



Journal of Agriculture, Food and Ecology

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/jafe>



TARIMDA BİYOKÖMÜR: TOPRAK İYİLEŞTİRMESİ VE ÜRÜN VERİMLİLİĞİ İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİR BİR YAKLAŞIM

Ali ÖZCAN^{a*}, Ali TUNCER^b

^a Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü, Teknik Bilimler MYO, Karaman, Türkiye

^b Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Bitkisel Üretim ve Teknolojileri ABD, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karaman, Türkiye

Özet

Bu çalışmanın özeti, tarımda biyokömürün kullanımının toprak iyileştirmesi ve ürün verimliliği açısından sürdürülebilir bir yaklaşım sunduğunu vurgulamaktadır. Biyokömür, tarımsal ve ormansal atıkların kontrol edilen bir piroliz süreciyle karbonize edilmesiyle elde edilen karbon zengini bir malzemedir. Bu malzemenin topraklara uygulanması, toprak verimliliğini artırma, su tutma kapasitesini iyileştirme ve bitki besin maddelerinin daha etkili kullanılmasını sağlama potansiyeline sahiptir. Biyokömürün toprak mikrobiyotası ve biyolojik aktivite üzerinde olumlu etkileri, sürdürülebilir tarım uygulamalarına katkı sağlamaktadır. Ayrıca, biyokömürün iklim değişikliği ile mücadelede karbon tutma yeteneği, bu malzemenin çevresel sürdürülebilirlik açısından önemini vurgular. Bu çalışma, biyokömürün tarımda kullanımının çeşitli avantajlarını ele alarak, sürdürülebilir tarımın teşvik edilmesine yönelik önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: bitki besin maddeleri; çevresel sürdürülebilirlik; tarımsal atıklar; karbon zengini malzeme; sürdürülebilir tarım uygulamaları; piroliz; toprak iyileştirme;

Abstract

The summary of this study emphasizes that the use of biochar in agriculture presents a sustainable approach to soil improvement and crop productivity. Biochar is a carbon-rich material obtained through a controlled pyrolysis process of agricultural and forestry residues. The application of this material to soils has the potential to enhance soil fertility, improve water retention capacity, and enable more effective utilization of plant nutrients. The positive effects of biochar on soil microbiota and biological activity contribute to sustainable agricultural practices. Furthermore, the carbon sequestration capability of biochar in combating climate change underscores its significance for environmental sustainability. This study evaluates the various advantages of biochar utilization in agriculture, considering it a crucial step toward promoting sustainable farming practices.

Keywords: plant nutrients; environmental sustainability; agricultural waste; carbon-rich material; sustainable agricultural practices; pyrolysis; soil remediation;

*Sorumlu yazar.

E-posta adresi: aliozcan@kmu.edu.tr

1. Giriş

1.1. Sürdürülebilir Tarım Uygulamalarında Biyokömürün Rolü

Birleşmiş Milletler Tahinlerine göre dünya nüfusunun 2050 yılında yaklaşık 10 milyara ulaşması öngörülmektedir. İnsanlığın artan nüfusunun gıda ihtiyacını karşılayabilmesi için, mevcut tarımsal üretimin artırılması gerekmektedir. Sürdürülebilir tarım uygulamaları çevresel zararları minimize indirmeyi hedeflerken, elde edilen ürün miktarı ve kalitesinin maksimize etmeyi hedefler. Bu hedefe ulaşmak için geleneksel olarak uygulanan kimyasal ürünlere alternatif olarak, doğal ürünlere ihtiyaç vardır. Sürdürülebilir tarım uygulamaları kapsamı tarımın kendini koruyarak ve tüm doğal kaynaklarını sürdürerek uzun bir süre boyunca besleyebileceği bir süreç olarak adlandırılabilir. Toprak verimliliğini sürdürmek, yüzey ve yer altı kaynaklarını korumak, yenilenebilir enerji kaynakları geliştirmek ve tarım yöntemlerini iklim değişikliğine uygun hale getirmek sürdürülebilir tarımın amaçları arasındadır [1].

Biyokömür, biyokötle olarak adlandırılan tarım ve orman atıklarından alınan organik maddenin az oksijenli/oksijensiz ortamda yakılarak elde edilen malzemedir. Fiziksel olarak biyokömür siyah, yüksek gözenekli, hafif, ince taneli, ve yüksek yüzey alanına sahip olması ile karakterizedir. Biyokömür, tarımsal ürünlerin sürdürülebilir olarak eldesi ve çevreye uyumluluğu sayesinde önemli role sahip olması öngörülmektedir. Biyokömür aslında insanlar tarafından yaklaşık olarak 2,000 yıldır toprak yapısını geliştirme amacıyla kullanılmaktadır. Terra preta (siyah toprak), Amazon bölgesinde bulunan, biyokötle ve diğer organik maddelerin özel olarak karıştırılması ve karbonize edilmesi ile elde ettikleri verimliliği ile ünlü biyokömürün ilk örneklerindedir [2].

Toprak sağlığı tarımsal uygulamaların devamı ve ürün eldesi için kritik öneme sahiptir. Sağlıklı bir toprak içerisinde besin kullanılabilirliği, su tutma ve drenaj, biyolojik aktivitesi, böcek ve hastalıklara karşı direnç, karbon tutuşu, organik madde miktarı, katyon değişim kapasitesi gibi parametrelerle karakterize edilebilir. Sağlıklı bir toprakta tohum ya da fide, hayatta kalması için gerekli olan besin elementlerini suyla birlikte topraktan alır. Tarımsal aktivitenin yüksek olması ile birlikte, toprakta ki besin elementlerinde eksiklik, toprağın uygulanan besin takviyesi ve suyu yeterince absorbe edememesi sonucu bitki büyümesi ve gelişimi sekteye uğrar. Biyokömürler gözenekli yapıları sayesinde, toprağa uygulandıklarında, besin elementleri ve suyu tutarak bitkinin absorbe edebilmesi için imkan tanımaktadır.

1.2. Biyokömür Eldesi

Biyokömür eldesi için 4 farklı yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde temel amaç az oksijenli ya da oksijensiz ortamda karbonca zengin olan biyometaryelin ısı miktarı, ön işlem, ısı işlem süresi gibi parametreler kontrol edilerek istenen uygulamaya özgün olarak sentezlenmesidir. Bu yöntemler piroliz, hidrotermal karbonizasyon, gazlaştırma, kavurmadır. Bunların içerisinde de en verimli yöntem piroliz yöntemi olarak öne çıkarken, hidrotermal karbonizasyon yöntemi ise daha düşük sıcaklıklara ihtiyaç duyduğundan en ekonomik olandır. Hidrotermal karbonizasyon yönteminde biyometaryel ilk önce suda çözünür ve kapalı bir reaktöre konarak kontrollü bir şekilde ısıtılır [3]. Reaksiyon sonunda bitki doğal metaryelinde suda çözünmeyen kısımlar hidrokömür olarak elde edilir. Piroliz yöntemi biyometaryelin oksijensiz ortamda 250 – 900 °C aralıkta ısıyla parçalanması işlemidir [4]. Piroliz işlemi bitkinin doğal yapısında bulunan lignin, selüloz, hemiselüloz gibi kütlelerin depololimerizasyon ve parçalara ayrılmasından ardından farklı biyogaz, biyoyağ, biyokömür ortaya çıkar [5]. Piroliz yönteminde sıcaklığın artmasıyla birlikte elde edilen biyokömür miktarı düşer ve ortaya çıkar hidrokarbon gaz miktarı artar. Hızlı piroliz yöntemi biyometaryelin hızlı bir şekilde yüksek ısılarla yakılması işlemidir. Bu yöntem özellikle sıvı biyoyağ eldesi için uygun bir yöntemdir [6]. Yavaş piroliz yöntemi biyometaryelin dakika da 10 °C sıcaklık artırılarak uzun süreli yakma işlemidir. Bu yöntem özellikle karbonizasyon ve hızlı piroliz yöntemine kıyasla daha verimli biyokömür eldesi sağlar [7].

2. Bitki Üzerine Etkileri

2.1. Bitki Verimliliği Üzerine Etkileri

Biyokömürlerin bitkiler üzerine etkilerinin yapıldığı araştırma sayısı giderek artmaktadır. Biyokömür tipi, toprak yapısı ve biyokömürün üretim koşulları gibi faktörlere bağlı olarak bu etkilerin değiştiği görülmüştür [8]. Bir derleme çalışmasında incelenen araştırmaların yaklaşık yarısında kısa vadeli olumlu verim veya büyüme etkileri gözlenmiştir. %30'u önemli bir fark olmadığını rapor ederken, %20'si olumsuz verim veya büyüme etkilerini belirtmiştir [9].

Kuzey Laos bölgesinde 10 farklı yerde çeltik üzerine yapılan bir araştırmada biyokömür, gübreleme (N ve P) ve çeltik çeşitleri gibi değişkenlerin kullanıldığı 3 farklı deneme yapılmıştır. Bu denemelerin sonucunda gübreleme ve toprak değişkenliklerine bağlı olarak biyokömür uygulamalarının toprak ve çeltik verimliliğini artırma potansiyeli rapor edilmiştir [10].

Biyokömürün mısır bitkisi üzerine etkilerinin incelendiği bir sera denemesinde olumlu sonuçlar rapor edilmiştir. Kumlu toprak kullanılarak yapılan bu araştırma sonucunda, 15 ve 20 t/ha biyokömür karışım oranları, kontrolle karşılaştırıldığında mısır tane verimini sırasıyla %150 ve %98 oranında artırmıştır [11].

Mısır bitkisi üzerine açık tarla koşullarına yapılan bir diğer çalışmada ise Biyokömür uygulamasının mısır verimini artırdığı ve sera gazı emisyonunu azalttığı belirtilmiştir. Yapılan araştırmada N ve N olmadan kurulan denemeler de 2 farklı dozda (20-40 t/ha) biyokömür ilavesi uygulamaları yapılmış ve kontrol denemeleri ile karşılaştırılmıştır. N gübresi olmadan yapılan denemelerden kontrol denemesine göre 20 t/ha ve 40 t/ha biyokömür uygulamasının sırasıyla %15,8 ve %7,3 oranında mısır verimini artırdığı belirtilmiştir. Araştırmacılar biyokömür uygulama dozundaki artışla mısır veriminde gözlemlenen artışların paralel olmadığını çünkü C/N oranının yüksek biyokömür uygulamasında daha yüksek olduğunu vurgulamışlardır [12]. Yüksek C içeriği nedeniyle C/N oranının artması, N'nin immobilizasyonuna yol açtığı da daha önceki araştırmalarda belirtilmiştir [13]. Bu bağlamda düşünüldüğünde optimum biyokömür uygulamasının verimlilik için önemli olduğu söylenebilir.

Standart gübreleme ile birlikte kontrol 30 t/ha ve 60 t/ha biyokömür uygulaması yapılan ardışık yıllarda denemeler kurulan bir çalışmada biyokömür uygulamalarının iki dozda da makarnalık buğday (*Triticum durum* L.) verimini olumlu yönde etkilediği, iki farklı biyokömür dozu arasında belirgin bir fark bulunmadığı raporlanmıştır. Aynı zamanda denemenin ertesi yılında biyokömür uygulamalarının ardından hiç biyokömür uygulaması yapılmadan bile kontrol uygulamasına göre daha pozitif sonuçlar alındığı belirtilmiştir [14].

Sera koşullarında Turp (*Raphanus sativus* var. Long Scarlet) ile yapılan saksı denemesinde 3 farklı dozda biyokömür (10, 50 ve 100 t/ha) ve 3 farklı doz biyokömür + 100 kg N/ha uygulamaları yapılmıştır. 6 hafta sonunda hasat edilen turplarda yapılan analizler sonucunda en yüksek kuru madde oranının 100 t/ha + 100 kg N/ha uygulamasının sonucunda ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Diğer yandan kuru madde oranı üzerinde sadece biyokömür uygulamalarının N eklenerek yapılan uygulamalara göre çok daha düşük kaldığı belirtilmiştir [15].

103 çalışmanın incelenerek analiz edildiği geniş kapsamlı bir çalışmada araştırmacılar biyokömür uygulamasının genel olarak verimliliği artırdığını bulmuşlardır. Biyokömür uygulamalarının farklı toprak tiplerinde farklı bitki verimliliği gösterdiği belirtilmiştir. Biyokömür bitki verimliliğinde en yüksek etkiyi kumlu

topraklarda (%29,5) göstermiştir. Ayrıca asidik ($\text{pH} < 5,0$) topraklarda da bitki verimliliğini (%30,2) daha olumlu etkilediği belirtilmiştir. Bunlara ek olarak bitki gruplarının farklılıklarına göre biyokömürün etkisini inceleyen araştırmacılar, biyokömürün baklagil (%30,3), sebze (%28,6) ve çim bitkileri (%13,9) gruplarında daha etkili olduğunu bulmuşlardır. Dünya üretiminde ilk sıralar da bulunan mısır (%8,4), buğday (%11,3) ve pirinç (%6,6) için biyokömürün etkisinin pozitif ama diğer gruplara nazaran daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca mısır ve buğday bitkisinin biyokütle artışlarını inceleyen araştırmacılar mısırdaki artan verim ile birlikte artan biyokütle oranlarını bulurlarken, buğday için artan verim azalan biyokütle oranlarının olduğunu raporlamışlardır [16].

2.2. Abiyotik ve Biyotik Stresler Üzerine Etkileri

Biyokömür uygulamalarının bitki verimliliğine etkilerinin yanı sıra biyotik ve abiyotik streslere karşı gösterdiği etkilerde incelenmektedir. İki farklı bitki türünde (biber ve domates) kurşuni küf (*Botrytis cinerea*) ve külleme (*Leveillula taurica*) yaprak patojenlerinin, biber bitkisinde zararlı akar türünün (*Polyphagotarsonemus latus*) etkisinin araştırıldığı bir çalışmada toprağa eklenmiş %1-%5 biyokömür konsantrasyonlarında bu zararlı organizmalarını bitkiler üzerine etkilerini azalttığı belirtilmiştir [17]. Biyokömürün domateste kurşuni küf (*Botrytis cinerea*) hastalığının etkisine bakılan bir diğer çalışmada hastalık şiddetinin yaklaşık %50 azalmasına neden olduğu belirtilmiştir [18].

Sera koşullarında kuşkonmaz bitkisi üzerine yapılan bir çalışmada, biyokömür uygulamasının kuşkonmaz bitkisinin kök ağırlığını arttırdığı ve buna ek olarak abisküler mikoriza funguslarının kök kolonizasyonunu arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca *Fusarium oxysporum* f. sp. asparagi ve *Fusarium proliferatum* funguslarının neden olduğu kök lezyonlarının yüzdesinde azalmanın meydana geldiği belirtilmiştir [19].

Çilek bitkisi üzerine yapılan saksı denemelerinde biyokömür uygulamasının farklı hastalıklara karşı (*Botrytis cinerea*, *Colletotrichum acutatum* ve *Podosphaera apahanis*) bitki mekanizmasındaki etkileri araştırılmıştır. Gerçek zamanlı PCR çalışmaları ile gen ifadelerinin de incelendiği çalışmada biyokömür uygulamasının hastalıkların etkilerini azalttığı belirtilmiştir [20].

Biyokömürün kök çürüklüğü etmeni *Rhizoctonia solani* patojenine karşı hıyar bitkisi üzerindeki etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, biyokömür uygulamasının yapılmadığı kontrol deneylerinde kök çürüklüğünün daha erken gözlemlendiği belirtilmiştir. Yapılan saksı denemelerinin sonucunda nispeten düşük dozlarda biyokömür uygulamalarının belli oranlarda hastalığın etkilerinin baskılandığı araştırmacılar tarafından vurgulanmıştır. Fakat yüksek dozda biyokömür uygulamalarının kontrol deneyleri ile karşılaştırıldığında etkisiz olduğu gözlemlenmiştir [21].

Biyotik streslerin yanı sıra biyokömür uygulamalarının abiyotik stres koşullarına odaklanan çalışmaların sayısı da giderek artmaktadır. Soya fasulyesinde kuraklık stresi etkilerinin incelendiği bir çalışmada saksı denemesinde biyokömür uygulamasının (20 t/ha) tohum canlılığı, çimlenme yüzdesi ve klorofil içeriği gibi parametrelerde kuraklık stresini hafifletici etkisi olduğu gözlemlenmiştir [22].

Farklı sulama rejimleriyle yapılan bir saksı denemesinde biyokömür uygulamasının mısır bitkisinin biyokütlesini arttırdığı ve buna ek olarak su ve N kullanımını daha efektif hale getirdiği belirtilmiştir. Bu kapsamda araştırmacılar çalışmada zayıf kumlu topraklarda biyokömür uygulamasının su kısıt koşullarda bitki büyümesini olumlu etkileyebileceğini vurgulamışlardır [23].

Yine mısır üzerine yapılan başka bir denemede araştırmacılar yüksek tuzlu topraklarda biyokömür uygulamasının tuz stresi etkisini hafifleterek bitki büyümesini olumlu yönde etkilediğini belirtmişlerdir. Farklı oranlarda yapılan biyokömür uygulamalarında (%1, %2, ve %5) en iyi etkinin en yüksek biyokömür uygulamasında elde edildiği raporlanmıştır [24].

3. Toprak İyileştirmesi Üzerindeki Etkiler

Araştırmacılar biyokömürün yüksek karbon (C) tutma rolüne ek olarak organik atıkların geri dönüşümü ve toprak düzenleyici olma konusuna yönelik çalışmalar yapmaktadır. Tarım da giderek artan sürdürülebilirlik terimi aynı zaman da atıkların değerlendirilmesi ve organik malzemelerin kullanımının artması gibi misyonları da beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda toprakları daha verimli ve sürdürülebilir hale getirmek için birçok çalışma yapılmaktadır. Yapılan çalışmalar biyokömür uygulamalarının toprak üzerine etkilerini farklı yönleri ile incelemekte ve olumlu sonuçlar sunmaktadır.

3.1. Toprak yapısı geliştirme

Literatür verilerinin meta analizinin yapıldığı bir çalışmada biyokömür uygulamasının genel olarak toprak özelliklerini iyileştirdiği yönünde sonuca varılmıştır. Yapılan bu analizde araştırmacılar biyokömür üzerine

yapılan araştırmalar sonucunda ortalama olarak toprak hacim ağırlığının azaldığını (%7,6), toprak gözenekliliğini arttırdığını (%8,4) ve su tutma kapasitesini arttırdığını (%15,1) rapor etmişlerdir [25]. Yapılan bir başka çalışmada biyokömür uygulamasının kontrol çalışması ile kıyaslandığında biyokömür içeren topraklarda organik madde miktarının %41-%75 oranında arttığı, CO₂ salınım miktarının %29-%39 oranında azaldığı görülmüştür. Ayrıca çalışmada biyokömür uygulamasının toprak agregat stabilitesini iyileştirebileceği belirtilmiştir [26].

Yapılan bir derleme çalışmasında birçok literatür taranmış ve çalışmaların sonucunda biyokömürün toprak verimliliğini arttırdığı belirtilmiştir. Ayrıca biyokömür uygulamasının toprakta mikrobiyal aktiviteleri doğrudan ve dolaylı olarak etkilediğinden bahsedilmiştir [27]. Yapılan bir laboratuvar çalışmasında biyokömür uygulamasının bakteriyel biyokütle miktarını arttırdığı gösterilmektedir [28].

Biyokömür uygulamalarının toprağın fiziksel özellikleri üzerine yapılan bir derlemede biyokömürün genel olarak toprak hacmini arttırmakta ve yoğunluğunu azaltmakta olduğu belirtilmiştir. Biyokömür kumlu topraklar da killi toprak yapılarına göre daha etkili olmaktadır [29].

Yapılan bir araştırma 2 farklı biyokömür uygulaması yapılan toprakların uygulama yapılmayan kontrollere göre katyon değişim kapasitesinin (KDK) daha yüksek olduğu görülmüştür. Asidik topraklarla yapılan bu çalışmada kireçleme uygulamasının da KDK üzerine olumlu etkileri gözlemlenmiş fakat biyokömür uygulamalarının daha etkili olduğu görülmüştür [30].

3.2. Su tutma üzerindeki etkisi

Suyun kullanılabilirliği tarımsal üretim için önemli bir parametredir. Bu bağlamda araştırmacılar biyokömür uygulamalarının toprağın su tutma kapasitesinde nasıl bir değişikliğe neden olduğunu araştırmaktadır. Bu araştırmaların birinde kumlu topraklar da yapılan biyokömür uygulamasının sus tutma kapasitesini arttırdığı ve kumlu topraklarda tarımsal üretim için suyun kullanılabilirliğini olumlu etkileyebileceğini belirtmişlerdir [31]. Yapılan bir derlemede biyokömürün parçacık boyutuna göre su tutma kapasitesi değişim gösterebileceği, küçük boyutlu parçacıklara sahip biyokömürlerin su tutma potansiyelinin artabileceği vurgulanmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda biyokömür uygulamaları genel olarak toprağın fiziksel yapısını iyileştirdiğini gözlemlenmiştir [32].

3.3. Besin tutma ve kullanılabilirlik

Yapılan bir çalışmanın sonucunda biyokömür uygulamasının yüksek yağış alan bölgelerde besin tutma potansiyelinden dolayı toprak düzenleyici olarak kullanılabileceğini vurgulamıştır. Aynı çalışmada biyokömürün amonyum iyonunu adsorbe etme özelliği olduğu gösterilmiştir [33]. Farklı piroliz sıcaklıkları ve farklı materyaller kullanılarak yapılan bir biyokömür denemesinde nitrat amonyum ve fosfat tutma yeteneği incelenmiş ve deneme sonucunda biyokömürün besin tutma yeteneğinin biyokömürün fiziksel ve kimyasal yapısı ile ilgili olabileceği bundan dolayı biyokömür uygulamaları yapılmadan önce özelliklerinin belirlenmesi gerektiği belirtilmiştir. Bazı biyokömür uygulamalarının besin tutma yeteneği düşük çıkarken bazılarının çok yüksek besin tutma yeteneği olduğu vurgulanmıştır [34].

4. Sonuç

Sonuç olarak, biyokömürün sürdürülebilir tarımdaki uygulaması, çeşitli zorluklara karşı önemli bir vaat taşımakta ve dayanıklı, çevre dostu tarım sistemlerini teşvik etmektedir. Biyokömürün sağladığı avantajlar, artan toprak verimliliği, geliştirilmiş su tutma kapasitesi ve karbon tutma gibi unsurlar, tarımsal ekosistemlerin genel sağlığına katkıda bulunmaktadır. Sürdürülebilir bir toprak düzenleyici olarak, biyokömür, besin döngüsü, mikrobiyal aktivite ve toprağın uzun vadeli verimliliği üzerinde olumlu etkiler yaparak tarım uygulamalarına çok yönlü bir yaklaşım sunmaktadır. Potansiyel avantajlar önemli olmakla birlikte, biyokömür kalitesi, uygulama oranları ve yerel toprak ve bitki koşullarıyla uyumluluk gibi faktörleri düşünmek kritiktir. Devam eden araştırmalar, tarla denemeleri ve bilgi paylaşımı, biyokömürün sürdürülebilir tarım üzerindeki olumlu etkilerini maksimize etmek için esastır. İklim değişikliği zorluklarıyla başa çıkarken ve gıda güvenliğini sağlamaya çalışırken, biyokömürün tarım uygulamalarına entegrasyonu, dayanıklı ve çevre dostu tarım sistemleri inşa etmek için umut verici bir yol olarak görülmektedir.

Kaynaklar

- [1] Lichtfouse, E., Navarrete, M., Debaeke, P., Souchère, V., Alberola, C., & Ménassieu, J. (2009). Agronomy for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 1–6. <https://doi.org/10.1051/agro:2008054>.
- [2] Ayaz, M., Feizienė, D., Tilvikienė, V., Akhtar, K., Stulpinaitė, U., & Iqbal, R. (2021). Biochar role in the sustainability of agriculture and environment. *Sustainability (Switzerland)*, 13(3), 1–22. <https://doi.org/10.3390/su13031330>.
- [3] Amalina, F., Razak, A. S. A., Krishnan, S., Zularisam, A. W., & Nasrullah, M. (2022). A comprehensive assessment of the method for producing biochar, its characterization, stability, and potential applications in regenerative economic sustainability – A review. *Cleaner Materials*, 3(September 2021), 100045. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100045>.
- [4] Wang, J., & Wang, S. (2019). Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1002–1022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282>.
- [5] López-Beceiro, J., Díaz-Díaz, A. M., Álvarez-García, A., Tarrío-Saavedra, J., Naya, S., & Artiaga, R. (2021). The complexity of lignin thermal degradation in the isothermal context. *Processes*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/pr9071154>.
- [6] Ha, J. H., & Lee, I. G. (2020). Study of a method to effectively remove char byproduct generated from fast pyrolysis of lignocellulosic biomass in a bubbling fluidized bed reactor. *Processes*, 8(11), 1–14. <https://doi.org/10.3390/pr8111407>.
- [7] Shahbaz, M., AlNouss, A., Parthasarathy, P., Abdelaal, A. H., Mackey, H., McKay, G., & Al-Ansari, T. (2022). Investigation of biomass components on the slow pyrolysis products yield using Aspen Plus for techno-economic analysis. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(3), 669–681. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01040-1>.
- [8] Semida, W. M., Beheiry, H. R., Sétamou, M., Simpson, C. R., Abd El-Mageed, T. A., Rady, M. M., & Nelson, S. D. (2019). Biochar implications for sustainable agriculture and environment: A review. *South African Journal of Botany*, 127, 333–347. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.11.015>.
- [9] Spokas, K. A., Cantrell, K. B., Novak, J. M., Archer, D. W., Ippolito, J. A., Collins, H. P., Boateng, A. A., Lima, I. M., Lamb, M. C., McAloon, A. J., Lentz, R. D., & Nichols, K. A. (2012). Biochar: A Synthesis of Its Agronomic Impact beyond Carbon Sequestration. *Journal of Environmental Quality*, 41(4), 973–989. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0069>.
- [10] Asai, H., Samson, B. K., Stephan, H. M., Songyikhangsuthor, K., Homma, K., Kiyono, Y., Inoue, Y., Shiraiwa, T., & Horie, T. (2009). Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos. 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. *Field Crops Research*, 111(1–2), 81–84. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.10.008>.
- [11] Uzoma, K. C., Inoue, M., Andry, H., Fujimaki, H., Zahoor, A., & Nishihara, E. (2011). Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. *Soil Use and Management*, 27(2), 205–212. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00340.x>.
- [12] Zhang, A., Liu, Y., Pan, G., Hussain, Q., Li, L., Zheng, J., & Zhang, X. (2012). Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain. *Plant and Soil*, 351(1–2), 263–275. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0957-x>.
- [14] 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. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.01.006>.
- [15] Chan, K. Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., & Joseph, S. (2007). Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research*, 45(8), 629–634. <https://doi.org/10.1071/SR07109>.
- [16] Liu, X., Zhang, A., Ji, C., Joseph, S., Bian, R., Li, L., Pan, G., & Paz-Ferreiro, J. (2013). Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions-a meta-analysis of literature data. *Plant and Soil*, 373(1–2), 583–594. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1806-x>.
- [17] Elad, Y., David, D. R., Harel, Y. M., Borenshtein, M., Kalifa, H. Ben, Silber, A., & Graber, E. R. (2010). Induction of systemic resistance in plants by biochar, a soil-applied carbon sequestering agent. *Phytopathology*, 100(9), 913–921. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-100-9-0913>.
- [18] Mehari, Z. H., Elad, Y., Rav-David, D., Graber, E. R., & Meller Harel, Y. (2015). Induced systemic resistance in tomato (*Solanum lycopersicum*) against *Botrytis cinerea* by biochar amendment involves jasmonic acid signaling. *Plant and Soil*, 395(1–2), 31–44. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2445-1>.
- [19] Elmer, W. H., & Pignatello, J. J. (2011). Effect of biochar amendments on mycorrhizal associations and Fusarium crown and root rot of asparagus in replant soils. *Plant Disease*, 95(8), 960–966. <https://doi.org/10.1094/PDIS-10-10-0741>.
- [20] Harel, Y. M., Elad, Y., Rav-David, D., Borenstein, M., Shulchani, R., Lew, B., & Graber, E. R. (2012). Biochar mediates systemic response of strawberry to foliar fungal pathogens. *Plant and Soil*, 357(1), 245–257. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1129-3>.
- [21] Jaiswal, A. K., Elad, Y., Graber, E. R., & Frenkel, O. (2014). Rhizoctonia solani suppression and plant growth promotion in cucumber as affected by biochar pyrolysis temperature, feedstock and concentration. *Soil Biology and Biochemistry*, 69, 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.10.051>.
- [22] Hafeez, Y., Iqbal, S., Jabeen, K., Shahzad, S., Jahan, S., & Rasul, F. (2017). Effect of biochar application on seed germination and seedling growth of *Glycine max* (L.) merr. Under drought stress. *Pakistan Journal of Botany*, 49(Special Issue), 7–13.

- [23] Haider, G., Koyro, H. W., Azam, F., Steffens, D., Müller, C., & Kammann, C. (2015). Biochar but not humic acid product amendment affected maize yields via improving plant-soil moisture relations. *Plant and Soil*, 395(1–2), 141–157. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2294-3>.
- [24] Kim, H. S., Kim, K. R., Yang, J. E., Ok, Y. S., Owens, G., Nehls, T., Wessolek, G., & Kim, K. H. (2016). Effect of biochar on reclaimed tidal land soil properties and maize (*Zea mays* L.) response. *Chemosphere*, 142, 153–159. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.06.041>.
- [25] Omondi, M. O., Xia, X., Nahayo, A., Liu, X., Korai, P. K., & Pan, G. (2016). Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data. *Geoderma*, 274, 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.03.029>.
- [26] Hua, L., Lu, Z., Ma, H., & Jin, S. (2014). Effect of biochar on carbon dioxide release, organic carbon accumulation, and aggregation of soil. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33(3), 941–946. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ep.11867>.
- [27] Palansooriya, K. N., Wong, J. T. F., Hashimoto, Y., Huang, L., Rinklebe, J., Chang, S. X., Bolan, N., Wang, H., & Ok, Y. S. (2019). Response of microbial communities to biochar-amended soils: a critical review. *Biochar*, 1(1), 3–22. <https://doi.org/10.1007/s42773-019-00009-2>.
- [28] Prayogo, C., Jones, J. E., Baeyens, J., & Bending, G. D. (2014). Impact of biochar on mineralisation of C and N from soil and willow litter and its relationship with microbial community biomass and structure. *Biology and Fertility of Soils*, 50(4), 695–702. <https://doi.org/10.1007/s00374-013-0884-5>.
- [29] Blanco-Canqui, H. (2017). Biochar and Soil Physical Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 81(4), 687–711. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017>.
- [30] 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. <https://doi.org/10.1080/03650340.2013.789870>.
- [31] Basso, A. S., Miguez, F. E., Laird, D. A., Horton, R., & Westgate, M. (2013). Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils. *GCB Bioenergy*, 5(2), 132–143. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12026>.
- [32] Blanco-Canqui, H. (2017). Biochar and Soil Physical Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 81(4), 687–711. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017>.
- [33] Ding, Y., Liu, Y. X., Wu, W. X., Shi, D. Z., Yang, M., & Zhong, Z. K. (2010). Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns. *Water, Air, and Soil Pollution*, 213(1–4), 47–55. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0366-4>.
- [34] Yao, Y., Gao, B., Zhang, M., Inyang, M., & Zimmerman, A. R. (2012). Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil. *Chemosphere*, 89(11), 1467–1471.