

## BİYOKÜTLEDEN GÖZENEKLİ KARBONLU MALZEME ÜRETİMİ: BİYOKÜTLE TİPİ VE SICAKLIĞIN FİZİKOKİMYASAL ÖZELLİKLERE ETKİSİ

<sup>1</sup>Aynur AŞMA , <sup>2</sup>Elif YAMAN , <sup>3</sup>Sinan TEMEL 

<sup>1</sup>Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Bilecik, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Alternatif Enerji Kaynakları Teknolojisi Programı, Bilecik, TÜRKİYE

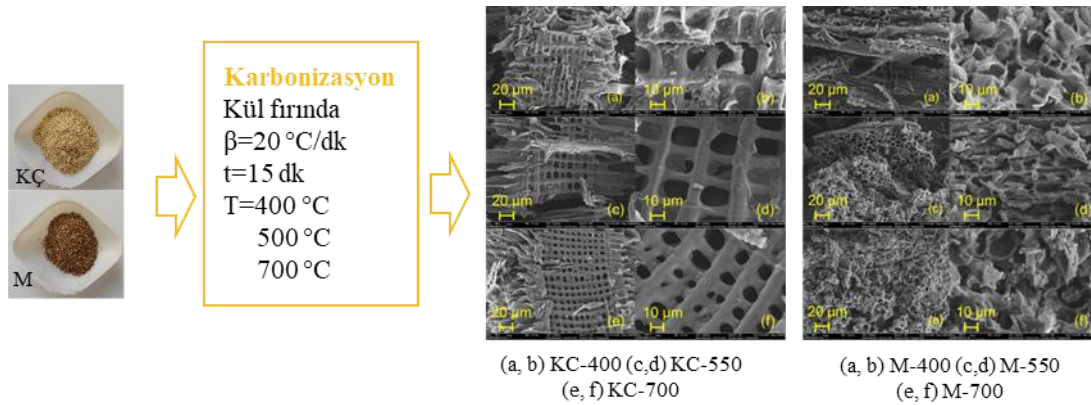
<sup>3</sup>Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Bilecik, TÜRKİYE

<sup>1</sup>aynurdalseckin@gmail.com, <sup>2</sup>elif.yaman@bilecik.edu.tr, <sup>3</sup>sinan.temel@bilecik.edu.tr

### Önemli Katkıları (Highlights)

- Biyokütle karbonlu malzeme üretmek için önemli bir hammaddedir.
- Farklı biyokütlelerden elde edilen karbonlu malzemelerin fizikokimyasal özellikleri birbirinden farklıdır.
- Rekasyon şartlarının seçimi karbonlu malzemenin uygulama alanına göre önemlidir.

### Grafiksel Özet (Graphical Abstract)



DeneySEL çalışma şartları ve elde edilen örneklerin SEM görüntüleri  
(Experimental operating conditions and SEM image of obtained samples)



## BİYOKÜTLEDEN GÖZENEKLİ KARBONLU MALZEME ÜRETİMİ: BİYOKÜTLE TİPİ VE SICAKLIĞIN FİZİKOKİMYASAL ÖZELLİKLERE ETKİSİ

<sup>1</sup>Aynur AŞMA , <sup>2</sup>Elif YAMAN , <sup>3</sup>Sinan TEMEL 

<sup>1</sup>Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Bilecik, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Alternatif Enerji Kaynakları Teknolojisi Programı, Bilecik, TÜRKİYE

<sup>3</sup>Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Bilecik, TÜRKİYE

<sup>1</sup>aynurdalseckin@gmail.com, <sup>2</sup>elif.yaman@bilecik.edu.tr, <sup>3</sup>sinan.temel@bilecik.edu.tr

(Geliş/Received: 16.11.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 03.01.2023)

**ÖZ:** Bu çalışmada, yenilenebilir bir kaynak olan iki farklı biyokütlenin (karaçam ağacı talaşı ve meşe ağacı talaşı) detaylı karakterizasyonu, bu biyokütlerden farklı sıcaklıklarda (400, 500 ve 700 °C) karbonizasyon yöntemi ile karbonlu malzeme üretilmesi ve üretilen bu malzemelerin karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı, biyokütle tipinin ve karbonizasyon sıcaklığının elde edilen karbonlu malzemenin fizikokimyasal özellikleri üzerine etkisinin belirlenmesidir. Bu sebeple biyokütle örnekleri seçilirken, birinin sert odun (hard wood) diğ erinin yumuşak odun (soft wood) olmasına dikkat edilmiştir. Biyokütle ve elde edilen örneklerin ön analizleri gerçekleştirilmiştir. Elementel analiz, Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometresi (FT-IR) ve Taramalı elektron mikroskobu (SEM) teknikleri kullanılarak karakterizasyon çalışmaları tamamlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, karbonizasyon sonucu elde edilen karbonlu malzemenin fizikokimyasal özelliklerinin hammadde tipi ve reaksiyon koşullarına bağlı olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Biyokütle, Karbonizasyon, Karakterizasyon

### Production of Porous Carbon Materials From Biomass: The Effect of Biomass Type and Temperature on Physicochemical Properties

**ABSTRACT:** In this study, detailed characterization of two different biomass samples (black pine wood sawdust and oak wood sawdust) which is a renewable resource, carbonization of these biomass at different temperatures (400, 500 and 700 °C) and the characterization of produced carbonaceous materials were carried out. The aim of the study is to specify the effect of biomass type and carbonization temperature on the physicochemical properties of the carbonaceous materials obtained. For this reason, while selecting biomass samples, importance was attached to ensure that one of them is hard wood and the other is soft wood. Pre-liminary analyses of biomass and obtained carbonaceous samples were executed. Characterization studies were completed using elemental analysis, Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) and Scanning electron microscopy (SEM) techniques. According to the results, it was determined that the physicochemical properties of the carbonaceous material obtained as a result of carbonization depend on the raw material type and reaction conditions.

**Keywords:** Biomass, Carbonization, Characterization

\*Corresponding Author: Elif YAMAN, [elif.yaman@bilecik.edu.tr](mailto:elif.yaman@bilecik.edu.tr)

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek katma değerli karbon malzemeler, karbonun yakıt olarak kullanılmasının yanı sıra aktif karbon [1], karbon nanotüpler [2], karbon nanofiberler [3], gözenekli karbon fiber [4-5], N-katkılı gözenekli karbon [6] ve grafen [7] dahil olmak üzere karbon içeren tüm malzemeleri kapsamaktadır. Bu karbonlu malzemeler genellikle yüksek spesifik yüzey alanı, iyi adsorpsiyon kapasitesi, yüksek mukavemet, yüksek sertlik ve yüksek iletkenlik özelliklerine sahiptir. Atık su arıtma [8], baca gazı arıtımı ve gaz saflaştırma [9-10], katalizör destek malzemesi [11], süperkapasitör [12], enerji depolama [13], güneş paneli [14] ve yarı iletken [15] uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Gözenekli karbonlu malzemeler konvensiyonel yöntemlerde genellikle kömür, petrol ve türevlerinden hazırlanmaktadır ve bu da enerji kıtlığına ve çevresel krizlere yol açmaktadır. Bu nedenle, yeni, çevre dostu, düşük maliyetli ve yenilenebilir hammaddeler bulmak ve gözenekli karbonlu malzemelerin hazırlama yöntemlerini geliştirmek, enerji verimliliğini sağlamak için önemlidir. Biyokütlenin karbon nötr olması kullanılmasındaki en büyük avantajdır ve karbon içeren tek yenilenebilir enerji kaynağıdır. Aynı zamanda üstün fizikokimyasal özelliklere sahiptir ve büyük miktarlarda, yaygın olarak ve iklimine uygun olarak her yerde yetiştirilebilir. Biyokütle, küresel krizle başa çıkmada, fosil yakıtlardan kimyasal hammadde üretiminin yerini almada, iklim değişikliği, enerji arzı ve enerji tüketimi arasındaki uyumsuzluğun giderilmesinde, çevrenin korunması ve en önemlisi karbonsuzlaştırmanın gerçekleştirilmesinde çok önemli role sahiptir. Biyokütlenin karbon açısından zengin, sürdürülebilir ve yenilenebilir doğası, onu yenilenebilir karbon malzemelerin üretiminde umut verici bir hammadde haline getirmektedir [16].

Biyokütle, genel olarak dünyada yaşayan tüm organizmaların zamanla oluşturduğu toplam kütle miktarı olarak tanımlanmaktadır [17]. Bitkisel kökenli lignoselülozik biyokütle kaynakları karbonlu malzeme üretiminde kullanılarak, kolay elde edilebilen, ucuz, sürdürülebilir ve atık yönetimine katkıda bulunan malzeme üretimi gerçekleştirilebilmektedir [18]. Biyokütle yüksek karbon (C) içeriğinin yanı sıra hidrojen (H), oksijen (O), azot (N) ve az miktarda alkali, toprak alkali ve ağır metaller içermektedir [19]. Lignoselülozik biyokütle, hemiselüloz, selüloz ve ligninin bir araya gelerek oluşturduğu odunsu biyokütle olarak tanımlanmaktadır. Diğer biyokütlere göre daha fazla lignin içeren odunsu biyokütle, sert odunlu (hardwood) ve yumuşak odunlu (softwood) olmak üzere iki gruba ayrılır. Sert odunlu ağaçlar geniş yapraklıdır, yavaş büyürler, tam olgunlaşması 100 yılı bulabilir, daha çok tropik iklimlerde yetişir ve lignin içerikleri kütlece yaklaşık %20-25'dir. Sert odunlu ağaçlara kızılğaç, kayın, maun, akçağaç, meşe ve ceviz ağacı örnek olarak verilebilir [20]. Yumuşak odunlu ağaçlar ise, iğne yapraklı ve kozalakları olan ağaç türlerindedir. Sert ağaçlara göre daha hızlı büyürler, karaçam, ardıç, sedir, göknar, çam, ladin ve porsuk ağacı yumuşak odunlu ağaçlara örnek olarak verilebilirler [21].

Biyokütleden gözenekli karbonlu malzeme üretim tekniklerinden biri karbonizasyondur. Bu yöntemde biyokütle oksijensiz ortamda yüksek sıcaklıklara çıkarılarak, ısıl olarak parçalanma gerçekleştirilir. Karbonizasyon reaksiyonunun katı ürünü, hammadde ve reaksiyon koşullarına göre değişmek üzere yaklaşık %85 karbon içeren, az miktarda oksijen ve hidrojen de içeren aromatik organik yapıda bir katıdır [22]. Katı ürün veriminin en yüksek olduğu yöntem yavaş karbonizasyondur. Yavaş karbonizasyonda ısıtma hızı düşük, reaksiyon süresi ise uzun tutulur. Karbonizasyon sonucunda elde edilen ürün verimi ve ısıl değeri hammadde tipine ve reaksiyon koşullarına bağlı olmak üzere sırası ile kütlece yaklaşık %35-55 ve 20-36 MJ/kg aralığında değişmektedir [23]. Yaashikaa ve arkadaşları, biyokütle tipi, sıcaklık, basınç, partikül boyutu, ısıtma hızı gibi reaksiyon koşullarının katı ürünün fizikokimyasal özellikleri üzerinde etkili olduğunu belirlemişlerdir [24]. Karbonizasyon sıcaklığı artırıldığında katı ürünün yüzey alanı artmakta ve mikro-gözenekliliği gelişmektedir [25-26]. Farklı kaynaklardan elde edilen biyokütlelerin karıştırılması ve karbonizasyonuna tabi tutulmasıyla elde edilen katı ürün özellikleri incelendiğinde ise, reaksiyon sıcaklığı ve karıştırma oranının en önemli iki reaksiyon parametresi olduğu görülmüştür [27-28].

Elde edilen katı ürün sahip olduğu mikro- ve mezo-gözenekler sayesinde doğrudan toprak iyileştirici olarak, atıksu arıtımında ve adsorpsiyon uygulamalarında yaygın olarak kullanılırlar [29]. Buna ek olarak, sanayide enerji kaynağı olarak ve kimya sanayisinde bazı kimyasalların hammaddesi olarak

kullanılabilmektedir [30-31].

Yapılan bu çalışmada, sert odun (meşe ağacı talaşı) ve yumuşak odun (karaçam ağacı talaşı) olmak üzere iki farklı tip biyokütleden farklı sıcaklıklarda (400 °C, 550 °C ve 700 °C) gözenekli karbonlu malzeme üretilmiştir. İki farklı tipte biyokütle seçilmesi ve farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen karbonizasyon işlemi ile biyokütle tipi ve reaksiyon sıcaklığının elde edilen biyokömür örneklerinin fizikokimyasal özelliklerine etkisinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Literatürdeki biyokömür üretim teknikleri incelendiğinde, çoğu çalışmada saf inert gaz akışının sağlandığı özel piroliz reaktörleri ya da tüp fırınların kullanıldığı görülmektedir [32-37]. Bu çalışmada kullanılan yöntemde ise, biyokömür atık biyokütle örneğinden piroliz yöntemi gibi özel reaktörler gerektirmeyen ve daha kolay bir yöntem olan kül fırında karbonizasyon yöntemi ile üretilmiştir. Biyokütle örnekleri seçilirken özellikle gıda değeri olmayan, mobilya sektörü atığı olan hammaddelerin seçilmesine özen gösterilmiştir. Böylelikle yapılan bu çalışma ile hem sürdürülebilir bir kaynak olarak biyokütle atığı değerlendirilmiş hem de atık yönetimine katkıda bulunulmuştur.

## 2. MATERYAL ve METOD (MATERIALS and METHOD)

### 2.1. Biyokütle Örneklerinin Karakterizasyonu (Characterization of Biomass Samples)

Çalışma kapsamında kullanılan biyokütle örneklerinden karaçam ağacı talaşı (KÇ) Sıla Orman Ürünleri (Bilecik, Türkiye); meşe ağacı talaşı (M) Arslanoğlu Kereste (Bilecik, Türkiye) firmalarından atık olarak temin edilmiştir. Öncelikle, KÇ ve M örneklerinin yığın (ASTM E 873-82) [38] ve gerçek yoğunlukları (He gaz piknometresi, Micromeritics-AccuPyc II 1340), nem (Nem tayin cihazı, Sartorius, MA 150), kül (ASTM 1102-84) [39], uçucu madde (ASTM E 897-82) [40] ve sabit karbon (100-(Nem+Kül+Uçucu Madde)) miktarları belirlenmiştir. KÇ ve M örneklerinin içerdiği karbon, hidrojen, azot ve oksijen miktarını tayin etmek için elementel analiz cihazı (LECO CHN/S 628) kullanılmış, elde edilen veriler ve Dulong formülü [41] kullanılarak örneklerin üst ısıl değerleri hesaplanmıştır. Hammaddelerin içerdiği fonksiyonel grupların tanımlanması için kullanılan Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (FT-IR, Perkin Elmer, Spectrum 100) 4000-380 cm<sup>-1</sup> dalga boyu aralığında, 4 cm<sup>-1</sup> çözünürlükte çalıştırılmıştır. Analizler gerçekleştirilirken zayıf toplam frekans (ATR) modülü kullanılmıştır. Biyokütle örneklerinin yüzey morfolojik özelliklerinin belirlenmesi için taramalı elektron mikroskobu (SEM, ZEISS SUPRA 40VP) kullanılmıştır. Görüntüler elde edilirken ikincil elektron (SE) dedektör kullanılarak, 10 kV elektron yükü ve ~10 mm çalışma mesafesi şartlarında çalışılmıştır. SEM analizinden önce iletkenliğin sağlanması için örnekler Au/Pd ile kaplanmıştır (Quorum Q300).

### 2.2. Biyokütle Örneklerinin Karbonizasyonu (Carbonization of Biomass Samples)

KÇ ve M örnekleri tartılarak toprak kaplara yerleştirilmiş, ağızları hava almayacak şekilde sıkıca kapatılmış ve kül fırına konmuştur. 20 °C/dk ısıtma hızı ile istenilen sıcaklığa çıkarılan örnekler bu sıcaklıklarda 15 dk bekletilmiştir. KÇ ve M örneklerinin farklı sıcaklıklarda karbonizasyonu ile elde edilen katı ürünler KÇ-400, KÇ-550, KÇ-700, M-400, M-550, M-700 olarak kodlanmıştır. Elde edilen bu örnekler ön analizler (yığın yoğunluk tayini, gerçek yoğunluk tayini, kül miktar tayini, nem miktar tayini, sabit karbon miktar tayini), elementel analiz, FT-IR ve SEM analizleri KÇ ve M örneklerine uygulanan aynı şartlarda uygulanmıştır. Deneysel yöntemi özetleyen şematik gösterim Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Deneysel yöntemin şematik olarak gösterimi

Figure 1.. Schematic representation of the experimental method

### 3. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

#### 3.1. Biyokütle Örneklerinin Karakterizasyon Sonuçları (Characterization Results of Biomass Samples)

KÇ ve M örneklerine uygulanan ön analizler ve elementel analiz sonuçları Çizelge 1’de verilmiştir. Hammaddelerin gerçek yoğunluk ve yığın yoğunluk değerleri arasında fark olması, biyokütlelerin gözenekli yapıda olduğunu göstermektedir. KÇ kütlece % 4,45 nem, % 2,34 kül ve %70,42 uçucu madde içerirken; M örneği %3,56 nem, %4,88 kül ve %68,32 uçucu madde içermektedir. Hammaddelerin içerdiği sabit karbon miktarı ise sırası ile kütlece %22,79 ve %23,24’dür. KÇ ve M örneklerinin düşük nem ve yüksek uçucu madde miktarına sahip olması bu hammaddelerin uçuculaştırma/karbonizasyon yöntemi ile karbonlu malzeme üretimi için uygun olduğunu göstermektedir. Karbonizasyon yönteminde hammadde reaktif olmayan ortamda, yüksek sıcaklıkta ısıl olarak bozundurulur. İşlem sırasında hammaddeye verilen ısı öncelikle yüzeydeki nemin uzaklaştırılmasında kullanıldığından, düşük nem içeriğine sahip biyokütleler karbonizasyon ile değerlendirilmek için tercih edilmektedir [42]. Elementel analiz sonuçlarına göre KÇ ve M örneklerinin içerdiği karbon miktarı sırası ile kütlece %40,22 ve %41,59’dur. Örneklerin sahip olduğu yüksek karbon miktarı, bu hammaddelerden karbonlu malzeme üretilmesi için uygundur.

Çizelge 1. Biyokütle örneklerinin ön analiz ve elementel analiz sonuçları

Table 1. Preliminary analysis and elemental analysis results of biomass samples

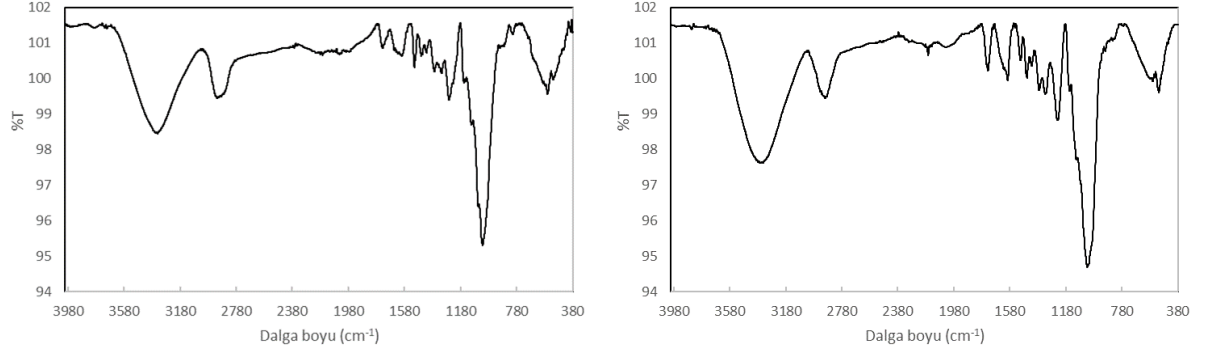
Özellik	KÇ	M
Gerçek Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1,38	1,27
Yığın Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	0,21	0,26
Nem (%)	4,45	3,56
Kül (%)	2,34	4,88
Uçucu Madde (%)	70,42	68,32
Sabit Karbon (%)*	22,79	23,24
Karbon (%)	40,22	41,59
Hidrojen (%)	6,58	6,19
Azot (%)	0,25	0,16
Oksijen (%)**	52,95	52,06
Isıl Değer (MJ/kg)	13,55	13,61

\*Farktan (Sabit Karbon= 100- (Nem+Kül+Uçucu Madde))

\*\*Farktan (Oksijen=100- (Karbon+Hidrojen+Azot))

KÇ ve M örneklerinin sahip olduğu fonksiyonel grupları gösteren FT-IR spektrumları Şekil 2’de verilmiştir. Şekil 2 (a)’da 3339 cm<sup>-1</sup>’de ve Şekil 2 (b)’de 3321 cm<sup>-1</sup>’de yer alan geniş pik, -OH grubuna aittir. Bu pikler ham maddelerin yapısında bulunan yüzey nemi ile alkol ve fenollerin içerdiği O-H gerilimini göstermektedir [43]. KÇ örneğinde 2915 cm<sup>-1</sup> metil ve metilen gruplarını ifade eden C-H gerilme titreşimine ait pik bulunmaktadır [44]. Hammadde yapısında bulunan karboksilik asit, keton, aldehit ve esterleri belirten C=O grubu 1739 cm<sup>-1</sup> ve 1598 cm<sup>-1</sup> bölgesindeki pikler ile belirtilmiştir. C=C gerilimini

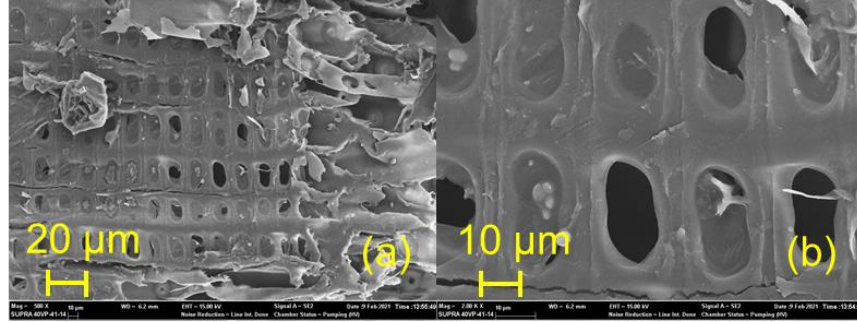
gösteren alkenlere ait pik  $509\text{ cm}^{-1}$  bölgesinde yer almaktadır [45]. Selüloz yapısındaki C-H ise  $1281\text{ cm}^{-1}$ 'de gözlenen pik ile belirlenmiştir [46].  $1021\text{ cm}^{-1}$  ve  $1262\text{ cm}^{-1}$  bölgesinde görülen pikler C-O gerilme titreşimine aittir ve yapıdaki alkol, fenol, eter ve ester gruplarını gösterir [47]. M örneğinde ise  $2887\text{ cm}^{-1}$  de alifatik  $\text{CH}_3$  grupları gösteren bir pik yer almaktadır. C-H gerilmesine ait pik  $1254\text{ cm}^{-1}$ 'de, C-O ve C-O-C bağlarına ait olan pik ise  $1019\text{ cm}^{-1}$ 'de görülmektedir [48].



Şekil 2: (a) KÇ (b) M örneklerinin FT-IR spektrumları

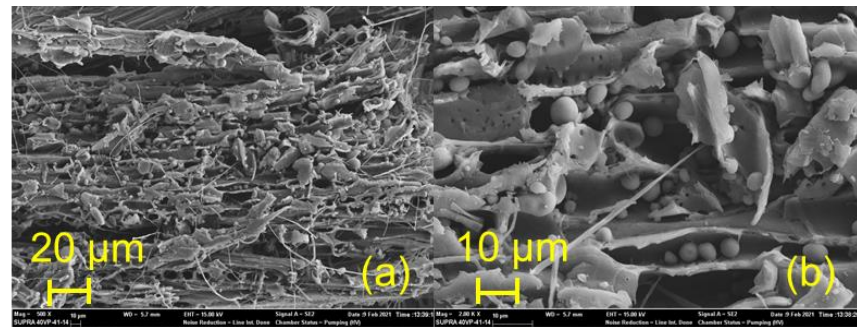
Figure 2: FT-IR spectra of (a) KÇ (b) M

KÇ ve M örneklerine ait SEM görüntüleri sırası ile Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir. Buna göre KÇ örneği az gözenekli ve düzlemsel yapıda, M ise karmaşık, daha gözenekli ve çok tabakalı lifli yapıdadır.



Şekil 3: KÇ'ye ait SEM görüntüleri (a) 500x (b) 2kx

Figure 3: SEM images of KÇ (a) 500x (b) 2kx



Şekil 4: M'ye ait SEM görüntüleri (a) 500x (b) 2kx

Figure 4: SEM images of M (a) 500x (b) 2kx

### 3.2. Karbonizasyon Sonucu Elde Edilen Örneklerin Karakterizasyon Sonuçları (Characterization 3.2.1. Results of Carbonized Samples)

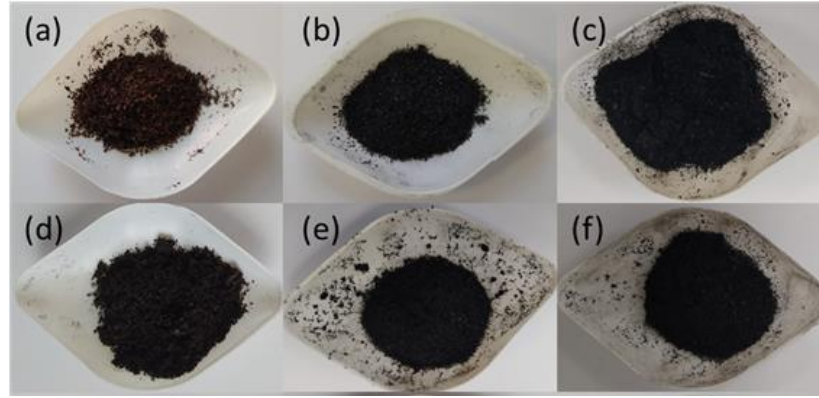
KÇ ve M örneklerinin farklı sıcaklıklarda karbonize edilmesi ile elde edilen örneklerin verimleri ve fiziksel görüntüleri sırası ile Çizelge 2 ve Şekil 5'te verilmiştir. Karbonizasyon reaksiyon sıcaklıkları arttıkça, daha fazla uçucu hidrokarbonun biyokütleden ayrılması ile katı ürün veriminin literatürle

uyumlu bir şekilde azaldığı görülmektedir [49]. Karbonizasyon sıcaklığının aynı olduğu fakat farklı biyokütlelerin karbonizasyonu sonucunda elde edilen verim değerlerinin birbirinden farklı olması ise, biyokütle tipinin elde edilen ürün veriminde etkili olduğunu göstermektedir.

**Çizelge 2:** Karbonizasyon reaksiyonu verimleri (%)

Biyokütle	Karbonizasyon Sıcaklığı (°C)		
	400	550	700
KÇ	51,03	27,02	14,19
M	60,40	43,80	29,84

Biyokütle tipi ve karbonizasyon sıcaklığı değiştikçe elde edilen katların morfolojik ve görsel özelliklerinin de farklılaştığı gözlenmiştir (Şekil 5). 400 °C'de elde edilen örneklerin renkleri kahverengimsiyken, reaksiyon sıcaklığı arttıkça siyah renkli örnekler elde edilmiştir.



**Şekil 5:** Örneklerin görselleri (a) KÇ-400 (b) KÇ-550 (c) KÇ-700 (d) M-400 (e) M-550 (f) M-700

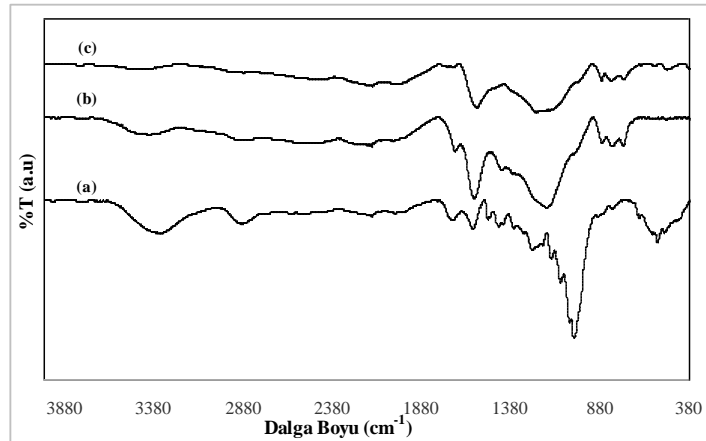
*Figure 5: Images of (a) KÇ-400 (b) KÇ-550 (c) KÇ-700 (d) M-400 (e) M-550 (f) M-700*

Farklı biyokütlelerden farklı reaksiyon koşullarında elde edilen karbonlu malzemelerin ön analiz ve elementel analiz sonuçları Çizelge 3'te verilmiştir. 400 °C, 550 °C ve 700 °C'de sentezlenen örneklerin yoğunluk değerleri karşılaştırıldığında, yüksek sıcaklıklara çıktığında gerçek yoğunluk değerlerinde önemli bir değişiklik görülmemiştir fakat yığın yoğunluk değerleri azalmıştır. Yüksek sıcaklıklara çıktığında, daha çok uçucu hidrokarbon yapıdan uzaklaşmış, buna bağlı olarak gözeneklilik artmış ve hesaplanan yığın yoğunluk değerleri de düşmüştür. En düşük yığın yoğunluk değerleri en yüksek sıcaklıklarda sentezlenen KÇ-700 ve M-700 örnekleri için sırasıyla 0,35 g/cm<sup>3</sup> ve 0,40 g/cm<sup>3</sup> olarak bulunmuştur. Karbonizasyon sıcaklığı arttıkça her iki biyokütle örneğinde de genel eğilimle nem içeriğinin azaldığı belirlenmiştir. Buna uymayan M-550 örneğinde nem değerinin yüksek olması, nem içeriğinin üretim sonrası saklama koşullarından etkilenmesi ile açıklanabilir. Karbonize edilmiş örneklerin sahip olduğu kül miktarları KÇ ve M'nin içerdikleri kül miktarlarından daha fazladır. Karbonizasyon sürecinde yüksek sıcaklığa çıktığında biyokütle yapısındaki uçucu hidrokarbonlar yapıdan uzaklaşır, kül yapıcı bileşenlerin kütlece yüzdeleri ise bağlı olarak artar. Buna göre, elde edilen örneklerin kül içerikleri hammaddelerin kül içeriğinden daha fazladır. Elementel analiz sonuçlarına göre, sıcaklık arttıkça örneklerin içerdiği karbon miktarı ve buna bağlı olarak hesaplanan ısıl değerlerde artış görülmüştür.

**Çizelge 3.** Karbonizasyon sonucu elde edilen örneklerinin ön analiz ve elementel analiz sonuçları*Table 3. Preliminary analysis and elemental analysis results of carbonized samples*

	KÇ-400	KÇ-550	KÇ-700	M-400	M-550	M-700
<b>Gerçek Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,39	1,34	1,35	1,24	1,28	1,26
<b>Yığın Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,49	0,49	0,35	0,50	0,48	0,40
<b>Nem (%)</b>	1,17	0,75	0,87	0,88	1,33	0,51
<b>Kül (%)</b>	1,03	2,01	1,65	23,82	19,73	21,47
<b>Uçucu Madde (%)</b>	56,54	53,67	49,23	50,76	48,07	35,27
<b>Sabit Karbon (%)</b>	41,26	43,57	48,25	24,54	30,87	42,75
<b>Karbon (%)</b>	42,05	47,98	53,65	45,73	46,12	50,09
<b>Hidrojen (%)</b>	5,97	5,32	5,88	5,12	5,20	5,32
<b>Azot (%)</b>	0,23	0,21	0,19	0,29	0,34	0,21
<b>Oksijen (%)</b>	51,75	46,49	40,28	48,86	48,34	44,38
<b>H/C</b>	1,70	1,33	1,32	1,34	1,35	1,28
<b>O/C</b>	0,92	0,73	0,56	0,80	0,79	0,67
<b>Isıl Değer (MJ/kg)</b>	13,50	15,52	19,36	14,04	14,38	16,61

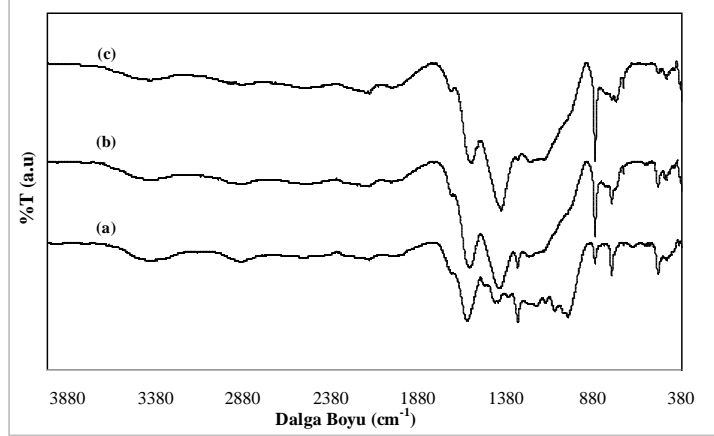
KÇ ve M örneklerinin farklı sıcaklıklarda karbonizasyonu sonucu elde edilen örneklerin FT-IR spektrumları sırası ile Şekil 6 ve Şekil 7’de verilmiştir. Şekil 6’da KÇ-400 örneğinde 3350 cm<sup>-1</sup> O-H grubunu gösteren, 2868 cm<sup>-1</sup>’de bulunan metil ve metilen gruplarını gösteren ve alkol, fenol, eter ve ester gruplarına ait C-O gerilme titreşimlerini gösteren piklerin şiddeti en yüksektir [50]. KÇ-400 örneğinde 2917 cm<sup>-1</sup> bölgesinde görülen yayvan ve düşük şiddetli pik, alkil gruplarına ait C-H gerilme titreşimini göstermektedir ve bu alifatik zincir biyokütle örneklerinin ana yapısına aittir [51]. KÇ-550 ve KÇ-700 örneklerinde bu pikin görülmemesinin sebebi, yüksek sıcaklıkta karbonizasyon reaksiyonlarının daha yüksek verimde gerçekleşmesi ve elde edilen biyokömür örneklerinin biyokütle yapısından tamamen uzaklaşmasıyla açıklanabilir [52]. Bu sonuç elementel analiz sonuçları ile de uyum içerisindedir. Karbonizasyon sıcaklığı arttıkça elde edilen biyokömür örneğinin karbon içeriğinin de arttığı belirlenmiştir. KÇ-550 örneğinde 1688 cm<sup>-1</sup> ve 1576 cm<sup>-1</sup> bölgesinde bulunan keton, aldehit, karboksilik asit ve esterlerin gruplarını gösteren C=O gerilme titreşiminin şiddeti en fazladır.

**Şekil 6:** FT-IR spektrumları (a) KÇ-400 (b) KÇ-550 (c) KÇ-700*Figure 6: FT-IR Spectra (a) KÇ-400 (b) KÇ-550 (c) KÇ-700*

Şekil 7’de verilen spektruma göre karbonizasyon sıcaklığı değiştikçe O-H grubuna ait bant titreşimi (3403 cm<sup>-1</sup>), C-H bant titreşimi (2874 cm<sup>-1</sup>) ve C=O (1590 cm<sup>-1</sup>) gerilme titreşimine ait pik şiddetlerinde farklılık olmadığı belirlenmiştir. Fakat M-400 örneğinde (en düşük karbonizasyon sıcaklığı) C=O gerilme titreşimini gösteren 1594 cm<sup>-1</sup>’de gözlenen pik en yüksek şiddettedir. Reaksiyon sıcaklığı arttıkça yapıdaki C-H grubunu (1405 cm<sup>-1</sup>) gösteren pik şiddetinin arttığı, C-H grubuna ait pikin (873 cm<sup>-1</sup>) ise M-700 örneğinde en yüksek şiddette olduğu belirlenmiştir.



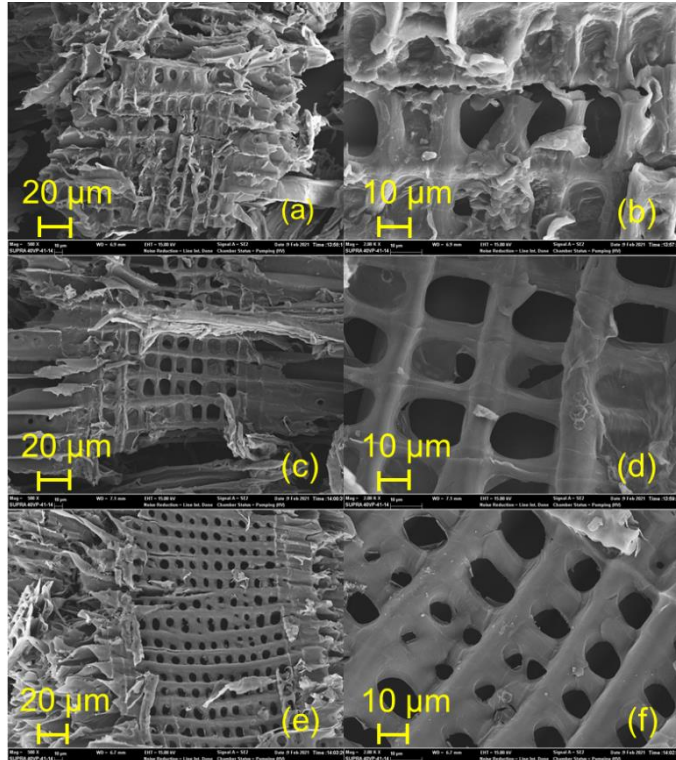
Hammaddeler ve karbonizasyon sonucu elde edilen karbonlu malzemelerin FT-IR spektrumları incelendiğinde, KÇ ve M örneklerinin daha çok tek bağlı alkil bileşenlerden oluştuğu, reaksiyon sonrası elde edilen örneklerin ise çift bağ ve aromatik yapılardan oluştuğu belirlenmiştir.



Şekil 7: FT-IR spektrumları (a) M-400 (b) M-550 (c) M-700

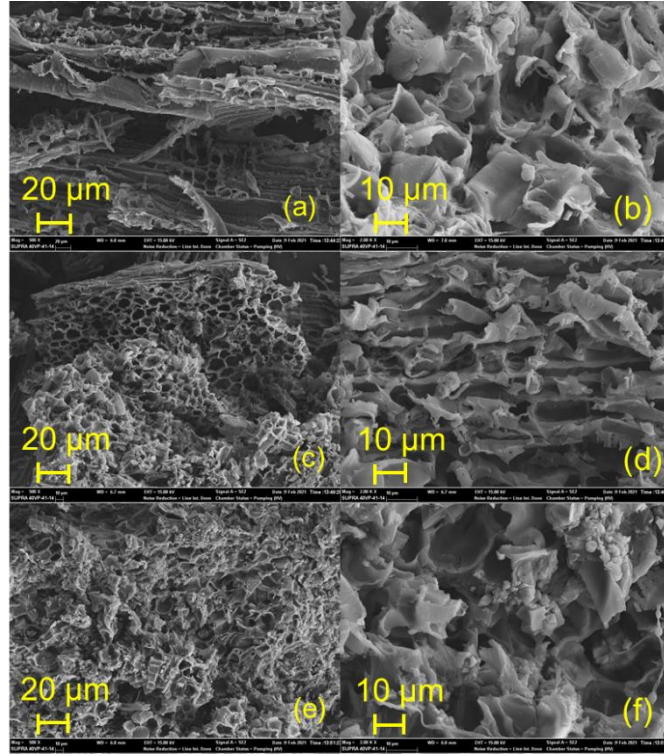
Figure 7: FT-IR Spectra (a) M-400 (b) M-550 (c) M-700

Farklı büyütmelerde alınan SEM görüntüleri Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir. KÇ-400, KÇ-550 ve KÇ-700 örneklerinin SEM görüntüleri incelendiğinde yüksek sıcaklıklara çıktıkça gözenekliliğin arttığı ve düzgün kafes yapılarının geliştiği görülmektedir. M-400, M-550 ve M-700 örneklerinde de yüksek sıcaklıklara çıktıkça gözenekliliğinin arttığı fakat süngerimsi yapıda gözeneklerin oluştuğu belirlenmiştir.



Şekil 8: SEM görüntüleri (a) KC-400, 500x (b) KC-400, 2kx (c) KC-550, 500x (d) KC-550, 2 kx (e) KC-700, 500 x (f) KC-400, 2kx

Figure 8: SEM images (a) KC-400, 500x (b) KC-400, 2kx (c) KC-550, 500x (d) KC-550, 2 kx (e) KC-700, 500 x (f) KC-400, 2kx



**Şekil 9:** SEM görüntüleri (a) M-400, 500x (b) M-400, 2kx (c) M-550, 500x (d) M-550, 2 kx (e) M-700, 500 x (f) M-400, 2kx

*Figure 9: SEM images (a) M-400, 500x (b) M-400, 2kx (c) M-550, 500x (d) M-550, 2 kx (e) M-700, 500 x (f) M-400, 2kx*

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Hammaddelerin içerdiği C, H, N ve O miktarlarının belirlenmesi için elementel analiz gerçekleştirilmiş ve sahip oldukları ısı değerleri KÇ ve M için sırasıyla 13,55 MJ/kg ve 13,61 MJ/kg olarak hesaplanmıştır. FT-IR analizlerine göre KÇ ve M yapılarında alkol, fenol, eter, keton, aldehit, karboksilik asit ve ester gruplarına ait pikler tespit edilmiştir. Örneklerin karbonize edilmesi ile yapıda metil ve metilen gruplarına, keton, aldehit, karboksilik asit, esterlerin gruplarına, alkol, fenol, eter ve ester grupları belirlenmiştir. Karbonizasyon öncesi ve sonrası gerçekleştirilen SEM analizine göre, yüzey morfolojik yapısının ısı işlemi ile değiştiği, sıcaklık arttıkça gözenekliliğin arttığı belirlenmiştir. Bu sonuç, yoğunluk değerlerinin sıcaklık arttıkça azalıyor olması ile de desteklenmektedir. Yumuşak odunlu ağaç (KÇ) ve sert odunlu ağaç (M) olarak örneklerin fizikokimyasal özellikleri birbiriyle karşılaştırıldığında, KÇ'nin kül içeriğinin daha düşük, uçucu madde içeriğinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Biyokütleden karbonlu malzeme üretiminde, kül miktarının düşük ve uçucu madde miktarının yüksek olması tercih edilmektedir, buna göre karbonizasyon işlemi için KÇ örneğinin daha uygun olduğu belirlenmiştir. KÇ örneğinden elde edilen biyokömür örnekleri ise M örneğinden elde edilen biyokömür örneklerine göre daha düşük kül ve daha yüksek gözeneklilik özelliğine sahiptir.

Yapılan karakterizasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre, biyokütle yenilenebilir, sürdürülebilir ve temiz bir kaynak olarak karbonlu malzeme üretiminde gelecek vadede bir hammadde olarak kullanılabilir. Biyokütleden elde edilen karbonlu malzemenin yüzeysel, fiziksel ve kimyasal özellikleri hammadde tipi ve reaksiyon koşullarına bağlıdır ve bunların seçimi karbonlu malzemenin uygulama alanına yönelik olmak üzere çok önemlidir. Belirlenen hammaddenin atık biyokütle olarak değerlendirilmesi ise hem üretim maliyetini azaltmakta hem de atık yönetimine katkıda bulunmaktadır.

**Etik Standartlar Bildirimi (Declaration of Ethical Standards)**

Bu çalışma yapılırken, yazarlık, alıntı, veri raporlama ve orijinal araştırma yayınlama dahil olmak üzere tüm etik yönergelere uyulmuştur.

**Yazar Katkı Beyannamesi (Credit Authorship Contribution Statement)**

AA: Deneylerin yapılması EY: Deneylerin tasarlanması, sonuçların yorumlanması, tam metnin yazılması ve revizyonu; ST: Sonuçların yorumlanması, tam metnin yazılması.

**Çıkar Çatışması Beyannamesi (Declaration of Competing Interest)**

Yazarların herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

**Destek / Teşekkür (Funding / Acknowledgements)**

Bu çalışma, kamu, ticari veya kar amacı gütmeyen sektörlerdeki finansman kuruluşlarından herhangi bir özel hibe almamıştır.

**Veri Kullanılabilirliği (Data Availability)**

Uygulanamaz.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] H. Xue, X. Gao, M. K. Seliem, M. Mobarak, R. Dong, X. Wang, Z. Li, "Efficient adsorption of anionic azo dyes on porous heterostructured MXene/biomass activated carbon composites: Experiments, characterization, and theoretical analysis via advanced statistical physics models", *Chemical Engineering Journal*, vol. 451, no. 3, Jan., pp. 138735, 2023.
- [2] A. Ito, K. Tanaka, "Applications of Carbon Nanotubes and Graphene in Spin Electronics", *Carbon Nanotubes and Graphene*, pp. 253-278, 2014.
- [3] W. D. Li, X. P. Wang, Eds., *Nanofibers: Synthesis, Properties, and Applications*, Nova Science Publishers Incorporated, 2012.
- [4] C. Ma, J. Bai, M. Demir, Q. Yu, X. Hu, W. Jiang, L. Wang, "Polyacrylonitrile-derived nitrogen enriched porous carbon fiber with high CO<sub>2</sub> capture performance", *Separation and Purification Technology*, vol. 303, Dec., pp. 122299, 2022.
- [5] C. Ma, T. Lu, M. Demir, Q. Yu, X. Hu, W. Jiang, L. Wang, "Polyacrylonitrile-Derived N-Doped Nanoporous Carbon Fibers for CO<sub>2</sub> Adsorption", *ACS Applied Nano Materials*, vol. 5, no. 9, Aug., pp. 13473-13481, 2022.
- [6] Q. Yu, J. Bai, J. Huang, M. Demir, B. N. Altay, X. Hu, L. Wang, "One-Pot Synthesis of N-Rich Porous Carbon for Efficient CO<sub>2</sub> Adsorption Performance", *Molecules*, Vol. 27, no. 20, Oct., pp. 6816, 2022.
- [7] S. Ray, "Applications of graphene and graphene-oxide based nanomaterials", *William Andrew Press*, 2015.
- [8] A. Gul, N. G. Khaligh, N. M. Julkapli, "Surface modification of carbon-based nanoadsorbents for the advanced wastewater treatment", *Journal of Molecular Structure*, vol. 1235, July, pp. 130148, 2021.
- [9] X. Zhang, Y. Li, Z. Zhang, M. Nie, L. Wang, H. Zhang, "Adsorption of condensable particulate matter from coal-fired flue gas by activated carbon", *Science of The Total Environment*, vol. 778, July, pp. 146245, 2021.

- [10] H. Zhang, J. Niu, Y. Guo, F. Cheng, "Recirculating coking by-products and waste for cost-effective activated carbon (AC) production and its application for treatment of SO<sub>2</sub> and wastewater in coke-making plant", *Journal of Cleaner Production*, vol. 280, no:2, Jan., pp. 124375, 2021.
- [11] E. Yaman, F. Ö. Gökmen, S. Temel, N. Özbay, "Evaluation of bio-char as porous catalyst support in the pyrolysis of Brassica napus subsp. napus cake", *Journal of Porous Materials*, vol. 29, no. 3, Feb., pp. 771-781, 2022.
- [12] A. M. Abioye, F. N. Ani, "Recent development in the production of activated carbon electrodes from agricultural waste biomass for supercapacitors: A review", *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 52, Dec., pp. 1282-129, 2015.
- [13] M. Sevilla, R. Mokaya, "Energy storage applications of activated carbons: supercapacitors and hydrogen storage", *Energy & Environmental Science*, vol. 7, no. 4, Jan., pp. 1250-1280, 2014.
- [14] R. K. Bera, S. G. Mhaisalkar, D. Mandler, S. Magdassi, "Formation and performance of highly absorbing solar thermal coating based on carbon nanotubes and boehmite", *Energy Conversion and Management*, vol. 120, July, pp. 287-293, 2016.
- [15] G. Zou, D. Zhang, C. Dong, H. Li, K. Xiong, L. Fei, Y. Qian, "Carbon nanofibers: synthesis, characterization, and electrochemical properties", *Carbon*, vol. 44, no. 5, Apr., pp. 828-832, 2006.
- [16] L. Ge, C. Zhao, M. Zuo, J. Tang, W. Ye, X. Wang, C. Xu, "Review on the preparation of high value-added carbon materials from biomass", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 168, Nov., pp. 105747, 2022.
- [17] E. Kapluhan, "Enerji Coğrafyası Açısından Bir İnceleme: Biyokütle Enerjisinin Dünyadaki ve Türkiye'deki Kullanım Durumu", *Marmara Coğrafya Dergisi*, vol. 30, Kas., pp. 97, 2014.
- [18] A. Aşma, E. Yaman, S. Temel, "Biyokütleden Üretilen Karbon Altlık Üzerinde ZnO Nano-Parçacıkların Biriktirilmesi ve Karakterizasyonu", *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 29, no. 3, Ara., pp. 431-439, 2021.
- [19] E. Sözen, G. Gündüz, D. Aydemir, E. Güngör, "Biyokütle Kullanımının Enerji, Çevre, Sağlık ve Ekonomi Açısından Değerlendirilmesi", *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, vol. 19, no. 1, Haz., pp. 149, 2017.
- [20] E. Novaes, M. Kirst, V. Chiang, H. Winter-Sederoff, R. Sederoff, "Lignin And Biomass: A Negative Correlation for Wood Formation and Lignin Content in Trees", *Plant Physiology*, vol. 154, no. 2, Oct., pp. 557, 2010.
- [21] Diffen, 2021, "Hardwood vs Softwood" 2022 [Online] Available: [https://www.diffen.com/difference/Hardwood\\_vs\\_Softwood](https://www.diffen.com/difference/Hardwood_vs_Softwood) [accessed: 15.11.2022]
- [22] J. P. Diebold, A. V. Bridgwater, "Overview of Fast Pyrolysis of Biomass for The Production of Liquid Fuels". *Developments in Thermochemical Biomass Conversion*, Springer, Dordrecht, 1997.
- [23] T. Kan, V. Strezov, T. J. Evans, "Lignocellulosic Biomass Pyrolysis: A Review of Product Properties and Effects of Pyrolysis Parameters", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 1139, May, 2016.
- [24] P. R. Yaashikaa, P. S. Kumar, S. Varjani, A. Saravanan "A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy", *Biotechnology Reports*, vol. 28, Dec., pp. 00570, 2020.
- [25] B. Khiari, I. Ghouma, A. I. Ferjani, A. A. Azzaz, S. Jellali, L. Limousy, M. Jeguirim, "Kenaf stems: Thermal characterization and conversion for biofuel and biochar production", *Fuel*, vol. 262, Feb., pp. 116654, 2020.
- [26] A. Hmid, D. Mondelli, S. Fiore, F. P. Fanizzi, Z. Al Chami, S. Dumontet, "Production and characterization of biochar from three-phase olive mill waste through slow pyrolysis", *Biomass and Bioenergy*, vol. 71, Dec., pp. 337, 2014.
- [27] A. Ghysels, A. Krämer, R. M. Venable, W. E. Teague, E. Lyman, K. Gawrisch, R. W. Pastor, "Permeability of membranes in the liquid ordered and liquid disordered phases", *Nature communications*, vol. 10, no.1, Dec., pp. 11, 2019.

- [28] G. Bhowmick, A. K. Sarmah, R. Sen, "Lignocellulosic biorefinery as a model for sustainable development of biofuels and value-added products", *Bioresource technology*, vol. 247, Jan., pp. 1148, 2018.
- [29] D. Mohan, A. Sarswat, Y. S. Ok, C. U. Pittman Jr, "Organic And İnorganic Contaminants Removal from Water with Biochar, A Renewable, Low Cost And Sustainable Adsorbent–A Critical Review", *Bioresource Technology*, vol. 160, May., pp. 201, 2014.
- [30] M. K. Hossain, V. Strezov, K. Y. Chan, A. Ziolkowski, P. F., Nelson, "Influence of Pyrolysis Temperature on Production And Nutrient Properties Of Wastewater Sludge Biochar", *Journal of Environmental Management*, vol. 92, no. 1, Jan., pp. 225, 2011.
- [31] Y. Lee, J. Park, C. Ryu, K. S. Gang, W. Yang, Y. K. Park, S., Hyun, "Comparison of Biochar Properties from Biomass Residues Produced by Slow Pyrolysis at 500 °C", *Bioresource Technology*, vol. 148, Nov., pp. 197, 2015.
- [32] L. Xie, Q. Li, M. Demir, Q. Yu, X. Hu, Z. Jiang, L. Wang, "Lotus seed pot-derived nitrogen enriched porous carbon for CO<sub>2</sub> capture application", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 655, Dec., pp. 130226, 2022.
- [33] C. Song, K. Chen, M. Chen, X. Jin, G. Liu, X. Du, Q. Huang, "Sequential combined adsorption and solid-phase photocatalysis to remove aqueous organic pollutants by H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>-modified TiO<sub>2</sub> nanoparticles anchored on biochar", *Journal of Water Process Engineering*, vol. 45, Feb., pp. 102467, 2022.
- [34] H. Luo, S. Yu, M. Zhong, Y. Han, B. Su, Z. Lei, "Waste biomass-assisted synthesis of TiO<sub>2</sub> and N/O-contained graphene-like biochar composites for enhanced adsorptive and photocatalytic performances", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 899, Apr., pp. 163287, 2022.
- [35] R. Shan, L. Lu, J. Gu, Y. Zhang, H. Yuan, Y. Chen, B. Luo, "Photocatalytic degradation of methyl orange by Ag/TiO<sub>2</sub>/biochar composite catalysts in aqueous solutions", *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 114, Aug., pp. 105088, 2020.
- [36] L. Lu, R. Shan, Y. Shi, S. Wang, H. Yuan, "A novel TiO<sub>2</sub>/biochar composite catalysts for photocatalytic degradation of methyl orange", *Chemosphere*, vol. 222, May, pp. 391-398, 2019.
- [37] J. Kim, B. Park, Y. Son, J. Khim "Peat moss-derived biochar for sonocatalytic applications", *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 42, Apr., pp. 26-30, 2018.
- [38] ASTM, "Standart test method for bulk density of densified particulate biomass fuels", *In ASTM Annual Book of Ame. Soc. for Testing and Materials Standarts*, Easton, M.D., USA, E 873-82, 1983.
- [39] ASTM, "Standart test method for ash in wood", *In ASTM Annual Book of Ame. Soc. for Testing and Materials Standarts*, Easton, M.D., USA, D-1102-84, 1983.
- [40] ASTM, "Standart test method for volatile matter in analysis sample refuse derived fuel-3", *In ASTM Annual Book of Ame. Soc. for Testing and Materials Standarts*, Easton, M.D., USA, E-897-82, 1983.
- [41] J. H. Harker, J. R. Backhurst, *Fuel and Energy* 120, London, Academic Press Inc., 1981.
- [42] B. V. Babu, A. S. Chaurasia, "Modeling for pyrolysis of solid particle: kinetics and heat transfer effects", *Energy Conversion and Management*, vol. 44, no. 14, Aug., pp. 2254, 2003.
- [43] A. S. Khan, Z. Man, M. A. Bustam, A. Nasrullah, Z. Ullah, A. Sarwono, N. Muhammad, "Efficient conversion of lignocellulosic biomass to levulinic acid using acidic ionic liquids", *Carbohydrate polymers*, vol. 181, Feb, pp. 211, 2018.
- [44] N. Wang, A. Tahmasebi, J. Yu, J. Xu, F. Huang, A. Mamaeva, "A comparative study of microwave-induced pyrolysis of lignocellulosic and algal biomass", *Bioresource technology*, vol. 190, Aug., pp. 90, 2015.
- [45] E. Yaman, "Biyokütleden Fenolik Hidrokarbonlarca Zengin Değerli Kimyasalların Elde Edilmesi", *PhD thesis, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bilecik, 2018.
- [46] P. Devi, A. K. Saroha, "Effect of pyrolysis temperature on polycyclic aromatic hydrocarbons toxicity and sorption behaviour of biochars prepared by pyrolysis of paper mill effluent treatment plant sludge", *Bioresource technology*, vol. 192, Sep., pp. 316, 2015.

- [47] T. Yuan, A. Tahmasebi, J. Yu, "Comparative study on pyrolysis of lignocellulosic and algal biomass using a thermogravimetric and a fixed-bed reactor", *Bioresource Technology*, vol. 175, Jan., pp. 333, 2015.
- [48] A. Ulusal, "Biyokütleden piroliz yöntemi ile üretilen biyocharin çevresel etkilerinin incelenmesi", *Master's thesis*, Anadolu Üniversitesi, 2016.
- [49] A. Tomczyk, Z. Sokołowska, P. Boguta, "Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects", *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, vol.19, no. 1, Feb., pp. 193, 2020.
- [50] N. Özbay, A. Ş. Yargıç, R. Z. Y. Şahin, E. Yaman, "Research on the Pyrolysis Characteristics of Tomato Waste with Fe-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst", *In Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions*, pp. 815-828, Academic Press, 2018.
- [51] E. Yaman, A. Ulusal, B. B. Uzun, "Co-pyrolysis of lignite and rapeseed cake: a comparative study on the thermal decomposition behavior and pyrolysis kinetics", *SN Appl Sci*, vol. 3, no. 1, Jan., pp. 1-15, 2021.
- [52] E. Yaman, T. C. Ulu, N. Özbay, "Characterization of different biochars and their impacts on infectivity of entomopathogenic nematode *Heterorhabditis bacteriophora*", *Biomass Conversion and Biorefinery*, in press, 1-14, 2021.