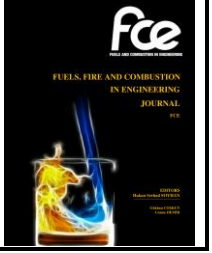
	<b>MÜHENDİSLİKTE YAKITLAR, YANGIN VE YANMA DERGİSİ</b> FUELS, FIRE AND COMBUSTION IN ENGINEERING JOURNAL		
	eISSN: 2564-6435		
	Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/fce">http://dergipark.gov.tr/fce</a>		
	<u>Geliş/Received</u> 31/12/2023		
	<u>Kabul/Accepted</u> 12/12/2023	<u>Doi:</u> <a href="https://doi.org/10.52702/fce.1245394">https://doi.org/10.52702/fce.1245394</a>	


## Süper Kapasitör Uygulamaları için Mikrodalga Destekli Biyokütle Tabanlı Elektrot Malzemesi Üretimi


Musa Altınışik<sup>1</sup>, Tülin Avcı Hansu<sup>2</sup>, Murat Akdemir<sup>3\*</sup>


### ÖZ

Süper kapasitörler, yüksek güç yoğunlukları, hızlı şarj/deşarj oranı, güç-enerji farkını kapatma avantajları, uzun çevrim ömürleri, basit çalışma ilkeleri, güvenli çalışmaları ve düşük bakım maliyetleri nedeniyle enerji depolama pazarında ilgi odağı haline gelmiştir. Son zamanlarda, özellikle ucuz, çevre dostu, gelişmiş gözenekli yapıda, yüksek özgül kapasiteli gibi özelliklerinden dolayı biyokütle türevi karbon elektrot malzemeler üzerine yapılan araştırmalar ivme kazanmıştır. Bu çalışmada, KOH aktivasyonu ve karbonizasyon yöntemiyle aktif karbona dönüştürülen Meşe mazısı biyokütlesine çeşitli sürelerde ve farklı güçlerde mikrodalga ısıtma uygulanarak başarılı bir şekilde süperkapasitör elektrotları üretilmiştir. Kimyasal karakterizasyonlar ve elektrokimyasal yöntemler kullanılarak elektrotların özellikleri belirlenmiştir. Mikrodalga uygulanmamış elektrodun kapasitans değeri 1 A/g akım yoğunluğunda 89 F/g iken MAQ-4 elektrodunun kapasitans değeri 283 F/g olarak hesaplanmıştır. Kapasitans değeri-Mikrodalga gücü arasındaki ilişki konveks bir parabol eğri özelliği sergilemiştir. Mikrodalga enerjisinin uygulanma süresi arttıkça elektrotların kapasitans değeri artmıştır. Mikrodalga gücü arttıkça farklı akım yoğunluklarındaki kapasitans değerleri arasındaki farkı oldukça azaltmıştır. Uygulanan mikrodalga gücü genel olarak elektrotların kararlılığını artırmıştır. Kararlılık testi için yapılan uzun döngülerden MAQ-4 elektrodunun kapasitans değerinde yalnızca %5,62'lik bir azalma görülmüştür. Elde edilen sonuçlar ışığında, üretilen elektrot malzemeleri iyi kapasitans, yüksek enerji, yüksek güç yoğunluğu, düşük maliyet ve çevre dostu olma gibi avantajları sayesinde hem organik atıkların yeniden kullanımında hem de enerji depolama ihtiyacının karşılanmasında gelecek vaat etmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji Depolama, süper kapasitör, biyokütle, mikrodalga.

<sup>1</sup> Musa ALTINIŞIK, Faculty of Engineering, Siirt University, Siirt; email: [musa.altnsk56@gmail.com](mailto:musa.altnsk56@gmail.com)  0000-0002-2201-4986

<sup>2</sup> Tülin AVCI HANSU, Faculty of Engineering, Siirt University, Siirt; email: [tulin.hansu@siirt.edu.tr](mailto:tulin.hansu@siirt.edu.tr)  0000-0001-5441-4696

<sup>\*3</sup> Murat AKDEMİR, Faculty of Engineering, Siirt University, Siirt; email: [muratakdemir@siirt.edu.tr](mailto:muratakdemir@siirt.edu.tr)  0000-0001-9235-1913

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

# Microwave Assisted Biomass-Based Electrode Material Production for Supercapacitor Applications

## ABSTRACT

Supercapacitors have become the focus of attention in the energy storage market due to their high power densities, fast charge/discharge rate, advantages of closing the power-energy gap, long cycle life, simple working principles, safe operation and low maintenance costs. Recently, researches on biomass-derived carbon electrode materials have gained momentum especially due to their cheap, environmentally friendly, advanced porous structure and high specific capacity. In this study, supercapacitor electrodes were successfully produced by applying microwave heating at various times and at different powers to Quercus infectoria biomass, which was converted to activated carbon by KOH activation and carbonization method. The properties of the electrodes were determined using chemical characterizations and electrochemical methods. While the capacitance value of the non-microwaved electrode was 89 F/g at 1 A/g current density, the capacitance value of the MAQ-4 electrode was calculated as 283 F/g. The relationship between capacitance value and microwave power exhibited a convex parabola curve characteristic. As the application time of microwave energy increased, the capacitance value of the electrodes increased. The applied microwave power generally increased the stability of the electrodes. From long cycles for stability testing, only a 5.62% reduction in capacitance value of the MAQ-4 electrode was observed. In light of the results obtained, the produced electrode materials are promising both in the reuse of organic wastes and in meeting the energy storage need, thanks to their advantages such as good capacitance, high energy, high power density, low cost and environmental friendliness.

**Keywords:** Energy Storage, super capacitor, biomass, Microwave

## 1. GİRİŞ

Küresel büyüme ve dünya nüfusunun artması ile birlikte enerji ihtiyacı ve talebi de orantılı olarak artmaktadır. Sürekli artan enerji talebi; enerji krizini, enerji fiyat artışlarını, enerji kalitesi sorunlarını ve çevre sorunlarını beraberinde getirmektedir. Enerji üretiminde en büyük pay fosil yakıtlara aittir. Ancak fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olması ve tüketilmesi sonucu doğaya verdiği zararlar nedeniyle toplumlar enerji üretiminde alternatif kaynaklara yönelmişlerdir. Sürdürülebilirlik, temiz ve yaşanabilir bir çevre araştırmacıları yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına yönlendirmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimine geçişte enerji depolama sistemleri bir köprü görevi görmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının dinamik gelişimi ile birlikte son dönemde enerji depolama sistemleri ile ilgili çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bu açıdan enerji depolama teknolojileri pazarında sürekli bir büyüme söz konusudur. Enerji depolama teknikleri, mekanik, elektrik, kimyasal ve termal gibi hemen hemen tüm enerji formlarında mevcuttur [1]. Bu enerji

depolama sistemlerinin her birinin enerji yoğunluğu, kullanım ömrü, maliyeti ve verimliliği gibi kendine has özellikleri vardır.

Elektrokimyasal kapasitörler veya ultrakapasitörler olarak da bilinen süper kapasitörler, yüksek güç yoğunlukları, hızlı şarj/deşarj oranı, güç-enerji farkını kapatma avantajları, uzun çevrim ömürleri, basit çalışma ilkeleri, güvenli çalışmaları ve düşük bakım maliyetleri nedeniyle enerji depolama pazarında ilgi odağı haline gelmiştir [2, 3]. Günümüzde süper kapasitörler Hibrit Elektrikli Araçlar, Elektrikli Araçlar, Yakıt Hücreli Araçlar, trenler, trolleybüsler, taşınabilir elektronik cihazlar, kesintisiz güç kaynakları, enerji depolama sistemleri gibi birçok uygulamada tek başına veya bataryalarla birlikte kullanılmaktadır [4]. Buna rağmen süper kapasitörlerin performansını artırmak için halen çalışmalar yapılmaktadır. Süper kapasitörlerin performansları büyük ölçüde kullanılan elektrot malzemelerinin fizikokimyasal özelliklerine bağlı olduğundan çalışmalar bu yönde yoğunlaşmıştır [5]. Süper kapasitörlerin elektrot malzemeleri, karbon bazlı malzemeler, iletken polimerler ve metal oksitler/hidroksitler ile yapılır [6]. Bu elektrot malzemeleri kapsamlı bir

şekilde araştırılmıştır. Ticari kapasitör elektrotlarının çoğu, geniş yüzey alanı, iyi iletkenlik, yüksek elektrokimyasal kararlılık, uzun çevrim ömrü, kolay işleme ve uygun maliyet gibi avantajlarından dolayı karbon bazlıdır [7-9]. Karbon bazlı elektrotların üretiminde aktif karbon, grafen ve karbon nanotüpler gibi çeşitli karbon formları kullanılmıştır [10]. Geleneksel olarak aktif karbonlar; kömür, petrol ve bunların türevlerinden elde edilmiştir [11].

Son yıllarda uygun maliyetli, biyolojik çevre ile uyumlu, kolay erişilebilir, yüksek adsorpsiyonlu, yenilenebilir yapıda, gelişmiş gözenekli yapıda, yüksek özgül kapasiteli gibi özelliklerinden dolayı biyokütle türevi karbon elektrot malzemeler üzerine yapılan araştırmalara odaklanılmıştır [12]. Bugüne kadar hammadde olarak fındık kabuğu, odun, nişasta, sükröz, selüloz, mısır tanesi, muz lifi, kahve telvesi, şeker kamışı küspesi, kayısı kabuğu, ayçekirdeği kabuğu, pirinç kabuğu ve pamuk sapı gibi biyoküteller kullanılarak farklı boyutlarda karbon malzemeler hazırlanmıştır [13-15]. Meşe mazısı olarakta bilinen Fagaceae familyasının Quercus cinsine ait bir meyve olan Quercus infectoria, Türkiye'nin güneydoğu bölgesinde bol miktarda yetişmektedir. Deri ve boyamada nadiren kullanılmasına rağmen ürünlerin çoğu toplanmamakta ve atık olarak doğaya karışmaktadır. Daha önce yaptığımız çalışmada atık ürünlerden katma değerli ürün oluşturmak amacıyla meşe mazısı biyokütlesini karbonizasyon ve farklı asit-baz aktivasyonları kullanarak ilk kez aktif karbona dönüştürmüş ve süperkapasitörler üretmiştik [16]. Üretilen çift katmanlı süper kapasitörlerin elektrolit ve elektrot arayüzünde yükler biriktirilerek enerji depolanır. Elektrot malzemelerinin spesifik yüzey alanının ve gözenek hacminin artması spesifik kapasitansın artışına yol açar. Bu çalışma kapsamında KOH-karbonizasyon yoluyla ürettiğimiz en iyi kapasitör malzemesinin spesifik yüzey alanı ile gözenek hacmini artırmak ve dolayısıyla süperkapasitörlerin kapasitans değerini, kararlılığını, empedans değerlerini, enerji ve güç yoğunluğu değerlerini iyileştirmek amacıyla ürettiğimiz aktif karbonu çeşitli sürelerde ve farklı güçlerde mikrodalga ısıtmaya maruz bırakarak yeni süperkapasitör elektrotları ürettik. Üretilen süperkapasitör elektrotlarının kimyasal ve elektriksel özellikleri kimyasal karakterizasyon ve elektrokimyasal yöntemler kullanılarak test edilmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Elektrot Malzemesinin Hazırlanması

KOH aktivasyonu ve karbozinyasyon yapılan biyokütle malzemesi (MAQ-0) çeşitli sürelerde ve güçlerde mikrodalga ısıtmaya tabii tutulmuştur. Üretilen dört farklı elektrot aktif malzemesine uygulanan mikrodalga gücü ve süresi Tablo 1'de verilmiştir. Elektrotları üretmek için hazırlanan aktif materyalden 0,16 g miktarında 1ml PVDF+NMP çözücüsüne (0,02 g PVDF) ilave edilmiştir. Elektrotların iletkenliğini artırmak amacıyla karışıma 0,02 g karbon nanotüp (CNT) ilave edilmiştir. Oluşan karışımı püskürtme kıvamına getirmek amacıyla 2 ml NMP ilave edilmiştir. Elde edilen karışım 10 dk ultrasonik su banyosuna tabii tutulmuş ve ardından yaklaşık 80 dakika manyetik karıştırıcı üzerinde karıştırılmıştır. Elde edilen homojen karışım nikel köpük üzerine püskürtmek için hazır hale getirilmiştir. Elektrokimyasal karakterizasyon sonucunda elde edilen döngüsel voltametri eğrileri (CV), empedans eğrileri (EIS) ve şarj-deşarj eğrileri (GCD) kullanılarak süper kapasitörün enerji depolama kapasitesi, kararlılığı ve enerji-güç yoğunluğu belirlenmiştir.

Tablo 1. Elektrot türleri için aktif karbona uygulanan mikrodalga güçleri ve süreleri

Elektrot materyali	Güç (W)	Süre (min.)
MAQ-1	500	10
MAQ-2	750	10
MAQ-3	1000	10
MAQ-4	500	20

### 2.2. Yüzey Karakterizasyonu

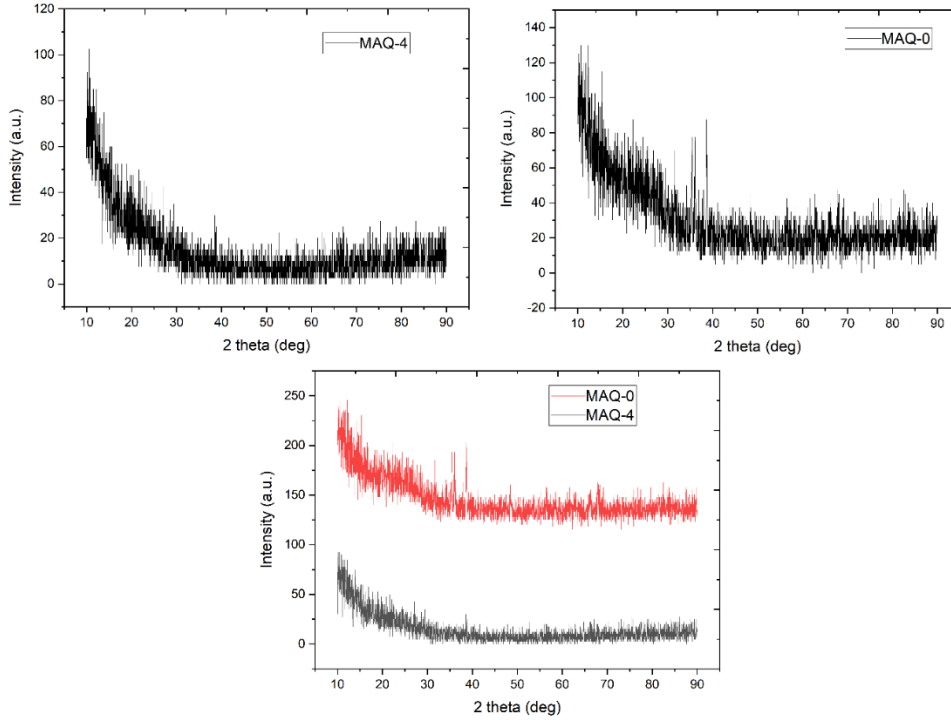
Hazırlanan elektrot aktif materyal nanoparçacıklarının morfolojisi ve boyut dağılımları taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDX) ve X-ışını kırınımı (XRD) metodu ile karakterize edilmiştir. Yüzey yapısı Brunauer-Emmett-Teller (BET) yöntemini kullanan yüzey alanı ve gözeneklilik ölçüm analizörü ile donatılmış bir Micromeritics Tristar II 3020 üzerinde gerçekleştirilmiştir.

### 3. BULGULAR VE SONUÇLAR

#### 3.1. Yüzey Karakterizasyonu Sonuçları

XRD metodu sentezlenen malzemenin kristal yapısını ve ara katman değişikliklerini araştırmaya yardımcı olur. Mikrodalga ile muamele edilmiş MAQ-4 malzemesi, mikrodalga uygulanmamış malzeme ve iki malzemenin karşılaştırılmasına ait XRD desenleri Şekil 1 a-c'de sunulmuştur. Mikrodalga uygulanmış MAQ-4 malzemesinin X-

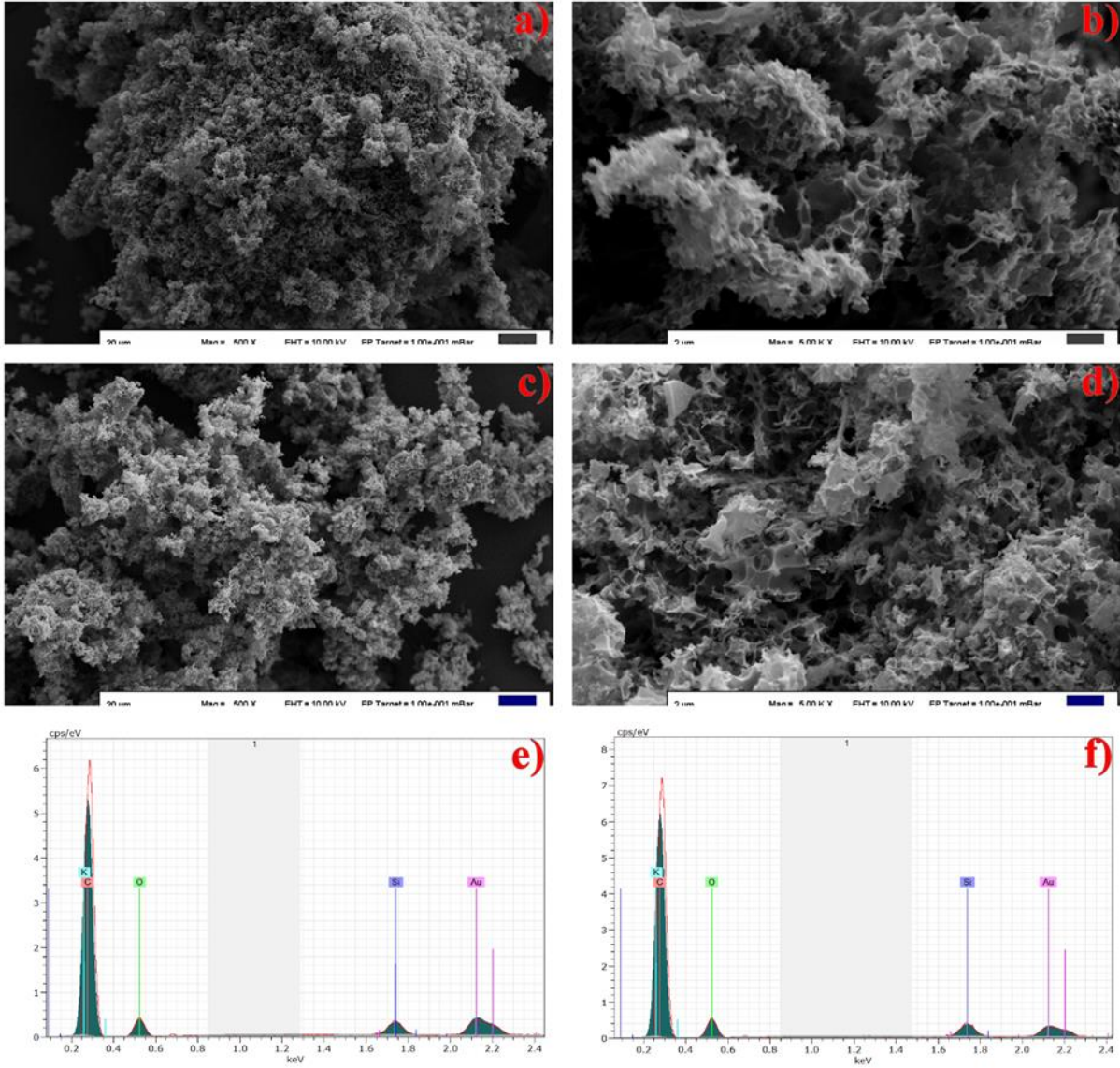
ışını kırınım deseni Şekil 1a'da verilmiştir. Şekil 1b'de işlem uygulanmamış MAQ-0 malzemesinin X-ışını kırınımı modeli verilmiştir. Mikrodalga uygulanmamış malzemede  $2\theta$ 'da 31.6, 35.4, 36.1, 38.6, 56.5, 67.9 ve 68 pikler gözlenmiştir. 35.4, 36.1 ve 38.6'daki piklerin şiddeti mikrodalga uygulanınca azalmıştır. Bu durum Şekil 1c'de rahatlıkla görülmektedir. Ayrıca mikrodalga uygulanınca  $2\theta$ 'da 20.6, 21.3, 22.4, 23.6 civarlarında pikler görülmüştür. Bu pikler amorf yapılar da bulunur ve malzemenin amorfleştiğini göstermektedir.



Şekil 1. a) Mikrodalga ile muamele edilmiş MAQ-4 malzemesi, b) mikrodalga uygulanmamış malzeme, c) iki malzemenin karşılaştırılmasına ait XRD desenleri

Üretilen malzemenin morfolojisini analiz etmek için Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) metodu kullanıldı. Mikrodalga uygulanmış ve uygulanmamış malzemelere ait SEM görüntüleri Şekil 2 a-d'de sunulmuştur. Şekillerde 2  $\mu$ m ve 20  $\mu$ m boyutlarındaki görüntüler verilmiştir. Şekil 2c-d'de görüldüğü üzere mikrodalga uygulanan malzemenin yüzeyinde gözenekler daha da açılmıştır. Bu durum BET analizi ile de uyumludur. Bu analiz ve görüntülere dayanarak malzemenin gözenek hacmi ve yüzey alanının artması sonucunda iyon transferinin daha rahat bir şekilde gerçekleştiği söylenebilmektedir. İyon ve yük geçişlerinin artmasına bağlı olarak da malzemenin spesifik kapasitansı artmaktadır [17,

18]. Şekil 2e-f'de malzemelerin EDX sonuçları ve Tablo 2'de malzemelerin elemental analiz sonuçları verilmiştir. Verilen sonuçlar mikrodalga enerjisinin uygulanmasıyla birlikte karbon (C) pikinin yoğunluğunun ve oranının arttığı görülmektedir. C miktarının artışına bağlı olarak malzeme yapısının amorfleştiğini söyleyebiliriz. Yapının amorfleşmesi sonucu elektrot yüzeyinde depolama alanları genişler. Bunun sonucunda amorf elektrot hızlı reaksiyon gerçekleşmesini ve mükemmel depolama performansının gerçekleştirilmesine olanak sağlar [19].



Şekil 2. Mikrodalga uygulanmış ve uygulanmamış malzemelere ait SEM görüntüleri ve EDX sonuçları

Tablo 2. Malzemelerin elementel analiz sonuçları

Elementler	MAQ-0	MAQ-4
	Atomik %	Atomik %
Karbon	83,93	89,20
Silikon	3,70	1,62
Potasyum	0,52	0,68
Altın	0,72	0,94
Oksijen	11,13	7,56

Malzemeye uygulanan mikrodalga enerjisinin malzemenin yapısına olan etkisini incelemek için BET analizi yapıldı. Tablo 3, mikrodalga uygulanmış ve uygulanmamış malzemelerin yüzey alanlarını, gözenek çaplarını ve gözenek hacimlerini göstermektedir. BET yüzey alanı ve gözenek hacmi artmıştır. Bu sonuçlar SEM-EDX analizi ile uyumlu olmakla beraber elektrotların

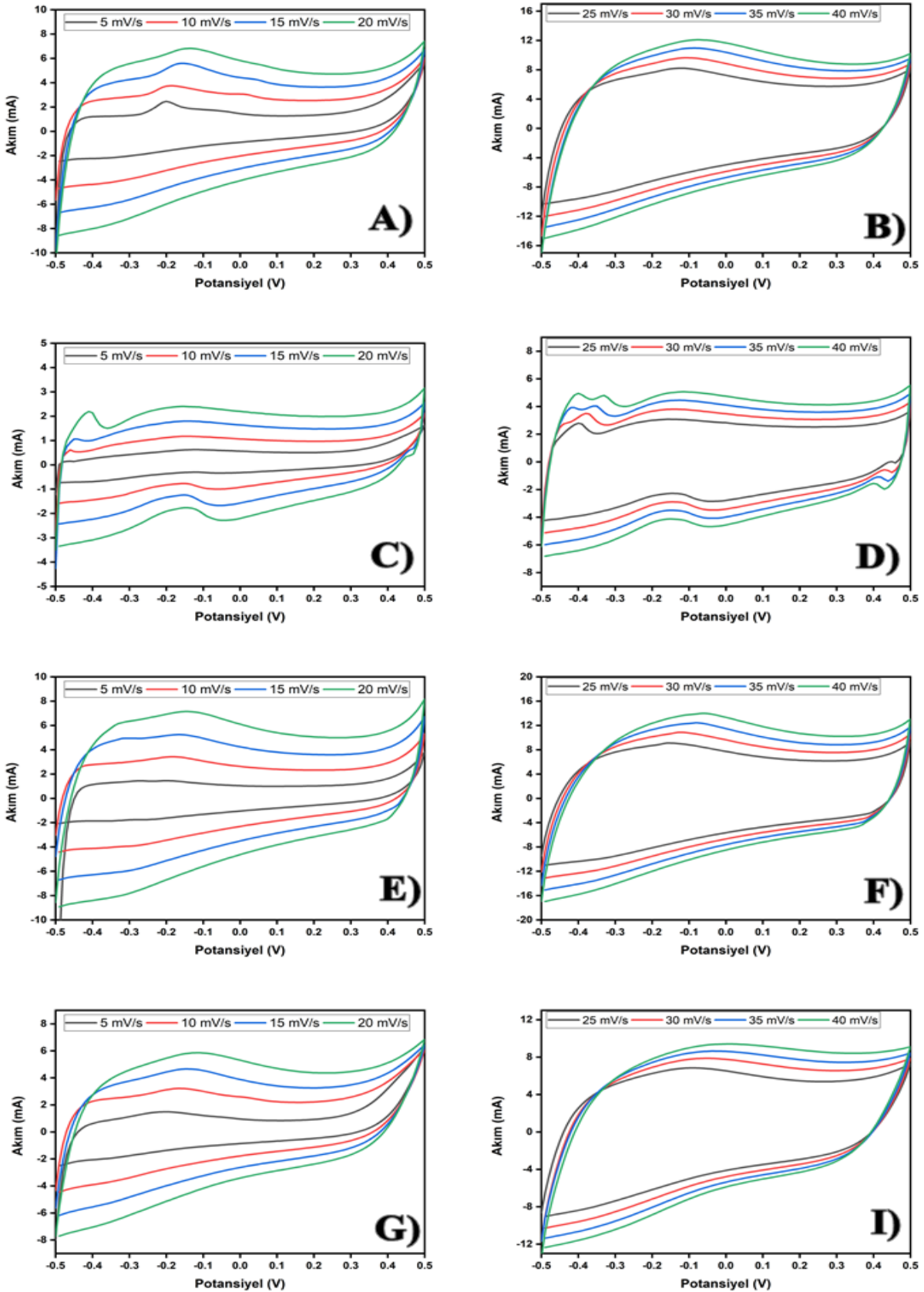
kapasitans değerlerindeki artışları da açıklamaktadır.

Tablo 3. Malzemelerin BET sonuçları

Malzeme	BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g)	Gözenek Hacmi (cc/g)	Gözenek Çapı (nm)
MAQ-0	636.5640	154.7252	1.58177
MAQ-4	669.9693	165.8428	1.57297

### 3.2. Elektrokimyasal Sonuçlar

KOH aktivatörü biyokütle materyal ile etkili bir şekilde etkileşime girmiş, bu da materyalin elektrokimyasal performansını etkileyerek güçlü bir aktivasyon etkisine neden olmuştu. Mikrodalga gücünün ve uygulama süresinin hazırlanan aktif karbonların üzerindeki etkisini incelemek için



Şekil 3. Farklı tarama hızlarında (A,B) MAQ-1 (C,D) MAQ-2 (E,F) MAQ-3 ve (G,H) MAQ-4'ün CV eğrileri

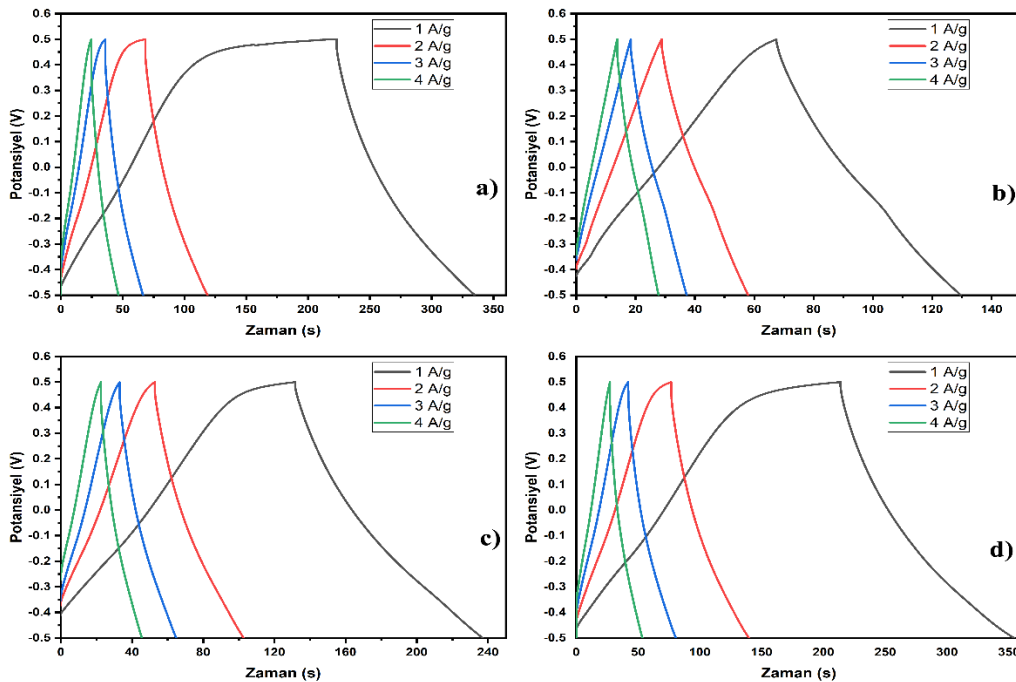
hazırlanan MAQ-1, MAQ-2, MAQ-3 ve MAQ-4 süperkapasitör hücrelerinin elektrokimyasal sonuçları iki elektrotlu 6 M KOH elektrolit

çözeltisi kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 3'te süper kapasitörlere ait CV eğrileri 5-40 mV/s aralıklarındaki tarama hızları için verilmiştir.

Elektrotlar genel olarak ideal elektrik çift katmanlı kapasitans davranışına sahip olduğunu gösteren iyi bir dikdörtgen benzeri eğri morfolojisi göstermiştir. Bu eğriler hazırlanan elektrot materyali ile elektrolit arasında iyon difüzyon/adsorpsiyon işlemlerinin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini ve yüksek tarama hızlarında bile mükemmel kararlılık sergilediğini göstermektedir [20, 21]. Bu, ortamda oluşan iyonların hızlı hareketine izin veren bu malzemenin hiyerarşik yapısına atfedilir [22, 23]. Uygulanan mikrodalga gücü CV eğrileri üzerinde parabolik bir etki göstermiştir. Uygulanan güç arttıkça CV eğrilerinde önce bir daralma daha sonra tekrar bir genişlemeye yol açmıştır. Nitekim GCD eğrileri yardımıyla hesaplanan elektrotların kapasitans değerleri de bu iddiayı desteklemektedir.

Hazırlanan elektrotların kapasitif performanslarını incelemek için süperkapasitörlere farklı akım yoğunluklarında GCD testi uygulanmış ve elde edilen eğriler Şekil 4'te verilmiştir. Şekillerde de görüldüğü gibi tüm akım yoğunluklarında elektrotların GCD eğrileri, iyi şarj-deşarj tersinirliğine sahip olduğunu gösteren bir ikizkenar üçgene benzer bir şekil göstermiştir. Eğriler, tipik bir elektriksel çift katmanlı kapasitör özelliği göstermiş ve herhangi bir psödokapasitans katkı gözlenmemiştir [24]. Elektrotlar üzerindeki aktif maddenin ağırlığı dikkate alınarak GCD

eğrileri yardımıyla özgül kapasitans değerleri hesaplanmıştır. Tablo 4'te her elektrotun çeşitli akım yoğunluklarında özgül kapasitans değerleri verilmiştir. En uzundeşarj süresi MAQ-4 elektrodunda görülmüştür, dolayısıyla en büyük spesifik kapasitans değeri ve en iyi elektrokimyasal performans MAQ-4 elektrodunda elde edilmiştir. Mikrodalga uygulanmamış elektrodun kapasitans değeri 1 A/g akım yoğunluğunda 89 F/g iken MAQ-4 elektrodunun kapasitans değeri 283 F/g olarak hesaplanmıştır. Kapasitans değeri-Mikrodalga gücü arasındaki ilişki konveks bir parabol eğri özelliği sergilemiştir. En düşük kapasitans değerleri 750 W için elde edilmiştir. Mikrodalga enerjisinin uygulanma süresi arttıkça elektrotların kapasitans değeri artmıştır. Elektrotların GCD eğrilerinde belirgin bir gerilim (IR kaybı) düşüşü yoktur, bu da elektrotların küçük iç dirence, iyi bir iletkenliğe ve üstün elektrokimyasal tersinirliğe sahip olduğunu gösterir [25]. Akım yoğunluğu arttıkça, tüm elektrotların spesifik kapasitansları azalmıştır ve bu kapasitans azalması en düşük MAQ-2 elektrodunda görülmüştür. Yüksek akım yoğunluklarındaki bu düşüş elektrolit iyonlarının malzeme gözeneklerine yetersiz difüzyonundan kaynaklanmaktadır [26]. Mikrodalga gücü arttıkça farklı akım yoğunluklarındaki kapasitans değerleri arasındaki farkı oldukça azaltmıştır. Fakat mikrodalğanın uygulanma süresi akım yoğunlukları arasındaki bu farkı arttırmıştır



Şekil 4. Çeşitli akım yoğunluklarında (A,B) MAQ-1 (C,D) MAQ-2 (E,F) MAQ-3 ve (G,H) MAQ-4 süper kapasitörlerinin şarjdeşarj eğrileri

Tablo 4. Çeşitli akım yoğunluklarında elektrotların özgül kapasitans değerleri

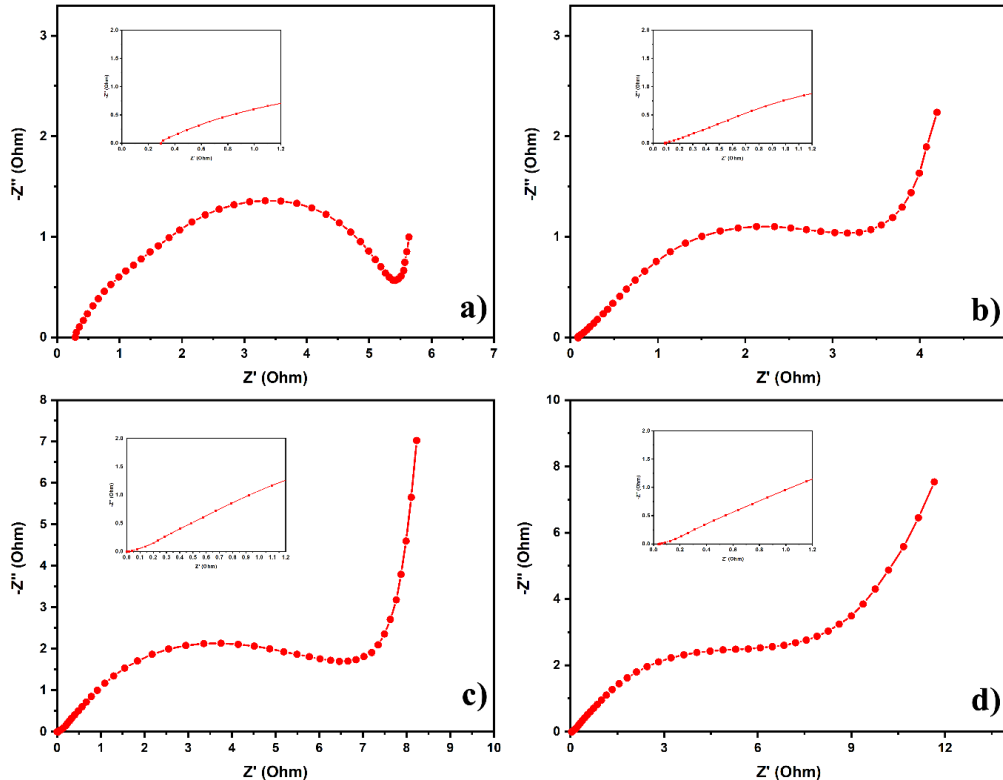
Elektrotlar	Özgül Kapasitans (F/g)			
	1 A/g	2 A/g	3 A/g	4 A/g
MAQ-1	231,04	214,26	201,57	200,38
MAQ-2	125,69	119,44	116,95	116,57
MAQ-3	213,84	204,89	198,21	193,69
MAQ-4	283,90	257,44	238,81	219,62

Hazırlanan süperkapasitör hücrelerinin empedansını ve elektrolit ile aktif materyalin iyon etkileşimini incelemek için 1 Hz ile 50 kHz frekans aralıklarında EIS ölçümleri yapılmıştır ve elde edilen Nyquist eğrileri Şekil 5'te verilmiştir. Elektrotların tümü yüksek frekans bölgesinde yarım daire ve düşük frekanslarda düz bir çizgi özelliği sergilemişlerdir. Düz çizginin eğimi şarj-deşarj esnasındaki Warburg empedansı olarak da bilinen difüzyon direncini gösterir. İdeal kapasitörlerde çizginin y eksenine paralel 90° olması beklenir. Difüzyon direnci en düşük MAQ-3 ve en yüksek MAQ-1 elektrodudur. Uygulanan mikrodalganın gücü arttıkça eğim artmıştır. Aynı zamanda uygulanan mikrodalga gücünün süresinde eğimi arttırmıştır. Yüksek frekans bölgesinde Nyquist eğrisinin x eksenini kestiği nokta süperkapasitörde eşdeğer seri direnç olarak bilinen aktif materyal ile akım toplayıcı arasındaki direnci ( $R_s$ ) temsil eder. Ayrıca  $R_{CT}$  direnci yarım daire

çapından hesaplanır ve bu dirençte elektrolit ile aktif malzeme arasındaki çift katmanlı kapasitansa atfedilir. Daha yüksek eşdeğer seri direnç, daha yavaş iyon transferi ve daha fazla süper kapasitör blokajı, daha yüksek  $R_{CT}$  değerleri ile gösterilir [27, 28]. Hazırlanan süperkapasitörlere ait  $R_{CT}$  ve  $R_s$  dirençleri Tablo 5'te verilmiştir. Uygulanan mikrodalganın gücü ve süresi arttıkça  $R_s$  direnci azalmıştır. MAQ-3 elektrodunun  $R_s$  direnci en düşük çıkmıştır.  $R_{CT}$  direnci ise uygulanan güç arttıkça önce bir düşüş sergilemiş ve daha sonra tekrar yükselmeye başlamıştır. Uygulanan mikrodalga güç süresinde  $R_{CT}$  direncini arttırmıştır. MAQ-1 elektrodunun  $R_s$  direnci diğer elektrotlarından yüksek olduğundan dolayı IR kaynaklı gerilim düşümü diğer elektrotlara nazaran yüksek çıkmıştır. Genel olarak  $R_s$  değerleri düşük ve gerilim düşümleri de önemsiz seviyelerdedir.

Tablo 5. Elektrotların empedans değerleri ve 1 A/g'da IR düşümleri

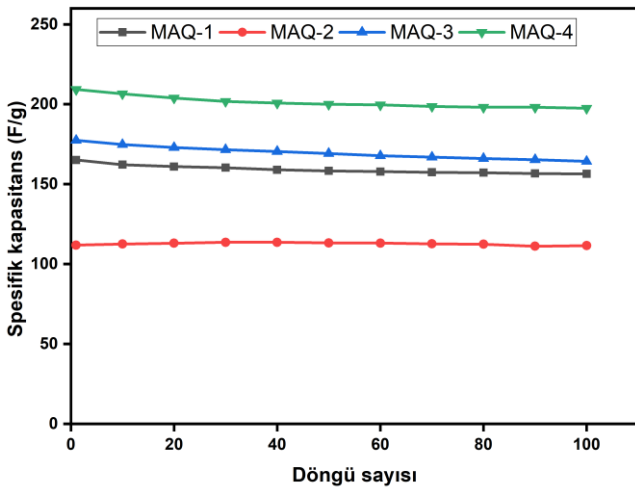
Elektrotlar	IR düşümü (mV)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_{CT}$ ( $\Omega$ )
MAQ-1	32	0.30	6,06
MAQ-2	11	0.09	4,48
MAQ-3	14	0.01	7,48
MAQ-4	12	0.04	8,86



Şekil 5. (a) MAQ-1 (b) MAQ-2 (c) MAQ-3 ve (d) MAQ-4 süper kapasitörlerinin empedans eğrileri



Süper kapasitörlerin pratik uygulamalar için iyi kapasitans değerlerine sahip olması beklenirken, öte yandan kararlı olmaları da oldukça önem arz etmektedir. 4 A/g akım yoğunluğunda elektrotların yaşam döngüsü testi Şekil 6'da verilmiştir. Uzun sıralı döngülerden sonra, MAQ-1, MAQ-2, MAQ-3 ve MAQ-4 elektrotları başlangıç kapasitelerinin sırasıyla %94,42, %99,71, %92,60 ve %94,38'ini korumuştur. Mikrodalga enerjisi uygulanmamış elektrodun kararlılığı %92,10 olarak elde edilmişti. Uygulanan mikrodalga gücü genel olarak elektrotların kararlılığını artırmıştır. Kararlılık-mikrodalga gücü arasındaki ilişki konkav bir parabolik bir eğri şeklinde elde edilmiştir. Maksimum kararlılık 750W gücünde elde edilirken, güç değeri arttıkça kararlılık yüzdesi tekrar düşmeye başlamıştır. Uygulanan mikrodalga enerjisinin süresi kararlılık üzerinde kayda değer bir değişiklik sergilememiştir. Sonuçlar, mikrodalga enerjisi uygulanmış malzemelerin elektrot malzemesi olarak kararlı ve güvenli bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Elektrotların kararlı performansı, iyonların hızlı taşınmasını kolaylaştıran gözenekli hiyerarşik yapılarından kaynaklanmaktadır [29].



Şekil 6. 4 A/g'da üç elektrotun döngüsel performansı akım yoğunluğu

#### 4. TARTIŞMA

KOH aktivasyonu ve karbonizasyon yöntemiyle aktif karbona dönüştürülen Meşe mazısı biyokütlesine çeşitli sürelerde ve farklı güçlerde mikrodalga ısıtma uygulanarak başarılı bir şekilde süperkapasitör elektrotları üretilmiştir. Mikrodalga uygulanmamış elektrodun kapasitans değeri 1 A/g akım yoğunluğunda 89 F/g iken MAQ-4 elektrodunun kapasitans değeri 283 F/g

olarak hesaplanmıştır. Kapasitans değeri-Mikrodalga gücü arasındaki ilişki konveks bir parabol eğri özelliği sergilemiştir. Mikrodalga enerjisinin uygulanma süresi arttıkça elektrotların kapasitans değeri artmıştır. Mikrodalga gücü arttıkça farklı akım yoğunluklarındaki kapasitans değerleri arasındaki farkı oldukça azaltmıştır. Uygulanan mikrodalga gücü genel olarak elektrotların kararlılığını artırmıştır. Kararlılık testi için yapılan uzun döngülerden MAQ-4 elektrodunun kapasitans değerinde yalnızca %5,62'lik bir azalma görülmüştür. Sonuç olarak üretilen elektrot malzemeleri iyi kapasitans, yüksek enerji, yüksek güç yoğunluğu, düşük maliyet ve çevre dostu olması gibi avantajları sayesinde hem organik atıkların yeniden kullanımında hem de enerji depolama ihtiyacının karşılanmasında kullanılabilir.

#### TEŞEKKÜR

Bu makale 8-11 Eylül 2022 tarihlerinde düzenlenen 16. Uluslararası Yakma Sempozyumu'nda (INCOS 2022) bildiri olarak sunulmuştur.

#### REFERENCES

- [1] Ibrahim, H., A. Ilinca, and J. Perron, Energy storage systems—Characteristics and comparisons. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2008. 12(5): p. 1221-1250.
- [2] Yan, J., et al., Recent advances in design and fabrication of electrochemical supercapacitors with high energy densities. *Advanced Energy Materials*, 2014. 4(4): p. 1300816.
- [3] Conway, B.E., *Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications*. 2013: Springer Science & Business Media.
- [4] Libich, J., et al., Supercapacitors: Properties and applications. *Journal of Energy Storage*, 2018. 17: p. 224-227.
- [5] Bi, Z., et al., Biomass-derived porous carbon materials with different dimensions for supercapacitor electrodes: a review. *Journal of materials chemistry a*, 2019. 7(27): p. 16028-16045.
- [6] Jian, X., et al., Carbon-based electrode materials for supercapacitor: progress, challenges and prospective solutions. *J. Electr. Eng*, 2016. 4(2): p. 75-87.

- [7] Simon, P. and Y. Gogotsi, Capacitive energy storage in nanostructured carbon–electrolyte systems. *Accounts of chemical research*, 2013. 46(5): p. 1094-1103.
- [8] Zhang, Y., et al., Progress of electrochemical capacitor electrode materials: A review. *International journal of hydrogen energy*, 2009. 34(11): p. 4889-4899.
- [9] Beguin, F. and E. Frackowiak, *Carbons for electrochemical energy storage and conversion systems*. 2009: Crc Press.
- [10] Geng, P., et al., Transition metal sulfides based on graphene for electrochemical energy storage. *Advanced Energy Materials*, 2018. 8(15): p. 1703259.
- [11] Zhang, L.L., Y. Gu, and X. Zhao, Advanced porous carbon electrodes for electrochemical capacitors. *Journal of Materials Chemistry A*, 2013. 1(33): p. 9395-9408.
- [12] Lu, H. and X. Zhao, Biomass-derived carbon electrode materials for supercapacitors. *Sustainable Energy & Fuels*, 2017. 1(6): p. 1265-1281.
- [13] Wei, L. and G. Yushin, Nanostructured activated carbons from natural precursors for electrical double layer capacitors. *Nano Energy*, 2012. 1(4): p. 552-565.
- [14] Jain, A., et al., Activated carbons derived from coconut shells as high energy density cathode material for Li-ion capacitors. *Scientific reports*, 2013. 3(1): p. 1-6.
- [15] Chen, M., et al., Preparation of activated carbon from cotton stalk and its application in supercapacitor. *Journal of solid state electrochemistry*, 2013. 17(4): p. 1005-1012.
- [16] Akdemir, M., Electrochemical performance of *Quercus infectoria* as a supercapacitor carbon electrode material. *International Journal of Energy Research*, 2022. 46(6): p. 7722-7731.
- [17] Li, Y., Wei, Z., Zhan, Z., Pei, J., Zhao, C., Xu, W., ... & Pang, S. (2024). Scale-up biomass strategy to macro-microporous nitrogen-doped carbon aerogels for ionic liquid supercapacitors with high efficiency. *Journal of Energy Storage*, 76, 109778.
- [18] Tufan, A., T.A. Hansu, and M. Akdemir, Production of a novel supercapacitor electrode material from *Rheum ribes* and its application. *Bulletin of Materials Science*, 2022. 45(3): p. 1-9.
- [19] Shen, S., Ma, D., Ouyang, K., Chen, Y., Yang, M., Wang, Y., ... & Zhang, P. (2023). An In Situ Electrochemical Amorphization Electrode Enables High-Power High-Cryogenic Capacity Aqueous Zinc-Ion Batteries. *Advanced Functional Materials*, 2304255.
- [20] Kim, W., et al., Preparation of ordered mesoporous carbon nanopipes with controlled nitrogen species for application in electrical double-layer capacitors. *Journal of Power Sources*, 2010. 195(7): p. 2125-2129.
- [21] Bora, M., et al., Highly scalable and environment-friendly conversion of low-grade coal to activated carbon for use as electrode material in symmetric supercapacitor. *Fuel*, 2022. 329: p. 125385.
- [22] Wang, H., M. Wang, and J. Wang, Nickel silicate hydroxide on hierarchically porous carbon derived from rice husks as high-performance electrode material for supercapacitors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021. 46(71): p. 35351-35364.
- [23] Irfan, M., et al., Value-added apple-derived carbonaceous aerogel for robust supercapacitor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021. 46(60): p. 30727-30738.
- [24] Özarslan, S., et al., A Novel Tea factory waste metal-free catalyst as promising supercapacitor electrode for hydrogen production and energy storage: A dual functional material. *Fuel*, 2021. 305: p. 121578.
- [25] Fan, S., et al., High-density oxygen-enriched graphene hydrogels for symmetric supercapacitors with ultrahigh gravimetric and volumetric performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021. 46(80): p. 39969-39982.
- [26] Li, L., et al., Honeycomb-like N/O self-doped hierarchical porous carbons derived from low-rank coal and its derivatives for high-performance supercapacitor. *Fuel*, 2023. 331: p. 125658.
- [27] Cai, J., et al., High-performance supercapacitor electrode materials from cellulose-derived carbon nanofibers. *ACS applied materials & interfaces*, 2015. 7(27): p. 14946-14953.
- [28] Cheng, Q., et al., Graphene and carbon nanotube composite electrodes for supercapacitors with ultra-high energy density. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2011. 13(39): p. 17615-17624.
- [29] Wu, Y., et al., Green and facile synthesis of porous carbon spheres from waste solution for high performance all-solid-state symmetric supercapacitors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021. 46(64): p. 32373-32384.