



**BIYOKÖMÜRÜN TOPRAK AGREGASYONU VE
BAZI FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE
ETKİLERİ**

Fatmanur KORKMAZ

**Danışman: Prof. Dr. Ekrem Lütfi AKSAKAL
Yüksek Lisans Tezi**

**Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Ana Bilim Dalı
2023**

(Her hakkı saklıdır.)

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

BİYOKÖMÜRÜN TOPRAK AGREGASYONU VE BAZI FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ

(Effects of Biochar on Soil Aggregation and Certain Physical Properties)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatmanur KORKMAZ

Danışman: Prof. Dr. Ekrem Lütfi AKSAKAL

Erzurum
Haziran, 2023

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Prof. Dr. Ekrem Lutfi AKSAKAL danışmanlığında, Fatmanur KORKMAZ tarafından hazırlanan bu çalışma, 16/06/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı Toprak Bilimi Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak oybirliği (3/0) ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. Mustafa Yıldırım CANBOLAT
Atatürk Üniversitesi Aslı Islak İmzalıdır

Danışman: Prof. Dr. Ekrem Lutfi AKSAKAL
Atatürk Üniversitesi Aslı Islak İmzalıdır

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Serdar SARI
Iğdır Üniversitesi Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim Kurulunun

..... / / tarih ve sayılı kararı.

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

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

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 Toprak Agregasyonu ve Bazı Fiziksel Özellikleri 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	3	30
Kuramsal Temeller	16	30
Materyal ve Metot	29	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	13	20
Sonuçlar	16	20
Tezin Geneli	19	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
Fatmanur KORKMAZ	Prof. Dr. Ekrem Lütfi AKSAKAL
16.6.2023	16.6.2023

İmza: Aslı Islak İmzalıdır

İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* 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 bilimsel ve kişisel yardımlarını esirgemeyen başta danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ekrem Lütfi AKSAKAL olmak üzere Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü öğretim üye ve personeline, ayrıca Sayın Prof. Dr. İlker ANGIN'a teşekkür ederim.

Fatmanur KORKMAZ



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİYOKÖMÜRÜN TOPRAK AGREGASYONU VE BAZI FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Fatmanur KORKMAZ

Danışman: Prof. Dr. Ekrem Lütü AKSAKAL

Amaç: Bu araştırma, farklı tekstüre sahip topraklara ağırlık esasından farklı dozlarda uygulanan biyokömürün toprakların agregasyonu ve bazı strüktürel özellikleri üzerindeki etkilerini ve biyokömürün toprak düzenleyici olarak kullanılabilirliğini belirlemek amacıyla yapılmıştır.

Yöntem: Araştırmada, kil (toprak I), tın (toprak II) ve kumlu tın (toprak III) tekstür sınıfındaki topraklar kullanılmıştır. Deneme için 8 mm'den elenen toprak örneklerine 1 mm'den elenmiş ağırlık esasına göre beş dozda (%0, %0,5, %1, %2 ve %4) biyokömür uygulanıp karıştırılmış ve plastik kaplara yerleştirilmiştir. Plastik deneme kaplarındaki toprak-biyokömür karışımları yaklaşık tarla kapasitesi nem seviyesinde laboratuvarında 1 yıl inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon sonrasında penetrasyon direnci ölçülmüş, bozulmamış ve bozulmuş örnekler alınarak araştırma konusu toprak özellikleri (agregat büyüklük dağılımı, agregat stabilitesi, dispersiyon oranı, organik karbon, hacim ağırlığı, hava geçirgenliği, hidrolik iletkenlik) için analizler yapılmıştır.

Bulgular: Biyokömür uygulama dozu arttıkça ortalama ağırlıklı çap (OAÇ) değerleri toprak I'de 23,99 mm'den 7,59 mm'ye, toprak II'de 3,56 mm'den 2,30 mm'ye düşmüştür. Ancak, toprak III'ün OAÇ değeri 3,99 mm'den 4,81 mm'ye yükselmiştir. Biyokömür uygulamaları araştırma topraklarının tüm agregat büyüklüklerinde agregat stabilitesi (AS) değerlerini artırırken dispersiyon oranı (DO) değerlerini düşürmüştür. Genel ortalama toprak I'in AS değerinde oransal olarak %27,53, toprak II'de %41,43 ve toprak III'de %67,76 artış meydana gelmiştir. Dispersiyon oranı değerleri ise genel ortalama toprak I'de %9,68, toprak II'de %10,31 ve toprak III'de %17,28 düşmüştür. Biyokömür uygulamaları toprakların organik madde (OM) içeriklerini önemli ölçüde artırırken hacim ağırlığı (HA) değerlerini düşürmüştür. Toprak I, II ve III'ün HA değerleri ortalama olarak %14,16, %16,54 ve %15,67 oranlarında düşmüştür. Kil tekstür sınıfındaki toprağın Hİ değeri ortalama olarak %540,64 oranında artarken, kumlu tın tekstür sınıfındaki toprağın Hİ değerinde %42,03 oranında azalma olmuştur. Biyokömür uygulamalarının araştırma konusu toprakların penetrasyon direnci (PD) değerlerini düşürdüğü ve uygulama dozu arttıkça PD'inde daha fazla düşüşlerin meydana geldiği belirlenmiştir.

Sonuç: Biyokömür uygulaması genel olarak, toprakların fiziksel ve agregasyon özelliklerini geliştirmiş, penetrasyon direncini ve kesekleşmeyi azaltmış, toprakların erozyona ve mekaniksel kuvvetlere karşı direncini artırmıştır. Sonuç olarak; biyokömür toprak fiziksel kalite parametrelerinin iyileştirilmesi ve toprakların erozyona karşı daha dirençli hale getirilmesi için toprak düzenleyici olarak kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Biyokömür, agregat büyüklük dağılımı, agregat stabilitesi, dispersiyon oranı, hacim ağırlığı, hidrolik iletkenlik

Haziran 2023, 54 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

EFFECTS OF BIOCHAR ON SOIL AGGREGATION AND CERTAIN PHYSICAL PROPERTIES

Fatmanur KORKMAZ

Supervisor: Prof. Dr. Ekrem Lütü AKSAKAL

Purpose: This research was carried out to determine the effects of biochar applied at different doses on soils with different textures on soil aggregation and some structural properties and the usability of biochar as a soil conditioner.

Method: In the study, clay (soil I), loam (soil II) and sandy loam (soil III) texture class soils were used. For the experiment, five different doses of biochar sieved from 1 mm (0, 0,5%, 1%, 2%, and 4%) were applied to the soil samples sieved from 8 mm and their homogeneous mixtures were ensured and placed in plastic containers. Soil-biochar mixtures placed in plastic containers were left to incubate for 1 year under laboratory conditions at approximately the field capacity moisture content. After incubation, penetration resistance was measured, undisturbed and disturbed samples were taken and analyzes were made for the parameters of the research (aggregate size distribution, aggregate stability, dispersion ratio, organic carbon, bulk density, air permeability, hydraulic conductivity).

Findings: As the biochar application dose increased, the mean weight diameter (MWD) values decreased from 23,99 mm to 7,59 mm in soil I and from 3,56 mm to 2,30 mm in soil II. However, the MWD of soil III increased from 3,99 mm to 4,81 mm. While biochar applications increased aggregate stability (AS) values in all aggregate fractions of the research soils, dispersion ratio (DR) values decreased. On the general average, the AS value of soil I increased by 27,53%, in soil II by 41,43% and in soil III by 67,76%. On the other hand, dispersion ratio values decreased proportionally 9,68% in soil I, 10,31% in soil II and 17,28% in soil III in general average. While biochar applications significantly increased the organic matter (OM) content of the soils, decreased the bulk density (BD) values. The HA values of soils I, II and III decreased on average by 14,16%, 16,54%, and 15,67%. While the HC value of the soil in the clay texture class increased by 540,64% on average, the HC value of the soil in the sandy loam texture class decreased by 42,03%. It has been determined that biochar applications reduce the penetration resistance (PR) values of the researched soils and as the application dose increases, more decreases occur in the PR.

Results: Biochar application generally has improved the aggregation and physical properties of the soils, reduced cloding and penetration resistance, and increased the resistance of the soils to erosion and mechanical forces. In conclusion, biochar can be used as a soil conditioner to improve soil physical quality parameters and make soils more resistant to erosion.

Keywords: Biochar, aggregate size distribution, aggregate stability, dispersion ratio, bulk density, hydraulic conductivity

June 2023, 54 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
KAYNAK ÖZETLERİ.....	3
Biyokütle ve Biyokömür	3
Biyokütle Dönüşüm Yöntemleri ve Piroliz Prosesi	4
Biyokömürün Toprak Özellikleri Üzerine Etkileri	5
MATERYAL ve YÖNTEM	7
Materyal	7
Araştırma toprakları	7
Toprak örneklerinin alındığı alanın coğrafi konumu ve iklim özellikleri.....	7
Toprak örneklerinin alındığı alanların toprak özellikleri	8
Toprak örneklerinin alınması ve analize hazırlanması.....	8
Biyokömür	8
Yöntemler.....	8
Laboratuvar analiz yöntemleri	8
Denemenin kurulması ve yürütülmesi	11
İstatistiksel değerlendirme	11
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	12
Toprak Özellikleri	12
Fiziksel ve kimyasal özellikler.....	12
Biyokömür uygulamalarının incelenen toprak özellikleri üzerine etkileri	14
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	44
KAYNAKLAR.....	46
ÖZGEÇMİŞ.....	54

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Araştırmada Kullanılan Deneme Topraklarının ve Biyokömürün Bazı Tanımlayıcı Özellikleri.....	13
Tablo 2. Toprakların Agregat Büyüklük Dağılımı (ABD) ve Ortalama Ağırlıklı Çap (OAÇ) Değerleri Üzerine Biyokömürün Etkileri.....	16
Tablo 3. İncelenen Parametreler Arasındaki Pearson Korelasyon Katsayıları	20
Tablo 4. Toprakların Agregat Stabilitesi (AS) Değerleri Üzerine Biyokömürün Etkileri (Ortalama±Std).....	23
Tablo 5. Toprakların Dispersiyon Oranı (DO) Değerleri Üzerine Biyokömürün Etkileri (Ortalama±Std).....	31
Tablo 6. Toprakların Organik Madde İçeriği, Hacim Ağırlığı, Hidrolik İletkenlik, Hava Geçirgenliği ve Penetrasyon Direnci Değerleri Üzerine Biyokömürün Etkileri	36

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Araştırma toprakların agregat büyüklük dağılımları.....	18
Şekil 2. Biyokömür uygulama dozu ile ortalama ağırlıklı çap arasındaki ilişkiler	19
Şekil 3. Biyokömür uygulaması sonrasında AS değerlerindeki oransal değişimler	25
Şekil 4. Biyokömür uygulaması sonrasında DO değerlerindeki oransal değişimler.....	33
Şekil 5. Biyokömür uygulaması ile topraklarının Hİ değerleri arasındaki ilişkiler	38
Şekil 6. Biyokömür uygulaması ile topraklarının HG değerleri arasındaki ilişkiler.....	41



KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

AS	: Agravat Stabilitesi
BK	: Biyokömür
DO	: Dispersiyon Oranı
HA	: Hacim Ağırlığı
HG	: Hava Geçirgenliği
Hİ	: Hidrolik İletkenlik
OAC	: Ortalama Ağırlıklı Çap
OC	: Organik Karbon
OM	: Organik Madde
PD	: Penetrasyon Direnci

GİRİŞ

İnsan popölasyonunun artmasına bağlı olarak ihtiyaçlarının da artması, kullanılabilir sınırlarına ulaşmış olan tarım, mera ve orman alanlarında yürütölen faaliyetlerin yoğunluğunu ve alanlar üzerindeki tahribatı artırmaktadır. Artan yoğun tarımsal faaliyetler toprakların verimlilik ve üretkenliğini belirleyen fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin kaybına, sürdürülebilir verimlilik ve üretkenlik özelliklerinin bozulmasına sebep olmaktadır. Verimlilik ve üretkenlik özellikleri açısından tahribata uğramış veya degrade olmuş alanların yerine yeni alanların ve alternatifinin olamaması ve bulunamamış olması, sözkonusu alanların verimlilik ve üretkenliğinin bozulmasına neden olan uygulamaların, faktörlerin, faaliyetlerin ve süreçlerin tespit edilmesi, tahrip olmuş ve degrade olmuş alanların toprak özelliklerinin iyileştirilmesi, ıslahı, verimlilik ve üretkenliğinin tekrardan sağlanabilmesi için yapılması gereken sürdürülebilir yönetimsel uygulamaların araştırılmasını zorunlu hale getirmiştir. Sürdürülebilir yönetimsel faaliyetler ve uygulamalar ise ancak söz konusu alanların degrade olan fiziksel, kimyasal ve biyolojik toprak özelliklerinin ıslahı ve geliştirilmesi ile toprak kalitesi ve sağlığının optimal seviyelere getirilmesiyle sağlanabilmektedir. Toprak strüktürel özellikleri ile agregasyonu, toprağın fiziksel kalitesi, üretkenliği ve sürdürülebilir üretken kullanımını doğrudan etkilemektedir. Bitkisel üretim ortamı olan toprağın sahip olduğu verimlilik ve üretkenlik kabiliyeti sadece besin elementi içeriğiyle değil fiziksel özellikleriyle de yakından ilgilidir.

Ekosistemin temel öğelerinden ve tarımsal üretimin temel unsurlarından olan toprak, sınırlı doğal bir kaynaktır. Hızla artan nüfusun beslenmesi ve artan oranlarda gelir elde etmek amacıyla topraklara sürekli ve yoğun tarımsal teknikler uygulanmaktadır. Bu yoğun tarımsal teknikler başta topraklar olmak üzere birçok doğal kaynağın bozulmasına neden olmaktadır. Tarımsal üretimde temel amaç; birim alandan en yüksek ürün elde edebilmenin yanı sıra, sürdürülebilir tarımsal üretim açısından ikamesi olmayan en önemli doğal kaynak ve üretet olan toprağın ve ekosistemin temel bileşenlerinin korunarak hem kaynakların hem de yaşanabilir bir çevrenin gelecek kuşaklara aktarılması olmalıdır. Bunun sağlanması için, sürdürülebilir tarım kavramının yaşama geçirilmesi, her şeyden önce, tarımsal üretimin önemli öğelerinden biri olan toprak kaynaklarının çevre ile uyumlu bir şekilde kullanılması ve korunup geliştirilmesi ile mümkün olabilecektir. Bu kapsamda iki unsur öne çıkmaktadır. Birincisi, tarımsal üretimin vazgeçilmezi olan topraklarımız ki bunları, günü birlik veya sezonluk bir şekilde ileriye düşünmeden sömürürcesine değil, sürdürülebilir bir düzeyde

bizden sonra da insanların bu kaynakları kullanacaklarını düşünerek ölçülü ve korumacı bir tutumla kullanılmalıdır. Diğer unsur ise, insanların faaliyetleri ile çoğunlukla olumsuz etkilenen çevredir. Bu faaliyetleri yaparken seçilecek uygulamalar (toprağa girdi olarak) doğru bir şekilde seçmeli ve uygun yöntemleri kullanarak ölçülü bir şekilde uygulanmalıdır. Uygulamalar beraberinde çoraklaşma, erozyon, sıkışma ve küresel ısınmaya katkı sağlayacak yeni sorunlar getirmemelidir.

Strüktürel özellikleri başta olmak üzere fiziksel özellikleri, toprakların sıvı ve gaz permeabilitelerini, su ve hava tutma kapasitelerini, yarayışlı nem miktarlarını, besin elementlerinin bitkiler tarafından kullanılabilirliğini, yarayışlılığını ve bitkiler tarafından alınabilirliğini, kök gelişimi ve nüfuzunu, mikrobiyal aktiviteyi, toprağın işlenme esnasında göstermiş olduğu penetrasyonu, işleme kolaylığını etkilemektedir. Strüktürel parametreler bitki gelişimi ve büyüme faktörleri arasında kabul edilmemesine rağmen, bitki büyümesi ve gelişimini dolaylı olarak etkilemesi nedeniyle sürdürülebilir tarım için geliştirilmesi ve korunması bir zorunluluktur. Toprakta agregatların oluşumu kadar, söz konusu agregatların ve pedlerin mekaniksel ve fiziksel dış kuvvetlere ve erosif kuvvetlere karşı stabiliteleri bitkisel üretim ve üretkenlik parametrelerinin devamlılığı için çok önemlidir.

Toprak fiziksel ve strüktürel özelliklerinin geliştirilmesi ve stabil agregat miktarının artırılması, erozyonun minimize edilmesi, bitkiler için daha iyi gelişme ile büyüme ortamı ve daha yüksek üretkenlik ortamı sağlamak amacıyla çiftlik gübresi başta olmak üzere farklı kaynaklardan elde edilmiş ve kompostlanmış organik atıkların toprağa ilavesi en yaygın yöntem olarak uzun yıllardan beri uygulanmaktadır. Bunun yanı sıra, son yıllarda yapılan araştırmalarda, polivinilalkol (PVA) ve poliakrilamid (PAM) gibi organik tabanlı kimyasal polimerler ile vermikülit, perlit ve diatomit gibi doğal mineral ve organik kaynaklı maddeler de kullanılmaya başlanmış ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Son yıllarda, toprak düzenleyicisi olarak biyokömürün (biochar) toprak fiziksel ve strüktürel parametreler üzerine etkileri araştırılmaya başlanmış olup, bu konuda yapılmış çalışmalar sınırlı sayıdadır. Bu çalışmanın amacı; kil, tın ve kumlu tın tekstür sınıfındaki topraklara biyokömür uygulamasının toprakların agregasyonu ve bazı strüktürel özellikleri üzerindeki etkilerini ortaya koymaktır.

KAYNAK ÖZETLERİ

Biyokütle ve Biyokömür

Toprak, besin kaynakları için gerekli olan mineraller, organik maddeler ve su gibi temel bileşenleri içerdiğinden tüm canlılar için vazgeçilmez yaşam kaynağıdır. Toprak oluşumunu arttırmak veya toprak üretmek insanoğlunun elinde olmadığı için insanoğlunun önceliği bu yaşam kaynağını en iyi şekilde korumak ve sürdürülebilir kullanımını sağlamaktır. Toprak; iklim, topoğrafya ve organizmaların ana materyal üzerine yaptıkları etkilerle yüzlerce yıllık zaman periyodunda oluşmakta ve şekillenmektedir.

Toprak verimliliğinin ve üretkenliğinin sürdürülebilir olmasında toprakların organik madde (OM) ve organik karbon (OC) içeriğinin yüksek olması oldukça önemlidir. Organik madde ve organik karbon hem toprağın fiziksel özelliklerinin ve hem de kimyasal özelliklerinin gelişmesinde uzun süreli etkiye sahiptir. Toprakların OM ve OC içerikleri yoğun toprak işleme gibi tarımsal faaliyetlerin etkisi ile zaman içinde azalmakta ve toprağın özellikleri olumsuz yönde etkilenmektedir. Tarımsal üretimin yoğun olduğu bölgelerde toprakların OM ve OC değerleri genelde düşük olup bu değerlerin artırılması topraklara OM ve OC sağlayabilecek materyallerin ilave edilmesi ile sağlanabilmektedir. Bu materyaller arasında en önemli ve etkin rolü çiftlik gübreleri gibi hayvansal atıklar almaktadırlar. Ayrıca, bitkisel artıklar ve ürünlerinin kullanımları da önemli bir potansiyele sahiptir. Bunların toprağa yıllar bazında belli oranlarda uygulanmaları toprakların verimliliklerini ve üretkenliklerini artırırken, mekaniksel kuvvetlere, su ve rüzgar gibi dış etkilere karşı da muhafazalarını artırmaktadır. Biyokütle kaynaklarının (bitkisel artıklar ve ürünler) farklı ortamlarda ve şartlarda yetiştirilebilmesi ve toplumsal olarak sosyal ve ekonomik iyileşme sağlaması açısından ekosistem ile uyumlu organik materyallerdir. Bunun yanı sıra; söz konusu materyaller tarım alanlarda bitkisel üretimi desteklemesinin yanısıra farklı teknolojik süreçler sonrasında kimyasal madde ve elektrik üretimi için önemli bir enerji kaynağıdırlar (Özçimen ve Meriçboyu 2009). Bu organik materyallerin piroliz işlemleri sonrasında elde edilen ve hem tarımsal hem de çevresel amaçlar için kullanılabilirlik özelliklerine sahip olan katı formları biyokömür (biochar) olarak adlandırılmaktadır.

Biyokömür, çok düşük veya tamamen oksijensiz ortamlarda yüksek karbon bazlı organik materyallerden (biyokütle) piroliz süreciyle elde edilen kömürleşmiş organik materyaldir. Biyokütle; karada ve su ortamlarında yetişen bitkiler, hayvansal atık ve artıklar,

gıda endüstrisi ve orman endüstrisi yan ürünleri ile kentsel organik atık ve artıkları içeren, biyolojik kökenli, temel bileşenleri karbonhidrat bileşikler olan tüm doğal organik maddeler olarak tanımlanmaktadır. (Tripathi et al. 2016). Biyokömür, topraklarda karbon tutulmasını ve depolanmasını, toprak özelliklerini iyileştirmek için toprak düzenleyicisi olarak kullanmak amacıyla üretilmektedir (Lehmann and Joseph 2009). Piroliz, tamamen oksijensiz ortamlarda ham organik materyallerin belirli ısı işlemlerinden geçirilerek organik materyallerin kimyasal bileşenlerine ayrılması işlemidir. Piroliz, Yunanca kökenli bir kelime olup, “pyro” ateş “lysis” ayrışma ya da oluşan parçacıkların değişime uğraması anlamına gelmektedir. Piroliz süreci genellikle 300°C ile 1000°C arasındaki sıcaklıklarda gerçekleşmektedir (Verheijen et al. 2009).

Biyokütle Dönüşüm Yöntemleri ve Piroliz Prosesi

Biyokütle farklı birçok teknolojik ve proses işlemleriyle faydalı enerjiye dönüştürülebilmektedir. Organik kaynaklı biyoküteller termokimyasal, biyokimyasal ve fizikokimyasal yöntemlerle enerjiye dönüştürülebilmektedir. Piroliz, direkt yakma, sıvılaştırma ve gazlaştırma prosesleri termokimyasal dönüşüm yöntemleridir. Alkol fermantasyonu ve anaerobik fermentasyon prosesleri biyokimyasal dönüşüm yöntemleridir. Transesterifikasyon prosesleri de fizikokimyasal dönüşüm yöntemlerini oluşturmaktadır (Koçar et al. 2010; Yılmaz ve Selim 2013).

Piroliz, gazlaştırma ve yakma prosesleri organik biyokütlenin termokimyasal dönüşüm yöntemlerini oluşturmaktadır.

Yakma prosesi, havalı/oksijenli ortamda biyokütlenin organik yapısının %100 oksidasyonu neden olmaktadır. Gazlaştırma prosesinde, biyokütle %15-30 oranında oksijenli ortamda gaza dönüştürülmektedir. Piroliz prosesinde ise, biyokütle tamamen oksijensiz ortamda içeriğindeki organik maddeler ısı vasıtasıyla bozunarak katı, sıvı ve gaz ürünlere dönüşmektedir. Biyokömürleştirme prosesi ile biyokütle tamamen oksijensiz ortamda düşük sıcaklık ile karbon içeriği yüksek katı bir ürüne dönüşmektedir (Dahlquist 2013).

Piroliz prosesi, organik materyallerin atmosferik basınçta tamamen oksijensiz ortamda 300°C ile 1000°C sıcaklıklar arasında katı, sıvı ve gaz ürünlerin elde edildiği termokimyasal ve endotermik bir prosestir. Piroliz prosesin temel prensibi, elde edilen son katı üründen oksijenin tamamen uzaklaştırılmasıdır. Bu işlem sonrasında elde edilen biyokömürün O/C oranı orijinal biyokütleyle kıyasla daha düşüktür (Stelt et al. 2011). Piroliz sonrasında elde edilen katı ürün, fosfor içeriği ve aktif karbon içeriğinden dolayı gübre olarak kullanılabilir (Adar et al. 2016).

Biyokömürün Toprak Özellikleri Üzerine Etkileri

Biyokütlelerin biyokömüre dönüştürülerek toprak düzenleyici olarak toprağa uygulanması, toprakta tutunumunu artırarak iklim değişikliğinin ve küresel ısınmanın azaltılmasının yöntemlerinden biri olarak görülmektedir (Zielinska et al. 2015). Biyokömür, toprakların su ve besin elementi tutma kapasitesi, hava-su geçirgenliği, gözeneklilik ile gözenek büyüklük dağılımı ve drenaj gibi toprağın fiziksel özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla tarımsal faaliyetlerde kullanılmaktadır (Lu et al. 2013). Biyokömürün toprağa ilavesi, toprak kalitesini ve bitki gelişimi/büyümesi için gerekli bitki besin elementlerini artırmaktadır (Cao and Pawłowski 2012).

Biyokömür, gözenekli yapıda olup yüzey alanı büyük ($\sim 500 \text{ m}^2/\text{g}$), katyon değişim kapasitesi ve su tutma kapasitesi yüksektir. Bu özellikleri sayesinde topraktaki katyonik yerdeğiştirme reaksiyonlarını artırmakta ve toprağın potasyum (K), magnezyum (Mg) ve kalsiyum (Ca) gibi besin elementlerini tutma ve yerdeğiştirme potansiyeli artmaktadır. Aromatik ve humik maddelerce zengindirler. Genel olarak biyokömür, toprakta karbon tutunumu ve depolanmasını artırarak CO_2 ve CH_4 salınımlarının azaltılması, küresel ısınma ve iklim değişikliğinin azaltılması, gübre maddesi olarak ve bitki besin elementlerini tutarak toprak verimliliğinin artırılması, toprak özelliklerinin geliştirilmesi, atık yönetiminde çevre kirliliğine neden olan atık/artıkların bertarafı ve enerji üretimi amacıyla kullanılmaktadır (Lorenz and Lal 2014). Ayrıca, son yıllarda, biyokömürler sulardan ve topraklardan inorganik ve organik kirleticilerin ve kirliliklerin uzaklaştırılması amacıyla da kullanılmaktadır (Zhang et al. 2013; Tan et al. 2015). Biyokömürün oksijen içeriği yüksektir ve bu sayede yüksek yüzey asit-baz fonksiyonel reaksiyonlarında da görev alırlar. Gözenekliliği ve yüksek spesifik yüzey alanı sayesinde kendi ağırlığının 6 katı kadar suyu tutabilir, topraktan fosfor ve azot gibi elementlerin bitkiler tarafından alınabilirliğini artırarak toprak için iyi bir besin elementi deposu oluşturmakta ve tarımsal üretim verimini artırmaktadır (Glaser et al. 2015). Ayrıca, bazık karakterli biyokömürler asit topraklara uygulandığında toprakların pH değerlerini yükselterek toprak pH'sını düzenlerler (Ippolito et al. 2016).

Biyokömürün karbon (C) içeriği üretildiği biyokütleyle ve piroliz koşullarına bağlı olarak %36-%94 aralığında (Novak et al. 2009; Keiluweit et al. 2010), %0,1-%97,4 aralığında (Aller 2016; Manolikaki and Diamadopoulos 2020) ve %0,1 ile %77,4 (Enders et al. 2012) gibi geniş aralıklarda değiştiği ve yapılan çalışmalarda biyokömür uygulamalarının toprağın organik karbon içeriğini artırdığı belirtilmektedir (Steiner et al. 2007; Awad et al. 2012; Liu et al. 2012b; Zhang et al. 2012; Biederman and Harpole 2013; Soenne et al. 2014; Agegnehu et al. 2017; Mahmoud et al. 2019). Van Zwieten et al. (2010) yapmış oldukları çalışmalarında

biyokömür ilavesiyle toprak organik karbon içeriğinin %18 ile %26 oranlarında ve Amoakwah et al. (2017)'de çalışmalarında toprak organik karbon içeriğinin %28 ile %66 arasında değişen oranlarda artışların olduğunu belirtmektedirler.

Yapılan araştırmalarda genel olarak biyokömürün toprak agregasyonu iyileştirdiği ve agregat stabilitesini artırdığı belirlenmiştir. Blanco-Canqui (2017), farklı tekstürdeki 34 toprağa %0,1-%10 ve 5 ton ha⁻¹-96 ton ha⁻¹ arasında değişen oranlarda biyokömür uygulamasının agregat stabilitesi üzerine etkilerinin incelendiği araştırmaları derlemiş ve topraklardan 24'ünde agregat stabilitesinin %21-%226 arasında değişen oranlarda artışlar meydana geldiğini, 10 toprağın agregat stabilitesinde ise değişikliğin olmadığını belirtmektedir. Islam et al. (2021) ve Omondi et al. (2016)'de yaptıkları derlemede biyokömür uygulamasının agregat stabilitesinin ortalama olarak %8,2-%18,2 arttığını ve biyokömür uygulama dozu artışıyla agregat stabilitesinin de arttığını belirtmektedirler.

Biyokömürün tane yoğunluğu 1,4 g cm⁻³ ile 2,1 g cm⁻³ arasında (Brewer et al. 2009; Chia et al. 2015), kütle yoğunluğu da 0,10 g cm⁻³ ile 0,65 g cm⁻³ arasında (Özçimen and Karaosmanoğlu 2004; Nagel et al. 2019) ve porozitesi de %70-%90 arasında (Blanco-Canqui 2017) değişmektedir. Toprağa biyokömür ilavesi tane yoğunluğu ile kütle yoğunluğunu düşürürken, poroziteyi artırmaktadır (Horák et al. 2019; Zhang et al. 2017; Major et al. 2010). Githinji (2014) yaptıkları araştırmalarında, tane yoğunluğunun biyokömür uygulamasıyla düştüğünü ve uygulama dozuyla tane yoğunluğu arasında doğrusala yakın bir ilişkinin olduğunu belirlemişlerdir. Pranagal et al. (2017) kumlu tınlı toprağa 30 ton ha⁻¹ ve 45 ton ha⁻¹ biyokömür uyguladıkları araştırmalarında, 2,63 g cm⁻³ olan tane yoğunluğunun biyokömür uygulamasıyla 2,59 g cm⁻³ ve 2,57 g cm⁻³'e düştüğünü ifade etmektedirler. Ayrıca, biyokömür uygulamaları ile kütle yoğunluğu değerinin 0,28 g cm⁻³ ve 0,53 g cm⁻³ miktarlarında düştüğünü de ifade etmektedirler. Zhang et al. (2021) kumlu, siltli tın ve killi topraklara %2 biyokömür uygulaması sonrasında kütle yoğunluklarının %28, %13 ve %15 oranlarında düştüğünü belirtmektedirler. Sun et al. (2013) yaptıkları araştırmalarında, kumlu tınlı toprağa 20 ton ha⁻¹ biyokömür uygulamasının kütle yoğunluğunu %9,1 oranında düşürdüğünü, poroziteyi ise %12 oranında arttığını belirlemişlerdir. Yapılan araştırmalarda biyokömürün kumlu, kumlu tınlı, tınlı kumlu tekstür sınıfındaki toprakların hidrolik iletkenliklerini düşürdüğü (Brockhoff et al. 2010; Castellini et al. 2015; Gamage et al. 2016; Lim et al. 2016), siltli tın, siltli kil, killi tın, kil tekstür sınıfındaki toprakların hidrolik iletkenliklerini artırdığı (Jien and Wang 2013; Ouyang et al. 2013; Xiao et al. 2016) ifade edilmektedir. Hidrolik iletkenliklerin %25-%328 arasında değişen oranlarda arttığı ve %7-%91 arasında değişen oranlarda azaldığı belirtilmektedir (Blanco-Canqui 2017).

MATERYAL ve YÖNTEM

Materyal

Araştırma toprakları

Araştırmada, Erzurum Ovasında ve Daphan Ovasında kollufulivial ana materyalden oluşmuş, %2 ile %4 hafif eğime sahip toprak işlemeli tarım arazilerinin 0-20 cm'lik işleme katmanından alınan toprak örnekleri kullanılmıştır. Erzurum Ovasından alınan örnekler Entisol ordosunda olup, “tın” tekstür sınıfındaki örnek Ustorthent ve “kumlu tın” tekstür sınıfındaki örnek Fluvaquent büyük toprak grubundadır. Daphan Ovasından alınan “kil” tekstür sınıfındaki örnek Vertisol ordosu Pellustert büyük toprak grubundadır. Örnekleme alanlarının seçimi ve sınıflandırmada Akgül (1992) ve Özgül (2003)'ün araştırmaları referans alınmıştır.

Toprak örneklerinin alındığı alanın coğrafi konumu ve iklim özellikleri

Erzurum, Doğu Anadolu Bölgesinde 39°10' ile 40°57' kuzey enlemleri ve 40°15' ile 42°30' doğu boylamları arasındadır. İli, kuzeyden Rize ile Artvin, kuzeydoğudan Ardahan, batıdan Erzincan ile Gümüşhane, güneyden Muş ile Bingöl, doğudan Kars ile Ağrı illeri çevirmekte olup yüzölçümü 24768 km², merkez ilçelerin yüzölçümü ise 2892 km²'dir.

Erzurum, sıcaklık ortalaması bakımından ülkemizdeki en düşük iller arasında yer almakta olup, karasal iklim hakim durumdadır. Kış ayları kar yağışlı ve soğuk, yaz ayları ise kurak ve serindir. Gündüz ile gece ve kış ile yaz mevsimleri arasındaki sıcaklık farkı oldukça yüksek olup, yüksek basınç koşullarının etkisinden dolayı kış ayları şiddetlidir. Toprağın kış aylarında karla örtülmesi ve soğuğun etkisi ile donlu günlerin sayısı 112 gündür. İklimin bu sert etkisi bitki örtüsünü ve tarımı olumsuz etkilemekte ve dolayısıyla tarımsal üretimi yapılan bitki çeşitliği bu nedenle sınırlıdır. Ekim ayının son çeyreğinden mayıs ayının başına kadar yörede hakim olan soğuk ve kuru hava mayıs ayından itibaren ısınmaya başlar. Erzurum'un uzun yıllar yağış verilere göre yıllık toplam yağış miktarı 435,6 mm'dir. Aylık olarak en fazla yağış 71,7 mm ile Mayıs ayında ve aylık en az yağış 17,9 mm ile Ağustos ayında meydana gelmektedir. Uzun yıllar sıcaklık ortalaması 5,7°C, en soğuk ay ortalama -9,1°C ile Ocak ve en sıcak aylar ortalama olarak 19,3°C ve 19,4°C ile Temmuz ve Ağustos aylarıdır. Yıllık toplam buharlaşma 987,2 mm, ortalama bağıl nem %63,9'dur. Ekim ayının sonlarında başlayan don olayı Nisan ayının ortalarına kadar devam etmektedir (Anonim 2020).

Toprak örneklerinin alındığı alanların toprak özellikleri

Erzurum Ovası toprakları allüviyal toprak karakteri göstermete olup, Karasu Nehri'nin çevresindeki organo-mineral topraklar hariç, ova topraklarının büyük kısmı Halosen genç allüviyonlardan meydana gelmektedir. Allüviyal ana materyal bazalt, aglomera, konglomera, kireç taşı ve volkanik tüfün parçalanma ayrışma ürünlerinden oluşmaktadır (Atalay 1978).

Daphan Ovası toprakları, genetik toprak sınıflama sisteminde zonal ordosunun kahverengi ve kestanerengi büyük toprak gruplarına girmektedirler. Ova topraklarının büyük bölümünün kil içeriği genellikle yüksek olup ağır bünyeli olmasına rağmen üst horizonları orta ve hafif alkalın reaksiyon göstermektedir. Yüzey horizonu topraklarının organik madde (OM) içerikleri %1,0 ile %3,6 arasında değişmektedir. Ovanın düz kesimlerinde topraktaki kireç yüzey horizonlardan yıkanmış olup, alkalilik sorunu olmayıp değişebilir sodyum içeriği %1,5'den daha azdır. Ova toprakları bitkiye yarayışlı potasyum (K) bakımından zengin olup, fosfor açısından ise gübrelemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Ova topraklarında tuzluluk ve çoraklık problemi yoktur (Akgül 1994).

Toprak örneklerinin alınması ve analize hazırlanması

Araştırmada kullanmak için Daphan ovasından Vertisol ordosu Pellustert, Erzurum ovasından Entisol ordosu Fluvaquent ve Ustorthent büyük toprak grubu olarak sınıflandırılıp tanımlanmış alanlardan 0-20 cm'lik işleme katmanından bozulmuş örnekler alınmıştır.

Alınan toprak örnekleri laboratuvara getirilerek oda sıcaklığında kurutulmuş ve deneme kurmak için 8,0 mm'den elenmiştir. Ayrıca, araştırma topraklarının bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla kullanmak için her toprak örneğinden 2 mm'lik elekten geçirilmiş yaklaşık 2 kg alt örnekler hazırlanmıştır.

Biyokömür

Araştırmada kullanılan biyokömür (BK) kentsel organik atık ve arıtma çamuru karışımından üretilmiş olup, organik karbon içeriği %21,16 (%36,48 organik madde), pH'sı 7,75, EC'si 9,45 mS cm⁻¹ ve tane yoğunluğu 1,72 g cm⁻³'tür.

Yöntemler

Laboratuvar analiz yöntemleri

Toprak tekstürü

Toprakların tekstürleri Bouyoucos Hidrometre yöntemiyle belirlenmiştir (Gee and Bauder 1986).

Toprak reaksiyonu (pH)

Toprakların reaksiyonları 1:2,5'luk toprak-su süspansiyonunda, biyokömürün reaksiyonu saturasyon ekstraktı süzüklerinde cam elektrotlu pH metre ile belirlenmiştir (McLean 1982).

Kireç

Toprakların kireç içerikleri Scheibler kalsimetresi kullanılarak belirlenmiştir (Nelson 1982).

Organik madde (OM)

Toprakların ve biyokömürün organik madde içerikleri Smith-Weldon yöntemiyle tespit edilmiştir (Nelson and Sommers 1982).

Kasyon değişim kapasitesi (KDK)

Toprak örnekleri normalitesi 1 ve pH'sı 8,2 olan sodyum asetatla muamele edilerek sodyum adsorpsiyonu sağlanmış, daha sonra normalitesi 1 ve pH'sı 7,0 olan amonyum asetatla ekstrakte edilen süzüklerde alev fotometrsinde Na^+ okuması yapılarak kasyon değişim kapasitesi belirlenmiştir (Rhoades 1982a).

Elektriksel iletkenlik (EC)

Toprakların elektriksel iletkenlik değerleri 1:2,5'luk toprak-su süspansiyonunda, biyokömürün elektriksel iletkenlik değeri ise saturasyon ekstraktı süzüklerinde belirlenmiştir (Rhoades 1982b).

Tane yoğunluğu

Tane yoğunluğu analizi piknometre yöntemiyle yapılmıştır (Blake and Hartge 1986a).

Hacim ağırlığı (HA)

Toprakların hacim ağırlıkları 100 cm^3 'lük bozulmamış örnekler alınarak belirlenmiştir (Blake and Hartge 1986b).

Agregat büyüklük dağılımı ve Ortalama ağırlıklı çap (OAÇ)

Agregat büyüklük dağılımı için yaklaşık 3 kg toprak 0,25, 0,5, 1, 2, 4, 6, 10, 15, 20, 25,4, 31,8, 38,1 ve 50,8 mm'lik elek serisinde kuru elemeye tabi tutularak her bir agregat büyüklük grubunun miktarı belirlenmiş ve aşağıdaki formül yardımıyla ortalama ağırlıklı çap değerleri hesaplanmıştır (Kemper and Rosenau 1986).

$$OAÇ = \sum_{i=1}^n X_i \cdot W_i$$

X_i : Herbir agregat büyüklük fraksiyonunun ortalama çapı, mm

W_i : X_i ortalama çaptaki büyüklük sınıfına ait agregatların oranı, %

Agregat stabilitesi (AS)

Toprakların suya dayanıklı agregat stabilitesi değerleri, hava kurusu 0,25-0,5, 0,5-1, 1-2, 2-4, 4-6, 6-10, 10-15, 15-20, 20-25,4, 25,4-31,8, 31,8-38,1 ve 38,1-50,8 mm büyüklüğündeki agregat fraksiyonlarında 0,25 mm elek açıklığında, 0,25 mm'den küçük ve mikroagregat olarak tanımlanan agregatların agregat stabiliteleride 0,100 mm elek açıklığında 42 devir/dakika darbe frekansına ve 12,7 mm darbe uzunluğu sahip Yoder tipi ıslak eleme aletinde kullanılarak belirlenmiştir (Kemper and Rosenau 1986; Coughlan et al. 1991; Loch and Foley 1992; Loch 1994; Loch and Foley 1994).

$$AS = \frac{P_1 - P_2}{P - P_2} \times 100$$

AS: Agregat stabilitesi, %

P_1 : Stabil agregat + Kum miktarı, g

P_2 : Kum miktarı, g

P: Fırın kuru toprak miktarı, g

Dispersiyon oranı (DO)

Toprak örneklerinin dispersiyon oranı, sadece suda dispers duruma geçen silt+kil miktarının tekstür analizinde belirlenen toplam silt+kil miktarına oranlanmasıyla aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır (Lal 1988).

$$DO = \frac{\text{Süspansiyonda ölçülen toplam (silt + kil), \%}}{\text{Mekanik analizde ölçülen toplam (silt + kil), \%}} \times 100$$

Hava geçirgenliği (HG)

Toprakların hava geçirgenliği bozulmamış örneklerde Kmoch aparatı kullanılarak belirlenmiştir (Ball and Schjonning 2002).

Hidrolik iletkenlik (HI)

Toprak örneklerinin hidrolik iletkenlik değerleri sabit su seviyeli permeametre yöntemi ile tespit edilmiştir (Klute and Dirksen 1986). Belli bir sürede (T) bozulmamış toprak örneğinden geçen suyun miktarı (Q), toprak kolonunun yüksekliği (L), sabit hidrolik yük (H) ve bozulmamış toprak örnek alma silindirin kesit alanından (A) yararlanılarak, hidrolik iletkenlik değerleri aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$K_s \text{ (cm/h)} = Q.L / A.T.H$$

Penetrasyon direnci (PD)

Araştırma topraklarının penetrasyon dirençleri el tipi penetrometre yardımıyla kg cm^{-2} olarak ölçülmüştür (Lowery and Morrison 2002).

Denemenin kurulması ve yürütülmesi

Araştırmada kil, tın ve kumlu tınlı toprakların bazı fiziksel parametreleri ile agregasyon özellikleri üzerine biyokömürün etkilerini belirlemek için laboratuvarında deneme kurulmuştur. Deneme kurmak için araziden alınan toprak örnekleri 8 mm'den elenmiş, fırın kuru ağırlık esasına göre kil tekstür sınıfı toprak için 14 kg, tın tekstür sınıfı toprak için 16 kg ve kumlu tın tekstür toprak için 17 kg tartılmıştır. Deneme için tartılmış toprak örneklerine 1 mm'den elenmiş ağırlık esasına göre bir tanesi kontrol olmak üzere beş dozda (%0, %0,5, %1, %2 ve %4) biyokömür uygulanmış ve büyük bir plastik leğen içerisinde toprak ile biyokömürün homojen bir şekilde karışımları sağlanmıştır. Toprak-biyokömür karışımları uzunluğu 40 cm, genişliği 25 cm ve derinliği 15 cm olan plastik deneme kaplarına yerleştirilmiştir. Deneme 3 toprak $\times$ 5 doz $\times$ 3 tekerrürlü olarak laboratuvarında yürütülmüş ve toplamda 45 örnekte çalışılmıştır. Plastik deneme kaplarına yerleştirilen toprak-biyokömür karışımları yaklaşık tarla kapasitesi nem seviyesinde 1 yıl inkübasyona bırakılmıştır. Denemenin inkübasyon süresi bitince, önce penetrasyon direnci ölçümleri yapılmış, daha sonra deneme kaplarından gerekli miktarlarda bozulmamış ve bozulmuş toprak örnekleri alınarak araştırma konusu toprak özellikleri için analizler yapılmıştır.

İstatistiksel değerlendirme

Faktöriyel araştırma desenine göre yürütülen araştırmada, muamele faktörlerinin incelenen toprak özellikleri üzerindeki etkilerini tespit için SPSS istatistik paket programı yardımıyla varyans analizi (ANOVA) ve Tukey'in çoklu karşılaştırma testi yapılmıştır (IBM 2011).

ARAşTIRMA BULGULARI ve TARTIşMA

Toprak zellikleri

Fiziksel ve kimyasal zellikler

Araştırma topraklarını tanımlayıcı bazı fiziksel ve kimyasal zellikler Tablo 1’de verilmiştir. Tablodan görüleceği üzere I nolu toprağın kil, silt ve kum içeriği sırasıyla %58,60, %25,43 ve %15,97 olarak tesbit edilmiş olup tekstür sınıfı kil (C) olarak belirlenmiştir. Toprak II’nin kil, silt ve kum içeriği %21,83, %31,44 ve %46,73 ve tekstür sınıfı tın (L) olarak belirlenmiştir. Toprak III’n kil, silt ve kum içeriği sırasıyla %14,46, %27,11 ve %58,43 ve tekstür sınıfı da kumlu tın (SL) olarak belirlenmiştir. Toprakların pH değerleri hafif alkalın, kireç içerikleri %1,49, %2,14 ve %0,65 olup çok az sınıfa, organik madde içerikleri %1,44, %1,51 ve %1,96 olup az sınıfına girmektedir. Toprakların KDK’ları 52,94, 30,73 ve 19,25 cmol kg⁻¹ olarak belirlenmiş olup kil içeriği en fazla kum içeriği en az olan kil tekstür sınıfındaki (Pellustert) toprakta en yüksek belirlenmiştir.

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

Parametreler	Topraklar ve Materyal			Biyokömür		
	Toprak I	Toprak II	Toprak III			
Kil (%)	58,60±1,40	21,83±1,51	14,46±1,06	Tane büyüklük dağılımı (%)	Kuru eleme	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 ⁻¹)	52,94±1,30	30,73±0,96	19,25±0,71		Islak eleme	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 ^{\$}	7,59±0,04 ^{\$}	7,24±0,06 ^{\$}			100-53 µ 2,82
EC (mS cm ⁻¹)	1,19±0,04 ^{\$}	1,03±0,02 ^{\$}	0,59±0,04 ^{\$}			<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		

^{\$} 1:2,5 toprak:su süspansiyonunda belirlenmiştir.

[€] Saturasyon ekstraktında belirlenmiştir.

Biyokömür uygulamalarının incelenen toprak özellikleri üzerine etkileri

Agregat büyüklük dağılımı (ABD) ve ortalama ağırlıklı çap (OAÇ)

Biyokömür (BK) uygulamalarının toprakların agregat büyüklük dağılımı (ABD) ve ortalama ağırlıklı çap (OAÇ) değerleri üzerine etkileri Tablo 2, Şekil 1 ve Şekil 2’de verilmiştir. Toprak I’e uygulanan biyokömür dozu arttıkça <0,25, 0,25-0,5, 0,5-1, 1-2, 2-4, 4-6 ve 6-10 mm agregat büyüklüklerinin miktarlarında kontrollerine göre artışlar meydana gelirken, 25,4-31,8, 31,8-38,1 ve 38,1-50,8 mm agregat büyüklüklerinin miktarlarında ise azalışların olduğu belirlenmiştir. Biyokömür uygulaması ile 31,8-38,1 mm agregat büyüklüklerinin miktarlarında meydana gelen azalışların istatistiksel olarak önemsiz olduğu belirlenirken, 25,4-31,8 ve 38,1-50,8 mm agregat büyüklüklerinin miktarlarında meydana gelen azalışların istatistiksel olarak önemli ($p<0,05$) olduğu belirlenmiştir. Kontrol düzeyinde 38,1-50,8 mm agregat fraksiyonu miktarı %28,65’ten %0,5, %1, %2 ve %4 biyokömür uygulamaları sonrasında sırasıyla %13,85, %10,44, %7,02 ve %0,64’e düşmüştür. Toprak II’de 0,25-0,5, 0,5-1, 1-2, 2-4, 4-6, 10-15, 15-20, 20-25,4 ve 25,4-31,8 mm agregat fraksiyonlarının miktarlarında kontrole düşüşler ve artışlar olduğu, fakat söz konusu değişimlerin istatistiksel olarak önemsiz olduğu belirlenmiştir. En küçük agregat büyüklüğü olan <0,25 mm agregat fraksiyonun miktarında meydana gelen artışlar ile 6-10 mm ve 38,1-50,4 mm agregat büyüklüğünün miktarlarında meydana gelen azalışların istatistiksel olarak önemli ($p<0,05$) olduğu belirlenmiştir. Kumlu tın tekstür sınıfında olan toprak III’e uygulanan biyokömürün <0,25, 0,25-0,5, 0,5-1, 1-2, 4-6, 6-10, 10-15, 15-20 ve 25,4-31,8 mm agregat fraksiyonlarının miktarlarında istatistiksel olarak önemsiz düzeyde artışlar ve azalışlara neden olduğu belirlenirken, 2-4 mm agregat fraksiyonunda meydana gelen azalışların ve 20-25,4, 31,8-38,1 ve 38,1-50,8 mm agregat fraksiyonlarında meydana gelen artışların önemli düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Toprak I, II ve III’ün kontrol örneklerinde 15 mm’den büyük agregat fraksiyonlarının miktarı %63,75, %5,42 ve %6,46 olarak belirlenmiştir. Özellikle, yüksek kil içeriğine sahip toprak I’in kontrol düzeyinde yüksek kil içeriği inkübasyon sürecinde kesek olarak nitelendirilebilecek büyük agregat yapılarının oluşmasına neden olmuştur. Kil ve silt içeriği daha az, kum içeriği daha fazla olan toprak II ve III’de büyük yapıların oluşumu toprak I’den çok daha az olmuştur. Biyokömür uygulaması toprak I ve II’de büyük agregat oluşumunu azaltmış ve buna bağlı olarak söz konusu topraklarda ortalama ağırlıklı çap (OAÇ) değerlerinin kontrole göre önemli düzeyde düşmesine neden olmuştur ($p<0,05$). Kum içeriği (%58,43) en yüksek ve kil içeriği (%14,46) en düşük olana toprak III’de ise biyokömür uygulaması büyük agregat oluşumunu artırmış ve buna bağlı olarak söz konusu toprakta

ortalama ağırlıklı çap değerinin önemli düzeyde artmasına neden olmuştur. Biyokömür ilavesiyle büyük çaplı agregatların oranlarının azalması ortalama ağırlıklı çap değerlerini Toprak I'de 23,99 mm'den %0,5 dozunda 18,64 mm'ye, %1 dozunda 17,87 mm'ye, %2 dozunda 11,93 mm'ye ve %4 dozunda 7,59 mm'ye düşürmüştür. Toprak II'nin kontrolünde 3,56 mm olan ortalama ağırlıklı çap değeri %0,5, %1, %2 ve %4 uygulama dozları sonrasında 3,08, 2,65, 2,74 ve 2,30 mm olarak hesaplanmıştır. Toprak III'de ise %0,5, %1, %2 ve %4 biyokömür uygulaması ortalama ağırlıklı çap değerini 3,99 mm'den 4,87, 6,83, 5,85 ve 4,81 mm'ye yükselmiştir. Biyokömür uygulama dozu ile ortalama ağırlıklı çap arasındaki korelasyon katsayıları Toprak I, II ve III için sırasıyla -0,951**, -0,757** ve 0,269 olarak belirlenmiştir (Tablo 3). Topraklara uygulanan organik kaynaklı materyallerin ve organik kaynaklı toprak düzenleyicilerin kil minerallerinin değişim komplekslerinde meydana getirdiği değişikliklerden dolayı büyük çaplı agregatların kırılarak daha küçük çaplı agregatların oluşmasına neden olabileceği ifade edilmekte olup, yapılan araştırmalarda da söz konusu durum belirlenmiştir (Whalen and Chang 2002; Hurisso et al. 2013; Aksakal et al. 2016).

Ortalama ağırlıklı çaptaki düşüş organik karbonun agregatlaşma üzerindeki etkisinden kaynaklanmaktadır. Mineral partiküllerin daha sıkı paketlenmesi ve agregat içindeki gözeneklerin mikro düzeyde olmasından dolayı küçük agregatlar büyük agregatlardan daha stabildir (Horn and Dexter 1989). Bu sonuçlar, biyokömürün I nolu toprak gibi yüksek kil ve silt içeren topraklarda kesek olarak nitelendirilebilecek büyük çaplı agregat oluşumunu azaltmak için kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca, yüksek negatif elektrik yükü ve yüksek spesifik yüzeyi sayesinde III nolu toprak gibi yüksek kum düşük kil içeriğine sahip topraklara uygulanan biyokömürün agregat oluşumunu ve agregatlaşmayı artıracığı görülmektedir.

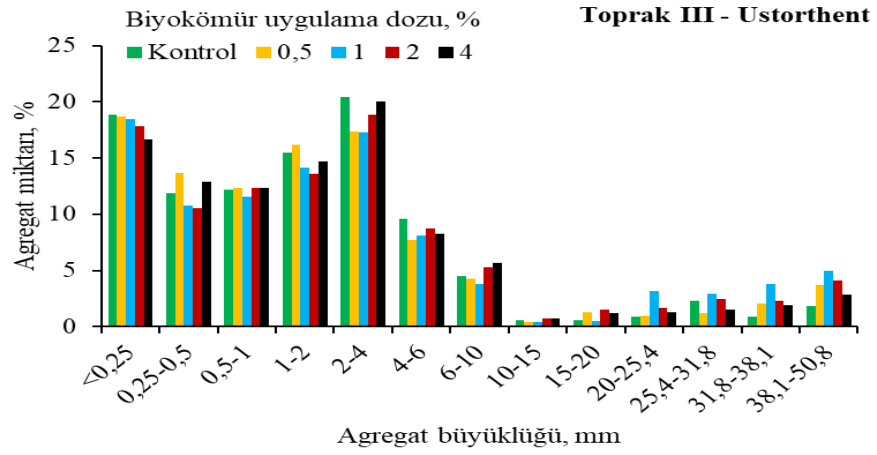
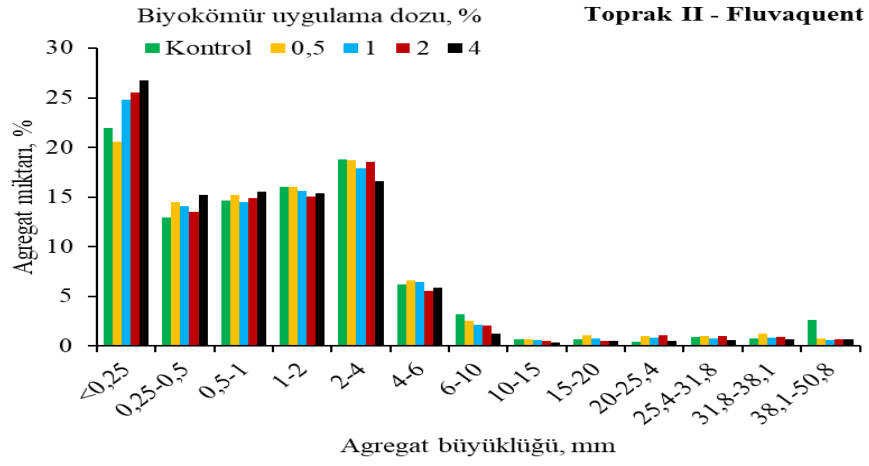
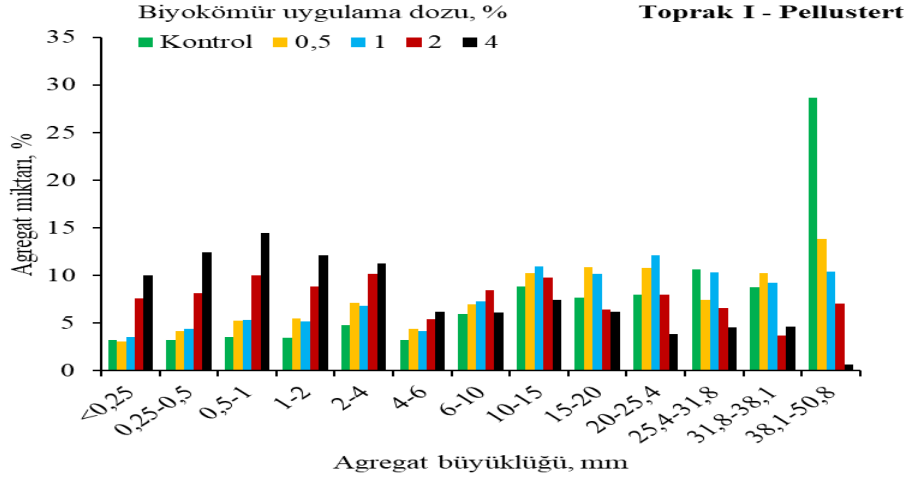
Tablo 2. Toprakların Agregat Büyüklük Dağılımı (ABD) ve Ortalama Ağırlıklı Çap (OAÇ) Değerleri Üzerine Biyokömürün Etkileri

Topraklar	Uygulama dozları (w/w)	Agregat büyüklük dağılımı (mm) (%)						
		<0,25	0,25 - 0,5	0,5 - 1	1 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 10
Toprak I (Kil)	%0 (Kontrol)	3,20±0,65c	3,23±0,69c	3,57±0,75c	3,45±0,64d	4,81±0,61c	3,19±0,41d	5,97±1,07
	%0,5	3,09±0,38c	4,17±0,67c	5,21±1,45c	5,46±1,39c	7,16±1,04b	4,41±0,73bc	7,00±1,95
	%1	3,54±1,78c	4,44±1,04c	5,33±0,97c	5,21±0,55c	6,78±0,29b	4,15±0,48cd	7,27±1,37
	%2	7,60±0,67b	8,11±0,61b	10,01±0,76b	8,87±0,72b	10,14±1,18a	5,42±0,58ab	8,45±0,50
	%4	10,03±1,76a	12,45±0,93a	14,45±0,53a	12,15±1,17a	11,25±0,71a	6,22±0,67a	6,10±0,58
Ortalama		5,50±3,10C	6,48±3,60C	7,72±4,21C	7,03±3,31B	8,03±2,52B	4,68±1,19C	6,96±1,39A
<i>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>ns (0,166)</i>
Toprak II (Tın)	%0 (Kontrol)	21,94±0,48bc	12,97±1,54	14,66±1,59	16,07±0,32	18,80±0,67	6,20±1,77	3,23±0,95a
	%0,5	20,58±1,94c	14,53±1,90	15,25±1,16	16,02±0,65	18,67±2,24	6,64±1,18	2,52±0,55a
	%1	24,80±1,50ab	14,11±0,30	14,51±1,60	15,64±1,19	17,91±2,04	6,44±0,69	2,14±0,75ab
	%2	25,55±3,34ab	13,53±1,17	14,94±0,45	15,06±1,80	18,59±3,48	5,53±0,45	2,04±0,23ab
	%4	26,75±1,76a	15,24±1,08	15,53±1,77	15,35±0,21	16,60±3,24	5,89±1,91	1,25±0,31b
Ortalama		23,93±2,93A	14,07±1,38A	14,98±1,24A	15,63±0,95A	18,11±2,31A	6,14±1,20B	2,24±0,85C
<i>p</i>		<i>0,020</i>	<i>ns (0,320)</i>	<i>ns (0,892)</i>	<i>ns (0,712)</i>	<i>ns (0,811)</i>	<i>ns (0,852)</i>	<i>0,032</i>
Toprak III (Kumlu tın)	%0 (Kontrol)	18,89±2,54	11,85±0,94	12,20±0,63	15,46±1,84	20,44±2,37a	9,64±1,36	4,49±1,16
	%0,5	18,72±0,72	13,68±3,49	12,38±0,61	16,21±1,46	17,40±1,61b	7,70±1,15	4,25±1,30
	%1	18,49±1,39	10,78±1,74	11,58±0,87	14,14±1,81	17,28±0,39b	8,14±0,15	3,81±0,24
	%2	17,84±1,37	10,53±1,97	12,36±0,69	13,61±1,41	18,83±0,86ab	8,77±0,69	5,29±0,46
	%4	16,63±2,49	12,90±1,57	12,32±1,11	14,67±1,20	20,03±1,31ab	8,28±1,46	5,69±0,94
Ortalama		18,11±1,78B	11,95±2,18B	12,17±0,75B	14,82±1,55A	18,80±1,83A	8,51±1,14A	4,70±1,05B
<i>p</i>		<i>ns (0,583)</i>	<i>ns (0,362)</i>	<i>ns (0,722)</i>	<i>ns (0,265)</i>	<i>0,047</i>	<i>ns (0,298)</i>	<i>ns (0,153)</i>
Genel ortalama	%0 (Kontrol)	14,67±8,81bc	9,35±4,72b	10,14±5,13c	11,66±6,24b	14,68±7,54	6,34±3,02	4,56±1,50
	%0,5	14,13±8,38c	10,79±5,37b	10,95±4,58c	12,56±5,43ab	14,41±5,66	6,25±1,71	4,59±2,30
	%1	15,61±9,55bc	9,78±4,38b	10,47±4,19c	11,66±5,01b	13,99±5,51	6,24±1,78	4,41±2,40
	%2	17,00±8,01ab	10,72±2,63b	12,44±2,21b	12,51±2,97ab	15,85±4,68	6,57±1,72	5,26±2,80
	%4	17,81±7,50a	13,53±1,68a	14,10±1,78a	14,06±1,69a	15,96±4,23	6,79±1,68	4,34±2,39
<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>0,151</i>	<i>0,795</i>	<i>0,269</i>
<i>Toprak × Biyokömür doz (p)</i>		<i>0,001</i>	<i>0,001</i>	<i>0,001</i>	<i>0,001</i>	<i>0,005</i>	<i>0,025</i>	<i>0,017</i>

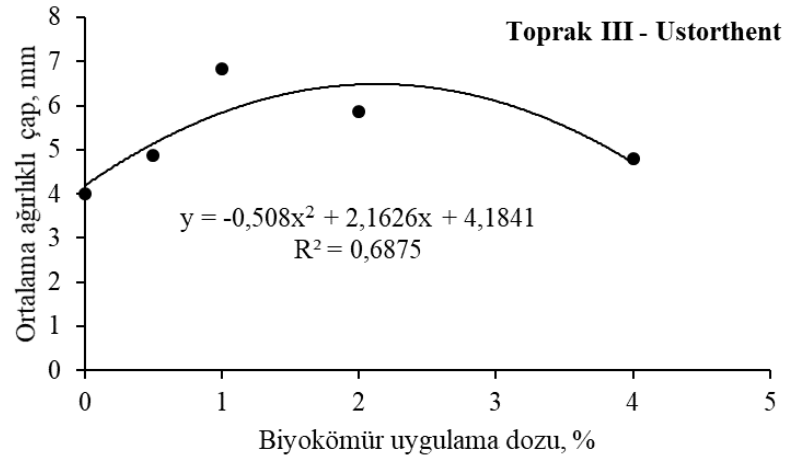
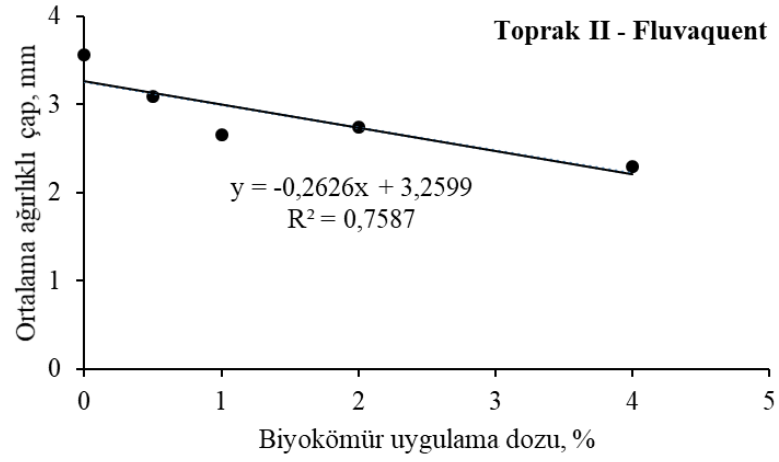
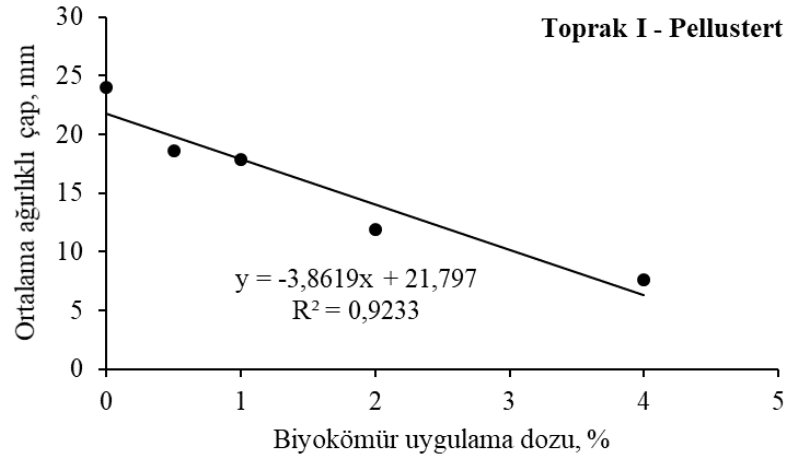
Farklı harflerle gösterilen değerler istatistiksel olarak birbirinden farklıdır ($p<0.05$); ns: not significant.

Tablo 2. (Devamı)

Topraklar	Uygulama dozları (w/w)	Agregat büyüklük dağılımı (mm) (%)						Ortalama ağırlıklı çap (mm)
		10 - 15	15 - 20	20 - 25,4	25,4 - 31,8	31,8 - 38,1	38,1 - 50,8	
Toprak I	%0 (Kontrol)	8,81±0,60	7,67±0,99ab	8,02±2,96ab	10,65±1,04a	8,76±0,48	28,65±2,24a	23,99±1,51a
	%0,5	10,23±2,12	10,88±3,36a	10,83±2,48a	7,43±3,88ab	10,25±7,66	13,85±1,28b	18,64±2,91b
	%1	10,93±1,37	10,19±2,78ab	12,11±2,56a	10,37±2,81a	9,26±2,09	10,44±4,17bc	17,87±1,33b
	%2	9,75±1,49	6,41±0,86b	7,97±2,16ab	6,60±2,07ab	3,66±1,33	7,02±4,55c	11,93±1,82c
	%4	7,47±2,11	6,19±0,54b	3,87±2,40b	4,52±1,70b	4,66±1,66	0,64±0,33d	7,59±0,64d
	Ortalama	9,44±1,85A	8,26±2,64A	8,56±3,63A	7,91±3,20A	7,32±4,14A	12,12±10,01A	16,00±6,08A
<i>p</i>		<i>ns (0,169)</i>	<i>0,050</i>	<i>0,021</i>	<i>0,049</i>	<i>ns (0,182)</i>	<i>0,001</i>	<i>0,001</i>
Toprak II	%0 (Kontrol)	0,69±0,31	0,67±0,20	0,46±0,25	0,93±0,52	0,76±0,24b	2,60±1,56a	3,56±0,85a
	%0,5	0,72±0,25	1,05±0,77	0,99±0,72	1,01±0,31	1,28±0,30a	0,73±0,10b	3,08±0,10ab
	%1	0,64±0,49	0,74±0,16	0,84±0,36	0,79±0,19	0,81±0,10b	0,64±0,06b	2,65±0,07bc
	%2	0,54±0,42	0,52±0,13	1,11±0,54	0,98±0,18	0,95±0,21ab	0,67±0,04b	2,74±0,20bc
	%4	0,35±0,32	0,56±0,24	0,54±0,32	0,60±0,12	0,65±0,07b	0,70±0,27b	2,30±0,09c
	Ortalama	0,59±0,34B	0,71±0,38B	0,79±0,47B	0,86±0,30C	0,89±0,28B	1,07±0,99C	2,87±0,55C
<i>p</i>		<i>ns (0,737)</i>	<i>ns (0,493)</i>	<i>ns (0,420)</i>	<i>ns (0,481)</i>	<i>0,028</i>	<i>0,026</i>	<i>0,027</i>
Toprak III	%0 (Kontrol)	0,60±0,13	0,57±0,12	0,93±0,64b	2,28±2,11	0,87±0,42b	1,81±1,78	3,99±1,03b
	%0,5	0,45±0,22	1,30±0,97	0,96±0,40b	1,18±0,44	2,04±1,31ab	3,73±1,28	4,87±0,76ab
	%1	0,41±0,12	0,47±0,16	3,17±1,94a	2,96±1,68	3,76±1,40a	5,00±2,56	6,83±2,02a
	%2	0,76±0,49	1,48±0,72	1,68±0,51ab	2,44±0,89	2,29±0,41ab	4,13±1,04	5,85±0,78ab
	%4	0,75±0,35	1,19±0,86	1,29±0,61ab	1,54±0,27	1,89±0,89ab	2,83±0,88	4,81±0,82ab
	Ortalama	0,59±0,29B	1,00±0,70B	1,61±1,20B	2,08±1,28B	2,17±1,27B	3,50±1,78B	5,27±1,42B
<i>p</i>		<i>ns (0,495)</i>	<i>ns (0,309)</i>	<i>0,042</i>	<i>ns (0,491)</i>	<i>0,045</i>	<i>ns (0,225)</i>	<i>0,047</i>
Genel Ortalama	%0 (Kontrol)	3,37±4,10	2,97±3,56ab	3,13±3,97bc	4,62±4,71a	3,46±3,99	11,02±13,33a	10,51±10,16a
	%0,5	3,80±4,94	4,41±5,17a	4,26±5,09ab	3,21±3,72ab	4,52±5,80	6,10±6,03b	8,86±7,53a
	%1	3,99±5,25	3,80±4,99ab	5,37±5,40a	4,70±4,64a	4,61±3,92	5,36±4,91b	9,12±6,92a
	%2	3,68±4,62	2,80±2,79ab	3,58±3,49bc	3,34±2,76ab	2,30±1,37	3,94±3,61bc	6,84±4,17b
	%4	2,86±3,63	2,65±2,72b	1,90±1,96c	2,22±1,97b	2,40±2,01	1,39±1,19c	4,90±2,35c
	Toprak (p)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
<i>Biyokömür doz (p)</i>		<i>0,130</i>	<i>0,028</i>	<i>0,001</i>	<i>0,014</i>	<i>0,084</i>	<i>0,001</i>	<i>0,001</i>
<i>Toprak × Biyokömür doz (p)</i>		<i>0,090</i>	<i>0,013</i>	<i>0,005</i>	<i>0,052</i>	<i>0,096</i>	<i>0,001</i>	<i>0,001</i>



Şekil 1. Araştırma toprakların agregat büyüklük dağılımları



Şekil 2. Biyokömür uygulama dozu ile ortalama ağırlıklı çap arasındaki ilişkiler

Tablo 3. İncelenen Parametreler Arasındaki Pearson Korelasyon Katsayıları

	BK	OM	OAÇ	AS	DO	HA	Hİ	HG	PD
Toprak I	BK	-							
	OM	,981**	-						
	OAÇ	-,951**	-,922**	-					
	AS	,973**	,989**	-,929**	-				
	DO	-,943**	-,901**	,879**	-,884**	-			
	HA	-,929**	-,911**	,847**	-,878**	,878**	-		
	Hİ	,801**	,758**	-,718**	,742**	-,794**	-,833**	-	
	HG	,937**	,896**	-,896**	,879**	-,870**	-,853**	,758**	-
	PD	-,948**	-,929**	,949**	-,928**	,908**	,864**	-,737**	-,882**
Toprak II	BK	-							
	OM	,948**	-						
	OAÇ	-,757**	-,690**	-					
	AS	,988**	,936**	-,747**	-				
	DO	-,828**	-,752**	,782**	-,808**	-			
	HA	-,972**	-,914**	,758**	-,968**	,815**	-		
	Hİ	-,726**	-,809**	,280	-,692**	,592*	,669**	-	
	HG	-,496	-,587*	,435	-,522*	,525*	,581*	,561*	-
	PD	-,952**	-,857**	,752**	-,937**	,871**	,914**	,649**	,433
Toprak III	BK	-							
	OM	,943**	-						
	OAÇ	,269	,042	-					
	AS	,908**	,780**	,411	-				
	DO	-,920**	-,802**	-,340	-,893**	-			
	HA	-,971**	-,884**	-,342	-,930**	,903**	-		
	Hİ	-,905**	-,864**	-,119	-,859**	,765**	,899**	-	
	HG	-,947**	-,901**	-,192	-,854**	,834**	,937**	,933**	-
	PD	-,963**	-,862**	-,385	-,934**	,933**	,983**	,877**	,925**
Genel korelasyon	BK	-							
	OM	,902**	-						
	OAÇ	-,280	-,412**	-					
	AS	,745**	,806**	-,654**	-				
	DO	-,412**	-,601**	,772**	-,748**	-			
	HA	-,652**	-,387**	-,404**	-,153	-,376**	-		
	Hİ	-,147	-,121	-,333*	-,142	-,327*	,460**	-	
	HG	-,017	,005	-,511**	,023	-,439**	,475**	,863**	-
	PD	-,550**	-,621**	,925**	-,814**	,824**	-,152	-,252	-,438**

BK: Biyokömür; OM: Organik madde; OAÇ: Ortalama ağırlıklı çap; AS: Agregat stabilitesi; DO: Dispersiyon oranı; HA: Hacim ağırlığı; Hİ: Hidrolik iletkenlik; HG: Hava geçirgenliği; PD: Penetrasyon direnci

** Korelasyon 0,01 seviyesinde önemlidir.

* Korelasyon 0,05 seviyesinde önemlidir.

Agregat stabilitesi (AS)

Biyokömür uygulamaları araştırma topraklarının tüm agregat fraksiyonlarında agregat stabilitesi (AS) değerlerini kontrollerine göre önemli düzeyde ($p<0,05$) artırmıştır (Tablo 4). Biyokömürün agregat stabilitesi üzerine etkinliğinin genel olarak doz arttıkça artış gösterdiği tespit edilmiştir. Kontrolleri ile karşılaştırıldığında, agregat fraksiyonlarında en yüksek AS değerleri en yüksek uygulama dozu %4'de elde edilmiştir.

Toprak I'e %0,5 biyokömür uygulaması sonrasında, her bir agregat büyüklüğünün AS değerleri kontrolleri ile karşılaştırıldığında oransal olarak %1,70 (10-15 mm agregat büyüklüğünde) ile %28,14 (20-25,4 mm agregat büyüklüğünde) arasında değişen oranlarda arttığı ve %0,5 biyokömür uygulamasının AS değerini ortalama olarak %24,71'den %26,47'ye yükselterek oransal olarak %7,12 artırdığı belirlenmiştir. Toprak I'e %1 biyokömür uygulaması sonrasında AS değerlerinin %5,92 (2-4 mm agregat büyüklüğünde) ile %29,67 (0,25-0,5 mm agregat büyüklüğünde) arasında değişen oranlarda, ortalama olarak da %15,30 oranında artırdığı belirlenmiştir. Söz konusu toprağın AS değerleri %2 uygulama dozunda %14,28 (2-4 mm agregat büyüklüğünde) ile %61,98 (0,25-0,5 mm agregat büyüklüğünde) arasında değişen oranlarda ve ortalama olarak da %34,11 artırdığı belirlenmiştir. Uygulamanın %4 dozunda %24,58 (15-20 mm agregat büyüklüğünde) ile %81,82 (0,5-1 mm agregat büyüklüğünde) arasında değişen oranlarda ve ortalama olarak da %49,00 artış meydana geldiği hesaplanmıştır (Tablo 4; Şekil 3).

Biyokömür uygulamasının %0,5, 1, 2 ve 4 dozları sonrasında toprak II'nin AS değerlerinde %2,49 ile %32,67, %18,95 ile %63,69, %28,07 ile %90,74 ve %33,89 ile %138,06 arasında değişen oranlarda ve ortalama olarak da %0,5 dozunda %12,87, %1 dozunda %32,49, %2 dozunda %46,50 ve %4 dozunda da %62,96 artış meydana geldiği belirlenmiştir (Tablo 4; Şekil 3).

Kum içeriği en yüksek, kil içeriği en düşük olan kumlu tın tekstür sınıfındaki III nolu araştırma toprağına %0,5, 1, 2 ve 4 dozlarında biyokömür uygulamaları sonrasında AS değerlerinde %17,75 ile %86,02, %18,32 ile %107,71, %22,18 ile %125,31 ve %34,67 ile %136,29 arasında değişen oranlarda ve ortalama olarak da %0,5 dozunda %49,25, %1 dozunda %61,79, %2 dozunda %68,60 ve %4 dozunda da %83,25 artış meydana geldiği belirlenmiştir (Tablo 4; Şekil 3). Biyokömür uygulamaları (%0,5, %1, %2 %4) sonrasında AS'nin ortalama değerleri değerlendirildiğinde oransal olarak en fazla artışların kumlu tınlı toprakta, daha sonra tınlı ve en az artışların kil tekstür sınıfındaki toprakta meydana geldiği belirlenmiştir.

Genel ortalama AS değeri kontrolde %27,14 iken biyokömür uygulama dozu artışı ile artış göstermiş, %0,5 dozunda %33,19, %1 dozunda 36,98, %2 dozunda 40,58 ve %4 dozunda %43,51 olarak belirlenmiş ve kontrole göre %22,29, %36,26, %49,52 ve %64,96 oranlarında artışlar belirlenmiştir. Biyokömür uygulaması ile AS arasındaki korelasyon katsayısı toprak I, II ve III için sırasıyla 0,973**, 0,988** ve 0,908** olarak belirlenirken, BK-AS arasındaki genel korelasyon katsayısı ise 0,745** olarak tespit edilmiştir (Tablo 3).



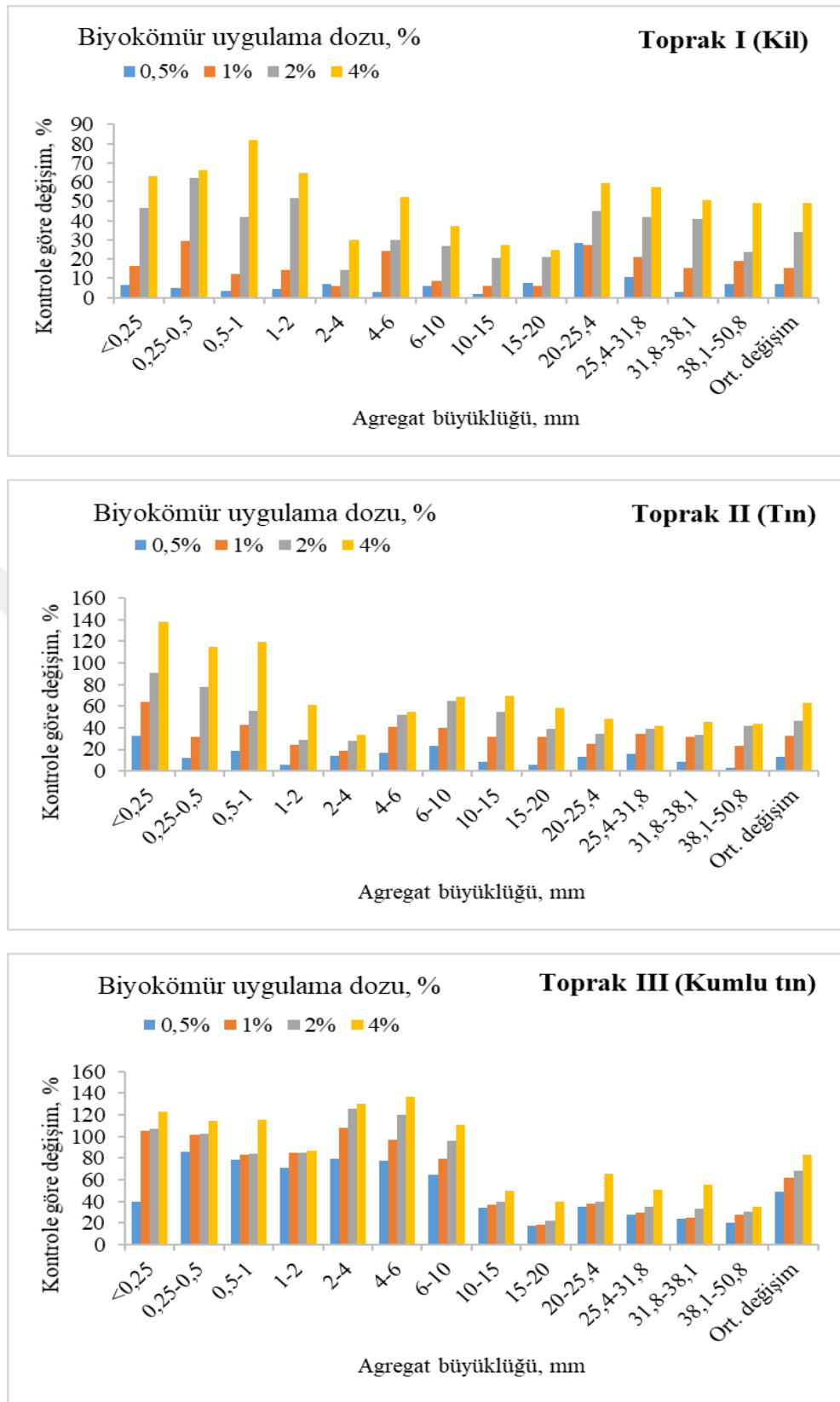
Tablo 4. Toprakların Agregat Stabilitesi (AS) Değerleri Üzerine Biyokömürün Etkileri (Ortalama±Std)

Topraklar	Uygulama dozları (w/w)	Agregat stabilitesi (%) (agregat büyüklüğü, mm)						
		<0,25	0,25 - 0,5	0,5 - 1	1 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 10
Toprak I (Kil)	%0 (Kontrol)	13,70±1,48c	19,17±0,69c	21,31±0,50c	23,34±1,26d	28,28±6,16b	26,03±5,26c	28,47±2,58b
	%0,5	14,58±1,66c	20,12±1,15c	22,03±0,80c	24,39±0,91cd	30,34±1,17ab	26,78±3,21c	30,13±1,81b
	%1	15,92±1,70bc	24,86±1,52b	23,88±2,45c	26,69±0,90c	29,96±1,89b	32,39±1,39b	30,97±1,61b
	%2	20,08±1,91ab	31,06±2,75a	30,29±0,83b	35,38±2,81b	32,30±1,16ab	33,87±1,74b	36,17±2,41a
	%4	22,37±1,88a	31,85±2,72a	38,75±2,07a	38,48±1,65a	36,80±0,74a	39,59±0,77a	39,11±0,51a
Ortalama		17,33±3,71C	25,41±5,73C	27,25±6,92C	29,66±6,48C	31,54±3,95B	31,73±5,72C	32,97±4,46C
<i>p</i>		<i>0,001</i>	<i>0,001</i>	<i>0,001</i>	<i>0,001</i>	<i>0,046</i>	<i>0,001</i>	<i>0,001</i>
Toprak II (Tın)	%0 (Kontrol)	17,45±1,71d	22,19±2,30d	22,51±3,40c	31,06±2,35c	37,08±1,24c	38,68±1,67c	36,28±5,66d
	%0,5	23,14±1,38cd	24,96±1,84cd	26,70±2,71bc	32,83±3,72bc	42,26±4,16bc	45,28±0,64b	44,78±0,83cd
	%1	28,55±1,06bc	29,22±2,24c	32,09±3,15b	38,45±1,35bc	44,10±2,40bc	54,53±3,46a	50,89±4,70bc
	%2	33,27±2,99b	39,53±2,85b	34,99±3,66b	39,94±3,39b	47,48±2,15ab	58,89±1,73a	59,85±2,01ab
	%4	41,53±4,01a	47,66±2,46a	49,36±3,04a	50,13±3,81a	49,64±2,59a	59,69±1,81a	61,18±1,76a
Ortalama		28,79±8,83B	32,71±10,05B	33,13±9,89B	38,48±7,41B	44,11±5,05A	51,41±8,64A	50,60±10,12A
<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)	19,06±1,29b	21,70±1,26b	23,15±1,00b	25,33±0,91b	24,25±0,36c	24,71±0,52b	26,72±0,90c
	%0,5	26,56±2,40b	40,37±1,49a	41,23±2,36a	43,25±5,63a	43,42±4,11b	43,88±1,83a	44,06±3,42b
	%1	39,17±5,64a	43,72±4,46a	42,40±6,95a	46,87±3,92a	50,38±5,08ab	48,79±5,76a	47,92±1,88ab
	%2	39,56±3,13a	44,04±4,35a	42,51±3,64a	46,89±3,46a	54,65±5,22a	54,40±7,05a	52,34±6,95ab
	%4	42,47±1,75a	46,49±1,74a	49,97±1,28a	47,42±3,57a	55,93±2,53a	58,40±8,38a	56,28±4,79a
Ortalama		33,37±9,72A	39,26±9,66A	39,85±9,74A	41,95±9,31A	45,73±12,45A	46,04±13,04B	45,46±11,16B
<i>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>
Genel Ortalama	%0 (Kontrol)	16,74±2,71d	21,02±1,95e	22,32±1,96d	26,58±3,75d	29,87±6,49d	29,81±7,23d	30,49±5,41c
	%0,5	21,43±5,59c	28,48±9,25d	29,99±8,87c	33,49±8,86c	38,72±6,94c	38,65±9,11c	39,66±7,42b
	%1	27,88±10,49b	32,60±8,94c	32,79±8,98bc	37,34±9,03bc	41,48±9,53bc	45,24±10,53b	43,26±9,68b
	%2	30,97±8,93b	38,21±6,42b	35,93±5,94b	40,74±5,75b	44,82±10,29ab	49,05±12,14ab	49,45±11,15a
	%4	35,46±10,11a	42,00±7,89a	46,03±5,80a	45,34±5,95a	47,46±8,64a	52,56±10,65a	52,19±10,36a
<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>0,001</i>	<i>0,001</i>	<i>0,001</i>	<i>0,002</i>	<i>0,001</i>

Farklı harflerle gösterilen değerler istatistiksel olarak birbirinden farklıdır ($p<0.05$); ns: not significant

Tablo 4. (Devamı)

Topraklar	Uygulama dozları (w/w)	Agregat stabilitesi (%) (agregat büyüklüğü, mm)						Ortalama AS (%)
		10 - 15	15 - 20	20 - 25,4	25,4 - 31,8	31,8 - 38,1	38,1 - 50,8	
Toprak I	%0 (Kontrol)	29,04±2,23b	29,27±2,38b	24,22±0,51d	25,62±2,97c	26,60±3,69c	26,11±4,14c	24,71±1,38d
	%0,5	29,54±0,72b	31,52±1,19b	31,04±0,24c	28,34±0,77bc	27,38±0,64bc	27,91±1,88bc	26,47±0,87d
	%1	30,84±1,02b	31,07±2,08b	30,89±0,80c	31,00±1,98b	30,73±1,97b	31,12±2,09bc	28,48±0,29c
	%2	35,01±1,69a	35,43±1,04a	35,16±1,50b	36,30±4,22a	37,42±0,53a	32,28±3,85b	33,13±0,67b
	%4	36,97±1,26a	36,46±0,74a	38,69±0,75a	40,34±1,72a	40,16±1,15a	38,98±0,97a	36,81±0,44a
Ortalama		32,28±3,49C	32,75±3,14C	32,00±5,07C	32,32±5,95B	32,46±5,86B	31,28±5,19B	29,92±4,65C
<i>p</i>		<i>0,001</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>
Toprak II	%0 (Kontrol)	33,34±4,33d	34,22±3,67c	34,46±2,69d	34,78±2,14c	35,70±1,40c	35,23±2,88c	31,77±0,67e
	%0,5	36,02±3,77cd	36,30±4,21c	38,92±1,35cd	40,25±3,73bc	38,59±2,47bc	36,11±2,01c	35,85±1,44d
	%1	43,90±1,00bc	45,17±1,36b	43,07±1,97bc	46,76±4,75ab	46,84±4,27ab	43,57±2,80b	42,09±2,04c
	%2	51,62±3,75ab	47,53±1,24ab	46,20±0,80b	48,19±1,14ab	47,76±1,94a	49,78±1,96ab	46,54±0,74b
	%4	56,40±1,29a	54,30±0,85a	51,22±0,94a	49,43±1,36a	51,96±4,36a	50,49±1,98a	51,77±0,91a
Ortalama		44,26±9,51A	43,50±7,98A	42,77±6,15A	43,88±6,26A	44,17±6,81A	43,04±7,00A	41,60±7,51A
<i>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>
Toprak III	%0 (Kontrol)	28,58±1,47b	30,20±1,02b	24,95±1,08c	26,26±2,41b	23,65±1,03c	25,80±2,83b	24,95±0,10d
	%0,5	38,23±7,62ab	35,56±4,57ab	33,69±4,05b	33,47±2,13a	29,37±1,73b	31,03±2,71ab	37,24±1,29c
	%1	39,05±3,14ab	35,73±2,75ab	34,31±3,38ab	34,12±2,20a	29,46±0,49b	32,88±1,60ab	40,37±2,01bc
	%2	40,02±1,54a	36,90±1,89ab	34,90±2,02ab	35,51±3,58a	31,44±2,36b	33,71±3,46a	42,07±2,47ab
	%4	42,87±2,99a	42,20±3,12a	41,36±2,29a	39,55±1,34a	36,70±2,60a	34,74±2,40a	45,72±0,61a
Ortalama		37,75±6,06B	36,12±4,67B	33,84±5,90B	33,78±4,92B	30,12±4,61C	31,63±3,97B	38,07±7,47B
<i>p</i>		<i>0,014</i>	<i>0,008</i>	<i>0,001</i>	<i>0,001</i>	<i>0,001</i>	<i>0,015</i>	<i>0,001</i>
Genel Ortalama	%0 (Kontrol)	30,32±3,41c	31,23±3,20d	27,88±5,17d	28,88±4,94d	28,65±5,81c	29,05±5,47c	27,14±3,55e
	%0,5	34,60±5,79b	34,46±3,87cd	34,55±4,08c	34,02±5,61c	31,78±5,40c	31,68±4,07c	33,19±5,17d
	%1	37,93±5,97b	37,32±6,49bc	36,09±5,80c	37,29±7,75bc	35,68±8,71b	35,86±6,14b	36,98±6,57c
	%2	42,22±7,70a	39,95±5,85b	38,75±5,74b	40,00±6,77ab	38,87±7,32b	38,59±8,86ab	40,58±6,06b
	%4	45,41±8,79a	44,32±8,06a	43,76±5,86a	43,11±4,93a	42,94±7,40a	41,40±7,24a	44,77±6,54a
<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 (p)</i>		<i>0,001</i>	<i>0,001</i>	<i>0,217</i>	<i>0,219</i>	<i>0,041</i>	<i>0,012</i>	<i>0,001</i>



Şekil 3. Biyokömür uygulaması sonrasında AS değerlerindeki oransal değişimler

Biyokömür ilavesinin toprak agregasyonu üzerindeki etkilerini araştıran çalışmalardan bazılarında tutarsızlıklar görülsede, genel bulgular biyokömürün agregasyonu iyileştirdiği ve agregat stabilitesini artırdığı yönündedir. Toprağa uygulanan biyokömürün agregasyon ve agregat stabilitesi üzerine etkinliğinin tekstüre, biyokömür hammaddesi ve üretim süreci koşullarına, biyokömürün kimyasal (pH, EC, element içeriği) ve fiziksel özelliklerine (özellik partikül büyüklüğü, spesifik yüzey), uygulama yöntemi, uygulama dozu ve inkübasyon süresine bağlı olarak değişkenlik gösterdiği ve sonuçların bu faktörlere bağlı olarak çok yüksek varyasyon gösterebileceği belirtilmektedir (Ouyang et al. 2013; Blanco-Canqui, 2017; Wang et al. 2017; Islam et al. 2021). Biyokömür ilavesinin toprak agregasyonu üzerine olumlu etkisi hem arazi hem de laboratuvarında yapılan çok sayıda çalışmayla ortaya konulmuş olsa da (Liang et al. 2008; Liu et al. 2012a; Lei and Zhang 2013; Soenne et al. 2014; Khademalrasoul et al. 2014; Baiamonte et al. 2015; Obia et al. 2016; Burrell et al. 2016; Bai et al. 2020) bazı araştırmalarda biyokömür ilavesinin toprakta agregat oluşumu ve stabilitesinde bir iyileşme veya gelişme sağlamadığı ifade edilmektedir (Busscher et al. 2003; Peng et al. 2011; Hardie et al. 2014; Zhang et al. 2015). Bu araştırmalardan, Busscher et al. (2003) araştırmasında toprağa %0,5, %1 ve %2 biyokömür uygulamış 70 gün inkübasyona bırakmış, Peng et al. (2011) %1 biyokömür uygulamış 11 gün inkübasyona bırakmış, Zhang et al. (2015) araştırmasında çok düşük (4,5 ve 9 ton/ha yaklaşık %0,2 ve %0,4 eşdeğer) dozlar kullanmış ve Hardie et al. (2014) araştırmasında ortalama ağırlıklı çapı 3,84 mm olan biyokömür kullanmıştır. Söz konusu araştırmalarda çok kısa inkübasyon süresi, çok düşük dozda uygulama ve uygulanan biyokömürün partikül çapının büyük olmasından dolayı biyokömür uygulaması sonrasında toprak agregasyonunda ve agregat stabilitesinde iyileşme meydana gelmemiştir. Partikül çapı küçük, ince taneli biyokömürün toprağa daha kolay ve homojen karıştırılabilmesinin yanısıra ince partiküller toprak taneleri arasındaki partikül-partikül temasını ve adhezyon ile kohezyonu artırmada kil gibi davranmasından ve biyokömür partikülleri küçüldükçe birim kütle başına spesifik yüzey alanının artmasından dolayı agregasyonda ve agregat stabilitesinde daha fonksiyonel olduğu, büyük biyokömür partiküllerinin etkinliğinin sınırlı düzeyde olduğu ifade edilmektedir (Herath et al. 2013; Ajayi and Horn 2017; Awe et al. 2021). Ayrıca, toprak agregatlarının oluşumu veya mevcut agregatların stabilitesinin gelişmesi zamana bağlı bir süreç olup, kısa inkübasyon sürecinde biyokömür uygulamasının toprak agregat oluşumu ve stabilitenin iyileştirilmesi üzerinde çok az etkisi olduğu belirtilmektedir (Liu et al. 2012a).

Abdelhafez et al. (2014) siltli tın tekstür sınıfındaki toprağa ağırlık esasından %1, %2,5, %5 ve %10 oranlarında şeker kamışından ve portakal kabuğundan 500 °C'den daha düşük piroliz sıcaklığında üretilmiş biyokömür uygulaması yapmışlardır. Şeker kamışı

biyokömürü uygulaması sonrasında agregat stabilitesi değerlerinde kontrole göre %63, %121, %179 ve %226 oranlarında, portakal kabuğu biyokömürü uygulaması sonrasında da %28, %51, %86 ve %121 oranlarında artışlar belirlemişlerdir. Amoakwah et al. (2017) tropical bölgede (Ghana) kumlu tın tekstüre sahip araziye 10 ve 20 ton/ha (ağırlık esasından %0,34 ve %0,68) mısır koçanı biyokömürü uygulamasıyla agregat stabilitesinin kontrole göre %27 ve %53 oranında arttığını belirlemişlerdir. Blanco-Canqui (2017) yapmış olduğu derlemede %0,1 ile %10 ve 5 ile 96 ton/ha arasında değişen oranlarda biyokömür uygulamasının yapıldığı farklı tekstürdeki 34 topraktan 24'ünde agregat stabilitesinin %21 ile %226 arasında değişen oranlarda arttığını, 10'unda ise herhangi bir değişimin olmadığını bildirmektedir. Islam et al. (2021) ve Omondi et al. (2016)'de yapmış oldukları geniş kapsamlı derleme çalışmalarında biyokömür uygulamasıyla agregat stabilitesinin ortalama olarak %18,2 ve %8,2 arttığını ve biyokömür uygulama dozunun artmasıyla agregat stabilitesinin arttığını belirlemişlerdir. Blanco-Canqui (2017) biyokömür uygulaması sonrasında agregat stabilitesinde meydana gelen değişimler ile tektür sınıfı arasında net bir ilişkinin olmadığını bildirmesine rağmen, biyokömürün organik partiküllerinin toprağın büyük fraksiyonlarının partikül bağlanmasını artıracak ve ince tektürlü topraklardan ziyade kaba tektürlü topraklarda agregasyonu daha fazla teşvik edeceğini belirtmektedir. Ouyang et al. (2013) ve Burrell et al. (2016) yaptıkları araştırmalarında, biyokömür uygulamasının agregat stabilitesini siltli kil ve killi topraklara göre kumlu topraklarda daha fazla artırdığını belirlemişlerdir. Biyokömür partikülleri kumlu topraklara organik bağlayıcı maddeler sağlayarak toprak agregasyonunu killi topraklara göre daha yüksek derecede iyileştirir (Blanco-Canqui 2017). Biyokömürün agregat stabilitesi üzerine olumlu etkilerinin yanında ayrıca, bazı araştırmacılar biyokömür uygulamasının toprakta dispersiyonu azalttığını da belirtmektedirler (Lin et al. 2012; Khademalrasoul et al. 2014; Soenne et al. 2014; Ajayi and Horn 2016; Amoakwah et al. 2017; Islam et al. 2021).

Biyokömür partikülleri agregat oluşumunda ve stabilitenin artırılmasında toprağın inorganik fraksiyonlarını fiziksel, kimyasal ve biyolojik kuvvetlerle birbirine bağlayan organik çekirdek görevi görür (Hua et al. 2014). Agregat oluşturmak için mineral toprak taneleri ile biyokömür arasındaki temas biyokömür yüzeylerindeki negatif yüklü karboksil, hidroksil ve fenolik fonksiyonel gruplar aracılığıyla oluşmakta olup, söz konusu fonksiyonel gruplar toprak tanelerini adsorbe eder ve mineral taneler ile biyokömür arasındaki kohezyon artar (Lin et al. 2012; Jien and Wang 2013; Soenne et al. 2014; Jindo et al. 2020; Islam et al. 2021).

Biyokömürün agregasyon ve agregat stabilitesi üzerine etkileri şu mekanizmalarla açıklanmaktadır. (1) Biyokömürün aromatik yapısının toprak taneleri arasında bir bağ olarak işlev gördüğü ve biyokömürün organik bağlayıcı maddeler sağlayarak toprak agregasyonunu artırdığı belirtilmektedir. Karbon molekülleri, polivalent katyonların bağlanmasıyla mineral toprak tanelerinin yüzeyinde organik ligandlar oluşturabilir. Organik ve inorganik parçacıkların birleşmesiyle oluşan organomineral kompleksler, mikroagregatlarının ve ardından makroagregaların oluşmasını sağlar (Tsai et al. 2012; Blanco-Canqui 2017; Du et al. 2017).

(2) Biyokömür sahip olduğu yüksek KDK ve külündeki kolay çözünebilir katyonlar ile katyon köprüsü oluşumu vasıtasıyla stabilizasyona önemli düzeyde etki etmektedir (Etiégni and Campbell 1991; Soinne et al. 2014). Ayrıca, biyokömürden toprak sistemine salınan kararsız C, çözünebilir tuzlar ve katyonlar elektrolit konsantrasyonunu artırır, toprak kolloidlerinin elektrik çift tabakalarını daraltarak flokülasyonu, agregasyonu ve stabiliteyi artırır (Burrell et al. 2016; Amoakwah et al. 2017).

(3) Biyokömür, toprak agregasyonu ve agregat stabilitesini geliştirmede önemli bir etkiye sahip olan makro ve mikro toprak canlılarının (özellikle mikorizal mantarlar ve solucanlar) popülasyonu ve aktivitelerini artırır (Warnock et al. 2007; Weyers and Spokas 2011; Awad et al. 2012; Greenberg et al. 2019). Toprakta mikrobiyal popülasyon ve aktivitenin artması sonrasında agregat stabilitesindeki artış mikroorganizmalar tarafından salgılanan polisakkaritler ve müsilajla, ayrıca mantar hifleriyle ilişkilendirilmektedir (Herath et al. 2013; Jien and Wang 2013; Hua et al. 2014; Burrell et al. 2016; Du et al. 2017; Yoo et al. 2017; Islam et al. 2021).

(4) Biyokömür, yüzeyindeki polar olmayan alifatik ve aromatik organik bileşiklerden dolayı hidrofobik özellik gösterebilmekte ve bu hidrofobik durumun neden olduğu su iticiliği suyun gözeneklere girmesini önleyen negatif bir basınç oluşturmaktadır (Zong et al. 2014; Mendoza and Horn 2018). Yüksek düzeydeki hidrofobisitenin, toprağın hidrolojik özelliklerini olumsuz etkileyebileceği belirtilmesine rağmen (Clothier et al. 2000; Blanco-Canqui and Lal 2009; Briggs et al. 2012; Blanco-Canqui 2017), orta düzeydeki hidrofobikliğin toprak agregasyonunu ve stabilitesini iyileştirmeye yardımcı olabileceği ifade edilmektedir (Blanco-Canqui et al. 2007; Herath et al. 2013;). Biyokömürün yüzey hidrofobik-hidrofilik etkileşimler yoluyla kil mineralleri ile etkileşime girdiği ve makroagregat oluşumu ve stabilitesini olumlu yönde etkilediği bildirilmektedir (Joseph et al. 2010). Hidrofilik yapıdaki toprağa ve agregatlar içerisine su girişi hızlı gerçekleşir ve bu hızlı su girişi agregatlar içerisinde hem havanın hapsolmesine hem de toprak agregatlarının

gevşemesine ve dağılmasına neden olur (Blanco-Canqui 2017). Ancak, hidrofobik özellikler, suyun toprak agregalarının gözenek boşluklarına girişini ve nüfuzunu azaltır, böylece agregat stabilitesini artırır (Glaser et al. 2002; Petter and Madari 2012). Piccolo and Mbagwu (1999), organik maddenin hidrofobik bileşenlerinin hidrofilik bileşenlerden agregat stabilitesine daha fazla katkıda bulunduğunu bildirmiştir. Biyokömürdeki yüksek aromatik C yapısı toprak organik maddesini bağlamaya yardımcı olarak, toprak agregalarının suya direncini artırarak ve agregatları fiziksel bozulmaya karşı daha dirençli hale getirerek agregasyonu iyileştirir (Wang et al. 2017).

Dispersiyon oranı (DO)

Biyokömür uygulamalarının toprakların dispersiyon oranı (DO) değerleri üzerine etkileri Tablo 5 ve Şekil 4’de verilmiştir. Tüm toprakların farklı boyutlardaki agregat fraksiyonlarında en yüksek DO değerleri kontrol seviyelerinde belirlenmiştir. Biyokömür uygulamaları ile DO değerlerinde genellikle önemli düzeyde düşüşler meydana gelmiştir. Biyokömürün DO üzerine etkinliğinin genel olarak doz arttıkça artış gösterdiği belirlenmiştir. Kontrolleri ile karşılaştırıldığında, agregat fraksiyonlarında en düşük DO değerleri en yüksek uygulama dozu olan %4’de elde edilmiştir.

Toprak I’nin kontrol düzeyinde <0,25, 0,25-0,5, 0,5-1, 1-2, 2-4, 4-6, 6-10, 10-15, 15-20, 20-25,4, 25,4-31,8, 31,8-38,1 ve 38,1-50,8 mm agregat fraksiyonlarında DO değerleri sırasıyla %79,29, %74,84, %71,33, %68,20, %66,88, %63,58, %62,74, %60,91, %60,55, %59,90, %60,82, %61,44 ve %59,78 belirlenirken %0,5 biyokömür uygulaması sonrasında %77,13, %71,74, %69,41, %67,80, %64,37, %62,48, %62,00, %60,58, %59,16, %54,83, %58,08, %57,30 ve %56,18 olarak belirlenmiştir. Kontrolleri ile karşılaştırıldığında %0,5 biyokömür uygulaması sonrasında Toprak I’nin agregat fraksiyonlarının DO değerlerinde oransal olarak %0,55 (10-15 mm agregat büyüklüğünde) ile %8,48 (20-25,4 mm agregat büyüklüğünde) arasında değişen oranlarda düşüşlerin meydana geldiği ve %0,5 biyokömür uygulamasının DO değerini ortalama olarak %65,40’dan %63,16’ya düşürerek oransal olarak %3,44 azalttığı belirlenmiştir. Toprak I’e %1 biyokömür uygulaması sonrasında DO değerlerinin %4,50 (1-2 mm agregat büyüklüğünde) ile %16,72 (38,1-50,8 mm agregat büyüklüğünde) arasında değişen oranlarda, ortalama olarak da %9,80 oranında düşürdüğü belirlenmiştir. Söz konusu toprağın DO değerleri %2 uygulama dozunda %6,78 (1-2 mm agregat büyüklüğünde) ile %18,11 (31,8-38,1 mm agregat büyüklüğünde) arasında değişen oranlarda ve ortalama olarak da %11,72 düştüğü belirlenmiştir. Uygulamanın %4 dozunda %8,88 (1-2 mm agregat büyüklüğünde) ile %19,65 (31,8-38,1 mm agregat büyüklüğünde)

arasında değişen oranlarda ve ortalama olarak da %13,91 oranında azalış meydana gelmiştir (Tablo 5; Şekil 4).

Toprak II'ye %0,5, 1, 2 ve 4 biyokömür uygulamaları sonrasında DO değerlerinde sırasıyla %0,18 ile %12,29, %2,50 ile %20,90, %3,62 ile %21,53 ve %4,82 ile %23,79 arasında değişen oranlarda ve ortalama olarak da %0,5 dozunda %5,37, %1 dozunda %9,71, %2 dozunda %12,08 ve %4 dozunda da %14,37 azalış meydana geldiği belirlenmiştir (Tablo 5; Şekil 4). Toprak III'e %0,5, 1, 2 ve 4 biyokömür uygulamaları sonrasında DO değerlerinde sırasıyla %1,17 ile %16,77, %8,49 ile %23,00, %14,22 ile %28,09 ve %15,34 ile %30,08 arasında değişen oranlarda ve ortalama olarak da %0,5 dozunda %7,66, %1 dozunda %16,78, %2 dozunda %20,67 ve %4 dozunda da %23,89 azalış meydana geldiği belirlenmiştir. Biyokömür uygulamaları (%0,5, %1, %2 %4) sonrasında DO'nın ortalama değerleri değerlendirildiğinde oransal olarak en fazla düşüşlerin kumlu tınlı toprakta, daha sonra tınlı ve en az düşüşlerin kil tekstür sınıfındaki toprakta meydana geldiği belirlenmiştir (Tablo 5; Şekil 4).

Genel ortalama DO değeri kontrolde %55,94 iken biyokömür uygulama dozu artışı ile düşüş göstermiş, %0,5 dozunda %52,98, %1 dozunda %49,48, %2 dozunda %47,84 ve %4 dozunda %46,43 olarak belirlenmiş ve kontrole göre %5,29, %11,55, %14,48 ve %17,00 oranlarında düşüşlerin meydana geldiği belirlenmiştir. Biyokömür uygulaması ile DO arasındaki korelasyon katsayısı toprak I, II ve III için sırasıyla -0,943**, -0,828** ve -0,920** olarak belirlenirken, BK-DO arasındaki genel korelasyon katsayısı ise -0,412** olarak belirlenmiştir (Tablo 3). Söz konusu bu ilişkilerin toprakların AS değerleri ile uyumlu oldukları belirlenmiş olup, DO ile AS arasında önemli düzeyde negatif korelasyonlar tespit edilmiştir. Dispersiyon oranı ile AS arasındaki korelasyon katsayıları toprak I, II ve III için sırasıyla -0,884**, -0,808** ve -0,893** olarak belirlenirken, DO-AS arasındaki genel korelasyon katsayısı -0,748** olarak belirlenmiştir (Tablo 3). Gülser (2006), Opara (2009) ve Aksakal et al. (2016) tarafından yapılan araştırmalarda da söz konusu parametreler arasında benzer ilişkilerin olduğu görülmektedir.

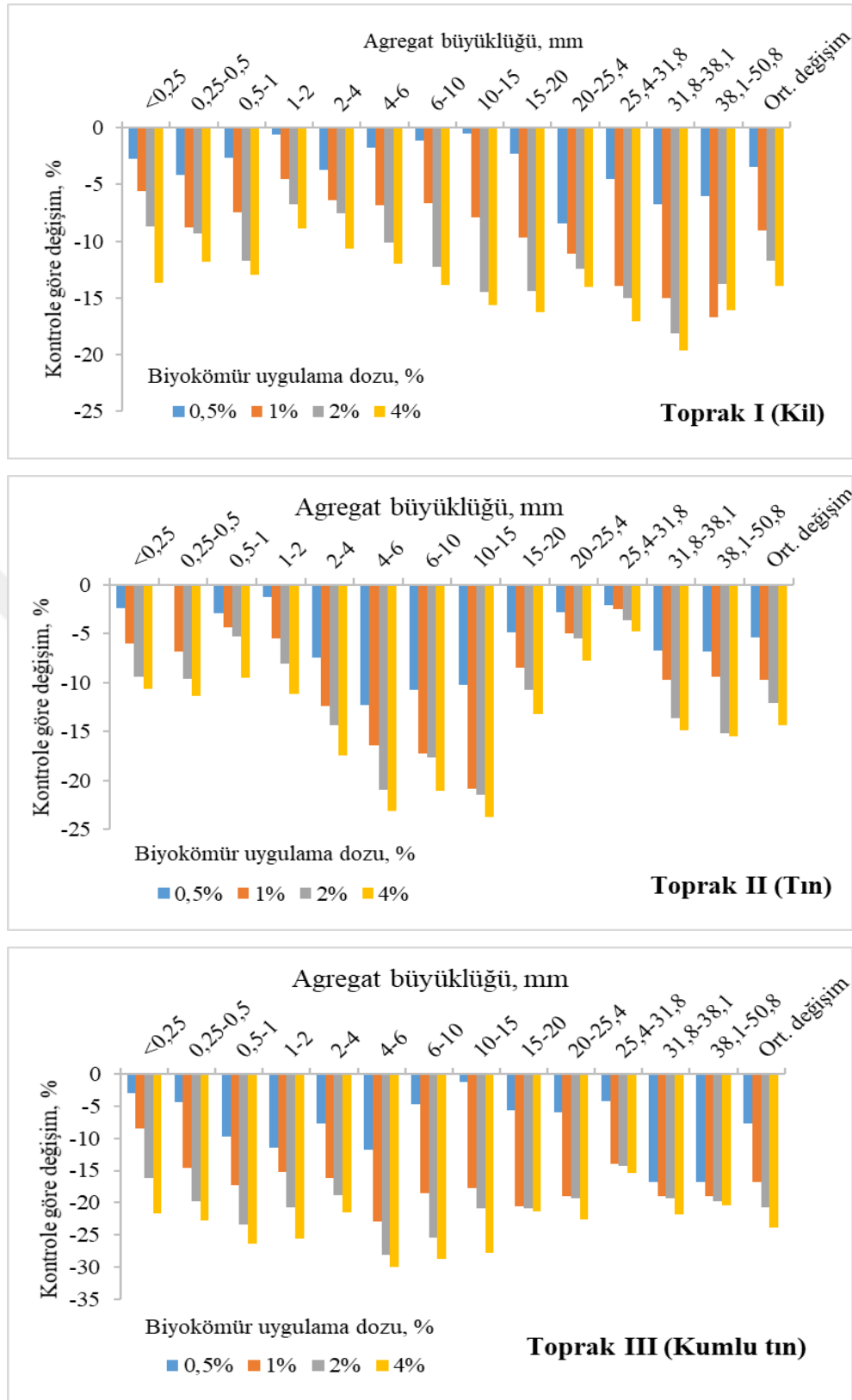
Tablo 5. Toprakların Dispersiyon Oranı (DO) Değerleri Üzerine Biyokömürün Etkileri (Ortalama±Std)

Topraklar	Uygulama dozları (w/w)	Dispersiyon oranı (%) (agregat büyüklüğü, mm)						
		<0,25	0,25 - 0,5	0,5 - 1	1 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 10
Toprak I (Kil)	%0 (Kontrol)	79,29±2,28a	74,84±4,36a	71,33±2,69a	68,20±2,57	66,88±3,41	63,58±0,68	62,74±3,25a
	%0,5	77,13±2,26a	71,74±2,25ab	69,41±2,66ab	67,80±2,89	64,37±3,39	62,48±3,40	62,00±2,12ab
	%1	74,82±2,37ab	68,27±2,54ab	66,04±3,54ab	65,13±2,21	62,60±1,48	59,22±4,68	58,56±3,22bc
	%2	72,36±1,59ab	67,83±1,43ab	62,93±3,64b	63,57±1,59	61,83±2,28	57,16±0,70	55,03±1,19bc
	%4	68,44±4,04b	65,98±1,81b	62,06±2,11b	62,14±3,25	59,74±2,29	55,98±3,57	54,02±3,36c
Ortalama		74,41±4,50A	69,73±3,98A	66,35±4,49A	65,37±3,26A	63,09±3,37A	59,68±4,00A	58,47±4,34A
<i>p</i>		<i>0,004</i>	<i>0,015</i>	<i>0,014</i>	<i>ns(0,065)</i>	<i>ns(0,070)</i>	<i>ns(0,051)</i>	<i>0,009</i>
Toprak II (Tın)	%0 (Kontrol)	70,31±1,51a	66,06±1,59	62,37±4,65	60,31±3,32	59,17±3,91a	59,65±3,93a	56,57±4,74a
	%0,5	68,59±2,46ab	65,94±2,40	60,57±3,29	59,55±2,64	54,78±2,51ab	52,32±2,69ab	50,51±2,59ab
	%1	66,09±2,54bc	61,57±4,67	59,67±4,09	57,01±4,97	51,80±3,79ab	49,84±6,96ab	46,82±6,29ab
	%2	63,67±1,86bc	59,67±1,62	59,04±0,75	55,41±3,91	50,64±3,02ab	47,14±2,42b	46,58±1,59ab
	%4	62,81±0,77c	58,54±3,19	56,44±2,23	53,56±2,18	48,85±3,05b	45,83±2,66b	44,67±2,44b
Ortalama		66,29±3,37B	62,36±4,08B	59,62±3,45B	57,17±3,97B	53,05±4,67B	50,96±6,13B	49,03±5,49B
<i>p</i>		<i>0,004</i>	<i>ns(0,063)</i>	<i>ns(0,256)</i>	<i>ns(0,212)</i>	<i>0,024</i>	<i>0,015</i>	<i>0,028</i>
Toprak III (Kumlu tın)	%0 (Kontrol)	66,33±1,03a	61,96±2,86a	60,74±2,69a	58,81±3,94a	55,00±9,35	54,79±8,41a	50,46±7,74a
	%0,5	64,38±3,74a	59,23±7,33ab	54,81±6,90ab	52,12±3,53ab	50,81±2,33	48,32±1,97ab	48,10±1,77ab
	%1	60,70±2,35ab	52,93±1,78bc	50,22±2,98ab	49,87±3,00bc	46,13±3,51	42,19±3,09b	41,11±2,46bc
	%2	55,61±0,91bc	49,74±1,32bc	46,55±3,19b	46,60±2,81bc	44,68±3,19	39,40±2,89b	37,65±1,75bc
	%4	51,97±2,92c	47,83±2,89c	44,75±4,76b	43,74±1,84c	43,17±2,94	38,31±2,56b	35,92±4,37c
Ortalama		59,80±5,91C	54,34±6,51C	51,41±7,06C	50,23±5,94C	47,96±6,16C	44,60±7,41C	42,65±6,93C
<i>p</i>		<i>0,001</i>	<i>0,005</i>	<i>0,007</i>	<i>0,001</i>	<i>ns(0,090)</i>	<i>0,005</i>	<i>0,007</i>
Genel ortalama	%0 (Kontrol)	71,98±5,93a	67,62±6,32a	64,81±5,78a	62,44±5,23a	60,35±7,47a	59,34±6,02a	56,59±7,18a
	%0,5	70,03±6,16ab	65,64±6,75a	61,60±7,54ab	59,82±7,29ab	56,65±6,50ab	54,37±6,75ab	53,54±6,70ab
	%1	67,20±6,52b	60,92±7,23b	58,64±7,55bc	57,34±7,31bc	53,51±7,73bc	50,41±8,63bc	48,83±8,56bc
	%2	63,88±7,37c	59,08±7,95b	56,18±7,80c	55,20±7,78c	52,38±7,94bc	47,90±7,95c	46,42±7,64c
	%4	61,07±7,67c	57,45±8,24b	54,42±8,16c	53,15±8,26c	50,59±7,68c	46,71±8,10c	44,87±8,40c
<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>0,299</i>	<i>0,629</i>	<i>0,319</i>	<i>0,352</i>	<i>0,965</i>	<i>0,596</i>	<i>0,697</i>

Farklı harflerle gösterilen değerler istatistiksel olarak birbirinden farklıdır ($p<0.05$); ns: not significant.

Tablo 5. (Devamı)

Topraklar	Uygulama dozları (w/w)	Dispersiyon oranı (%) (agregat büyüklüğü, mm)						Ortalama DO (%)
		10 - 15	15 - 20	20 - 25,4	25,4 - 31,8	31,8 - 38,1	38,1 - 50,8	
Toprak I	%0 (Kontrol)	60,91±1,12a	60,55±0,86a	59,90±2,23a	60,82±1,12a	61,44±3,27a	59,78±3,36a	65,40±2,01a
	%0,5	60,58±1,99a	59,16±0,94ab	54,83±1,57ab	58,08±2,59ab	57,30±1,86ab	56,18±1,99ab	63,16±0,47a
	%1	56,12±2,98ab	54,69±3,07bc	53,26±2,91b	52,34±2,11b	52,20±3,27bc	49,79±3,70b	59,47±1,64b
	%2	52,07±1,59b	51,85±4,89bc	52,47±2,39b	51,66±5,23b	50,31±3,18bc	51,54±3,62ab	57,74±0,79b
	%4	51,41±2,51b	50,71±3,53c	51,51±2,60b	50,44±2,23b	49,36±2,75c	50,17±2,92b	56,31±0,70b
Ortalama		56,22±4,55A	55,39±4,80A	54,40±3,66A	54,67±4,89A	54,12±5,34A	53,49±4,84A	60,41±3,67A
<i>p</i>		<i>0,001</i>	<i>0,010</i>	<i>0,011</i>	<i>0,006</i>	<i>0,002</i>	<i>0,013</i>	<i>0,001</i>
Toprak II	%0 (Kontrol)	51,96±5,99a	44,33±7,12	41,30±5,93	37,76±4,63	38,23±4,46	38,04±4,51	52,77±3,83a
	%0,5	46,64±2,43ab	42,16±2,54	40,14±2,45	36,95±1,30	35,64±1,82	35,43±2,69	49,94±1,30ab
	%1	41,10±2,82b	40,58±2,65	39,22±2,62	36,81±2,23	34,50±1,87	34,45±3,59	47,65±2,00ab
	%2	40,77±4,44b	39,54±2,45	39,04±2,34	36,39±2,86	33,03±2,58	32,26±2,13	46,40±0,98b
	%4	39,60±2,31b	38,45±2,67	38,09±1,52	35,94±1,35	32,55±3,54	32,14±2,02	45,19±0,82b
Ortalama		44,01±5,83B	41,01±3,95B	39,56±3,04B	36,77±2,42B	34,79±3,32B	34,46±3,49B	48,39±3,31B
<i>p</i>		<i>0,014</i>	<i>ns(0,408)</i>	<i>ns(0,763)</i>	<i>ns(0,922)</i>	<i>ns(0,223)</i>	<i>ns(0,219)</i>	<i>0,009</i>
Toprak III	%0 (Kontrol)	46,41±4,99a	41,73±3,29a	39,81±5,35a	36,23±1,97	36,90±1,99a	36,23±4,04	49,65±3,83a
	%0,5	45,87±1,31a	39,36±2,62ab	37,42±2,91ab	34,69±3,30	30,72±1,78b	30,16±2,60	45,85±1,80ab
	%1	38,18±1,42b	33,17±2,31b	32,22±2,57ab	31,14±2,80	29,91±1,93b	29,34±3,67	41,32±0,54bc
	%2	36,73±2,06b	33,03±1,60b	32,13±1,84ab	31,08±1,85	29,78±1,64b	29,04±1,41	39,39±0,60c
	%4	33,50±2,56b	32,84±2,32b	30,81±2,78b	30,67±1,89	28,84±1,29b	28,85±1,66	37,79±0,56c
Ortalama		40,14±5,82C	36,03±4,43C	34,48±4,57C	32,76±3,12C	31,23±3,34C	30,72±3,77C	42,80±4,80C
<i>p</i>		<i>0,001</i>	<i>0,003</i>	<i>0,030</i>	<i>ns(0,107)</i>	<i>0,001</i>	<i>ns(0,063)</i>	<i>0,001</i>
Genel ortalama	%0 (Kontrol)	53,09±7,46a	48,87±9,68a	47,00±10,54a	44,93±12,21a	45,52±12,30a	44,68±11,87a	55,94±7,78a
	%0,5	51,03±7,37a	46,89±9,47ab	44,13±8,37ab	43,24±11,38ab	41,22±12,35b	40,59±12,10ab	52,98±7,92b
	%1	45,13±8,62b	42,81±9,75bc	41,57±9,57b	40,10±9,73bc	38,87±10,41bc	37,86±9,74b	49,48±8,09c
	%2	43,19±7,35b	41,48±8,75c	41,21±9,16b	39,71±9,77bc	37,71±9,81bc	37,61±10,77b	47,84±8,05cd
	%4	41,50±8,17b	40,66±8,30c	40,14±9,32b	39,01±9,00c	36,92±9,75c	37,05±10,13b	46,43±8,10d
<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>0,675</i>	<i>0,808</i>	<i>0,626</i>	<i>0,184</i>	<i>0,302</i>	<i>0,693</i>	<i>0,558</i>



Şekil 4. Biyokömür uygulaması sonrasında DO değerlerindeki oransal değişimler

Organik madde (OM)

Biyokömür uygulamalarının araştırma konusu toprakların organik madde (OM) içeriklerini istatistiksel olarak önemli ($p < 0,05$) ölçüde artırdığı ve uygulama dozu arttıkça OM içeriğinde artışların meydana geldiği belirlenmiştir (Tablo 6). Çalışmada kullanılan

biyokömür %21,16 organik karbon (%36,48 organik madde) içermektedir. Toprak I'in kontrol seviyesindeki OM içeriği %1,17 iken %0,5, 1, 2 ve 4 biyokömür uygulama dozları sonrasında %1,28, %1,49, %1,72 ve %2,03 olarak belirlenmiştir. Kontrol ile kıyaslandığında %0,5 uygulama dozu sonrasında toprağın OM içeriğinde oransal olarak %9,4 oranında, %1 dozunda %21,5, %2 dozunda %47,0 ve %4 uygulama dozu sonrasında da %73,5 oranında artışların meydana geldiği hesaplanmıştır.

Toprak II'in kontrol seviyesindeki OM içeriği %1,26 iken %0,5, 1, 2 ve 4 biyokömür uygulama dozları sonrasında %1,41, %1,54, %1,93 ve %2,52 olarak belirlenmiştir. Kontrol ile kıyaslandığında %0,5 uygulama dozu sonrasında toprağın OM içeriğinde oransal olarak %11,9 oranında, %1 dozunda %22,2, %2 dozunda %53,2 ve %4 uygulama dozu sonrasında da %100,0 oranında artışların meydana geldiği hesaplanmıştır. Toprak III'ün kontrolünde OM içeriği %1,33 iken %0,5, 1, 2 ve 4 uygulama dozları sonrasında %1,49, %1,63, %2,02 ve %2,69 olarak belirlenmiştir. Kontrol ile kıyaslandığında %0,5 uygulama dozu sonrasında toprağın OM içeriğinde oransal olarak %12,0 oranında, %1 dozunda %22,6, %2 dozunda %51,9 ve %4 uygulama dozu sonrasında da %102,3 oranında artışların meydana geldiği hesaplanmıştır.

Genel ortalama, kontrol seviyesinde OM içeriği %1,25 iken %0,5, 1, 2 ve 4 biyokömür uygulamaları sonrasında %1,39, %1,55, %1,89 ve %2,41 olarak ölçülmüş olup oransal olarak %11,2, %24,0, %51,2 ve %92,8 artışların meydana geldiği hesaplanmıştır. Biyokömür ile OM arasındaki korelasyon katsayıları toprak I, II ve III için sırasıyla 0,981**, 0,948** ve 0,943** olarak belirlenirken, BK-OM arasındaki genel korelasyon katsayısı 0,902** olarak belirlenmiştir (Tablo 3).

Biyokömürün karbon (C) içeriğinin üretildiği hammaddeye bağlı olarak %36 ile %94 (Novak et al. 2009; Keiluweit et al. 2010), %0.1 ile %97.4 (Aller 2016; Manolikaki and Diamadopoulos 2020) ve %0,1 ile %77,4 (Enders et al. 2012) gibi geniş aralıklarda değiştiği ve yapılan çalışmalarda biyokömür uygulamalarının toprağın organik karbon içeriğini artırdığı belirtilmektedir (Steiner et al. 2007; Awad et al. 2012; Liu et al. 2012b; Zhang et al. 2012; Biederman and Harpole 2013; Soinne et al. 2014; Agegnehu et al. 2017; Mahmoud et al. 2019). Van Zwieten et al. (2010) yapmış oldukları çalışmalarında biyokömür ilavesiyle toprak organik karbon içeriğinin %18 ile %26 oranlarında ve Amoakwah et al. (2017)'de çalışmalarında toprak organik karbon içeriğinin %28 ile %66 arasında değişen oranlarda artışların olduğunu belirtmektedirler.

Hacim ağırlığı (HA)

Topraklara biyokömür ilavesinin toprakların hacim ağırlıklarını (HA) önemli düzeyde ($p<0,05$) düşürdüğü ve biyokömür uygulama dozu arttıkça hacim ağırlığında düşüşlerin meydana geldiği belirlenmiştir (Tablo 6). Toprak I'in kontrolünde HA değeri $1,13 \text{ g cm}^{-3}$ iken, %0,5, 1, 2 ve 4 biyokömür uygulama dozları sonrasında $1,08 \text{ g cm}^{-3}$, $1,03 \text{ g cm}^{-3}$, $1,00 \text{ g cm}^{-3}$ ve $0,97 \text{ g cm}^{-3}$ olarak belirlenmiştir. Kontrolü ile kıyaslandığında %0,5 uygulama dozu sonrasında toprağın HA değerinde %4,42 oranında, %1, %2 ve %4 uygulama dozu sonrasında %8,85, %11,50 ve %14,16 oranında düşüşlerin meydana geldiği hesaplanmıştır. Toprak II ve III'ün kontrollerinde HA değerleri sırasıyla $1,27 \text{ g cm}^{-3}$ ve $1,34 \text{ g cm}^{-3}$ olarak tespit edilirken, uygulamalar sonrasında en düşük HA değerleri en yüksek uygulama dozu olan %4 uygulama dozunda $1,06 \text{ g cm}^{-3}$ ve $1,13 \text{ g cm}^{-3}$ olarak belirlenmiştir. Toprak II ve III'de %4 biyokömür uygulaması sonrasında HA değerlerinde kontrollerine göre %16,54 ve %15,67 oranlarında düşüşlerin meydana geldiği tespit edilmiştir. Genel ortalama, kontrol seviyesinde HA $1,25 \text{ g cm}^{-3}$ iken %0,5, 1, 2 ve 4 biyokömür uygulamaları sonrasında 1,19, 1,14, 1,08 ve $1,05 \text{ g cm}^{-3}$ olarak belirlenmiş olup oransal olarak %4,80, %8,80, %13,60 ve %16,00 düşüşlerin meydana geldiği hesaplanmıştır. Biyokömür ile HA arasında arasındaki korelasyon katsayıları toprak I, II ve III için sırasıyla -0,929**, -0,972** ve -0,972** olarak belirlenirken, genel korelasyon katsayısı -0,652** olarak belirlenmiştir (Tablo 3). Topraklara uygulanan toprak düzenleyicilerin topraklarda gözenekliliği artırdığı ve buna bağlı olarak HA değerlerini düşürdüğü Shirani et al. (2002); Blanco-Canqui and Lal (2004); Angın (2008); Candemir and Gülser (2011); Aksakal et al. (2016) tarafından yapılan çalışmalarda da ifade edilmektedir.

Topraklara biyokömür uygulamasının tane yoğunluğu ile hacim ağırlığını düşürürken poroziteyi artırdığı yapılan çalışmalarda belirtilmektedir (Major et al. 2010; Githinji 2014; Zhang et al. 2017; Horák et al. 2019). Pranagal et al. (2017) kumlu tınlı toprağa 30 ve 45 ton/ha biyokömür uyguladıkları çalışmalarında, uygulamalar sonrasında hacim ağırlığı değerinin $0,28$ ve $0,53 \text{ g cm}^{-3}$ miktarlarında düştüğünü belirlemişlerdir. Zhang et al. (2021) %2 biyokömür uygulamasıyla kumlu, siltli tın ve killi toprakların hacim ağırlıklarının %28, %13 ve %15 oranlarında azaldığını belirlemişlerdir. Sun et al. (2013) kumlu tınlı toprağa 20 ton/ha biyokömür uygulamasıyla hacim ağırlığının %9.1 azaldığını, porozitenin ise %12 arttığını belirtmektedirler.

Biyokömür uygulamasından sonra toprağın tane yoğunluğu, hacim ağırlığı ve porozitesinde meydana gelen değişimler üç mekanizma ile açıklanmaktadır. Birincisi, biyokömürün tane yoğunluğu ve hacim ağırlığının toprak mineral fraksiyonlarına göre daha düşük olması ve yüksek miktarda makro ve mikro gözenekliliğe sahip olmasından dolayı,

biyokömürün toprağa ilave edilmesi seyreltme etkisi yoluyla toprağın tane yoğunluğu ile hacim ağırlığını düşürmekte ve poroziteyi artırmaktadır. İkinci olarak, biyokömür uygulaması ile organik C konsantrasyonunun artması, biyolojik aktiviteyi ve toprak agregasyonunu teşvik eder ve makro gözenekliliği artırır, böylece toprak hacim ağırlığını azaltır, poroziteyi artırır (Hardie et al. 2014; Blanco-Canqui 2017; Dokht et al. 2017; Yang and Lu 2021). Üçüncü olarak, biyokömürün yüksek iyon değişim kapasitesi ve yüksek spesifik yüzey alanı organik maddenin kil fraksiyonu ile bağlanmasını destekleyebilir ve dolayısıyla topraktaki gözenek miktarını ve gözenek büyüklük dağılımını değiştirir (Horák et al. 2019).

Tablo 6. Toprakların Organik Madde İçeriği, Hacim Ağırlığı, Hidrolik İletkenlik, Hava Geçirgenliği ve Penetrasyon Direnci Değerleri Üzerine Biyokömürün Etkileri

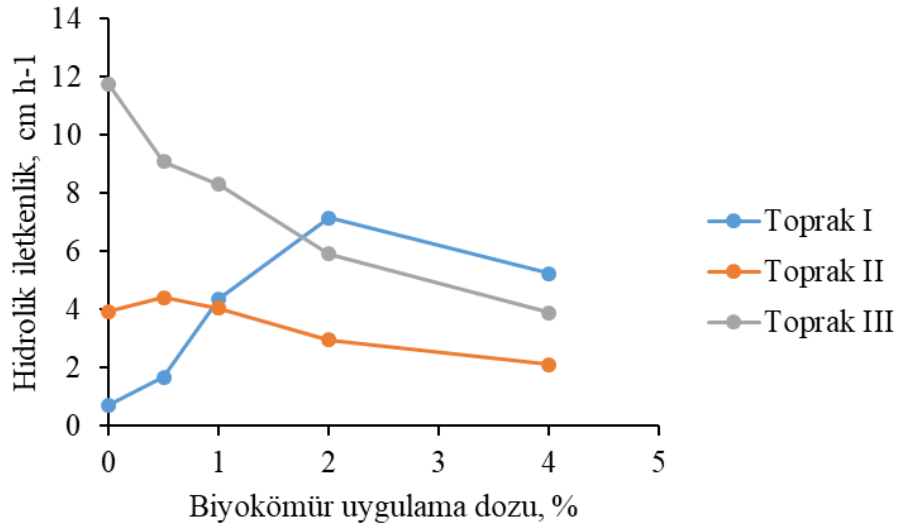
Topraklar	Uygulama dozları w/w)	Organik madde (%)	Hacim ağırlığı (g cm ⁻³)	Hidrolik iletkenlik (cm h ⁻¹)	Hava geçirgenliği (μ ²)	Penetrasyon direnci (kg cm ⁻²)
Toprak I	%0 (Kontrol)	1,17±0,06d	1,13±0,04a	0,72±0,19c	28,76±3,41c	4,14±0,70a
	%0,5	1,28±0,02d	1,08±0,03ab	1,68±0,34bc	43,18±5,07c	3,39±0,21ab
	%1	1,49±0,05c	1,03±0,02bc	4,38±1,21ab	66,62±9,57b	3,12±0,19b
	%2	1,72±0,03b	1,00±0,02c	7,15±1,88a	69,19±11,34ab	1,94±0,30c
	%4	2,03±0,06a	0,97±0,02c	5,24±1,62a	89,53±8,85a	0,94±0,12d
	Ortalama	1,54±0,32C	1,04±0,06C	3,83±2,65B	59,45±23,06B	59,45±23,06B
	<i>p</i>	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Toprak II	%0 (Kontrol)	1,26±0,04e	1,27±0,02a	3,93±1,17a	61,16±12,63ab	1,50±0,16a
	%0,5	1,41±0,03d	1,23±0,02a	4,41±0,64a	82,03±10,82a	1,04±0,22b
	%1	1,54±0,03c	1,17±0,02b	4,05±0,28a	69,78±4,70ab	0,71±0,02c
	%2	1,93±0,03b	1,09±0,01c	2,95±0,37ab	55,53±3,19b	0,54±0,03cd
	%4	2,52±0,06a	1,06±0,02c	2,10±0,35b	52,47±2,83b	0,33±0,04d
	Ortalama	1,73±0,47B	1,16±0,08B	3,49±1,03B	64,19±12,95B	64,19±12,95B
	<i>p</i>	0,001	0,001	0,008	0,007	0,007
Toprak III	%0 (Kontrol)	1,33±0,02e	1,34±0,01a	11,73±2,38a	113,16±7,17a	1,61±0,12a
	%0,5	1,49±0,03d	1,28±0,02b	9,09±1,75ab	107,20±6,70ab	1,32±0,10b
	%1	1,63±0,04c	1,22±0,02c	8,30±0,94ab	91,31±7,61bc	1,04±0,11c
	%2	2,02±0,06b	1,17±0,02cd	5,92±0,87bc	82,40±5,74cd	0,84±0,06cd
	%4	2,69±0,03a	1,13±0,02d	3,89±0,65c	69,65±1,53d	0,70±0,09d
	Ortalama	1,83±0,50A	1,23±0,08A	7,79±3,05A	92,75±17,28A	92,75±17,28A
	<i>p</i>	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Genel ortalama	%0 (Kontrol)	1,25±0,08e	1,25±0,10a	5,46±5,08a	67,69±37,62c	2,42±1,34a
	%0,5	1,39±0,10d	1,19±0,09b	5,06±3,38ab	77,47±28,76a	1,92±1,12b
	%1	1,55±0,07c	1,14±0,09c	5,58±2,19a	75,90±13,35ab	1,62±1,13b
	%2	1,89±0,14b	1,08±0,08d	5,34±2,15ab	69,04±13,36bc	1,11±0,66c
	%4	2,41±0,30a	1,05±0,07e	3,74±1,63b	70,55±16,73bc	0,66±0,28d
	Toprak (p)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	Biyokömür doz (p)	0,001	0,001	0,015	0,035	0,035
	Toprak × Biyokömür doz (p)	0,001	0,167	0,001	0,001	0,001

Farklı harflerle gösterilen değerler istatistiksel olarak birbirinden farklıdır (p<0,05).

Hidrolik iletkenlik (Hİ)

Araştırma konusu toprakların hidrolik iletkenlik (Hİ) değerleri üzerine biyokömür uygulamalarının etkileri toprakların tekstürlerine göre farklılıklar ve değişkenlikler göstermektedir (Tablo 6; Şekil 5).

Kil tekstür sınıfındaki toprak I'in Hİ değerleri %0,5, %1 ve %2 biyokömür uygulama dozları ile artış göstermiş ve en yüksek Hİ değeri ($7,15 \text{ cm h}^{-1}$) %2 uygulama dozunda elde edilmiştir. Ancak, %4 uygulama dozu sonrasında toprağın Hİ değerinde azalış meydana geldiği belirlenmiştir. En yüksek uygulama dozu olan %4'de Hİ değeri azalış göstermiş olsa bile kontrol toprağı Hİ değerinden önemli derecede yüksek olduğu belirlenmiştir. Toprak I'in kontrol seviyesinde Hİ $0,72 \text{ cm h}^{-1}$ iken %0,5, %1, %2 ve %4 biyokömür uygulama dozları sonrasında $1,68$, $4,38$, $7,15$ ve $5,24 \text{ cm h}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Kontrolü ile kıyaslandığında %0,5, %1, %2 ve %4 uygulama dozları sonrasında toprağın Hİ değerinde %133,33, %508,33, %893,10 ve %627,78 oranlarında artışların meydana geldiği hesaplanmıştır. Tın tekstür sınıfındaki toprak II'de en yüksek Hİ değeri en düşük uygulama dozu olan %0,5 dozunda elde edilmiş ve bu dozdan sonra uygulama dozu arttıkça Hİ değerlerinde azalışların meydana geldiği belirlenmiştir. Toprak II'nin kontrol düzeyinde Hİ değeri $3,93 \text{ cm h}^{-1}$ iken, %0,5 uygulama dozunda $4,41 \text{ cm h}^{-1}$, %1 dozunda $4,05 \text{ cm h}^{-1}$, %2 dozunda $2,95 \text{ cm h}^{-1}$ ve %4 dozunda $2,10 \text{ cm h}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Kontrol ile karşılaştırıldığında %0,5 ve %1 dozlarında elde edilen Hİ değerlerinin kontrolden %12,21 ve %3,05 daha yüksek, %2 ve %4 uygulama dozlarında belirlenen Hİ değerlerinin kontrolden %24,94 ve %46,56 daha düşük olduğu belirlenmiştir. Kumlu tın tekstür sınıfındaki toprak III'e biyokömür uygulamaları Hİ değerlerinde önemli düzeyde ($p < 0,05$) azalışlara neden olmuştur. En yüksek Hİ değeri kontrol seviyesinde $11,73 \text{ cm h}^{-1}$ olarak belirlenirken, biyokömür uygulamasıyla ve uygulanan doz arttıkça Hİ değerlerinde sürekli olarak düşüşlerin meydana geldiği tespit edilmiştir. Toprak III'ün Hİ değerleri %0,5, %1, %2 ve %4 uygulama dozlarında $9,09$, $8,30$, $5,92$ ve $3,89 \text{ cm h}^{-1}$ olarak belirlenmiş olup, kontrolden %22,51, %29,24, %49,53 ve %66,84 oranlarında daha düşüktür. Biyokömür-Hİ arasındaki korelasyon katsayıları toprak I, II ve III için sırasıyla $0,801^{**}$, $-0,726^{**}$ ve $-0,905^{**}$ olarak belirlenmiştir. Biyokömür uygulaması sonrasında toprakların tekstürlerine bağlı olarak Hİ değerlerindeki artış ve azalışların temel nedeni, biyokömürün toprak gözenek karakterlerine yapmış olduğu etkilerden kaynaklanmaktadır.



Şekil 5. Biyokömür uygulaması ile topraklarının Hİ değerleri arasındaki ilişkiler

Kum içeriği yüksek olan kaba tekstürlü topraklar, kil içeriği yüksek olan ince tekstürlü topraklardan daha düşük spesifik yüzeye, mezo ve mikrogözenek hacmine sahiptir. Biyokömür ilavesi kaba tekstürlü toprakların spesifik yüzeyi ile toplam mezo ve mikrogözenek hacminde ince tekstürlü topraklardan daha büyük nispi artışa yol açmaktadır (Awe et al. 2021; Yang and Lu 2021; Zhang et al. 2021;). Ayrıca, küçük çaplı ince biyokömür partikülleri makro gözenekleri tıkayarak makro gözenek hacminin azalmasına ve mikro ile mezogözenek hacimlerinin artmasına neden olur (Ajayi and Horn 2016; Awe et al. 2021). Çalışmalar, biyokömürün topraktaki makro gözeneklerin oranını azaltabileceğini (Petersen et al. 2016) ve mezo gözeneklerin oranını artırabileceğini göstermektedir (Lu et al. 2014; Pranagal et al. 2017). Petersen et al. (2016), biyokömürün drenajı sağlayan makro gözenekleri (60–300 μm) su tutan mezo gözeneklere (0,2–60 μm) dönüştürdüğünü belirlemişlerdir. Biyokömürün, toprak gözenek büyüklük dağılımında meydana getirdiği değişimler, (1) biyokömürün partikül içi gözenekliliği ve yüksek spesifik yüzeyinden kaynaklanan doğrudan etki ve (2) biyokömür partikülleri arasında ve biyokömür partikülleri ile toprak fraksiyonları arasında oluşan gözenekler ile biyokömür-toprak etkileşiminden kaynaklanan agregasyondaki ve strüktürdeki değişimlerden kaynaklanan dolaylı etki ile açıklanmaktadır (Blanco-Canqui 2017; Yang and Lu 2021; Zhang et al. 2021).

Biyokömürün toprakta poroziteyi ve gözenek büyüklük dağılımını değiştirmesinden etkilenen en önemli özellikler geçirgenlik özellikleri olup, biyokömürün hidrolik iletkenlik ve hava geçirgenliği üzerine etkileri net değildir. Bazı çalışmalar biyokömür uygulamasının hidrolik iletkenlik ve hava geçirgenliğinde artışlar meydana getirdiğini bildirirken, bazıları ise düşüslere neden olduğunu bildirmektedirler.

Jien and Wang (2013), siltli kil tekstür sınıfındaki toprağa 2 mm'den elenmiş biyokömürden ağırlık esasına göre %2,5 ve %5 oranlarında uygulamalarından sonra hidrolik iletkenliği 1,8 kat arttığını, Herath et al. (2013) siltli tın tekstür sınıfındaki toprağa biyokömür uygulaması sonrasında hidrolik iletkenliğin %32, %50 ve %139 arttığını, Ajayi and Horn (2016) 20, 50 ve 100 g/kg biyokömür uygulamasının siltli killi tın tekstür sınıfındaki toprağın hidrolik iletkenliğini %25, %61 ve %77 artırdığını, Oguntunde et al. (2008) hidrolik iletkenliğin 6,1 cm h⁻¹'den 11,4 cm h⁻¹'e yükseldiğini ve oransal olarak %88 arttığını, Barnes et al. (2014) %10 biyokömür ilavesinin hidrolik iletkenliği killi toprakta %328 oranında artırdığını, Xiaoqin et al. (2021) siltli tın tekstür sınıfındaki toprağa %2 ve %5 biyokömür uygulamasıyla hidrolik iletkenliğin önemli düzeyde arttığını ve bunda gözenekler arası bağlantılarının iyileşmesinin etkili olduğunu ifade etmektedirler. Sun et al. (2013) biyokömür uygulamasının makrogözenek miktarını ve makrogözenek/porozite oranını arttığını, ayrıca, farklı matrik potansiyellerinde (pF 2,0, 2,5, 2,7 ve 3,0) yaptıkları hava geçirgenliği değerlerinin kontrolden %69 ile %223 arasında değişen oranlarda daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir.

Devereux et al. (2012) kumlu tınlı toprağa %5 biyokömür uygulaması sonrasında ortalama gözenek boyutunun 0,070 mm²'den 0,046 mm²'ye düştüğünü ve ortalama hidrolik iletkenliğin 4,8×10⁻³ cm s⁻¹'den 2,3×10⁻³ cm s⁻¹'e düşerek %52 oranında azalmanın, Ibrahim et al. (2013) kumlu tınlı toprağa 5, 10, 15 ve 20 g/kg biyokömür uygulaması sonrasında hidrolik iletkenlikte %1,1, %7,8, %11,1 ve %15 oranlarında ve infiltrasyon oranında da 10, 15 ve 20 g/kg biyokömür uygulaması sonrasında %12,1, %12,1 ve %27,6 azalışların, Mendoza and Horn (2018) kumlu tınlı toprağa %2,5 ve %5 biyokömür uygulamasının hidrolik iletkenliği önemli düzeyde düşürdüğünü, Barnes et al. (2014) %10 biyokömür ilavesinin hidrolik iletkenliği kumda %92 oranında azalttığını belirlemişlerdir. Kumari et al. (2014) kumlu tınlı tekstüre sahip araziye 20 ton/ha biyokömür uygulamasından sonra hava geçirgenliğin düştüğünü ifade etmektedirler.

Genel olarak, yapılan çalışmalarda biyokömür ilavesinin kaba (kumlu, kumlu tınlı, tınlı kumlu) bünyeli toprakların hidrolik iletkenliğini azalttığı (Brockhoff et al. 2010; Uzoma et al. 2011; Githinji 2014; Castellini et al. 2015; Gamage et al. 2016; Lim et al. 2016), ince bünyeli (siltli tın, siltli kil, killi tın, kil) toprakların hidrolik iletkenliğini artırdığı (Asai et al. 2009; Kameyama et al. 2012; Jien and Wang 2013; Ouyang et al. 2013; Xiao et al. 2016) belirtilmektedir. İncelenen araştırmalarda hidrolik iletkenlikteki artış oranlarının %25 ile %328 arasında, azalma oranlarının ise %7 ile %91 arasında değişmekte olduğu belirtilmektedir (Blanco-Canqui 2017).

Biyokömür uygulaması sonrasında kaba tekstürlü toprakların infiltrasyonu ve hidrolik iletkenliğindeki düşüşler, toprak makro gözeneklerinin ince biyokömür partikülleri tarafından doldurulması, tıkanması, daha dar gözenekler ile darboğazların oluşması ve kıvrımlılığın artmasına atfedilmektedir. Küçük partiküller gözenek boşluğunu tıkamakta ve biyokömür partikülleri toprak inorganik fraksiyonları ile etkileşime girerek su akış hızını doğrudan etkileyen toprağın gözenekli ortamını değiştirebilmektedir. Ayrıca, bazı kararsız biyokömür partikülleri hızla parçalanabilir, çimentolanabilir ve toprak gözeneklerini tıkayarak toprak içindeki su akışını azaltabilir. Özellikle, levha benzeri biyokömür partikülleri, büyük ve küresel parçacıklardan ziyade toprak mikro gözeneklerini kolayca tıkayabilir (Githinji 2014; Novak et al. 2016; Mendoza and Horn 2018). Biyokömür ayrıca kum fraksiyonlarının bağlanmasını artırarak, toprak kohezyonunu artırarak, matrik potansiyeli artırarak ve suyu adsorbe ederek kumlu topraklarda su akışını azaltabilir. Düşük biyokömür uygulama oranlarının kumlu topraklarda su akışını azalttığı, ancak yüksek kil içeriğine sahip topraklarda doymuş hidrolik iletkenliği artırdığı belirlenmiştir (Blanco-Canqui 2017).

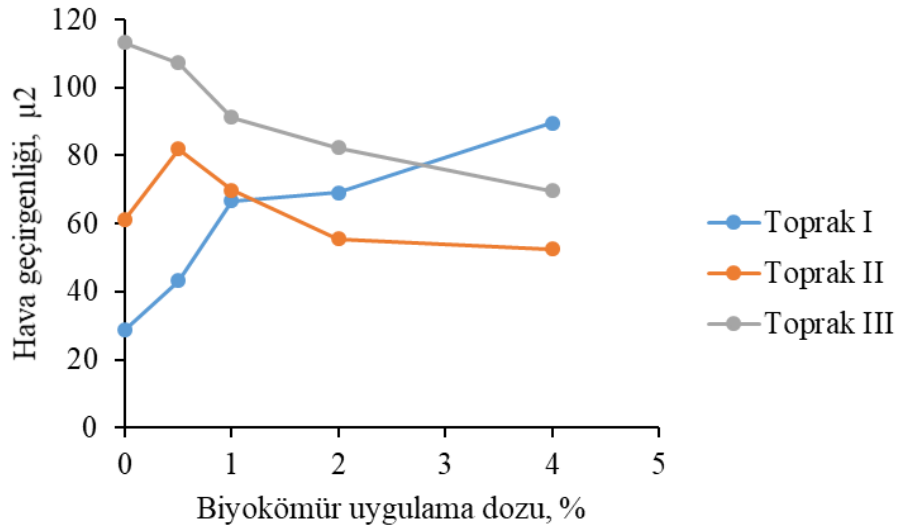
İnce tekstürlü topraklarda, biyokömür toprak agregasyonunu iyileştirerek ve böylece makro gözenekliliği ve makro gözenekliliğin toplam poroziteye oranını önemli ölçüde artırarak infiltrasyonu ve hidrolik iletkenliği artırdığı belirlenmiştir. Özellikle, kil fraksiyonlarından daha büyük partiküllere sahip biyokömürün eklenmesi, gözenek büyüklük dağılımında heterojenlik ve daha geniş gözenek büyüklük dağılımı oluşturabileceği, agregasyonu ve makro gözenek oluşumunu artırarak toprakta hidrolik iletkenliği artırdığı belirtilmektedir (Herath et al. 2013; Kumari et al. 2014; Xiao et al. 2016; Zhang et al. 2021). Ayrıca, Zhou et al. (2018) killi topraklara biyokömür ilavesinin kıvrımlılığını %20-30 oranında azalttığını ve hidrolik iletkenliğin artışında önemli bir faktör olduğunu ifade etmektedirler.

Hava geçirgenliği (HG)

Araştırma konusu toprakların hava geçirgenliği (HG) değerleri üzerine biyokömür uygulamalarının etkileri hidrolik iletkenlikte olduğu gibi toprakların tekstürlerine göre farklılıklar ve değişkenlikler gösterdiği belirlenmiştir (Tablo 6; Şekil 6).

Toprak I'ın HG değerleri biyokömür uygulama dozlarının artışı ile artış göstermiş ve en yüksek HG değeri en yüksek uygulama dozunda (%4) elde edilmiştir. Toprak I'ın kontrol seviyesinde HG 28,76 μ^2 iken %0,5, %1, %2 ve %4 biyokömür uygulama dozları sonrasında 43,18, 66,62, 69,19 ve 89,53 μ^2 'ye yükseldiği belirlenmiştir. Kontrolü ile kıyaslandığında %0,5, %1, %2 ve %4 uygulama dozları sonrasında toprağın HG değerlerinde %50,14, %131,64, %140,58 ve %211,30 oranlarında artışların meydana geldiği hesaplanmıştır. Biyokömürün %0,5 dozunda ölçülen HG değerinin kontrol HG değerinden %50,14 oranında

daha yüksek olmasına rağmen istatistiksel olarak farklılığın olmadığı belirlenirken, %1, %2 ve %4 uygulama dozları HG değerlerinin kontrol değerinden istatistiki olarak önemli düzeyde ($p<0,05$) yüksek olduğu belirlenmiştir. Toprak II’de en yüksek HG değeri ($82,03 \mu^2$) en düşük uygulama dozu olan %0,5 dozunda elde edilmiş ve bu dozdan sonra uygulama dozu arttıkça HG değerlerinde azalışların meydana geldiği belirlenmiş olup en düşük HG değeri ($52,47 \mu^2$) en yüksek uygulama dozunda belirlenmiştir. Kontrol düzeyinde HG değeri $61,16 \mu^2$ ölçülürken, %0,5 uygulama dozunda $82,03 \mu^2$, %1 dozunda $69,78 \mu^2$, %2 dozunda $55,53 \mu^2$ ve %4 dozunda $52,47 \mu^2$ olarak belirlenmiştir. Kontrol ile karşılaştırıldığında %0,5 ve %1 dozlarında elde edilen HG değerlerinin kontrolden %34,12 ve %14,09 daha yüksek, %2 ve %4 uygulama dozlarında belirlenen HG değerlerinin kontrolden %9,21 ve %14,21 daha düşük olduğu belirlenmiştir. Toprak III’e biyokömür uygulamaları HG değerlerinde önemli düzeyde ($p<0,05$) azalışlara neden olmuştur. En yüksek HG değeri kontrol seviyesinde $113,16 \mu^2$ olarak belirlenirken, biyokömür uygulamasıyla ve uygulanan doz arttıkça HG değerlerinde düşüşlerin meydana geldiği tespit edilmiştir. Toprak III’ün HG değerleri %0,5, %1, %2 ve %4 uygulama dozlarında $107,20$, $91,31$, $82,40$ ve $69,65 \mu^2$ olarak belirlenmiş olup, kontrolden %5,27, %19,31, %27,58 ve %38,45 oranlarında daha düşüktür. Biyokömür-HG arasındaki korelasyon katsayıları toprak I, II ve III için sırasıyla $0,937^{**}$, $-0,496$ ve $-0,947^{**}$ olarak belirlenmiştir (Tablo 3).



Şekil 6. Biyokömür uygulaması ile topraklarının HG değerleri arasındaki ilişkiler

Toprak hava geçirgenliği genel olarak agregat içi ve agregatlar arası makro gözenekler ve gözeneklerin sürekliliği tarafından kontrol edilmektedir (Sun et al. 2013; Ajayi and Horn 2016). Toprakların hava iletim özellikleri ve hava geçirgenliği, fraksiyon büyüklük dağılımı ve hacim ağırlığının yanı sıra, toplam gözeneklilik ve hava ile dolu gözenek boşluğu,

gözeneklerin birbirleriyle bağlantısı ve kıvrımlılık gibi gözenek yapısı parametrelerinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Ayrıca, toprak su içeriği hava dolu gözeneklerin azalmasına ek olarak, gözenekler arasındaki darboğazlarda gaz akış yollarının su ile tıkanması yoluyla gaz taşıma ve iletim parametrelerini önemli ölçüde etkiler (Hamamoto et al. 2009). İnce tekstürlü topraklara biyokömür uygulaması makro gözeneklilik ile hava dolu gözenek miktarını artırmasının yanı sıra gözenek kıvrımlılığını azalttığından dolayı hava geçirgenliğini artırdığı belirlenmiştir (Sun et al. 2013; Ajayi and Horn 2016). Kaba tekstürlü topraklara uygulanan biyokömür mikro ve mezo gözeneklilik ile su tutma potansiyelini artırması, gözenekler arası hava bağlantılarını zayıflatması ve kıvrımlılığı artırmasından dolayı hava geçirgenliğini düşürdüğü belirlenmiştir (Kumari et al. 2014; Mendoza and Horn 2018).

Penetrasyon direnci (PD)

Biyokömür uygulamalarının toprakların penetrasyon direnci (PD) değerlerini istatistiksel olarak önemli ($p < 0,05$) düzeyde düşürdüğü ve biyokömür uygulama dozu arttıkça PD’inde daha fazla düşüşlerin meydana geldiği belirlenmiştir (Tablo 6).

Kil tekstür sınıfında olan toprak I’in kontrolündeki PD değeri $4,14 \text{ kg cm}^{-2}$ iken, %0,5 %1, %2 ve %4 biyokömür uygulama dozları sonrasında 3,39, 3,12, 1,94 ve $0,94 \text{ kg cm}^{-2}$ olarak ölçülmüş olup en düşük değer %4 uygulama dozunda belirlenmiştir. Kontrolü ile kıyaslandığında %4 uygulama dozu sonrasında toprağın PD değerinde %77,29 oranında düşüşün meydana geldiği hesaplanmıştır. Toprak II’in kontrolündeki PD değeri $1,50 \text{ kg cm}^{-2}$ iken, %0,5 %1, %2 ve %4 biyokömür uygulama dozları sonrasında 1,04, 0,71, 0,54 ve $0,33 \text{ kg cm}^{-2}$ olarak belirlenmiş olup en düşük değer %4 uygulama dozunda ölçülmüştür. Kontrolü ile kıyaslandığında %4 uygulama dozu sonrasında toprağın PD değerinde %78,00 oranında düşüşün meydana geldiği hesaplanmıştır. Toprak III’ün kontrol seviyesinde PD değeri $1,61 \text{ kg cm}^{-2}$ ölçülürken uygulama dozu arttıkça PD’inde düşüşlerin meydana geldiği belirlenmiş olup en düşük PD değeri %4 biyokömür uygulama dozunda $0,70 \text{ kg cm}^{-2}$ ölçülmüştür. Kontrolü ile kıyaslandığında %4 uygulama dozu sonrasında toprağın PD değerinde %56,52 oranında düşüşün meydana geldiği hesaplanmıştır. Genel ortalamada, kontrol seviyesinde PD değeri $2,42 \text{ kg cm}^{-2}$ iken, %0,5 %1, %2 ve %4 biyokömür uygulamaları sonrasında 1,92, 1,62, 1,11 ve $0,66 \text{ kg cm}^{-2}$ olarak ölçülmüştür. Kontrol ile kıyaslandığında %0,5 biyokömür uygulamasının PD değerini %20,66 oranında düşürdüğü, %1, %2 ve %4 oranında biyokömür uygulamalarının ise %33,06, %54,13 ve %72,72 oranlarında düşürdüğü hesaplanmıştır. Biyokömür ile PD arasında arasındaki korelasyon katsayıları Toprak I, II ve III için sırasıyla -0,948**, -0,952** ve -0,963** olarak belirlenirken, biyokömür-PD arasındaki genel korelasyon katsayısı -0,550 olarak belirlenmiştir. Penetrasyon direncini etkileyen en nemli

toprak özelliklerinden birinin toprakların HA değerlerinin olduğu Zhang (1994); Bandyopadhyay et al. (2010); Aksakal et al. (2016) tarafından yapılan araştırmalarda belirtilmekte olup, HA ile PD arasında pozitif korelasyonun olduğu ve düşük HA değerlerinde düşük PD, yüksek HA değerlerinde yüksek PD'nin ölçüleceği ifade edilmektedir. Ayrıca, PD ile AS arasında da negatif ilişkilerin olduğuda belirtilmektedir. Bu araştırmada da PD ile HA ve PD ile AS arasında benzer ilişkiler tespit edilmiş olup; Toprak I'de PD-HA ve PD-AS arasındaki korelasyon katsayıları sırasıyla 0,864**, -0,928** olarak belirlenmiştir. Toprak II'de söz konusu katsayılar 0,914**, -0,937**, Toprak III'de 0,983**, -0,934** olarak belirlenmiştir (Tablo 3).

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Biyokömür uygulamasının farklı tekstürdeki toprakların bazı fiziksel ve strüktürel özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bu yüksek lisans tez çalışmasında; biyokömür uygulaması kil ve silt içeriği yüksek olan kil ve tın tekstür sınıfındaki topraklarda kesek olarak nitelendirilebilecek kadar büyük çaplı agregat oluşumunu kontrollerine göre azaltmıştır. Söz konusu topraklarda büyük çaplı agregat miktarlarının azalmasına bağlı olarak bu toprakların ortalama ağırlıklı çap değerleri de düşmüştür. Kum içeriği yüksek, kil içeriği düşük olan kumlu tın tekstür sınıfındaki toprakta ise biyokömür ilavesi söz konusu toprakta kontrol toprağına göre büyük çaplı agregat oluşumunu artırmıştır. Söz konusu toprakta büyük çaplı agregat miktarının artması ortalama ağırlıklı çap değerini artırmıştır. Kil ve tın tekstür sınıfındaki topraklara biyokömür uygulama dozu arttıkça ortalama ağırlıklı çap değerleri düşerken, kum tekstür sınıfındaki toprağın ortalama ağırlıklı çap değeri uygulama dozu artışı ile artmıştır.

Araştırma topraklarına biyokömür ilavesi topraklarının tüm agregat büyüklüklerinde agregat stabilitesi değerlerini önemli düzeyde artırmıştır. Agregat stabilitesi üzerine biyokömürün etkinliğinin genel olarak doz arttıkça artış gösterdiği belirlenmiştir. Biyokömür uygulamaları sonrasında AS'nin ortalama değerleri değerlendirildiğinde oransal olarak en fazla artışların kumlu tınlı toprakta, daha sonra tınlı ve en az artışların kil tekstür sınıfındaki toprakta meydana geldiği belirlenmiştir. Araştırma toprakların farklı büyüklüklerdeki agregatlarında en yüksek dispersiyon oranı değerleri biyokömür uygulanmamış kontrol topraklarında belirlenirken, biyokömür uygulamaları ile dispersiyon oranı değerlerinde genellikle önemli düzeyde düşüşler meydana geldiği belirlenmiştir. Biyokömür uygulamaları sonrasında DO'nın ortalama değerleri değerlendirildiğinde oransal olarak en fazla düşüşlerinsırasıyla kumlu tın, tın ve kil tekstür sınıfındaki toprakta meydana geldiği belirlenmiştir.

Biyokömür uygulamaları araştırma konusu toprakların organik madde içeriklerini (organik karbon) önemli düzeyde artırırken, hacim ağırlıklarını ve penetrasyon direnci değerlerini önemli ölçüde düşürmüştür. Kil tekstür sınıfındaki toprağın hidrolik iletkenlik ve hava geçirgenliği değerleri biyokömür uygulamaları ile önemli düzeyde artarken, kumlu tınlı tekstürdeki toprağın değerlerinde önemli düzeyde düşüşler meydana gelmiştir. Tın tekstür sınıfındaki toprağına %0,5 ve %1 biyokömür uygulamalarının hidrolik iletkenlik ve hava

geçirgenliđi deđerlerini artırdıđı ve elde edilen deđerlerin kontrolden daha yüksek olduđu belirlenirken, %2 ve %4 uygulama dozlarının hidroluk iletkenlik ve hava geçirgenliđi deđerlerini dűşürdüđu ve deđerlerin kontrolden daha dűşük olduđu belirlenmiřtir.

Toprakta agregasyon özelliklerinin ve fiziksel özelliklerin iyileşmesi, toprakların mekaniksel kuvvetlere ve erozyona karşı direncini artırmasının yanısıra bitkiler için daha iyi bir üretken ortam sağlamaktadır. Biyokömür uygulaması topraklarda agregasyonu ve agregat stabilitesini geliştirmiş, özellikle kesekleşmeyi, penetrasyon direncini ve hacim ağırlığını dűşürmüřtür. Topraklara biyokömür ilavesi ile hacim ağırlığının dűřmesi ve porozitenin artması toplam gözenek miktarının arttığının iyi bir göstergesi olup; toprakta hava ile su hareketini ve bitki kök gelişimini olumlu yönde etkileyecektir. Sonuç olarak; biyokömür toprak fiziksel kalite parametreleri ile üretkenlik özelliklerinin iyileştirilmesi ve toprakların mekaniksel kuvvetler ile erozyona karşı daha dirençli hale getirilmesi amacıyla toprak düzenleyici olarak kullanılabilir.

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.
- Adar, E., Karatop, B., İnce, M. and Bilgili, M.S., 2016. Comparison of methods for sustainable energy management with sewage sludge in Turkey based on SWOT-FAHP analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 429-440.
- Agegehu, G., Srivastava, A.K. and Bird, M.I., 2017. The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: a review. *Applied Soil Ecology*, 119, 156-170.
- Ajayi, A.E. and Horn, R., 2016. Modification of chemical and hydrophysical properties of two texturally differentiated soils due to varying magnitudes of added biochar. *Soil and Tillage Research*, 164, 34-44.
- Ajayi, A.E. and Horn, R., 2017. Biochar-induced changes in soil resilience: effects of soil texture and biochar dosage. *Pedosphere*, 27 (2), 236-247.
- Akgül, M., 1992. Daphan Ovası Topraklarının Sınıflandırılması ve Haritalanması. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Erzurum.
- Akgül, M., 1994. Daphan ovası topraklarının temel toprak etütleri I. Bazı fiziksel ve kimyasal özellikler. Atatürk Üni. Ziraat Fak. Dergisi, 2, 223-236.
- Aksakal, E.L., Sari, S. and Angin, I., 2016. Effects of vermicompost application on soil aggregation and certain physical properties. *Land Degradation and Development*, 27, 983-995.
- Aller, M.F., 2016. Biochar properties: transport, fate, and impact. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 46 (14-15), 1183-1296.
- Amoakwah, E., Frimpong, K.A. and Arthur, E., 2017. Corn cob biochar improves aggregate characteristics of a tropical sandy loam. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 81, 1054-1063.
- Angin, İ., 2008. Arıtma Çamurlarının Fiziksel ve Kimyasal Toprak Düzenleyicisi Olarak Kullanımı. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarımsal Yapılar ve Sulama Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Erzurum.
- Anonim, 2020. T.C. Başbakanlık Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, Erzurum Bölge Müdürlüğü Raporları.
- Asai, H., Samson, B.K., Stephan, H.M., Songyikhangsuthor, K., Homma, K., Kiyono, Y., Inoue, Y., Shiraiwa, T. and Horie, T., 2009. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. *Field Crop Research*, 111 (1-2), 81-84.
- Atalay, İ., 1978. Erzurum Ovası ve Çevresinin Jeolojisi ve Jeomorfolojisi. Atatürk Üni. Yayınları No: 91, Erzurum.
- Awad, Y.M., Blagodatskaya, E., Ok, Y.S. and Kuzyakov, Y., 2012. Effects of polyacrylamide, biopolymer, and biochar on decomposition of soil organic matter and plant residues as determined by ¹⁴C and enzyme activities. *European Journal of Soil Biology*, 48, 1-10.
- 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.
- 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. *Nature Scientific Reports*, 10, 7891.

- 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.
- Ball, B.C. and Schjonning, P., 2002. Air Permeability. In *Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods*, Dane JH, Topp GC (eds). SSSA Inc., Madison, WI; 1141-1158.
- Bandyopadhyay K.K., Misra A.K., Ghosh P.K. and Hati K.M., 2010. Effect of integrated use of farmyard manure and chemical fertilizers on soil physical properties and productivity of soybean. *Soil and Tillage Research*, 110, 115-125.
- Barnes, R.T., Gallagher, M.E., Masiello, C.a., Liu, Z. and Dugan, B., 2014. Biochar-Induced changes in soil hydraulic conductivity and dissolved nutrient fluxes constrained by laboratory experiments. *PlosOne*, 9(9), e108340.
- Biederman, L.A. and Harpole, W.S., 2013. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis. *GCB Bioenergy*, 5, 202-214.
- Blake, G.R., and Hartge, K.H., 1986a. Particle Density. *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2nd Edition. Agronomy No: 9. 377-382, 1188 p, Madison, Wisconsin USA.
- Blake, G.R., and Hartge, K.H., 1986b. Bulk Density. *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. 2nd Edition. Agronomy No: 9. 363-375, 1188 p, Madison, Wisconsin USA.
- Blanco-Canqui H and Lal R. 2004. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 23(6), 481-504.
- Blanco-Canqui, H. and Lal, R., 2009. Extent of soil water repellency under long-term no-till soils. *Geoderma*, 149 (1-2), 171-180.
- Blanco-Canqui, H., 2017. Biochar and soil physical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 81, 687-711.
- Blanco-Canqui, H., Lal, R. and Shipitalo, M.J., 2007. Aggregate disintegration and wettability for long-term management systems in the Northern Appalachians. *Soil Science Society of America Journal*, 71 (3), 759-765.
- Brewer, C.E., Schmidt-Rohr, K., Satrio, J.A. and Brown, R.C., 2009. Characterization of biochar from fast pyrolysis and gasification systems. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 28, 386-396.
- Briggs, C., Breiner, J.M. and Graham, R.C., 2012. Physical and chemical properties of pinus ponderosa charcoal: implications for soil modification. *Soil Science*, 177 (4), 263-268.
- Brockhoff, S.R., Christians, N.E., Killorn, R.J., Horton, R. and Davis, D.D., 2010. Physical and mineral-nutrition properties of sand-based turfgrass root zones amended with biochar. *Agronomy Journal*, 102 (6), 1627-1631.
- 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.
- Busscher, W., Novak, J. and Ahmedna, M., 2003. Biochar addition to a southeastern USA coastal sand to decrease soil strength and improve soil quality. In: *Proceedings of the ISTRO 18th Triennial Conference*, Izmir, Turkey, June, pp. 15-19.
- Candemir F. and Gülser C., 2011. Effects of different agricultural wastes on some soil quality indexes in clay and loamy sand fields. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42, 13-28.
- Cao, Y. and Pawłowski, A., 2012. Sewage sludge-to-energy approaches based on anaerobic digestion and pyrolysis: Brief overview and energy efficiency assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (3), 1657-1665.
- Castellini, M., Giglio, L., Niedda, M., Palumbo, A.D. and Ventrella, D., 2015. Impact of biochar addition on the physical and hydraulic properties of a clay soil. *Soil Tillage Res.*, 154, 1-13.
- Chia, C.H., Downie, A. and Munroe, P., 2015. Characteristics of biochar: physical and structural properties. In: *Lehmann, J., Joseph, S.D. (Eds.), Biochar for Environmental*

- Management: Science, Technology and Implementation, second ed. Taylor and Francis, Florence, KY, USA, pp. 89-109.
- Clothier, B.E., Vogeler, I. and Magesan, G.N., 2000. The breakdown of water repellency and solute transport through a hydrophobic soil. *Journal of Hydrology*, 231-232, 255-264.
- Coughlan, K.J., McGarry, D., Loch, R.J., Bridge, B. and Smith, G.D., 1991. The measurement of soil structure - Some practical initiatives. *Aust. J. Soil Res.*, 29 (6), 869-889.
- Dahlquist, E., 2013. Technologies for Converting Biomass to Useful Energy: Combustion, Gasification, Pyrolysis, Torrefaction and Fermentation, Series: Sustainable Energy Developments 4, CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL, USA, p 497.
- Devereux, R.C., Sturrock, C.J. and Mooney, S.J., 2012. The effects of biochar on soil physical properties and winter wheat growth. *Earth Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 103 (1), 13-18.
- Dokht, H.F., Naeini, S.A.M., Dordipour, E., Jong, L.W.D. and Hezarjaribi, E., 2017. Effects of sewage sludge and its biochar on soybean yield in fine-textured loess soil. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 4 (2), 81-91.
- Du, Z.L., Zhao, J.K., Wang, Y.D. and Zhang, Q.Z., 2017. Biochar addition drives soil aggregation and carbon sequestration in aggregate fractions from an intensive agricultural system. *Journal of Soils and Sediments*, 17, 581-589.
- Enders, A., Hanley, K., Whitman, T., Joseph, S. and Lehmann, J., 2012. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresource Technology*, 114, 644-653.
- Etiégni, L. and Campbell, A.G., 1991. Physical and chemical characteristics of wood ash. *Bioresource Technology*, 37 (2), 173-178.
- Gamage, D.N.V., Mapa, R.B., Dharmakeerthi, R.S. and Biswas, A., 2016. Effect of rice-husk biochar on selected soil properties in tropical alfisols. *Soil Research*, 54, 302-310.
- 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.
- Githinji, L., 2014. Effect of biochar application rate on soil physical and hydraulic properties of a sandy loam. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60 (4), 457-470.
- Glaser, B., Lehmann, J. and Zech, W., 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soil in the tropics with charcoal – a review. *Biology and Fertility of Soils*, 35, 219-230.
- Glaser, B., Wiedner, K., Seelig, S., Schmidt, H.P. and Gerber, H., 2015. Biochar organic fertilizers from natural resources as substitute for mineral fertilizers. *Agron. Sustain. Dev.*, 35, 667-678.
- Greenberg, I., Kaiser, M., Polifka, S., Wiedner, K., Glaser, B. and Ludwig, B., 2019. The effect of biochar with biogas digestate or mineral fertilizer on fertility, aggregation and organic carbon content of a sandy soil: results of a temperate field experiment. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 182, 824-835.
- Gülser C. 2006. Effect of forage cropping treatments on soil structure and relationships with fractal dimensions. *Geoderma*, 131, 33-44.
- Hamamoto, S., Moldrup, P., Kawamoto, K. and Komatsu, T., 2009. Effect of particle size and soil compaction on gas transport parameters in variably saturated, sandy soils. *Vadose Zone*, 8, 986-995.
- Hardie, M., Clothier, B., Bound, S., Oliver, G. and Close, D., 2014. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? *Plant and Soil*, 376, 347-361.
- 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*, 209-210, 188-197.

- Horák, J., Simanský, 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.
- Horn, R. and Dexter, A.R., 1989. Dynamics of soil aggregation in an irrigated desert loess. *Soil and Tillage Research*, 13: 253-266.
- Hua, L., Lu, Z., Ma, H. and Jin, S., 2014. Effect of biochar on carbon dioxide release, organic carbon accumulation, and aggregation of soil. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 33 (3), 941-946.
- Hurisso, T.T., Davis, J.G., Brummer, J.E., Stromberger, M.E., Mikha, M.M., Haddix, M.L., Booher, M.R. and Paul, E.A., 2013. Rapid changes in microbial biomass and aggregate size distribution in response to changes in organic matter management in grass pasture. *Geoderma*, 193-194, 68-75.
- IBM, 2011. IBM Statistics for Windows, version 20.0. IBM Corporation. Armonk, NY.
- Ibrahim, H.M., Al-Wabel, M.I., Usman, A.R.A. and Al-Omran, A., 2013. Effect of conocarpus biochar application on the hydraulic properties of a sandy loam soil. *Soil Science*, 178, 165-173.
- Ippolito, J.A., Ducey, T.F., Cantrell, K.B., Novak, J.M. and Lentz, R.D., 2016. Designer, acidic biochar influences calcareous soil characteristics. *Chemosphere*, 142: 184-191.
- 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.
- Jien, S.H. and Wang, C.S., 2013. Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil. *Catena*, 110, 225-233.
- Jindo, K., Monedero, M.A.S., Mastrolonardo, G., Audette, Y., Higashikawa, F.S., Silva, C.A., Akashi, K. and Mondini, C., 2020. Role of biochar in promoting circular economy in the agriculture sector. Part 2: a review of the biochar roles in growing media, composting and as soil amendment. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 7, Article number 16.
- Joseph, S.D., Camps-Arbestain, M., Lin, Y., Munroe, P., Chia, C.H., Hook, J., van Zwieten, L., Kimber, S., Cowie, A., Singh, B.P., Lehmann, J., Foidl, N., Smernik, R.J. and Amonette, E., 2010. An investigation into the reactions of biochar in soil. *Australian Journal of Soil Research*, 48 (7), 501-515.
- Kameyama, K., Miyamoto, T., Shiono, T. and Shinogi, Y., 2012. Influence of sugarcane bagasse-derived biochar application on nitrate leaching in calcaric dark red soil. *Journal of Environmental Quality*, 41 (4), 1131-1137.
- Keiluweit, M., Nico, P.S., Johnson, M.G. and Kleber, M., 2010. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). *Environmental Science and Technology*, 44 (4), 1247-1253.
- 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.
- Klute, A. and Dirksen, C., 1986. Hydraulic Conductivity and Diffusivity: Laboratory Methods. *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2nd Edition. Agronomy No: 9. 687-734, 1188 p, Madison, Wisconsin USA.
- Koçar, G., Eryaşar, A., Ersöz, Ö., Arıcı, Ş. ve Durmuş, A., 2010, *Biyogaz Teknolojileri*, Ege Üniversitesi Basımevi, ISBN 978-605-61108-0-1, İzmir, 251s.
- Kumari, K.G.I.D., Moldrup, P., Paradelo, M., Elsgaard, L., Hauggaard-Nielsen, H. and de Jonge, L.W., 2014. Effects of biochar on air and water permeability and colloid and phosphorus leaching in soils from a natural calcium carbonate gradient. *Journal of Environmental Quality*, 43 (2), 647-657.

- Lal, R., 1988. Soil Erosion Research Methods. Soil and Water Conservation Society, Iowa-USA.
- Lehmann, J. and Joseph, S., 2009. Biochar for Environmental Management Science and Technology. Earthscan, London, UK. p 416.
- Lei, O. and Zhang, R., 2013. Effects of biochars derived from different feedstocks and pyrolysis temperatures on soil physical and hydraulic properties. *Journal of Soil and Sediments*, 13, 1561-1572.
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Sohi, S., Thies, J.E., Skjemstad, J.O., Luizao, F.J., Engelhard, M.H., Neves, E.G. and Wirrick, S., 2008. Stability of biomass-derived black carbon in soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72 (24), 6069-6078.
- Lim, T.J., Spokas, K.A., Feyereisen, G. and Novak, J.M., 2016. Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. *Chemosphere*, 142, 136-144.
- Lin, Y., Munroe, P., Joseph, S., Kimber, S. and Van Zwieten, L., 2012. Nanoscale organo-mineral reactions of biochars in ferrosol: an investigation using microscopy. *Plant and Soil*, 357, 369-380.
- Liu, J., Schulz, H., Brandl, S., Miehtke, H., Huwe, B. and Glaser, B., 2012b. Short-term effect of biochar and compost on soil fertility and water status of a Dystric Cambisol in NE Germany under field conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175, 698-707.
- Liu, X.H., Han, F.P. and Zhang, X.C., 2012a. Effect of biochar on soil aggregates in the Loess Plateau: results from incubation experiments. *International Journal of Agriculture and Biology*, 14, 975-979.
- Loch, R.J. and Foley, J.L., 1992. Effects of plot size on size distributions of water stable material at the soil surface under simulated rain. *Aust. J. Soil Res.*, 30 (2), 113-118.
- Loch, R.J. and Foley, J.L., 1994. Measurement of aggregate breakdown under rain-Comparison with test of water stability and relationships with field measurements of infiltration. *Aust. J. Soil Res.*, 32 (4), 701-720.
- Loch, R.J., 1994. A method for measuring aggregate water stability of dryland soils with relevance to surface seal development. *Aust. J. Soil Res.*, 32 (4), 687-700.
- Lorenz, K. and Lal, R., 2014. Biochar application to soil for climate change mitigation by soil organic carbon sequestration. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 177 (5), 651-670.
- Lowery, B. and Morrison, J.E., 2002. Soil Penetrometers and Penetrability. In *Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods*, Dane JH, Topp GC (eds). SSSA Inc. Madison, WI; 363-388.
- Lu, H., Zhang, W., Wang, S., Zhuang, L., Yang, Y. and Qiu, R., 2013. Characterization of sewage sludge-derived biochars from different feedstocks and pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 102, 137-143.
- 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.
- Mahmoud, E., El-Beshbeshy, T., El-Kader, N.A., Shal, R.E. and Khalafallah, N., 2019. Impacts of biochar application on soil fertility, plant nutrients uptake and maize (*Zea mays* L.) yield in saline sodic soil. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 719.
- Major, J. 2010. Guidelines on Practical Aspects of Biochar Application to Field Soil in Various Soil Management Systems, International Biochar Initiative, http://www.biocharinternational.org/sites/default/files/IBI%20Biochar%20Application%20Guidelines_web.pdf.
- Manolikaki, I. and Diamadopoulos, E., 2020. Agronomic potential of biochar prepared from brewery byproducts. *Journal of Environmental Management*, 255, 109856.
- 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.V. and Horn, R., 2018. Effect of biochar addition on hydraulic functions of two textural soils. *Geoderma*, 326, 88-95.
- Nagel, K., Hoilett, N.O., Mottaleb, M.A., Meziani, M.J., Wistrom, J. and Bellamy, M., 2019. Physicochemical characteristics of biochars derived from corn, hardwood, miscanthus, and horse manure biomasses. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(8), 987-1002.
- 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*. 2nd Edition. Agronomy No: 9. 539-579, 1159 p, Madison, Wisconsin USA.
- 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.
- Novak, J., Sigua, G., Watts, D., Cantrell, K., Shumaker, P., Szogi, A., Johnson, M.G. and Spokas, K., 2016. Biochars impact on water infiltration and water quality through a compacted subsoil layer. *Chemosphere*, 142, 160-167.
- Novak, J.M., Lima, I., Xing, B., Gaskin, J.W., Steiner, C., Das, K.C., Ahmedna, M., Rehrh, D., Watts, D.W., Busscher, W.J. and Schomberg, H., 2009. Characterization of designer biochars produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Annals of Environmental Science*, 3, 195-206.
- 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.
- Oguntunde, P.G., Abiodun, B.J., Ajayi, A.E. and van de Giesen, N., 2008. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 171, 591-596.
- 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.
- Opara, C.C., 2009. Soil microaggregates stability under different land use types in southeastern Nigeria. *Catena*, 79, 103-112.
- Ouyang, L., Wang, F., Tang, J., Yu, L. and Zhang, R., 2013. Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13 (4), 991-1002.
- Özçimen, D. and Karaosmanoğlu, F., 2004. Production and characterization of bio-oil and biochar from rapeseed cake. *Renewable Energy* 29, 779-787.
- Özçimen, D. ve Meriçboyu, A.E., 2009. Fındık kabuğu karbonizasyon sonuçlarının istatistiksel değerlendirilmesi. *İTÜ Dergisi*, 8 (1), 116-124.
- Özgül, M., 2003. Erzurum Yöresinde Yaygın Olarak Bulunan Büyük Toprak Gruplarının Sınıflandırılması ve Haritalanması. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Toprak Anabilimdalı, Doktora Tezi, Erzurum.
- Peng, X., Ye, L.L., Wang, C.H., Zhou, H. and Sun, B., 2011. Temperature-and duration-dependent rice straw-derived biochar: characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China. *Soil and Tillage Research*, 112 (2), 159-166.
- Petersen, C.T., Hansen, E., Larsen, H.H., Hansen, L.V., Ahrenfeldt, J. and Hauggaard-Nielsen, H., 2016. Pore-size distribution and compressibility of coarse sandy subsoil with added biochar. *European Journal of Soil Science*, 67, 726-736.
- Petter, F.A. and Madari, B.E., 2012. Biochar: agronomic and environmental potential in Brazilian savannah soils. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16 (7), 761-768.
- Piccolo, A. and Mbagwu, J.S.C., 1999. Role of hydrophobic components of soil organic matter in soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, 63 (6), 1801-1810.

- Pranagal, J., Oleszczuk, P., Tomaszewska-Krojanska, D., Kraska, P. and Rozylo, K., 2017. Effect of biochar application on the physical properties of haplic podzol. *Soil and Tillage Research*, 174, 92-103.
- Rhoades, J.D., 1982a. Cation Exchange Capacity. *Methods of Soil Analysis*, Part 2. Chemical and Microbiological Properties. 2nd Edition. Agronomy No: 9, 149-157, 1159 p, Madison, Wisconsin USA.
- Rhoades, J.D., 1982b. Soluble Salts, In: Page, A.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*, Part 2, Chemical and Microbiological Properties, 2nd ed. ASA, SSSA, Agronomy No: 9. Madison, Wisconsin, pp. 167-179.
- Shirani, H., Hajabbasi, M.A., Afyuni, M. and Hemmat, A., 2002. Effects of farmyard manure and tillage systems on soil physical properties and corn yield in central Iran. *Soil and Tillage Research*, 68, 101-108.
- Soinne, H., Hovi, J., Tammeorg, P. and Turtola, E., 2014. Effect of biochar on phosphorus sorption and clay soil aggregate stability. *Geoderma*, 219-220, 162-167.
- Steiner, C., Teixeira, W.G., Lehmann, J., Nehls, T., de Macêdo, J.L.V., Blum, W.E. and Zech, W., 2007. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant Soil*, 291, 275-290.
- Stelt, M.J.C., Gerhauser, H., Kiel, J.H.A. and Ptasiński, K.J., 2011. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review, *Biomass and Bioenergy*, 35 (9), 3748-3762.
- Sun, Z., Moldrup, P., Elsgaard, L., Arthur, E., Bruun, E. W., Hauggaard-Nielsen, H. and de Jonge, L.W., 2013. Direct and indirect short-term effects of biochar on physical characteristics of an arable sandy loam. *Soil Science*, 178 (9), 465-473.
- Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., Gu, Y. and Yang, Z., 2015. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous Solutions. *Chemosphere*, 125, 70-85.
- Tripathi, M., Sahu, J.N. and Ganesan, P., 2016. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 467-481.
- Tsai, W.T., Liu, S.C., Chen, H.R., Chang, Y.M. and Tsai, Y.L., 2012. Textural and chemical properties of swine-manure-derived biochar pertinent to its potential use as a soil amendment. *Chemosphere*, 89 (2), 198-203.
- Uzoma, K.C., Inoue, M., Andry, H., Fujimaki, H., Zahoor, A. and Nishihara, E., 2011. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. *Soil Use and Management*, 27 (2), 205-212.
- Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Chan, K., Downie, A., Rust, J., Joseph, S. and Cowie, A., 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant Soil*, 327, 235-246.
- Verheijen, F.G.A., Jones, R.J.A., Rickson, R.J. and Smith, C.J., 2009. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Science Reviews*, 94 (1-4), 23-38.
- Wang, D., Fonte, S.J., Parikh, S.J., Six, J. and Scow, K.M., 2017. Biochar additions can enhance soil structure and the physical stabilization of C in aggregates. *Geoderma*, 303, 110-117.
- Warnock, D.D., Lehmann, J., Kuyper, T.W. and Rillig, M.C., 2007. Mycorrhizal responses to biochar in soil - concepts and mechanisms. *Plant and Soil*, 300, 9-20.
- Weyers, S.L. and Spokas, K.A., 2011. Impact of biochar on earthworm populations: a review. *Applied and Environmental Soil Science*, 541592.
- Whalen, J.K. and Chang, C., 2002. Macroaggregate characteristics in cultivated soils after 25 annual manure applications. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 1637-1647.

- Xiao, Q., Zhu, L., Shen, Y. and Li, S., 2016. Sensitivity of soil water retention and availability to biochar addition in rainfed semi-arid farmland during a three-year field experiment. *Field Crops Research*, 196, 284-293.
- Xiaoqin, S., Dongli, S., Yuanhang, F., Hongde, W. and Lei, G., 2021. Three-dimensional fractal characteristics of soil pore structure and their relationships with hydraulic parameters in biochar-amended saline soil. *Soil and Tillage Research*, 205, 104809.
- 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.
- Yilmaz, S. and Selim, H., 2013. A review on the methods for biomass to energy conversion systems design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 420-430.
- Yoo, G., Kim, H. and Choi, J.Y., 2017. Soil aggregate dynamics influenced by biochar addition using the ^{13}C natural abundance method. *Soil Science Society of America Journal*, 81 (3), 612-621.
- Zhang H., 1994. Organic matter incorporation affects mechanical properties of soil aggregates. *Soil and Tillage Research*, 31, 263-275.
- Zhang, A., Bian, R., Pan, G., Cui, L., Hussain, Q., Li, L., Zheng, J., Zheng, J., Zhang, X., Han, X. and Yu, X., 2012. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles. *Field Crops Research*, 127, 153-160.
- Zhang, J., Amonette, J.E. and Flury, M., 2021. Effect of biochar and biochar particle size on plant-available water of sand, silt loam, and clay soil. *Soil and Tillage Research*, 212, 104992.
- Zhang, M., Cheng, G., Feng, H., Sun, B., Zhao, Y., Chen, H., Chen, J., Dyck, M., Wang, X., Zhang, J. and Zhang, A., 2017. Effects of straw and biochar amendments on aggregate stability, soil organic carbon, and enzyme activities in the Loess Plateau, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 10108-10120.
- Zhang, Q., Du, Z., Lou, Y. and He, X., 2015b. A one-year short-term biochar application improved carbon accumulation in large macroaggregate fractions. *Catena*, 127, 26-31.
- Zhang, W., Mao, S., Chen, H., Huang, L. and Qiu, R., 2013. Pb(II) and Cr(VI) sorption by biochars pyrolyzed from the municipal wastewater sludge under different heating conditions. *Bioresource Technology*, 147, 545-552.
- Zhou, H., Yu, X., Chen, C., Zeng, L., Lu, S. and Wu, L., 2018. Evaluating hydraulic properties of biochar-amended soil aggregates by high-performance pore-scale simulations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 82, 1-9.
- Zielinska, A., Oleszczuk, P., Charnas, B., Skubiszewska-Zieba, J. and Pasieczna-Patkowskac, S., 2015. Effect of sewage sludge properties on the biochar characteristic, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 112, 201-213.
- Zong, Y., Chen, D. and Lu, S., 2014. Impact of biochars on swell-shrinkage behavior, mechanical strength, and surface cracking of clayey soil. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 177, 920-926.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Fatmanur KORKMAZ
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	
Lisans:	
Yüksek lisans:	
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi