



TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME DERGİSİ

<http://dergi.toprak.org.tr>



Çeltik sapından elde edilen biyokömürün bazı karakterizasyon özellikleri

Muhittin Onur Akça ^{1,*}, Sadık Usta ¹, Veli Uygur ²,
 Sonay Sözüdoğru Ok¹

¹ Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Ankara

² Isparta Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Isparta

Özet

Son yıllarda oldukça önemli olan biyokömür özellikleri, kullanım alanının belirlenmesi ve toprak ortamındaki potansiyel fonksiyonlarının tahmininde kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada çeltik saplarından 400°C'de yavaş piroliz yoluyla elde edilen biyokömürün bazı fizikokimyasal özellikleri ileri analitik tekniklerle incelenmiştir. Çalışmada, elde edilen biyokömür materyalinde; verim, uçucu madde (UM), mineral kül içeriği (MKİ), sabit karbon (SK), elementel analizler (C, H, N, S), spektroskopik analizler (FT-IR, ¹³C NMR, XPS, XRF ve XRD), görüntüleme analizi (SEM-EDX), parçacık boyutu ve spesifik yüzey alanı analizleri yapılmıştır. Elde edilen bu sonuçlara göre, 400 °C'de pirinç sap/samanından üretilen biyokömür, büyük gözeneklere ve orta ila düşük özgül yüzey alanına sahiptir; zayıf kristalite, karbonca zengin, selülozik amorf bir malzemedir ve silvit (KCl) mineralini içermektedir. Bu özellikleri biyokömürün topraklarda karbon stabilizasyonunda kullanımına uygun olabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Çeltik sapı, biyokömür, karakterizasyon, spektroskopi.

Some characterization properties of biochar obtained from rice straw

Abstract

The properties of biochar, which are very important in the last decade, are critical in determining usage purpose and estimating potential functions in the soil environment. In this study, some physico-chemical properties of biochar, obtained from slow pyrolysis process at 400 °C from rice straw, were investigated by means of advanced analytical techniques. In the study, the properties of biochar material such as yield, volatile matter (VM), mineral ash content (MAC), fixed carbon (FC), elemental composition (C, H, N, S), spectroscopic properties (FT-IR, ¹³C NMR, XPS, XRF and XRD), morphological attributes (SEM-EDX), particle size and specific surface area were investigated. According to the results biochar produced from rice straw at 400 °C has large pores and moderate to low specific surface area; is a weakly crystalline, carbon-rich cellulosic amorphous material; contains silvite (KCl) mineral. These properties show that biochar may be suitable for use in carbon stabilization in soils.

Keywords: Rice straw, Biochar, Characterization, Spectroscopy.

© 2020 Türkiye Toprak Bilimi Derneği. Her Hakkı Saklıdır

Giriş

Tarım, küresel ekonominin şekillenmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Boyabatlı ve ark., 2019). Küresel nüfus artışıyla, gıda talebinin 2050 yılına kadar % 70 oranında artması beklenmektedir (Samantarai ve Achakzai, 2014). Toprak sağlığından ve tarımsal sistemden ödün vermeden büyüyen nüfusa yeterli miktarda ve kalitede gıda sağlanması, tarım sektöründeki kritik zorluklardan biri haline gelmiştir (Sashidhar ve ark., 2020).

Biyokütle, sürdürülebilir enerji ve kimyasal hammaddenin kaynağı olarak bilinmektedir. Biyokütlenin biyokömüre dönüştürülmesi, büyük ölçüde artan enerji talebi ve sera gazı emisyonlarına ilişkin kaygılar nedeniyle büyük ilgi çekmektedir (Heo ve ark., 2010). Biyokömür ifadesi yeni bir terim olmakla birlikte tarımda meydana gelen sorunların azaltılması için bir yöntem olarak biyokömür uygulamalarına duyulan ilgi

* Sorumlu yazar:

Tel. : 0312 596 11 88

E-posta : moacka@ankara.edu.tr

Geliş Tarihi : 06 Ağustos 2020

Kabul Tarihi : 02 Ekim 2020

e-ISSN : 2146-8141

DOI : 10.33409/tbbdd.777226

giderek artmaktadır. Biyokömür, [Lehmann ve Joseph \(2009\)](#) tarafından inert bir atmosferde biyokütlenin ısıtılması ile üretilen karbonca zengin bir piroliz ürünü olarak tanımlanmıştır.

Bitkisel ve hayvansal atıklardan elde edilen çok sayıda biyokütlenin pirolizi araştırılmıştır ([Ahmad ve ark., 2014](#)). Tarımsal atıklar, biyokömür üretimi için yaygın olarak bulunabilen ve ucuz malzemelerdir ([Chen ve ark., 2011](#)). Canlıların beslenmesinde çok önemli bir yere sahip olan tahıllar, dünyada ve ülkemizde geniş ekim alanlarına sahiptir. Dünyadaki insanların yarısından fazlasının beslenmesinde ve günlük enerji ihtiyacının % 25'ini karşılayan ([Sürek 2002](#)) çeltik tahıllar içinde buğdaydan sonra en önemli kültür bitkisidir ([San, 2005](#)). Türkiye'de insanların önemli bir bölümü geçimini tarımsal faaliyetlerden sağlamaktadır. Tahıl yetiştiriciliği tarımsal faaliyetler içerisinde en büyük paya sahip olan bitki türü olup, bu grup içerisinde yer alan çeltik 2019 yılı verilerine göre 126419 ha ekim alanında 1000000 ton rekolteye sahiptir ([TÜİK, 2019](#)). Çeltik tarımı neticesinde her yıl ortalama olarak 150 milyon ton civarında çeltik sapı üretilmektedir. Çeltik sapı ve kavuzu sahip olduğu özellikler nedeniyle hayvan beslenmesi, toprağa direk olarak karıştırılması ya da başka maksatlarla kullanımı son derece sınırlı olan bir materyaldir. Bu nedenle çiftçiler bu potansiyel organik madde kaynağından yakarak kurtulma yolunu genellikle tercih etmektedirler. Bu materyalin biyokömüre dönüştürülerek çeltik alanlarında ya da diğer tarım alanlarında toprak kalitesini özellikle de organik maddesini arttırmak ve karbon döngüsünü yavaşlatma maksadıyla kullanım potansiyeli bulunmaktadır.

Biyokömüre dönüştürülen materyalin karakterizasyonu, topraklarda ya da diğer alanlarda oluşturabileceği etkilerin değerlendirilmesi ve potansiyel kullanım alanlarının dizayn edilmesi için ilk adımdır ([Verheijen ve ark., 2010](#)). Biyokömür ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, piroliz koşulları (ısıtma sıcaklığı ve süresi) ve hammadde kaynağı gibi parametreler elde edilen materyalin fizikokimyasal özellikleri ile yakından ilişkilidir ([Enders ve ark., 2012](#)). Bu nedenle, biyokömürün karakteristiklerinin bilinmesi topraklara en uygun uygulamalarının tanımlanmasında kilit bir faktördür. Biyokömürün topraklara uygulandığında gösterdiği etki, uygulanan materyalin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin bir fonksiyonudur. Ayrıca, özellikleri ortaya konulan biyokömürler, daha yüksek agronomik etkiye sahip olabilecek, belirli bir hedefe dönük özel fonksiyonlara sahip yeni biyokömürlerin dizayn edilmesinde kritik öneme sahiptir. Ancak biyokömür özelliklerinin bu uygulamalarla ilişkisi ülkemizde henüz tam olarak anlaşılabilir değildir.

Bu çalışmanın amacı, çeltik sapından elde edilen biyokömürün tanımlayıcı bazı fizikokimyasal özelliklerinin, temel, elementel, spektroskopik, görüntüleyici, ışınal, boyut ve yüzey analiz teknikleri ile ortaya konulmasıdır.

Materyal ve Yöntem

Materyal

Bu çalışmada, Çorum ili Osmancık İlçesi'nde çeltik üretimi yapılan bir araziden (Enlem: 34.85611379 N, Boylam: 40.88687341 E) alınan çeltik sapları biyokütle kaynağı olarak kullanılmıştır.

Yöntem

Biyokömür materyalinin hazırlanması ve pirolizi

Öncelikle çeltik sapları, 4-5 cm boyuta gelecek şekilde küçültülmüş, 60 °C fırında % 10'dan az nem içerecek biçimde 24 saat süreyle kurutulmuş ve ardından biyokömür üretme fırınına (PANOSAN, DTC 860) yerleştirilmiştir. Biyokömür materyali, çeltik sapının oksijensiz ortamda 400 °C'de ısıtılması yoluyla "yavaş piroliz" işlemi ile elde edilmiştir. Biyokömür üretiminde fırın sıcaklığı 10 °C dk⁻¹ arttırılmış ve 2 saat 400 °C de tutulmuştur. Biyokömür materyali daha sonra 0.25 mm'den elenerek karakteristiklerinin belirlenmesi için homojen hale getirilmiştir.

Karakterizasyon yöntemleri

Biyokömür materyalinin karakterizasyonuna ait analizler Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Laboratuvarları ve ODTÜ Merkez Laboratuvarları'nda yapılmıştır. Bu analizlere ait yöntemler aşağıdaki verilmiştir.

Verim, mineral kül miktarı, uçucu madde ve sabit karbon: Amerikan Test ve Malzemeler Derneği ([ASTM, 2007](#))'ye göre belirlenmiştir. Belirtilen bu değerler aşağıdaki formüller yardımı ile hesaplanmıştır.

$$(\%) \text{Biyokömür verimi} = \frac{\text{Tartılan biyokömür miktarı (g)}}{\text{Hammaddenin fırın kuru ağırlığı}} \times 100 \quad (1)$$

$$(\%) \text{Mineral kül içeriği} = \frac{Ma}{Mb} \times 100 \quad (2)$$

Ma: 750 °C sonrası tartılan ağırlık, Mb: 105 °C sonrası tartılan ağırlık

Biyokömürün uçucu madde içeriği, örneğin 950 °C'ye kadar kapalı bir seramik potada ısıtılıp 7 dakika bekletildikten sonra meydana gelen "ağırlık eksilmesi" nden belirlenmiştir.

$$(\%) \text{ Sabit karbon} = (\%) 100 - (\% \text{ Mineral kül İçeriği} + \% \text{ Uçucu madde}) \quad (3)$$

eşitliğinden hesaplanmıştır.

Organik kısmın elementel içeriği; biyokömürün C, H, N ve S içerikleri elementel analiz cihazı (LECO 932) kullanılarak belirlenmiştir. Biyokömürün fonksiyonel grupları FT-IR (Fourier Dönüşümlü Kızıl Ötesi Spektrometresi, Perkin Elmer 400) cihazı kullanılarak MIR (4000-400 cm⁻¹) spektrum aralığında belirlenmiştir. Katı NMR ¹³C (Katı Nükleer Manyetik Rezonans Spektrometresi, Bruker BioSpin AG) moleküler yapı incelenmiştir. XPS (X Işını Fotoelektron Spektrometresi, PHI 5000 Versaprobe) cihazı ile biyokömür yüzeyinin kimyasal bileşimi belirlenmiştir. SEM (Taramalı Elektron Mikroskop, Quanta 400F Field Emission) biyokömürün makroporozitesini ve fiziksel morfolojisi görüntülenmiştir (Angin, 2013). Biyokömürdeki mineral yapılar ve kristallenme dereceleri XRD (X Işını Difraksiyonu, Rigaku Ultima-IV X-Işını Kırınım Cihazı) ile belirlenmiştir. XRF (X ışını Floresans Spektrometresi, Rigaku ZSX Primus II) cihazı ile organik maddenin ana bileşenleri dışındaki elementel bileşimi belirlenmiştir. Parçacık boyutu Malvern Mastersizer 2000 cihazı ile belirlenmiştir. Biyokömürün yüzey alanı Quantachrome Corporation, Autosorb-6 cihazı ile (iç ve dış yüzey ya da toplam aktif yüzey) N₂ adsorpsiyon tekniği kullanılarak belirlenmiştir (Brunauer-Emmett-Teller, 1938).

Bulgular ve Tartışma

Biyokömüre ait temel analiz sonuçları

Analizlerde kullanılan biyokömür materyali 0.25 mm'lik elekten elenmiştir. Bu materyale ait bazı özellikler Çizelge 1' de verilmiştir.

Temel analizlerden; uçucu madde (UM), sabit karbon (SK) ve mineral kül içeriği (MKİ) biyokömür hakkında bazı karakteristik bilgiler sağlar. Mineral kül içeriği, stabilite ve biyokömürün inorganik element içeriği ile ilişkilidir (Fidel, 2015). Uçucu madde ve sabit karbon ise kararsız (labil) ve rekalsitran (ayrışmaya karşı dirençli) biyokömür özelliklerini tahmin etmek için kullanılmaktadır (Archontoulis ve ark., 2016).

Çizelge 1. Çeltik sapından elde edilen biyokömür materyaline ait temel analizler

Biyokömür verimi (%)	Uçucu madde (UM) (%)	Mineral kül içeriği (MKİ) (%)	Sabit karbon (SK) (%)
42.1	25.7	30.3	44.0

Biyokömür verimi

Biyokömür materyalinin verimi % 42.1 olarak bulunmuştur. Yapılan diğer çalışmalara bakıldığında; Sun ve ark. (2014) yaptıkları bir çalışmada, çeltik sapından elde edilen biyokömür verimini % 34.3; Jindo ve ark. (2014) ise % 39.3 olarak bulmuşlardır. Bu temel farklılığın nedeni materyallerdeki farklılıklar ve piroliz koşullarındaki (sıcaklık ve inert ortam) değişimlerdir (Demirbas ve Arin, 2002; Uzun ve ark., 2006; Tsai ve ark., 2007).

Mineral kül miktarı

Biyokömürün mineral kül miktarı % 30.3 olarak bulunmuştur. Çeltik sapından 400 °C'de elde edilen biyokömürler ile yapılan çalışmalara bakıldığında; Naeem ve ark. (2017) % 36, Deka ve ark. (2018) % 24.97 ve Manna ve ark. (2020) % 26.1 mineral kül bulmuşlardır. Yapılan çalışmalara bakıldığında bulunan değer arada bir değer olduğu ve diğer çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmektedir. Mineral kül miktarı, biyokömürün organik maddesinin ve bünyesinde bulunan suyun yanma işleminden sonra uzaklaştırılmasıyla kalan inorganik makro ve mikro elementlerinin bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle, kül içeriği, orijinal hammadde kaynağının inorganik içeriğinin bir fonksiyonudur. Piroliz işlemi sırasında, karbon ve oksijen kaybı en çok olan iki elementtir. Artan piroliz sıcaklığıyla birlikte biyokömür veriminin düşmesine bağlı olarak kül içeriği de artmaktadır. Biyokömürün kül içeriği, üretim yöntemine ve hammadde kaynağına bağlı olarak oldukça değişkendir (Enders ve ark., 2012; Mukome ve ark., 2013). Mineral kül içeriğinin; pH, elektriksel iletkenlik ve kimyasal bileşimi ile yakından ilişkili olduğu belirtilmiştir (Lehmann ve ark., 2011). Bu ilişkiler kül miktarının, hammadde kaynağındaki Ca, K ve Mg tuzlarının hidroliz ürünlerinden oluşan karbonatlar ve oksitler olarak belirtilmektedir.

Uçucu madde miktarı

Biyokömürün uçucu madde miktarı % 25.7 olarak bulunmuştur. Kararsız karbon (labil) ile yakından ilişkili olan uçucu madde, biyokömürün stabilitesini göstermektedir. Çeltik sapından 400 °C'de elde edilen biyokömürler ile yapılan çalışmalara bakıldığında; Liu ve ark. (2018) % 32.21, Chandra ve ark. (2020) % 48.63

uçucu madde bulmuşlardır. Yapılan çalışmalara bakıldığında elde edilmiş olan bu değer düşük olduğu görülmektedir.

Sabit karbon değeri

Biyokömürün sabit karbon değeri % 44.0 olarak bulunmuştur. Sabit karbon, kararlı karbon içeriği ile yakından ilişkilidir. Sabit karbon terimi, çevresel açıdan değerlendirildiğinde “karbon negatif materyal” potansiyelini göstermektedir; daha yüksek verim, iklim değişikliğini azaltma aracı olarak daha yüksek potansiyel anlamına gelmektedir (Brassard ve ark., 2016). Sabit karbon, artan piroliz sıcaklığı ile artmakta ve biyokömür stabilite göstergesi olarak kullanılabilir.

Çeltik sapından 400 °C’de elde edilen biyokömürler ile yapılan çalışmalara bakıldığında; Li ve ark. (2018) % 21.88, Liu vd. (2018) % 26.71 sabit karbon bulmuşlardır. Yapılan bu çalışma ile bulunan mineral sabit karbon değeri % 44.0 olarak, yapılan diğer çalışmalara göre yüksek görülmektedir. Bu da çalışmamızda üretilen biyokömürün daha stabil olduğunun bir göstergesidir.

Biyokömüre ait elementel analiz sonuçları

Biyokömür materyalinin C, H, N ve S değerleri, elementel analiz cihazı (LECO 932) kullanılarak analiz edilmiş; ayrıca materyaldeki oksijen içeriği, O/C, H/C ve C/N oranları aşağıdaki eşitlikler yardımıyla ile bulunmuştur. Bu parametrelere ait değerler Çizelge 2’de verilmiştir.

$$\%O = 100 - (\%C + \%N + \%S + \%H - \text{mineral kül}) \quad (4)$$

$$O/C = (\%O / (O'nin \text{ atom ağırlığı})) \div (\%C / (C'un \text{ atom ağırlığı})) \quad (5)$$

$$H/C = (\%H / (H'nin \text{ atom ağırlığı})) \div (\%C / (C'un \text{ atom ağırlığı})) \quad (6)$$

$$C/N = (\%C / (C'nin \text{ atom ağırlığı})) \div (\%N / (N'un \text{ atom ağırlığı})) \quad (7)$$

Biyokömürlerde mineralizasyon oranı için; O/C oranı <0.2 ise 1000 yıldan fazla, 0.2-0.6 arasında ise 100-1000 yıl arası, >0.6 ise 100 yıldan daha az sürede mineralize olduğu belirtilmiştir (Spokas, 2010). Elde edilen O/C oranı (0.23) Spokas (2010)’a göre materyalin biyokömür olduğunu göstermektedir. Materyalin H/C oranı % 0.98 olarak bulunmuştur (Çizelge 2). Bu da elde ettiğimiz çeltik biyokömürünün, toprakta mineralizasyonu için O/C’nin doğrusal etkiye sahip olduğu varsayımı ile 900 yıl civarında bir zaman gerektirdiğini göstermektedir. Toprağa ilave edilen biyokömürlerin ortalama ayrışma süresi (mineralize olma durumu) henüz tam bir netliğe kavuşmamıştır. Yarı ömürlerin <50 ila 1400 yıl arasında değişebileceğini gösteren çalışmalar vardır (Kuzuyakov ve ark., 2009). Çalışmalar O/C oranının stabilite ile ilgili olduğunu, daha stabil olan biyokömürlerin daha az “O” içeren fonksiyonel gruba ve daha düşük O/C oranına sahip olduğunu göstermektedir.

Biyokömür içeriğindeki karbon miktarı ile temel oranlar arasındaki ilişkiler; aromatiklik (H/C), stabilite (O/C) ve potansiyel N immobilizasyonu (C/N) olarak belirtilmektedir. Yapılan çalışmalar, toplam karbon ve organik karbonun, biyokömür üretimi için gereken hammadde ve piroliz sıcaklığı ile ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Biyokömürlerin içerdiği karbon miktarı hammaddeye bağlı olarak % 36-94 oranında değişebildiği, artan piroliz sıcaklığı ile de karbon içeriğinin arttığı bildirilmiştir (Novak ve ark., 2009; Keiluweit ve ark., 2010). UC Davis Biyokömür veritabanından elde edilen veriler incelendiğinde, düşük sıcaklıkta üretilen biyokömürlerin toplam karbon içeriğinin % 60-95, odunsu hammaddelerden üretilenlerin ise (findık kabuğu vb.) % 50-70 arasında değiştiği ortaya koyulmuştur (Mukome ve Parikh, 2013). Biyokömürün organik karbon içeriği hammadde türü, üretim sıcaklığı ve tipi ile doğrudan ilişkilidir (Mukome ve ark., 2013). Hammadde ve piroliz koşullarına bağlı olarak, organik karbonun % 50’sine kadar olan kısmı biyokömür içinde depolanabilmektedir (Sohi ve ark., 2010). Biyokömürün içindeki elementlerin toplam katkısı arasında karşılaştırma yapmak yeterli olmamakta; iki veya daha fazla elementin nispi katkıları arasındaki karşılaştırmalar daha bilgilendirici olmaktadır. Örneğin, H/C ve O/C elementel oranları, biyokömürlerin kimyasal yapılarını yorumlamak için kullanılmaktadır. H/C oranı genellikle aromatiklik için ve mineralize olma yeteneğinin bir göstergesi olarak kullanılmakta (Hammes ve ark., 2008; Krull ve ark., 2009), O/C oranı ise biyokömür stabilitesini tahmin etmek için kullanılmaktadır (Spokas, 2010). Piroliz sıcaklığının artması ile birlikte hem H/C hem de O/C oranları azalmakta, böylelikle O-bazlı fonksiyonel grupları az olan materyallerden daha stabil biyokömür üretilmektedir (Mukome ve ark., 2013).

Çizelge 2. Çeltik sapından elde edilen biyokömür materyalinin organik kısımlarına ait elementel analizler

Sıcaklık	C	H	N	S	O	O/C	H/C	C/N
°C	%	%	%	%	%	Atomik oran	Atomik oran	Atomik oran
400	48.8	3.99	1.43	0.31	15.2	0.23	0.98	39.30

Spektroskopik analiz sonuçları

Biyokömür fonksiyonel gruplarıyla ilgili spesifik bilgiler, uygulanan biyokömürlerin toprakta nasıl tepki vereceğini tahmin etmek ve anlamak için oldukça önemlidir. Bununla birlikte, hangi biyokömürün en uygun olduğunu tahmin etmek için materyalin tam bir karakterizasyonu gereklidir.

FT-IR (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi) sonuçları

FT-IR spektrumları, biyokömür yüzeylerindeki fonksiyonel grupları karakterize etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. FT-IR analiz sonucu biyokömüre ait absorpsiyon değerine karşı dalga sayısını gösteren spektrum Şekil 1'de verilmiştir.

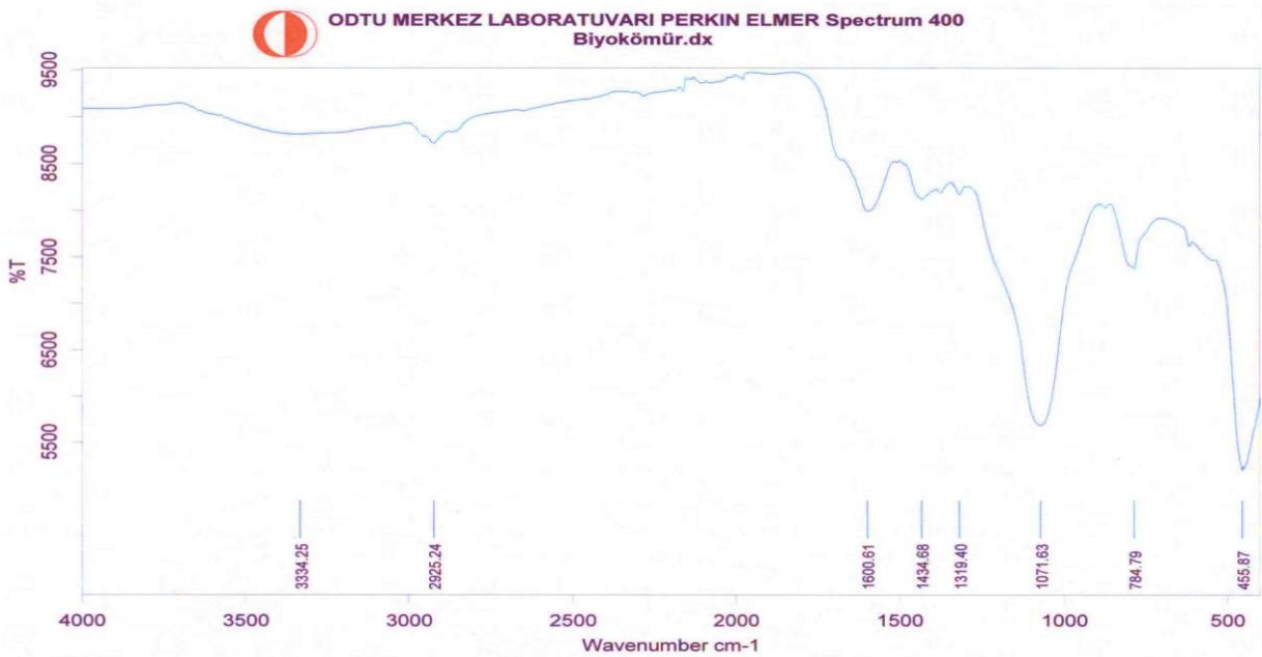
Biyokömür materyaline ait spektrumda bulunan fonksiyonel gruplar aşağıda özetlenmiştir:

- 3600-3200 cm^{-1} aralığında -OH bağı bulunmaktadır. Elde edilen spektrumda bu bölgede gözlenen pikin büyüklüğü -OH grupları içeren bileşiklerin az miktarda olduğunu göstermektedir. Bu bölgede dehidrojenizasyon yüksek ancak, -OH parçalanmış olup aromatikliğe geçiş olduğu görülmektedir.
- 2950-2850 cm^{-1} aralığı aromatik C-H gerilmesini göstermektedir.
- 1740-1700 cm^{-1} aralığı az miktarda karboksil yapıdaki C=O bağı göstermektedir.
- Spektrumda 1600 cm^{-1} ve ~1400 cm^{-1} civarında gözlenen pikler yapıdaki C=C bağı göstermektedir.
- 1071 cm^{-1} 'de gözlenen pik C-O-C fonksiyonel grubunu içeren hemiselüloz selüloz yapıyı ortaya koymaktadır (Keiluweit ve ark., 2010).

FT-IR spektrumundan elde edilen verilerin sıcaklıkla olan değerlendirilmesi şu şekilde yapılabilir;

- yüksek piroliz sıcaklığının, alifatik yapıya karşılık gelen değerleri azalttığı ve aromatik yapıdan elde edilen pik değerlerini arttırdığı görülmektedir. Piroliz sıcaklığının bu etkisi başlangıçtaki dehidrasyonun O-H piklerinde azalmaya neden olmasıyla açıklanabilir, yüksek sıcaklıklar lignin ve selüloza karşılık gelen piklerin artmasına neden olmaktadır.

Çeltik sapından elde edilen biyokömürün FT-IR spektrumları selüloza oldukça yakınlık göstermektedir (Pastorova ve ark., 1994; Cao ve Tan, 2002). Biyokömür içindeki selülozik ve lignitik bileşenler 300 °C'de dehidrasyona uğramaya başlamakta (3500-3200 cm^{-1} , dalga boyu), lignitik/selülozik kaynaklı ürünlerin oluşumu 400 °C'de (çoklu pik, 1600-700 cm^{-1}) ortaya çıkmaktadır. Hemiselüloz ve selüloz çeltiğin temel bileşenlerindedir. Bu sebeple çeltik sapının piroliz işlemi sırasında ayrışması lignininkinden çok daha kolay olduğundan dolayı (Yang ve ark., 2007), ağırlık kaybı ve H/C, O/C molar oranlarının odun veya çim kaynaklı biyokömürlere nazaran daha etkili olduğunu ortaya koymaktadır (Keiluweit ve ark., 2010).

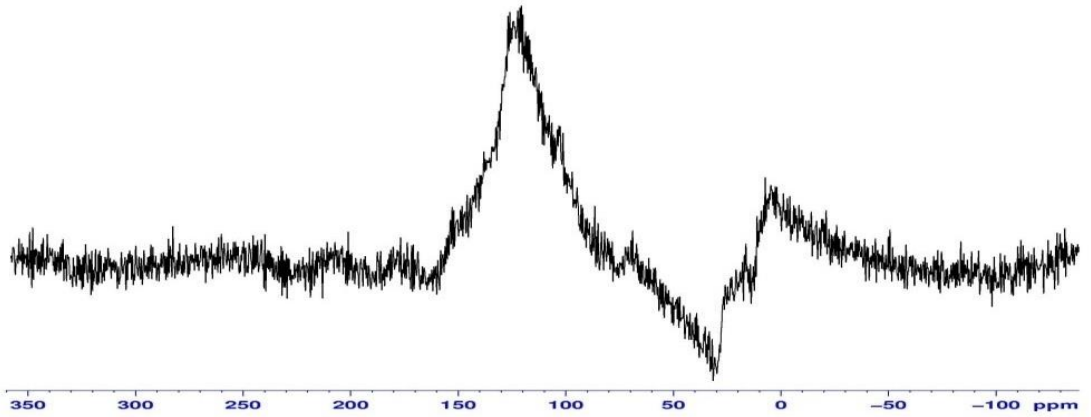


Şekil 1. Çeltik sapından elde edilen biyokömür materyalinin FT-IR spektrumları

Katı NMR ^{13}C (Katı Nükleer Manyetik Rezonans Spektrometresi) sonuçları

Katı hal ^{13}C Nükleer Manyetik Rezonans (NMR) spektroskopisi, biyokömürün fonksiyonel gruplarını karakterize etmek için sıklıkla kullanılmıştır (Cao ve ark., 2011; Kinney ve ark., 2012). Biyokömür materyaline ait ^{13}C -NMR analizi sonucu elde edilen spektrum Şekil 2'de verilmiştir. Yapıdaki karbonun soğurma farkını gösteren kimyasal kayma değerleri spektrumda "ppm (parts per million)" olarak verilmiştir. ~130 ppm civarında elde edilen pik biyokömür materyali içindeki aromatik karbonları göstermektedir.

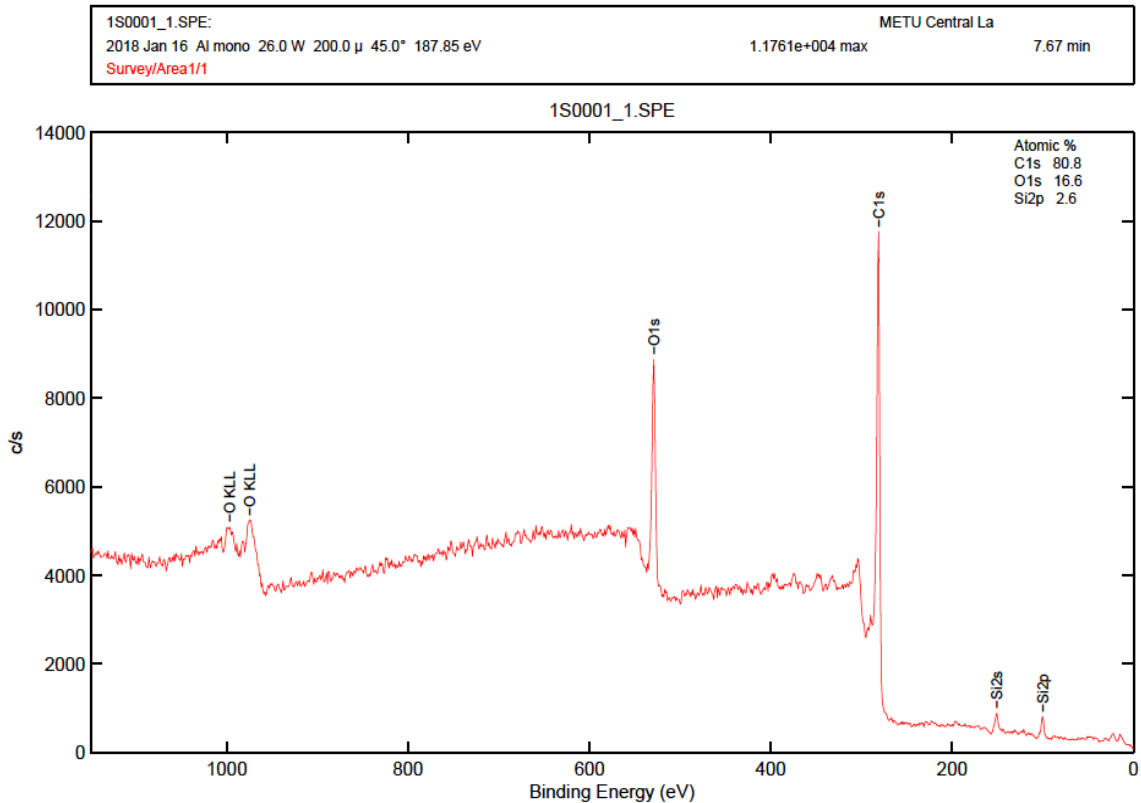
Li ve ark. (2013), iki boyutlu ^{13}C -NMR korelasyon spektroskopisi kullanarak 100-800 °C'de piroliz edilen çeltik sapı ve kavuz biyokömürlerinde fonksiyonel grupların varlığını araştırmıştır. Çeltik sapı ve kepeğinden elde edilen biyokömürler dehidroksilasyon/dehidrojenasyon ve aromatisasyon işleminden geçirilmiştir. Genel olarak, artan piroliz sıcaklığıyla birlikte, aromatik yapıların üretilmesinden önce O-alkillenmiş grupların ve anomerik O-C-O karbonlarının oluşumu meydana geldiğini bildirmiştir.



Şekil 2. Çeltik sapından elde edilen biyokömür materyalinin ^{13}C -NMR analizi spektrumu

XPS (x-ray fotoelektron spektroskopisi) sonuçları

X-Ray fotoelektron spektroskopisi katı materyallerin yüzeyleri hakkında kimyasal bilgi elde etmek için kullanılan gelişmiş bir yüzey analiz tekniğidir. Bu yöntemle elde edilen bulgulara göre biyokömür materyaline ait oranlar ve bağlanma enerjileri ile bağların durumları Şekil 3 ve Çizelge 3 ve 4'de verilmiştir.



Şekil 3. Çeltik sapından elde edilen biyokömür materyalinin XPS spektrumu

Çizelge 3 incelendiğinde; biyokömür materyalinin oksijen içeriği % 16.6, karbon içeriği % 80.8 ve O/C oranı % 0.20 olarak bulunmuştur. Çizelge 4 incelendiğinde; bağlanma enerjilerine göre oluşan CIS ve OIS bağları görülmektedir. 280 eV'de C=O, 281 eV'de C-C, C=C, C-H, 282 eV'de C-O, 283 eV'de COO, 523 eV'de OOC ve 530 eV'de C-O-C bağları görülmektedir. Çeltik saplarından elde edilen biyokömürlerde; [Wu ve ark., \(2015\)](#), [Tan ve ark., \(2019\)](#) çalışmalarında benzer sonuçlar bulmuşlardır.

Çizelge 3. XPS cihazı tarafından elde edilen elementlerin atomik oranları

O (%)	C (%)	O/C (%)
16.6	80.8	0.20

Çizelge 4. XPS cihazı tarafından elde edilen elementlerin bağlanma enerjileri ve bağ durumları arası ilişkiler

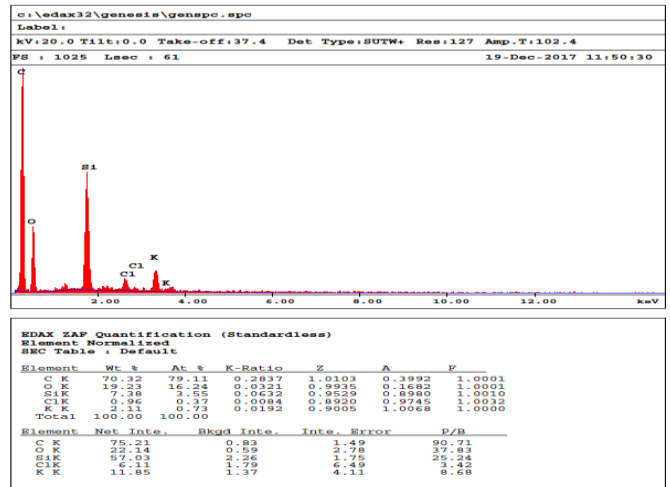
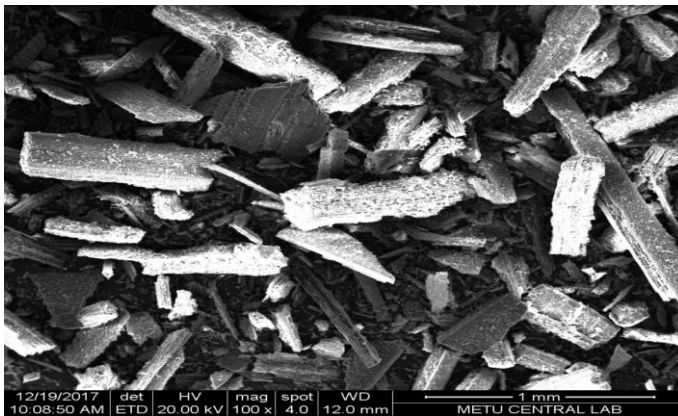
Bağlanma Enerjisi (eV)	C1S
280	C=O
281	C-C, C=C, C-H
282	C-O
283	COO
Bağlanma Enerjisi (eV)	O1S
529	O=C
530	C-O-C

Biyokömürü tanımlayıcı görüntüleme analiz sonuçları

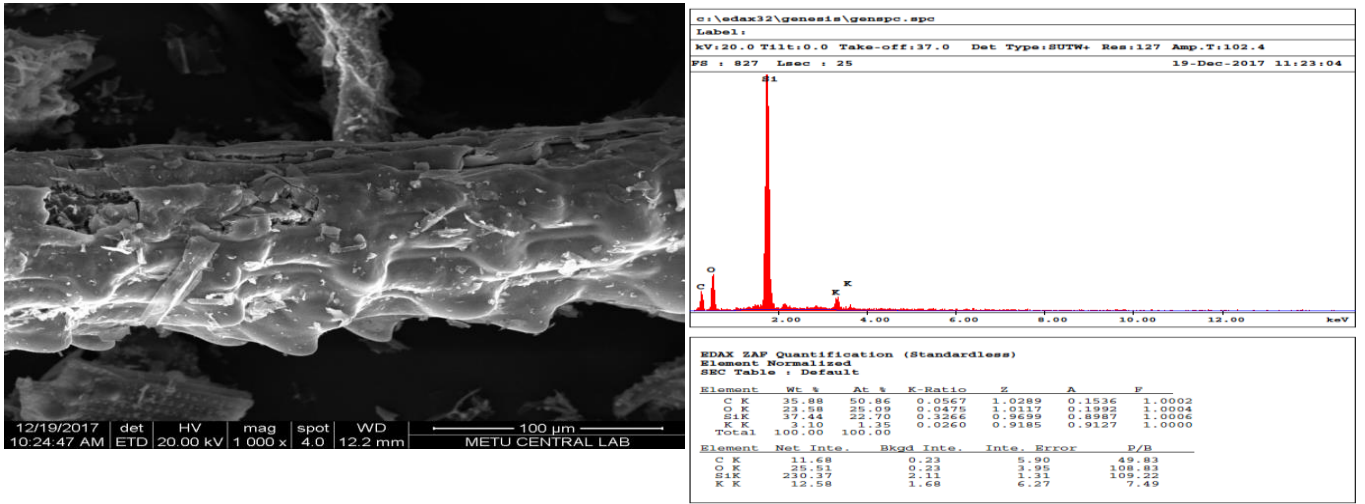
Biyokömür materyalinin makroporozitesini ve fiziksel morfolojisini belirlemek için, SEM cihazı kullanılarak görüntüleme yapılmıştır. Biyokömür materyali iletken olmadığı için (Au-Pd ile) kaplama yapılmıştır. SEM-EDX (Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) - Enerji yayımlı X-ışını analizi (EDX)), biyokömürün yapısal ve kimyasal özelliklerini nicel olarak incelemek için etkili bir yöntem olarak bilinmektedir.

SEM-EDX cihazı ile farklı büyüklüklerde (1mm-100µm-50µm) görüntüler alınmıştır. Cihazın çalışma özellikleri alınan görüntülerin üzerinde belirtilmiştir (Şekil 4, 5 ve 6)

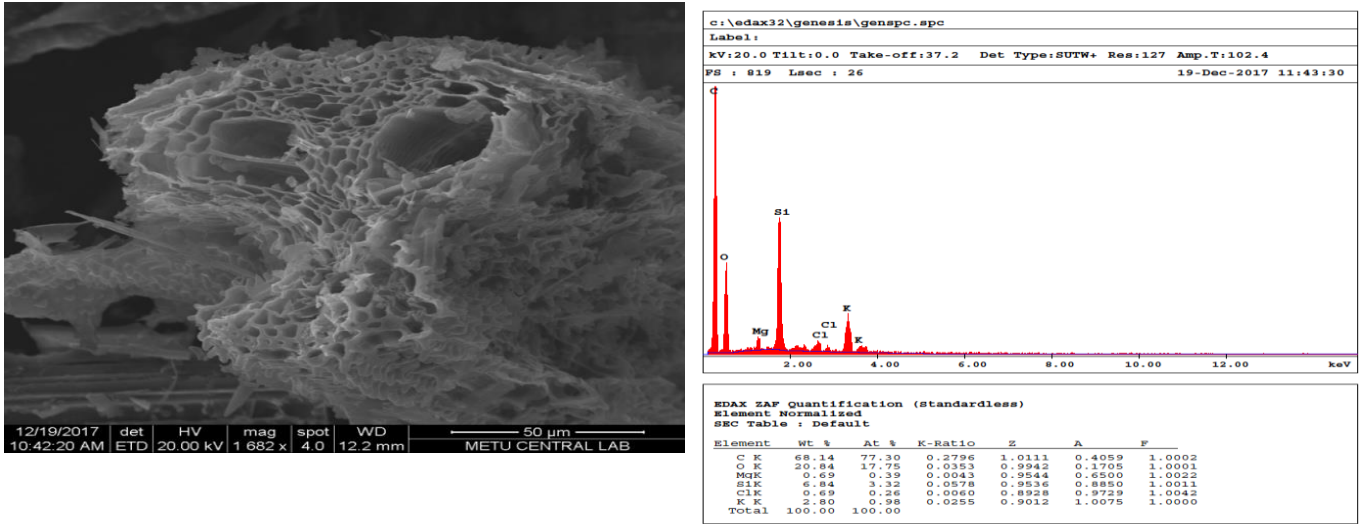
Morfoloji; biyokömürün büyüklüğü, şekli ve yapısının toplu bir ölçüsüdür. Bu özellik genellikle biyokömür yüzeyinin bir görüntüsü olarak elde edilir. Elde edilen görüntüler piroliz sıcaklığının ve hammadde türünün bir fonksiyonu olarak farklılık gösterir. Odun türevli biyokömürler genellikle hammaddenin lignoselüloz bitki dokusundan üretilmiş, büyük gözenekli yapıya sahip olmaktadırlar ([Lee ve ark., 2010](#); [Ozcimen ve Ersoy-Mericboyu 2010](#); [Mukome ve ark., 2013](#)). Bu bilgilere dayanarak, görüntülere bakıldığı zaman 400 °C'de piroliz edilen çeltik sapı biyokömürünün yüzeylerinde sıcaklığa bağlı olarak büyük gözenekli yapıların varlığı dikkati çekmektedir (Şekil 6).



Şekil 4. Çeltik sapından elde edilen biyokömür materyalinin mercek altındaki ilk görüntüsü ve kimyasal bileşimi (100 x)



Şekil 5. Çeltik sapından elde edilen biyokömür materyalinin SEM görüntüsü (1000 x, farklı perspektif) ve SEM-EDX ile belirlenen kimyasal bileşimi



Şekil 6. Çeltik sapından elde edilen biyokömür materyalinin SEM görüntüsü (1682 x) ve SEM-EDX ile belirlenen kimyasal bileşimi

XRD (x-ışını difraksiyon) sonuçları

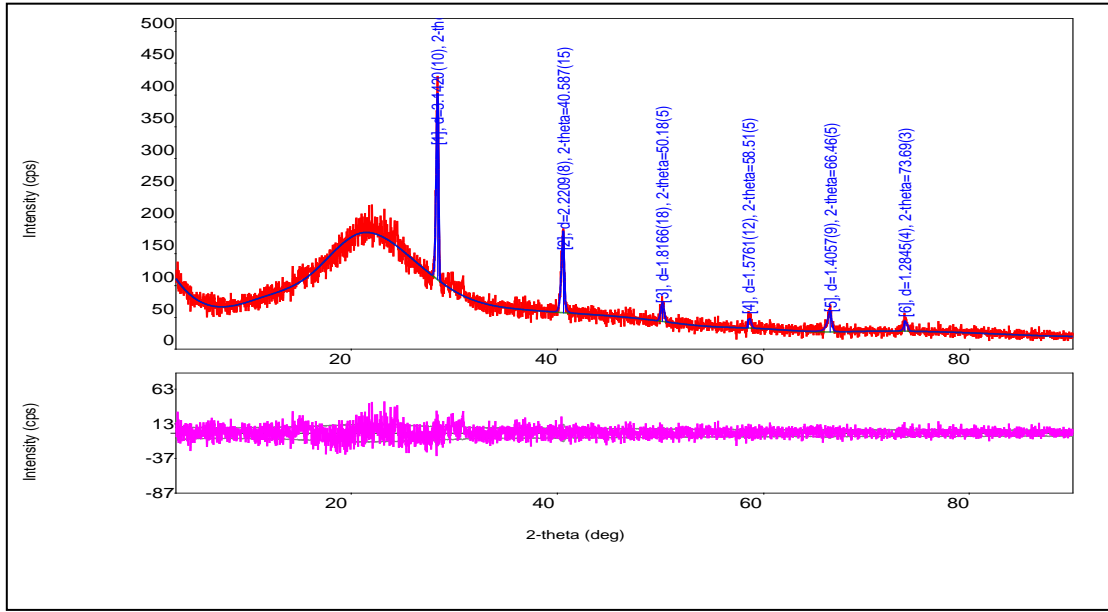
Biyokömür gibi karbon içeriği yüksek materyallerde kristallik boyutu, aromatiklik, tabakalar arası mesafe gibi üç boyutlu bilgiler XRD analizi ile elde edilebilmektedir (Lehmann ve Joseph 2015).

Çeltik sapından elde edilen biyokömür içerisinde silisyum (Si) ve potasyumun (K) miktarı oldukça fazladır (Liao ve ark., 2004; Soest 2006). Bu bilgilere göre KCl (3.14 ve 2.22 Å) içeriği piklerden görülmektedir (Çizelge 5). Bu durum, çeltik bitkisinin sapında yer alan organik maddenin yapısına dahil olmayan çözünabilir Cl'nin çözünabilir K ile biyokömür eldesi sürecinde silvit mineralini oluşturduğuna atfedilebilir.

Çizelge 5. Çeltik sapından elde edilen biyokömür materyaline ait pik listesi

2-teta (deg)	d (Å)	Boy (cps)	Int. I (cps deg)	FWHM (deg)	Boyut	Faz ismi
28.383(9)	3.1420(10)	204(13)	55.9(14)	0.257(7)	333(9)	Silvit, syn, (2,0,0)
40.587(15)	2.2209(8)	91(9)	31.9(13)	0.287(18)	308(20)	Silvit, syn, (2,2,0)
50.18(5)	1.8166(18)	22(4)	8.1(6)	0.35(4)	261(27)	Silvit, syn, (2,2,2)
58.51(5)	1.5761(12)	14(3)	3.7(8)	0.25(6)	375(89)	Silvit, syn, (4,0,0)
66.46(5)	1.4057(9)	24(5)	13.4(10)	0.40(6)	248(37)	Silvit, syn, (4,2,0)
73.69(3)	1.2845(4)	15(4)	4.9(8)	0.23(6)	445(108)	Silvit, syn, (4,2,2)

Çeltik sapından 400 °C'de elde edilen biyokömürün XRD piklerine bakıldığında (Şekil 7) zayıf kristalin yapı ve karbon bakımından zengin bir faza sahip amorf bir materyal olduğunu göstermektedir.



Şekil 7. Çeltik sapından elde edilen biyokömür materyaline ait XRD diyagramı

XRF (X-ışını Floresans Spektrometresi) analiz sonuçları

Işımanın dalga boyunun saptanmasıyla elementin cinsi (nitel), saptanan bu ışının yoğunluğunun ölçülmesiyle element konsantrasyonu (nicel) belirlenmektedir. Bor-Uranyum aralığında oksit formunda çalışılan örneklerin sonuçları, hem oksit hem de metal formunda belirlenmiştir. Sonuçlar aşağıda Çizelge 6-7'de verilmiştir.

Çizelge 6. Çeltik sapından elde edilen biyokömür materyalinin XRF analizine göre içerdiği bileşikler (Oksit Formunda)

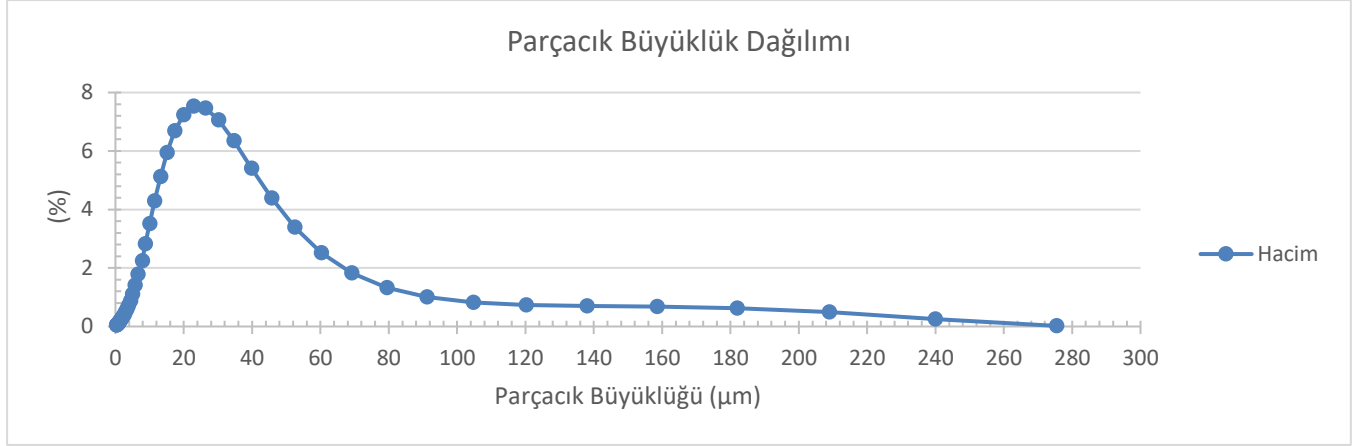
Bileşik No	Bileşik	Sonuç (%)
1	CO ₂	81.0
2	SiO ₂	9.35
3	B ₂ O ₃	5.97
4	K ₂ O	1.62
5	MgO	0.524
6	SO ₃	0.332
7	CaO	0.265
8	Na ₂ O	0.148
9	P ₂ O ₅	0.321
10	Al ₂ O ₃	0.0629
11	MnO	0.0336
12	Fe ₂ O ₃	0.0228
13	SrO	0.0016

Çizelge 7. Çeltik sapından elde edilen biyokömür materyalinin XRF analizi ile belirlenen element içeriği

Element Sayısı	Element	Sonuç (%)
1	C	51.6
2	O	29.8
3	Si	8.37
4	B	3.53
5	K	3.41
6	Cl	1.33
7	Mg	0.580
8	Ca	0.541
9	S	0.305
10	Na	0.200
11	P	0.130
12	Mn	0.079
13	Al	0.062
14	Fe	0.049
15	Sr	0.0044

Parçacık boyutu sonuçları

Parçacık boyutu analiz sonucuna göre; çeltik sapından elde edilen biyokömür materyalinin parçacık boyutu dağılımı 0.316 μm (% 0.04) ile 275.4 μm (% 0.25) arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Parçacık boyutunun dağılımı ağırlıklı olarak 11.5 μm ile 79.4 μm arasında olduğu görülmektedir (Şekil 8). Biyokömürün parçacık boyutu son ürünün özelliklerini etkileyen en önemli fiziksel özelliklerdendir (Joseph ve ark. 2009). Biyokömürlerin fizikokimyasal özellikleri, onu üretmek için kullanılan hammaddenin özellikleri ve üretim koşullarına (örneğin, parçacık boyutu, sıcaklık, ısıtma hızı ve süresi) bağlıdır (He ve ark., 2000; Lehmann, 2007; Zhang et al., 2009; Cantrell ve ark., 2012).



Şekil 8. Çeltik sapından elde edilen biyokömür materyalinin parçacık büyüklük dağılımı

Spesifik yüzey alanı sonuçları

Çeltik sapından 400 °C'de elde edilen biyokömür materyalinin yüzey alanı 13.17 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Yüzey alanı ve gözeneklilik, biyokömürün ağır metal tutma kapasitesini etkileyen temel fiziksel özelliklerdendir. Biyokütle piroliz işlemine tabi tutulduğunda, dehidrasyon işlemi ile su kaybına bağlı olarak biyokömür içinde mikroporlar oluşmaktadır (Bagreev ve ark., 2001). Genel olarak lignin içeriği yüksek olan biyoküteller (ör; bambu, hindistan cevizi kabuğu) makro gözenek bakımından zengin iken, selüloz içeriği yüksek olan biyokütellerde (ör; kavuz) ise mikro gözenekli yapılar zenginleşmektedir (Joseph ve ark., 2007).

Sonuç

Bu çalışma, çeltik sapından elde edilen biyokömürün ileri analitik yöntemler kullanılarak karakterizasyonunu belirlemek için yürütülmüştür. Sonuç olarak karakterizasyon işlemleri neticesinde, 400 °C'de üretilen biyokömürün büyük gözenekli yapılar oluşturduğu, biyokömürün selülozik bir materyal olduğu ve ayrıca bünyesinde silvit (KCl) mineralini içerdiği, biyokömürün zayıf kristalin yapılı ve karbon bakımından zengin bir faza sahip amorf bir materyal olduğu ve biyokömürün spesifik yüzey alanının çok yüksek olmadığı ortaya konulmuştur.

Farklı karakterizasyon teknikleri ile elde edilen bilgiler, toprağa ilave edilen biyokömürlerin toprak pH'sını nasıl etkileyeceğini ve topraktaki inorganik ve organik bileşiklerle nasıl etkileşime gireceğini anlamak için oldukça önemlidir. Örneğin, karboksil ve hidroksil fonksiyonel gruplarına sahip biyokömürler, daha yüksek kation değişim kapasitesine ve yüksek adsorbsiyon kapasitesine sahip olmaktadır. Bu yöntemlerin kullanılması ile mevcut fonksiyonel grupların belirlenmesi ve böylelikle agronomik veya çevresel etkiler için hangi biyokömürün daha uygun olduğu ortaya konulabilecektir. Bu çalışmanın spesifik amaçlarla biyokömür üretmek isteyen araştırmacılar için yol göstereceği düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu araştırma, Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar ve Proje Destek Birimi'nin, "17L0447008" kodlu "Çeltik Sapından Elde Edilen Biyokömür Uygulamalarının Çeltik Yetiştiriciliğinde Kadmiyum Biyoyararlılığına Etkisi" konulu doktora projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Araştırmada kullanılan cihazlar için, ODTÜ Merkez Laboratuvarları'ndan yararlanılmıştır.

Kaynaklar

- Ahmad M, Rajapaksha AU, Lim JE, Zhang M, Bolan N, Mohan D, Vithanage M, Lee SS, Ok YS, 2014. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. *Chemosphere*, 99:19-33.
- Angin D, 2013. Effect of pyrolysis temperature and heating rate on biochar obtained from pyrolysis of safflower seed press cake. *Bioresource Technology*, 128:593-597.

- Archontoulis VS, Huber I, Miguez F, Thorburn P, Rogovska N, Laird D, 2016. A model for mechanistic and system assessments of biochar effects on soils and crops and trade-offs. *GCB Bioenergy*, 8:1028-1045.
- ASTM D1762-84, 2007. Standard test method for chemical analysis of wood charcoal. Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- Bagreev A, Bandosz T, Locke D, 2001. Pore structure and surface chemistry of adsorbents obtained by pyrolysis of sewage sludge-derived fertilizer. *Carbon*, 39:1971-1979.
- Boyabath O, Nasiry J, Zhou YH, 2019. Crop planning in sustainable agriculture: dynamic farmland allocation in the presence of crop rotation benefits. *Manage. Sci.*, 65(5):1949-2443.
- Brassard P, Godbout S, Raghavan V, 2016. Soil biochar amendment as a climate change mitigation tool: key parameters and mechanisms involved. *J. Environ. Manag.*, 181:484-497.
- Brunauer S, Emmett PH, Teller E, 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. *J. Am. Chem. Soc.*, 60:309-319.
- Cantrell KB, Hunt PG, Uchimiya M, Novak JM, Ro KS, 2012. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresour. Technol.*, 107:419-428.
- Cao X, Ma L, Liang Y, Gao B, Harris W, 2011. Simultaneous immobilization of lead and atrazine in contaminated soils using dairy manure biochar. *Environ Sci. Technol.*, 45:4884-4889.
- Cao Y, Tan HM, 2002. Effects of cellulase on the modification of cellulose. *Carbohydr Res.*, 337:1291-1296.
- Chandra S, Medha I, Bhattacharya J, 2020. Potassium-iron rice straw biochar composite for sorption of nitrate, phosphate, and ammonium in soil for timely and controlled release. *Science of the Total Environment*, 712:1-15.
- Chen B, Chen Z, Lv S, 2011. A novel magnetic biochar efficiently sorbs organic pollutants and phosphate. *Bioresour Technol.*, 102(2):716-723.
- Deka K, Medhi BK, Kandali GG, Das R, Pathak K, Sarkar L, Nath KD, 2018. Evaluation of physico-chemical properties of rice straw and rice husk-derived biochar. *Eco. Env. & Cons.*, 24(2):768-772.
- Demirbas A, Arin G, 2002. An overview of biomass pyrolysis. *Energy Sources*, 24:471-482.
- Enders A, Hanley K, Whitman T, Joseph S, Lehmann J, 2012. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresour Technol.*, 114:644-653.
- Fidel RB, 2015. Biochar properties and impact on soil CO₂ and N₂O emissions. Ph.D. Dissertation, Iowa State University.
- Hammes K, Smernik RJ, Skjemstad JO, Schmidt MWI, 2008. Characterisation and evaluation of reference materials for black carbon analysis using elemental composition, colour, BET surface area and ¹³C NMR spectroscopy. *Applied Geochemistry*, 23:2113-2122.
- He BJ, Zhang Y, Yin Y, Funk TL, Riskowski GL, 2000. Operating temperature and retention time effects on thermochemical conversion process of swine manure. *Trans. ASABE*, 43:1821-1825.
- Heo HS, Park HJ, Yim JH, Sohn JM, Park J, Kim SS, Ryu C, Jeon JK, Park YK, 2010. Influence of operation variables on fast pyrolysis of *Miscanthus sinensis* var. *purpurascens*. *Bioresour Technol.*, 101(10):3672-3677.
- Jindo K, Mizumoto H, Sawada Y, Sanchez-Monedero MA, Sonoki T, 2014. Physical and chemical characterization of biochars derived from different agricultural residues. *Biogeosciences*, 11(23):6613-6621.
- Joseph SD, Downie A, Crosky A, Lehmann J, Munroe P, 2007. Biochar for carbon sequestration, reduction of greenhouse gas emissions and enhancement of soil fertility; a review of the materials science. *Rend. Circ. Mat. Palermo Suppl.*, 48:101-106.
- Joseph S, Peacocke C, Lehmann J, Munroe P, 2009. Developing a biochar classification and test methods. In: *Biochar for Environmental Management Science and Technology* (eds. Lehmann J, Joseph S). London, Earthscan, pp. 107-112.
- Keiluweit M, Nico PS, Johnson MG, Kleber M, 2010. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). *Environ. Sci. Technol.*, 44:1247-1253.
- Kinney TJ, Masiello CA, Dugan B, Hockaday WC, Dean MR, 2012. Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures. *Biomass and Bioenergy*, 41:34-43.
- Krull ES, Baldock JA, Skjemstad JO, Smernik RJ, 2009. Characteristics of biochar: Organo-chemical properties. In: *Stability of Biochar in Soil. Biochar for Environmental Management* (eds. Lehmann J, Joseph S), Science and Technology, Earthscan, London, UK, pp.53-66.
- Kuzyakov Y, Subbotina I, Chen H, Bogomolova I, Xu X, 2009. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling. *Soil Biology and Biochemistry*, 41:210-219.
- Lee JW, Kidder M, Evans BR, Paik S, Buchanan III AC, Garten CT, Brown RC, 2010. Characterization of biochars produced from cornstovers for soil amendment. *Environ. Sci. Technol.*, 44:7970-7974.
- Lehmann J, 2007. Bio-energy in the black. *Front. Ecol. Environ.*, 5:381-387.
- Lehmann J, Joseph S, 2009. Biochar for environmental management: an introduction. In: *Biochar for environmental management: science and technology* (eds. Lehmann J, Joseph S). Earthscan, London.
- Lehmann J, Rillig MC, Thies J, Masiello CA, Hockaday WC, Crowley D, 2011. Biochar effects on soil biota—A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43:1812-1836.
- Lehmann J, Joseph S, 2015. Biochar for environmental management: science, transformations. *Soil Biol. Biochem.*, 83:19-28.
- Li J, Shen F, Yang G, Zhang Y, Deng S, Zhang J, Zeng Y, Lou T, Mei Z, 2018. Valorizing rice straw and its anaerobically digested residues for biochar to remove Pb (II) from aqueous solution. *International Journal of Polymer Science*.
- Li XM, Shen QR, Zhang DQ, Mei XL, Ran W, Xu YC, Yu GH, 2013. Functional groups determine biochar properties (pH and EC) as studied by twodimensional ¹³C NMR correlation spectroscopy. *PLoS One*, 8(6) e65949.

- Liao CP, Wu CZ, Yanyongjie Huang HT, 2004. Chemical elemental characteristics of biomass fuels in China. *Biomass Bioenerg.*, 27:119-130.
- Liu Z, Niu W, Chu H, Zhou T, Niu Z, 2018. Effect of the carbonization temperature on the properties of biochar produced from the pyrolysis of crop residues. *BioResources*, 13(2):3429-3446.
- Manna S, Singh N, Purakayastha TJ, Berns AE, 2020. Effect of deashing on physico-chemical properties of wheat and rice straw biochars and potential sorption of pyrazosulfuron-ethyl. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(1):1247-1258.
- Mukome FND, Parikh SJ, 2013. UC Davis Biochar Database. University of California Davis, Davis, CA.
- Mukome FND, Zhang XM, Silva LCR, Six J, Parikh SJ, 2013. Use of chemical and physical characteristics to investigate trends in biochar feedstocks. *J. Agri. Food Chem.*, 61:2196-2204.
- Naeem MA, Khalid M, Aon M, Abbas G, Tahir M, Amjad M, Murtaza B, Yang A, Akhtar SS, 2017. Effect of wheat and rice straw biochar produced at different temperatures on maize growth and nutrient dynamics of a calcareous soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(14):2048-2061.
- Novak JM, Lima I, Xing B, Gaskin JW, Steiner C, Das KC, Ahmedna M, Rehrh D, Watts DW, Busscher WJ, Schmobert H, 2009. Characterization of designer biochars produced at different temperatures and their effects on a lomay sand. *Annals of Environmental Science*, 3:195-206.
- Ozcimen D, Ersoy-Mericboyu A, 2010. Characterization of biochar and bio-oil samples obtained from carbonization of various biomass materials. *Renewable Energy*, 35:1319-1324.
- Pastorova I, Botto RE, Arisz PW, Boon JJ, 1994. Cellulose char structure: a combined analytical Py-GC-MS, FTIR, and NMR study. *Carbohydr Res.*, 262:27-47.
- Samantarai S, Achakzai A, 2014. Application of nanotechnology in agriculture and food production: opportunity and challenges. *Middle-East J. Sci. Res.* 22(4):499-501.
- San S, 2005. Türkiye'de yetiştirilen çeltik (*Oryza sativa* L.) çeşitlerinde genetik farklılığın oryizin elektroforegramı yöntemi ile belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Sashidhar P, Kochar M, Singh B, Gupta M, Cahill D, Adholeya A, Dubey M, 2020. Biochar for delivery of agri-inputs: Current status and future perspectives. *Science of the Total Environment*, 703: 134892.
- Soest PJ Van, 2006. Rice straw, the role of silica and treatments to improve quality. *Animal Feed Sci. Tech.*, 130:137-171.
- Sohi SP, Krull E, Lopez-Capel E, Bol R, 2010. Chapter 2-A review of biochar and its use and function in soil. In: *Advances in Agronomy* (ed. Donald LS), Academic Press, San Diego, CA, pp. 47-82.
- Spokas KA, 2010. Review of the stability of biochar in soils: predictability of O:C molar ratios. *Carbon Manage.*, 1:289-303.
- Sun J, Lian F, Liu Z, Zhu L, Song Z, 2014. Biochars derived from various crop straws: characterization and Cd (II) removal potential. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 106:226-231.
- Sürek H, 2002. Çeltik Tarımı. Hasad Yayıncılık, İstanbul.
- Tan G, Liu Y, Xiao D, 2019. Influence of different pyrolysis methods on the sorption property of rice straw biochar. *Separation Science and Technology*, 54(17):2773-2782.
- Tsai WT, Lee MK, Chang YM, 2007. Fast pyrolysis of rice husk: Product yields and composition. *Bioresource Technology*, 98:22-28.
- TÜİK, 2019. http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1001.
- Uzun BB, Putun AE, Putun E, 2006. Fast pyrolysis of soybean cake: Product yields and compositions. *Bioresource Technology*, 97:69-576.
- Verheijen F, Jeffery S, Bastos AC, van der Velde M, Diafas F, 2010. Biochar application to soils. A critical scientific review of effects on soil properties, processes, and functions. EUR 24099 EN Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg. 149.
- Wu M, Feng Q, Sun X, Wang H, Gielen G, Wu W, 2015. Rice (*Oryza sativa* L) plantation affects the stability of biochar in paddy soil. *Scientific Reports*, 5, 10001.
- Yang HP, Yan R, Chen HP, Lee DH, Zheng CG, 2007. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86:1781-1788.
- Zhang SY, Hong RY, Cao JP, Takarada T, 2009. Influence of manure types and pyrolysis conditions on the oxidation behavior of manure char. *Bioresour. Technol.*, 100:4278-4283.