından olumlu etkiler sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda toprağın fiziksel yapısını dış etkenlere karşı daha dirençli hale getirmektedir. Bunun yanında, biyokütle kaynaklarının farklı çevresel koşullarda işlenebilmesi, hem ekolojik uyum açısından avantaj sağlamak hem de kırsal kalkınma ve enerji üretimi açısından ekonomik katkılar sunmaktadır.

Biyokömür, organik karbonun toprakta uzun süreli olarak depolanmasını sağlamak amacıyla ve aynı zamanda toprakların fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik özelliklerini iyileştirmek için etkili bir toprak düzenleyicisi olarak kullanılmaktadır (Lehmann *et al.* 2009). Gui *et al.* (2025) tarafından yapılan çalışmada, biyokömürlerin atmosferik CO₂ tutulumu üzerindeki etkileri ele alınmış ve biyokömürün toprakla etkileşiminin toprağın karbon depolama kapasitesini önemli ölçüde artırdığı ortaya konmuştur. Son yıllarda yapılan çalışmalar, biyokömürün toprak fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri üzerinde birçok olumlu etkiler sağladığını ortaya koymaktadır (Sohi *et al.* 2010; Jeffery *et al.* 2011; Xie *et al.* 2025; Jiang *et al.* 2025). Özellikle, toprak organik karbonunu artırarak karbon tutulumuna katkı sağlaması, toprak verimliliğine katkı sağlaması, iklim değişikliğini azaltma ve strüktürü iyileştirmesi, biyokömürü sürdürülebilir tarım uygulamaları açısından önemli bir materyal haline getirmiştir (Yuan *et al.* 2025; Wu *et al.* 2025). Yüksek düzeyde hidroksil, fenol ve karboksil gibi yüzey fonksiyonel grupları sayesinde toprağın negatif yük kaynaklarını, katyon değişim kapasitesini, bitki besin elementleri adsorpsiyon kapasitesini ve besin elementlerinin bitkiler tarafından kullanılabilirliğini artırarak verimliliği artırdığı ve besin elementlerinin bitkiler tarafından kullanılabilirliğini artırdığı ifade edilmektedir (Lehmann *et al.* 2003; Cheng *et al.* 2006; Liang *et al.* 2006; Laird *et al.* 2010; Yang *et al.* 2017; Palansooriya *et al.* 2019). Buna ek olarak, biyokömürün toprağın su tutma kapasitesini artırdığı, böylece bitkilerin kuraklık stresine karşı dayanıklılığını güçlendirdiği (Baiamonte *et al.* 2019; Zhang *et al.* 2022; Huang *et al.* 2024), toprak pH'ını dengeleyerek besin alımını kolaylaştırdığı/artırdığı ve mikrobiyal çeşitliliği artırarak toprak verimliliğini dolaylı olarak artırdığı belirtilmektedir (Lehmann *et al.* 2011; Mukherjee and Lal 2013; Zhang *et al.* 2021; Ighalo *et al.* 2025). Razzaghi *et al.* (2020) tarafından gerçekleştirilen meta-analiz çalışmasında da biyokömür uygulamalarının ortalama olarak toprağın kütle yoğunluğu ile tane yoğunluğunu azalttığı ve kullanılabilir su içeriğini artırdığı ifade edilmektedir. Pidlisnyuk *et al.* (2025), iki farklı biyokütleden elde edilen biyokömürün mısır gelişimi üzerindeki etkilerini değerlendirdikleri araştırmalarında, biyokömürün toprak kimyası ve bitki gelişimi üzerinde belirleyici olduğunu, önemli düzeyde değişimlerin meydana geldiğini ortaya koymuşlardır. Biyokömür ilavesinin toprağın doygun su içeriğini artırdığı ve makroporoziteyi olumlu yönde etkilediği (Zanutel *et al.* 2024), farklı iklim koşullarında mısır verimini artırdığını ve kuraklık koşullarında bile

toprak-su ilişkilerini iyileştirdiği (Park *et al.* 2023) yapılmış çalışmalarla ortaya konmuştur. Ayrıca, agregat oluşumunu ve agregat stabilitesini artırarak toprakların fiziksel ve mekaniksel özelliklerini geliştirdiği, mekaniksel kuvvetlere karşı direncini artırdığı, sıkışmayı ve fiziksel degradasyonu azalttığı ifade edilmektedir (Herath *et al.* 2013; Ahmed *et al.* 2017; Awe *et al.* 2021; Blanco-Canqui 2021; Yang and Lu 2021).

Toprak sıkışması toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini olumsuz yönde etkileyerek önemli düzeyde verimlilik ve üretkenlik sorunlarının ve toprağın sürdürülebilir kullanımında da önemli sorunların ortaya çıkmasına neden olan toprak mekaniksel parametrelerindendir. Sıkışma, toprak hacim ağırlığını artırarak, poroziteyi azaltarak, mekanik direnci artırarak, su infiltrasyonunu, gaz alışverişini ve biyolojik aktiviteleri azaltarak kök büyümesini engeller ve bitkilerin besin ve su alma yeteneklerini sınırlı hale getirerek verimlilikte ve üretkenlikte önemli bir azalmaya neden olur (Aksakal 2004; Shah *et al.* 2017; Ogorek *et al.* 2025). Biyokömür uygulamaları toprakların organik karbon içeriğini artırarak, toprak fraksiyonları arasındaki kohezyonu artırarak, mikro/makro strüktürel ünitelerin gelişmesini sağlayarak, agregat stabilitesini ve agregatların esnekliği ile gevrekliğini artırarak mekaniksel kuvvetlere karşı direncini artırdığı ve toprak sıkabilirliğini/sıkışmasını azalttığı, Proctor sıkışma testi parametreleri olan optimum nem içeriği (OMC) ve maksimum hacim ağırlığında (MBD) iyileştirme yönünde etkili olduğu belirlenmiştir (Wang *et al.* 2016; Amoakwah *et al.* 2017; Zong *et al.* 2018; Sokołowska *et al.* 2020; Blanco-Canqui 2021). Bu bulgular, biyokömürün çevresel strese dayanıklı tarımsal sistemler geliştirmede önemli bir araç ve önemli bir toprak düzenleyici olduğunu ortaya koymaktadır.

Toprakların tarımsal potansiyellerini ile tarımsal faaliyetlerde (işleme, tohum yatağı hazırlama, tarla trafiği, sıkışma, vb.) göstereceği tavırları değerlendirmek için kullanılan en önemli mekaniksel özelliklerden biri kıvam limitleri (Atterberg limitleri)'dir. Kıvam limitleri 1911 yılında killerin plastikliğini belirlemek için ilk defa İsveçli bir bilim adamı olan Atterberg tarafından deneysel olarak ortaya konmuştur. Tarım topraklarının işlenmeye uygunluğu ve sıkışmaya neden olabilecek mekaniksel kuvvetlere karşı göstereceği davranışların değerlendirilmesinde kullanılan temel göstergelerden biridir (Canbolat ve Öztaş 1996; Mosaddeghi *et al.* 2009). Toprakların işlenebilirlik durumlarını yorumlamak için genel özelliklerin yanı sıra su tutma kapasiteleri (Dexter and Bird 2001), kıvam limitleri (Mueller *et al.* 1990) ve Proctor sıkıştırma testi parametrelerinden (Wagner *et al.* 1992) yararlanılmaktadır. Literatürdeki birçok çalışmada kıvam limitleri ile Proctor sıkışma testi parametreleri arasında anlamlı korelasyonlar tespit edilmiş ve özellikler plastik limit (PL) değerinin Proctor optimum nem (OMC) içeriğinin belirlenmesinde dolaylı bir gösterge olabileceği öne sürülmektedir.

Diğer yandan, likit limitin (LL) toprağın doygunluk sınırını belirleyerek taşıma gücünde meydana gelen azalmayı ortaya koyduğu ve özellikle işlenebilirlik açısından önemli olduğu belirtilmektedir (Canbolat ve Öztaş 1996).

Biyokömürün yüksek oranda organik karbon içermesi, yüksek spesifik yüzeye, yüksek poroziteye ve yüksek su tutma kapasitesine sahip olması toprağın kıvam limitlerine doğrudan etkileyecektir (Blanco-Canqui 2017; Yang and Lu 2021). Arthur *et al.* (2020), Gana’da yürüttükleri bir çalışmada üç yıllık tarla denemesinde, pirinç samanı biyokömürünün topraklarının kıvam limitleri ve agregat özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada uyguladıkları 0, 15 ve 30 t ha⁻¹ dozlarındaki biyokömürün, özellikle yüksek dozlarda, likit ve plastik limit değerlerinde belirgin artış sağladığı ve toprağın işlenebilirliğini olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir. Yang and Lu (2021), pirinç sapı, mısır sapı, buğday sapı, pirinç kabuğu ve bambu kaynaklı beş farklı biyokömürün, agregat stabilitesi, su tutma kapasitesi ve mekanik özelliklere etkilerini üç sezonluk bir tarla denemesiyle incelemişler ve uygulama dozlarını 0, 11, 25 ve 22.5 t ha⁻¹ olarak seçmiş ve sonuçta 22.5 t ha⁻¹ biyokömür uygulamasının, kontrol grubuna kıyasla >5 mm makroagregat oranında anlamlı artış, topraktaki su tutma kapasitesinde ve kullanılabilir su içeriğinde belirgin iyileşmeler sağladığını göstermişlerdir. Ayrıca, biyokömür uygulamaları plastik indeks (PI) değerlerini artırarak toprağın işlenebilir su aralığını genişlettiğini belirlemişlerdir. Saberian *et al.* (2025), biyokömürün kıvam limitlerine etkisini incelediği çalışmasında özellikle plastik limitte önemli artışlar meydana geldiğini bildirmektedir. Yadav and Bag (2023), bambu biyokömürü uygulamasının hem kıvam limitleri hem de Proctor sıkışma parametreleri üzerinde olumlu etkiler yaptığını göstermiştir. Wan *et al.* (2022) tarafından yapılan çalışmada biyokömür uygulamasının toprak yoğunluğu, özgül ağırlık ve kıvam limitleri gibi özelliklerde de değişimlere yol açtığı belirtilmiştir. Araştırma, biyokömürün toprak gözenek yapısını değiştirerek hem mühendislik hem de tarımsal uygulamalarda yararlı olabileceği ifade edilmektedir.

Biyokömürün toprakların özellikleri üzerindeki etkileri son yıllarda hem çevresel sürdürülebilirlik hem atık değerlendirilmesi hem de tarımsal verimlilik/üretkenlik açısından artan bir ilgiyle araştırılmaktadır. Özellikle biyokömürün kıvam limitleri ve Proctor sıkışma parametreleri gibi tarımsal ve mühendislik açısından kritik öneme sahip mekaniksel göstergeler üzerine yapılan çalışmalar sınırlı sayıdadır. Bu nedenle, bu çalışmada farklı tekstürlere sahip topraklara uygulanan biyokömürün kıvam limitleri ile Proctor sıkışma parametreleri üzerindeki etkilerini ve tarımsal uygulamalarda sürdürülebilir toprak yönetimine katkısını ortaya koymak amaçlanmaktadır.

MATERYAL VE METOT

Materyal

Araştırmada kullanılan toprak örnekleri ve örneklerin analize hazırlanması

Bu çalışmada, Erzurum yöresinde yer alan Erzurum Ovası ve Daphan Ovası'ndaki toprak işlemeli tarım alanlarında yaygın olarak görülen bazalt, kireçtaşı ve kollüvyal kökenli ana materyaller üzerinde gelişmiş tarım toprakları kullanılmıştır. Seçilen alanlar, benzer toprak sıcaklık ve nem rejimlerine sahip olması açısından değerlendirmeye alınmıştır. Örneklemeye çalışmaları, Daphan Ovası'nda Vertisol ordosunda kil tekstür sınıfında Pellustert, Erzurum Ovası'ndan ise Entisol ordosunda, sırasıyla tın tekstür sınıfında Fluvaquent ve kumlu tın tekstür sınıfında Ustorthent büyük toprak gruplarını temsil edecek şekilde yürütülmüştür. Örnekler 0-20 cm derinliğindeki işleme katmanından alınmıştır. Arazi koşullarında alınan toprak örnekleri, laboratuvar ortamında (20–25 °C sıcaklık aralığında) kurutulmuş; içerdikleri taş, çakıl, bitki artıkları ve benzeri yabancı materyallerden temizlenmiştir. Deneme kurmak amacıyla her bir örnek 8.0 mm çapındaki elekten geçirilerek homojen hale getirilmiştir. Ayrıca, toprakların bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesine yönelik analizlerde kullanılmak üzere, her örnekten yaklaşık 2 kg ağırlığında alt örnekler alınmış ve bu örnekler 2 mm çapındaki elekten elenerek analizlere uygun hale getirilmiştir. Örneklemeye noktalarının belirlenmesinde, Akgül (1992) ve Özgül (2003) tarafından yapılan önceki çalışmalardan yararlanılmış ve bu çalışmalar referans alınmıştır.

Örneklerin alındığı ilin coğrafi konumu ve iklim özellikleri

Çalışmada kullandığımız toprak örnekleri, Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan Erzurum ili sınırları içerisinde bulunan Daphan ve Erzurum ovalarından alınmıştır. Erzurum ili, 39°55' – 40°35' kuzey enlemleri ile 41°15' – 42°35' doğu boylamları arasında konumlanan rakımı ortalama 1850 metre yükseltidedir. Yüksek rakımının ve dağlık konumu nedeniyle karasal iklim özellikleri gösteren şehirde, kışlar uzun, soğuk ve karlı geçmektedir. Yaz ayları ise kısa, ılıman ve kurak geçmektedir. Meteorolojik verilere göre (1929-2024 yılları arası) yıllık ortalama sıcaklık yaklaşık 5 ile 6°C arasında (5.8°C) olup yıllık yağış miktarı yaklaşık 400–500 mm arasında (430.9 mm) değişmektedir (Anonim 2025). Şehre hakim olan bu iklim tipi, bitki gelişimi üzerinde önemli ölçüde etkili olmakta, özellikle don olayları, düşük sıcaklıklar ve nem yetersizliği bitki gelişim süreçlerini sınırlandırmaktadır.

Biyokömür

Bu çalışmada kullanılan biyokömür (BK), kentsel organik atık ile arıtma çamuru karışımından elde edilmiş olup, %21.17 organik karbon (eşdeğer olarak %36.50 organik madde) içeriğine, 7.74 pH değerine, 9.44 mS cm⁻¹ elektriksel iletkenliğe ve 1.71 g cm⁻³ tane yoğunluğuna sahiptir (Tablo 1).

Yöntemler

Laboratuvar analiz yöntemleri

Toprak tekstürü

Toprakların bünyeleri, Bouyoucos hidrometre yöntemi kullanılarak belirlenmiştir (Gee and Bauder 1986).

Organik karbon (OC) ve organik madde (OM)

Toprakların ve biyokömürün OC ve OM miktarları, Smith-Weldon yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir (Nelson and Sommers 1982).

Kasyon değişim kapasitesi (KDK)

Toprak örnekleri öncelikle 1 N ve pH 8.2 değerine sahip sodyum asetat çözeltisi ile işleme tabi tutularak sodyum adsorpsiyonu sağlanmıştır. Daha sonra, 1 N ve pH'sı 7.0 olan amonyum asetat çözeltisi kullanılarak ekstraksiyon yapılmış; elde edilen süzüntülerde Na⁺ konsantrasyonu alev fotometresiyle ölçülmüş ve bu veriler kullanılarak kasyon değişim kapasitesi hesaplanmıştır (Rhoades 1982a).

Toprak reaksiyonu (pH)

Toprakların pH değerleri, 1:2.5 oranında hazırlanmış toprak-su süspansiyonunda belirlenirken; biyokömürün pH ölçümü ise saturasyon ekstraktından elde edilen süzüntülerde, cam elektrotlu pH metre ile belirlenmiştir (McLean 1982).

Kireç

Topraklardaki kireç miktarları, Scheibler Kalsimetresi kullanılarak hacimsel yöntemle belirlenmiştir (Nelson 1982).

Elektriksel iletkenlik (EC)

Toprak örneklerinin elektriksel iletkenlik değerleri 1:2.5 oranında hazırlanan toprak-su karışımlarından elde edilen süspansiyonlarda belirlenmiştir. Biyokömüre ait EC değerleri ise, saturasyondan elde edilen ekstraktın süzülmesiyle elde edilen numunelerde ölçülmüştür. (Rhoades 1982b).

Tane yoğunluğu

Tane yoğunluğu analizlerinde piknometre yöntemi kullanılmıştır (Blake and Hartge 1986).

Agregat stabilitesi (AS)

Toprakların agregat stabilitesi, hava kurusu 1-2 mm boyutundaki agregat fraksiyonlarında, 0.25 mm elek açıklığına sahip, 12.7 mm darbe uzunluğu ve 42 devir/dakika darbe frekansı ile çalışan Yoder tipi ıslak eleme cihazı kullanılarak belirlenmiştir (Kemper and Rosenau 1986).

$$AS = [(P1-P2) / (P-P2)] \times 100$$

AS: Agregat stabilitesi, %

P1: Stabil agregat + Kum miktarı, g

P2: Kum miktarı, g

P: Fırın kuru toprak miktarı, g

Kıvam limitleri

Likit limit (LL), plastik limit (PL), plastiklik indeksi (PI), ufalanabilirlik (gevreklik) indeksi ve büzülme limiti (BL)'ni belirlemek amacıyla, deneme sonrası topraklardan yaklaşık 3'er kg hava kurusu örnek alınmış ve 0.42 mm'lik elekten geçirilmiştir. Elek altından elde edilen örneklerden yaklaşık 500 g'lık alt örnekler alınarak, plastik nem düzeyine (cam macunu kıvamı) ulaşacak şekilde homojen biçimde karıştırılarak nemlendirilmiş ve ardından hidrolik denge sağlanması amacıyla kapaklı alüminyum kutular içerisinde 24 saat süreyle bekletilmiştir.

Likit limit (LL)

Likit limit (LL) değerleri, uç açısı 30° ve ağırlığı 80 gram olan koniye sahip cone penetrometre cihazı kullanılarak üç nokta yöntemiyle belirlenmiştir. Koninin 20 mm derinliğe batmasıyla elde edilen nem düzeyi likit limit olarak esas alınmıştır (McBride 1993).

Plastik limit (PL)

Plastik limit tayini, toprak macunu örneklerinin cam yüzey üzerinde yaklaşık 3 mm çapında çubuklar haline getirilebildiğı durumdaki nem içeriğinden hesaplanmıştır (McBride 1993).

Plastiklik indeksi (PI)

Plastiklik indeksi, likit limit ile plastik limit arasındaki fark ($PI = LL - PL$) alınarak hesaplanmıştır (McBride 1993).

Büzölme limiti (BL)

Büzölme limiti (BL), ASTM D427-04 standart yöntemi kullanılarak belirlenmiştir (ASTM 1992).

Ufalanabilirlik (Gevreklik) indeksi (FI)

Ufalanabilirlik indeksi, plastik limit ile büzölme limiti arasındaki nem içeriğı farkından ($FI = PL - BL$) hesaplanmıştır (Hemmat *et al.* 2010).

Proctor sıkıştırma testi

Toprakların sıkışabilirlik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, farklı nem içeriklerinde yapılan sıkıştırma deneylerinde optimum su içeriğı ve bu neme karşılık gelen maksimum kuru birim hacim ağırlık Proctor yöntemi ile tespit edilmiştir. Deneylerde kullanılan Proctor sıkıştırma seti; yaka, sıkıştırma kabı, alt tabla ve tokmaktan oluşmaktadır. Deney prosedürü kapsamında, iç çapı 102 mm ve yüksekliğı 115 mm olan sıkıştırma silindirine toprak üç parça halinde yerleştirilmiş, 50.8 mm çapında ve 2.5 kg ağırlığında olan tokmak, 30.5 cm yükseklikten serbest düşme prensibiyle uygulanarak sıkıştırma gerçekleştirilmiştir. Artan nem düzeylerinde yapılan bu işlemler sonucunda, toprakların sıkışma davranışlarını yansıtan tipik Proctor eğrileri elde edilmiştir.

Her bir toprak örneğinden hava kurusu halde 4 kg örnek tartılmış, bu örneklerle başlangıçta toplam kütlenin %3'üne karşılık gelen 120 ml su eklenmiş ve sonraki her bir sıkıştırma aşamalarında da 120 ml su ilavesi yapılmıştır. Nemlendirme işleminin ardından örnekler homojen bir biçimde karıştırılmış ve Proctor sıkışma testi uygulanmıştır. Deney sürecinde, her bir örnek üç eşit parçaya ayrılarak kalıba yerleştirilmiş, her tabaka tokmakla 25 darbe uygulanarak sıkıştırılmıştır. Üç aşamada topraklar sıkıştırıldıktan sonra, kalıp üzerindeki yaka çıkarılmış ve üst kısımdan taşan fazla toprak spatula ile düzeltilmiştir. Kalıp içerisinde sıkıştırılmış halde bulunan toprağın toplam kütlesi, kalıp hacmine (911 cm³) bölünerek yaş birim hacim ağırlığı hesaplanmıştır. Daha sonra, kalıptan çıkarılan örnekten alt numune alınarak nem içeriği belirlenmiştir. Elde edilen yaş birim hacim ağırlığı ve nem değerleri kullanılarak kuru birim hacim ağırlığı ilgili eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır (ASTM 2007).

$$\delta b_{dry} = \delta b_{wet} / 1+w$$

δb_{dry} : Kuru birim hacim ağırlığı, g cm⁻³

δb_{wet} : Islak birim hacim ağırlığı, g cm⁻³

w: Toprak örneğinin ağırlık esasından nem içeriği, %

Biyokömür inkübasyon denemesinin kurulması ve yürütülmesi

Bu araştırmada; biyokömür uygulamasının kil, tın ve kumlu tın tekstür sınıflarına ait toprakların kıvam limitleri ile Proctor sıkışma testi parametreleri üzerine etkilerini belirlemek amacıyla laboratuvar da bir inkübasyon denemesi yürütülmüştür. Hava kurusu deneme toprak örnekleri 8 mm'lik elekten geçirilmiş ve nem içerikleri belirlenerek fırın kuru ağırlık esas alınarak, kil, tın ve kumlu tın tekstür sınıfındaki her bir toprak örneğinden 15'er kg tartılmıştır. Bu topraklara, 1 mm elekten elenmiş ve ağırlık esasına göre hazırlanmış biyokömür, %0 (kontrol), %0.5, %1, %2 ve %4 oranlarında ilave edilmiş ve karışımların homojenliği sağlanmıştır. Hazırlanan toprak+biyokömür karışımları, her biri 10 cm derinliğinde, 45 cm uzunluğunda ve 25 cm genişliğinde olan plastik kaplara yerleştirilmiştir. Deneme, laboratuvar ortamında üç tekerrürlü olarak yürütülmüş ve tekstür × doz kombinasyonu için toplamda 45 adet örnek hazırlanmıştır (3 toprak tekstürü × 5 doz × 3 tekerrür). Deneme kaplarına yerleştirilen karışımlar yaklaşık tarla kapasitesi nem düzeyine getirilmiş ve laboratuvar koşullarında 12 ay süreyle inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon süresince deneme topraklarının nem içerikleri düzenli aralıklarla kontrol edilmiş, buharlaşma kayıplarını dengelemek amacıyla her iki veya üç günde bir tarla kapasitesini koruyacak miktarda su ilavesi yapılmıştır. İnkübasyon süresi sonunda plastik kaplardan yeterli miktarda örnek alınarak araştırmada hedeflenen parametrelere yönelik laboratuvar çalışmaları yapılmıştır.

İstatistiksel Değerlendirme

Elde edilen veriler varyans analizi ile (ANOVA) değerlendirilmiş, uygulamalar arasındaki farklılıkların belirlenmesi amacıyla Tukey'in çoklu karşılaştırma testi kullanılmıştır. Ayrıca, araştırmada ölçülen parametreler arasındaki ilişkileri incelemek adına korelasyon ve regresyon analizleri yapılmıştır. Tüm istatistiksel analizler SPSS paket programı (IBM 2017) aracılığı ile gerçekleştirilmiştir.



ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Araştırmada Kullanılan Toprakların Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Araştırmada kullanılan topraklara ait bazı temel fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 1’de verilmiştir. Yapılan analizlere göre, I numaralı toprağın kil, silt ve kum içerikleri sırasıyla %58.59, %25.42 ve %15.99 olarak belirlenmiş ve söz konusu toprak "kil" (C) tekstür sınıfında yer almaktadır. II numaralı toprakta kil %21.84, silt %31.45 ve kum %46.71 tespit edilmiş ve "tın" (L) sınıfına girdiği belirlenmiştir. III numaralı toprak örneğinde ise kil %14.47, silt %27.12 ve kum %58.41 bulunmuş ve bu toprağın "kumlu tın" (SL) tekstür sınıfına girdiği belirlenmiştir. Tüm toprakların pH değerleri hafif alkali özellik göstermekte ve ayrıca kireç içerikleri sırasıyla %1.48, %2.13 ve %0.64 olarak ölçülmüş ve tamamı “çok az” kireç sınıfında yer almıştır. Organik madde içerikleri ise sırasıyla %1.43, %1.52 ve %1.97 olarak tespit edilmiştir. Katyon değişim kapasiteleri (KDK) açısından değerlendirildiğinde ise, I, II ve III numaralı topraklarda sırasıyla 52.95, 30.74 ve 19.24 cmol kg⁻¹ değerlerine ulaşılmış ve en yüksek KDK değeri kil içeriğinin en fazla, kum içeriğinin ise en düşük olduğu "kil" tekstür sınıfındaki (Pellustert) toprakta tespit edilmiştir.

Tablo 1. Araştırmada Kullanılan Deneme Topraklarının ve Biyokömürün Bazı Tanımlayıcı Özellikleri

Parametreler	Topraklar ve Biyokömür						
	Toprak I	Toprak II	Toprak III	Biyokömür			
Kil (%)	58.59±1.41	21.84±1.50	14.47±1.05	Tane büyüklük dağılımı (%)	Kuru eleme	1000-500 μ	11.53
Silt (%)	25.42±2.08	31.45±1.07	27.12±1.12			500-250 μ	13.54
Kum (%)	15.99±2.36	46.71±1.24	58.41±1.31			250-100 μ	14.84
Tekstür sınıfı	Kil	Tın	Kumlu tın			100-53 μ	25.05
Büyük toprak grubu	Pellustert	Fluvaquent	Ustorthent			<53 μ	35.04
KDK (cmol kg ⁻¹)	52.95±1.32	30.74±0.97	19.24±0.72		Islak eleme	1000-500 μ	3.43
CaCO ₃ (%)	1.48±0.02	2.13±0.06	0.64±0.03			500-250 μ	2.93
Organik madde (%)	1.43±0.06	1.52±0.12	1.97±0.10			250-100 μ	2.05
pH	7.47±0.02 ^Ψ	7.58±0.04 ^Ψ	7.23±0.06 ^Ψ			100-53 μ	2.83
EC (mS cm ⁻¹)	1.18±0.04 ^Ψ	1.02±0.02 ^Ψ	0.58±0.04 ^Ψ			<53 μ	88.76
Tane yoğunluğu (g cm ⁻³)	2.66±0.02	2.62±0.02	2.67±0.02	1.71±0.02			

^Ψ 1:2.5 toprak:su süspansiyonunda belirlenmiştir.

^Ω Saturasyon ekstraktında belirlenmiştir.

Biyokömürün Toprak Organik Karbon (OC) İçeriğine Etkisi

Yaptığımız bu araştırma sonucunda, biyokömürün toprak organik karbonuna (OC) etkisinin anlamlı ($p<0.001$) olduğu belirlenmiştir. Üç farklı toprak tekstüründe de biyokömür dozu arttıkça OC miktarının da arttığı gözlemlenmiştir (Tablo 2).

Toprak I'de (kil), kontrol grubunda %0.67 olan organik karbon göz önüne alındığında %0.5 doz biyokömür uygulamasında OC değeri %0.67'den %0.74'e çıkmış ve %10.45 oranında artış göstermiştir. Aynı şekilde, %1 dozda %28.36 artış göstermiştir. Yine %2 oranında biyokömür uygulanan dozda %49.25 artmış ve %4 dozda %76.12 oranında artış kaydedilmiştir. Killi toprakta en yüksek OC değeri %1.18 ile %4 dozunda elde edilmiştir (Tablo 2). Toprak II'de (tın) benzer bir artış eğilimi görülmüştür. OC değeri kontrol grubunda %0.73 iken %0.5 dozda %0.82 (%12.33 artış), %1 dozda %0.89 (%21.92 artış), %2 dozda %1.12 (%53.42 artış) ve %4 dozda %1.46 (%100 artış) olarak ölçülmüştür. Bu toprakta da en yüksek OC değeri %4 doz uygulamasıyla elde edilmiştir (Tablo 2). Toprak III'te de (kumlu tın) biyokömür uygulamaları OC içeriği üzerine belirgin bir etki göstermiştir. Kontrol grubundaki OC değeri %0.77 iken %0.5 dozda %0.86 (%11.69 artış), %1 dozda %0.94 (%22.08 artış), %2 dozda %1.17 (%51.95 artış) ve %4 dozda %1.56 (%102.60 artış) olarak belirlenmiştir (Tablo 2).

Genel ortalamalara bakıldığında kontrol grubuna göre %0.5, %1, %2 ve %4 doz uygulamaları sırasıyla %10.96, %23.29, %50.68 ve %91.78 oranlarında OC artışı sağlamıştır. Biyokömür dozu ile OC arasındaki korelasyon katsayısı Toprak I, II ve III için sırasıyla 0.981^{**}, 0.948^{**} ve 0.943^{**} gibi oldukça yüksek ve anlamlı düzeyde bulunmuştur. Bu güçlü pozitif korelasyonlar, biyokömürün toprak organik karbonunu artırmada etkili bir toprak düzenleyicisi olduğunu göstermektedir (Tablo 2 ve Tablo 3). Araştırmada kullanılmış olan biyokömür %21.16 organik karbon içermekte olup uygulama dozu arttıkça toprakların OC içeriklerinde önemli düzeyde artışlar sağlamıştır. Elde ettiğimiz sonuçlar güncel literatürler ile de desteklenmekte olup biyokömür ilavesinin toprak organik karbon içeriğinde önemli düzeylerde artışlar sağladığı belirtilmektedir. Blanco-Canqui (2017), Al-Wabel *et al.* (2018), Mendoza and Horn (2018), El-Naggar *et al.* (2019), Palansooriya *et al.* (2019), Tanure *et al.* (2019), Han *et al.* (2020), Li *et al.* (2025), Karlsson *et al.* (2025), Yan *et al.* (2026) tarafından yapılan çalışmalarda farklı özelliklere sahip biyokömürün farklı dozlarda uygulanması sonrasında toprak OC içeriğinin %32.3 ile %248 arasında değişen oranlarda artışlar meydana geldiği belirtilmektedir.

Tablo 2. Toprakların Organik Karbon (OC), Agregat Stabilitesi (AS), Likit Limit (LL), Plastik Limit (PL), Plastiklik İndeksi (PI), Büzülme Limiti (BL) ve Ufalanabilirlik İndeksi (FI) Değerleri Üzerine Biyokömürün Etkileri

Topraklar	Uygulama dozları (w/w) (%)	Organik karbon (%)	Agregat stabilitesi (%)	Likit limit (%)	Plastik limit (%)	Plastiklik indeksi (%)	Büzülme limiti (%)	Ufalanabilirlik indeksi (%)
Toprak I (Kil)	0 (Kontrol)	0.67±0.03d	23.69±1.28d	67.39±0.87c	40.15±1.43c	27.25±0.66a	16.21±0.47d	23.94±1.12c
	0.5	0.74±0.01d	24.76±0.93cd	69.15±1.17bc	41.68±1.01bc	27.47±0.44a	17.02±0.30cd	24.66±0.74bc
	1	0.86±0.03c	27.09±0.92c	71.22±1.37b	44.47±0.47b	26.75±1.16a	17.91±0.17bc	26.55±0.62b
	2	1.00±0.02b	35.91±2.85b	74.05±0.82a	49.18±2.15a	24.88±1.34b	18.34±0.42b	30.84±1.75a
	4	1.18±0.04a	39.06±1.68a	76.30±0.76a	51.79±1.00a	24.51±0.76b	21.08±0.66a	30.71±0.52a
Ortalama		0.89±0.19C	30.10±6.58C	71.62±3.45A	45.45±4.70A	26.17±1.50A	18.11±1.75A	27.34±3.16A
	<i>p</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>0.007</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>
Toprak II (Tın)	0 (Kontrol)	0.73±0.02e	31.53±2.39c	37.87±1.36d	24.57±0.98c	13.29±0.81a	10.16±0.65c	14.42±0.33c
	0.5	0.82±0.02d	33.32±3.78c	40.07±1.31cd	26.80±1.91bc	13.27±0.63a	11.24±0.83c	15.56±1.68bc
	1	0.89±0.02c	39.03±1.37b	41.57±0.61c	30.89±1.62b	10.68±1.15b	12.93±0.64b	17.96±1.01b
	2	1.12±0.03b	40.54±3.44b	45.09±1.02b	35.36±1.60a	9.74±0.86b	13.97±0.53b	21.39±1.19a
	4	1.46±0.03a	50.89±3.87a	49.39±1.13a	38.85±1.39a	10.54±1.21b	16.28±0.48a	22.57±1.04a
Ortalama		1.00±0.27B	39.06±7.52B	42.80±4.30B	31.29±5.61B	11.51±1.74B	12.91±2.28B	18.38±3.42B
	<i>p</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>0.002</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>
Toprak III (Kumlu tın)	0 (Kontrol)	0.77±0.02e	25.71±0.92b	27.16±1.17d	19.38±1.08e	7.79±0.79ns	6.83±0.29d	12.55±1.26d
	0.5	0.86±0.02d	43.89±5.72a	29.91±0.66cd	21.97±0.20d	7.95±0.51	7.66±0.41cd	14.31±0.22cd
	1	0.94±0.02c	47.58±3.99a	32.57±1.00c	24.93±1.34c	7.64±0.83	8.96±0.85bc	15.97±1.11bc
	2	1.17±0.03b	47.59±3.51a	36.04±1.22b	27.83±1.01b	8.22±0.37	10.32±1.12b	17.51±0.59b
	4	1.56±0.02a	48.13±3.62a	41.48±1.50a	32.44±0.54a	9.04±0.97	12.34±0.98a	20.10±0.77a
Ortalama		1.06±0.29A	42.58±9.45A	33.43±5.24C	25.31±4.78C	8.13±0.80C	9.22±2.13C	16.09±2.79C
	<i>p</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>0.220</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>
Genel ortalama	0 (Kontrol)	0.73±0.05e	26.98±3.80d	44.14±18.07e	28.03±9.42e	16.11±8.71a	11.06±4.14d	16.97±5.36c
	0.5	0.81±0.06d	33.99±8.99c	46.38±17.66d	30.15±8.96d	16.23±8.75a	11.97±4.12d	18.18±4.98c
	1	0.90±0.04c	37.90±9.17bc	48.46±17.54c	33.43±8.74c	15.03±8.94b	13.27±3.92c	20.16±4.94b
	2	1.10±0.08b	41.35±5.83b	51.73±17.22b	37.45±9.49b	14.28±8.02b	14.21±3.54b	23.25±6.04a
	4	1.40±0.18a	46.03±6.04a	55.72±15.84a	41.02±8.58a	14.70±7.44b	16.57±3.85a	24.46±4.86a
<i>Toprak (p)</i>		<i>0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>
<i>Biyokömür doz (p)</i>		<i>0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>
<i>Toprak × Biyokömür doz (p)</i>		<i>0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>0.021</i>	<i>0.526</i>	<i>0.001</i>	<i>0.414</i>	<i>0.261</i>

Farklı harflerle gösterilen değerler istatistiksel olarak birbirinden farklıdır ($p<0.05$); ns: İstatistiksel olarak önemsiz

Tablo 3. İncelenen Parametreler Arasındaki Pearson Korelasyon Katsayıları

	BK	OC	AS	LL	PL	PI	BL	FI	OMC	MBD
Toprak I	BK	-								
	OC	.981**	-							
	AS	.931**	.947**	-						
	LL	.965**	.965**	.930**	-					
	PL	.958**	.960**	.961**	.979**	-				
	PI	-.787**	-.795**	-.876**	-.774**	-.886**	-			
	BL	.923**	.947**	.871**	.922**	.922**	-.772**	-		
	FI	.913**	.903**	.946**	.946**	.977**	-.890**	.817**	-	
	OMC	.970**	.958**	.909**	.948**	.929**	-.734**	.892**	.887**	-
	MBD	-.971**	-.938**	-.904**	-.938**	-.952**	.831**	-.872**	-.933**	-.909**
Toprak II	BK	-								
	OC	.948**	-							
	AS	.894**	.908**	-						
	LL	.956**	.978**	.882**	-					
	PL	.968**	.944**	.889**	.973**	-				
	PI	-.761**	-.628*	-.689**	-.669**	-.822**	-			
	BL	.963**	.952**	.868**	.971**	.976**	-.750**	-		
	FI	.946**	.914**	.879**	.949**	.989**	-.849**	.934**	-	
	OMC	.977**	.941**	.921**	.954**	.961**	-.742**	.945**	.945**	-
	MBD	-.978**	-.939**	-.847**	-.943**	-.955**	.751**	-.955**	-.930**	-.952**
Toprak III	BK	-								
	OC	.943**	-							
	AS	.752**	.568*	-						
	LL	.970**	.968**	.684**	-					
	PL	.980**	.959**	.715**	.992**	-				
	PI	.507	.616*	.21	.632*	.525*	-			
	BL	.938**	.933**	.646**	.964**	.960**	.582*	-		
	FI	.960**	.928**	.729**	.960**	.977**	.454	.879**	-	
	OMC	.957**	.909**	.715**	.927**	.936**	.483	.921**	.897**	-
	MBD	-.968**	-.910**	-.793**	-.937**	-.939**	-.530*	-.900**	-.919**	-.957**
Genel korelasyon	BK	-								
	OC	.902**	-							
	AS	.691**	.757**	-						
	LL	.24	-.033	-.380*	-					
	PL	.483**	.211	-.148	.959**	-				
	PI	-.085	-.328*	-.621**	.937**	.798**	-			
	BL	.450**	.19	-.185	.949**	.982**	.800**	-		
	FI	.496**	.221	-.118	.944**	.991**	.779**	.947**	-	
	OMC	.466**	.175	-.168	.955**	.984**	.811**	.974**	.969**	-
	MBD	-.308*	-.021	.314*	-.985**	-.970**	-.891**	-.970**	-.947**	-.970**

** Korelasyon 0.01 seviyesinde önemlidir.

* Korelasyon 0.05 seviyesinde önemlidir.

BK: Biyokömür, OC: Organik Karbon, AS: Agregat Stabilitesi, LL: Likit Limit, PL: Plastik Limit, PI: Plastiklik İndeksi, BL: Büzülme Limiti, FI: Ufalanabilirlik İndeksi, OMC: Optimum Nem İçeriği, MBD: Maksimum Hacim Ağırlığı

Biyokömürün Agregat Stabilitesi (AS) Üzerine Etkisi

Agregat stabilitesi parametresi üzerinde biyokömür uygulamalarının çok önemli derecede ($p < 0.001$) etkili olduğu belirlenmiştir. Uygulama dozlarındaki artış özellikle kumlu tınlı toprağın agregat stabilitesinde oransal olarak daha fazla artış sağlamıştır. Toprak I’de AS değeri kontrol grubunda %23.69 iken uygulama dozu arttıkça AS değeri de artmış ve en yüksek doz olan %4’lük uygulamada %39.06’ya çıkarak yaklaşık %65 oranında bir artış göstermektedir (Tablo 2). Toprak II’de AS %31.53’ten başlayarak artan dozlarla birlikte %50.89’a ulaşmıştır. Bu da yaklaşık %61’lik bir artış olduğunu göstermiştir. Toprak III’te ki

artış ise en yüksek artıştır. Kontrol değeri olan %25.71, %0.5 dozda %43.89'a, %1 dozda %47.58'e, %2 dozda %47.59'a ve %4 dozda %48.13'e yükselmiştir. Bu da kontrol grubuna göre %87'lik bir artışa karşılık gelmektedir. Agregat stabilitesinin bu oranda artması, biyokömürün özellikle kum içeriği yüksek olan topraklarda agregat yapısını daha fazla güçlendirdiğini göstermektedir. Genel ortalamalara göre agregat stabilitesi kontrol grubunda %26.98 iken %4 doz biyokömür uygulamasında bu değer %46.03'e ulaşmış ve %70.61 oranında bir artış göstermiştir (Tablo 2). Korelasyon analizleri, biyokömür ile AS arasında çok önemli düzeyde pozitif ilişki olduğunu göstermektedir. Söz konusu korelasyon katsayıları toprak I, II ve III için sırasıyla 0.931**, 0.894** ve 0.752** olarak belirlenmiştir (Tablo 3).

Artan organik madde ve organik karbon içeriğine bağlı olarak toprak fiziksel özelliklerindeki ve agregat özelliklerindeki iyileşmeler birçok araştırmacı tarafından uzun yıllardır incelenmektedir. Son yıllarda önemli bir organik karbon kaynağı olarak biyokömürün toprak özellikleri üzerine etkileri araştırılmakta olup genel olarak toprak özelliklerini iyileştirici yönde etki yaptığı ifade edilmektedir. Toprağın sürdürülebilir kullanımı ve kalitesi açısından en önemli parametrelerden biri olan agregat stabilitesinin de biyokömür ilavesiyle genellikle pozitif yönlü değişimler gösterdiği hem arazi hem de laboratuvarla yapılan çalışmalarla ortaya konulmuştur. Abdelhafez *et al.* (2014), siltli tın bir toprakta ağırlık esasına göre %1, %2.5, %5 ve %10 oranlarında şeker kamışı ve portakal kabuğu orjinli biyokömür uygulamışlardır. Şeker kamışından elde edilen biyokömür uygulaması sonrasında, agregat stabilitesi değerlerinde kontrol grubuna kıyasla sırasıyla %63, %121, %179 ve %226 oranında artış saptanmıştır. Portakal kabuğu biyokömürü uygulandığında ise bu artışlar sırasıyla %28, %51, %86 ve %121 olarak belirlenmiştir. Amoakwah *et al.* (2017) tropikal bölgede (Ghana) kumlu tın tekstüre sahip araziye 10 ve 20 ton/ha mısır koçanı biyokömür uygulamasıyla agregat stabilitesinin kontrole göre %27 ve %53 oranında arttığını belirlemişlerdir. Liang *et al.* (2008), Liu *et al.* (2012), Lei and Zhang (2013), Khademalrasoul *et al.* (2014), Soinne *et al.* (2014), Baiamonte *et al.* (2015), Burrell *et al.* (2016), Obia *et al.* (2016), Omondi *et al.* (2016), Blanco-Canqui (2017), Bai *et al.* (2020), Islam *et al.* (2021)'ın farklı biyokütlelerden elde edilmiş farklı özelliklerdeki biyokömürlerin farklı dozlarda uygulandığı laboratuvar ve arazi çalışmalarında agregat stabilitesinin kontrole göre %21 ile %220 arasında değişen oranlarda arttığı belirlenmiş olup, uygulama dozlarının artmasıyla birlikte agregat stabilitesinin de arttığı tespit edilmiştir.

Biyokömürün Likit Limit (LL) Değerleri Üzerine Etkisi

Yapılan araştırmada biyokömür uygulamalarının toprakların likit limit (LL) değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı ($p < 0.001$) bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen veriler, uygulama dozu arttıkça LL değerlerinde istikrarlı bir artış meydana geldiğini

ortaya koymaktadır (Tablo 2; Şekil 1; 2; 3). Toprak I’de (kil), kontrol grubunda LL değeri %67.39 olarak belirlenmiştir. Bu değer %0.5 doz biyokömür uygulamasıyla %69.15’e yükselmiş (%2.61 artış), %1 dozda %71.22 (%5.68 artış), %2 dozda %74.05 (%9.88 artış) ve %4 dozda %76.30 (%13.22 artış) değerlerine ulaşmıştır. En yüksek LL değerleri %4 biyokömür uygulamasında elde edilmiştir (Tablo 2). Toprak II’de de (tın) benzer bir artış eğilimi gözlenmiştir. Kontrol grubunda LL değeri %37.87 iken, %0.5 doz uygulamasında %40.07 (%5.81 artış), %1 dozda %41.57 (%9.77 artış), %2 dozda %45.09 (%19.07 artış) ve %4 dozda %49.39 (%30.42 artış) seviyelerine ulaşmıştır (Tablo 2). Toprak III’te (kumlu tın) ise biyokömür uygulamaları LL değerlerini sırasıyla, %27.16 (kontrol)’den, %29.91 (%10.13 artış), %32.57 (%19.92 artış), %36.04 (%32.70 artış) ve %41.48 (%52.72 artış) seviyelerine yükseltmiştir. Bu toprakta en yüksek artış oranı %4 doz uygulamasında meydana gelmiştir (Tablo 2). Genel ortalama değerlerine göre, LL değeri kontrol grubunda %44.14 iken, %0.5 dozda %46.38, %1 dozda %48.46, %2 dozda %51.73 ve %4 dozda %55.72 olarak ölçülmüştür. Kontrole göre artışlar sırasıyla %5.07, %9.79, %17.20 ve %26.23 düzeyinde olmuştur (Tablo 2). Biyokömür (BK) ile LL arasında önemli pozitif korelasyonlar belirlenmiştir. Bu korelasyon katsayıları toprak I, II ve III için sırasıyla 0.965**, 0.956** ve 0.970** düzeyinde olup, istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. Organik karbon (OC) ile LL arasında da önemli düzeyde korelasyonlar belirlenmiş olup, katsayılar toprak I, II ve III için 0.965**, 0.978** ve 0.968***’dir (Tablo 3). Elde edilen sonuçlar, biyokömür uygulamasının toprakların likit limitini belirgin düzeyde yükselttiğini göstermektedir.

Biyokömürün Plastik Limit (PL) Değerleri Üzerine Etkisi

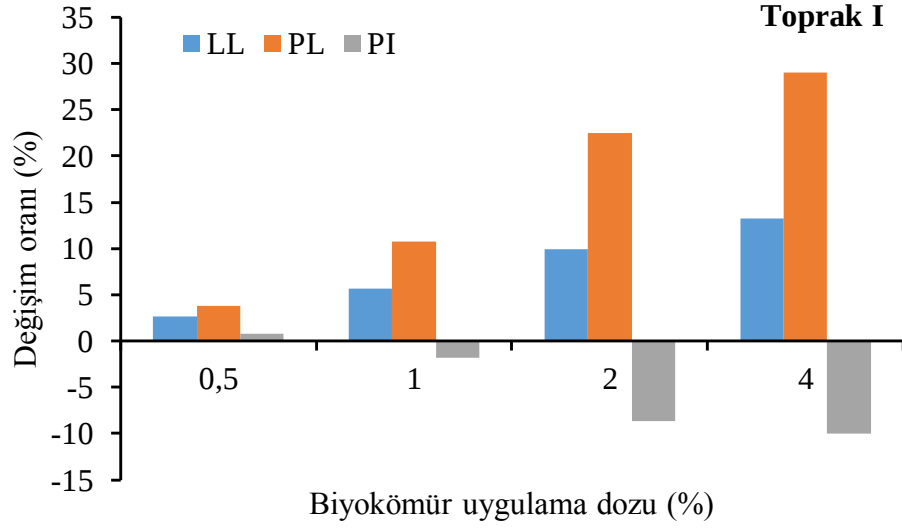
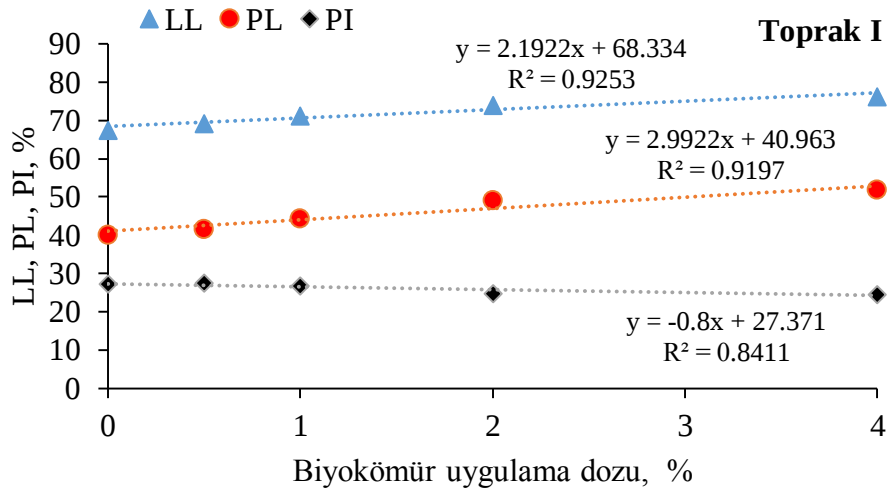
Çalışmada biyokömür uygulamalarının toprakların plastik limit (PL) değerleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı ($p<0.001$) etkiler yaptığı belirlenmiştir. Araştırma topraklarında artan biyokömür dozlarıyla birlikte PL değerlerinde pozitif ve anlamlı artışlar gözlemlenmiştir (Tablo 2; Şekil 1; 2; 3). Bu artış, toprakların plastik kıvama geçiş noktalarının biyokömür ile daha yüksek su içeriğinde gerçekleştiğini göstermektedir. Toprak I’de (kil) kontrol grubunda PL değeri %40.15 olarak ölçülmüştür. Bu değer %0.5 doz uygulamasıyla %41.68’e (%3.81 artış), %1 dozda %44.47’ye (%10.76 artış), %2 dozda %49.18’e (%22.49 artış) ve %4 dozda %51.79’a (%28.99 artış) yükselmiştir. Toprak II’de (tın), biyokömür uygulamaları kontrol grubundaki %24.57’lik PL değerini sırasıyla %26.80 (%9.08 artış), %30.89 (%25.72 artış), %35.36 (%43.92 artış) ve %38.85 (%58.12 artış) seviyelerine yükseltmiştir. Toprak III’te (kumlu tın) de benzer bir eğilim gözlenmiştir. PL değeri kontrol grubunda %19.38 iken, %0.5 dozda %21.97 (%13.36 artış), %1 dozda %24.93 (%28.64 artış), %2 dozda %27.83 (%43.60 artış) ve %4 dozda %32.44 (%67.39 artış) seviyelerine çıkmıştır. Biyokömürün PL üzerine

etkisi kumlu tınlı toprakta tınlı ve killi topraktan daha belirgin olmuştur. Genel ortalama değerlere göre PL kontrol grubunda %28.03 olarak belirlenmişken, biyokömür uygulamalarıyla birlikte bu değer %0.5 dozda %30.15 (%7.56 artış), %1 dozda %33.43 (%19.27 artış), %2 dozda %37.45 (%33.61 artış) ve %4 dozda %41.02'ye (%46.34 artış) yükselmiştir. Plastik limit (PL) ile biyokömür (BK) uygulamaları arasındaki korelasyon katsayıları sırasıyla toprak I için 0.958**, toprak II için 0.968** ve toprak III için 0.980** olarak belirlenmiştir. Organik karbon (OC) ile PL arasındaki korelasyon katsayıları da toprak I, II ve III için sırasıyla 0.960**, 0.944** ve 0.959** olarak belirlenmiştir (Tablo 2 ve Tablo 3).

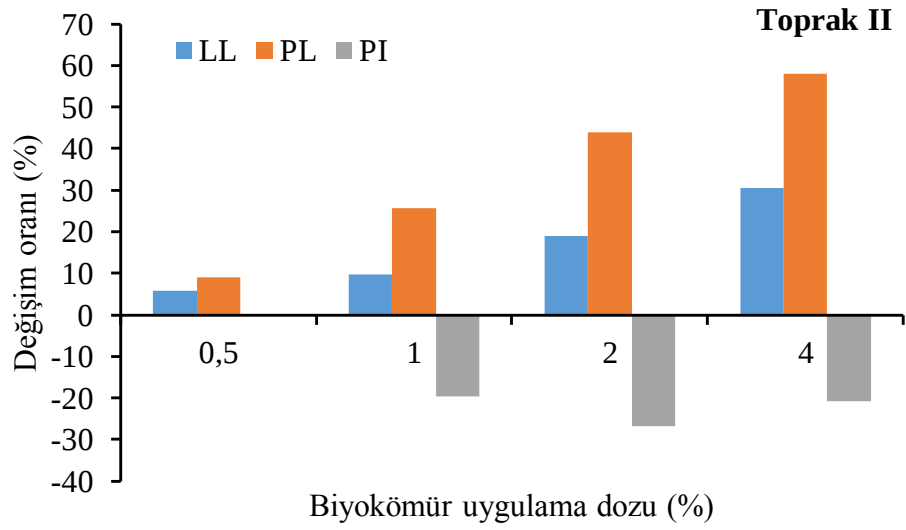
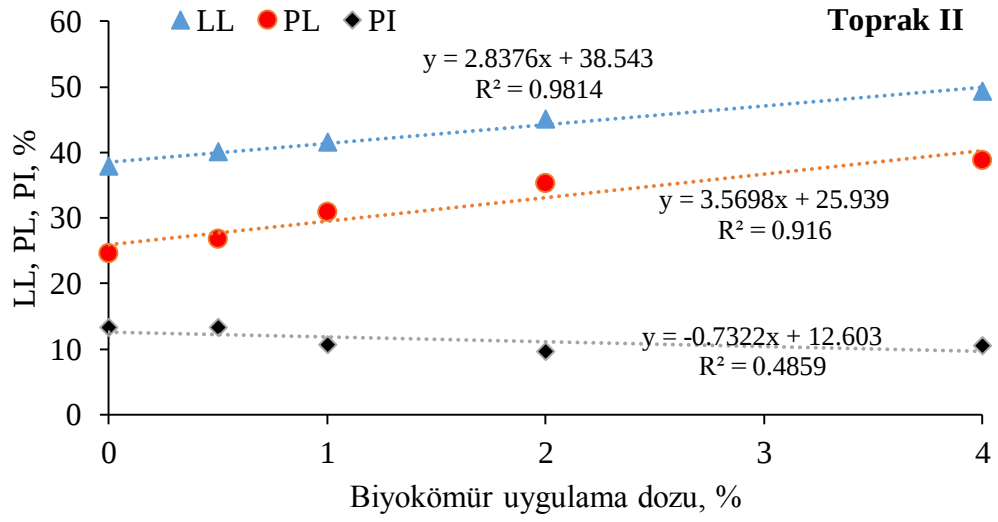
Biyokömürün Plastik İndeksi (PI) Değerleri Üzerine Etkisi

Biyokömür uygulamalarının kil ve tın tekstür sınıfındaki toprakların plastiklik indeksi (PI) değerleri üzerine etkilerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirlenirken, kumlu tın tekstür sınıfındaki toprağın PI değerleri üzerine biyokömürün etkisinin istatistiksel olarak önemsiz ($p = 0.220$) olduğu belirlenmiştir (Tablo 2; Şekil 1; 2; 3). Biyokömür uygulamasının toprakların PI değerleri üzerine etkileri net olmayıp, kontrole göre artışlar ve azalışlar belirlenmiştir. Toprak I (kil) için kontrol grubunda PI değeri %27.25 olarak ölçülmüştür. Bu değer %0.5 doz biyokömür uygulamasında %27.47 (%0.8 artış), %1 dozda %26.75 (%1.8 azalış), %2 dozda %24.88 (%8.7 azalış) ve %4 dozda %24.51 (%10.1 azalış) olarak hesaplanmıştır. Toprak II'de (tın) kontrol grubundaki PI değeri %13.29 iken, %0.5 dozda %13.27 (%0.2 azalış), %1 dozda %10.68 (%19.64 azalış), %2 dozda %9.74 (%26.71 azalış) ve %4 dozda %10.54 (%20.69 azalış) değerlerine gerilemiştir. Toprak III'te (kumlu tın), PI değerleri kontrol grubunda %7.79 olarak belirlenmiştir. Bu değer, biyokömür uygulamasıyla %0.5 dozda %7.95 (%2.05 artış), %1 dozda %7.64 (%1.93 azalış), %2 dozda %8.22 (%5.52 artış) ve %4 dozda %9.04 (%16.05 artış) olarak belirlenmiştir. Kumlu tın toprakta diğerlerine kıyasla plastiklik indeksi daha düşük seviyelerde kalmasına rağmen, artış eğilimi göstermiştir. Genel ortalama değerlere göre PI kontrol grubunda %16.11 iken, %0.5, %1, %2 ve %4 dozlarında sırasıyla %16.23, %15.03, %14.28 ve %14.70 olarak ölçülmüştür (Tablo 2). Bu değerler genel anlamda PI'de küçük çaplı değişimler ve sınırlı bir azalış eğilimi olduğunu ortaya koymaktadır. Korelasyon analizleri sonucunda plastiklik indeksi (PI) ile biyokömür (BK) uygulamaları arasında toprak I'de -0.787**, toprak II'de -0.761** ve toprak III'te ise 0.507 düzeyinde korelasyonlar belirlenmiştir. Organik karbon (OC) ile PI arasındaki korelasyon katsayısı değerleri ise toprak I, II ve III için sırasıyla, -0.795**, -0.628* ve 0.616* olarak belirlenmiştir. Biyokömür uygulamaları PI üzerinde sınırlı ve toprak tipine bağlı değişkenlik gösteren etkiler göstermektedir (Tablo 3).

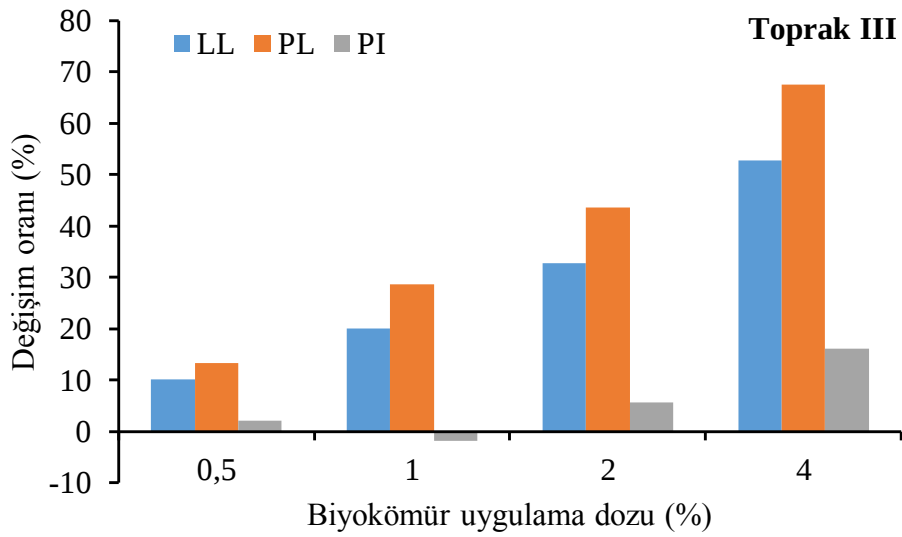
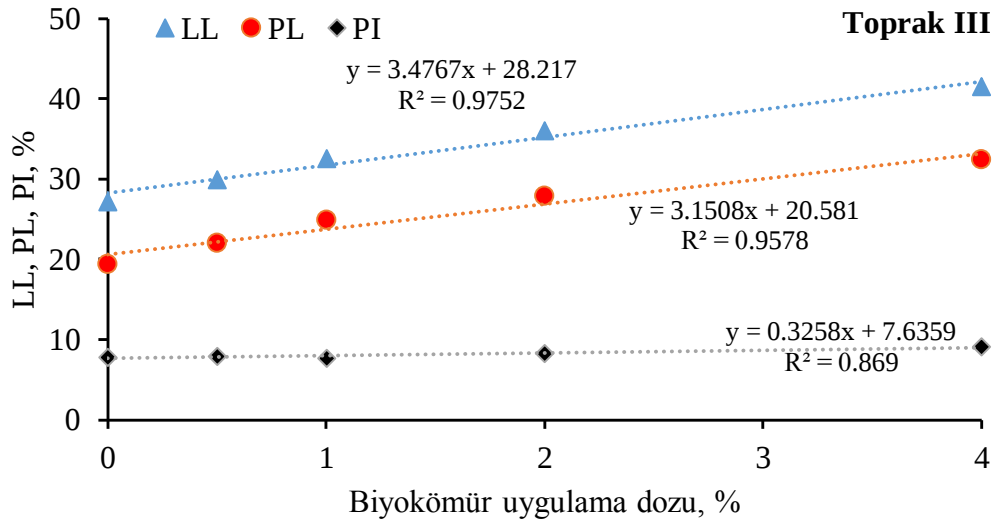
Kıvam limitleri (Atterberg limitleri), toprakların mekanik ve hidrolojik davranışlarının önemli göstergeleridir. Kıvam limitleri hakkındaki bilgiler, toprakların mühendislik açısından, örneğin bina temellerinin stabilitesi ve tarımsal açıdan da toprak işleme ile fiziksel/strüktürel özelliklerin en az zarara uğrayacağı en uygun nem aralığının belirlenmesi ve en düşük seviyede sıkışmaya maruz kalabileceği nem aralığının tespiti açısından çok büyük öneme sahiptir (Zong *et al.* 2016; Blanco-Canqui 2017; Yang and Lu 2021). Rixon *et al.* (1991), Canbolat ve Öztaş (1997), Bhushan and Sharma (2002), Lal and Shukla (2004), Hemmat *et al.* (2010), Arthur *et al.* (2020) toprakların kıvam limiti değerleri ile kil, organik madde ve organik karbon içeriği arasında istatistiksel olarak anlamlı pozitif ilişkiler olduğunu belirtirken, kum içeriği ile anlamlı düzeyde negatif ilişkiler olduğunu belirtmektedirler. Biyokömürün yüksek oranda organik karbon içermesi, yüksek spesifik yüzey, yüksek düzeyde mikro gözeneklilik ve yüksek su tutma kapasitesine sahip olması ve toprak minerallerinden farklı mekaniksel özelliklere sahip olması toprakların mekaniksel özelliklerini önemli düzeyde etkiler (Blanco-Canqui *et al.* 2006; Guo *et al.* 2014; Yang and Lu 2021). Zong *et al.* (2016) kumlu toprağa saman, odun parçaları ve arıtma çamurundan elde edilen biyokömürü %0, 2, 4 ve 6 oranlarında uyguladıkları araştırmalarında toprağın LL değerlerinin %8 ile %22 arasında değişen oranlarda, PI değerlerinin %48 ile %99 arasında değişen oranlarda artış gösterdiğini, PL değerlerinin azalma eğilimi gösterdiğini ifade etmektedirler. Lu *et al.* (2014) pirinç kabuğu biyokömürünün killi toprağa %0, 2, 4 ve 6 oranlarda uygulanmasının PL ile LL değerlerini %15 ile %18 arasında değişen oranlarda artırdığını, PI değerlerinde önemli bir değişimin olmadığını belirtmektedirler. Aksakal *et al.* (2024) arıtma çamuru kullanarak yaptıkları bir çalışmada arıtma çamuru uygulamasının toprakların organik madde içeriğini artırdığını ve artan organik maddenin farklı tekstürdeki toprakların LL ile PL değerlerini artırdığını, PI değerlerinde ise artış ve azalışların meydana geldiğini bildirmektedirler. Ahmed *et al.* (2017) akçaağaç odun atıklarından elde edilen biyokömürün siltli tınlı toprağın LL, PL ve PI değerlerini %13.7, %5.3 ve %8.4 oranında artırdığını ifade etmektedirler. Ahmed *et al.* (2017) LL ve PL değerlerindeki bu artışın, toprağın daha yüksek nem içeriği koşullarında herhangi bir deformasyon olmadan daha kolay işlenebileceği ve ayrıca daha yüksek bir işlenebilirlik aralığı sağlayabileceği anlamına geldiğini belirtmektedirler.



Şekil 1. Biyokömür uygulaması ile LL, PL, PI arasındaki ilişkiler ve kontrole göre değişim oranları (Toprak I)



Şekil 2. Biyokömür uygulaması ile LL, PL, PI arasındaki ilişkiler ve kontrole göre değişim oranları (Toprak II)



Şekil 3. Biyokömür uygulaması ile LL, PL, PI arasındaki ilişkiler ve kontrole göre değişim oranları (Toprak III)

Biyokömürün Büzülme Limiti (BL) Değerleri Üzerine Etkisi

Elde edilen araştırma bulgularına göre, biyokömür uygulamaları toprakların büzülme limiti değerleri (BL) üzerinde istatistiksel olarak anlamlı ($p < 0.001$) etkiler yapmıştır. Araştırmada kullanılan tüm topraklarda artan biyokömür dozlarına paralel olarak büzülme limitinde de belirgin artışlar tespit edilmiştir. Büzülme limiti, toprakların hacimce küçüldüğü nem düzeyini temsil etmesi bakımından, dayanıklılık ve su tutma kapasitesiyle yakından ilişkili olup, bu parametredeki artışlar, biyokömürün toprakların suya doygunluk durumundan itibaren fiziksel hacimlerini daha uzun süre korumasına katkı sağladığını göstermektedir.

Toprak I (kil tekstürlü) örneklerinde, kontrol grubunda ölçülen BL değeri %16.21 olup, bu değer sırasıyla %0.5, %1, %2 ve %4 biyokömür dozlarında %17.02, %17.91, %18.34 ve %21.08 seviyelerine ulaşmıştır. Bu veriler, %4 doz biyokömür uygulamasıyla büzülme limitinde %30.04 oranında bir artış olduğu belirlenmiştir (Tablo 2). Toprak II (tın tekstürlü) grubunda BL değeri başlangıçta %10.16 iken, uygulanan artan dozlarla bu değer %11.24, %12.93, %13.97 ve %16.28'e yükselmiştir. En yüksek doz olan %4 dozunda BL'de %60.24'lük bir artış gerçekleşmiştir. Toprak III (kumlu tın) grubunda BL kontrol değerinin %6.83 gibi oldukça düşük bir seviyede olduğu belirlenmiştir. Artan biyokömür uygulamalarıyla bu değer sırasıyla %7.66, %8.96, %10.32 ve %12.34 seviyelerine ulaşmış ve %4 biyokömür uygulama dozunda BL değerinde %80.67 gibi yüksek bir oranda artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Genel kontrol grubunun BL değeri %11.06 olarak belirlenirken, %0.5, 1, 2 ve 4 uygulama dozlarında sırasıyla %11.97, %13.27, %14.21 ve %16.57 olarak belirlenmiştir. Söz konusu uygulama dozları sonrasında BL değerlerinde kontrole göre oransal olarak %8.23, %19.98, %28.48 ve %49.82'lik artışların meydana geldiği hesaplanmıştır (Tablo 2). Korelasyon analizleri sonucunda tüm topraklarda biyokömür dozu ile BL arasında (toprak I için 0.923**, toprak II için 0.963**, toprak III için 0.938**) ve organik karbon ile BL arasında (toprak I için 0.947**, toprak II için 0.952**, toprak III için 0.933**) güçlü pozitif korelasyonlar tespit edilmiştir (Tablo 3).

Biyokömürün Ufalanabilirlik (Gevreklik) İndeksi (FI) Değerleri Üzerine Etkisi

Biyokömür uygulamalarının bir diğer önemli mekaniksel toprak özelliği olan ufalanabilirlik indeksi (FI) üzerinde de istatistiksel olarak anlamlı ($p < 0.001$) etkiler yaptığı saptanmıştır. Toprak I (kil tekstürlü) örneklerinde kontrol grubu FI değeri %23.94 olarak belirlenmiş, bu değer %0.5 dozda %24.66, %1 dozda %26.55, %2 dozda %30.84 ve %4 dozda %30.71'e yükselmiştir. Özellikle %2 ve %4 doz biyokömür uygulamalarında yaklaşık %28 artış gözlenmiştir. Toprak II (tın) grubunda başlangıç FI değeri %14.42 iken bu değer uygulamalar sonrasında sırasıyla %15.56, %17.96, %21.39 ve %22.57 olarak ölçülmüştür. Biyokömürün en yüksek uygulama dozunda yaklaşık %57 oranında bir artış gerçekleşmiştir. Toprak III (kumlu tın) örneklerinde ise, FI kontrol grubunda %12.55 olup, %0.5 dozda %14.31'e, %1 dozda %15.97'ye, %2 dozda %17.51'e ve %4 dozda %20.10'a çıkmıştır. Biyokömür uygulama dozu arttıkça FI değerleri de artmış ve %4 dozunda %60'a varan bir artış meydana geldiği belirlenmiştir. Genel ortalamada, FI kontrol grubunda %16.97 iken %4 doz biyokömür uygulamasında bu değer %24.46'ya çıkmış ve yaklaşık %44 oranında bir artış kaydedilmiştir (Tablo 2). Pearson korelasyon analizlerinde biyokömür dozu ile FI arasında korelasyon katsayıları toprak I'de 0.913**, toprak II'de 0.946**, toprak III'te 0.960**

belirlenirken, organik karbon ile FI arasındaki söz konusu katsayılar 0.903**, 0.914** ve 0.928** olarak güçlü ve istatistiksel olarak son derece anlamlı pozitif ilişkiler saptanmıştır (Tablo 3). Ufalanabilirlik (gevreklik), toprağın strüktürel kalitesinin bir göstergesi olup (Reis *et al.* 2014; Ahmed and Raghavan 2018), uygulanan bir gerilim altında veya işleme operasyonları sırasında bir toprak kütesinin belirli bir boyut aralığında daha küçük agregatlara (ekim işlemlerinin yapılabileceği büyüklük) dağılma eğilimini ifade etmektedir (Utomo and Dexter 1981; Watts and Dexter 1998). Toprağa uygulanan gerilimler, işleme operasyonları ve ekim işlemleri sırasında toprak strüktürünün minimum düzeyde tahrip olması/degrade olması FI'nin artırılmasıyla en aza indirilebilir ve ayrıca, ekim işlemlerinin yapılabilirliği ile optimum işleme süresi FI'nin artırılmasıyla uzatılabilir (Tivy 1990).

Proctor Sıkışma Testi Sonuçları

Biyokömür uygulamalarının Proctor sıkışma testi parametreleri olan optimum nem içeriği (OMC) ve maksimum hacim ağırlığı (MBD) üzerine olan etkilerinin istatistiksel olarak önemli düzeyde ($p < 0.001$) olduğu belirlenmiş olup (Tablo 4) deneme topraklarının sıkışma eğrileri Şekil 4'de sunulmuştur. Biyokömür uygulamaları toprakların sıkışma davranışında önemli rol oynayan OMC ve MBD değerlerini anlamlı şekilde değiştirmiştir. Toprakların OMC değerleri artan biyokömür dozu ile birlikte sürekli artış gösterirken, MBD değerlerinde ise belirgin bir azalma meydana gelmiştir (Şekil 4; 5; 6). Elde edilen bu bulgular, biyokömürün fiziksel toprak yapısının önemli ölçüde sıkışmaya karşı direncini artırdığını göstermektedir.

Tüm topraklarda biyokömür uygulama dozu arttıkça en fazla sıkışmanın meydana geldiği OMC değerlerinde önemli artışlar gözlenmiştir. Toprak I'in kontrol seviyesinde OMC değeri %29.51 olarak belirlenmiş, artan biyokömür dozları ile birlikte bu değer %31.87, %34.35, %37.83 ve %40.99'a kadar yükselmiştir. Söz konusu değerler kontrole göre sırasıyla %7.99, %16.39, %28.21 ve %38.91 oranlarında artış göstermiştir. Toprak II ve III'te de benzer eğilimler izlenmiş olup, biyokömür uygulama dozu arttıkça OMC değerleri artmış ve %4 dozda en yüksek OMC değerleri elde edilmiştir. En yüksek uygulama dozu olan %4 dozunda OMC değerlerinin kontrollerine göre artış oranları toprak II için %56.07 ve toprak III için %72.90 olarak hesaplanmıştır. Genel ortalama kontrol seviyesinde OMC değeri %20.56 iken, %0.5, %1, %2 ve %4 biyokömür uygulamalarında bu değerler sırasıyla %23.21, %25.47, %27.96 ve %31.15 olarak belirlenmiş ve kontrole kıyasla sırasıyla %12.89, %23.88, %35.99 ve %51.51 oranlarında artışların olduğu hesaplanmıştır (Tablo 4; Şekil 4; 5; 6).

Araştırma topraklarında en fazla sıkışmanın kontrol seviyelerinde meydana geldiği, buna bağlı olarak da en yüksek MBD değerlerinin kontrol gruplarında kaydedildiği

belirlenmiştir. Biyokömür uygulama dozlarının artışıyla birlikte, toprakların sıkışma eğilimini gösteren MBD değerleri kademeli olarak azalmış ve en düşük değerler %4 biyokömür uygulamasında elde edilmiştir (Tablo 4; Şekil 4; 5). Toprak I'ın kontrol grubundaki MBD değeri 1.44 g cm^{-3} iken %2 ve %4 biyokömür uygulamaları sonrasında bu değerler sırasıyla 1.33 ve 1.32 g cm^{-3} olarak belirlenmiş olup, kontrole göre sırasıyla %7.51 ve %8.84 oranlarında azalmalar meydana gelmiştir. Benzer şekilde toprak II ve III'te de en düşük MBD değerleri %4 dozda gözlemlenmiş olup, MBD'nin kontrollerine göre düşüş oranları toprak II için %11.04, toprak III için ise %10.00 olarak hesaplanmıştır. Genel ortalamalara göre kontrol düzeyinde MBD değeri 1.71 g cm^{-3} iken, %4 biyokömür uygulaması sonucunda bu değer 1.54 g cm^{-3} 'e düşmüş ve %9.94 oranında azalma meydana gelmiştir (Tablo 4; Şekil 4; 5; 6).

Biyokömür uygulamaları ile OMC ve MBD değerleri arasındaki ilişkiler korelasyon analizleriyle de desteklenmiştir. Biyokömür dozu ile OMC arasında toprak I, II ve III için sırasıyla 0.970^{**} , 0.977^{**} ve 0.957^{**} düzeyinde anlamlı pozitif korelasyonlar saptanmıştır. Biyokömür dozu ile MBD arasında da sırasıyla -0.971^{**} , -0.978^{**} ve -0.968^{**} düzeylerinde önemli düzeyde negatif korelasyonlar belirlenmiştir. Organik karbon içeriği ile OMC arasındaki korelasyon katsayıları toprak I, II ve III için sırasıyla 0.958^{**} , 0.941^{**} ve 0.909^{**} olarak belirlenirken, OC ile MBD arasındaki katsayılar -0.938^{**} , -0.939^{**} ve -0.910^{**} olarak belirlenmiştir. Biyokömür uygulamalarının toprak organik karbon ve agregat stabilitesi (AS) üzerindeki olumlu etkileri de göz önünde bulundurulduğunda, bu fiziksel gelişmenin toprak sıkışması ile de bağlantılı olduğu anlaşılmaktadır. Yapılan korelasyon analizlerinde OMC ile AS arasında sırasıyla 0.909^{**} , 0.921^{**} ve 0.715^{**} düzeyinde pozitif korelasyonlar, MBD ile AS arasında ise -0.904^{**} , -0.847^{**} ve -0.793^{**} düzeyinde negatif korelasyonlar tespit edilmiştir (Tablo 3).

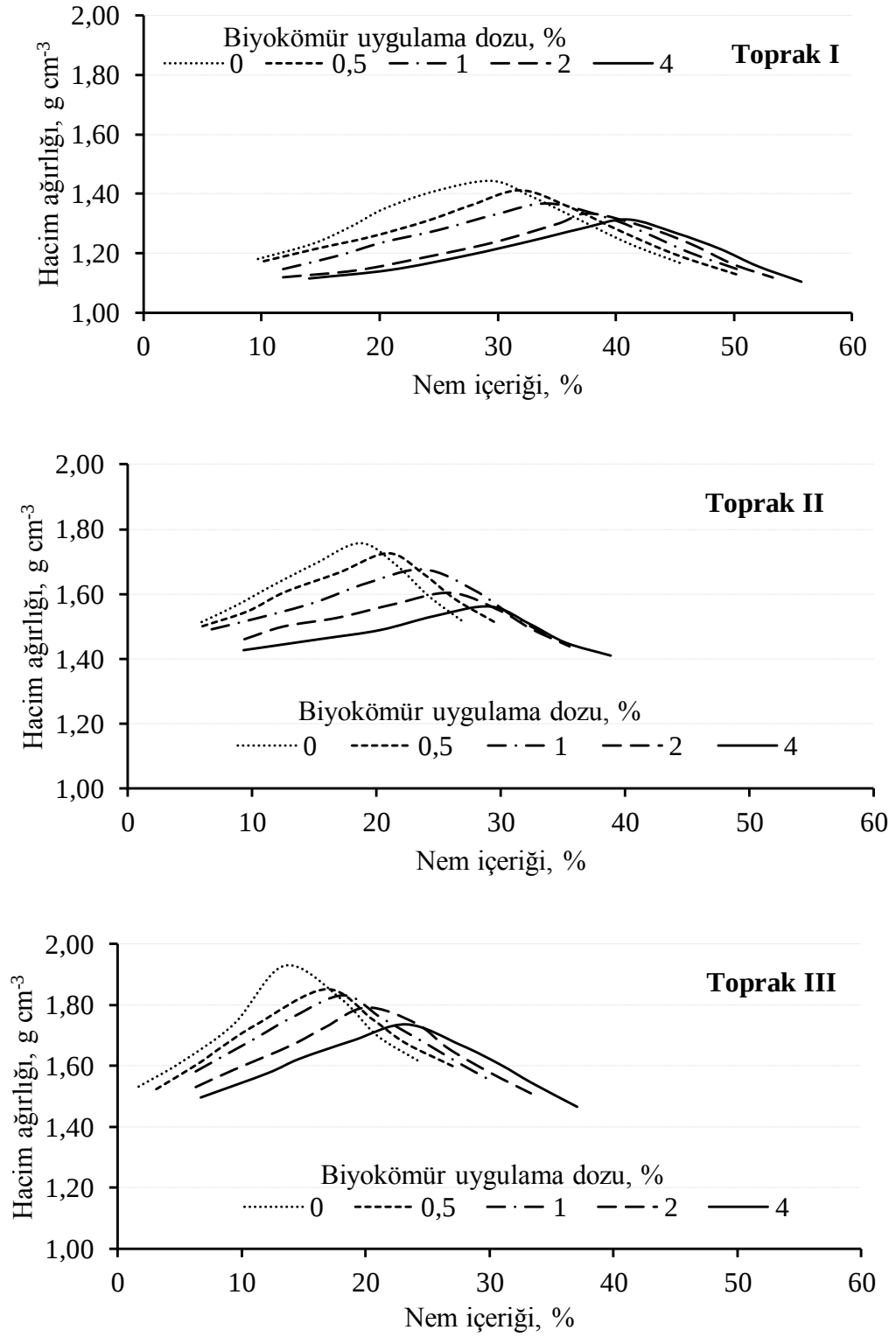
Tablo 4. Toprakların Proctor Sıkışma Testi Parametreleri Optimum Nem İçeriği (OMC) ve Maksimum Hacim Ağırlığı (MBD) Üzerine Biyokömürün Etkileri

Topraklar	Uygulama dozları (w/w) (%)	Optimum nem içeriği (%)	Optimum nem içeriğinde kontrole göre değişim oranları (%)	Maksimum hacim ağırlığı (g cm ⁻³)	Maksimum hacim ağırlığında kontrole göre değişim oranları (%)
Toprak I (Kil)	0 (Kontrol)	29.51±1.44c	0.00	1.44±0.02a	0.00
	0.5	31.87±1.52bc	+7.99	1.41±0.01a	-2.00
	1	34.35±1.41b	+16.39	1.37±0.02b	-5.11
	2	37.83±0.56a	+28.21	1.33±0.01c	-7.51
	4	40.99±0.69a	+38.91	1.32±0.01c	-8.84
Ortalama		34.91±4.37A		1.37±0.05C	
<i>p</i>		<i>0.001</i>		<i>0.001</i>	
Toprak II (Tın)	0 (Kontrol)	18.69±1.08c	0.00	1.76±0.02a	0.00
	0.5	20.96±0.82c	+12.11	1.73±0.02a	-1.72
	1	23.80±1.18b	+27.35	1.68±0.02b	-4.55
	2	25.99±0.81b	+39.02	1.60±0.02c	-8.71
	4	29.18±0.82a	+56.07	1.56±0.01d	-11.04
Ortalama		23.72±3.90B		1.67±0.08B	
<i>p</i>		<i>0.001</i>		<i>0.001</i>	
Toprak III (Kumlu tın)	0 (Kontrol)	13.47±1.04d	0.00	1.93±0.01a	0.00
	0.5	16.81±0.96c	+24.82	1.85±0.02b	-3.95
	1	18.27±0.85bc	+35.73	1.83±0.01bc	-5.00
	2	20.06±0.66b	+48.96	1.79±0.02c	-7.15
	4	23.28±1.52a	+72.90	1.74±0.02d	-10.00
Ortalama		18.38±3.49C		1.83±0.07A	
<i>p</i>		<i>0.001</i>		<i>0.001</i>	
Genel ortalama	0 (Kontrol)	20.56±7.16e	0.00	1.71±0.21a	0.00
	0.5	23.21±6.81d	+12.89	1.66±0.20b	-2.92
	1	25.47±7.14c	+23.88	1.62±0.20c	-5.26
	2	27.96±7.86b	+35.99	1.58±0.20d	-7.60
	4	31.15±7.87a	+51.51	1.54±0.18e	-9.94
<i>Toprak (p)</i>		<i>0.001</i>		<i>0.001</i>	
<i>Biyokömür doz (p)</i>		<i>0.001</i>		<i>0.001</i>	
<i>Toprak × Biyokömür doz (p)</i>		<i>0.457</i>		<i>0.001</i>	

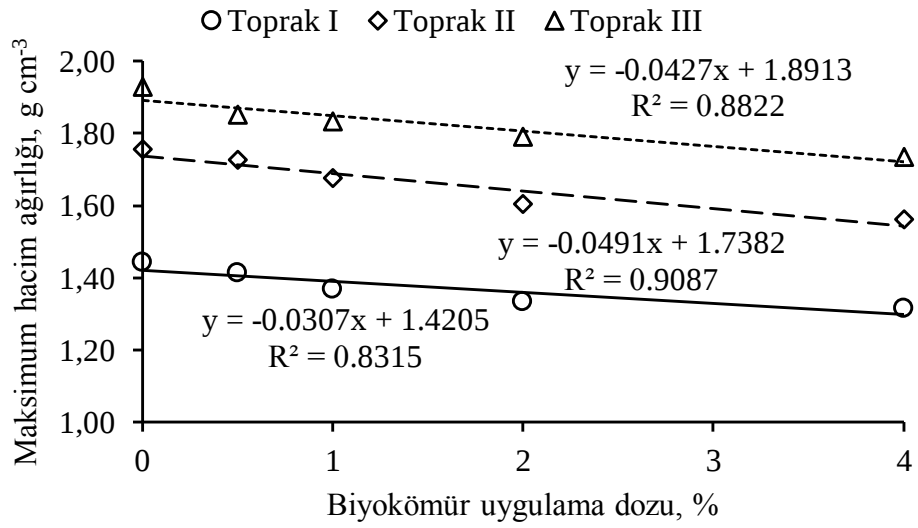
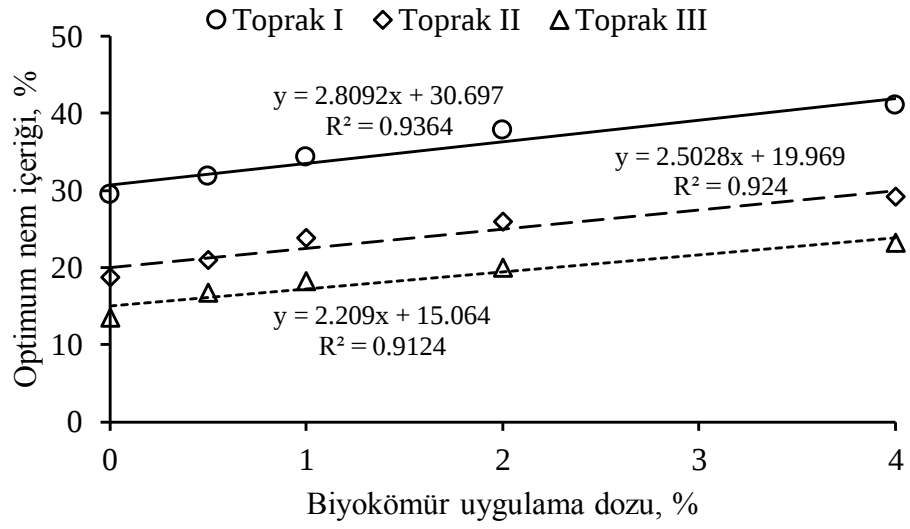
Farklı harflerle gösterilen değerler istatistiksel olarak birbirinden farklıdır ($p<0.05$).
ns: İstatistiksel olarak önemsiz.

Geçmiş yıllarda yapılan çalışmalar incelendiğinde de toprak organik madde ve organik karbon içeriğini artırmaya yönelik yapılan tarımsal faaliyetlerin/yönetimlerin ve toprağa uygulanan organik materyal girdilerinin toprağın sıkışabilirliği üzerindeki etkilerinin benzer şekilde olduğu, artan organik madde ve organik karbon içeriğinin OMC değerlerini artırırken MBD değerlerini düşürdüğü belirlenmiştir (Baumgart and Horn 1991; Barzegar *et al.* 2000; Batjes 2014; Ajayi *et al.* 2016; Xiao *et al.* 2016; Pranagal *et al.* 2017; Obour *et al.* 2019; Bayat *et al.* 2020; Singh *et al.* 2025). Biyokömürün toprak sıkışması üzerine etkilerinin araştırıldığı çalışmalarda da toprağa biyokömür ilave edilmesinin toprak sıkışmasını önemli ölçüde azalttığı

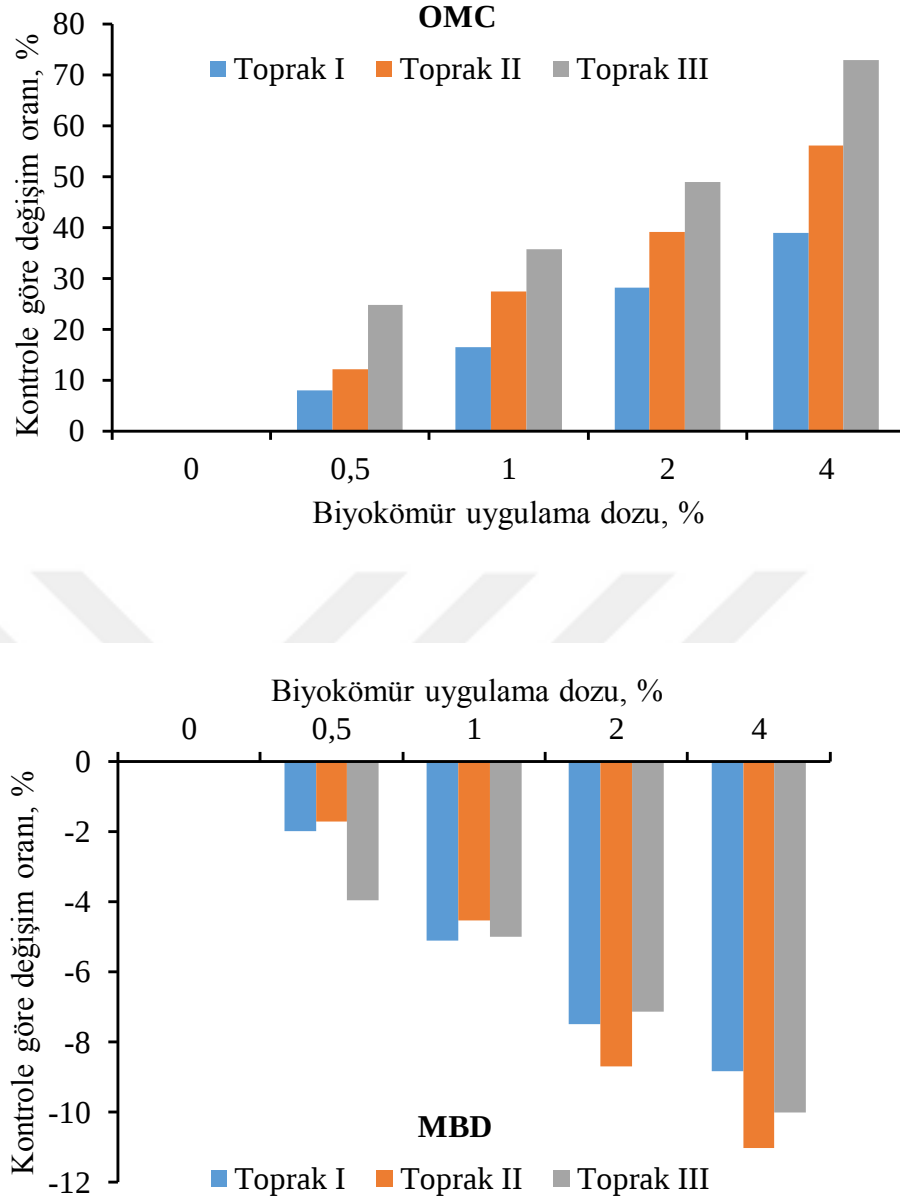
belirtilmektedir. Literatürlerde, biyokömür uygulaması ile Proctor testi OMC değerlerinin %1 ile %64 arasında değişen oranlarda artarken, MBD değerlerinin ise %1 ile %19 arasında değişen oranlarda düştüğü bildirilmektedir (Ahmed *et al.* 2017; Tan *et al.* 2017; Horák *et al.* 2019; Kumar *et al.* 2019; Awe *et al.* 2021; Blanco-Canqui 2021; Hussain *et al.* 2021; Yang and Lu 2021). Biyokömür uygulaması sonrasında meydana gelen değişimler aşağıdaki mekanizmalar ile açıklanmaktadır. İlk olarak, biyokömür parçacıkları toprak mineral parçacıklarına göre daha düşük yoğunluğa ve daha yüksek gözenekliliğe sahip olduğundan seyreltme etkisiyle hacim ağırlığını azaltır. İkinci olarak, özellikle kararsız C bileşikleri olmak üzere, biyokömür uygulamasıyla organik C konsantrasyonundaki artış, yüksek negatif yük kapasitesi ve yüksek özgül yüzey alanı biyolojik aktiviteyi, toprak agregasyonunu teşvik eder ve gözenekliliği artırarak hacim ağırlığını azaltır. Ayrıca, organik madde ve organik karbonun elastikiyet özelliğe sahip olması toprağa elastikiyet ve uygulanan mekaniksel kuvvete karşı geri tepme kapasitesi kazandırmasının yanı sıra, artan agregat stabilitesi toprakların mekaniksel kuvvetlere karşı direncini arttırarak hacim ağırlığını azaltır. Kritik nem içeriğindeki artış, biyokömürün yüksek su adsorpsiyon kapasitesine, yüksek yüzey alanına, yüksek gözenekliliğine ve agregasyon ile artan gözeneklilik ile açıklanmaktadır. Araştırma sonuçları, biyokömür uygulamasının toprağın sıkıştırma kuvvetlerine karşı direncini artırdığını ve potansiyel olarak toprağın genel dayanıklılığını geliştirdiğini, biyokömür uygulamasının toprak sıkıştırılabilirliğini azaltmak için bir strateji olduğunu göstermektedir. Nitekim, biyokömürle kritik su içeriğindeki artış, biyokömür uygulanmış toprakların, biyokömürsüz topraklara göre daha yüksek su içeriğinde toprak sıkışmasına neden olmadan tarla trafiğine veya mekaniksel kuvvetlere direnç gösterebileceğini göstermektedir. Biyokömür uygulanmış topraklar, belirli bir sıkıştırma enerjisinde biyokömürsüz topraklara göre daha az sıkıştırılabilir, çökmeye karşı daha kararlıdır (Reddy *et al.* 2015; Kumar *et al.* 2019; Blanco-Canqui 2021). Sonuç olarak, biyokömür uygulamaları Proctor sıkışma testi parametreleri üzerinde anlamlı etkiler meydana getirmiş, OMC'yi artırırken MBD'yi düşürmüştür. Bu etkiler toprak tekstürüne bağlı olarak değişkenlik gösterirken, özellikle kum içeriği yüksek kaba yapılı topraklarda OMC'deki artış oranının daha yüksek olması biyokömürün geçirgen ve düşük kil içeriğine sahip topraklarda daha etkili olabileceğini göstermektedir (Ahmed and Raghavan 2018; Zong *et al.* 2018; Blanco-Canqui 2021). Elde edilen bu bulgular, biyokömürün fiziksel toprak yapısını iyileştirmeye yönelik sürdürülebilir bir toprak yönetimi aracı olarak kullanılabileceğini desteklemektedir.



Şekil 4. Araştırma topraklarının Proctor sıkışma testi eğrileri



Şekil 5. Biyokömür uygulaması ile OMC ve MBD arasındaki ilişkiler



Şekil 6. Biyokömür uygulamasıyla araştırma topraklarının OMC ve MBD değerlerinde kontrole göre meydana gelen değişimler

Atterberg limitleri, toprağın mekaniksel kuvvetlere karşı göstereceği mukavemeti ve toprak işleme operasyonları için optimum nem içeriğinin belirlenmesi açısından çok önemlidir. Maksimum sıkışmanın meydana geldiği andaki nem içeriğinin, optimum nem içeriğinin (OMC), LL ve PL'e göre artması toprağın daha yüksek nem koşullarında herhangi bir degradasyona veya deformasyona uğramadan daha kolay işlenebileceği ve daha yüksek bir işlenebilirlik aralığı sağlayabileceği anlamına gelmektedir (Ahmed *et al.* 2017; Yang and Lu 2021). Toprak I'in kontrolünde OMC 29.51, LL 67.39 olarak belirlenmiş ve OMC/LL oranı $[(29.51/67.36) \times 100 = \%43.79]$ %43.79 olarak, yani $OMC=0.44LL$ olarak belirlenmiştir. Söz konusu oran biyokömürün %0.5, 1, 2 ve 4 uygulama dozları sonrasında 0.46LL, 0.48LL, 0.51LL ve 0.54LL olarak belirlenmiştir. Toprak II'nin kontrolünde bu oran 0.49LL iken

biyokömür uygulamaları sonrasında 0.52LL, 0.57LL, 0.58LL ve 0.59LL'ye yükselmiş, toprak III'te de kontrolde 0.50LL iken tüm biyokömür dozları sonrasında 0.56LL'ye yükselmiştir. Genel ortalama kontrol dozunda söz konusu oran 0.47LL iken uygulamalar sonrasında 0.50LL, 0.53LL, 0.54LL ve 0.56LL olarak belirlenmiştir. Diğer bir oransal katsayı OMC/PL olup, toprak I'in kontrolünde bu katsayı $[(29.51/40.15) \times 100 = 73.49]$ %73.49 olarak, yani 0.73PL olarak belirlenirken, %0.5, 1, 2 ve 4 dozları sonrasında 0.76PL, 0.77PL, 0.77PL ve 0.79PL olarak belirlenmiştir. Toprak II'de kontrolde 0.76PL iken, uygulamalar sonrasında 0.78PL, 0.77PL, 0.74PL ve 0.75PL olarak ve toprak III'ün kontrolünde 0.70PL iken uygulamalar sonrasında 0.77PL, 0.73PL, 0.72PL ve 0.72PL olarak belirlenmiştir. Genel ortalama kontrolde bu oran 0.73PL iken biyokömür uygulamaları sonrasında 0.77PL, 0.76PL, 0.75PL ve 0.76PL olarak belirlenmiştir. Proctor sıkışma parametreleri olan OMC ile MBD'nin LL ile PL arasındaki ilişkiler korelasyon katsayıları ile de kendini göstermektedir. OMC ile LL arasındaki korelasyon katsayıları toprak I, II, III ve genel ortalama 0.948**, 0.954**, 0.927** ve 0.955** olarak, OMC ile PL arasındaki korelasyon katsayıları da 0.929**, 0.961**, 0.936** ve 0.984** olarak belirlenmiştir. MBD ile LL arasındaki korelasyon katsayıları -0.938**, -0.943**, -0.937** ve -0.985** olarak, MBD ile PL arasındaki korelasyonlar da -0.952**, -0.955**, -0.939** ve -0.970** olarak belirlenmiştir (Tablo 3). Benzer ilişkiler (Terzaghi *et al.* 1988; Mueller *et al.* 1990; Dexter and Bird 2001; Mueller *et al.* 2003; Barzegar *et al.* 2004; Mosaddeghi *et al.* 2009) tarafından yapılmış olan çalışmalarda da belirlenmiştir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu araştırmada, üç farklı tekstüre sahip (kil, tın ve kumlu tın) topraklara artan dozlarda uygulanan biyokömürün toprağın kıvam limitleri ve sıkışma parametreleri üzerindeki etkileri kapsamlı biçimde incelemiştir. Elde edilen bulgular, biyokömür uygulamasının toprak yapısını iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Organik karbon miktarı, tüm toprak gruplarında biyokömür dozları ile birlikte anlamlı düzeyde artış göstermiştir. Bu artış, biyokömürün organik karbonca zengin yapısından kaynaklanmaktadır. Agregat stabilitesi değerleri de dozla birlikte düzenli şekilde artmış, agregat oluşumunun biyokömürle desteklendiği anlaşılmıştır. Likit limit (LL) ve plastik limit (PL) değerlerinde benzer şekilde artış gözlenmiş Plastiklik indeksi (PI) değerlerinde ise artışlar ve azalışlar gözlemlenmiştir. Büzülme limiti ve ufalanabilirlik (gevreklik) indeksi değerlerinde, tüm toprak tekstürlerinde düzenli artışlar meydana gelmiş ve biyokömürün hem kuruma esnasında toprak yapısını koruyucu hem de işlenebilirliği kolaylaştırıcı etkiler sunduğu belirlenmiştir. Proctor sıkışma testi sonuçları, optimum nem içeriğinin arttığını, buna karşın maksimum hacim ağırlığının azaldığını göstermiştir. Bu durum, biyokömürün toprak sıkışmayı azaltıcı, hava ve su dengesini iyileştirici bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Özellikle %4 doz biyokömür uygulaması tüm topraklarda en yüksek olumlu etkileri sağlamış ancak düşük dozların dahi birçok parametrede kayda değer iyileşmeler sağladığı görülmüştür. İncelenen parametreler arasındaki korelasyon analizleri, biyokömür uygulamasının özellikle organik karbon, agregat stabilitesi, optimum nem içeriği gibi temel göstergeler ile yüksek düzeyde pozitif ilişkili olduğunu göstermiştir. Maksimum hacim ağırlığı ile ise negatif korelasyonlar dikkat çekmiş ve bu durum biyokömürün sıkışmayı azaltan etkisini desteklemiştir. Biyokömür uygulaması ile maksimum sıkışmanın meydana geldiği andaki nem içeriğinin, optimum nem içeriğinin (OMC), LL ve PL'e göre artmasını sağlamış ve biyokömür uygulaması ile toprağın daha yüksek nem koşullarında herhangi bir degradasyona veya deformasyona uğramadan daha kolay işlenebileceği ve daha yüksek bir işlenebilirlik aralığı sağlayabileceği görülmektedir. Elde edilen veriler, biyokömürün toprakların fiziksel yapısını iyileştirici etkilerini açıkça ortaya koymuştur. Sonuç olarak bu çalışma göstermiştir ki, biyokömür uygulaması farklı tekstüre sahip topraklarda organik karbon içeriğini artırmakta, toprağın fiziksel ve mekaniksel özelliklerini iyileştirmektedir. Biyokömür, sürdürülebilir toprak yönetimi ve toprak üretkenliğini artırıcı bir materyal olarak önerilebilir.

KAYNAKLAR

- Abdelhafez, A.A., Li, J., and Abbas, M.H.H., 2014. Feasibility of biochar manufactured from organic wastes on the stabilization of heavy metals in a metal smelter contaminated soil. *Chemosphere*, 117, 66-71.
- Ahmed, A., Garipey, Y., and Raghavan, V., 2017. Influence of wood-derived biochar on the compactibility and strength of silt loam soil. *International Agrophysics*, 31, 149-155.
- Ahmed, A.S.F., and Raghavan, V., 2018. Influence of wood-derived biochar on the physico-mechanical and chemical characteristics of agricultural soils. *International Agrophysics*, 32, 1-10.
- Ajayi, A.E., Holthusen, D., and Horn, R., 2016. Changes in microstructural behaviour and hydraulic functions of biochar amended soils. *Soil Tillage Research*, 155, 166-175.
- Akgül, M., 1992. Daphan Ovası Topraklarının Sınıflandırılması ve Haritalanması. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Aksakal, E.L., 2004. Toprak sıkışması ve tarımsal açıdan önemi. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 35(3-4), 247-252.
- Aksakal, E.L., Cambaztepe, A., Angın, I., and Sarı, S., 2024. Effects of the application of anaerobically digested sewage sludge on the consistency limits and compaction characteristics of differently textured soils. *Journal of Agricultural Sciences Belgrade*, 69(1), 57-76.
- Al-Wabel, M.I., Hussain, Q., Usman, A.R.A., Ahmad, M., Abduljabbar, A., Sallam, A.S., and Ok, Y.S., 2018. Impact of biochar properties on soil conditions and agricultural sustainability: A review. *Land Degradation and Development*, 29, 2124-2161.
- Amoakwah, E., Frimpong, K.A., and Arthur, E., 2017. Corn cob biochar improves aggregate characteristics of a tropical sandy loam. *Soil Science Society of America Journal*, 81, 1054-1063.
- Anonim, 2025. T.C. Başbakanlık Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, Erzurum Bölge Müdürlüğü Raporları.
- Arthur, E., Danso, E.O., Beiranvand, M., Pouladi, N., Yakubu, A., Abenney-Mickson, S., and Sabi, E.B., 2020. Rice straw biochar effects on Atterberg limits and aggregate characteristics of an Acrisol in Ghana. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(13), 1861-1872.
- ASTM (American Society for Testing and Materials), 1992. Annual Book of ASTM Standards. ASTM International, Philadelphia, PA.
- ASTM (American Society for Testing and Materials), 2007. ASTM D698-07: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Awe, G.O., Reichert, J.M., Holthusen, D., Ambus, J.V., and Carvalho, P.C.F., 2021. Characterization of microstructural stability of biochar-amended Planosol under conventional tillage for irrigated lowland rice ecosystem. *Soil and Tillage Research*, 212, 105051.
- Babu, S., Singh, R., Avasthe, R., Kumar, S., Rathore, S.S., Singh, V.K., and Petrosillo, I., 2023. Soil carbon dynamics under organic farming: impact of tillage and cropping diversity. *Ecological Indicators*, 147, 109940.
- Bai, N., Zhang, H., Zhou, S., Sun, H., Zhao, Y., Zheng, X., Li, S., Zhang, J., and Lv, W., 2020. Long-term effects of straw return and straw-derived biochar amendment on bacterial communities in soil aggregates. *Scientific Reports*, 10, 7891.

- Baiamonte, G., Crescimanno, G., Parrino, F., and De Pasquale, C., 2019. Effect of biochar on the physical and structural properties of a sandy soil. *Catena*, 175, 294-303.
- Baiamonte, G., Pasquale, C.D., Marsala, V., Cimò, G., Alonzo, G., Crescimanno, G., and Conte, P., 2015. Structure alteration of a sandy-clay soil by biochar amendments. *Journal of Soils and Sediments*, 15, 816-824.
- Barzegar, A.R., Asoodar, M.A., and Ansari, M., 2000. Effectiveness of sugarcane residue incorporation at different water contents and the Proctor compaction loads in reducing soil compactibility. *Soil and Tillage Research*, 57(3), 167-172.
- Barzegar, A.R., Hashemi, A.M., Herbert, S.J., and Asoodar, M.A., 2004. Interactive effects of tillage system and soil water content on aggregate size distribution for seedbed preparation in Fluvisols in southwest Iran. *Soil and Tillage Research*, 78(1), 45-52.
- Batjes, N.H., 2014. Projected changes in soil organic carbon stocks upon adoption of recommended soil and water conservation practices in the Upper Tana River catchment, Kenya. *Land Degradation and Development*, 25(3), 278-287.
- Baumgart, T., and Horn, R., 1991. Effect of aggregate stability on soil compaction. *Soil and Tillage Research* 19(2-3), 203-213.
- Bayat, H., Asghari, S., Rastgou, M., and Sheykhzadeh, G.R., 2020. Estimating Proctor parameters in agricultural soils in the Ardabil plain of Iran using support vector machines, artificial neural networks and regression methods. *Catena*, 189, 104467.
- Bhushan, L., and Sharma, P.K., 2002. Long-term effects of lantana (*Lantana* spp. L.) residue additions on soil physical properties under rice-wheat cropping: I. Soil consistency, surface cracking and clod formation. *Soil and Tillage Research*, 65(2), 157-167.
- Blake, G.R., and Hartge, K.H., 1986. Particle Density. *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2nd Edition. Agronomy No: 9. 377-382, 1188 p, Madison, Wisconsin USA.
- Blanco-Canqui, H., 2017. Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 81(4), 687-711.
- Blanco-Canqui, H., 2021. Does biochar application alleviate soil compaction? Review and data synthesis. *Geoderma*, 404, 115317.
- Blanco-Canqui, H., Lal, R., Post, W.M., Izaurrealde, R.C., and Shipitalo, M.J., 2006. Organic carbon influences on soil particle density and rheological properties. *Soil Science Society of America Journal*, 70(4), 1407-1414.
- Burrell, L.D., Zehetner, F., Rampazzo, N., Wimmer, B., and Soja, G., 2016. Long-term effects of biochar on soil physical properties. *Geoderma*, 282, 96-102.
- Canbolat, M.Y. ve Öztaş, T., 1996. Erzurum yöresinde farklı ana materyal ve iklim koşullarında oluşmuş üç toprak profilinin kıvam limitleri ve şişme-büzülme karakteristikleri. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 27, 272-283.
- Canbolat, M.Y. ve Öztaş, T., 1997. Toprağın kıvam limitleri üzerine etki eden bazı faktörler ve kıvam limitlerinin tarımsal yönden değerlendirilmesi. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 28(1), 120-129.
- Cheng, C.H., Lehmann, J., Thies, J.E., Burton, S.D., and Engelhard, M.H., 2006. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. *Organic Geochemistry*, 37, 1477-1488.
- Chivenge, P.P., Murwira, H.K., Giller, K.E., Mapfumo, P., and Six, J., 2007. Long-term impact of reduced tillage and residue management on soil carbon stabilization: Implications for conservation agriculture on contrasting soils. *Soil and Tillage Research*, 94(2), 328-337.
- Dexter, A.R., and Bird, N.R.A., 2001. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil and Tillage Research*, 57: 203-212.
- Dündar, M., 1987. Toprak organik maddesi ve ekolojik yönden önemi. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 37(1), 99-108.

- EBC (European Biochar Certificate), 2025. European Biochar Certificate-Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. Carbon Standards International (CSI), Frick, Switzerland, <https://www.carbon-standards.com/docstransfer4000093EN.pdf>=1065751 (10.10.2025).
- Efthimiou, N., 2025. Governance and degradation of soil in the EU. An overview of policies with a focus on soil erosion. *Soil and Tillage Research*, 245, 106308.
- El-Naggar, A., Lee, S.S., Rinklebe, J., Farooq, M., Song, H., Sarmah, A.K., and Ok, Y.S., 2019. Biochar application to low fertility soils: A review of current status, and future prospects. *Geoderma*, 337, 536-554.
- European Commission, 2021. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels, <https://eur-lexeuropa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0699> (10.10.2025).
- Gee, G.W., and Bauder, J.W., 1986. Particle-Size Analysis. *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2nd Edition. Agronomy No: 9. 383-411, 1188 p, Madison, Wisconsin USA.
- Gui, X., Xu, X., Zhang, Z., Hu, L., Huang, W., Zhao, L., and Cao, X., 2025. Biochar-amended soil can further sorb atmospheric CO₂ for more carbon sequestration. *Communications Earth and Environment*, 6, Article number: 5.
- Guo, Y., Tang, H., Li, G., and Xie, D., 2014. Effects of cow dung biochar amendment on adsorption and leaching of nutrient from an acid yellow soil irrigated with biogas slurry. *Water, Air and Soil Pollution*, 225(1), 1820.
- Han, L., Sun, K., Yang, Y., Xia, X., Li, F., Yang, Z., and Xing, B., 2020. Biochar's stability and effect on the content, composition and turnover of soil organic carbon. *Geoderma*, 364, 114184.
- Hemmat, A., Aghilinategh, N., Rezainejad, Y., and Sadeghi, M., 2010. Long-term impacts of municipal solid waste compost, sewage sludge and farmyard manure application on organic carbon, bulk density and consistency limits of a calcareous soil in central Iran. *Soil and Tillage Research*, 108(1-2), 43-50.
- Herath, H.M.S.K., Camps-Arbestain, M., and Hedley, M., 2013. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: an Alfisol and an Andisol. *Geoderma*, 209, 188-197.
- Horák, J., Šimanský, V., and Igaz, D., 2019. Biochar and biochar with N fertilizer impact on soil physical properties in a silty loam Haplic Luvisol. *Journal of Ecological Engineering*, 20(7), 31-38.
- Huang, C., Chen, Y., Jin, L., and Yang, B., 2024. Properties of biochars derived from different straw at 500 °C pyrolytic temperature: Implications for their use to improving acidic soil water retention. *Agricultural Water Management*, 301, 108953.
- Hussain, R., Ghosh, K.K., and Ravi, K., 2021. Impact of biochar produced from hardwood of mesquite on the hydraulic and physical properties of compacted soils for potential application in engineered structures. *Geoderma*, 385, 114836.
- IBM, 2017. IBM SPSS Statistics for Windows, version 25.0. IBM Corporation. Armonk, NY.
- Ighalo, J.O., Ohoro, C.R., Ojukwu, V.E., Oniye, M., Shaikh, W.A., Biswas, J.K., Seth, C.S., Mohan, G.B.M., Chandran, S.A., and Rangabhashiyam, S., 2025. Biochar for ameliorating soil fertility and microbial diversity: From production to action of the black gold. *iScience*, 28(1), 111524.
- Islam, M.U., Jiang, F., Guo, Z., and Peng, X., 2021. Does biochar application improve soil aggregation? A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 209, 104926.
- İrget, M.E. ve Cengiz, A., 2018. Organik maddenin toprak kalitesi ve üretime etkileri. *Organomineral Gübre Çalıştayı*, İstanbul.

- Jeffery, S., Verheijen, F. G., Van Der Velde, M., and Bastos, A.C., 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 144(1), 175-187.
- Jiang, Z., Huang, S., and Meng, Z., 2025. Long-term effects of biochar on the hydraulic properties of soil: A meta-analysis based on 1-10 years field experiments. *Geoderma*, 458, 117318.
- Karlsson, M.B., Kamp, A., and Thomsen, T.P., 2025. Dynamic assessment of biochar soil carbon climate change impacts. *Science of the Total Environment*, 995, 180058.
- Kemper, W.D., and Rosenau, R.C., 1986. Aggregate Stability and Size Distribution. *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2nd Edition. Agronomy No: 9. 425-442, 1188 p, Madison, Wisconsin USA.
- Khademalrasoul, A., Naveed, M., Heckrath, G., Kumari, K.G.I.D., Jonge, L.W., Elsgaard, L., Vogel, H., and Iversen, B.V., 2014. Biochar effects on soil aggregate properties under no-till maize. *Soil Science*, 179(6), 273-283.
- Koushika, S.P., Krishnaveni, A., Pazhanivelan, S., Bharani, A., Arunkumar, V., Devaki, P., and Muthukrishnan, N., 2024. Carbon Economics of Different Agricultural Practices for Farming Soil. *arXiv*, 2403.07530.
- Kumar, H., Ganesan, S.P., Bordoloi, S., Sreedeeep, S., Lin, P., Mei, G., and Sarmah, A.K. 2019. Erodibility assessment of compacted biochar amended soil for geo-environmental applications. *Science of the Total Environment*, 672, 698-707.
- Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R., and Karlen, D., 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158, 436-442.
- Lal, R., and Shukla, M.K., 2004. *Principles of Soil Physics*. New York, 682. New York
- Lal, R., 2016. Soil health and carbon management. *Food and Energy Security*, 5(4), 212-222.
- Lal, R., 2020. Soil organic matter content and crop yield. *Journal of Soil and Water Conservation*, 75(2), 27A-32A.
- Lehmann, J., and Joseph, S., 2009. *Biochar for Environmental Management Science and Technology*. Earthscan, London, UK.
- Lehmann, J., Joseph, S., Downie, A., Crosky, A., and Munroe, P., 2009. Biochar for Environmental Management: An Introduction. In *Biochar for Environmental Management: Science Technology and Implementation*, (pp. 1-14), Routledge.
- Lehmann, J., Pereira da Silva Jr, J., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W., and Glaser, B., 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil*, 249(2), 343-357.
- Lehmann, J., Rillig, M.C., Thies, J., Masiello, C.A., Hockaday, W.C., and Crowley, D., 2011. Biochar effects on soil biota-a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(9), 1812-1836.
- Lei, O., and Zhang, R., 2013. Effects of biochars derived from different feedstocks and pyrolysis temperatures on soil physical and hydraulic properties. *Journal of Soils and Sediments*, 13(9), 1561-1572.
- Li, L., Yang, J., Yu, Y., Shakoar, A., Virk, A.L., Li, F.M., and Kan, Z.R., 2025. Crop straw converted to biochar increases soil organic carbon but reduces available carbon. *European Journal of Agronomy*, 164, 127499.
- Li, Y., Feng, X., Huai, Y., Hassan, M.U., Cui, Z., and Ning, P., 2024. Enhancing crop productivity and resilience by promoting soil organic carbon and moisture in wheat and maize rotation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 368, 109021.
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B., Skjemstad, J.O., Thies, J., Luizao, F.J., Petersen, J., and Neves, E.G., 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1719-1730.

- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Sohi, S., Thies, J.E., Skjemstad, J.O., and Wirrick, S., 2008. Stability of biomass-derived black carbon in soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(24), 6069-6078.
- Liu, C., He, C., Chang, S.X., Chen, X., An, S., Wang, D., and Li, P., 2024. Fertilization and tillage influence on soil organic carbon fractions: A global meta-analysis. *Catena*, 246, 108404.
- Liu, X.H., Han, F.P., and Zhang X.C., 2012. Effect of biochar on soil aggregates in the Loess Plateau: results from incubation experiments. *International Journal of Agriculture and Biology*, 14, 975-979.
- Lu, S.G., Sun, F.F., and Zong, Y.T., 2014. Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol). *Catena*, 114, 37-44.
- Luo, P., Zhang, W., Xiao, D., Hu, J., Li, N., and Yang, J., 2025. Biochar-Based Fertilizers: Advancements, Applications and Future Directions in Sustainable Agriculture-A Review. *Agronomy*, 15(5), 1104.
- Ma, Y., Woolf, D., Fan, M., Qiao, L., Li, R., and Lehmann, J., 2023. Global crop production increase by soil organic carbon. *Nature Geoscience*, 16(12), 1159-1165.
- McBride, R.A., 1993. Soil consistency limits. In: Carter, M.R. (Ed.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Lewis Publication/CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 519-527.
- McLean, E.O., 1982. Soil pH and Lime Requirement. *Methods of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties*, 2nd Edition., Agronomy, No: 9. 199-224, 1159 p, Madison, Wisconsin USA.
- Mendoza, K., and Horn, R., 2018. Effect of biochar addition on hydraulic functions of two textural soils. *Geoderma*, 326, 88-95.
- Meng, X., Meng, F., Chen, P., Hou, D., Zheng, E., and Xu, T., 2024. A meta-analysis of conservation tillage management effects on soil organic carbon sequestration and soil greenhouse gas flux. *Science of the Total Environment*, 954, 176315.
- Mosaddeghi, M.R., Morshedizad, M., Mahboubi, A.A., Dexter, A.R., and Schulin, R., 2009. Laboratory evaluation of a model for soil crumbling for prediction of the optimum soil water content for tillage. *Soil and Tillage Research*, 105(2), 242-250.
- Mueller, L., Schindler, U., Fausey, N.R., and Lal, R., 2003. Comparison of methods for estimating maximum soil water content for optimum workability. *Soil and Tillage Research*, 72(1), 9-20.
- Mueller, L., Tille, P., and Kretschmer, H., 1990. Trafficability and workability of alluvial clay soils in response to drainage status. *Soil and Tillage Research*, 16(3), 273-287.
- Mukherjee, A., and Lal, R., 2013. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. *Agronomy*, 3(2), 313-339.
- Nelson, D.W., and Sommers, L.E., 1982. Total Carbon, Organic Carbon and Organic Matter. *Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, 9, 539-579.
- Nelson, R.E., 1982. Carbonate and Gypsum. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. 2nd Edition. Agronomy No: 9. 181-197, 1159 p, Madison, Wisconsin USA.
- Nepal, J., Ahmad, W., Munsif, F., Khan, A., and Zou, Z., 2023. Advances and prospects of biochar in improving soil fertility, biochemical quality, and environmental applications. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1114752.
- Obia, A., Mulder, J., Martinsen, V., Cornelissen, G., and Børresen, T., 2016. In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils. *Soil and Tillage Research*, 155, 35-44.
- Obour, P.B., Danso, E.O., Yakubu, A., Abenney-Mickson, S., Sabi, E.B., Darrah, Y.K., and Arthur, E., 2019. Water retention, air exchange and pore structure characteristics after three years of rice straw biochar application to an Acrisol. *Soil Science Society of America Journal*, 83(6), 1664-1671.

- Ogorek, L.L.P., Gao, Y., Farrar, E., and Pandey, B.K., 2025. Soil compaction sensing mechanisms and root responses. *Trends in Plant Science*, 30(5), 565-575.
- Omondi, M.O., Xia, X., Nahayo, A., Liu, X., Korai, P.K., and Pan, G., 2016. Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data. *Geoderma*, 274, 28-34.
- Özgül, M., 2003. Erzurum Yöresinde Yaygın Olarak Bulunan Büyük Toprak Gruplarının Sınıflandırılması ve Haritalanması. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Toprak Anabilimdalı, Erzurum.
- Palansooriya, K.N., Ok, Y.S., Awad, Y.M., Lee, S.S., Sung, J.K., Koutsospyros, A., and Moon, D.H., 2019. Impacts of biochar application on upland agriculture: A review. *Journal of Environmental Management*, 234, 52-64.
- Park, J.H., Yun, J.J., Kim, S.H., Park, J.H., Acharya, B.S., Cho, J.S., and Kang, S.W., 2023. Biochar improves soil properties and corn productivity under drought conditions in South Korea. *Biochar*, 5(1), 66.
- Pidlisnyuk, V., Herts, A., Kononchuk, O., Khomenchuk, V., Horyn, O., Markiv, V., and Mamirova, A., 2025. Comprehensive study of biochars from different vegetative feedstocks: influence on soil properties and development of *Zea mays* L. *Environmental Sciences Europe*, 37(1), 77.
- Pranagal, J., Oleszczuk, P., Tomaszewska-Krojańska, D., Kraska, P., and Różyło, K., 2017. Effect of biochar application on the physical properties of Haplic Podzol. *Soil and Tillage Research*, 174, 92-103.
- Razzaghi, F., Obour, P. B., and Arthur, E., 2020. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. *Geoderma*, 361, 114055.
- Reddy, K.R., Yaghoubi, P., and Aksoy, Y.Y., 2015. Effects of biochar amendment on geotechnical properties of landfill cover soil. *Waste Management and Research*, 33(6), 524-532.
- Reis, D.A., Lima, C.L.R., Pauletto, E.A., Dupont, P.B., and Pillon C.N., 2014. Tensile strength and friability of an Alfisol under agricultural management systems. *Scientia Agricola*, 71(2), 163-168.
- Rhoades, J.D., 1982a. Cation Exchange Capacity. *Methods of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties*, 2nd ed., Ed: A.L. Page. Soil Science Society of America Inc., Madison, Wisconsin, 149-157.
- Rhoades, J.D., 1982b. Soluble Salts, In: Page, A.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties*, 2nd ed., Ed: ASA, Soil Science Society of America, Agronomy No: 9. Madison, Wisconsin, pp. 167-179.
- Rixon, A.J., Xianliang, Y., and Xia, Z.H., 1991. Effect of heavy applications of organic residues on the physical properties of paddy soils in China. *Soil and Tillage Research*, 20(1), 101-108.
- Saberian, M., Zhu, J., Roychand, R., Sun, X., Li, J., and Li, C.Q., 2025. Effect of fine-grained wood biochar on the geotechnical and microstructural behaviour of expansive clay as pavement subgrade. *J. of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. (in press).
- Shah, A.N., Tanveer, M., Shahzad, B., Yang, G., Fahad, S., Ali, S., and Souliyanonh, B., 2017. Soil compaction effects on soil health and crop productivity: an overview. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(11), 10056-10067.
- Shumba, A., Chikowo, R., Thierfelder, C., Corbeels, M., Six, J., and Cardinael, R., 2024. Mulch application as the overarching factor explaining increase in soil organic carbon stocks under conservation agriculture in two 8-year-old experiments in Zimbabwe. *Soil*, 10(1), 151-165.
- Singh, N., Flury, M., Neely, H., Bary, A., Akin, I., and LaHue, G.T. 2025. Compaction of a sandy loam soil not impacted by long-term biosolids applications. *Soil and Tillage Research*, 253, 106648.

- Sohi, S.P., Krull, E., Lopez-Capel, E., and Bol, R., 2010. A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, 105, 47-82.
- Soinne, H., Hovi, J., Tammeorg, P., and Turtola, E., 2014. Effect of biochar on phosphorus sorption and clay soil aggregate stability. *Geoderma*, 219, 162-167.
- Sokołowska, Z., Szewczuk-Karpisz, K., Turski, M., Tomczyk, A., Cybulak, M., and Skic, K., 2020. Effect of wood waste and sunflower husk biochar on tensile strength and porosity of dystic cambisol artificial aggregates. *Agronomy*, 10(2), 244.
- Stockmann, U., Adams, M.A., Crawford, J.W., Field, D.J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., and Zimmermann, M., 2013. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 164, 80-99.
- Taban, S., Turan, M.A. ve Katkat, A.V., 2013. Tarımda organik madde ve tavuk gübresi. *Tavukçuluk Araştırma Dergisi*, 10(1), 9-13.
- Tan, Z., Lin, C.S., Ji, X., and Rainey, T.J., 2017. Returning biochar to fields: A review. *Applied Soil Ecology*, 116, 1-11.
- Tanure, M.M.C., da Costa, L.M., Huiz, H.A., Fernandes, R.B.A., Cecon, P.R., Junior, J.D.P., and da Luz, J.M.R., 2019. Soil water retention, physiological characteristics, and growth of maize plants in response to biochar application to soil. *Soil and Tillage Research*, 192, 164-173.
- Terzaghi, A., Hoogmoed, W.B., and Miedema, R., 1988. The use of the wet workability limit to predict the land quality workability for some Uruguayan Soils. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 36(1), 91-103.
- Tivy, J., 1990. *Agricultural Ecology*. London, UK: Longman.
- Utomo, W.H., and Dexter, A.R., 1981. Soil friability. *European Journal of Soil Science*, 32(2), 203-213.
- Wagner, L.E., Ambe, N.M., and Barnes, P., 1992. Tillage-induced soil aggregate status as influenced by water content. *Transactions of the ASAE*, 35(2), 499-504.
- Wan, Y., Dong, Z., He, X., Liu, R., Cai, Y., Liu, L., and Xue, Q., 2022. Effect of biochar on permeability of compacted soil and its microscopic mechanism. *Canadian Geotechnical Journal*, 59(12), 2184-2195.
- Wang, J., Xiong, Z., and Kuzyakov, Y., 2016. Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. *GCB Bioenergy*, 8(3), 512-523.
- Watts, C.W., and Dexter, A.R., 1998. Soil friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. *European Journal of Soil Science*, 49(1), 73-84.
- Wu, J., Zhou, B., Li, Z., Liu, C., Li, Y., Wang, Y., and Shan, S., 2025. Biochar promoted soil organic carbon accumulation and aggregate stability by increasing the content of organic complex metal oxides in paddy soil. *Soil and Tillage Research*, 254, 106713.
- Xiao, Q., Zhu, L.X., Shen, Y.F., and Li, S.Q., 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.
- Xie, Y., Bai, T., Zhang, Y., Sun, B., Gao, M., and Feng, H., 2025. Nano biochar enhances organic carbon accumulation, molecular complexity, and salt leaching in saline-alkali soil columns. *Journal of Environmental Management*, 389, 126205.
- Yadav, S.K., and Bag, R., 2023. Effect of bamboo biochar on strength and water retention properties of low plastic clay and silty sand. *Scientific Reports*, 13(1), 6201.
- Yan, S., Zhang, S., Yan, P., Wei, Z., Niu, X., and Zhang, H., 2026. Biochar application increased soil carbon sequestration by altering organic carbon components in aggregates. *Soil and Tillage Research*, 255, 106795.
- Yang, C.D., and Lu, S.G., 2021. Effects of five different biochars on aggregation, water retention and mechanical properties of paddy soil: A field experiment of three-season crops. *Soil and Tillage Research*, 205, 104798.

- Yang, D., Yunguo, L., Shaobo, L., Xixian, H., Zhongwu, L., Xiaofei, T., Guangming, Z., and Lu, Z., 2017. Potential benefits of biochar in agricultural soils: a review. *Pedosphere*, 27(4), 645-661.
- Yuan, H., Wu, Y., Sun, Y., Liu, J., Lin, L., Xia, F., and Meng, J., 2025. Differential effects of biochar and straw incorporation on soil organic carbon: A case study on paddy cultivation in Northeast China. *Journal of Environmental Management*, 390, 126284.
- Zanutel, M., Garré, S., Sanglier, P., and Biielders, C., 2024. Biochar modifies soil physical properties mostly through changes in soil structure rather than through its internal porosity. *Vadose Zone Journal*, 23(1), e20301.
- Zhang, Q., Li, S., Saleem, M., Ali, M.Y., and Xiang, J., 2021. Biochar and earthworms synergistically improve soil structure, microbial abundance, activities and pyraclostrobin degradation. *Applied Soil Ecology*, 168, 104154.
- Zhang, X., Liu, Y., and Zhang, A., 2022. The influence of biochar on soil properties and crop yields: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 324, 107734.
- Zong, Y., Wang, Y., Sheng, Y., Wu, C., and Lu, S., 2018. Ameliorating soil acidity and physical properties of two contrasting texture Ultisols with wastewater sludge biochar. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 25726-25733.
- Zong, Y., Xiao, Q., and Lu, S., 2016. Acidity, water retention, and mechanical physical quality of a strongly acidic Ultisol amended with biochars derived from different feedstocks. *Journal of Soils Sediments*, 16, 177-190.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Abdullah BAKAN
Eğitim	
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora:	
Yabancı Dil Bilgisi	
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	