

Sürdürülebilir Toprak Üretkenliğinde Biyoçar Kullanımı Use of Biochar in Sustainable Soil Productivity

Mesut Budak*

Siirt Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Siirt, TÜRKİYE

<https://orcid.org/0000-0001-5715-1246>

Harun Bektaş

Siirt Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Biyoteknoloji Bölümü, Siirt, TÜRKİYE

<https://orcid.org/0000-0002-4397-4089>

Kübra Polat

Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Şanlıurfa,
TÜRKİYE

<https://orcid.org/0000-0003-2966-8699>

Fatma KÖROĞLU

Siirt Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Biyoteknoloji Bölümü, Siirt, TÜRKİYE

<https://orcid.org/0000-0002-7846-0643>

Derleme Makalesi

Geliş Tarihi

28/04/2023

Kabul Tarihi

03/05/2023

DOI

10.5281/zenodo.7950011

Özet

Fosil yakıtların enerji kaynağı olarak aşırı kullanımının yanı sıra topraklar üzerindeki baskı sonucu sera gazı ve su buharı emisyonlarının artması küresel ısınmanın temel nedenlerini oluşturmaktadır. Zira su buharı ve sera gazlarının emisyonundaki artış insan faaliyetlerinin en önemli sonuçlarından biridir. Son zamanlarda insan kaynaklı sera gazı emisyonları ile ilgili sorunlara kısmi bir çözüm getirmek için karbon-negatif teknolojilerin geliştirilmesi ve kullanılması önem arz etmiştir. Bu bağlamda organik atıkların termo-kimyasal pirolizinin bir ürünü olarak elde edilen biyoçar materyalinin tarım arazilerinde kullanılması potansiyel olarak sera gazı emisyonlarını azaltırken, tarımsal üretkenliği ve gıda güvenliğini iyileştirmesi açısından oldukça önem arz etmektedir. Bu çalışmanın amacı, önemli bir toprak düzenleyici olarak kabul gören biyoçar maddesinin toprağın, fiziko-kimyasal ve biyolojik özelliklerine olan etkisinin yanı sıra bitki gelişimi ve toprakta karbon tutumu açısından önemini ortaya koymak için günümüze kadar yapılan çalışmalar konusunda bir meta analiz yapmaktır.

Anahtar Kelimeler: Biyoçar, karbon depolama, küresel ısınma, tarımsal atıklar, toprak verimliliği.

Review Article

Received

28/04/2023

Accepted

03/05/2023

DOI

10.5281/zenodo.7950011

Abstract

Excessive use of fossil fuels as an energy source, as well as pressure on the land, results in increased emissions of greenhouse gases and water vapor, which are the main causes of global warming. The increase in emissions of water vapor and greenhouse gases is one of the most significant consequences of human activities. Recently, the development and use of carbon-negative technologies have become important for partially solving problems related to human-induced greenhouse gas emissions. In this context, the use of Biochar material obtained as a product of thermochemical pyrolysis of organic waste in agricultural lands has the potential to reduce greenhouse gas emissions while improving agricultural productivity and food security. The aim of this study is to conduct a meta-analysis of studies conducted to date on the effects of biochar material, which is considered an important soil conditioner, on the physical, chemical, and biological properties of soil, as well as its importance in plant growth and carbon sequestration in the soil.

Keywords: Biochar, carbon storage, global warming, agricultural waste, soil fertility.

1. Giriş

Hızla gelişen endüstriyel faktörlerin yanı sıra artan dünya nüfusuna bağlı olarak tarım ürünlerine olan talep artışı tarım toprakları üzerinde antropojenik baskı oluşturmakta ve nihayetinde de toprakların üretim kapasitesinin azalmasına neden olmaktadır. Zira 2050 yılında dünya nüfusunun 9.8 milyara ulaşacağı varsayımı (1), tarım toprakları üzerinde oluşacak baskının ne denli artacağını daha net bir şekilde ortaya koymaktadır. Araştırmalar gelecekte daha ciddi beslenme ve çevre problemlerinin ortaya çıkmasına engel olmak için tarım arazilerinin üretim kapasitelerinin iyileştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Howel (2), artan nüfusun beslenme gereksinimini karşılamak için, 2050 yılına kadar tarım arazi alanlarının artırılarak veya toprakların üretim kapasiteleri iyileştirilerek üretimde en az iki kat artış sağlanması gerektiğini bildirmiştir.

İnsanoğlunun beslenme gereksinimini karşılamadaki önemli rolüne ek olarak toprakta yüksek miktarda karbon depolayarak küresel ısınmanın hafifletilmesine katkıda bulunması açısından tarımsal araziler karasal ekosistemlerin önemli bir parçasıdır. Yeterli ve ekonomik anlamda ürün elde edilmesinin yanı sıra tarım arazilerinde karbon stokunun artırılarak sera gazı salınımlarının azaltılması ise tarım arazilerinin üretim kapasitelerini arttıracak etkili tarımsal yönetim uygulamaları yoluyla mümkün olabilmektedir (3, 4). Bu nedenle son zamanlarda tarım arazilerinde ürün verimini ve sürdürülebilirliğini iyileştirmek için düşük verimli toprakların rehabilite edilmesine artan bir ilgi bulunmaktadır (5).

Verimli toprak, bitki gelişimini engelleyebilecek herhangi bir toksik elemente sahip olmadan bitki büyümesi için gerekli besinleri ve suyu tedarik edebilme yeteneğine sahiptir (5). Zira toprak verimliliği toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri tarafından kontrol edilmektedir (6) ve tarımsal üretimde sürdürülebilirliği sağlamak için bu özellikler kritik bir öneme sahiptir (5). Fiziksel kimyasal ve biyolojik toprak özellikleri iyileştirilerek toprakların üretkenlik kapasitelerini arttırmak için toprakların doğru bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir. Yapılan birçok araştırmada organik gübrelerin

Sürdürülebilir Toprak Üretkenliğinde Biyoçar Kullanımı

(hayvan gübresi, yeşil gübre, organik atıklar, kompost, biyoçar) toprakların organik madde kapsamını arttırdığı ve sonuçta fiziksel, kimyasal ve biyolojik toprak özelliklerini iyileştirdiği rapor edilmiştir (7, 8). Bu yüzden son zamanlarda toprak kalitesini arttıran, ürün verimini iyileştiren ve iyi bir karbon tutucu olan biyoçara olan ilgi artmıştır. Son 20 yıldır organik atıkların piroliz edilmesiyle elde edilen biyoçarın toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini iyileştirerek toprak verimliliğini arttırdığı rapor edilmiştir (9, 10, 11, 12, 13).

Günümüze kadar biyoçarın tarımsal üretime etkisi konusunda da oldukça fazla çalışma yapılmış ve yapılmaya da devam etmektedir. Özellikle de toprak verimliliğini artırması, toprakların karbon depolama kapasitesini geliştirmesi, toprak nemini koruyabilmesi, yüzey akışı veya yıkanma ile kaybolacak besin elementi miktarını azaltması gibi nedenlerle biyoçar, tarımsal üretimde kullanımı yönüyle önemli bir potansiyele sahiptir (9). Dolayısı ile bu çalışmada son zamanlarda önemli bir araştırma potansiyeline sahip olan biyoçarın toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerine olan etkilerinin yanı sıra bitki gelişimi üzerindeki etkilerinin ortaya konulması için detaylı literatür araştırmasının yapılması amaçlanmıştır.

2. Biyoçar Uygulamalarının Toprakların Fiziksel Özelliklerine Etkisi

2.1. Toprak Tekstürüne Etkisi

Biyoçarın yüksek spesifik yüzey alanı ve çok gözenekli yapısı (14) düşük su tutma kapasitesine sahip kumlu topraklarda su tutma kapasitesini arttırmaktadır (15). Uzoma ve ark (14), kumlu bir toprağa hayvan gübresinden üretilen biyoçar uygulaması sonucu su tutma kapasitesinde %91 artış, toprak pH'sı ve kation değişim kapasitesinde de önemli oranda artış sağlayarak toprakta değişebilir kationların (Ca, K, Mg) alımını arttırdığını bildirmiştir. Bitki tarafından alınabilir su genellikle toprakta mezo gözeneklerde bulunmaktadır (16). Killi topraklarda bulunan mezo gözenekler, kumlu topraklarda bulunan mezo gözeneklerden daha fazla hacime sahiptir. Bu nedenle kumlu topraklara biyoçar uygulanmasıyla gözenek hacmi killi topraklara oranla daha fazla artış göstermektedir. Zhan ve ark. (17), kumlu, siltli tınlı ve killi topraklara biyoçar uygulaması sonucunda su tutma kapasitesinin kumlu topraklarda %57, siltli tınlı topraklarda %20 ve killi topraklarda %2 oranında artış gösterdiğini bildirilmiştir. Biyoçarın gözenekli yapısı, kaba dokulu ve ince dokulu topraklarda fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri iyileştirici özelliği ile sürdürülebilir toprak verimliliğine katkı sunmaktadır (18). Killi toprağa, meyve ağaçlarında üretilen biyoçar uygulaması, toprakta makro gözeneklerde artış sağlayarak toprak havalanmasını önemli oranlarda arttırmaktadır (19). Li ve ark. (20), siltli-killi topraklara biyoçar uygulaması ile azot kaybında %8.3 ve %17 oranında azalmalar olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca biyoçarın gözenekli yapısı kumlu topraklarda nitrat kaybını da azaltmaktadır (14).

2.2 Hacim ağırlığına etkisi

Fiziksel toprak kalitesinin önemli bir göstergesi olan hacim ağırlığı tarımsal uygulamalardan önemli derecede etkilenmektedir (21). Yapılan birçok bilimsel çalışmada hacim ağırlığındaki artışların

toprakta su ve hava hareketlerini olumsuz etkilediği, bitki kök gelişimini yavaşlattığı, besin elementlerinin alınabilirliğini azalttığı bildirilmiştir (22, 23, 24). Nitekim yüksek hacim ağırlığının olumsuz etkisini ortadan kaldırmak için organik kökenli materyallerin kullanımı birçok araştırmacı tarafından dile getirilmektedir (9, 21). Biyoçar gözenekli bir yapıya ve mineral topraktan daha küçük olan bir hacim ağırlığına (0.05 - 0.57 kg m⁻³) sahiptir (21). Bu nedenle biyoçar uygulamalarının toprak hacim ağırlığını düşürmesi beklenmektedir. Zira Laird ve ark. (25) Biyoçar uygulamalarının toprak hacim ağırlığını önemli ölçüde azalttığını rapor etmiştir. Ayrıca Verheijen ve ark. (26), kumlu topraklara biyoçar uygulaması ile hacim ağırlığının önemli derecede düştüğünü bildirmiştir.

2.3. Agregatlaşmaya Etkisi

Toprak agregatı, toprak taneciklerinin (kum, silt ve kil) topraktaki çimentolayıcı (organik madde, kireç, kil içeriği, Al-Fe oksitler) maddeler sayesinde bir araya gelerek oluşturdukları küçük yapılardır. Agregatlar, toprak yapısının korunmasında olduğu kadar verimliliğinde de kritik bir rol oynar (27). İyi bir agregatlaşmaya sahip toprak, bitki için yararlı olan su miktarının artmasına, besin elementlerinin daha fazla tutulmasının yanısıra, organik maddeyi bozulmadan koruyabilme yeteneğine sahiptir (28). Özellikle de yarı kurak iklim bölgelerinde toprak agregat stabilitesi toprağın fiziksel özelliklerini yansıtır ve toprak kalitesinin değerlendirilmesi için kullanılacak temel parametrelerin (toprak gözenekliliği, su tutma kapasitesi, geçirgenlik, erozyonu karşı direnç vb.) korunmasında önemli bir rol oynar (29). Agregatların dayanıklılığı ve aralarındaki gözenekler, suyun hareketini ve depolanmasını, havalandırmayı, erozyonu, biyolojik aktiviteyi ve bitkilerin büyümesini etkiler. Bu nedenle toprakta agregat stabilitesinin oluşumu önemlidir. Toprakta agregat oluşumunu teşvik eden en önemli faktör toprak organik maddesidir (30). Nitekim, bugüne kadar yapılan birçok çalışmada organik katkılı maddelerin toprağa ilavesinin agregat stabilitesini arttırdığı ve bunun sonucunda toprağın fiziksel yapısını iyileştirerek ürün veriminin artırıldığı ve toprak taneciklerinin bir araya gelerek erozyona karşı direnç gösterdiğini rapor etmiştir (31, 32, 33, 34, 35). Zira Ouyang (36), siltli-killi ve tınlı-kumlu tekstüre sahip iki farklı toprağa biyoçar ilave etmiş ve bunun sonucunda özellikle de tınlı kumlu topraklarda agregatlaşmanın önemli ölçüde artış gösterdiğini bildirmiştir. Ayrıca Soenneve ark. (37) odunsu atıklardan üretilen biyoçarın killi toprağa uygulanması ile agregat stabilitesinin %13 oranında arttığını ve bu artışın biyoçarın güçlü yapıda organik madde içermesi ve mineralizasyona uğramasından ileri geldiğini rapor etmiştir.

2.4. Toprak Gözenekliliğine Etkisi

Toprakların toplam gözenekliliği toprağın tekstürüne, strüktürüne, gözenek büyüklük dağılımına, organik madde içeriğine, mevcut nem içeriğine ve arazi üzerindeki trafiğin yoğunluğuna bağlı olarak önemli değişimler göstermektedir. Toprak gözenekliliğinde oluşacak değişimler toprakların su tutma kapasitesini, ısı, su ve hava hareketlerini etkilediğinden bitki gelişimi ve verimi üzerinde

Sürdürülebilir Toprak Üretkenliğinde Biyoçar Kullanımı

önemli etkilere neden olmaktadır (38). Kil içeriği yüksek topraklarda toplam gözenekliliği ile beraber mikro gözenekliliğin fazla olması su ile doymuş koşulların (havasız koşullar) oluşmasına neden olurken kaba tekstürlü topraklarda makro gözeneklilik ile beraber toplam gözenekliliğin düşük olması düşük su tutma kapasitesine neden olmaktadır. Her iki durumda da (yağış veya sulama dönemlerinde killi topraklarda oksijensiz ortam ve kumlu topraklarda kurak dönemlerde nem içeriğinin düşük olmasından dolayı kuraklık stresi) zaman zaman bitkiler stres yaşamaktadır. Liu ve ark. (39), kumlu toprağa biyoçar uygulandıktan sonra toprakta toplam gözeneklilikte artış sağlanarak su tutma kapasitesinde %127 oranında önemli bir artış olduğunu bildirmişlerdir. Githinji (40) fıstık kabuklarından elde edilen biyoçar materyalini tınlı kumlu tekstüre sahip toprağa ilave etmiş ve toprakta toplam gözenekliliğin biyoçarda bulunan gözenekliliğe bağlı olarak artış gösterdiğini, bunun sonucunda da toprağın birçok fiziksel özelliklerinde iyileştirme sağlayarak domates bitkisinde bitki gelişimini teşvik ettiğini bildirmiştir. Obia ve ark. (41), 350 °C'de piroliz edilen mısır koçanlarından üretilen biyoçarın toprağa uygulanması ile toprakta mikro gözeneklilikte ve nihayetinde de ($p < 0.01$) toplam gözenekliliğinde artış olduğunu ve bu artışın toprağın su tutma kapasitesinde, mikroorganizma sayısında ve toprak agregatlaşmasında önemli artışlara neden olduğunu bildirmiştir. Jin ve ark. (42) soya yetiştiriciliğinde yaptığı çalışmada mısır koçanından üretilen NPK'lı gübre karışımının uygulandığı durumlarda bitkilerin besin elementlerini toprakta daha fazla aldığını, toprak toplam gözenekliliğinin %11.3 oranında artış gösterdiğini ve buna bağlı olarak soya fasulyesinin veriminde önemli artışlar olduğunu rapor etmiştir. Ayrıca biyoçarın yüksek gözenekli yapısı (43) toprakta toplam gözenek sayısını arttırarak mikroorganizmaların yaşamı için bir habitat oluşturmakta ve toprakta bitkinin ihtiyacı olan enzimatik işlevlerin gerçekleşmesini sağlamaktadır (18, 43, 44; 45, 46). Zira Abujabhah ve ark. (47) tınlı-kumlu tekstüre sahip toprağa biyoçar ve kompost uygulanmasıyla bakteri sayısında %18 oranında artış olduğunu rapor etmiştir.

2.5. Toprak Su Tutma Kapasitesine Etkisi

Toprağın su tutma kapasitesi, bitki büyümesi için karbon dağılımını, besin döngüsünü ve fotosentez oranını etkileyen en önemli toprak faktörlerinden biridir (48). Bugüne kadar dünyanın birçok farklı yerinde yapılan bilimsel çalışmalarda, toprağın su tutma kapasitesinin, ürün verimini ve değişkenliğini kontrol ettiği ve organik madde ilavesiyle toprağın su tutma kapasitesinin arttığı rapor edilmiştir (49, 50). Organik karbonca zengin olan ve yüksek gözenekli yapısı sayesinde biyoçar uygulamalarının toprakta su tutma kapasitesini arttırdığı ve bitkinin gelişimi için gerekli olan suda çözünebilen besin elementlerinin tedarikini sağladığı rapor edilmiştir (18). Günümüze kadar yapılan bilimsel çalışmalar, biyoçar uygulamasının, yüksek gözenekliliği, hidrofilik alanların varlığı ve biyoçarın geniş spesifik yüzey alanı sayesinde toprakta su tutulmasını etkilediğini göstermektedir. Ancak, bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır. Nitekim, biyoçarın toprakta su tutma kapasitesini arttırdığını rapor eden çalışmalar (51, 52) olduğu gibi toprakta su tutma kapasitesini düşürdüğü (53, 54) veya hiç değiştirmediklerini rapor eden çalışmalar da

bulunmaktadır (41, 55). Ancak bu karşıt görüşlerin olmasının temel nedeni çalışma yapılan toprakların farklı tekstüre sahip olmasından ileri gelmektedir. Zira Razzaghi ve ark. (56) farklı tekstüre sahip topraklarda yaptıkları biyoçar uygulamalarından sonra kaba tekstürlü (kumlu) topraklarda biyoçar uygulamalarının su tutma kapasitesini arttırdığı, killi topraklarda ise düşürdüğünü rapor etmiştir. Yu ve ark. (57) tınlı-kumlu toprağa odunsu atıklardan elde edilen biyoçar uygulanmasıyla su tutma kapasitesinde %16'lık bir artış olduğu, bunun da besin alımını sağlayarak bitki büyümesini teşvik ettiğini rapor etmiştir.

3. Biyoçarın Toprakların Kimyasal Özelliklerine Etkisi

3.1. Toprak pH'sına Etkisi

Biyoçar yüksek miktarlarda karbon içerir ve biyokütle çeşitlerine bağlı olarak yapısında değişen oranlarda K, Ca ve Mg gibi bazik katyonlarını bulundurur (58). Bazik karakterli özelliği nedeni ile de biyoçar asitli topraklarda pH'yı yükselterek kireçleme görevi görmektedir. Zira bazik karakter özelliğinden dolayı biyoçar, asidik topraklar için önemli bir toprak pH düzenleyicisi olarak kabul görmektedir (9, 59, 60). Asidik topraklara uygulanan biyoçar toprak pH'sını dengeleyerek besin elementlerinin alınabilirliğini dolayısı ile de ürün verimi ve kalitesini arttırmaya yardımcı olmaktadır. Chan ve Xu (61), asit karakterli toprakta buğday yetiştirildiğini ve biyoçar uygulanması sonucunda toprak pH'sının arttığını ve bu artışa bağlı olarak buğday bitkisinde büyümenin teşvik edildiğini bildirmiştir. Elbetteki toprak pH'sına olan etkisi biyoçar üretiminde kullanılan biyokütle ve piroliz sıcaklığına bağlı olarak değişim göstermektedir. Nitekim, asidik bir toprağa mısır ve çim atıklarından üretilen biyoçarları uygulayan Chinttala ve ark. (62) mısır biyokütlesinden üretilen biyoçarın yapısında daha fazla bazik katyon bulunduğundan çim biyokütlesine göre toprak asitliğini daha fazla giderdiğini bildirilmiştir.

Biyoçar toprak pH'sını artırması ve besin elementi alımını kolaylaştırmasının yanısıra toprak pH'sını düzenleyerek ağır metallerin emilimini de engelleyebilmektedir. Rees ve ark. (60) ağır metal içeren asidik ve alkali topraklara biyoçar uygulayarak toprak reaksiyonunu gözlemlemiş ve asidik toprakta pH'nın 5.8'den 6.9'a çıkarak önemli bir artış, alkali toprakta ise 7.2'den 7.4'e yükselterek küçük bir artış sağladığı ve bunun sonucunda da asidik toprakta artan pH ile Pb, Cu, Cd, Zn ve Ni'in, alkali toprakta ise Cu ve Zn'nun çözünebilirliğinin önemli oranda azaldığını rapor etmişlerdir. Ayrıca Demir (63), biyoçar zeolit uygulamalarının artırılmış kentsel atıksu ile sulanan topraklardaki ağır metal birikimi üzerindeki etkilerini araştırdığı çalışmada biyoçar ve zeolit uygulamalarının toprakta arıtma suyundaki ağır metalleri filtre ederek topraktan yıkanıp su kaynaklarına ulaşma riskini azalttığını rapor etmiştir.

3.2. Toprakta Organik Karbon Depolamasına Etkisi

Toprak için önemli bir organik madde kaynağı olan bitkisel atıkların biyoçara dönüştürülüp toprağa uygulanması, toprak organik karbon içeriğini zenginleştirmesinin (18) yanı sıra toprakta uzun süre stabil kalıp karbon salınımını azaltmaktadır (64). Biyoçarın yoğun karbon içeriği negatif yüklü

Sürdürülebilir Toprak Üretkenliğinde Biyoçar Kullanımı

olmasını sağlar. Buda toprakta organik maddenin tutulmasını ve böylelikle de organik karbon birikimini sağlamaktadır. Biyoçarın bu özelliği yenilenebilir enerji kaynağı olarak görülmektedir (65). Toprakta karbon birikimi CO₂'nin atmosfere yavaş salınımına katkı sunmasına ilaveten, biyoçarın uzun sürede ayrışabilme özelliği küresel ısınmanın azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Bu durum küresel ısınmanın bir sonucu olan iklim değişiklerinin azalmasına da katkıda bulunmaktadır (66, 67, 68). Busscherr ve ark. (69), ceviz kabuklarından elde edilen biyoçarın toprağa uygulanması ile toprakta karbon depolama oranının arttığını rapor etmişlerdir. Ayrıca Vaccari ve ark. (70), organik maddece fakir tarım arazilerinde biyoçar uygulamalarının toprak organik maddesini dolayısı ile de toprakta tutulan karbon miktarını arttırdığını rapor etmişlerdir.

Biyoçarın kararlı yapısı sayesinde toprakta karbon uzun yıllar boyunca kalabilir (71). Biyoçarın bu özelliği toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin uzun vade de değişip toprak kalitesini iyileştirilebilmektedir (72). Steinbeiss ve ark. (73) siltli kil tekstüre sahip bir toprağa odunsu atıklardan üretilen biyoçar eklenmesiyle toprakta karbonun %27 oranında artış gösterdiğini ve bu artışın toprakta on yıl süreyle kalıp toprak kalitesini iyileştirerek ürün verimini arttırabileceğini rapor etmiştir. Ancak farklı biyokütleler nedeniyle toprakta organik karbon artışı farklılık gösterebilmektedir. Zira pirinç atığından elde edilen biyoçarın toprağa uygulanmasıyla 5 ay süre içerisinde toplam organik karbonda %0.09 artış (74) sağlanırken buğday atığından elde edilen biyoçarın toprağa uygulanmasıyla 5 yıl süre içerisinde toplam organik karbonda %76.9 artış (75) olduğu rapor edilmiştir. Bununla beraber pirinç ve mısır atığından elde edilen biyoçarın toprağa uygulanmasıyla 2 yıl süre içerisinde toplam organik karbonda %9,63 artış (76), kauçuk ağacı atığından elde edilen biyoçarın toprağa uygulanmasıyla 54 gün süre içerisinde toplam organik karbonda %0.52 oranında artış (77) olduğu bildirilmiştir. Woolf ve ark. (78) ise biyoçar kullanımı ile net karbondioksit, metan ve azot oksit emisyonlarının %12 düzeyinde azaltılabileceğini rapor etmişlerdir.

3.3. Toprak Besin Elementlerine Etkisi

Biyoçar uygulamalarının toprakta besin elementi miktarlarını arttırmakla beraber, toprakta mevcut besin elementlerinin yayışlılığı veya tutunması üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Zira toprağa uygulanan biyoçar bitkiler ve toprak mikroorganizmaları için bir besin kaynağı olması yanısıra (79), bir besin havuzu görevi görerek besinlerin hareketliliğini ve biyoyararlanımını (80) ve bir toprak düzenleyici olarak, besin maddelerinin reaksiyonlarını ve döngüsünü etkilemektedir (81).

Biyoçarın ham maddesini oluşturan tarımsal veya organik kökenli atıklar farklı dozlarda azot (N), fosfor (P), potasyum (K) ve diğer besin elementlerini içerdiğinden, toprağı besin elementlerince zenginleştirmektedir (82). Leng ve ark. (83) biyoçar üretim aşamasında bir miktar azot ve kükürtün piroliz sırasında gaz emisyonu yoluyla kaybolduğunu ancak diğer besin elementlerinin çoğunun toprakta biyoçarın ayrışması sırasında toprağa salındığını ve bitkiler için kullanılabilir hale geldiğini rapor etmiştir. Proliz aşamasında artan sıcaklıkla beraber N içeriği azalırken (83), kül içeriğindeki artış nedeniyle P ve K içerikleri artmaktadır (84). Steiner ve ark. (85), yürüttükleri çalışmada kümes hayvanı

çöpünden elde ettikleri kompost ve aynı kompostta biyoçar ilave ederek toprakta nitrat yıkanmasına olan etkisine bakmışlardır. Araştırmacılar topraktaki azot kaybının, yalnız kompost uygulaması ile %20, biyoçar eklenmiş kompost ile %52 oranında azaldığını bildirmiştir.

Ayrıca biyoçar besin elementlerini toprakta depo ederek yıkanmasını ve gaz emisyonu yolu ile toprakta kayıplarını önemli derece azaltmaktadır. Biyoçarın besin tutma kapasitesi, biyoçarın gözenekliliğine ve yüzey yüküne (katyon ve anyon değişim kapasitesi) bağlıdır. Biyoçar uygulaması, yıkanma yoluyla N, P ve K kaybını ve azot oksit emisyonu yoluyla N kaybını azaltmaktadır (86). Liao ve ark. (87) biyoçar yapısında bulunan organik azotun çok yavaş mineralize olması ve yavaş salınım özelliği sayesinde bitki için gerekli N ihtiyacını önemli oranlarda karşılayabildiğini rapor etmiştir. Novak ve ark. (88) tarafından yapılan çalışmada ise fındık kabuğundan elde edilen ve bir miktar N içeren biyoçarın %0.5 ve %1 oranında toprağa uygulanması ile toplam C ve N oranında önemli bir artış sağlandığı bildirilmiştir. Laird ve ark. (89) toprağa biyoçar uygulamasıyla toprakta fosfor kayıplarının %11 ve %69 oranında azaldığını bildirmiştir. Bu nedenle, toprakların besin elementi alımını arttırmak ve besin elementi kaybını azaltmak, üretim kapasitesinin artırılması ve sürdürülebilirliğinin sağlanması açısından biyoçar tarımsal üretimde bir alternatif olarak kullanılmaktadır. Laghari ve ark. (90) kumlu çöl toprağına biyoçar uygulamış ve toprağın su tutma kapasitesinin %32, toplam karbonun (C) %11, toprakta tutulan toplam fosforun (P) %70 ve toplam potasyumun (K) %42 kadar arttığını rapor etmiştir. Günal, (18) iki farklı tekstüre sahip toprağına sıvı hayvan gübresi ile zenginleştirilmiş farklı biyoçar çeşitlerinin buğday bitkisinin gelişimine ve toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerine olan etkilerini incelemiştir. Araştırmada biyoçar uygulaması sonucu toprağın yarıyışlı su içeriği ve yarıyışlı potasyum içeriğinin arttığı ve özellikle de kumlu toprakta besin elementi tutma kapasitesinin arttığı rapor edilmiştir.

3.4. Toprak Katyon Değişim Kapasitesine (KDK) Etkisi

Biyoçar düşük katyon kapasitesine sahip topraklarda iyileştirici özelliğe sahiptir. Biyoçarın yüksek spesifik yüzey alanına sahip olması nedeniyle toprakta katyon değişim kapasitesini arttırması (91) toprak verimliliği açısından önem arz etmektedir. Zira piroliz işlemi sonucunda biyoçarın negatif yükleri artmaktadır (92, 93). Artan bu negatif yükler biyoçarın katyon değişim kapasitesi özelliğini arttırmaktadır. Toprakta katyon değişim kapasitesinde görülen artışlar besin elementi alımının artmasına ve nihayetinde de bitki büyümesini teşvik ederek ürün veriminde önemli bir artış sağlamaktadır. Bugüne kadar toprağına biyoçar uygulayarak çalışma yürüten birçok araştırmacı biyoçarın uygulanması ile toprakta negatif yüklerin artış gösterdiğini dolayısı ile de KDK'nın arttığını rapor etmiştir (58, 94). Jiang ve ark. (95) asit karakterli bir toprağına %3 ve %5 oranında biyoçar ilavesiyle toprağın katyon değişim kapasitesinin önemli oranda artış gösterdiğini bildirmiştir. Ghorbani (96) ise tınlı kumlu ve killi tekstüre sahip topraklara 0, %1, %3 oranlarında biyoçar ilave etmiş ve kontrol grubuna göre biyoçar eklenen tınlı kumlu topraklarda sırasıyla %20 ve %30 oranında, killi toprakta ise sırasıyla %9 ve %19 oranında KDK'nın artış gösterdiğini rapor etmiştir. Chen ve ark. (13) ise tınlı-kumlu ve tınlı-siltli topraklara pirinç

Sürdürülebilir Toprak Üretkenliğinde Biyoçar Kullanımı

atıklarından elde edilen biyoçar uygulamış ve toprak KDK'sının %0.93 ile % 40.28 oranında artış sağlandığını bildirmiştir. Ayrıca araştırmacılar KDK'da görülen artışın özellikle tınlı-siltli toprakta daha fazla olduğunu ve bu artış sebebiyle topraktaki toplam fosfor konsantrasyonunun arttığı, bunun sonucunda daha iyi bir bitki gelişimi olduğunu bildirmiştir. Ayrıca Pandian ve ark. (97), tınlı-kumlu tekstüre sahip bir toprağa biyoçar uygulanmasıyla katyon değişim kapasitesinin arttığı ve bu artış ile beraber potasyum alımının arttığı ve biyoçarın azot alımına olumlu etkisi ile birlikte yer fıstığı bitkisinde gövde büyümesinin daha fazla olduğunu rapor etmişlerdir.

3.5. Toprakların Biyolojik Özelliklerine Etkisi

Toprağa biyoçar uygulaması ile mikrobiyal popülasyon uyarılmakta, hareketsiz toprak mikroorganizmaları harekete geçmekte ve mikrobiyal solunumda önemli artışlar meydana gelmektedir (98). Biyoçar ilavesinden sonra CO₂ akışlarında önemli artışlar olmaktadır. Bunun nedenleri; a) bazı biyoçar bileşenlerinin biyotik tüketimi (99), (b) biyoçar-C'nin abiyotik salınımı (100) ve/veya (c) biyoçar ve doğal toprak organik maddesi (TOM) havuzları arasındaki etkileşimlerdir (99). Ayrıca, biyoçar, gözenekli yapısı nedeniyle mükemmel bir habitat sunarak ve sorpsiyon yoluyla çeşitli toprak toksinlerinin biyoyararlanımını azaltarak toprak organizmalarını dolaylı olarak uyarabilir (98).

Thies ve Rillig (101), gözenekli yapıya sahip olan biyoçarın mikroorganizmalar (toprak hayvanları, algler, mantarlar) için barınak görevi üstlendiğini ve mikroorganizmaların yaşamsal faaliyetleri için uygun bir habitat oluşturduğunu bildirmiştir (102). Zira yapılan bilimsel çalışmalarda su, besin tutumu ve toprak havalanmasını sağlama kapasitesi yüksek olan biyoçarın oksijenli ve oksijensiz ortamlarda yaşayan tüm mikroorganizmalara yaşamsal faaliyetler için ideal bir ortam oluşturduğunu bildirilmiştir (103, 104). Sial ve ark. (105) siltli-kil tekstüre sahip bir toprak ile deneme kurmuş ve denemede kontrol, %1 ve %2 muz kabuğu ve %1 ve %2 muz kabuğundan elde edilmiş biyoçar olmak üzere 5 uygulamalı bir çalışma yürütmüşlerdir. Araştırmacılar elde ettikleri bulgularda biyoçarın muz kabuğuna göre sırası (%1 ve %2 biyoçar) ile CO₂ emisyonlarında %24.3 ve %42.3 oranında azalma, üreaz enzim aktivitesinde %48.2 ve %54.3, fosfataz enzim aktivitesinde ise %6 ve %12 oranında artış olduğunu rapor etmişlerdir.

Toprağa biyoçar takviyesi toprakta enzimatik aktiviteyi artırır (98) dehidrojenazların aktivitesinde önemli bir artış sağlamaktadır (106). Biyoçar gözenekli yapısı, yüksek spesifik alanı ve yapısında ayrılan karbon ve azot bulundurmasıyla bakterilerin toprağa tutunmasını sağlayıp toprakta bakteri sayısının kayıplarında önemli derecede azaltmaktadır (107). Mierzwa- Hersztek ve ark. (108), kanatlı hayvan atığından elde edilen biyoçarı tınlı kumlu toprağa uygulayarak enzimatik aktiviteyi gözlemlemiş ve üreazların aktivitesinin %44 oranında dehidrojenaz aktivitesinin ise %19 oranında artış gösterdiğini rapor etmiştir. Araştırmacılar bunun nedeninin biyoçarın toprak pH'ını artırıcı özellikte olmasından kaynaklandığını bildirmiştir. Zira enzimatik aktiviteler asidik topraklarda işlevlerini azaltıp alkali topraklarda artırır (109, 110).

4. Bitki Gelişimine Etkisi

4.1. Bitki Kök Gelişimine Etkisi

Bitki gelişiminde bitki kök sistemi önemli bir rol oynamaktadır. Kökler, bitki için su ve besin elementi alımı dışında, fotosentetik ve biyosentez olaylarında, hormonal büyümede (111) ve toprakta karbon tutunmasında da önemli rol oynamaktadır (112, 113). Ayrıca kökler, mikrobiyal topluluğa (bakteri, mantar, algler) sinyaller salgılayıp bunları toprağa çekip çoğalmalarını sağlayarak bitki gelişimini teşvik etmektedir (114). Bitki köklerinin bitki için gerekli bu fonksiyonları yerine getirmesi toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerine bağlı olarak değişim göstermektedir (115). Bu nedenle iyi bir kök gelişimi için toprak özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Biyoçarın doğrudan kökler ile temas etmesi, kök özelliklerinin gelişmesine ve kök büyümesinin artmasına katkı sunmaktadır (116). Zira Abiven ve ark. (117) Zambiya’da toprak üretkenlik kapasitesi azalmış olan farklı topraklara hektara 4 ton mısır koçanlarından üretilmiş biyoçar uygulamışlardır. Araştırmacılar biyoçarın kök sistem boyutunda ve kök gövde oranında önemli artışların olduğunu bildirmiştir. Zhu ve ark. (118), kumlu topraklarda farklı dozlarda (%0, %0.15, %0.75 ve %1.5 biyoçar/toprak) biyoçar uygulayarak 2 farklı soya fasulyesinde kök gelişimini incelemiştir. Araştırmacılar çimlenmeden 7 gün sonra biyoçarın kök büyümesini hafif miktarda arttırdığını çimlenmeden sonraki 10. günde %1,5’lik biyoçarın, kontrol parseline göre toplam kök uzunluğunu ve toplam kök yüzey alanını sırasıyla %48.4 ve %27.4 ($P < 0.05$) arttırdığını bildirmiştir. Aynı çalışmada elde edilen gözlemler sonucunda biyoçarın kök morfolojisi üzerindeki olumlu etkilerinin özellikle ince kökler ($< 0,5$ mm) üzerinde yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Ayrıca, kök canlılığı ve yaprakta çözünen şeker içeriğinin, hem %0.75 hem de %1.5 biyoçar uygulamalarında önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Araştırmacılar sürgün biyokütlesinde ise, kontrole kıyasla %1.5 biyoçar uygulamasında maksimum %65.6 oranında arttığını bildirmiştir. Sürgün gelişiminin tersine kök gövde oranında ise çimlenmeden sonraki 7 ve 10. günde (%1.5 biyoçar uygulamasında) sırasıyla %32.3 ve %23.5’lik bir azalma olduğu tespit edildiği bildirilmiştir. Araştırmacılar biyoçarın kök morfolojisini ve kök canlılığını iyileştirerek soya fasulyesi fidesinin büyümesi üzerinde olumlu etkiler oluşturduğunu bildirmiştir. Feng ve ark. (119) biyoçarın bitki kök mimarisine olan etkisini incelediği çalışmada toprak yüzeyine biyoçar uygulanması (37.28 g biyoçar (kg toprak)⁻¹) ile bitki kök sisteminin iyi geliştiği ve azot asimilasyon etkinliğini önemli ölçüde artırarak kullanılan üre gübresinde %25’lik bir tasarruf sağlandığını ifade etmişlerdir.

Biyoçarın bitki kök sistemi üzerine etkisini inceleyen Ren ve ark. (120), 3 yıl boyunca süren bir arazi denemesinde toprağa farklı dozlarda (600, 1.200, 1.800, 2.400 ve 3.000 kg/ha biyoçar) biyoçar uygulamıştır. Araştırmacılar biyoçar uygulaması ile kök canlılığının önce arttığını sonra azaldığını, son yılda biyoçar uygulamaları arasında önemli bir fark elde edilmediğini ancak denemenin ilk yılında 1800 kg/ha biyoçar uygulamasının, denemenin son iki yılında ise 2400 kg/ha biyoçar uygulamasının kök canlılığını maksimum değere ulaştırdığını bildirmiştir. Özellikle kontrol parseline göre 2400 kg/ha biyoçar uygulamasının bütün bitkisinde kök gelişimini %164.12 oranında arttırdığını bildirmiştir. Ayrıca

Sürdürülebilir Toprak Üretkenliğinde Biyoçar Kullanımı

2400 kg/ha biyoçar uygulamasının kök canlılığını %177.8 ve kök ucu sayısını %100.9 oranında arttırdığı rapor edilmiştir.

4.2. Bitki Gövdesi ve Sürgünleri Üzerine Etkisi

Bir bitkinin gelişmesi için ihtiyaç duyduğu besin elementi ve suyu tedarik etmesi ve bitkisel üretkenliğin artırılması amacı ile biyoçar kullanımı son zamanlarda önemli bir araştırma konusu olmuştur (39). Biyoçar bitkiye sağladığı besin elementi ve su ile bitki gelişimine önemli oranlar da katkı sunmaktadır. Major ve ark. (121), 4 yıl süren arazi denemesinde mısır ve soya bitkilerine inorganik gübre ile farklı dozlarda biyoçar uygulamıştır. Araştırmacılar ilk iki yıl içinde biyoçarın toprakta besin elementi tutumunu arttırdığı ve toprak pH'sını düzenleyerek bitki gelişimini teşvik ettiğini rapor etmişlerdir.

Bitki gelişimini etkileyen en önemli faktör toprakta besin elementlerinin uzun süreli bir şekilde depolanması ve gerekli durumlarda çözünebilir forma geçmesidir. Özellikle de toprakta karbon tutumu ve azot gibi besin elementlerinin toprakta uzun süreli depolanması bitki gelişimi için hayati önem taşımaktadır (122). Kumlu ve tınlı tekstüre sahip iki farklı toprakta kompost ve kayın ağacından elde edilen biyoçarın yulaf bitkisinin gelişimi üzerine olan etkisinin incelendiği çalışmada kontrol parseline göre biyoçar uygulanan parselde bitki boyunda %33'lük bir artış olduğu bildirilmiştir. Ayrıca aynı çalışmada toprağa uygulanan biyoçar miktarı arttıkça toprakta depolanan besin elementi konsantrasyonunun arttığı ifade edilmiştir (123).

Biyoçarın bitkisel üretimde verim üzerine olan etkisini ortaya koymak için 155 farklı çalışmayı inceleyen Dai ve ark. (124), biyoçar uygulamalarının bitkinin verimine ortalama %16'luk bir etki ettiği, ancak bazı çalışmalarda biyoçarın bitki verimi üzerinde herhangi bir etkiye sahip olmadığı bazı çalışmalarda ise bitki üzerinde %97.4'lük bir etki ettiğini rapor etmişlerdir. Araştırmacılar biyoçar uygulamalarının bitki gelişimi üzerindeki bu denli farklılığın kullanılan biyoçar miktarından veya farklı toprak koşullarından kaynaklandığını bildirmiştir. Nitekim 2017'de benzer bir çalışma yapan Jeffrey ve ark. (125), biyoçarın ılıman iklimlerde bitkide verim artışına neredeyse hiç etkisinin olmadığını, ancak tropik iklim koşullarına sahip bölgelerde bitki gelişiminin ortalama %25 oranında artış sağladığını bildirmiştir. Araştırmacılar tropik bölgelerdeki toprakların asidik pH'lara sahip olması (pH = 5.7) ve ayrışmanın fazla olması nedeni ile verimliliğin düşük olduğu, yüksek pH'ya sahip biyoçar uygulamasının toprak pH'sını iyileştirdiğinden bu topraklarda bitki verimliliğini arttırdığını bildirmiştir.

5. Sonuç

Tarımsal üretimde sürdürülebilirlik ve verim artışının sağlanmasında en önemli faktörlerden birisi de, toprak özelliklerinin iyileştirilmesidir. Toprakların organik madde içeriğinin artırılması ve toprak sürdürülebilirliği için çeşitli uygulamalar yapılmaktadır. Biyoçar, toprak özelliklerinin geliştirilmesi, organik madde oranının artırılması, rizosfer canlılığı ve sürdürülebilirliği açısından ümit vaat eden bir ürün olarak öne çıkmaktadır. Yapılan çalışmalar, biyoçarın, toprağın bazı fiziksel,

kimyasal ve biyolojik özelliklerinin ve bitki toprak üstü ve altı aksamalarının iyileştirilmesinde katkı sunduğunu göstermektedir. Toprak su tutma kapasitesinin de artırılmasında yararları ortaya koyulmuş olan biyoçarın, iklim değişiminin yol açtığı negatif etkileri azaltmada önemli rol oynayacağı düşünülmektedir. Biyoçarın, toprak kimyası ve fiziki özelliklerine ve toprak-bitki etkileşimine etkilerinin kapsamlı çalışmalar ile ortaya koyulması, daha efektif sonuçlar elde edilmesine katkı sunacaktır. Bu çalışma ile biyoçar-toprak-bitki ilişkisi konusunda güncel çalışmalar ve son gelişmeler özetlenmeye çalışılmıştır.

Kaynaklar

1. Kopittke, P. M., Menzies, N. W., Wang, P., McKenna, B. A., Lombi, E., 2019. Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment international*, 132, 105078.
2. Howell, T.A., 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agronomy journal*, 93(2), pp.281-289.
3. Bamminger, C., Poll, C., & Marhan, S. (2018). Offsetting global warming-induced elevated greenhouse gas emissions from an arable soil by biochar application. *Global Change Biology*, 24(1), e318-e334.
4. Zhang, A., Bian, R., Hussain, Q., Li, L., Pan, G., Zheng, J., ... & Zheng, J. (2013). Change in net global warming potential of a rice–wheat cropping system with biochar soil amendment in a rice paddy from China. *Agriculture, ecosystems & environment*, 173, 37-45.
5. El-Naggar, A., Lee, S. S., Rinklebe, J., Farooq, M., Song, H., Sarmah, A. K., ... & Ok, Y. S., 2019. Biochar application to low fertility soils: A review of current status, and future prospects. *Geoderma*, 337, 536-554.
7. Igalavithana, A. D., Shaheen, S. M., Park, J. N., Lee, S. S., Ok, Y. S., 2015. Potentially toxic element contamination and its impact on soil biological quality in urban agriculture: A critical review. *Heavy metal contamination of soils*, 81-101.
8. Martinez, J. M., Galantini, J. A., Duval, M. E., 2018. Contribution of nitrogen mineralization indices, labile organic matter and soil properties in predicting nitrogen mineralization. *Journal of soil science and plant nutrition*, 18(1), 73-89.
9. Li, M., Wang, J., Guo, D., Yang, R., Fu, H., 2019. Effect of land management practices on the concentration of dissolved organic matter in soil: A meta-analysis. *Geoderma*, 344, 74-81.
10. Günal E, 2018. Sıvı Hayvan Gübresi ile Zenginleştirilmiş Biyoçarların Ekmeklik Buğdayın Gelişimi, Besin Elementi Alımı ve Toprak Kalitesine Etkileri. *Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*. s. 345. YÖK Tez No: 516795.
11. Günal, E., ve Erdem, H., 2018. Biyokömür; Tanımı, Kullanımı ve Tarım Topraklarındaki Etkileri. *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 15(2), 87-93.
12. Wang, C., Liu, J., Shen, J., Chen, D., Li, Y., Jiang, B., Wu, J., 2018. Effects of biochar amendment on net greenhouse gas emissions and soil fertility in a double rice cropping system: A 4-year field experiment. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 262, 83-96.
13. Jin, Z., Chen, C., Chen, X., Hopkins, I., Zhang, X., Han, Z., ... Billy, G., 2019. The crucial factors of soil fertility and rapeseed yield-A five year field trial with biochar addition in upland redsoil, China. *Science of the Total Environment*, 649, 1467-1480.
14. Chen, L., Liu, M., Ali, A., Zhou, Q., Zhan, S., Chen, Y., Pan, X., Zeng, Y., 2020. Effects of biochar on paddy soil fertility under different water management modes. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(4), 1810-1818.
15. Uzoma, K. C., Inoue, M., Andry, H., Fujimaki, H., Zahoor, A., Nishihara, E., 2011. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. *Soil use and management*, 27(2), 205-212.
16. Głab, T., Palmowska, J., Zaleski, T., Gondek, K., 2016. Effect of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sandy soil. *Geoderma*, 281, 11-20.

17. Edeh, I. G., Mašek, O., Buss, W., 2020. A meta-analysis on biochar's effects on soil water properties–New insights and future research challenges. *Science of the Total Environment*, 714, 136857.
18. Zhang, J., Amonette, J. E., Flury, M., 2021. Effect of biochar and biochar particle size on plant-available water of sand, silt loam, and claysoil. *Soil and Tillage Research*, 212, 104992.
19. Lehmann, J., Joseph, S., 2009. Biochar for Environmental Management: An Introduction. Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.). Biochar for environmental management: science and technology. *Earthscan*. pp. 1-12.
20. Castellini, M., Giglio, L., Niedda, M., Palumbo, A.D., Ventrella, D., 2015. Impact of biochar addition on the physical and hydraulic properties of a clay soil. *Soil and Tillage Research*, 154, 1-13.
21. Li, S., Zhang, Y., Yan, W., Shangguan, Z., 2018. Effect of biochar application method on nitrogen leaching and hydraulic conductivity in a siltyclaysoil. *Soil and Tillage Research*, 183, 100-108.
22. AhmadBhat, S., Kuriqi, A., Dar, M. U. D., Bhat, O., Sammen, S. S., Towfiqul Islam, A. R. M., Heddam, S. 2022. Application of biochar for improving physical, chemical, and hydrological soil properties: a systematic review. *Sustainability*, 14(17), 11104.
23. Logsdon, S. D. and Karlen, D. L., 2004. Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. *Soil and Tillage Research*, 78(2), 143-149.
24. Saffih-Hdadi, K., Défossez, P., Richard, G., Cui, Y. J., Tang, A. M., Chaplain, V., 2009. A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. *Soil and Tillage Research*, 105(1), 96- 103.
25. Lin, L., Han, S., Zhao, P., Li, L., Zhang, C., Wang, E., 2022a. Influence of soil physical and chemical properties on mechanical characteristics under different cultivation durations with Mollisols. *Soil and Tillage Research*, 224, 105520.
26. Laird, D., Fleming, P., Davis, D., Horton, R., Wang, B., Karlen, D., 2010. Impact of biochar amendments on the quality of a typical midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158(3–4), 443–449.
27. Verheijen, F. G., Zhuravel, A., Silva, F. C., Amaro, A., Ben-Hur, M., Keizer, J. J., 2019. The influence of biochar particle size and concentration on bulk density and maximum water holding capacity of sandy vs sandy loam soil in a column experiment. *Geoderma*, 347, 194-202.
28. Mustafa, A., Minggang, X., Shah, S. A. A., Abrar, M. M., Nan, S., Baoren, W., Núñez- Delgado, A., 2020. Soil aggregation and soil aggregate stability regulate organic carbon and nitrogen storage in a redsoil of southern China. *Journal of Environmental Management*, 270, 110894.
29. Borselli, L., Carnicelli, S., Ferrari, G.A., Pagliai, M. and Lucamante, G., 1996. Effects of gypsum on hydrological, mechanical and porosity properties of a kaolinitic crusting soil. *Soil technology*, 9(1-2), 39-54.
30. Liu, D., Ju, W., Jin, X., Li, M., Shen, G., Duan, C., Fang, L., 2021. Associated soil aggregate nutrients and controlling factors on aggregate stability in semiarid grassland under different grazing prohibition time frames. *Science of the Total Environment*, 777, 146104.
31. Annabi, M., Houot, S., Francou, C., Poitrenaud, M., Bissonnais, Y. L., 2007. Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities. *Soil Science Society of America Journal*, 71(2), 413-423.
32. Karami, A., Homaei, M., Afzalinia, S., Ruhipour, H., Basirat, S., 2012. Organic resource management: Impacts on soil aggregate stability and other soil physico- chemical properties. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 148, 22-28.
33. Sun, F. and Lu, S., 2014. Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(1), 26-33.
34. Ma, N., Zhang, L., Zhang, Y., Yang, L., Yu, C., Yin, G., Ma, X. 2016. Biochar improves soil aggregate stability and water availability in a mollisol after three years of field application. *PLoS one*, 11(5), e0154091.
35. He, Y., Xu, C., Gu, F., Wang, Y., Chen, J. 2018. Soil aggregate stability improves greatly in response to soil water dynamics under natural rains in long-term organic fertilization. *Soil and Tillage Research*, 184, 281-290.

36. Ma, S., Du, S., Pan, G., Dai, S., Xu, B., Tian, W. 2021. Organic molecular aggregates: From aggregation structure to emission property. *Aggregate*, 2(4), e96.
37. Ouyang, L., Wang, F., Tang, J., Yu, L., Zhang, R., 2013. Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties. *Journal of soil science and plant nutrition*, 13(4), 991-1002.
38. Soenneke, H., Hovi, J., Tammeorg, P., Turtola, E., 2014. Effect of biochar on phosphorus sorption and clay soil. *Geoderma*, aggregate stability, 219, 162-167.
39. Fu, T., Chen, H., Fu, Z., Wang, K., 2016. Surface soil water content and its controlling factors in a small karst catchment. *Environmental Earth Sciences*, 75(21), 1-11.
40. Liu, Q., Liu, B., Zhang, Y., Lin, Z., Zhu, T., Sun, R., ... Lin, X., 2017. Can biochar alleviate soil compaction stress on wheat growth and mitigate soil N₂O emissions?. *Soil Biology and Biochemistry*, 104, 8-17.
41. 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.
42. Obia, A., Mulder, J., Martinsen, V., Cornelissen, G., 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.
43. Jin, L., Wei, D., Yin, D., Zhou, B., Ding, J., Wang, W., Wang, L., 2020. Investigations of the effect of the amount of biochar on soil porosity and aggregation and crop yields on fertilized black soil in northern China. *Plos one*, 15(11), e0238883.
44. Lehmann, J., Rillig, M.C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W.C., Crowley, D., 2011. Biochar effects on soil biota—a review. *Soil biology and biochemistry*, 43(9), 1812-1836.
45. Kookana, R. S., Sarmah, A. K., Van Zwieten, L., Krull, E., Singh, B., 2011. Biochar application to soil: agronomic and environmental benefits and unintended consequences. *Advances in agronomy*, 112, 103-143.
46. Partey, S. T., Saito, K., Preziosi, R. F., Robson, G. D., 2016. Biochar use in a legume– rice rotation system: effects on soil fertility and crop performance. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62(2), 199-215.
47. Abujabhah, I. S., Bound, S. A., Doyle, R., Bowman, J. P., 2016. Effects of biochar and compost amendments on soil physico-chemical properties and the total community within a temperate agricultural soil. *Applied Soil Ecology*, 98, 243- 253.
48. Minasny, B., McBratney, A. B., 2018. Limited effect of organic matter on soil available water capacity. *European journal of soil science*, 69(1), 39-47.
49. Yang, F., Zhang, G.L., Yang, J.L., Li, D.C., Zhao, Y.G., Liu, F., Yang, R.M., Yang, F., 2014. Organic matter controls of soil water retention in an alpine grassland and its significance for hydrological processes. *Journal of Hydrology*, 519, 3086-3093.
50. Williams, A., Hunter, M.C., Kammerer, M., Kane, D.A., Jordan, N.R., Mortensen, D.A., Smith, R.G., Snapp, S., Davis, A.S., 2016. Soil water holding capacity mitigates down side risk and volatility in US rainfed maize: time to invest in soil organic matter?. *PloS one*, 11(8), p.e0160974.
51. Głąb, T., Żabiński, A., Sadowska, U., Gondek, K., Kopeć, M., Mierzwa–Hersztek, M., Tabor, S., 2018. Effects of co-composted maize, sewage sludge, and biochar mixtures on hydrological and physical qualities of sandy soil. *Geoderma*, 315, 27- 35.
52. Villagra-Mendoza, K., Horn, R. 2018. Effect of biochar addition on hydraulic functions of two textural soils. *Geoderma*, 326, 88-95.
53. Carvalho, M. T. M., Madari, B. E., Bastiaans, L., Van Oort, P. A. J., Leal, W. G. O., Heinemann, A. B., Meinke, H., 2016. Properties of a clay soil from 1.5 to 3.5 years after biochar application and the impact on rice yield. *Geoderma*, 276, 7-18.
54. Madari, B.E., Silva, M.A., Carvalho, M.T., Maia, A.H., Petter, F.A., Santos, J.L., Zeviani, W.M. 2017. Properties of a sandy clay loam Haplic Ferralsol and soybean grain yield in a five-year field trial as affected by biochar amendment. *Geoderma*, 305, 100-112.
55. Baiamonte, G., Crescimanno, G., Parrino, F., De Pasquale, C. 2019. Effect of biochar on the physical and structural properties of a sandy soil. *Catena*, 175, 294-303.
56. Razzaghi, F., Obour, P. B., Arthur, E., 2020. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. *Geoderma*, 361, 114055.

Sürdürülebilir Toprak Üretkenliğinde Biyoçar Kullanımı

57. Yu, O. Y., Raichle, B., Sink, S. 2013. Impact of biochar on the water holding capacity of loamy sand soil. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 4(1), 1-9.
58. Novak, J. M., Ippolito, J. A., Watts, D. W., Sigua, G. C., Ducey, T. F., Johnson, M. G., 2019. Biochar compost blends facilitates witchgrass growth in mine soils by reducing Cd and Zn bio availability. *Biochar*, 1(1), 97-114.
59. Laird, D. A., 2008. The charcoal vision: a win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. *Agronomy journal*, 100(1), 178-181.
60. Rees, F., Simonnot, M. O., Morel, J. L., 2014. Short-term effects of biochar on soil heavy metal mobility are controlled by intra-particle diffusion and soil pH increase. *European Journal of Soil Science*, 65(1), 149-161.
61. Chan, K.Y, Xu, Z., 2009. Biochar: nutrient properties and their enhancement. Chapter 5. In: Lehmann, J, Joseph, S, editors. *Biochar for environmental management science and technology*. London: *Earthscan*; p. 67-84.
62. Chintala, R., Mollinedo, J., Schumacher, T. E., Malo, D. D., Julson, J. L., 2014. Effect of biochar on chemical properties of acidic soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60(3), 393-404.
63. Demir, Y. (2021). The Effects of The Applications of Zeolite and Biochar to The Soils Irrigated With Treated Wastewater on The Heavy Metal Concentrations of The Soils and Leaching Waters from The Soils. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 16(1), 223-236.
64. Cross, A. and Sohi, S. P., 2011. The priming potential of biochar products in relation to labile carbon contents and soil organic matter status. *Soil biology and biochemistry*, 43(10), 2127-2134.
65. Lehmann, J., 2007. A handful of carbon. *Nature*, 447(7141), 143-144.
66. Lorenz, K., Lal, R. 2014a. Biochar application to soil for climate change mitigation by soil organic carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(5), 651-670.
67. Han, L., Sun, K., Yang, Y., Xia, X., Li, F., Yang, Z., Xing, B. 2020. Biochar's stability and effect on the content, composition and turnover of soil organic carbon. *Geoderma*, 364, 114184.
68. Lehmann, J., Cowie, A., Masiello, C. A., Kammann, C., Woolf, D., Amonette, J. E., Whitman, T., 2021. Biochar in climate change mitigation. *Nature Geoscience*, 14(12), 883-892.
69. Busscher, W. J., Novak, J. M., Evans, D. E., Watts, D. W., Niandou, M. A. S., Ahmedna, M., 2010. Influence of pecan biochar on physical properties of a Norfolk loamy sand. *Soil Science*, 175(1), 10-14.
70. Vaccari, F. P., Baronti, S., Lugato, E., Genesio, L., Castaldi, S., Fornasier, F., Miglietta, F., 2011. Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat. *European journal of agronomy*, 34(4), 231-238.
71. Schmidt, M. W., Skjemstad, J. O., Jäger, C., 2002. Carbon isotope geochemistry and nano morphology of soil black carbon: Black chernozemic soils in central Europe originate from ancient biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(4), 70-1.
72. Bolan, N. S., Kunhikrishnan, A., Choppala, G. K., Thangarajan, R., Chung, J. W., 2012. Stabilization of carbon in composts and biochars in relation to carbon sequestration and soil fertility. *Science of the Total Environment*, 424, 264-270.
73. Steinbeiss, S., Gleixner, G., Antonietti, M., 2009. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(6), 1301-1310.
74. Pathak, H., Singh, R., Bhatia, A., Jain, N., 2006. Recycling of rice straw to improve wheat yield and soil fertility and reduce atmospheric pollution. *Paddy and Water Environment*, 4(2), 111-117.
75. Zhang, Y., Liu, Y. R., Lei, P., Wang, Y. J., Zhong, H., 2018. Biochar and nitrate reduce risk of methyl mercury in soils under straw amendment. *Science of the Total Environment*, 619, 384-390.
76. Witt, C., Cassman, K. G., Olk, D. C., Biker, U., Liboon, S. P., Samson, M. I., Ottow, J. C. G., 2000. Crop rotation and residue management effects on carbon sequestration, nitrogen cycling and productivity of irrigated rice systems. *Plant and Soil*, 225(1), 263-278.

77. Shanthi, P., Renuka, R., Sreekanth, N. P., Babu, P., Thomas, A. P., 2013. A study of the fertility and carbon sequestration potential of ricesoil with respect to the application of biochar and selected amendments. *Annals of environmental science*, 7, 17-30.
78. Woolf, D., Amonette, J.E., Street-Perrott, F.A., Lehmann, J., Joseph, S., 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nat. Commun.* 1. Article Number 56.
79. Li, H., Dong, X., da Silva, E. B., de Oliveira, L. M., Chen, Y., Ma, L. Q., 2017. Mechanisms of metal sorption by biochars: biochar characteristics and modifications. *Chemosphere*, 178, 466-478.
80. Gul, S., Whalen, J. K., 2016. Biochemical cycling of nitrogen and phosphorus in biochar-amended soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 103, 1-15.
81. Lusiba, S., Odhiambo, J., Ogola, J., 2017. Effect of biochar and phosphorus fertilizer application on soil fertility: soil physical and chemical properties. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(4), 477-490.
82. Purakayastha, T. J., Bera, T., Bhaduri, D., Sarkar, B., Mandal, S., Wade, P., Tsang, D. C. 2019. A review on biochar modulated soil condition improvements and nutrient dynamics concerning crop yields: Pathways to climate change mitigation and global food security. *Chemosphere*, 227, 345-365.
83. Leng L., , Xu, S., Liu, R., Yu, T., Zhuo, X., Leng, S., Huang, H., 2020 Nitrogen containing functional groups of biochar: An overview. *Bioresource technology*, 298, 122286
84. Tomczyk, A., Sokołowska, Z., Boguta, P., 2020. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19(1), 191-215.
85. Steiner, C., Das, K. C., Melear, N., Lakly, D., 2010. Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar. *Journal of environmental quality*, 39(4), 1236-1242.
86. Hossain, M.K., Strezov, V., Nelson, P.F., 2015. Comparative assessment of the effect of waste water sludge biochar on growth, yield and metal bioaccumulation of cherry tomato. *Pedosphere*, 25(5), 680-685.
87. Liao, J., Liu, X., Hu, A., Song, H., Chen, X., Zhang, Z., 2020. Effects of biochar-based controlled release nitrogen fertilizer on nitrogen-use efficiency of oilseedrape (*Brassica napus* L.). *Scientific reports*, 10(1), 1-14.
88. Novak, J. M., Busscher, W. J., Ducey, T. D. 2009, Evaluation of designer biochars to ameliorate select chemical and physical characteristics of degraded soils. In *AICHE Annual Meeting, Nashville. 8-13 November 2009*. (conferencepaper).
89. Laird, D., Fleming, P., Davis, D., Horton, R., Wang, B., Karlen, D., 2010. Impact of biochar amendments on the quality of a typical midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158(3-4), 443-449.
90. Laghari, M., Mirjat, M. S., Hu, Z., Fazal, S., Xiao, B., Hu, M., Guo, D., 2015. Effects of biochar application rate on sandy desert soil properties and sorghum growth. *Catena*, 135, 313-320.
91. Pimenta, A. S., de Oliveira Miranda, N., de Carvalho, M. A. B., da Silva, G. G. C., Oliveira, E. M. M. 2019. Effects of biochar addition on chemical properties of a sandy soil from northeast Brazil. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(3), 1-6.
92. Chen, B., Zhou, D., Zhu, L., 2008. Transitional adsorption and partition of nonpolar and polar aromatic contaminants by biochars of pine needles with different pyrolytic temperatures. *Environmental science & technology*, 42(14), 5137-5143.
93. Mia, S., Dijkstra, F. A., Singh, B., 2017. Aging induced changes in biochar's functionality and adsorption behavior for phosphate and ammonium. *Environmental science & technology*, 51(15), 8359-8367.
94. Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Chan, K. Y., Downie, A., Rust, J., Cowie, A., 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and soil*, 327(1), 235-246.
95. Jiang, J., Xu, R. K., Jiang, T. Y., Li, Z., 2012. Immobilization of Cu (II), Pb (II) and Cd (II) by the addition of rice straw derived biochar to a simulated polluted Ultisol. *Journal of hazardous materials*, 229, 145-150.

96. Ghorbani, M., Asadi, H., Abrishamkesh, S., 2019. Effects of rice husk biochar on selected soil properties and nitrate leaching in loamy sand and clay soil. *International soil and water conservation research*, 7(3), 258-265.
97. Pandian, K., Subramaniyan, P., Gnasekaran, P., Chitraputhirapillai, S., 2016. Effect of biochar amendment on soil physical, chemical and biological properties and groundnut yield in rainfed Alfisol of semi-arid tropics. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62(9), 1293-1310.
98. Ameloot, N., Graber, E. R., Verheijen, F. G., De Neve, S. 2013. Interactions between biochar stability and soil organisms: review and research needs. *European Journal of Soil Science*, 64(4), 379-390.
99. Zimmerman, A. R., Gao, B., Ahn, M. Y., 2011. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils. *Soil biology and biochemistry*, 43(6), 1169-1179.
100. Bruun, S., Thomsen, I. K., Christensen, B. T., Jensen, L. S., 2008. In search of stable soil organic carbon fractions: a comparison of methods applied to soils labelled with ¹⁴C for 40 days or 40 years. *European Journal of Soil Science*, 59(2), 247-256.
101. Thies, J.E. and Rillig, M.C., 2012. Characteristics of biochar: biological properties. In *Biochar for environmental management* (pp. 117-138). *Routledge*.
102. Lin, Q., Tan, X., Almatrafi, E., Yang, Y., Wang, W., Luo, H., ... Zhang, C., 2022b. Effects of biochar-based materials on the bioavailability of soil organic pollutants and their biological impacts. *Science of The Total Environment*, 153956.
103. Manirakiza, E., Ziadi, N., Luce, M. S., Hamel, C., Antoun, H., Karam, A., 2019. Nitrogen mineralization and microbial biomass carbon and nitrogen in response to co-application of biochar and paper mill biosolids. *Applied Soil Ecology*, 142, 90-98.
104. Palansooriya, K. N., Wong, J. T. F., Hashimoto, Y., Huang, L., Rinklebe, J., Chang, S. X., ... Ok, Y. S., 2019. Response of microbial communities to biochar-amended soils: a critical review. *Biochar*, 1(1), 3-22.
105. Sial, T. A., Khan, M. N., Lan, Z., Kumbhar, F., Ying, Z., Zhang, J., Li, X., 2019. Contrasting effects of banana peels waste and its biochar on greenhouse gas emissions and soil biochemical properties. *Process Safety and Environmental Protection*, 122, 366-377.
106. Warnock, D.D., Lehmann, J., Kuyper, T.W., Rillig, M.C., 2007. Mycorrhizal responses to biochar in soil-concept and mechanisms. *Plant and soils*, 300(1-22), 9-2
107. Pietikäinen, J., Kiikkilä, O., Fritze, H., 2000. Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus. *Oikos*, 89(2), 231-242.
108. Mierzwa-Hersztek, M., Gondok, K., Baran, A., 2016. Effect of poultry litter biochar on soil enzymatic activity, ecotoxicity and plant growth. *Applied Soil Ecology*, 105, 144-150.
109. Ouyang, L., Tang, Q., Yu, L. A., Zhang, R., 2014. Effects of amendment of different biochars on soil enzyme activities related to carbon mineralization. *Soil Res*, 52, 706-716.
110. Ducey, T. F., Novak, J. M., Johnson, M. G., 2015. Effects of biochar blends on microbial community composition in two coastal plain soils. *Agriculture*, 5(4), 1060-1075.
111. Aiken, R. M. and Smucker, A. J. M., 1996. Root system regulation of whole plant growth. *Annual review of phytopathology*, 34(1), 325-346.
112. Matamala, R., Gonzalez-Meler, M. A., Jastrow, J. D., Norby, R. J., Schlesinger, W. H., 2003. Impacts of fine root turnover on forest NPP and soil C sequestration potential. *Science*, 302(5649), 1385-1387.
113. Nie, M., Lu, M., Bell, J., Raut, S., Pendall, E., 2013. Altered root traits due to elevated CO₂: a meta-analysis. *Global Ecology and Biogeography*, 22(10), 1095-1105.
114. Drogue, B., Combes Meynet, E., Moënnelocoz, Y., WisniewskiDyé, F., Prigent Combaret, C., 2013. Control of the cooperation between plant growth promoting rhizobacteria and crops by Rhizosphere signals. *Molecular microbial ecology of the rhizosphere*, 1, 279-293.
115. Rogers, E. D. and Benfey, P. N., 2015. Regulation of plant root system architecture: implications for crop advancement. *Current Opinion in Biotechnology*, 32, 93-98.
116. Alburquerque, J. A., Cabello, M., Avelino, R., Barrón, V., del Campillo, M. C., Torrent, J. 2015. Plant growth responses to biochar amendment of Mediterranean soils deficient in iron and phosphorus. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 178(4), 567-575.

117. Abiven, S., Hund, A., Martinsen, V., Cornelissen, G., 2015. Biochar amendment increases maize root surface areas and branching: a shovelomics study in Zambia. *Plant and soil*, 395(1), 45-55.
118. Zhu, Q., Kong, L., Xie, F., Zhang, H., Wang, H., Ao, X., 2018. Effects of biochar on seedling root growth of soybeans. *Chilean journal of agricultural research*, 78(4), 549-558.
119. Feng, L., Xu, W., Tang, G., Gu, M., Geng, Z., 2021. Biochar induced improvement in root system architecture enhances nutrient assimilation by cotton plant seedlings. *BMC plantbiology*, 21(1), 1-14.
120. Ren, T., Wang, H., Yuan, Y., Feng, H., Wang, B., Kuang, G., Liu, G., 2021. Biochar increases tobacco yield by promoting root growth based on a three-year field application. *Scientific Reports*, 11(1), 1-9.
121. Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S. J., Lehmann, J., 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and soil*, 333(1), 117-128.
122. Marris, E., 2006. Putting the carbon back: Black is the new green. *Nature*, 442(7103), 624-626.
123. Schulz, H., Dunst, G., Glaser, B., 2013. Positive effects of composted biochar on plant growth and soil fertility. *Agronomy for sustainable development*, 33(4), 817-827.
124. Dai, Y., Zheng, H., Jiang, Z., Xing, B. 2020. Combined effects of biochar properties and soil conditions on plant growth: a meta-analysis. *Science of the total environment*, 713, 136635.
125. Jeffery, S., Verheijen, F.G., Van Der Velde, M., Bastos, A.C., 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, ecosystems & environment*, 144(1), 175-187.