

Atıf İçin: Bakan, A. ve Aksakal, E. L. (2026). Biyokömürün Farklı Tekstürdeki Toprakların Proctor Sıkıştırma Testi Parametreleri Üzerine Etkileri. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 16(1), 375-385.

To Cite: Bakan, A. & Aksakal, E. L. (2026). Effects of Biochar on Proctor Compaction Test Parameters of Different Textured Soils. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 16(1), 375-385.

Biyokömürün Farklı Tekstürdeki Toprakların Proctor Sıkıştırma Testi Parametreleri Üzerine Etkileri

Abdullah BAKAN^{1,2*}, Ekrem Lütfi AKSAKAL²

Öne Çıkanlar:

- Optimum Nem İçeriği
- Maksimum Hacim Ağırlık
- Toprak Verimliliği

Anahtar Kelimeler:

- Biyokömür
- Organik karbon
- Agregat stabilitesi
- Toprak strüktürü
- Toprak sıkışması

ÖZET:

Toprak sıkışması, toprağın üretkenliğini etkileyen önemli bir faktör olup, topraklardaki hacimsel değişimler, doğal olaylar ve mekaniksel dış kuvvetler nedeniyle meydana gelir. Toprak fiziksel koşullarının bozulması, su, hava, sıcaklık ve çimlenme gibi faktörlere olumsuz etki yaparak kök gelişimini ve sürgün çıkışını engeller, bitkisel üretimin düşmesine neden olur. Söz konusu olumsuzlukları minimize etmenin en etkili yöntemlerinde biri organik kaynaklı toprak düzenleyicilerin toprağa uygulanmasıdır. Bu çalışmada, farklı tekstürlerdeki topraklara (kil, tın, kumlu tın) farklı dozlarda biyokömür (BC) uygulamasının (%0, %0,5, %1, %2, %4) toprağın organik karbon (OC), agregat stabilitesi (AS) ve Proctor sıkışma testi parametreleri olan optimum nem içeriği (OMC) ile maksimum hacim ağırlığı (MBD) üzerine etkileri incelenmiştir. Biyokömür uygulaması araştırma topraklarının organik karbon (OC) içeriğini ve agregat stabilitesi (AS) değerlerini istatistiksel olarak önemli düzeyde ($p < 0.001$) artırmıştır. Daha yüksek dozlarda uygulanan biyokömür dozları daha belirgin iyileştirmelere yol açmış, genel ortalamalar incelendiğinde kontrol grubunda %0.73 olan OC değeri %4 biyokömür uygulamasında %1.4 olarak belirlenmiştir. AS ise kontrolde %26.98 iken %4 biyokömür uygulamasında %46.03 olarak belirlenmiştir. Optimum nem içeriği (OMC) biyokömür uygulamasıyla genel ortalamada %20.56'dan %31.15'e yükselmiş ve oransal olarak %51.51 oranında bir artış gösterirken, maksimum hacim ağırlık (MBD) 1.71 g/cm³'den 1.54 g/cm³'e düşmüş ve oransal olarak %9.94 oranında bir azalış göstermiştir. Korelasyon analizi, BC ile OC, AS ve OMC arasında güçlü pozitif ilişkiler olduğunu gösterirken; MBD ile BC, OC ve AS arasında önemli negatif korelasyon olduğunu göstermiştir. Bulgularımız, biyokömür uygulamasının toprakların özelliklerini iyileştirerek sıkışmaya karşı direncini artırdığını ve sıkışmayı azalttığını ortaya koymaktadır. Bu iyileştirmeler daha iyi toprak sağlığına, artan tarımsal üretkenliğe ve artan çevresel dayanıklılığa katkıda bulunarak biyokömürü sürdürülebilir arazi yönetimi için toprak iyileştiricisi olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Effects of Biochar on Proctor Compaction Test Parameters of Different Textured Soils

Highlights:

- Optimum Moisture Content
- Maximum Bulk Density
- Soil Fertility

Keywords:

- Biochar
- organic carbon
- aggregate stability
- soil structure
- soilcompaction

ABSTRACT:

Soil compaction is a critical factor limiting soil productivity, commonly caused by volumetric changes, natural events, and mechanical forces. The degradation of soil physical properties adversely affects essential factors such as water availability, air exchange, temperature regulation, and seed germination, ultimately restricting root development and shoot emergence, which leads to reduced plant growth and yield. One of the most effective strategies to mitigate soil compaction is the application of organic-based soil amendments. This study investigated the effects of biochar (BC) applied at different rates (0%, 0.5%, 1%, 2%, and 4%) to soils with varying textures (clay, loam, and sandy loam) on key soil quality indicators: soil organic carbon (OC), aggregate stability (AS), and Proctor compaction parameters including optimum moisture content (OMC) and maximum bulk density (MBD). The results demonstrated that biochar significantly improved OC and AS across all soil types ($p < 0.001$). The OC increased from 0.73% in the control to 1.40% with 4% BC, while AS improved from 26.98% to 46.03%. Biochar also enhanced OMC from 20.56% to 31.15% (a 51.51% increase) and reduced MBD from 1.71 g/cm³ to 1.54 g/cm³ (a 9.94% decrease). Correlation analysis indicated strong positive relationships between BC and OC, AS, and OMC, and significant negative correlations between MBD and BC, OC, and AS. These findings suggest that biochar application enhances soil structure and resilience against compaction, supporting improved soil health, agricultural productivity, and environmental sustainability. Therefore, biochar represents a promising amendment for sustainable land management.

¹ Abdullah BAKAN ([Orcid ID: 0009-0007-8059-4038](https://orcid.org/0009-0007-8059-4038)), Bahçe Kültürleri Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Erzincan, Türkiye

² Ekrem Lütfi AKSAKAL ([Orcid ID: 0000-0002-8910-3190](https://orcid.org/0000-0002-8910-3190)), Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Erzurum, Türkiye

***Sorumlu Yazar/Corresponding Author:** Abdullah BAKAN, e-mail: abdullahbakan2424@gmail.com

Bu çalışma Abdullah BAKAN'ın Yüksek Lisans Tezinden Üretilmiştir.

GİRİŞ

Dünya nüfusu hızla artarken kırsal alanlardan şehirlere de göç artmakta ve hızlı bir kentleşme yaşanmaktadır. Bu hızlı kentleşmeye bağlı olarak kentsel arazi alanının 2100 yılına kadar 3.6 milyon kilometrekareye çıkacağı, tarım alanlarında önemli düzeyde azalma meydana geleceği öngörülmektedir (Gao & O'Neill, 2020). Artan nüfus, küresel ölçekte gıda talebini önemli ölçüde artırmakta; bu durum, kentleşme kaynaklı toprak kayıplarıyla birleşerek verimli tarım alanları üzerinde ciddi baskılar oluşturmaktadır. Bu bağlamda, son yıllarda sürdürülebilirlik kavramı etrafında geliştirilen onarıcı tarım uygulamaları, toprak sağlığının korunması ve ekosistem hizmetlerinin devamlılığı açısından önem kazanmaktadır. Toprak sağlığını olumsuz etkileyen fiziksel bozulmalardan biri olan toprak sıkışması, özellikle yoğun tarımsal faaliyetler ile ağır makinelerin kontrolsüz kullanımı sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu süreç; kök gelişimini, su ve hava hareketliliğini kısıtlamakta, dolayısıyla bitki büyümesi ve tarımsal verimi olumsuz etkilemektedir (Batey, 2009). Sıkışmış topraklarda, artan hacim ağırlığı ve mekanik direnç, gözenekliliğin ve agregat stabilitesinin azalmasına yol açarak toprak yapısını bozmaktadır. Bu durum hem tarımsal üretkenliği hem de çevresel sürdürülebilirliği olumsuz yönde etkilemektedir (Seifu Woldeyohannis, 2024; Frene et al., 2024; Yang et al., 2025). Toprak sıkışması, gözenekliliği ve hava-su dengesini olumsuz etkileyerek kök gelişimini kısıtlamakta, bunun sonucunda bitki veriminde azalmalar meydana gelmektedir. Sıkışmanın şiddetine bağlı olarak infiltrasyon, havalanma, mikrobiyal aktivite ve besin elementi döngüsü gibi temel toprak işlevleri zayıflamakta; bu durum özellikle yoğun tarla trafiğiyle birlikte daha belirgin hale gelmektedir (Aksakal, 2004), toprak sıkışmasının fiziksel, kimyasal ve biyolojik bozulmalar yoluyla üretkenliği ve tarımsal sürdürülebilirliği tehdit eden başlıca etkenlerden biri olduğunu belirtmektedir.

Toprak sıkışmasının etkileri yalnızca üretimle sınırlı kalmayıp, çevresel sorunları da beraberinde getirmektedir. Sıkışmış topraklarda infiltrasyon kapasitesinin azalması, yüzey akışını ve erozyonu artırarak su kalitesinde bozulmalara ve su kütlelerinde sediment birikimine neden olmaktadır (Batey, 2009). Ayrıca, sınırlı havalanma koşulları anaerobik ortamların oluşmasına yol açmakta, bu da nitroz oksit gibi sera gazlarının emisyonunu artırarak iklim değişikliği üzerinde olumsuz etkilere neden olmaktadır (Ball, 2013). Bu kapsamda, toprak sıkışmasını azaltmaya yönelik alternatif uygulamalar önem kazanmaktadır. Organik katkı maddelerinin, özellikle kentsel atıklar da dahil olmak üzere organik yan ürünlerin geri dönüştürülerek kullanılması, toprak verimliliğinin artırılması, strüktürel özelliklerin geliştirilmesi, agregat oluşumunun ve strüktürel stabilitenin iyileştirilmesi açısından etkili bir yöntem olarak değerlendirilmektedir (Abbott & Murphy, 2007; Abiven et al., 2009). Bu uygulamalardan biri de biyokömür kullanımına dayanmaktadır. Biyokütlelerin, oksijensiz veya düşük oksijenli bir ortamda yüksek sıcaklıklarda pirolizlenmesiyle elde edilen ve bozulmaya karşı dirençli bir karbon ürünü olan biyokömür, toprağın özelliklerini iyileştirme potansiyeline sahiptir. Yüksek özgül yüzey alanı, negatif yüzey yükü ve kararlı yapısı sayesinde toprakların fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini iyileştirme potansiyeline sahiptir ve bu yönüyle bitkisel üretimin verimliliğini artırmada etkili bir toprak katkı maddesi olarak değerlendirilmektedir (Madari et al., 2017; Özcan & Tuncer, 2024). Ayrıca biyokömürün toprak hacim ağırlığını düşürmede hayvan gübresi ile benzer etkilere sahip olduğunu bildirilmiştir (Blanco-Canqui, 2021). Yine biyokömür, kararlı yapısı, yüksek gözenekliliği ve toprak strüktürel özelliklerini iyileştirme ve sıkışmayı azaltmadaki uzun süreli faydaları nedeniyle özellikle umut verici bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Önceki çalışmalarda biyokömürün bir toprak düzenleyicisi olarak büyük bir potansiyele sahip olması ve toprak kalitesini iyileştirmesinin yanı sıra sosyoekonomik ve çevresel faydaları ile de dikkat çektiği rapor edilmiştir (Zhang, 2013; Li et al., 2021). Toprak sıkışması, toprak fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri

üzerinde bir dizi olumsuz etkilere neden olmaktadır (Aksakal, 2004). Toprak organik maddesi; hacim ağırlığı, toplam porozite, gözenek büyüklük dağılımı ve mekanik direnç gibi yapısal özellikler üzerinde önemli etkiler oluşturarak, kök gelişimi ile bitkiye su ve oksijen temininde kritik rol oynamaktadır (Turgut & Öztaş, 2012). Toprak sıkışması, hacim ağırlığını ortalama %10-25 oranında artırırken, gözenekliliği %30-50 oranında azaltabilmektedir. Bu değişimler, su infiltrasyon hızında %60-80'e varan düşüşlere, hava geçirgenliğinde %70'e varan azalmalara ve kök gelişiminde ciddi kısıtlamalara neden olmaktadır (Özdemir & Canbolat, 1997; Servadio et al., 2005). Biyokömür uygulamaları, toprak organik karbon ve organik maddesi miktarını artırarak toprak fiziksel ve mekaniksel özelliklerini geliştirerek sıkışabilirliği azaltma potansiyeli taşımaktadır. Bu çalışmada, farklı tekstürdeki topraklara (kil, tın ve kumlu tın) laboratuvar koşullarında ağırlık esasından farklı oranlarda (%0, %0.5, %1, %2 ve %4) uygulanan biyokömürün proctor sıkışma testi parametreleri üzerine etkileri değerlendirilmiştir.

MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, biyokömürün farklı tekstür sınıflarına (kil, tın ve kumlu tın) sahip toprakların Proctor sıkışma parametreleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Toprak örnekleri Erzurum ilindeki farklı toprak ordolarından (Akgül, 1992; Özgül, 2003) alınmış ve 8 mm'lik bir elekten elenmiştir. Daha önce 1 mm'den elenmiş olan biyokömür, topraklara ağırlık esasına göre beş farklı dozda (%0, %0.5, %1, %2 ve %4) ilave edilmiş ve homojen karışımları sağlanmıştır.

Toprak-biyokömür karışımları 40 cm uzunluğunda, 25 cm genişliğinde ve 15 cm derinliğinde plastik kaplara yerleştirilmiştir. Karışımlar altı ay boyunca yaklaşık tarla kapasitesi nem içeriğinde inkübe edilmiş (Greenberg et al., 2019; Hailegnaw et al., 2019), inkübasyon süresi boyunca nem seviyeleri düzenli olarak izlenmiş ve tarla kapasitesi nem seviyesinde kontrol altına alınarak üç günde bir su ilavesi yapılmıştır. Deneme, 3 tekerrürlü olarak laboratuvar koşullarında yürütülmüş ve toplam 45 örnekte (3 tekstür × 5 biyokömür dozu × 3 tekerrür) çalışılmıştır. Inkübasyon süresinin sonunda, toprak örnekleri alınarak proctor sıkışma parametrelerin ve bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlemek için analize tabi tutulmuştur. Bu çalışmada kullanılan biyokömür, arıtma çamurundan üretilmiş olup, ticari bir firmadan temin edilmiştir. Çizelge 1'de araştırmada kullanılan deneme topraklarının ve biyokömürün bazı tanımlayıcı özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1. Deneme Topraklarının ve Biyokömürün Bazı Tanımlayıcı Özellikleri

Parametreler	Topraklar			Materyal	
	Toprak I	Toprak II	Toprak III	Biyokömür	
Kil (%)	58.60±1.40	21.83±1.51	14.46±1.06	Tane büyüklük dağılımı (%)	1000-500 µ 11.52
Silt (%)	25.43±2.09	31.44±1.08	27.11±1.14		500-250 µ 13.55
Kum (%)	15.97±2.37	46.73±1.25	58.43±1.32		250-100 µ 14.83
Tekstür sınıfı	Kil	Tın	Kumlu tın		100-53 µ 25.07
Büyük toprak grubu	Pellustert	Fluvaquent	Ustorthent		<53 µ 35.03
KDK (cmol /kg)	52.94±1.30	30.73±0.96	19.25±0.71	Tane büyüklük dağılımı (%)	1000-500 µ 3.42
CaCO ₃ (%)	1.49±0.02	2.14±0.06	0.65±0.03		500-250 µ 2.94
Organik madde (%)	1.44±0.07	1.51±0.11	1.96±0.09		250-100 µ 2.04
pH	7.46±0.02 ^ψ	7.59±0.04 ^ψ	7.24±0.06 ^ψ		100-53 µ 2.82
EC (mS/cm)	1.19±0.04 ^Ω	1.03±0.02 ^Ω	0.59±0.04 ^Ω		<53 µ 88.78
Tane yoğunluğu (g/cm ³)	2.67±0.02	2.63±0.02	2.68±0.02	1.72±0.02	

^ψ 1:2.5 toprak: su süspansiyonunda belirlenmiştir. ^Ω Saturasyon ekstraktında belirlenmiştir.

Toprak örneklerinin tekstürü Gee & Or (2002)'e göre, pH Thomas (1996)'a göre, elektriksel iletkenlik Rhoades (1996)'a göre belirlenmiştir. Kireç içeriği (Loeppert & Suarez, 1996)'e göre, organik karbon ve organik madde (Nelson & Sommers, 1996)'e göre tespit edilmiştir. Tane yoğunluğu

(Flint & Flint, 2002) ve kation değişim kapasitesi (Sumner & Miller, 1996)'a göre belirlenmiştir. Agregat stabilitesi Nimmo & Perkins (2002)'e göre ve proctor sıkıştırma testi parametreleri (ASTM, 1992)'e göre belirlenmiştir.

Veriler, varyans analizi (ANOVA) yöntemiyle değerlendirilmiştir. Uygulamalar arasındaki farklılıkların belirlenmesinde Tukey'in çoklu karşılaştırma testi kullanılmıştır. Ayrıca, ölçülen parametreler arasındaki ilişkileri incelemek amacıyla korelasyon ve regresyon analizleri uygulanmıştır. Tüm istatistiksel analizler, SPSS paket programı (IBM, 2011) aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmada, biyokömür uygulamasının farklı tekstürdeki topraklarda toprak organik karbonu (OC), agregat stabilitesi (AS), optimum nem içeriği (OMC) ve maksimum hacim ağırlığı (MBD) özellikleri üzerinde önemli düzeyde etkiler yaptığı belirlenmiştir. Tüm toprak tiplerinde biyokömür uygulaması ile OC ve AS değerlerinde istatistiksel olarak anlamlı ($p < 0.001$) artışlar gözlenmiştir (Çizelge 2).

Kil bünyeli Toprak I'te OC, kontrol grubunda %0.67 iken, %4 biyokömür uygulamasında %1.18'e ulaşmış ve %76.12 oranında artmıştır. AS ise %23.69'dan %39.06'ya çıkarak %64.88 artış göstermiştir. Tın bünyeli Toprak II'de OC, %0.73'ten %1.46'ya çıkarak %100 artış sağlamıştır. AS ise %31.53'ten %50.89'a yükselmiş ve %61.40 oranında artmıştır. Kumlu tın bünyeli Toprak III'te OC, %0.77'den %1.56'ya çıkarak %102.60 artış gösterirken; AS ise %25.71'den %48.13'e çıkarak %87.20 oranında yükselmiştir. Biyokömür uygulaması sonrasında, hem OC'da hemde AS'de oransal olarak en fazla artışlar kumlu tınlı tekstür sınıfındaki toprakta meydana gelmiştir (Çizelge 2).

Biyokömür uygulama oranlarının (%0, %0.5, %1, %2 ve %4) artmasıyla OC ve AS değerlerinde kademeli artışlar kaydedilmiştir. Kontrol grubu topraklarında OC %0.67 ile %0.77 ve AS de %23.69 ile %31.53 aralığında değişirken; %4 biyokömür uygulaması sonrasında OC'nun %1.18 ile %1.56 ve AS'nin ise %39.06 ile %50.89 aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Genel ortalama kontrolde OC içeriği %0.73 iken %0.5, %1, %2 ve %4 biyokömür uygulaması sonrasında OC içeriğinin %0.81, %0.90, %1.10 ve %1.40'a yükseldiği, genel ortalama kontrolde AS değeri %26.98 olarak belirlenirken söz konusu biyokömür uygulamaları sonrasında %33.99, %37.90, %41.35 ve %46.03 olarak belirlenmiştir (Çizelge 2).

Biyokömür uygulamasının toprakların Proctor sıkıştırma parametresi olan optimum nem içeriği (OMC) ve maksimum hacim ağırlığı (MBD) değerleri üzerine önemli düzeyde etkiler yaptığı belirlenmiştir. Biyokömür uygulama oranlarının (%0.5, %1, %2 ve %4) artmasıyla OMC'de artışlar meydana gelirken, MBD değerlerinde düşüşler kaydedilmiştir (Çizelge 3; Şekil 1) Tüm toprak tiplerinde biyokömür uygulaması ile OMC'de istatistiksel olarak anlamlı ($p < 0.001$) artışlar meydana gelirken ve MBD değerlerinde istatistiksel olarak anlamlı ($p < 0.001$) düşüşler belirlenmiştir. Biyokömür uygulamasıyla Toprak I'de OMC %29.51'den %40.99'a yükselmiş, MBD ise 1.44 g /cm³'ten 1.32 g /cm³'e düşmüştür. Toprak II'de OMC %18.69'dan %29.18'e çıkarken, MBD 1.76 g /cm³'ten 1.56 g /cm³'e düşmüştür. Toprak III'te ise OMC %13.47'den %23.28'e yükselirken, MBD ise 1.93 g /cm³'ten 1.74 g /cm³'e düşmüştür. Oransal olarak OMC'de en fazla artış %72.83 ile kumlu tın tekstür sınıfında olan Toprak III'de meydana gelirken, oransal olarak MBD'de en fazla düşüş %11.36 ile tın tekstür sınıfında olan Toprak II'de meydana gelmiştir (Çizelge 3).

Korelasyon analizleri, parametreler arasında güçlü ve anlamlı ilişkilerin bulunduğunu göstermektedir. Tüm toprak tiplerinde biyokömür uygulaması ile OC, AS ve OMC arasında pozitif; MBD ile ise negatif korelasyonlar tespit edilmiştir ($p < 0.01$). Özellikle kil bünyeli toprakta, biyokömür ile OC ($r = 0.981$), AS ($r = 0.931$) ve OMC ($r = 0.970$) arasında yüksek pozitif ilişkiler bulunurken,

MBD ile bu parametreler arasında güçlü negatif korelasyonlar saptanmıştır. Benzer ilişkiler diğer toprak tiplerinde de gözlemlenmiş ve biyokömür uygulamasının toprak yapısal özelliklerini iyileştirme potansiyelini doğrular niteliktedir (Çizelge 4).

Çizelge 2. Toprak Organik Karbonu (OC) ve Agregat Stabilitesi (AS) Değerleri Üzerine Biyokömürün Etkileri

Topraklar	Uygulama Dozları (w/w) (%)	Organik Karbon (%)	Agregat Stabilitesi (%)
Toprak I (Kil)	0 (Kontrol)	0.67±0.03d	23.69±1.28d
	0.5	0.74±0.01d	24.76±0.93cd
	1	0.86±0.03c	27.09±0.92c
	2	1.00±0.02b	35.91±2.85b
	4	1.18±0.04a	39.06±1.68a
Ortalama	0.89±0.19C	30.10±6.58C	
<i>p değeri</i>	0.001	0.001	
Toprak II (Tın)	0 (Kontrol)	0.73±0.02e	31.53±2.39c
	0.5	0.82±0.02d	33.32±3.78c
	1	0.89±0.02c	39.03±1.37b
	2	1.12±0.03b	40.54±3.44b
	4	1.46±0.03a	50.89±3.87a
Ortalama	1.00±0.27B	39.06±7.52B	
<i>p değeri</i>	0.001	0.001	
Toprak III (Kumlu Tın)	0 (Kontrol)	0.77±0.02e	25.71±0.92b
	0.5	0.86±0.02d	43.89±5.72a
	1	0.94±0.02c	47.58±3.99a
	2	1.17±0.03b	47.59±3.51a
	4	1.56±0.02a	48.13±3.62a
Ortalama	1.06±0.29A	42.58±9.45A	
<i>p değeri</i>	0.001	0.001	
Genel Ortalama	0 (Kontrol)	0.73±0.05e	26.98±3.80d
	0.5	0.81±0.06d	33.99±8.99c
	1	0.90±0.04c	37.90±9.17bc
	2	1.10±0.08b	41.35±5.83b
	4	1.40±0.18a	46.03±6.04a
Toprak (<i>p değeri</i>)		0.001	0.001
Biyokömür dozu (<i>p değeri</i>)		0.001	0.001
Toprak × Biyokömür Dozu (<i>p değeri</i>)		0.001	0.001

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

Korelasyon analizlerimize göre, Toprak I'de biyokömür (BC) ile organik karbon (OC) arasında çok yüksek düzeyde pozitif bir korelasyon ($r=0.981$, $p<0.01$) bulunmuştur. Benzer şekilde, agregat stabilitesi (AS) ile OC ($r = 0.947$, $p<0.01$) ve AS ile BC ($r = 0.931$, $p<0.01$) arasında da güçlü pozitif ilişkiler gözlenmiştir. Optimum nem içeriği (OMC) ile BC ($r = 0.970$, $p<0.01$) ve OC ($r = 0.958$, $p<0.01$) arasındaki ilişkiler de anlamlı ve pozitifdir. Öte yandan, maksimum hacim ağırlık (MBD) ile diğer tüm parametreler arasında anlamlı negatif korelasyonlar tespit edilmiştir: BC ($r=-0.971$, $p<0.01$), OC ($r=-0.938$, $p<0.01$), AS ($r=-0.904$, $p<0.01$), OMC ($r=-0.909$, $p<0.01$). Toprak II'de ise BC ile OC ($r = 0.948$, $p<0.01$), BC ile AS ($r=0.894$, $p<0.01$), OMC ile OC ($r=0.941$, $p<0.01$) arasında anlamlı pozitif ilişkiler belirlenmiştir. Aynı şekilde, MBD ile BC ($r=-0.978$, $p<0.01$), OC ($r=-0.939$, $p<0.01$) ve OMC ($r=-0.952$, $p<0.01$) arasında anlamlı negatif korelasyonlar bulunmuştur. Toprak III'te BC ile OC ($r=0.943$, $p<0.01$) arasında anlamlı pozitif bir ilişki gözlenmiş; AS ile OC ($r=0.568$, $p<0.05$) arasında orta düzeyde, AS ile BC ($r=0.752$, $p<0.01$) arasında ise daha güçlü bir ilişki bulunmuştur. MBD ile diğer tüm parametreler arasında ise yüksek düzeyde negatif korelasyonlar tespit edilmiştir: BC ($r=-$

Biyokömürün Farklı Tekstürdeki Toprakların Proctor Sıkıştırma Testi Parametreleri Üzerine Etkileri

0.968, $p < 0.01$), OC ($r = -0.910$, $p < 0.01$), AS ($r = -0.793$, $p < 0.01$) ve OMC ($r = -0.957$, $p < 0.01$) (Çizelge 4).

Çizelge 3. Toprakların Proctor Sıkıştırma Testi Parametreleri Optimum Nem İçeriği (OMC), Maksimum Hacim Ağırlığı (MBD) Üzerine Biyokömürün Etkileri

Topraklar	Uygulama Dozları (w/w) (%)	Optimum Nem İçeriği (%)	Optimum Nem İçeriğinde 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	-2.08
	1	34.35±1.41b	+16.40	1.37±0.02b	-4.86
	2	37.83±0.56a	+28.19	1.33±0.01c	-7.64
	4	40.99±0.69a	+38.90	1.32±0.01c	-8.33
Ortalama		34.91±4.37A		1.37±0.05C	
<i>p değeri</i>		0.001		0.001	
Toprak II (Tın)	0 (Kontrol)	18.69±1.08c	0.00	1.76±0.02a	0.00
	0.5	20.96±0.82c	+12.15	1.73±0.02a	-1.70
	1	23.80±1.18b	+27.34	1.68±0.02b	-4.55
	2	25.99±0.81b	+39.06	1.60±0.02c	-9.09
	4	29.18±0.82a	+56.13	1.56±0.01d	-11.36
Ortalama		23.72±3.90B		1.67±0.08B	
<i>p değeri</i>		0.001		0.001	
Toprak III (Kumlu Tın)	0 (Kontrol)	13.47±1.04d	0.00	1.93±0.01a	0.00
	0.5	16.81±0.96c	+24.80	1.85±0.02b	-4.15
	1	18.27±0.85bc	+35.63	1.83±0.01bc	-5.18
	2	20.06±0.66b	+48.92	1.79±0.02c	-7.25
	4	23.28±1.52a	+72.83	1.74±0.02d	-9.84
Ortalama		18.38±3.49C		1.83±0.07A	
<i>p değeri</i>		0.001		0.001	
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 değeri)</i>		0.001		0.001	
<i>Biyokömür doz (p değeri)</i>		0.001		0.001	
<i>Toprak×Biyokömür doz (p değeri)</i>		0.457		0.001	

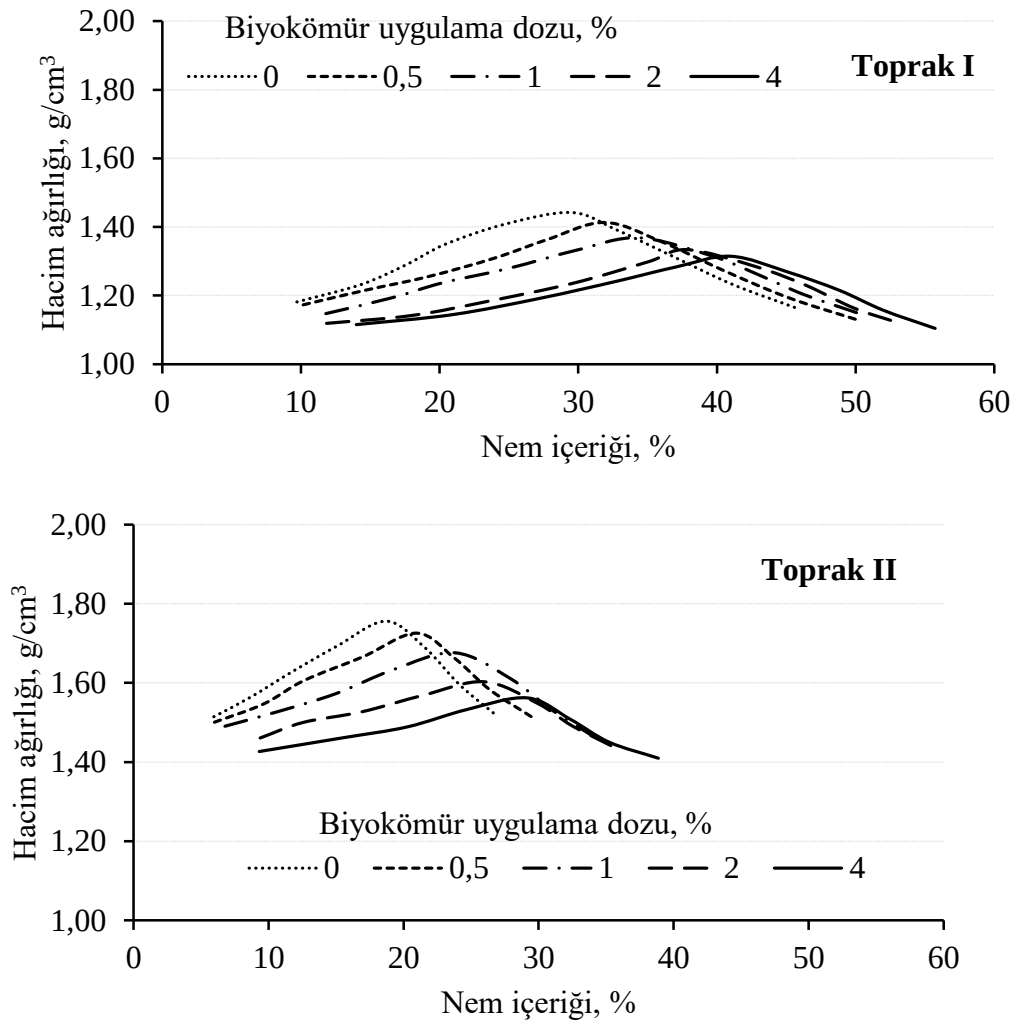
Farklı harflerle gösterilen değerler istatistiksel olarak birbirinden farklıdır ($p < 0.05$); ns: İstatistiksel olarak önemsiz.

Toprak tiplerinden bağımsız genel ortalamalar göz önüne alındığında, korelasyon analizinde ise BC ile OC arasında anlamlı pozitif bir ilişki ($r = 0.902$, $p < 0.01$), AS ile hem BC ($r = 0.691$, $p < 0.01$) hem de OC ($r = 0.757$, $p < 0.01$) arasında anlamlı pozitif korelasyonlar gözlenmiştir. MBD ile BC ($r = -0.308$, $p < 0.05$) ve OC ($r = -0.021$) arasında anlamlı negatif korelasyonlar belirlenmiştir. OMC ise diğer parametrelerle zayıf düzeyde korelasyon göstermiş; OC ile olan ilişkisi ($r = 0.175$) anlamsız bulunurken, AS ile olan ilişkisi negatif yönde ($r = -0.168$) olmuştur (Çizelge 4).

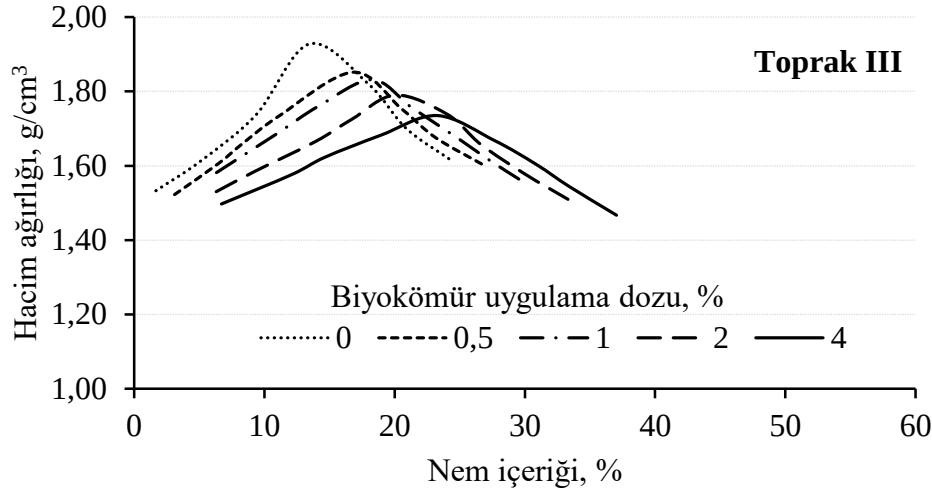
Bu çalışmada elde edilen bulgular, biyokömür uygulamasının farklı toprak tiplerinde toprak organik karbonu (OC), agregat stabilitesi (AS), optimum nem içeriği (OMC) ve maksimum hacim ağırlığı (MBD) üzerinde önemli ve anlamlı etkiler yaptığını göstermektedir. Özellikle OC değerlerinde gözlemlenen %76 ile %103 arasındaki artışlar, biyokömürün karbon açısından yüksek potansiyel taşıdığını ortaya koymuştur. Bu bulgu, Liu et al. (2023) tarafından bildirilen OC artışlarıyla örtüşmektedir.

Çalışmamızda gözlenen agregat stabilitesi artışları da aynı derecede dikkat çekicidir. Tüm toprak tiplerinde önemli iyileşmeler kaydedilmiş olup, killi toprakta agregat stabilitesi %23,69'dan %39,06'ya, tınlı toprakta %31.53'ten %50.89'a ve kumlu tınlı toprakta %25.71'den %48.13'e yükselmiştir. Ayrıca biyokömür uygulaması, optimum nem içeriği (OMC) ve maksimum hacim ağırlığı (MBD) üzerinde de belirgin etkiler göstermiştir ($p < 0.001$). Toprak I'te OMC %29.51'den %40.99'a yükselmiş, MBD ise 1.44 g /cm³'ten 1.32 g /cm³'e düşmüştür. Toprak II'de OMC

%18.69'dan %29.18'e çıkarken, MBD 1.76 g /cm³'ten 1.56 g /cm³'e düşmüştür. Toprak III'te ise OMC %13.47'den %23.28'e, MBD ise 1.93 g /cm³'ten 1.74 g /cm³'e düşmüştür. Bu sonuçlar, biyokömür uygulamasının toprağın sıkışmaya karşı gösterdiği direnci artırdığını ve tarla koşullarında daha yüksek nem içeriğinde daha düşük sıkışmanın meydana gelmesini sağlayacaktır. Nitekim (Sari et al., 2017) toprak yapısal stabilitesinin artırılmasının, sıkışabilirliği önemli ölçüde azalttığını yaptıkları çalışmada belirtmişlerdir. Çalışmada elde edilen doz-sonuç analizleri incelendiğinde, biyokömür uygulama oranları (%0–4, w/w) ile toprak parametreleri arasında sürekli olumlu bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur. Genel ortalamalar dikkate alındığında optimum nem içeriği kontrol grubuna göre %4 biyokömür uygulamasında %51.51 artmış, maksimum hacim ağırlığı ise %9.94 azalmıştır. Nitekim, Omondi et al. (2016) yaptıkları bir çalışmada biyokömür uygulamalarının toprak fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiş, biyokömür ilave edilen topraklarda kontrol parsellerine kıyasla hacim ağırlığı değerlerinde yaklaşık %7.6 oranında bir azalma gözlemlenmiştir. OMC ve MBD'nin farklı toprak tekstürlerinde gösterdiği değişim, biyokömürün her durumda aynı etkiyi göstermediğini, dolayısıyla uygulama kararlarında toprak koşullarının mutlaka dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Toprakların organik karbon içeriği, tekstürel yapısı ve mikrobiyal topluluk bileşimi gibi özgün özellikleri, biyokömürün etkililiğini doğrudan etkilemektedir.



Şekil 1. Araştırma toprakların proctor sıkıştırma testi eğrileri



Şekil 1. Araştırma toprakların proctor sıkıştırma testi eğrileri (Devamı)

Çizelge 4. İncelenen Parametreler Arasındaki Pearson Korelasyon Katsayıları

		BC	OC	AS	OMC	MBD
Toprak I	BC	-				
	OC	.981**	-			
	AS	.931**	.947**	-		
	OMC	.970**	.958**	.909**	-	
	MBD	-.971**	-.938**	-.904**	-.909**	-

Çizelge 4. İncelenen Parametreler Arasındaki Pearson Korelasyon Katsayıları (Devamı)

Toprak II	BC	-				
	OC	.948**	-			
	AS	.894**	.908**	-		
	OMC	.977**	.941**	.921**	-	
	MBD	-.978**	-.939**	-.847**	-.952**	-
Toprak III	BC	-				
	OC	.943**	-			
	AS	.752**	.568*	-		
	OMC	.957**	.909**	.715**	-	
	MBD	-.968**	-.910**	-.793**	-.957**	-
Genel korelasyon	BC	-				
	OC	.902**	-			
	AS	.691**	.757**	-		
	OMC	.466**	.175	-.168	-	
	MBD	-.308*	-.021	.314*	-.970**	-

** Korelasyon 0.01 seviyesinde önemlidir. * Korelasyon 0.05 seviyesinde önemlidir.

BC: Biyokömür, OC: Organik Karbon, AS: Agregat Stabilitesi, OMC: Optimum Nem İçeriği, MBD: Maksimum Hacim Ağırlığı

Korelasyon analizleri, biyokömür (BC), organik karbon (OC), agregat stabilitesi (AS), optimum nem içeriği (OMC) ve maksimum hacim ağırlığı (MBD) parametreleri arasında karmaşık ilişkileri ortaya koymuştur. I. toprakta, BC ve OC arasında tespit edilen yüksek düzeyde pozitif korelasyon ($r=0.981$, $p<0.01$), biyokömürün OC artışıdaki etkisini güçlü biçimde desteklemektedir. Bu durum, Lehmann et al. (2020) tarafından da vurgulanan, biyokömürün toprak organik madde dinamiklerini geliştirme potansiyeliyle örtüşmektedir. MBD ile diğer parametreler arasında tüm toprak türlerinde gözlemlenen anlamlı negatif korelasyonlar, biyokömür ve organik karbon artışına paralel olarak toprak hacim ağırlığının sistematik şekilde azaldığını göstermektedir.

Agregat stabilitesi, özellikle I. ve II. topraklarda OC ve BC ile yüksek düzeyde pozitif korelasyon göstermiş; bu da bu düzenleyicinin toprak yapısal bütünlüğünü artırmadaki rolünü açıkça ortaya koymaktadır. Toprakta agregat stabilitesi ile organik madde düzeyi arasında kuvvetli bir ilişki olduğu bilinmektedir. Biyokömür uygulamaları, toprağın karbon içeriğini artırarak organik ve inorganik parçacıkların bir araya gelmelerini ve stabilitesi yüksek agregatların oluşumunu teşvik etmektedir (Blanco-Canqui, 2021). III. toprakta gözlemlenen orta düzeyde korelasyonlar ise

biyokömürün her tekstürdeki toprakta aynı düzeyde etki göstermediğini; toprak tekstürüne göre toprak yönetim stratejilerinin geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

SONUÇ

Bu çalışma, farklı tekstürlere sahip topraklara uygulanan biyokömürün toprakların bazı fiziksel, kimyasal ve mekaniksel özelliklerinde önemli düzeylerde değişimler meydana getirdiğini ortaya koymaktadır. Biyokömür uygulaması, toprakların organik karbon içeriğini ve agregat stabilitesi değerlerini önemli düzeyde artırmıştır. Biyokömür uygulama dozlarının artmasıyla toprakların organik karbon içeriği ve agregat stabilitesi değerlerinde de artışlar meydana gelmiş ve en yüksek değerler %4 uygulama dozunda belirlenmiştir. Biyokömür uygulaması sonrasında, hem organik karbon içeriğinde hemde agregat stabilitesi değerlerinde oransal olarak en fazla artışlar kumlu tınlı tekstür sınıfındaki toprakta meydana gelmiştir. Ayrıca, biyokömür uygulamasının Proctor sıkışma parametresi olan optimum nem içeriği ve maksimum hacim ağırlığı değerleri üzerine de önemli düzeyde etkiler yaptığı belirlenmiştir. Biyokömür uygulama dozu arttıkça toprakların optimum nem içeriği değerleri artarken, maksimum hacim ağırlığı değerleri ise düşmüştür. En yüksek optimum nem içeriği değerleri ve en düşük maksimum hacim ağırlığı değerleri %4 uygulama dozunda elde edilmiştir. Kontrolü ile kıyaslandığında oransal olarak optimum nem içeriğinde en fazla artış kumlu tınlı tekstür sınıfındaki toprakta meydana gelirken, oransal olarak maksimum hacim ağırlığında en fazla düşüş ise tın tekstür sınıfındaki toprakta meydana gelmiştir. Sonuç olarak; biyokömür uygulaması toprakların organik karbon içeriğini artırarak agregat stabilitesinde artışlar sağlamış ve organik karbon ile agregat stabilitesindeki bu artışlar toprakların mekaniksel kuvvetlere ve sıkışmaya karşı direncini artırarak sıkışma parametreleri olan optimum nem içeriğini artırırken maksimum hacim ağırlığını düşürmüştür. Bu iyileştirmeler daha iyi toprak sağlığına ve artan tarımsal üretkenliğe katkıda bulunarak biyokömürü sürdürülebilir arazi yönetimi için toprak iyileştiricisi olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar, bu çalışmanın bulgularını etkileyecek herhangi bir finansal veya kişisel çıkar çatışmasının bulunmadığını beyan etmektedir.

Yazar Katkısı

Abdullah BAKAN ve Ekrem Lutfi AKSAKAL çalışmanın araştırma süreci, metodolojisi ve analiz aşamalarına katkı sağlamıştır. Tüm yazarlar, nihai metni okuyup onaylamıştır.

KAYNAKLAR

- Abbott, L. K., & Murphy, D. V. (2007). What is soil biological fertility? In D. V. Murphy & L. K. Abbott (Eds.), *Soil biological fertility: A key to sustainable land use in agriculture* (pp. 1–15). Dordrecht: Springer.
- Abiven, S., Menasseri, S., & Chenu, C. (2009). The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability—A literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(1), 1-12.
- Akgül, M. (1992). Daphan Ovası Topraklarının Sınıflandırılması ve Haritalanması. Atatürk Üni. Fen Bilimleri Enst. Doktora Tezi.
- Aksakal, E. L. (2004). Toprak sıkışması ve tarımsal açıdan önemi. *Research in Agricultural Sciences*, 35(3-4).
- ASTM. (1992). *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.
- Ball, B. C. (2013). Soil structure and greenhouse gas emissions: A synthesis of 20 years of experimentation. *European Journal of Soil Science*, 64(3), 357-373.

- Batey, T. (2009). Soil compaction and soil management—A review. *Soil Use and Management*, 25(4), 335-345.
- Blanco-Canqui, H. (2021). Does biochar application alleviate soil compaction? Review and data synthesis. *Geoderma*, 404, 115317.
- Flint, A. L., & Flint, L. E. (2002). 2.2 Particle density. In *Methods of soil analysis: Part 4 Physical methods* (Vol. 5, pp. 229–240). Soil Science Society of America.
- Frene, J. P., Pandey, B. K., & Castrillo, G. (2024). Under pressure: Elucidating soil compaction and its effect on soil functions. *Plant and Soil*, 502(1), 267–278.
- Gao, J., & O'Neill, B. C. (2020). Mapping global urban land for the 21st century with data-driven simulations and Shared Socioeconomic Pathways. *Nature Communications*, 11(1), 2302.
- Gee, G. W., & Or, D. (2002). Particle-size analysis. In J. H. Dane & G. C. Topp (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 4 Physical methods* (pp. 255–293). Soil Science Society of America.
- Greenberg, I., Kaiser, M., Polifka, S., Wiedner, K., Glaser, B., & Ludwig, B. (2019). The effect of biochar with biogas digestate or mineral fertilizer on fertility, aggregation and organic carbon content of sandy soil: Results of a temperate field experiment. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 182, 824-835.
- Hailegnaw, N. S., Mercl, F., Pracke, K., Szakova, J., & Tlustos, P. (2019). High temperature-produced biochar can be efficient in nitrate loss prevention and carbon sequestration. *Geoderma*, 338, 48-55.
- IBM. (2011). *IBM Statistics for Windows, Version 20.0*. Armonk, NY: IBM Corporation.
- Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., & Crowley, D. (2020). Biochar effects on soil biota—A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(9), 1812–1836.
- Li, L., Zhang, Y. J., Novak, A., Yang, Y., & Wang, J. (2021). Role of biochar in improving sandy soil water retention and resilience to drought. *Water*, 13(4), 407.
- Liu, C., Yang, L., Li, Y., & Sun, Z. (2023). Biochar effects on soil structure and hydraulic properties: A review. *Environmental Research*, 216, 114456.
- Loeppert, R. H., & Suarez, D. L. (1996). Carbonate and gypsum. In *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods* (Vol. 5, pp. 437–474). Soil Science Society of America.
- Madari, B. E., Silva, M. A., Carvalho, M. T., Maia, A. H., Petter, F. A., Santos, J. L., ... & Zeviani, W. M. (2017). Properties of a sandy clay loam Haplic Ferralsol and soybean grain yield in a five-year field trial as affected by biochar amendment. *Geoderma*, 305, 100–112.
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods* (Vol. 5, pp. 961–1010). Soil Science Society of America.
- Nimmo, J. R., & Perkins, K. S. (2002). 2.6 Aggregate stability and size distribution. In *Methods of soil analysis: Part 4 Physical methods* (Vol. 5, pp. 317–328). Soil Science Society of America.
- Omondi, M. O., Xia, X., Nahayo, A., Liu, X., Korai, P. K., & Pan, G. (2016). Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of data. *Geoderma*, 274, 28–34.
- Özcan, A., & Tuncer, A. (2024). Tarımda biyokömür: Toprak iyileştirmesi ve ürün verimliliği için sürdürülebilir bir yaklaşım. *Journal of Agriculture, Food and Ecology*, 1(1), 7–13.
- Özdemir, N., & Canbolat, M. (1997). Toprak strüktürünün oluşum süreçleri ve yönetimi. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 28(3).
- Özgül, M. (2003). Erzurum Yöresinde Yaygın Olarak Bulunan Büyük Toprak Gruplarının Sınıflandırılması ve Haritalanması. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Toprak Anabilimdalı Doktora Tezi.

- Rhoades, J. D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. In *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods* (Vol. 5, pp. 417–435). Soil Science Society of America.
- Sari, S., Aksakal, E. L., & Angin, I. (2017). Influence of vermicompost application on soil consistency limits and soil compatibility. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 41(5), 357–371.
- Seifu Woldeyohannis, Y. (2024). Negative effect of soil compaction and investigation of its relation with soil physiochemical properties in mechanization farming system. *Applied and Environmental Soil Science*, 2024(1), 5654283.
- Servadio, P., Marsili, A., Vignozzi, N., Pellegrini, S., & Pagliai, M. (2005). Effects on some soil qualities in central Italy following the passage of four wheel drive tractor fitted with single and dual tires. *Soil and Tillage Research*, 84(1), 87-100.
- Sumner, M. E., & Miller, W. P. (1996). Cation exchange capacity and exchange coefficients. In *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods* (Vol. 5, pp. 1201–1229). Soil Science Society of America.
- Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. In *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods* (Vol. 5, pp. 475–490). Soil Science Society of America.
- Turgut, B., & Öztaş, T. (2012). Penetrasyon direncini etkileyen bazı toprak özelliklerinin yersel değişiminin belirlenmesi. *Tarım Bilimleri Dergisi–Journal of Agricultural Sciences*, 18(2), 115–120.
- Yang, Y., Meng, Z., Li, H., Gao, Y., Li, T., & Qin, L. (2025). Soil porosity as a key factor of soil aggregate stability: Insights from restricted grazing. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1535193.
- Zhang, X., Wang, H., He, L., Lu, K., Sarmah, A., Li, J., ... & Huang, H. (2013). Using biochar for remediation of soils contaminated with heavy metals and organic pollutants. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 8472–8483.
- Zheng, X., Dong, J., Zhang, W., Xiang, J., Yin, X., & Han, L. (2021). Biogas residue biochar shifted bacterial community, mineralization, and molecular structure of organic carbon in a sandy loam Alfisol. *GCB Bioenergy*, 13(5), 838–848.