

T.C.  
SİİRT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜPERKAPASİTÖR İÇİN MEŞE MAZISI TEMELLİ VE MİKRODALGA  
DESTEKLİ AKTİF KARBONDAN ELEKTROT ÜRETİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Musa ALTINIŞIK  
(213111008)

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Murat AKDEMİR

II. Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Tülin AVCI HANSU

Temmuz-2023  
SİİRT

## TEZ KABUL VE ONAY SAYFASI

Musa ALTINIŞIK tarafından hazırlanan ‘‘Süperkapasitör İçin Meşe Mazısı Temelli ve Mikrodalga Destekli Aktif Karbondan Elektrot Üretimi’’ adlı tez çalışması 06/07/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliğı ile Siirt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliğı Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Prof. Dr. Fevzi HANSU

.....

#### Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Murat AKDEMİR

.....

#### Üye

Doç. Dr. Sabit HOROZ

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Doç. Dr. Harun BEKTAŞ  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ÖN SÖZ

Yüksek lisans tez konumun belirlenmesinde ve çalışmanın hazırlanma sürecinin her aşamasında bilgisini, tecrübesini ve değerli zamanını esirgemeyerek her fırsatta bana yardımcı olan danışman hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Murat AKDEMİR ve Dr. Öğr. Üyesi Tülin AVCI HANSU'ya;

Siirt Üniversitesi Biyoteknoloji Laboratuvarında deneyler aşamasında ihtiyacımız olan materyaller konusundaki yardımları ve bilgileriyle bize destekte bulunan Sayın Doç. Dr. Mustafa KAYA ve Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Raşit ATELGE'ye, çalışmalarımın çeşitli aşamalarında destekte bulunan Arş.Gör. Rıdvan ÇETİN'e;

Tezi yazmam konusunda beni cesaretlendiren ve bilgi ve tecrübesiyle birlikte manevi destek de sağlayan değerli hocam Prof. Dr. Fevzi HANSU'ya;

Tez süreci boyunca manevi desteğini esirgemeyen değerli arkadaşım Şilan OĞUZ'a;

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hissettiğim kıymetli aileme ve tez çalışmam boyunca emeği geçen tüm herkese;

En derin duygularla teşekkürü borç bilirim.

Musa ALTINIŞIK  
SİİRT-2023

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖN SÖZ .....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
TABLolar LİSTESİ .....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	viii
ÖZET .....	x
ABSTRACT.....	xi
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1. Enerji Depolama Cihazları.....	2
1.2. Süperkapasitörler .....	4
1.2.1. Süperkapasitörlerin tarihsel gelişimi .....	5
1.2.2. Süperkapasitörlerin kullanım alanları .....	6
1.2.3. Süperkapasitörlerin sınıflandırılması .....	8
1.2.3.1. Elektrokimyasal çift katmanlı kapasitörler (EDLC) .....	8
1.2.3.2. Psödokapasitörler .....	10
1.2.3.3. Hibrit kapasitörler .....	11
1.2.4. Süperkapasitör uygulamalarında kullanılan elektrot malzemeleri.....	12
1.2.4.1 İletken polimerler.....	13
1.2.4.2 Metal oksitler/hidroksitler.....	14
1.2.4.3 Karbon temelli malzemeler .....	15
Karbon nanotüpler .....	15
Karbon arojeller .....	16
Aktif karbonlar .....	16
1.2.5. Süperkapasitörlerde Performans Ölçüm Yöntemleri .....	18
1.2.5.1. Döngüsel voltametri.....	18
1.2.5.2. Galvanostatik şarj-deşarj.....	18
1.2.5.3. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi .....	19
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>20</b>
<b>3. MATERYAL VE METOT.....</b>	<b>38</b>
3.1. Materyal .....	38
3.2. Metot .....	38
3.2.1 Hammaddenin hazırlanması .....	38
3.2.2 Mikrodalga enerjisiyle aktivasyon .....	40
3.2.3 Süperkapasitör elektrotlarının oluşturulması .....	41
3.2.4. Elektrotların performans testleri .....	44
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>45</b>

4.1. Yüzey Karakterizasyonu.....	45
4.2. Elektrokimyasal Ölçümler .....	48
4.2.1 Döngüsel Voltametri (CV) Sonuçları .....	48
4.2.2 Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) sonuçları.....	51
4.1.3 Galvanostatik şarj-deşarj (GCD) sonuçları.....	52
<b>5. SONUÇLAR.....</b>	<b>56</b>
<b>6. KAYNAKLAR .....</b>	<b>58</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>66</b>



## TABLULAR LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 3.1.</b> Elektrot türleri için aktif karbona uygulanan mikrodalga güçleri ve süreleri.....	41
<b>Tablo 4.1.</b> Malzemelerin elementel analiz sonuçları .....	47
<b>Tablo 4.2.</b> Malzemelerin BET sonuçları .....	48
<b>Tablo 4.3.</b> Elektrotların empedans değerleri ve 1 A/g'da IR düşümleri.....	52
<b>Tablo 4.4.</b> Çeşitli akım yoğunluklarında her bir elektrotun spesifik kapasitans değerleri.....	54



## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1. Dünyada toplam nihai enerji tüketiminin tahmini yenilenebilir enerji payı ....	1
Şekil 1.2. Ragone Grafiği .....	3
Şekil 1.3. Süperkapasitör yapısı .....	5
Şekil 1.4. Süperkapasitörlerin sınıflandırılması .....	8
Şekil 1.5. Elektrokimyasal çift katmanlı kapasitörün (EDLC) şematik gösterimi .....	9
Şekil 1.6. Psödokapasitörün şematik gösterimi .....	10
Şekil 1.7. Hibrit kapasitörün şematik gösterimi .....	12
Şekil 3.1. Kül fırını görünümü.....	39
Şekil 3.2. Aktif karbonun üretim süreci akış şeması gösterimi .....	39
Şekil 3.3. A) Küçük parçalara bölünmüş meşe mazısı B) MMB den aktivasyon ve karbonizasyon sonucu elde edilmiş aktif karbon .....	40
Şekil 3.4. Katı faz mikrodalga reaktör.....	41
Şekil 3.5. A) Ultrasonik banyo B) Manyetik karıştırıcı (WN-H320).....	42
Şekil 3.6. Püskürtme yöntemiyle nikel köpüklerin kaplanma görüntüsü .....	43
Şekil 3.7. A) 15 mm çapında kesilmiş elektrotlar B) İki elektrotlu süperkapasitör hücresi .....	43
Şekil 4.1. a) Mikrodalga ile muamele edilmiş MAQ-4 malzemesi, b) mikrodalga uygulanmamış malzeme, c) iki malzemenin karşılaştırılmasına ait XRD desenleri .....	46
Şekil 4.2. Mikrodalga uygulanmış ve uygulanmamış malzemelere ait SEM görüntüleri ve EDX sonuçları .....	47
Şekil 4.3. Farklı tarama hızlarında (A,B) MAQ-1 (C,D) MAQ-2 (E,F) MAQ-3 ve (G,H) MAQ-4'ün CV eğrileri .....	50
Şekil 4.4. (A) MAQ-1, (B) MAQ-2, (C) MAQ-3, (D) MAQ-4 Süperkapasitörlerin empedans eğrileri .....	52
Şekil 4.5. Farklı akım yoğunluklarında (A) MAQ-1, (B) MAQ-2, (C) MAQ-3, (D) MAQ-4 süperkapasitörler için GCD eğrileri.....	54
Şekil 4.6. 4 A/g akım yoğunluğunda MAQ süperkapasitörlerine ait döngüsel kararlılık performansı. ....	55

## KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
<b>A</b>	: Amper
<b>AC</b>	: Aktif Karbon
<b>AMR</b>	: Otomatik Sayaç Okuma
<b>BET</b>	: Brunauer-Emmett-Teller
<b>cm</b>	: Santimetre
<b>CNT</b>	: Karbon Nanotüpler
<b>CO<sub>2</sub></b>	: Karbondioksit
<b>Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub></b>	: Kobalt Oksit
<b>CP</b>	: İletken Polimer
<b>CV</b>	: Döngüsel Voltametri
<b>dm</b>	: Desimetre
<b>EDLC</b>	: Elektrokimyasal Çift Katmanlı Kapasitörler
<b>EIS</b>	: Elektrokimyasal Empedans Spektroskopi
<b>ESR</b>	: Eşdeğer Seri Direnç
<b>EV</b>	: Elektrikli Araçlar
<b>F</b>	: Farad
<b>FCV</b>	: Yakıt Hücresi Araçlar
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Demir Oksit
<b>FeS</b>	: Demir Sülfür
<b>FTIR</b>	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
<b>GCD</b>	: Galvanostatik Şarj-Deşarj
<b>GPS</b>	: Küresel Konumlama Sistemi
<b>gr</b>	: Gram
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	: Sülfürik Asit
<b>HA</b>	: Hümik Asit
<b>HEV</b>	: Hibrit Elektrikli Araçlar
<b>K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	: Potasyum Karbonat
<b>KCl</b>	: Potasyum Klorür
<b>kg</b>	: Kilogram
<b>KHCO<sub>3</sub></b>	: Potasyum Karbonat
<b>KOH</b>	: Potasyum Hidroksit
<b>kV</b>	: Kilovolt
<b>kW</b>	: Kilowatt
<b>Li</b>	: Lityum
<b>Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	: Lityum Sülfat
<b>LiCl</b>	: Lityum Klorür
<b>M</b>	: Mol
<b>mA</b>	: Miliamper
<b>MAQ</b>	: Meşe Mazısı Biyokütlesi
<b>MB</b>	: Metilen Mavisi
<b>MnO<sub>2</sub></b>	: Manganez Dioksit
<b>MSWCNT</b>	: Çok Duvarlı Karbon Nanotüpler
<b>mV</b>	: Milivolt
<b>MW</b>	: Mikrodalga
<b>N<sub>2</sub></b>	: Azot

<b>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	: Sodyum Sülfat
<b>NaCl</b>	: Sodyum Klorür
<b>NaNO<sub>3</sub></b>	: Sodyum Nitrat
<b>NaOH</b>	: Sodyum Oksit
<b>Ni(OH)<sub>2</sub></b>	: Nikel II Hidroksit
<b>NiO</b>	: Nikel Oksit
<b>nm</b>	: Nanometre
<b>NMP</b>	: N-metil-2 piroolidon
<b>PANI</b>	: Polianilin
<b>PDA</b>	: Kişisel Dijital Asistan
<b>PPy</b>	: Polipirol
<b>PTh</b>	: Politiyofen
<b>PVA</b>	: Polivinil Asetat
<b>PVDF</b>	: Poliviniliden Florür
<b>R<sub>ct</sub></b>	: Gözeneklerdeki Elektrolit Direncini
<b>RES</b>	: Yenilenebilir Enerji Kaynakları
<b>RuO<sub>2</sub></b>	: Rutenyum Oksit
<b>s</b>	: Saniye
<b>SC</b>	: Süperkapasitör
<b>SEM</b>	: Scanning Electron Microscope
<b>SOHIO</b>	: Standart Oil Company
<b>SSA</b>	: Özgül Yüzey Alanı
<b>SWCNT</b>	: Tek Duvarlı Karbon Nanotüpler
<b>TEM</b>	: Transmission Electron Microscope
<b>V</b>	: Volt
<b>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	: Vanadyum Oksit
<b>W</b>	: Watt
<b>Wh</b>	: Watt saat
<b>ZnCl<sub>2</sub></b>	: Çinko Klorür

<b><u>Simge</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
<b>C</b>	: Kapasitans
<b>ε</b>	: Elektrolit geçirgenliği
<b>A</b>	: Yüzey Alanı
<b>d</b>	: Mesafe
<b>ΔV</b>	: Potansiyel Değişim
<b>s</b>	: zaman
<b>Hz</b>	: Hertz
<b>kHz</b>	: Kiloherzt
<b>mV</b>	: Milivolt
<b>Z</b>	: Empedans
<b>f</b>	: Frekans
<b>kHz</b>	: Kiloherzt
<b>F</b>	: Farad
<b>P</b>	: Güç yoğunluğu
<b>Δt</b>	: Deşarj süresi

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

## SÜPERKAPASİTÖR İÇİN MEŞE MAZISI TEMELLİ VE MİKRODALGA DESTEKLİ AKTİF KARBONDAN ELEKTROT ÜRETİMİ

Musa ALTINIŞIK

**Siirt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Murat AKDEMİR**

**II. Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Tülin AVCI HANSU**

**2023, 66+XI Sayfa**

Dünya genelinde artan nüfus ve teknolojik gelişmeler enerjiye olan ihtiyacı her geçen gün artırmaktadır. Enerji talebinin artmasıyla birlikte üretilen enerjiyi depolamak ve sonradan kullanmak büyük önem arz etmektedir. Süper kapasitörler, enerji depolama sistemlerinde yükleri hızlı bir şekilde depolayıp transfer ettikleri için son zamanlarda ilgi odağı olmuştur. Bu tez çalışmasında, meşe mazısından üretilen mikrodalga destekli aktif karbonlar kullanılarak süperkapasitörler için iyi özelliklere sahip olan yeni bir elektrot malzemesi üretilmiştir. Çalışmanın birinci aşamasında, meşe mazısı biyokütlesi karbonizasyon ve baz aktivasyonu yoluyla aktif karbona dönüştürülmüş; ikinci aşamada, elde edilen aktif karbonlar farklı sürelerde ve farklı güç değerlerinde mikrodalga enerjisine tabi tutulmuş; üçüncü aşamada ise elde edilen numuneler kullanılarak hedeflenen elektrotlar üretilmiştir. Üretilen süperkapasitör elektrotlarının elektrokimyasal performansları oda sıcaklığında galvanostatik şarj-deşarj (GCD), Döngüsel voltametri (CV) ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) teknikleri kullanılarak test edilmiş olup elektrotların kapasitesi ve kararlılıkları hesaplanmıştır. Üretilen bu elektrotlar kullanılarak toplamda dört farklı süperkapasitör hücresi geliştirilmiştir. Döngüsel voltametri eğrileri incelendiğinde, geliştirilen süperkapasitör hücrelerinin ideal kapasitif davranışı gösteren simetrik dikdörtgensel şekiller oluşturduğu görülmüştür. En iyi spesifik kapasitans değeri, 20 dk boyunca 500 W gücünde mikrodalga enerjisine tabi tutularak üretilen MAQ-4 numunesinin elektrotlarından (1 A/g akım yoğunluğunda 283,9 F/g) elde edilmiştir. 6 M KOH elektrolitinde 4 A/g akım yoğunluğunda 100 GCD döngüsünden sonra MAQ-1, MAQ-2, MAQ-3 ve MAQ-4 elektrotlarının kapasitans tutma oranları sırasıyla %94,4, %99,7, %92,6 ve %94,4 olarak hesaplanmıştır. Alınan sonuçlar, meşe mazısı biyokütlesinden üretilen aktif karbonlara mikrodalga enerjisinin uygulanmasıyla elde edilen elektrotların iletkenliği, kapasitesi, üstün döngüsel kararlılığı, çevre dostu olmaları ve düşük maliyetli olmaları nedeniyle gelecekte enerji depolama teknolojisi için önemli bir alternatif olabileceğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji depolama, süperkapasitör, aktif karbon, biyokütle, meşe mazısı, mikrodalga

## ABSTRACT

### MS THESIS

# ELECTRODE PRODUCTION FROM QUERCUS INFECTORIA BASED AND MICROWAVE AID ACTIVATED CARBON FOR SUPERCAPACITOR

Musa ALTINIŞIK

The Graduate School of Natural and Applied Science of Siirt University  
The Degree of Master of Science  
in Electrical-Electronics Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Murat AKDEMİR

Co-Supervisor: Assist. Prof. Dr. Tülin AVCI HANSU

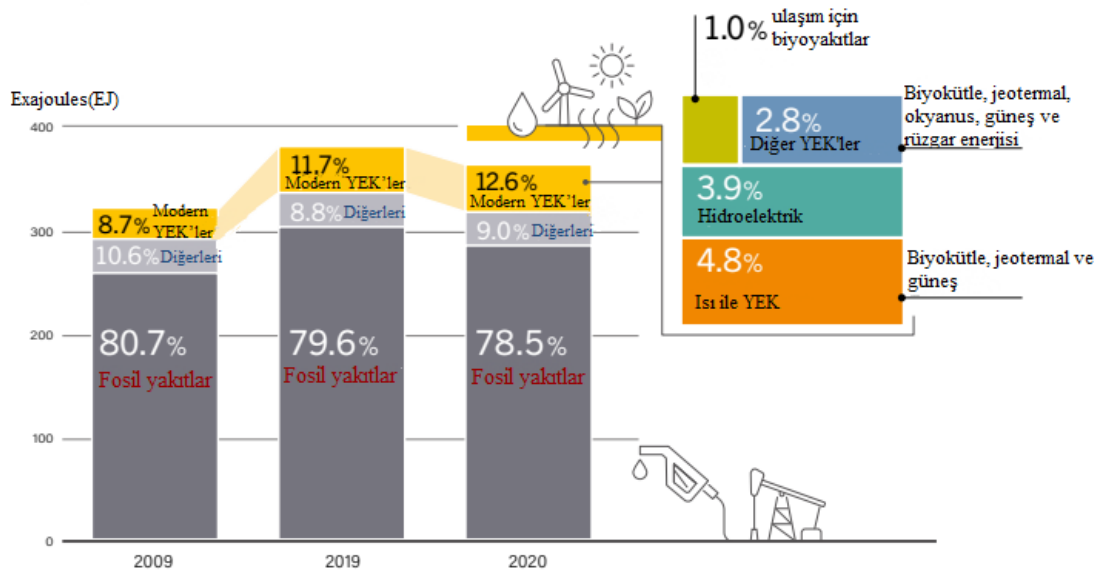
2023, 66+XI Pages

Increasing population and technological developments around the world increase the need for energy day by day. With the increase in energy demand, it is of great importance to store and later use the energy produced. Supercapacitors have recently been the focus of attention, as they quickly store and transfer charges in energy storage systems. In this thesis, a new electrode material with good properties for supercapacitors was produced by using microwave supported activated carbons produced from *Quercus infectoria*. In the first phase of the study, *Quercus infectoria* biomass was converted to activated carbon via carbonization and base activation; In the second stage, the obtained activated carbons were subjected to microwave energy at different times and at different power values; In the third stage, the targeted electrodes were produced using the obtained samples. The electrochemical performances of the produced supercapacitor electrodes were tested at room temperature using galvanostatic charge-discharge (GCD), Cyclic voltammetry (CV) and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) techniques, and the capacity and stability of the electrodes were calculated. A total of four different supercapacitor cells were developed using these produced electrodes. When the cyclic voltammetry curves were examined, it was observed that the developed supercapacitor cells formed symmetrical rectangular shapes showing ideal capacitive behavior. The best specific capacitance value was obtained from the electrodes of the MAQ-4 sample (283,9 F/g at a current density of 1 A/g) produced by exposing it to 500 W microwave energy for 20 minutes. Capacitance retention rates of MAQ-1, MAQ-2, MAQ-3 and MAQ-4 electrodes were calculated as 94,4%, 99,7%, 92,6% and 94,4%, respectively, after 100 GCD cycles in 6 M KOH electrolyte at a current density of 4 A/g. The results showed that the electrodes obtained by applying microwave energy to activated carbons produced from *Quercus infectoria* biomass may be an important alternative for energy storage technology in the future due to their conductivity, capacity, superior cyclic stability, environmental friendliness and low cost.

**Keywords:** Energy storage, supercapacitor, activated carbon, biomass, quercus infectoria, microwave

## 1. GİRİŞ

Dünyada inovasyon ve dijitalleşme ile birlikte enerji talebinde büyük artış görülmekte ve yakın gelecekte arzın talebi karşılayamayacağı öngörülmektedir. Günümüzde enerji talebinin çoğu halen fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Buna karşın fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olması ve tüketilmesi sonucunda doğada oluşturdukları tahribatlar nedeniyle, enerji üretiminde alternatif kaynaklara olan yönelim hızla artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları (YEK), küresel ısınmayı ve olumsuz sağlık etkilerini azaltmakla birlikte enerji maliyetlerini dengeleyebilir ve tüketicilere sürdürülebilir enerji sağlayabilir (Pfeifer ve ark., 2018). Şekil 1.1. yenilenebilir enerjinin dünyadaki toplam enerji üretimindeki payını göstermektedir.



Şekil 1.1. Dünyada toplam nihai enerji tüketiminin tahmini yenilenebilir enerji payı (Anonymous, 2022)

Görüldüğü üzere elektrik üretiminin büyük kısmı atmosfere büyük zarar veren fosil kaynaklardan sağlanmaktadır. Fosil yakıtlardan yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş sürekli artmakla birlikte henüz yeterli seviyede değildir. Fosil yakıtların fazlaca kullanılması ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanımının küresel çapta henüz istenilen seviyede olmaması nedeniyle, küresel ısınma, iklim değişikliği, karbon emisyonu gibi birbiriyle bağlantılı birçok sorun oluşmaktadır. Bu durum karşısında ülkeler ve kuruluşlar birtakım önlemler almaktadırlar. Bu bağlamda 175 ülkenin imzaladığı Paris İklim Anlaşması ile dünya genelinde karbon salımının 2030 yılına kadar yüzde 50 azaltılması,

2050'ye kadar da sifıra düşürülmesi amaçlanmaktadır. Böylece küresel ortalama yüzey sıcaklığındaki artışı 1,5 derece ile sınırlandırmak, en kötü ihtimalle 2 derecenin altında tutup iklim krizinin önüne geçmek hedeflenmektedir. Bu doğrultuda, Avrupa'nın BP, Eni, Equinor, Repsol, Shell ve Total gibi önde gelen şirketleri 2050 yılı için net sıfır emisyon hedeflerini açıklamışlardır (Anonymous, 2022). Bazı petrol ve gaz şirketleri, ya yenilenebilir enerji şirketlerinde hisse satın alarak ya da temel işlerini yenilenebilir enerjilere doğru çeşitlendirerek yenilenebilir kaynaklara yatırım yapmışlardır (Anonymous, 2022). Ulusal ekonomilerin girdisinde büyük pay sahibi olan enerji kaynakları, ülke politikalarında değişikliğe sebebiyet verecek nitelikte stratejik bir konumdadır.

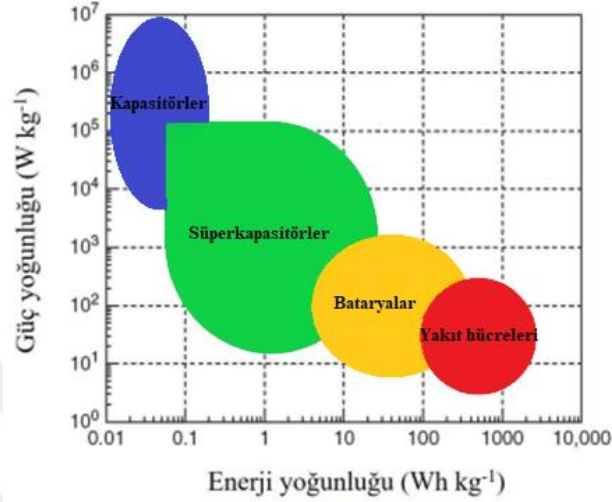
Sürdürülebilirliğin sağlanması, küresel istikrar, enerji arz güvenliği, daha temiz ve yaşanabilir bir çevre için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında artış görülmektedir. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının daha verimli kullanılması için enerji depolama sistemleriyle birlikte kullanılması gerekmektedir. Çünkü yenilenebilir enerji kaynaklarında sürekli bir enerji akışı yoktur, bu özellik elektrik şebekelerinin kontrolünü ve yönetimini giderek daha zor ve karmaşık hale getirmektedir (Wang ve ark., 2013). Enerji depolama sayesinde, iki yönlü güç düzenleme avantajı sağlanır, yani yenilenebilir güç fazla olduğunda gücü emebilir ve güç yetersiz olduğunda gücü serbest bırakabilir (Banaei ve ark., 2006). Enerji depolama teknolojisi, yeni enerji tüketim kapasitelerinin geliştirilmesinde, güç sistemlerinin istikrarlı ve ekonomik işleyişinin sağlanmasında ve yenilenebilir enerji teknolojilerinin yaygın olarak uygulanmasının desteklenmesinde rol oynamaktadır (Abdalla ve ark., 2021).

### **1.1. Enerji Depolama Cihazları**

Günümüzde kimyasal, elektrokimyasal, mekanik, elektromanyetik veya termal olarak farklı depolama teknolojileri kullanılmaktadır (İbrahim ve ark., 2008). Bu enerji depolama sistemlerin her birinin enerji yoğunluğu, ömrü, maliyeti ve verimi gibi kendine özgü karakteristikleri vardır. Sürekli gelişimi ve olgunluğu nedeniyle, enerji depolama teknolojisi, elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji santralleri, dağıtım ağları ve iletim şebekeleri gibi çeşitli alanlarda uygulanmaktadır (Alsayegh ve ark., 2010)

Farklı enerji depolama ve dönüştürme teknolojileri arasında piller, yakıt hücreleri ve süperkapasitörler en çok bilinen yöntemlerdendir. Bu noktada elektrokimyasal enerji depolama cihazlarının performanslarını değerlendirmek ve karşılaştırmak için genellikle Ragone eğrisi kullanılır (Yu ve ark., 2013). Şekil 1.2'de sunulan Ragone grafiği; piller,

yakıt hücreleri ve süperkapasitörler dâhil olmak üzere şu ana kadar mevcut olan çeşitli enerji depolama ve dönüştürme sistemlerinin enerji performansına karşı güç durumunu göstermektedir. Burada enerji yoğunluğu, birim hacim veya kütle başına biriken enerjiyi ifade ederken güç yoğunluğu ise, birim hacim veya kütle başına enerji aktarım hızı olarak ifade edilmektedir.



Şekil 1.2. Ragone Grafiği (Kim ve ark., 2015)

Süperkapasitör, geleneksel kapasitörler ve piller arasındaki güç-enerji boşluğunu kapatan yeni bir tür enerji depolama cihazıdır. Piller ve düşük sıcaklıklı yakıt hücreleri tipik düşük güçlü cihazlardır, geleneksel kapasitörler ise çok düşük enerji yoğunluğuna sahiptirler (Kötz ve Carlen, 2000). Bu nedenle, elektrokimyasal kapasitörler, ilgili cihazla birleştirildiğinde güç yoğunluğu açısından pil performansını artırabilir veya enerji yoğunluğu açısından kapasitör performansını iyileştirebilir (Kötz ve Carlen, 2000). Elektrokimyasal kapasitörler veya ultra kapasitörler olarak da bilinen süperkapasitörler, geleneksel kapasitörlere göre nispeten yüksek enerji yoğunlukları, pillere kıyasla da büyük güç yoğunlukları ve uzun çevrim ömürleri (>100000 döngü) nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmüştür (Endo ve ark., 2005; Zhang ve Lou, 2013). Süperkapasitörler günümüzde, elektrikli ve hibrit araçlarda, yakıt hücreli yolcu araçlarında, trenlerde, trolleybüslerde, taşınabilir elektronik cihazlarda, kesintisiz güç kaynaklarında, enerji depolama sistemlerinde vb. birçok uygulamada tek başlarına veya pillerle birlikte kullanım alanı bulmuştur (Libich ve ark., 2018).

## 1.2. Süperkapasitörler

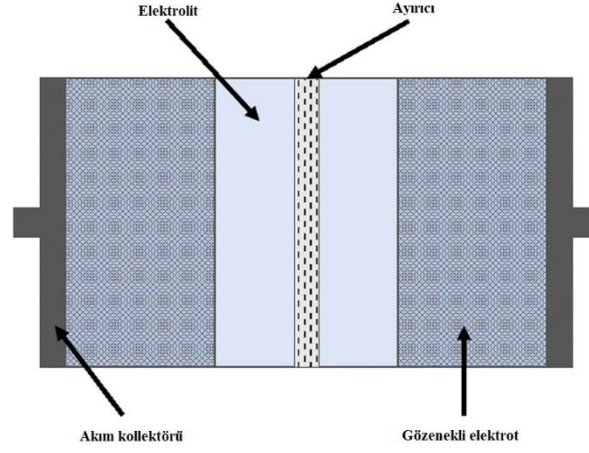
Süperkapasitörler, yüksek güç yoğunluğu, hızlı şarj/deşarj işlemi ve iyi döngüsel kararlılık gibi avantajları nedeniyle yeni nesil enerji cihazları olarak kabul edilmektedirler (Largeot ve ark., 2008). Mükemmel enerji-güç kombinasyon özelliklerine sahip ideal bir süperkapasitörün elektrokimyasal performansı, büyük ölçüde elektrot malzemelerine ve elektrolite bağlıdır. Elektrotların spesifik kapasitansı doğrudan elektrot malzemelerinin erişilebilir yüzey alanı ile, yüksek güç yoğunluğu ise elektrot malzemelerinin elektronik iletkenliğine ve iyonların malzemelerin gözenek kanalında hızlı taşınmasına bağlıdır. Bu nedenle, elektronik iletkenliği yüksek ve gelişmiş gözenekli yapıya sahip gelişmiş elektrot malzemelerinin kullanılması elektrokimyasal çift katmanlı kapasitörler (EDLC) için önemlidir.

Süperkapasitörlerin elektrot malzemelerinin üretimi, karbon bazlı malzemeler, iletken polimerler ve metal oksitler/hidroksitler ile yapılmaktadır (Jian ve ark., 2016). Geniş yüzey alanı, iyi iletkenliği, yüksek elektrokimyasal kararlılığı, uzun çevrim ömrü, kolay işlenebilmesi ve uygun maliyeti gibi avantajlarından dolayı ticari kapasitör elektrotlarının büyük bir bölümü karbon esaslıdır (Simon ve Gogotsi, 2008; Zhang ve Zhao, 2009). Karbon esaslı elektrot üretiminde aktif karbon (AC), grafen ve karbon nanotüpler (CNT'ler) gibi çeşitli karbon formları kullanılmaktadır (Geng ve ark., 2018). Son yıllarda maliyet bakımından uygun olması, biyolojik çevreye uyumu, kolay erişilebilir olmaları, yüksek adsorpsiyon, yenilenebilir yapıları, gelişmiş gözenekli yapı, yüksek özgül kapasite vb. gibi özellikleri nedeniyle biyokütle kaynaklı karbon elektrot malzemeleri üzerine araştırmalar hız kazanmaktadır (Lu ve Zhao, 2017).

Süperkapasitörler, enerji depolamanın elektrot-elektrolit arayüzünde şarj vedeşarj işlemlerine dayalı olduğu kapasitör tipidir (Abruña ve ark., 2008). Süperkapasitörlerdeki enerji depolama ilkesi, geleneksel bir kapasitörünkiyle benzerdir (Zhang ve Zhao, 2009). Geleneksel kapasitörün aksine, süperkapasitörler, kapasitansta geleneksel kapasitörlere göre 10000 kat artışa yol açan daha büyük bir etkin yüzey alanına sahip birleşik elektrotlara sahiptir (Kim ve ark., 2015).

Süperkapasitör, bir elektrolit içine daldırılmış bir ayırıcı kullanılarak ayrı tutulan iki elektrot konfigürasyonundan oluşur. Bir süperkapasitör düzeneği kollektör (akım toplayıcı), polarize elektrotlar, pozitif ve negatif iyonları olan elektrolit ve bir ayırıcı bileşenlerinden oluşmaktadır. Şekil 1.3' te gösterildiği gibi, süperkapasitör, iyon geçirgen bir zar (ayırıcılar) aracılığıyla bir elektrottan ayrılan iyonik olarak iletken bir elektrolit

aracılığıyla bağlanan iki elektrottan oluşur. Elektrolitlerdeki iyonlar, uygulanan gerilimin elektrotları polarize etmesiyle elektrik çift katmanları üretir.



Şekil 1.3. Süperkapasitör yapısı (Smith ve ark., 2020)

### 1.2.1. Süperkapasitörlerin tarihsel gelişimi

Süperkapasitör teknolojisinin başlangıcı, 1853'te elektrik yükünün sadece bir iletkenin yüzeyinde değil, aynı zamanda bir elektrot ve bir elektrolit arasındaki "çift katmanlı" arayüzde de depolanabileceğini ilk kez fark eden Helmholtz'un çalışmasına dayanmaktadır (Conte, 2010). 1950'lerde General Elektrik Mühendisleri, yakıt hücreleri ve şarj edilebilir piller için kapasitörler oluşturmak amacıyla gözenekli karbon elektrotlarını araştırmaya başlamışlardır. Gözenekli karbon elektrotları kullanarak, H. Becker 1957'de bir "düşük voltajlı elektrolitik kondansatör" oluşturmuştur. İlk patentler, yüksek yüzey alanlı karbona dayalı bir kapasitörün Becker tarafından tanımlandığı 1957 yılına dayanmaktadır. 1966'da araştırma amaçlı yakıt hücresi projeleri geliştirirken, Standard Oil Company, Cleveland, Ohio (SOHIO) araştırmacıları, "elektrik enerjisi depolama aygıtı" olarak başka bir versiyonunu geliştirdiler (Conte, 2010). 1960'larda, SOHIO, ince gözenekli bir yalıtkanla ayrılmış aktif kömürden yapılmış iki katmandan oluşan ilk hücreyi icat etmiştir. Bu teknoloji, mevcut çift katmanlı kapasitörler için temel konsept haline geldi. Daha sonra 1969'da bu tür cihazları pazarlamak için ilk girişimler SOHIO tarafından üstlenildi. Ancak, 1971 yılında, Standard Company ticarileştirme sorunları nedeniyle buluşunu, ürününe "süperkapasitör" adını veren NEC adlı başka bir şirkete lisansladı ve bilgisayar belleğini korumak için yedek güç olarak kullanılmak üzere bu ürünü satmayı başardı (Namisnyk ve Zhu, 2003). 1978'de Matsushida (Panasonic), geliştirilmiş elektrotlar içeren çift katmanlı kapasitörler üretme yöntemlerinin patentini

aldı (Yoshida, 1988). Bu ‘Altın kapasitör’ler olarak adlandırılan elektrikli çift katmanlı kapasitör hattının ilk temeliydi. 1987’de ELNA olarak bilinen bir şirket Dynacap’ı üretti. Bu üç ürün de düşük güçlü uygulamaları gerçekleştirmek için kullanıldı. İlk yüksek güçlü çift katmanlı kapasitörler, Pinnacle Research Institute (PRJ) tarafından askeri uygulamalar için geliştirildi. 1980 yılı sonunda, artan kapasitans değerlerine bağlı olarak şarj ve deşarj akımları artmış ve eşdeğer seri direnç (ESR) değerleri azalmıştır. 1992’de Maxwell Laboratories bu gelişmeyi devraldı ve güç uygulamalarını vurgulamak için onlara “Boost Caps” adını verdi (Namisnyk ve Zhu, 2003). Evans, 1994 yılında elektrolitik ve elektrokimyasal kapasitörlerin özelliklerini birleştiren yüksek voltajlı bir tantal elektrolitik kapasitör geliştirdi. Bu süperkapasitör elektrolitik ve elektrokimyasal kapasitör özelliklerini birleştirir, ancak yüksek maliyetleri sadece askeri uygulamalarla sınırlı kalmasına neden olmuştur (Evans, 1994). Günümüzde ABD’de Maxwell Technologies, AVX ve Cooper Electronic Technologies; Japonya’da ELNA ve Matsushita; Rusya’da ESMA ve Avustralya’da Cap-XX firmalarının tümü farklı özellikte süperkapasitörleri piyasaya sunmaktadırlar (Namisnyk ve Zhu, 2003).

### **1.2.2. Süperkapasitörlerin kullanım alanları**

Süperkapasitörler, çoğunlukla çok kısa bir süre içinde büyük miktarda enerji depolama veya serbest bırakma ihtiyacı olan, daha uzun bir kullanım ömrünün gerekli olduğu ve nispeten kısa bir süre için büyük miktarda güce ihtiyaç duyulan uygulamalarda kullanılmaktadırlar (Libich ve ark., 2018). Otomobil ve ulaşım sistemleri, savunma ve askeriye, bilgisayarlar ve yedek çipler, tıbbi ve endüstriyel sektörler dahil olmak üzere çeşitli alanlarda süperkapasitörlerin uygulamalarını görmek mümkündür (Muzaffar ve ark., 2019).

Günümüzde süperkapasitörler öncelikle hibrit elektrikli araçlarda (HEV), elektrikli araçlarda (EV) ve yakıt hücresi araçlarında (FCV) (yolcu araçları, trenler ve trolleybüslerde kullanılmaktadır (Libich ve ark., 2018). Toplu taşıma araçlarında ve hibrit elektrikli araçlarda enerji geri kazanımı, süperkapasitörlere olan ilgiyi daha da artırmıştır. Bunun nedeni, toplu taşıma için birincil zorluk, sık durmalar için fren yaparken yenilenen enerjiyi kullanmak ve yola çıkmak için hızlanırken depolanan enerjiyi yeniden kullanmaktır. Süperkapasitörler, anlık fren enerjisini depolamakta ve talep üzerine deşarj edebilmekte, bu şekilde de yakıt verimliliğini artırabilmektedir. Ayrıca mevcut HEV’lerde, şarj/deşarj mekanizmalarının dirençlerinden ve ekzotermik reaksiyonlarından

kaynaklanan istenmeyen ısı ürettiği için sıcaklık kararlılığı zorluklarıyla karşılaşılmaktadır. Isıyı etkin bir şekilde dağıtma yeteneğine sahip olan süperkapasitörler, termal sorunları gidermek için HEV'lere uygulanabilmekte ve böylece HEV pazarına daha kolay giriş yapmalarını sağlamaktadırlar (Miller ve Burke, 2008). Süperkapasitörler bu özelliklerinden dolayı elektrikli araçlar için klasik akülere alternatif olarak kabul edilmektedirler.

Askeri uygulamalarda, süperkapasitörler genellikle silahlı araçların elektronik aksamalarında, helikopterlerde kara kutular ve diğer uygulamalar için alternatif güç olarak uygulanmakta ve kullanılmaktadırlar (Yu ve ark, 2013). Ayrıca, Faz dizinli radar anteni, lazer güç kaynakları, askeri radyo iletişimi, aviyonik görüntüleme ve enstrümantasyon, hava yastığı dağıtım yedek gücü ve GPS güdümlü füzeler vb. yüksek derecede hassas güç gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadırlar.

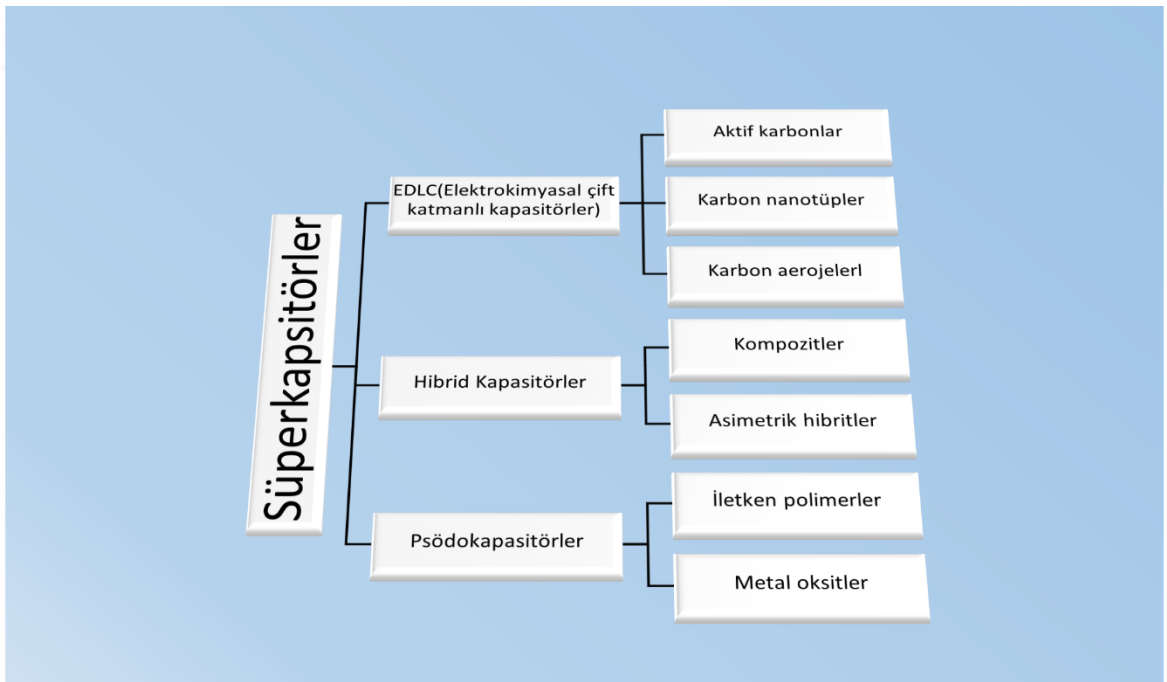
Mikro şebekelere güç sağlamada yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarında sürekli bir enerji akışı yoktur, bu özellik elektrik şebekelerinin kontrolünü ve yönetimini giderek daha zor ve karmaşık hale getirmektedir (Wang ve ark., 2013). Gün içinde enerji talebi fazla olduğunda ve üretim kısa bir süreliğine düştüğünde, mikro şebekeye anında güç sağlamak ve tersi durum meydana geldiğinde enerji depolamak için süperkapasitörler kullanılabilir. Böylece elektrik hatlarında oluşacak gerilim dalgalanmaları azaltılabilmektedir.

Süperkapasitörler yedek güç kaynağı olarak ilk kez uygulama alanı bulmuştur (Yu ve ark., 2013). Rüzgâr türbinlerinde, kanat hatve kontrolünde yedek güç sağlar, böylece ana besleme arızalanması durumunda, kanat hatvesini ayarlamak mümkün olacaktır (Lee, 2019). Süperkapasitörler, dizüstü bilgisayarlar, PDA'lar (kişisel dijital asistan), GPS, taşınabilir medya oynatıcılar ve el cihazları gibi değişken yüklere sahip uygulamalarda sabit bir güç kaynağı sağlamaya yardımcı olabilmektedirler. RAM, S-RAM, mikro denetleyici ve PC Kartı gibi düşük güçlü cihazlar, bir yedekleme veya acil kapatma sistemi olarak süperkapasitörler tarafından desteklenmektedir. Otomatik sayaç okuma (AMR) ekipmanı veya endüstriyel elektronik olay bildirimleri gibi düşük enerjili uygulamalar için tek güç kaynağı olarak hizmet ederler. Şarj edilebilir pillerin gücü, kısa elektrik kesintilerinin ve büyük akım tepe noktalarının etkilerini azaltan süperkapasitörler kullanılarak tamponlanır. Süperkapasitörler kablosuz bir el aleti tornavidaya güç sağlayabilmektedirler. Süperkapasitör destekli kablosuz bir tornavida pille çalışan bir muadiliyle karşılaştırıldığında çalışma süresinin yaklaşık yarısına sahipken, 90 saniyenin altında tamamen şarj olduğu gözlemlenmiş ve üç ay kullanılmadığı halde şarjının %85'ini

koruduğu gözlemlenmiştir. Süperkapasitörler dalgalı olmayan yüklerde de kullanılabilir. Dijital fotoğraf makinesi flaşları ve LED el fenerlerinde kullanım alanlarındadır. Sağlık sektöründe, fibrilasyona girmiş bir kalbi sinüs ritmine geri döndürmek için kullanılan defibrilatör cihazlarında da kullanılabilir.

### 1.2.3. Süperkapasitörlerin sınıflandırılması

Süperkapasitörler Şekil 1.4'te görüldüğü gibi enerji depolama mekanizması temelinde, elektrokimyasal çift katmanlı kapasitörler, psödo kapasitörler ve hibrit kapasitörler olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadırlar (Kim ve ark., 2015).

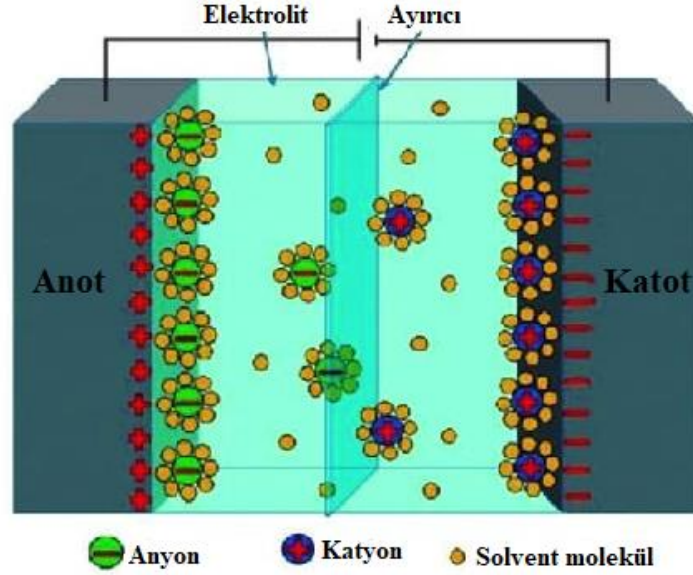


Şekil 1.4. Süperkapasitörlerin sınıflandırılması

#### 1.2.3.1. Elektrokimyasal çift katmanlı kapasitörler (EDLC)

Genel olarak, bir elektrokimyasal çift katmanlı kapasitör (EDLC), yükü elektrostatik olarak depolayan bir elektrokimyasal kapasitördür (Simon ve Gogosti, 2008). Kapasitans mekanizmasına sahip bir EDLC, dielektrik kapasitörün tipik bir kapasitans mekanizmasına benzerdir (Guidi ve ark., 2008). Kapasitörlerde kapasitans düşük olduğundan yük depolaması sınırlıdır. Bununla birlikte, bir süperkapasitör, geleneksel kapasitörünkine benzer şarj/deşarj mekanizmasına sahip elektrotların geniş arayüz alanı nedeniyle elektrokimyasal çift katman ilkesine dayalı olarak daha fazla enerji depolayabilir (Barrade ve ark., 2000). Şekil 1.5'te

elektrokimyasal çift tabaka bir süperkapasitörün şematik gösterimi verilmiştir (Chen ve ark., 2017).



Şekil 1.5. Elektrokimyasal çift katmanlı kapasitörün (EDLC) şematik gösterimi (Chen ve ark., 2017)

EDLC, metalik akım toplayıcılarına yapıştırılmış iki elektrot içermektedir. Buna ek olarak, elektrotlar, merkezinde iyon geçirgen ayırıcı bulunan bir elektrolit çözeltisine yerleştirilir. Bir güç kaynağından elektrotlara gerilim uygulandığında elektrolit sıvısı içerisindeki iyonlar ayrılarak zıt yüklü elektrodun yüzeyine doğru hareket etmeye başlar. Elektrot yüzeyindeki gözenekler sayesinde yük elektrotların yüzeyinde birikmeye başlar. Bu şekilde elektrot-elektrolit arayüzündeki yük ayrımının bir sonucu olarak çift tabaka oluşmaktadır. Bu iki yük katmanını, bir dielektrik ayırıcı sayesinde ayrılmaktadır. (Halper ve Ellenbogen, 2006). Yük depolama, arayüz boyunca herhangi bir yük aktarımı olmadan doğrudan elektrot malzemesinin çift katmanlı boyunca gerçekleşmektedir (Muzaffar ve ark., 2019).

EDLC'lerin üretiminde kullanılan çok sayıda birbirinden farklı elektrot malzemeleri bulunmaktadır. Elektrot malzemesinin seçimi, elektriksel özelliklerin belirlenmesinde esastır. EDLC'lerde çift tabaka mekanizması nedeniyle yük depolama bir yüzey işlemidir ve bu nedenle elektrot malzemesinin yüzey özellikleri kapasitans üzerinde önemli bir etki yaratmaktadır. EDLC davranışı gösteren çeşitli malzemeler arasında karbon, yüksek yüzey alanı nedeniyle süperkapasitörlerin geliştirilmesinden bu yana kullanılmaktadır. Karbon, düşük maliyeti, kolay bulunabilirliği ve ayrıca

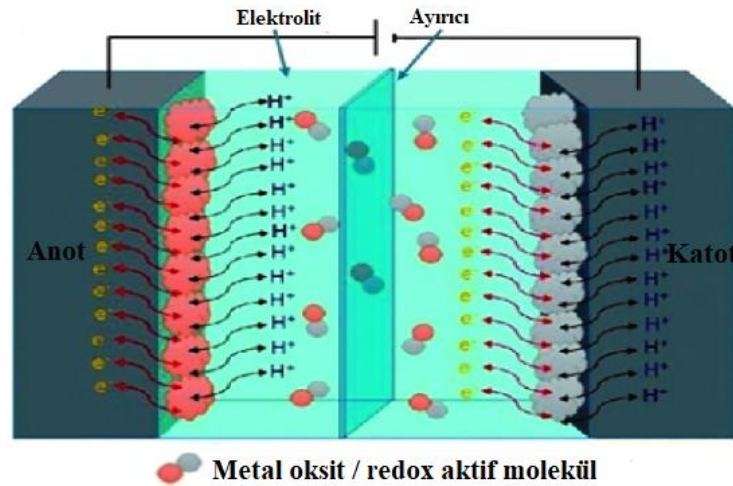
nanotüpler, lifler ve köpükler gibi farklı üretim formlarında bulunabilmesi nedeniyle de günümüzde EDLC'ler için en çok araştırılan elektrot malzemesi olmaya devam etmektedir. Karbonun aktifleştirilmiş karbon gibi aktif bir forma dönüştürülmesi gözenekliliği ve gözeneklerin elektrolite erişilebilirliğini etkilemektedir. Gözeneklerin içindeki iyon hareketliliği, elektrolitik çözelti kütlesindeki iyon hareketliliğinden bağımsızdır. Ancak gözenek boyutu, bir hücredeki genel iyon hareketliliği üzerinde önemli bir etki yaratmaktadır (Muzaffar ve ark., 2019).

### 1.2.3.2. Psödokapasitörler

EDLC'den farklı olarak, bu yöntem hızlı ve tersinir elektrokimyasal redoks reaksiyonlarına dayanmaktadır. Elektrik enerjisi, elektrotlar ve elektrolit iyonları arasındaki elektron yükü transferi ile Faradaik olarak depolanmaktadır (Halper ve Ellenbogen, 2006). Psödokapasitörde, kabul edilen yük miktarına ve değişen potansiyele bağlı kapasitans ile çift katman boyunca yük geçişi söz konusudur. Psödokapasitör elektrotları esas olarak metal oksitlerden, metal katkılı karbondan ve iletken polimerlerden karşılanmaktadır. Psödo kapasitans (C), yük kabulünün ( $\Delta q$ ) ve değişen potansiyelin ( $\Delta V$ ) türeviyle verilir;

$$C = \frac{d(\Delta q)}{d(\Delta V)} \quad (1.1)$$

Tipik bir psödokapasitörün şematik gösterimi şekil 1.6' da verilmiştir.



Şekil 1.6. Psödokapasitörün şematik gösterimi (Chen ve ark., 2017)

Psödokapasitif elektrotlarda üç tür Faradaik işlem meydana gelir, bunlar; elektrolitteki iyonların tersinir yüzey adsorpsiyonu, elektrolitteki iyonları içeren redoks

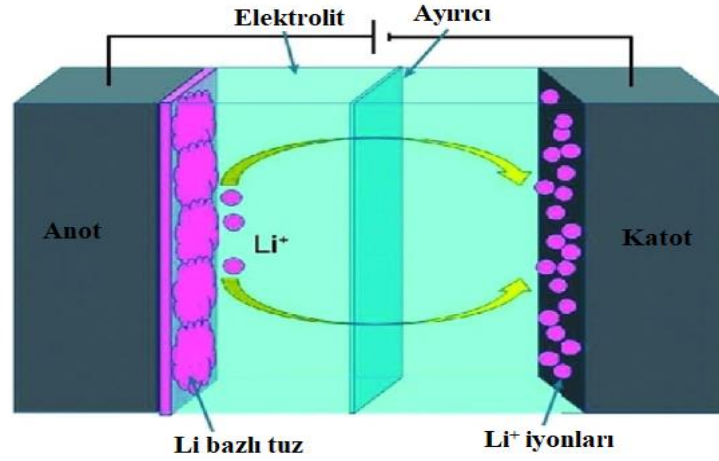
reaksiyonları ve iletken polimerlerde tersinir doping (katkılama)-dedoping işlemleri. İlk iki işlem esas olarak yüzey reaksiyonlarıdır ve bu nedenle elektrotların yüzey alanına büyük ölçüde bağlıdır. Üçüncü işlem daha çok toplu bir işlemdir ve elektrot malzemelerinin spesifik kapasitansı, yüzey alanına çok daha az bağlıdır, ancak iyonları elektrotlara ve elektrotlardan verimli bir şekilde dağıtmak için mikro gözeneklere sahip nispeten yüksek bir yüzey alanı tercih edilmektedir (Burke, 2000). Redoks reaksiyonları genellikle elektrokimyasal olarak erişilebilir arayüzey alanıyla orantılı bir elektrostatik çift katmanlı kapasitans bileşeni eşlik eder ve tipik olarak toplam kapasitansın %5-10'una katkıda bulunur. Psödokapasitans bazlı malzemelerde yüksek spesifik kapasitansa ulaşılabilir (Zhao ve ark., 2011).

Hızlı tersinir Faradaik yük transfer reaksiyonundan yararlanarak, psödokapasitörler tarafından EDLC'lerden daha yüksek bir enerji yoğunluğu sağlanır (Lu ve ark., 2013). EDLC'lerden daha yüksek bir enerji yoğunluğu sağlayabilmelerine rağmen, şarj/deşarj esnasında elektrotlar fiziksel değişikliklere maruz kaldıklarından, EDLC'lere kıyasla nispeten zayıf dayanıklılıkları vardır (Zhao ve ark., 2011). Bu tür süperkapasitörler EDLC'lere oranla daha az tercih edilmektedir (Libich ve ark., 2018).

### **1.2.3.3. Hibrit kapasitörler**

EDLC'lerin ve psödokapasitörlerin depolama mekanizmasının kombinasyonu, hibrit süperkapasitörlerin enerji depolama mekanizmasını oluşturmaktadır. Hibrit süperkapasitörlerde pozitif elektrot ve negatif elektrot olmak üzere iki farklı elektrot vardır. Pozitif elektrot (Anot), tipik olarak elektrot yüzeyindeki çift katmanda elektrostatik enerji depolayan aktif karbondan; negatif elektrotta (katot) ise genellikle psödo kapasitif elektrot malzemesinden yapılmaktadır (Libich ve ark., 2018). Hibrit süperkapasitörün bir yarısı EDLC gibi davranırken, diğer yarısı psödo kapasitör gibi davranmaktadır (Stoller ve ark., 2008).

Günümüzde hibrit kapasitörler iki farklı şekilde yapılabilmektedir: (i) psödokapasitif metal oksitler ile karbon elektrot ve (ii) lityum ilave elektrotları ile karbon elektrotlar (Simon ve Gogotsi, 2008). Li yerleştirilmiş elektrot ve karbon bazlı elektrottan oluşan bir hibrit süperkapasitörün şematik diyagramı Şekil 1.7'da gösterilmektedir.



Şekil 1.7. Hibrit kapasitörün şematik gösterimi (Chen ve ark., 2017)

Hibrit süperkapasitörler, EDLC ve psödokapasitörden daha yüksek enerji yoğunluklarına ve güç yoğunluklarına sahiptir (Stoller ve ark., 2008). Geleneksel kapasitörlerin yanı sıra EDLC ve psödokapasitörlere göre iki ila üç kat daha fazla yüksek kapasitans elde edilebilmekte bununla birlikte daha geniş çalışma gerilimi aralığı sağlayabilmektedir. Ancak hibrit süperkapasitörlerde faradayik reaksiyonlar gerçekleştiğinden EDLC'ye oranla daha az çevrim ömrüne sahiptirler.

#### 1.2.4. Süperkapasitör uygulamalarında kullanılan elektrot malzemeleri

Elektrotlar, esas olarak iyonlar ve elektronlar için ya elektrikli çift katmanlar oluşturan ya da kimyasal olarak reaksiyona giren adsorpsiyon bölgeleri sağlamak için kullanılmaktadır. Süperkapasitörlerin kapasitansı büyük ölçüde elektrot özelliklerinin özelliklerine bağlıdır. Elektrotlar iyi iletkenlik, yüksek kimyasal kararlılık, kontrollü gözenek yapısı, sıcaklık kararlılığı, işlenebilirlik, çevre dostu ve düşük maliyetli özelliklere sahip olmalıdır.

Süperkapasitörlerin elektrot malzemeleri, karbon bazlı malzemeler, geçiş metal oksitleri ve iletken polimerler olmak üzere üç alt bölüme ayrılmaktadır. Bu elektrot malzemeleri yalnızca farklı özelliklere değil, aynı zamanda farklı şarj depolama mekanizmalarına da sahiptirler. Burada, elektrot malzemelerinin uygun seçimi ve tasarımı, gelişmiş süperkapasitör performansları için hayati önem taşımaktadır (Vangari ve ark., 2013).

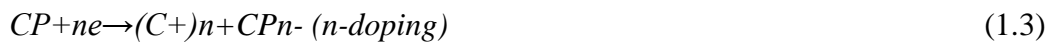
Çeşitli elektrot malzemeleri arasında, ticari olarak temin edilebilen kapasitörlerin %80'inden fazlasının üretildiği karbonlu malzemeler, en yaygın kullanılanlar arasındadır

(Simon ve Gogotsi, 2012; Zhang ve ark., 2019). Nispeten düşük maliyetli, çok yönlü mevcut formları, geniş yüzey alanı, iyi elektrik iletkenliği ve farklı çözeltilerde (kuvvetli asidikten baza kadar) mükemmel kimyasal kararlılığı nedeniyle, karbon elektrot malzemeleri fazlaca tercih edilmektedir. Elektrokimyasal çift katmanlı kapasitörler ve psödo-kapasitörler tarafından paylaşılan ortak bir özellik, enerji depolamanın esas olarak elektrolit ve elektrot arasındaki arayüze yakın malzemeyi içermesidir. Böylece partikül boyutunun azaltılması, daha büyük bir yüzey alanı sağlayarak aktif malzemelerin kullanımını büyük olasılıkla artırabilir. 10 nm'den daha küçük boyutta ultra ince nano yapılar tasarlanmanın yüksek performanslı süperkapasitörleri gerçekleştirebileceği kabul edilmiştir (Vangari ve ark., 2013). Bununla birlikte, spesifik yüzey alanı ile elektroaktif malzemelere karşılık gelen gözenek boyutu arasında bir denge olması istenmektedir. Çünkü büyük mikro gözeneklilik (kötü iletkenliğe yol açar) ve gözenek boyutlarının geniş dağılımı (artan “ölü hacim”), özellikle yüksek akım yoğunluklarında büyük oranlarda kapasitans kaybına neden olmaktadır (Jiang ve ark., 2013).

#### 1.2.4.1 İletken polimerler

İletken polimerler (CP), anyonlar ve katyonlarla elektrokimyasal doping veya redoks reaksiyonuna girebilen tipik bir psödokapasitif malzeme sınıfıdır. İletken polimerler, yüksek kapasitans, iyi esneklik, yüksek iletkenlik, yüksek çalışma gerilim aralığı, yüksek depolama kapasitesi, hafiflik, ayrıca karbon bazlı elektrot malzemelerine kıyasla nispeten düşük bir eşdeğer seri direnç (ESR) ve düşük maliyet gibi nedenlerle süperkapasitör elektrot malzemeleri olarak kullanılmaktadır (Mastragostino ve ark., 2002; Wang ve ark., 2019).

İletken polimerlerin yük depolama mekanizması aşağıdaki iki formülle açıklanmaktadır: oksidasyon üzerine p-doping ve indirgeme üzerine n-doping şeklinde gerçekleşmektedir.



Burada CP iletken polimeri, A<sup>-</sup> ve C<sup>+</sup> elektrolitteki anyon ve katyonu temsil eder.

Süperkapasitör uygulamalarındaki yaygın elektriksel CP'ler, Polianilin (PANI), polipirol (PPy), politiyofen (PTh) ve bunların türevlerdir (Viswanathan, 2017; Wang ve ark., 2019). Doping ve dedoping reaksiyonları sonucunda iletken polimerlerde şişmeler

veya büzülmeler meydana gelmektedir. Bu onların daha düşük çevrim ömrüne sahip olmasına neden olmaktadır (Mastragostino ve ark., 2002). Bu dezavantajların üstesinden gelmek için, iletken polimer malzeme yapılarının ve morfolojilerinin iyileştirilmesi ve kompozit elektrot malzemelerinin imal edilmesi gibi stratejiler denenmektedir (Viswanathan, 2017). Bu noktada aktif karbon/iletken polimer kompozitleri geliştirilmiştir. Aktif karbon, iletken polimerlerin kapasitansı önemli ölçüde artırabilmekte, aynı zamanda kompozit elektrotların elektriksel iletkenliğini ve mekanik dayanıklılığını da geliştirebilmektedir.

#### 1.2.4.2 Metal oksitler/hidroksitler

Genel olarak, metal oksit bazlı psödokapasitörler, geleneksel karbon bazlı EDLC'lerden ve iletken polimerli psödokapasitörlerden daha yüksek enerji ve güç yoğunluğu sağlayabilmektedir. Ayrıca polimer bazlı malzemelerden daha iyi kararlılığa sahiptirler. Elektrostatik karbon malzemelere benzer şekilde enerji depolama ortamı olarak işlev görmekte ve belirli gerilim aralıklarında elektrot malzemeleri ile iyonlar arasında elektrokimyasal faradaik reaksiyonlar gerçekleşmektedir. Süperkapasitör uygulamaları için dikkate alınması gereken metal oksitler için genel gereksinimler şunlardır: (1) malzeme elektronik olarak iletken olmalıdır; (2) metal, üç boyutlu bir yapının geri döndürülemez modifikasyonlarını içeren hiçbir faz değişikliği olmaksızın değişken değerlikte bulunmalıdır; ve (3) protonlar, indirgeme üzerine (ve kafesin dışına) oksit kafesine serbestçe interkalasyon yapabilmeli, bu da  $O^{2-} \leftrightarrow OH^-$  kolay bir şekilde birbirine dönüştürülmesine izin vermektedir (Viswanathan, 2017). Günümüzde psödokapasitif elektrotlar için bu koşulları sağlayan oksit bileşenler; rutenyum oksit ( $RuO_2$ ), mangan oksit ( $MnO_2$ ), kobalt oksit ( $Co_3O_4$ ), nikel oksit ( $NiO$ ) ve vanadyum oksittir ( $V_2O_5$ ) (Kim ve ark., 2015; Viswanathan, 2017).

Bu metal oksitler, artan kapasitansa yol açan belirli gerilimlerde çoklu oksidasyon durumlarına maruz kalır. Rutenyum oksit, yüksek oranda geri dönüşümlü redoks reaksiyonları, 1,2 V gerilim aralığında erişilebilen üç farklı oksidasyon durumu, yüksek proton iletkenliği, oldukça yüksek özgül iletkenliği, iyi ısıl kararlılığı, uzun çevrim ömrü, metalik tip iletkenlik ve yüksek çevrim kapasitesi sayesinde en çok çalışılan sistemdir (Simon ve Gogotsi, 2008; Viswanathan, 2017). Rutenyum metalinin zehirli olması, doğada az bulunması ve pahalı olması dezavantajlardır. Maliyeti azaltmak için, karbon veya iletken polimer gibi diğer substratlar üzerinde sulu rutenyum oksit parçacıklarının

biriktirildiği karışık oksit kompozitler veya rutenyum bazlı kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

#### **1.2.4.3 Karbon temelli malzemeler**

Karbon bazlı malzemeler, diğer malzemelerle karşılaştırıldığında daha yüksek yüzey alanlarına, daha gelişmiş sentez tekniklerine ve daha düşük maliyete sahiptirler, bu yüzden süperkapasitör elektrot gereksinimlerini tamamen karşılayabilirler. Aktif karbon, karbon nanotüpler (CNT) ve grafen gibi karbon bazlı malzemeler, yüksek yüzey alanları, yüksek gözeneklilik, düşük maliyet ve çeşitli formlarda üretilibilmeleri (örneğin tozlar, nanotüpler, aerogeller) gibi istenilen kimyasal ve fiziksel özelliklere sahiptirler (Jayalakshmi ve Balasubramanian, 2008). İletkenlikleri daha az olmasına rağmen verimli süperkapasitör elektrotlardır (Namisnyk ve Zhu, 2003).

#### **Karbon nanotüpler**

Diğer karbon bazlı elektrotların aksine, karbon nanotüp elektrotlardaki mezo gözenekler birbirine bağlıdır ve neredeyse tüm mevcut yüzey alanını kullanan sürekli bir yük dağılımı sağlamaktadır. Bu nedenle, karbon nanotüp elektrotlar aktif karbon elektrotlara kıyasla mütevazı bir yüzey alanına sahip olsa da bu elektrotlar aktif karbon bazlı süperkapasitörlerdekiyle karşılaştırılabilir kapasitanslar elde etmek için yüzey alanı daha verimli bir şekilde kullanılmaktadır (Frackowiak ve Beguin, 2001).

CNT'ler benzersiz iç yapıları, tamamen erişilebilir dış yüksek yüzey alanları, düşük kütle yoğunlukları, mükemmel elektriksel iletkenlikleri, olağanüstü mekanik, termal ve kimyasal kararlılıkları gibi mükemmel özellikleri nedeniyle süperkapasitörler için elektrot malzemeleri olarak ilgi odağı haline gelmiştir (Du ve Pan, 2006; Futaba ve ark., 2006). Karbon nanotüpler genellikle belirli hidrokarbonların ayrışması yoluyla ve tek duvarlı karbon nanotüpler (SWCNT'ler) ve çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT'ler) gibi farklı nanoyapılar elde etmek için kristal sıralarının değişebileceği belirli parametreleri işleyerek sentezlenmektedir. Örneğin, Niu ve ark. tarafından yapılan çalışmada katalitik olarak büyütülmüş karbon nanotüplerden levha elektrotlar hazırlanmış ve sentezlenen CNT'nin 8 nm çapa ve 430 m<sup>2</sup>/g'lık spesifik bir yüzey alanına sahip olduğu görülmüştür. Tek hücreli bir test cihazında H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> elektrolit çözeltisi kullanılarak maksimum 104 F/g'lık bir kapasitansın elde edildiği bu çalışmada, ulaşılan kapasitans değeri, farklı yöntemlerden elde edilen CNT malzemelerinden daha yüksektir (Niu ve ark., 1997). Araştırmacılar ayrıca, doğrudan iletken alt tabakalar üzerine

biriktirilen CNT malzemelerinin, aktif malzemeler ve akım toplayıcılar arasındaki temas direncini azaltabileceğini bildirmişlerdir. Buna dayanarak, Shi ve arkadaşları, kimyasal buhar biriktirme kullanarak CNT'yi doğrudan Ni köpüğün üzerine büyütmüş ve üretilen malzemenin transfer yöntemi kullanılarak elde edilen CNT malzemesinden %127 oranında daha yüksek özgül kapasitansa sahip olduğunu görmüşlerdir (Rui ve ark., 2011). Bu mükemmel sonuçlara rağmen, düşük özgül alanlar ve yüksek maliyetler CNT'nin yüksek performanslı süperkapasitörlerde kullanımını sınırlandırmaktadır.

### **Karbon arojeller**

Karbon Arojeller, düşük yoğunluk, yüksek yüzey alanı, iyi iletkenlik, mekanik kararlılık, titreşim kararlılığı ve ek bağlayıcı gerektirmemesi nedeniyle Süperkapasitör elektrotlarında kullanılmaktadır (Lerner, 2004). Karbon arojeller, serpiştirilmiş mezo gözenekli sürekli bir iletken karbon nanopartiküller açısından oluşmaktadır. Bu sürekli yapı ve akım toplayıcıya kimyasal olarak bağlanma yetenekleri nedeniyle, karbon arojeller ek bir yapışkan bağlama maddesinin uygulanmasını gerektirmemektedir. Bağlayıcısız bir elektrot olarak, karbon arojellerin aktif karbonlardan daha düşük bir ESR'ye sahip olduğu görülmüştür (Frackowiak ve Beguin, 2001; Arico ve ark., 2005). Yüksek absorblama özelliği nedeniyle, süperkapasitörlere çok daha fazla elektrot malzemesi yüklenebilmekte ve böylece daha yüksek bir hacimsel enerji yoğunluğu elde edilebilmektedir (Kwon ve ark., 2004). Aerojel elektrotları yapmak için piroliz ve Resorsinol formaldehit yöntemleri kullanılmaktadır (Lerner, 2004). Karbon arojeller yüksek yüzey alanına rağmen kapasitans değerleri çok yüksek değildir.

### **Aktif karbonlar**

Karbonların mükemmel iletkenlik özelliği, kimyasal olarak kararlı olmaları, yüksek yüzey alanlarına sahip olmaları, gözenekli morfolojik yapıları, kompozit malzemelerle uyumu, yüksek korozyon direnci, geniş çalışma sıcaklığı aralığı, toksik olmama, kolay işlenebilirlik ve düşük maliyet özelliklerine sahip olmaları, onları modern süperkapasitörlerde çift katmanlı elektrotlar için tercih edilen malzemeler haline getirmektedir (Zhang ve Zhao, 2009; Yu ve ark., 2013). Karbonun birçok çeşidi vardır ancak hepsi elektrot malzemelerinde kullanılamamaktadır. Endüstriyel standartta ve en temel yüksek yüzey alanlı karbon malzemesi aktif karbondur (AC) (Yu ve ark., 2013). AC, en eski ve en yaygın gözenekli karbon türüdür.

AC'ler, çok çeşitli doğal ve sentetik öncüler de dâhil olmak üzere organik bileşiklerin karbonizasyonu ve kısmi oksidasyonu (aktivasyonu) ile hazırlanır (Gu ve Yushin, 2014). Karbonizasyon işleminde, karbonca zengin malzemeler, oksijensiz ortamda yüksek sıcaklıklarda (700 ila 1200 °C) işlenerek amorf karbon oluşturulur ve aktivasyon işleminde, karbon parçacıklarının büyük bir kısmında gözenekli ağlar sağlayabilen alkaliler, karbonatlar, klorürler veya asitler (örn. KOH, NaOH, ZnCl) gibi aktifleştirici maddeler ile daha düşük sıcaklıklar (400 ila 700 °C) uygulanır. Genel olarak, bu iki süreç, AC'lerin fizyokimyasal özelliğinin ve spesifik yüzey alanının öncü malzemelere ve aktivasyon yöntemlerine bağlı olduğu spesifik yüzey alanı ve gözeneklilikte muazzam artışlara yol açabilmektedir (Simon ve Burke, 2008).

Aktif karbonların yüksek yüzey alanlarına ulaşmak için farklı boyutlardaki mikro gözeneklerden (<2 nm genişliğinde), mezo gözeneklerden (2-50 nm) ve makro gözeneklerden (>50 nm) oluşan karmaşık gözenekli bir yapısı vardır. Kapasitans, yüzey alanı ile doğru orantılı olmasına rağmen, deneysel sonuçlar, aktif karbonlar için yüksek yüzey alanının tamamının cihazın kapasitansına katkıda bulunmadığını göstermektedir (Zhai ve ark., 2011). Bunun sebebi, küçük mikro gözeneklere yayılmak için çok daha büyük olan elektrolit iyonlarından kaynaklandığı düşünülmektedir, böylece bazı gözeneklerin yük depolamaya katkıda bulunmasını engellediği görülmüştür. (Qu ve Shi, 1998). Bu araştırma ayrıca gözenek boyutlarının dağılımı, enerji yoğunluğu ve cihazın güç yoğunluğu arasında ampirik bir ilişki olduğunu göstermektedir. Daha büyük gözenek boyutları, daha yüksek güç yoğunlukları ile ilişkilidir ve daha küçük gözenek boyutları, daha yüksek enerji yoğunlukları ile ilişkilidir. Sonuç olarak, aktif karbon elektrotların gözenek boyutu dağılımı, EDLC tasarımında önemli bir araştırma alanıdır (Qu ve Shi, 1998; Zhai ve ark., 2011).

Bir başka araştırma konusu da AC'lerin nano gözenekli yapısı ile farklı elektrolitlerdeki kapasitans performansları arasındaki ilişkidir. Genel olarak, AC'lerin kapasitansı sulu elektrolitlerde, organik elektrolitlerden daha yüksektir. Bunun bir nedeninin, sudakilerle karşılaştırıldığında organik çözeltilerdeki elektrolit iyonlarının etkin boyutunun daha büyük olduğu düşünülmektedir. Organik elektrolitler, iyonlardan daha küçük olan gözeneklerin sayısını arttırmakta ve bu nedenle yük depolamaya katkıda bulunmayanların sayısını arttırmaktadır. Kimyasal afinite olarak karbon yüzeyinin organik elektrolit tarafından ıslanabilirliği başka bir neden olabilmektedir (Zhai ve ark., 2011).

Ticari aktif karbon üretiminde en çok kullanılan ön maddeler; petrokok, zift ve kömürdür (He ve ark., 2012). Ancak fosil yakıtların çevreye etkisi ve sınırlılığı göz önüne

alındığında, son zamanlarda biyokütle kaynaklı malzemeler, bol, ucuz, erişilebilir olması, çevreyi koruma, enerji tasarrufu, özel yapı ve iyi iletkenlik gibi üstünlükleri nedeniyle geleneksel karbon malzemelerin yerini almak için ilgi kaynağı olmuştur (Hu ve ark., 2010; He ve ark., 2012; Tang ve ark., 2017).

### 1.2.5. Süperkapasitörlerde performans ölçüm yöntemleri

Süperkapasitörlerin elektrokimyasal performansını karakterize etmek için çeşitli aletler veya test metodları geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Bu noktada, döngüsel voltametri (CV), galvanostatik şarj/deşarj (GCD) ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) testleri yaygın olarak kullanılan testlerdendir.

#### 1.2.5.1. Döngüsel voltametri

Döngüsel voltametri, elektrokimyasal enerji depolama cihazlarının performanslarını değerlendirebilmek için kullanılan bir analiz tekniğidir. CV yöntemi potansiyodinamik elektrokimyasal ölçüme dayanmaktadır (Wang ve ark., 2019). Bu analitik teknik, zamana doğrusal olarak karşılık gelen elektrot potansiyeli belirlemesini içermektedir. Çalışan elektrotla ilgili olarak uygulanan gerilime karşı akım grafiği çizilir. Ölçüm, çalışma ve referans elektrotları arasına gerilim uygulanarak yapılırken, sırasıyla çalışma ve karşı elektrotlar arasındaki akım hesaplanır (Muzaffar ve ark., 2019).

Elektrot malzemelerinin kapasitansı, Denklem (1.4) kullanılarak dikdörtgensel CV eğrilerinden hesaplanabilmektedir:

$$C = \frac{i}{v} \quad (1.4)$$

C spesifik kapasitans (F/g),  $i$  ortalama gerilimdeki akım yoğunluğu (A/g) ve  $v$  tarama hızıdır (V/s). CV ölçümü, bir EDLC veya dikdörtgen bir CV eğrisi sergileyen tipik bir psödokapasitif elektrot malzemeler için ortalama kapasitansı değerlendirmek için doğrudan kullanılabilir.

#### 1.2.5.2. Galvanostatik şarj-deşarj

Süperkapasitör cihazlarının üç temel parametresi olan kapasitans, eşdeğer direnç ve çalışma gerilimi GCD yöntemi ile test edilebilmekte ve daha sonra zaman sabiti, güç ve enerji yoğunlukları, kaçak ve tepe akımı gibi diğer özellikleri de bu sonuçlardan

yararlanarak yorumlanabilmektedir. SC cihazlarının çevrim kararlılığını incelemek için de kullanılabilir. Ayrıca, üç elektrotlu bir kurulum kullanarak, SC malzemeleri için spesifik kapasitans, tersinirlik ve potansiyel penceresi de GCD testi ile elde edilebilmektedir (Zhang ve Pan, 2015).

Bu metot, SC cihazının veya çalışma elektrodunun, sabit bir akım seviyesinde tekrar tekrar şarj edilmesi ve boşaltılması ile gerçekleştirilmektedir. Sonuçta şarj ve deşarj süresine göre kaydedilen voltaj değerleri, potansiyel (E)-zaman (s) grafiğinde çizilmektedir (Muzaffar ve ark., 2019).

GCD testi ile kapasitans değerlendirmesi, Denklem (1.5) kullanılarak belirlenir:

$$C = \frac{Ixt}{\Delta v} \quad (1.5)$$

Burada C diferansiyel kapasitansı (F/g), I akım yoğunluğunu (A/g),  $\Delta V$  çalışma potansiyeli penceresini ve t elektrodun deşarj süresini (s) temsil eder.

### 1.2.5.3. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi

Elektrokimyasal impedans spektroskopisi, frekans tepkisi ve empedansın yanı sıra, yük transferi, kütle aktarımı ve yük depolama mekanizmasını karakterize etmek amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca kapasitans, enerji ve güç özelliklerini tahmin etmede de EIS kullanılabilir (Dupont ve ark., 2014).

EIS ölçümleri, süperkapasitör empedans verilerinin, 0,01 Hz ila 100 kHz gibi geniş bir frekans aralığında 5 veya 10 mV'lik küçük bir voltaj genliği ile belirli bir potansiyelde toplanmasıyla gerçekleştirilmektedir (Wang ve ark., 2016). Elde edilen sonuçlar Nyquist eğrisinde gösterilmektedir. Nyquist eğrisi, empedans spektrumlarını bilinen frekans aralıkları üzerinden göstermektedir. Nyquist eğrisi üç bölgeden oluşmaktadır. Nyquist eğrisi, yüksek frekans bölgesinde görünür yarım daire, orta frekans bölgesinde dikey bir çizgi, düşük frekans bölgesinde de kapasitif davranışı temsil eden ikinci bölgenin dikey çizgisi boyunca hayali bir çizgi oluşmaktadır (Qian ve ark., 2014).

EIS ölçümleri kullanılarak kapasitans aşağıdaki Denklem (1.6) ile hesaplanır:

$$C = \frac{1}{2\pi f|Z|} \quad (1.6)$$

Burada C kapasitansı, f frekansı ve Z empedansı göstermektedir.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Sürdürülebilirliğin sağlanması, küresel istikrar, enerji arz güvenliği, daha temiz ve yaşanabilir bir çevre, enerji depolama kaynaklarına olan ilgiyi arttırmaktadır. Günümüzde kimyasal, elektrokimyasal, mekanik, elektromanyetik veya termal olarak farklı depolama teknolojileri kullanılmaktadır. Bu enerji depolama sistemlerin her birinin enerji yoğunluğu, ömrü, maliyeti ve verimi gibi kendine özgü karakteristikleri vardır. Farklı enerji depolama ve dönüştürme teknolojileri arasında piller, yakıt hücreleri ve süperkapasitörler en çok bilinen yöntemlerdendir. Süperkapasitörler, geleneksel kapasitörlere göre nispeten yüksek enerji yoğunlukları, pillere kıyasla da büyük güç yoğunlukları ve uzun çevrim ömürleri nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmüştür. Son zamanlarda karbon bazlı malzemeler, yüksek yüzey alanları, yüksek gözeneklilik, düşük maliyet ve çeşitli formlarda üretilibilmeleri gibi üstün özelliklerinden dolayı elektrot yapımında kullanılan en yaygın malzemelerdir. Bugüne kadar biyokütleyi hammadde olarak kullanarak çeşitli yöntemler aracılığıyla farklı boyutlarda üretilen karbonlardan süperkapasitörler hazırlanmıştır.

Xuan ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada, Süperkapasitör elektrodunda kullanılmak üzere biyokütle kaynaklı torreya grandis kabuğu kullanılarak, azot gazı (N<sub>2</sub>) atmosferi altında karbonizasyon ve KOH aktivasyonu yoluyla nano gözenekli aktif karbonlar üretilmiştir. Aktivasyon sıcaklığının ve KOH dozajının, gözenek yapısı ve elektrokimyasal özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Gözenek yapıları, KOH oranı ve aktivasyon sıcaklığı ile ilişkili olduğu gözlemlenmiştir. N<sub>2</sub> adsorpsiyon-desorpsiyon testleri, AC-800-3 numunesinin, yüksek BET yüzey alanı (2100,8 m<sup>2</sup>/g) ve gözenek hacmi (1,02 cm<sup>3</sup>/g) gibi iyi özellikler göstermiştir. AC-800-3 ile hazırlanan elektrot, üç elektrotlu sistemde 0,5 A/g'da 290,5 F/g'lık yüksek bir kapasitans ve %62,6'lık hız kapasitesi göstermiştir. AC-800-3 elektrodunun birleştirilmiş simetrik hücresi, 0–1,6 V gerilim aralığında 360,1 W k/g güç yoğunluğunda 13,5 W h k/g enerji yoğunluğu elde edilmiş ve 7202,1 W k/g güç yoğunluğunda bile 6,8 Wh k/g'ı koruduğu gözlemlenmiştir. 5000 şarj/deşarj döngüsünden sonra ilk kapasitans değerinin %93,1 tutarak iyi bir döngü kararlılığı sergilemiştir. 1. ve 5000. döngüye ait GCD eğrilerinin karşılaştırılarak iki eğri arasında voltaj düşüşü farkı olmaması, AC-800-3 elektrodu için iç direncin 5000 devirden sonra açıkça artmadığını göstermiştir. Bu sonuçlardan, elektrot malzemesi olarak

kullanılan torreya grandis kabuğu süperkapasitör uygulamalarında sadece düşük maliyetiyle değil, aynı zamanda yüksek performansı ile talepleri karşılayabileceğini göstermektedir.

Sun ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada, bol miktarda aminoasit ve protein içeren ve heteroatomlar açısından zengin, kendi kendine katkılı fonksiyonel karbonlar hazırlamak için büyük avantajlar gösteren, kolayca bulunabilen bir mahsul olan kinoa'dan, N<sub>2</sub> atmosferi altında aktivasyon ve karbonizasyon işlemlerinden sonra aktif karbon üretilmiş ve süperkapasitör elektrotunda kullanılmak üzere performansı incelenmiştir. KOH aktivasyonuna sahip kinoadan türetilen karbon, QPC-X olarak adlandırılmış ve burada X (1, 2, 3, 4), sırasıyla KOH'nin ön- karbonize edilmiş ürüne ağırlık oranını göstermektedir. Aynı koşul altında, karşılaştırmalar için KOH aktivasyonu olmayan karbona QC adı verilmiştir. Çalışmada elektrolit olarak KOH (6 M) ve TEABF<sub>4</sub>/AN (1 M) kullanılmıştır. QC numunesi, 500 C'de karbonizasyondan sonra masif yapıyı sergilerken, QPCX numuneleri, karbonizasyon ve KOH aktivasyonundan sonra önemli gözenekli yapı gösterdi. QPC-3 örneğinin SEM ve TEM yoluyla mikro gözenekler ve mezo gözeneklerden oluşan çok gözenekli bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen QPC-3 örneği, 2597 m<sup>2</sup>/g'lık büyük bir yüzey alanı (SSA) olarak ölçülmüştür. FTIR spektrumları, yüzey fonksiyonel grubunu tanımak için kullanılmıştır. QPC-3'ün QC'den daha düşük bir hidrofobik grup C-H içeriğine ve daha yüksek hidrofilik grup C=O, C-O ve O-H içeriğine sahip olduğunu göstermiştir. QC ve QPCX elektrot malzemelerinin CV testi, -1-0 V potansiyel aralıkları arasında 10 mV/s tarama hızında ölçülmüştür. QPC-X'in tipik CV eğrisi, EDLC'lerde sinerjik etkileri gösteren simetrik bir dikdörtgen şekil göstermiştir. QPC-3 numunesinin integral alanı, QPC-3 numunesinin en iyi kapasitansı gösterdiğini gösteren QC, QPC-1, QPC-2 ve QPC-4 numunelerinden çok daha büyük olduğu görülmüştür. Elektrot örneklerinin GCD eğrileri, yarı simetrik bir kapasitif davranış sergilemiştir. GCD eğrilerinden QPC-3 numunesinin deşarj süresi diğerlerine oranla daha uzun olduğu görülmüştür. 6 M KOH elektrolitindeki EDLC'ler için elektrot olarak değerlendirildiğinde, QPC-3 numunesinin kapasitansı 1 A/g'da 330 F/g'e ulaşmış, hatta 20 A/g'lık yüksek akım yoğunluğunda bile %75'lik yüksek hız kapasitesi ve olağanüstü çevrim kararlılığı göstermiştir. Buna karşılık, QC elektrodu zayıf bir performans göstermiş ve kapasitans tutma 20 A/g'da yalnızca %30 bulunmuştur. Kapasitör, 100 W k/g güç yoğunluğunda 9,5 Wh k/g enerji yoğunluğu göstermiştir. Ayrıca, iki aynı QPC-3 elektroduna dayalı simetrik EDLC'ler ayrıca sırasıyla sulu ve organik elektrolitte 0,5 A/g ve 20 A/g'da 254 F/g ve 99,2 F/g'lik spesifik kapasitanslar ve

%73 ve %61'lik kapasitans tutma oranı göstermiştir. QPC-3 elektrot numunesi, 1 M TEABF<sub>4</sub>/AN (0–2,5 V) elektrolit kullanılarak iki elektrotlu bir sistemdeki kapasitans davranışı açısından değerlendirilmiştir. EDLC elektrotları gibi neredeyse dikdörtgen şekiller oluşturmuş, klasik kapasitif davranışı göstermiştir. Ayrıca, GCD eğrisi simetrik bir ikizkenar üçgen ve neredeyse doğrusal potansiyel-zaman davranışı göstererek tipik bir EDLC özelliğini göstermiştir. Toplam kütle bazında iki elektrodun özgül kapasitansı, 0,5 A/g'da 99,2 F/g olarak ölçülmüştür. Kapasitans tutmanın 20 A/g'da %61 olduğunu göstermiştir. QPC-3, 2 A/g'da 10000 döngüden sonra ilk kapasitansın yalnızca %10'unu kaybetmiş ve iyi bir döngü kararlılığı sergilemiştir. Kulombik verim 10000 devirden sonra %100 olarak kalmıştır. TEABF<sub>4</sub>/AN'de 625 W k/g nispi güç yoğunluğunda 22 W h k/g özgül enerji yoğunluğu elde edilmiştir. Yüksek performanslı süperkapasitör elektrotları için kinodan türetilen karbon malzemenin olağanüstü performansa sahip olduğu ve elektrot malzemeleri için alternatif sunduğu gözlemlenmiştir.

Peng ve ark. (2014), yüksek enerji yoğunluklu simetrik bir süperkapasitör imal etmek için biyokütle türevli gözenekli aktif karbon olarak pomelo kabuğu'nu (PP) kullanmışlar. Gözenekli aktif karbon, pomelo kabuğundan (PP) yüksek sıcaklıkta karbonizasyon ve KOH aktivasyon işlemi, ardından argon (Ar) atmosferi altında ısıl işlem yoluyla hazırlanmıştır. Hazır hale getirilen numuneye P-AC, argon atmosferi altında 2 saat boyunca 800 °C'de muamele edilince H-AC numunesi olarak ifade edilmiştir. P-C karbonunun aktivasyonundan sonra, BET yüzey alanlarının değeri 5,7'den 2191 m<sup>2</sup>/g'a ve P-AC'nin toplam gözenek hacmi 0,004'ten 1,034 cm<sup>3</sup>/g'a yükselmiştir. H-AC' nin özgül yüzey alanı 2057 m<sup>2</sup>/g olarak kalmıştır. P-C, P-AC ve H-AC'nin SEM fotoğrafları incelendiğinde, P-C numunesinin yüzeyi, yüksek büyütme görüntüdeki birkaç delik dışında pürüzsüze yakın bir yüzey sergilerken, P-AC malzemesi, yüksek sıcaklıkta aktivasyon altında KOH aşındırması nedeniyle pürüzsüz olmayan yüzey karakterleri sergilemiştir. Argon atmosferi altında 800 °C'de 2 saat ısıl işlemden sonra P-AC ve H-AC karbon malzemesinin yapısında önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Döngüsel voltammetri (CV) ölçümleri, farklı tarama hızlarında gerçekleştirilmiştir. Farklı akım yoğunluklarında galvanostatik şarjlı deşarj ölçümleri yapılmış. EIS analizleri, açık devre potansiyelinde ve 2 M KOH sulu elektrolitte 10 mV alternatif akım genliği ile 10 kHz'den 0,1 Hz'e kadar başka bir elektrokimyasal çalışma istasyonu kullanılarak kaydedilmiştir. Simetrik süperkapasitörün elektrokimyasal ölçümleri, oda sıcaklığında iki elektrotlu bir hücrede elektrokimyasal çalışma istasyonu kullanılarak 1M NaNO<sub>3</sub> sulu elektrolit içinde gerçekleştirilmiştir. P-C, P- ve H-AC elektrotları için 0,5 A/g akım yoğunluğunda 89,4

F/g, 376,3 F/g ve 322,1 F/g özgül kapasitans göstermiştir. 10 A/g Akım yoğunluğunda, bu elektrotların kapasitans tutması sırasıyla %32,4, %66,2 ve %66,4 olmuştur. Bu iyi kapasitif davranışlar, oksijenle zenginleştirilmiş yüzeye ve yüksek spesifik yüzey alanına sahip P- ve H-AC karbon malzemelerinin üstün süper kapasitif özelliklere sahip olduğunu doğrulamıştır. PC, P- ve H-AC elektrotlarının iç direnci sırasıyla 0,74, 0,72 ve 0,52 civarında ölçülmüştür. Isıl işleme düşük oksijen içeren karbonun karbon malzemelerin iletkenliğini artırabileceği sonucuna varılmıştır. 1 M NaNO<sub>3</sub> sulu elektrolit içindeki elektrokimyasal kapasitifini araştırmak için elde edilen HAC karbon materyali ile üretilen simetrik süperkapasitör, hücre için farklı tarama hızlarındaki CV eğrilerinden düzgün bir dikdörgensel şekil oluşturmuş bu da ideal kapasitif davranış sergilediğini göstermiştir. Süperkapasitörün çalışma gerilimi 1,7 V'a ulaşabilmiştir. Bu çalışmada simetrik süperkapasitör H-AC (+) / H-AC (-), 0,5 A/g deşarj akım yoğunluğunda 17,1 Wh/kg enerji yoğunluğuna ve 420 W/kg güç yoğunluğuna sahiptir. Güç yoğunluğu, 5 A/g sabit akımda 12,8 Wh/kg enerji yoğunluğunu koruyarak 3854 W/kg'a yükselmiştir. Bütün bu sonuçlardan hareketle pomela kabuğundan türetilen karbon malzemenin elektrot malzemesi için uygulanabilirliğini ve yüksek enerji yoğunluğu ve düşük maliyeti sebebiyle kullanılabilirliği görülmüştür.

Deng ve ark. (2010) tarafından, Mikrodalga (MW) radyasyonu altında farklı aktivasyon maddeleri (KOH ve K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) ile pamuk saplarından hazırlanan aktif karbonlar (AC) incelenmiştir. Radyasyon gücü, radyasyon süresi ve aktivasyon maddesi/öncü oranları gibi bazı parametrelerin AC'lerin adsorpsiyon kapasiteleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tek adımlı MW aktivasyonundan elde edilen sonuçlar, MW radyasyon süresinin ve radyasyon gücünün AC'lerin adsorpsiyon kapasiteleri üzerindeki en önemli faktörler olduğunu göstermiştir. Radyasyon süresi uzadıkça adsorpsiyon miktarındaki artış giderek yavaşlamıştır. Ayrıca, mikrodalga radyasyonuna uzun süre maruz kaldıktan sonra gözeneklerin yok olabileceği de görülmüştür. Aktivasyon maddesi olarak KOH kullanıldığında, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>'ten daha fazla mikro gözenekler üretilmiştir. K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> kullanıldığında ise daha fazla sayıda mezogözenek üretilmiştir. Geleneksel ısıtma ile karşılaştırıldığında, mikrodalga ısıtma işlem süresini kısaltabileceği ve KOH tüketimini azaltabileceği görülmüştür. Böylece, kimyasal aktivasyon hem mikro gözenekliliği hem de mezo gözenekliliği geliştirebileceği sonucu çıkartmıştır.

Abbas ve Ahmed (2016) tarafından yapılan çalışmada, Aktivasyon reaktifi olarak K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ile mikrodalga (MW) ışınlanması altında aktif karbonlar (AC) yapmak için hurma çekirdeği (DS) kullanılmıştır. Bir kuvars reaktöründe MW ışınlanması altında tek aşamalı

AC üretimi için parçacık boyutu 300-600 µm olan 2 g hurma çekirdeği seçilmiştir. Radyasyon süresinin (4–12 dakika), radyasyon gücünün (540–700 W) ve emdirme oranının (0,5–2,5 K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/g kuru DS, 24 saat emdirilmiş) AC'lerin verimleri ve Metilen mavisi (MB) alımları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. 8 dakikalık radyasyon süresinde, 660 W MW gücünde ve 1,5 g/g emdirme oranında ağırlıkça %19,9 AC verimi rapor edilmiştir. BET yüzey alanı, toplam gözenek hacmi ve ortalama gözenek çapı sırasıyla 1144,25 m<sup>2</sup>/g, 0,656 m<sup>3</sup>/g ve 3,004 nm olarak ölçülmüştür. AC'nin SEM görüntüleri incelendiğinde hurma çekirdeği yüzeyinin yoğun, düzlemsel ve daralmış olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, mikrodalga uygulanan numune, düzenli bir gözenek yapısı oluşturan, iyi gelişmiş ve düzgün bir yüzey sergilemiştir.

Foo ve Hameed (2011) tarafından yapılan çalışmada, parçacık boyutu 1-2 mm olan hurma çekirdekleri 700 °C'de bir tüp fırında Azot gazı (N<sub>2</sub>) atmosferi altında kömür haline getirilmiş ve daha sonra KOH çözeltisi ve kömür, oranca 1,75:1 karıştırılmış. Aktivasyon adımı, 600 W MW gücü altında 300 ml/dk N<sub>2</sub> akış hızı ve 8 dakikalık radyasyon süresi ile boru biçimli bir cam reaktörde gerçekleştirilmiştir. AC'lerin BET yüzey alanı, Langmuir yüzey alanı ve toplam gözenek hacmi sırasıyla 856 m<sup>2</sup>/g, 1275 m<sup>2</sup>/g ve 0,4680 m<sup>3</sup>/g olarak ölçülmüştür. SEM görüntüleri mikrodalga ışınlanmış numunenin, düzenli bir gözenek yapısı, iyi gelişmiş ve düzgün bir yüzey göstermiştir.

Zhu ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmada, biyo-ayrışmış bir üründen, hümik asit (HA) nitrojen katkılı hiyerarşik gözenekli karbonlar (NHPC'ler) hazırlamak için nitrojen işlevselleştirme ve gözenek yapısı kontrolünü birleştiren yeni bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada NHPC'ler, homojen üre ve hümik asit (HA) karışımının doğrudan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> aktivasyonu ile elde edilmiştir. Elde edilen numunelerin elektrokimyasal performansı, üç elektrotlu sistem ve iki elektrotlu kapasitör sistemi birleştirilerek değerlendirilmiştir. BET yöntemiyle elde edilen sonuçlardan hareketle, numunelerin gözenek yapısının büyük ölçüde Üre/HA oranına bağlı olduğu bulunmuştur. NHPC'ler %5'lik yüksek bir nitrojen içeriğine sahip olduğu, 3142 m<sup>2</sup>/g özgül yüzey alanı ve 2,6 m<sup>3</sup>/g toplam gözenek hacmi sağladığı görülmüştür. Kimyasal bileşimden ve geliştirilmiş gözenek yapısından yararlanan NHPC elektrotları, yüksek özgül kapasiteye sahip iyonik sıvı elektrolitte 0,05 A/g'da 209 F/g ve 20 A/g'da 148 F/g gibi yüksek bir kapasitif performans sergilemiştir. 44 W k/g güç yoğunluğunda 88 Wh k/g enerji yoğunluğu sağlamıştır. 1000 döngüden sonra kapasitans kaybı %9 olduğundan uzun çevrim ömrü ömrüne sahip olduğu görülmüştür. Yeşil ve düşük maliyetli malzeme ve

basit ve ölçeklenebilir sentez yolu ile üstün performans, NHPC örneğini yüksek enerjili süperkapasitör için umut verici bir aday haline getirmiştir.

Cao ve Yang (2018) tarafından yapılan çalışmada, hidrotermal karbonizasyon ve kendiliğinden-fiziksel aktivasyon yoluyla, yüksek fruktozlu mısır şurubundan aktif karbon üretimi gerçekleştirilmiştir. Sentezlenen AC'ler analiz edilmiş ve EDLC'lerin elektrot malzemesi olarak kullanılmıştır. Aktivasyon süresinin geometrik ve gözenekli özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. EDLC'lerin elektrokimyasal performansı, 6 M KOH sulu çözeltisinde incelenmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde aktif karbonların küresel bir şekle sahip olduğu görülmüş olum AC küre boyutu yaklaşık 0,8 mm olarak ölçülmüştür. Aktif karbonlar 1473 m<sup>2</sup>/g gibi yüksek bir yüzey alanına sahip olduğu görülmüştür. Aktivasyon süresinin artmasıyla hem yüzey alanı hem de mikro gözenek fraksiyonu artmıştır. AC kürelerinden yapılan süperkapasitör hücreler, 0,2 A/g elektrik akımı yoğunluğunda 168 F/g özgül kapasitans ve 1,5 kW/kg güç yoğunluğunda 4,2 W h/kg enerji yoğunluğu ile mükemmel elektrokimyasal performans sergilemiştir. Deneysel sonuçlar, toplam yüzey alanının artmasıyla özgül gravimetrik kapasitansın arttığını göstermektedir; bu, aktif karbonların gözenekli özelliklerinin ve aktif karbonlardan yapılan süperkapasitör hücrelerin elektrokimyasal özelliklerinin kontrolünde aktivasyon süresinin önemini ortaya koymuştur.

Tian ve ark. (2017) tarafından yapılan çalışmada, yenilenebilir karbon kaynağı olarak selüloz araştırılmıştır. Mezogözenekli/mikrogözenekli hibrit yapıya sahip gözenekli karbonlar (MMC), ilave bir aktifleştirici reaktif olmadan bir selüloz aerogelinin karbonlaştırılmasıyla hazırlanmıştır. MMC malzemelerini elde etmek ve selüloz aerojellerin çözünmesi amacıyla sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır. Elde edilen selüloz bazlı MMC malzemeleri 646 m<sup>2</sup>/g özgül yüzey alanına, 0,4403 m<sup>3</sup>/g gözenek hacmine sahip olup, ortalama 1,49 nm büyüklüğündeki mikro gözeneklerden ve 2,25 ~ 3,32 nm aralığındaki mezo gözeneklerden oluşan optimal bir gözenek yapısına sahip olduğu görülmüştür. Mikro gözenekler, daha fazla elektrolit iyonu depolayabilmişken, mezogözenekler, elektrolit iyonunun iç gözeneklere nüfuz etmesini kolaylaştırmak için iyi bir kanal sağladığı görülmüştür. MMC malzemelerine dayanan iki elektrotlu simetrik bir süperkapasitör, 0,2 A/g'da 160 F/g spesifik kapasitans, 0 V ila 1,8 V voltaj aralığında, 180,11 W k/g güç yoğunluğunda 17,81 Wh k/g'lık enerji yoğunluğu gibi yüksek elektrokimyasal performans sergilemiştir. 1 A/g akım yoğunluğunda 1000 döngüden sonra %90 kapasitans tutma özelliği göstermiş bu da iyi bir döngü kararlılığına sahip

olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada, selüloz bazlı gözenekli karbonun süperkapasitörler için ideal bir aday olduğunu göstermiştir.

Zhang ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada, biyokütle kaynağı olarak Sichuan biberi kullanılmıştır. Sichuan biberinin ön karbonizasyon ve ardından 800 °C de Nitrojen atmosferinde KOH aktivasyonu ile hiyerarşik mikro gözenekli karbon (HPC-2) üretilmiştir. Sentezlenen karbon malzemelerin elektrokimyasal özellikleri ilk olarak üç elektrotlu bir sistem kullanılarak 2 M KOH elektrolitinde incelenmiştir. Aktif karbonun özgül yüzey alanı 1823,1 m<sup>2</sup>/g ve gözenek hacmi 0,906 cm<sup>3</sup>/g gibi gelişmiş bir gözenekliliğe sahip olduğu ve iyi kapasitif davranışlar sergilediği görülmüştür. Üç elektrotlu bir sistemde kullanıldığında, HPC-2 1 A/g akım yoğunluğunda yaklaşık 171 F/g olarak en yüksek spesifik kapasitans değerine sahip olduğu görülmüştür. 50 A/g'lık oldukça yüksek bir akım yoğunluğunda 113 F/g kapasitans sağlamıştır ve 40 A/g'lık yüksek bir akım yoğunluğunda 10000'den fazla şarj/deşarj döngüsünden sonra ihmal edilebilir kapasitans düşüşü ile iyi bir döngü kararlılığı sergilemiştir. Bu araştırmanın bir devamı olarak iki elektrotlu simetrik bir HPC-2//HPC-2 süperkapasitör hücresi oluşturulmuştur. 10 A/g'lık yüksek akım yoğunluğunda 30 F/g kapasitans sağlamış, 10000 şarj/deşarj döngüsünden sonra %100'e yakın kapasitans tutma ile kararlı elektrokimyasal davranışa sahip olduğunu göstermiştir. 1250 W k/g güç yoğunluğunda 4,2 Wh k/g ile en yüksek enerji yoğunluğunu vermiştir. HPC-2'nin hem üç hem de iki elektrotlu sistemlerdeki bu tür elektrokimyasal özellikleri, daha önce bildirilen çok sayıda gözenekli biyokütle karbonunkinden üstün veya karşılaştırılabilir, bu nedenle onu yüksek performanslı enerji depolama cihazlarının geliştirilmesi için umut verici bir aday yapmıştır Buna göre, geliştirilen hiyerarşik gözenekli karbon HPC-2'nin pratik uygulamalarda enerji depolama için gelişmiş bir karbon malzemesi olarak kullanılabilirliği öngörülmüştür.

Dong ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmada, biyokütle kaynağı olarak böğürtlen seçilmiş ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeS ile kaplanmıştır. N, S-kodlu hiyerarşik gözenekli hibrit karbon üretilmek amacıyla demir sülfat ve böğürtlen arasındaki hidrotermal reaksiyonu ve ardından karbonizasyonu ile hibrit bir aktif karbon üretimi gerçekleştirilmiştir. Ortaya çıkan karbon kompozitler (FeSN-C), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeS ile dekore edilmiş ve nitrojen ve kükürt ile kodlanmış mikroküreler ve nano-tabakalardan oluşmuştur. FeSN-C elektrodunun 80 A/g akım yoğunluğunda ve 50000 sarj/deşarj döngüsündenden sonra özgül kapasitans kaybının olmadığı görülmüştür. 0,1 A/g akım yoğunluğunda 1320,4 F cm<sup>3</sup> gibi yüksek hacimsel kapasitans değeri elde edilmiştir. 221,9 W h/L'de 100,9 W h k/g gibi yüksek

enerji yoğunluğu elde edilmiştir. Bu kompozitin olağanüstü performansı, hiyerarşik gözenekli mimariye (kısa difüzyon yolu), çok katkılı heteroatomlara (mükemmel iletkenlik ve elektrokimyasal reaktivite) ve az miktarda demir tuzları kalıntısına (hızlı redoks reaksiyonu sağladı) bağlanmıştır. Mükemmel performansı gösteren  $Fe_2O_3/FeS$  ile kaplanmış N, S kodlu hiyerarşik gözenekli karbon hibritleri, enerji depolamadaki potansiyel uygulamalar için kullanılabileceği görülmüştür.

Vinayagam ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada, simetrik süperkapasitörlerin elektrotlarında kullanılmak üzere java eriği meyve kabukları (SCFS) ve Vetiver kökleri (CZR) kullanılarak fiziksel aktivasyon yöntemiyle ilk kez gözenekli aktif karbonlar üretilmiştir. Biyokütleden türetilmiş aktif karbon (BAC) malzemeleri, 700 °C'de  $N_2$  atmosferinde karbonizasyon ardından  $N_2$  atmosferinde 700 °C'de  $CO_2$  aktivasyonu şeklinde elde edilmiştir. Simetrik süperkapasitör, iki elektrotlu konfigürasyonda oluşturulmuş ve iki özdeş elektrot (SCFS-AC//SCFS-AC ve CZR-AC//CZR-AC) kullanılarak üretilmiş ve analiz edilmiştir. Elektrokimyasal teknikler (CV, CD ve EIS), 6 M KOH elektrolitinin sulu çözeltisinde üç elektrotlu bir hücre konfigürasyonu ile ortaya çıkan aktif karbon malzemelerinin kapasitif performanslarını tahmin etmek için gerçekleştirilmiştir. Her iki AC malzemesinin CV profilleri, karbon yüzeyi üzerindeki Faradaik olmayan işlemlere (EDLC davranışı), düşük tarama hızında neredeyse dikdörtgen şekil oluşturmuştur. SCFS-AC// SCFS-AC ve CZR-AC//CZR-AC simetrik süperkapasitör cihazları, sırasıyla 0,2 A/g'da 196 F/g ve 120 F/g özgül kapasitans sağlanmıştır ve 2 A/g'da 48 F/g ve 40 F/g değerlerini korumuştur. SCFS-AC'nin CV profili, CZR-AC'ninkinden daha büyük bir alan sergileyerek, BET sonuçlarıyla ilişkili olarak SCFS-AC'nin daha yüksek özgül kapasitansını göstermiştir. SCFS-AC, 0,5 A/g'da 253 F/g'lık yüksek bir özgül kapasitans gösterirken, CZR-AC, aynı akım yoğunluğunda 294 F/g'lık yüksek bir özgül kapasitans göstermiştir. Bu biyokütleden türetilmiş aktif karbon (BAC) bazlı simetrik süperkapasitörler, 200 W k/g güç yoğunluğunda olağanüstü bir güç yoğunluğuyla maksimum 27,22 W h k/g (SCFS-AC) ve 16,72 W h k/g (CZR-AC) enerji yoğunluğu sağlamıştır. 5000 GCD döngüsünden sonra (SCFS-AC) ilk kapasitansın %96,5'unu ve (CZR-AC) ise %91,8 kapasitans tutma performansını göstermiştir. Bu çalışma, enerji depolama uygulamaları için BAC'deki gözenekliliği kontrol etmek için çevre açısından güvenli ve yenilikçi bir yaklaşım sunmuştur.

Ye ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada, Malva cevizinden süperkapasitör elektrot malzemesinde kullanılmak üzere aktif karbon üretilmiştir. Ön karbonizasyonun nihai karbon örneklerinin süperkapasitörün fizikokimyasal özellikleri ve elektrokimyasal

performansları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Öte yandan, yüksek performanslı süperkapasitörler için elektrot malzemelerinin hazırlanmasında malva cevizinin potansiyel bir biyokütle kaynağı olarak kullanılıp kullanılmayacağı da değerlendirilmiştir. Elektrokimyasal performans, 6 M temel solüsyonda üç elektrotlu bir sistem kullanılarak değerlendirilmiştir. Spesifik olarak, AMHC, hidrotermal ön karbonizasyon ardından kimyasal aktivasyon adımları yoluyla sentezlenmiştir. AMAC, ise birincil tavlama karbonizasyonu ve daha sonra kimyasal aşındırma ile hazırlanmıştır. SEM görüntülerinden AMHC numunesi yarı iki boyutlu dalgalı katmanlı morfoloji buna karşılık, tavllanmış ürün AMAC, gömülü mikron dereceli boşluklar veya gözenekler içeren üç boyutlu düzensiz blok mimarileri göstermiştir. Ayrıca, öz karbonizasyon işleminin bir sonucu olarak, AMHC'nin birim boyutu, AMAC'inkinden gözle görülür şekilde daha küçük olduğu görülmüştür. Gözenekli karbonların spesifik yüzey alanı yaklaşık 1842 m<sup>2</sup>/g ölçülmüştür. 1 A/g akım yoğunluğunda AMAC ve AMHC için 312 ve 279 F/g'lık spesifik kapasitanslar elde edilmiştir. 5 A/g'lık akım yoğunluğunda ise spesifik kapasitansları sırasıyla 276 ve 245 F/g olarak bulunmuştur. 5 A/g'lık akım yoğunluğunda 7500 döngüden sonra AMAC ve AMHC elektrotları için karşılık gelen spesifik kapasitans tutma oranları %94,7 ve %93,2 olarak iyi çevrim ömrünün olduğunu göstermiştir. Simetrik cihaz, 246 W k/g özgül güçte 8,4 W h k/g'lık enerji yoğunluğu sergilemiştir. Sonuçlar, malva cevizinin yüksek performanslı elektrokimyasal kapasitörler için gözenekli karbon tasarımında potansiyel bir öncü olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Gong ve ark. (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, yüksek nitrojen katkılı gözenekli karbon üretimi için sert ipekböceği ilk önce basit karbonizasyon ve aktivasyon adımları ile iyi gelişmiş mikro gözenekli karbon (SSMC) materyalinin sentezi için öncü olarak kullanılmıştır. SSMC'ye ultra yüksek özgül yüzey alanı (2523 m<sup>2</sup>/g), büyük gözenek hacmi (1,37 m<sup>3</sup>/g) ve yüksek heteroatom işlevsellik içeriği (%3,5 N ve %5,1 O) göstermiştir. Nitrojen katkılı mikro yapı, üç ve iki elektrot testlerinde sırasıyla 1 A/g akım yoğunluğunda 304 F/g ve 273 F/g yüksek spesifik kapasitans sergilemiştir. İki simetrik elektrot sistemindeki tek elektrot, 253 F/g'lık özgül kapasitans sağlamıştır. 234 W k/g güç yoğunluğunda 7,9 Wh k/g enerji yoğunluğu sağlamıştır. Bulgular, SSMC'nin yüksek performanslı ticari süperkapasitörler için aktif malzeme olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Ding ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada, aktif karbon hazırlamak için hammadde olarak azotça zengin fasulye küspesi seçilmiştir. Fasulye posasından türetilen

yerinde N katkıli aktif karbon malzemeleri (BPC), farklı CO<sub>2</sub> hacim konsantrasyonlarında tek adımlı aktivasyon ile hazırlanmıştır. BPC'lerin elektrokimyasal özellikleri, 6 M KOH sulu elektrolit ile birleştirilmiş simetrik iki elektrotlu bir süperkapasitörde doğrudan değerlendirilmiştir. Deney sonuçları, CO<sub>2</sub> aktivasyonunun nitrojen katkıli elektrot malzemeleri hazırlamak için uygun olan BPC'lerin morfoloji yapısını, kimyasal bileşimini ve elektrokimyasal performanslarını büyük ölçüde geliştirdiğini doğrulamıştır. CO<sub>2</sub> konsantrasyonunun SSA, gözenek hacmi, gözenek boyutu dağılımı ve nitrojen içeren fonksiyonel gruplar üzerinde önemi görülmüştür. CO<sub>2</sub>'nin aktivasyonda önemli bir rol oynadığını ve BPC'de gözeneklerin açılmasını ve genişlettiğini göstermiştir. BPC için maksimum SSA 558,2 m<sup>2</sup>/g'e kadar ulaşmıştır. CO<sub>2</sub> konsantrasyonunun hacimce %0'dan %50'ye çıkarılmasıyla N içeriği %5,0'dan %10,0'a yükselmiştir. Ek olarak, piridin ve pirol nitrojenin psödokapasitansı arttırdığı piridin, pirol, grafit ve nitröz oksit tespit edilmiş ve analiz edilmiştir. BPC-50'nin maksimum spesifik kapasitansı 0,25 A/g'da 106 F/g'a ulaşmıştır. 6 M KOH elektrolitli simetrik süperkapasitörde 20000 döngüden sonra 10 A/g'da kapasitansının %93'ü korumuştur. BPC-50 için 2,11 kW k/g güç yoğunluğunda 7 Wh k/g enerji yoğunluğu ve 62,2 W k/g güç yoğunluğunda 3,6 Wh k/g enerji yoğunluğu elde edilmiştir. Elde edilen BPC, iyi bir spesifik kapasitans ve yüksek döngüsel kararlılık sergilemiştir. Süperkapasitör elektrotları için alternatif olduğunu göstermiştir.

Wang ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmada, atık bambu sapından mikrodalga ısıtma ve hem katalizör hem de aktivasyon ajanı olarak görev gören KHCO<sub>3</sub> yardımıyla grafen benzeri karbon materyali sentezlenmiştir. Grafen benzeri karbon malzeme, 1887 m<sup>2</sup>/g özgül yüzey alanına sahip gözenekli yapıya sahip, yüksek grafitleşme derecesine sahip grafen benzeri nano tabakalardan oluşmuştur. Üç elektrotlu sistemde 0,5 A/g akım yoğunluğunda, özgül kapasitans 204,0 F/g'ye ulaşmıştır. 10,0 A/g akım yoğunluğunda 10000 döngüden sonra, tek bir elektrotun maksimum özgül kapasitansı, %93,83'lük özgül kapasitans tutma ile 139,0 F/g olmuştur. Coin-tipi simetrik süperkapasitörde 0,5 A/g akım yoğunluğunda maksimum özgül kapasitans 75,9 F/g iken ve 10,0 A/g akım yoğunluğunda 5000 döngüden sonra kapasitans tutma %94,02 olup, yüksek bir kapasitans tutma başarısı göstermiştir. Deneysel sonuçlar, mikrodalga destekli katalitik grafitleştirilmenin basit ve hızlı bir süreç olduğunu ve iyi kalitede grafen benzeri karbon malzemenin hazırlanması için potansiyel olarak mükemmel bir yeşil ve düşük maliyetli metodoloji olarak hizmet edebileceğini göstermiştir.

Fu ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada, sorgum sapı kullanılarak biyokütle kaynaklı aktif karbon üretilmiştir. Ni(OH)<sub>2</sub>, sorgum sapı biyokütle karbonu (SSBC)

üzerinde mikrodalga biriktirme yöntemi ile büyütülmüştür. Ortaya çıkan  $\text{Ni}(\text{OH})_2$ /sorgum sapı biyokütle karbonu, sırasıyla 2 A/g ve 20 A/g akım yoğunluklarında 889,2 F/g ve 490,1 F/g'lık spesifik kapasitanslar sergilemiştir. Ayrıca, 20 A/g'da 30000 şarj/deşarj döngüsünden sonra kapasitansın %95,9'u koruyarak olağanüstü döngü kararlılığı göstermiştir. Biyo-atıkların etkili bir şekilde bertaraf edilmesi ve elektrot malzemelerinin hazırlanması bu çalışmada gerçekleştirilmiştir. Mikrodalga biriktirme, sorgum sapı biyokütle karbonu üzerinde homojen  $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 'nin hızlı büyümesini hazırlamış ve olağanüstü kapasitif performanslar sağlamıştır. Bu çalışma, süperkapasitörler için yüksek performanslı elektrotların rasyonel inşası için iyi bir temel oluşturmuştur.

Xie ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada, çeşitli aktivasyon sıcaklıklarının (750, 800, 850 ve 900 °C) şişirilmiş pirinç bazlı karbonun morfolojisi, özgül yüzey alanı ve grafitleşme derecesi üzerindeki etkisini incelenmiştir. Daha sonra, şişirilmiş pirinç bazlı karbon bir elektrotun elektrokimyasal performansı ölçülmüştür. 1 A/g'da, R-800 numunesinin özgül kapasitansı 117,2 F/g'a ulaşmış ve aynı akım yoğunluğunda %85,3 kapasitans tutma başarısı göstermiştir. Ayrıca, bir hibrit süperkapasitör R-800//R-800, 15,23 Wh k/g'lık olağanüstü bir enerji yoğunluğu, 5739,43 W k/g'lık güç yoğunluğu ve yüksek döngü kararlılığı (5000 şarj/deşarj döngüsünden sonra %94,5) göstermiştir. Bu işlevselleştirilmiş biyokütle karbonu, sürdürülebilir kalkınma ve biyokütle malzemeleri arasında bir köprü oluşturmak için umut verici bir malzeme olarak düşünülmüştür.

Li ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada, çörek otundan elde edilen gözenekli grafen nano tabakalar (PGNS'ler) mikrodalga radyasyonu ile hazırlanmıştır. Aktivatör olarak potasyum hidroksit (KOH) kullanılmıştır. Hazırlanan numunenin karakterizasyonu (spesifik yüzey alanı, gözenek yapısı, kristal yapısı ve kimyasal bileşim gibi) analiz edilmiş ve mikrodalgaların ve geleneksel ısı işleminin numunenin karakteristik yapısı üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Daha sonra yapısal özelliklerinin elektrokimyasal performansı üzerindeki etkisini incelemek için bir EDLC'nin elektrot malzemesi olarak farklı yöntemler kullanılarak hazırlanan iki numune kullanılmıştır. En iyi performansa sahip numuneler, pratik uygulamalarda elektrokimyasal performansı incelemek için daha ileri testler için simetrik kapasitörler halinde birleştirilmiştir. Geleneksel karbonizasyon ile karşılaştırıldığında, mikrodalga radyasyonu ile hazırlanan PGNS-4 numunesi, yalnızca daha geniş bir spesifik yüzey alanına ( $2414,5 \text{ m}^2/\text{g}$ ), uygun çapa sahip mikro gözeneklere, uygun sayıda mezo gözenek ve makro gözeneklere sahip olmakla kalmamış, aynı zamanda daha yüksek bir grafitleşme derecesi göstermiştir.

Mikrodalga radyasyonu, malzemenin yerel karbon kristal yapısının dönüşümünü kolaylaştırmış ve bu da yüksek oranda grafitleşmeye neden olmuştur. Elektrikli çift katmanlı kapasitör (EDLC) elektrot malzemesi olarak PGNS-4, 1,0 A/g'da 369 F/g ve 10,0 A/g'da 320 F/g gibi yüksek bir özgül kapasitans sergilemiştir. 6 M KOH elektrolit çözeltisinde 10 A/g'da 10000 şarj/deşarj döngüsünden sonra %91,3 kapasitans tutma başarısı göstermiştir. 10000 döngüden sonraki GCD eğrisi, iyi bir döngüsel stabiliteye işaret eden simetrik bir üçgen olarak görünmüştür. Ayrıca, monte edilmiş simetrik katı kapasitör, 1 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>'te 25,2 W h k/g'lık bir maksimum enerji yoğunluğuna ulaşmıştır. Bu çalışma, mikrodalga radyasyonunun, yüksek derecede grafitleşme ve nihai ürünün oldukça gözenekli yapısı nedeniyle biyokütle kaynaklı gözenekli grafen karbonlarını sentezlemek için ideal bir teknik olduğunu göstermiştir

Wang ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmada, buğday kabuğundan aktif karbon üretimi gerçekleştirilmiştir. Biyokütle kaynaklı gözenekli karbonda yüksek bir yüzey alanı (SSA) ve gözenek hacmi arasında iyi bir denge, önkarbonizasyon işlemi sırasında bir mezogözenek oluşturuucu madde olarak KCl ve NaCl karışımı erimiş tuz ve bir başka mikro gözenek oluşturuucu madde olarak KOH kullanılarak elde edilmiştir. N<sub>2</sub> atmosferi altında karbonlaştırma ve sonrasında KOH ile aktivasyon genellikle yavaş iyon taşıma kinetiği ile karbon malzemedeki bol miktarda mikro gözenekler oluşturmaları nedeniyle hava atmosferi tercih edilmiştir. Gözenekli karbonun mezo gözenek/mikro gözenek yapısı, önkarbonizasyon sıcaklıklar değiştirilerek ayarlanabilmiştir. SSA ve mezogözenekler arasında iyi bir dengeye sahip gözenekli karbon, üç elektrotlu bir sistemde 1,0 A/g'da 402 F/g'lık bir özgül gravimetrik kapasitans sergilemiştir. İki elektrotlu simetrik bir süperkapasitörde, biyokütleden türetilen gözenekli karbon ayrıca 1,0 A/g'da 346 F/g'lık yüksek özgül gravimetrik kapasitans ve 5,0 A/g'da 30000 döngüden sonra ilk kapasitansın %98,59'unu koruyan iyi bir döngü stabilitesi sağlamıştır. Bu çalışma, gözenek yapılarını ve SSA'yı optimize ederek biyokütleden türetilen gözenekli karbonun elektrokimyasal performansını artırmak için temel değerlere sahip olduğu görülmüştür.

Cao ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmada, mısır sapı çekirdeği (CSC), nanogözenekli aktif karbon hazırlamak için bir öncü olarak kullanılmıştır. Mısır sapının süngerimsi dokusuna dayanarak, aktifleştirici madde olarak KOH kullanarak nispeten yüksek yüzey alanlı ve hiyerarşik gözenekli yapıya sahip karbon malzemeleri elde edilmiştir. Elektrokimyasal özellikler, farklı cihazlarla karakterize edilmiş ve spesifik kapasitans ile gözenek özellikleri arasındaki ilişkiler analiz edilmiştir. Yapısal

karakterizasyonlar, CSC700'ün miro-mezo hiyerarşik gözenek dokusuna sahip olduğunu göstermiştir. Aktif karbonun (AC) en yüksek spesifik yüzey alanı (2495 m<sup>2</sup>/g) elde edilmiştir. CSC700 numunesi, 1,0 Ω gibi nispeten düşük bir iç dirence sahip olduğu görülmüştür. 0,1 A/g akım yoğunluğunda 6 mol/L KOH elektrolitinde Spesifik kapasitans 323 F/g ölçülmüştür. 5 A/g'lık daha yüksek bir akım yoğunluğunda özgül kapasitans 260,2 F/g gibi hala yüksek bir değer göstermiştir. Bu sonuçlar, CSC-700'ün hızlı iyon taşınması için uygun olduğunu göstermiştir. 1,0 A/g akım yoğunluğunda 1000 DGC döngüsünden sonra %97,9'luk kapasitans tutma oranıyla çok iyi döngüsel kararlılığa sahip olduğunu göstermiştir. Süperkapasitörler için bir elektrot malzemesi olarak CSC-700, özellikle yüksek akım yoğunluğunda mükemmel elektrokimyasal performans sergilemiş elektrot malzemesi için umut kaynağı olmuştur.

Fu ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada, kamelya oleifera'nın biyokütle atığından mikrodalga destekli aktivasyon işlemiyle, elektrokimyasal aktif oksijen içeren gruplarla işlevselleştirilmiş hiyerarşik bir karbon üretilmiştir. İlk olarak kamelya oleifera kalıntısı 400 °C'de ön karbonize edilmiştir. Kısmen karbonize olan malzemeye daha sonra KOH ilave edilip ve mikrodalga ile işlenmiştir. KOH kalıntısının hidroklorik asit ile uzaklaştırılmasından sonra, nanotabaka morfolojisine (MAC) sahip karbon materyali elde edilmiştir. Elde edilen mezogözenekli karbon (MAC), psödokapasitif aktivasyon ile nano tabaka morfolojisine, zengin mezogözenekliliğe, geniş yüzey alanına (1726 m<sup>2</sup>/g) ve çok yüksek oksijen fonksiyonelliklerine (ağırlıkça %16,2) sahip olduğu görülmüştür. Daha sonra süperkapasitör elektrotu hazırlanmış ve 2,0 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>'te test edilmiştir. 0,5 A/g'de MAC 367 F/g spesifik kapasitans ve %66 hız performansı göstermiştir. Aynı akım yoğunluğunda DAC-800 ise 298 F/g spesifik kapasitans ve %44 hız performansı göstermiştir. MAC tabanlı simetrik süperkapasitör, 275 F/g yüksek kapasite, 478 W/kg güç yoğunluğunda 9,55 Wh/kg büyük enerji yoğunluğu ve 10000 şarj-deşarj döngüsünden sonra %99 kapasitans tutma ile mükemmel döngü stabilitesi göstermiştir. Elde edilen MAC, elektrokimyasal enerji depolaması için gelecek vaat eden fonksiyonel bir malzeme olduğunu ispatlamıştır.

Liu ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada, aktif karbonlar (AC'ler) üretmek için atık palmye kullanılmıştır. Hiyerarşik gözenekli karbonlar (PC'ler) hazırlamak için tek adımlı bir mikrodalga aktivasyon yöntemi uygulanmıştır. Çeşitli spesifik yüzey alanlarına (14, 642 ve 1344 m<sup>2</sup>/g) sahip AC'ler, atık palmyeden hiyerarşik PC'lere, yani sırasıyla PC<sub>1</sub>, PC<sub>2</sub> ve PC<sub>3</sub>'e dönüştürmek için mikrodalga enerjisini hızlı bir şekilde emmek için ilk kez kullanılmıştır. PC'lerin morfolojik ve yapısal karakterizasyonları

incelenmiştir. Ayrıca, elektrot olarak PC'lere dayalı süperkapasitörlerin elektrokimyasal performansları incelenmiştir. Sonuçlar, PC<sub>1</sub> 'in en geniş spesifik yüzey alanına (1573 m<sup>2</sup>/g) ve en yüksek mikro gözenek hacmine (0,573 cm<sup>3</sup>/g) ve ayrıca uygun mezogözenekliliğe (%29,69) sahip gözenekli bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir. Elde edilen PC<sub>1</sub> süperkapasitörü, bir elektrolit jel (PVA/LiCl) içinde bile, 0,5 A/g'da 226,0 F/g'lık yüksek bir özgül kapasitans sergilemiş ve 10 A/g'da %69,16 olarak kalmıştır, bu da mükemmel hız kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, 1,4 kW k/g güç yoğunluğunda 72,3 Wh k/g'lık yüksek bir enerji yoğunluğu sergilemiştir ve 28,8 kW k/g'lık yüksek bir güç yoğunluğunda 50,0 Wh k/g'lık bir enerji yoğunluğunu korumuş, 2000 döngüden sonra kapasitans tutma %88,6 olmuş ve iyi bir döngü kararlılığı göstermiştir. Ayrıca, bu yaklaşımın gelecekte gelişmiş enerji depolama uygulamaları için yenilenebilir biyokütleden türetilen karbon malzemeleri hazırlamak için yeni bir yol açabileceği öngörülmüştür.

Liang ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmada, kamelya oleifera kabuğunun hızlı ve uygun bir mikrodalga destekli karbonizasyonu ve KOH aktivasyonu yoluyla oksijen açısından zengin gözenekli bir karbon (KMAC) üretilmiştir. Elde edilen KMAC, üç boyutlu gözenekli yapıya, geniş yüzey alanına (1229 m<sup>2</sup>/g) ve zengin oksijen fonksiyonelliklerine (C/O oranı 1,66) sahip olduğu görülmüştür. Süperkapasitör için elektrot malzemesi olarak, gözenekli karbondan (KMAC) türetilen mikrodalga destekli karbonizasyon/aktivasyon yöntemi, 0,5 A/g akım yoğunluğunda 2,0 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (315 F/g-202 F/g) ve 6,0 M KOH (251 F/g-214 F/g) elektrolitlerinde doğrudan karbonizasyon/KOH aktivasyon yönteminden türetilen aktif karbondan (KAC) daha yüksek bir kapasitans elde edilmiştir. 20 A/g akım yoğunluğunda 5000 döngüden sonra, KMAC elektrodu %89'luk bir kapasitans muhafazası ile özgül kapasitansı 220'den 196 F/g'ye düşmüştür ve iyi bir uzun döngü kararlılığı göstermiştir.

Wang ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada, gözenekli karbonun (PC) sentezi için biyokütle kaynağı olarak kâğıt yapımı ve biyoetanol üretiminin bir yan ürünü olan enzimatik hidroliz lignin (EHL) seçilmiş ve doğrudan mikrodalga ısıtma yoluyla üretilmiştir. Ortaya çıkan PC, 2482 m<sup>2</sup>/g'lık yüksek bir spesifik yüzey alanı ve %35,6'lık yüksek mezogözenek içeriği ve %17,1'lik oksijen içeriği ile hiyerarşik bir gözenek dağılımı sergilemiştir. Bu çalışmada üretilen PC elektrotları, 1 A/g'da 338 F/g'lık yüksek bir özgül kapasitans ve 10 A/g'da %86'lık yüksek kapasitans tutma performansı göstermiştir. PC tabanlı süperkapasitör, bir Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> elektrolitinde 0,5 A/g akım

yoğunluğunda 17,1 Wh k/g ve bir KOH elektrolitte 0,5 A/g akım yoğunluğunda 8,6 Wh k/g maksimum enerji yoğunluğu sağlamıştır.

Jin ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışmada, Mısır koçanı biyokütle kaynağı olarak kullanılmış ve biyokömüre dönüştürmek için mikrodalga ve yavaş piroliz uygulanmıştır. Sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit kimyasal maddeleri, aşamalı olarak aktif karbon üretmek için kullanılmıştır. Numunelerin gözenek yapıları ve yüzey alanı, 77K'da nitrojen adsorpsiyonu/desorpsiyonu ile karakterize edilmiştir. Sonuçlar, potasyum hidroksit aktivasyonu ile birleştirilmiş mikrodalga piroliz ile aktif karbonların daha yüksek spesifik yüzey alanlarını elde edildiğini göstermiştir. Bununla birlikte, elektrokimyasal ölçümler, 0,05 mol/g (potasyum hidroksit/biyokömür) ile işlenen yavaş piroliz biyokömürünün en iyi elektrokimyasal özellikleri sergilediğini göstermiştir. Elektrokimyasal ölçümler sonucunda, 0,1 A/g'lık bir akım yoğunluğunda özgül kapasitans 245,9 F/g olarak elde edilmiştir. 1,0 A g'lık yüksek akım yoğunluğunda bile 211,6 F/g'lık bir özgül kapasitansı korumuştur.

Rawal ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmada, Saccharum bengalense (S. bengalense) yapraklarının biyokütlesinden aktif karbon sentezlenmiş ve ZnCl<sub>2</sub> aktivasyon yöntemi kullanılmıştır. Sentezlenen S. bengalense türevli aktif karbon (SbAC), 2090 m<sup>2</sup>/g değerinde iyi bir spesifik yüzey alanı, 0,049 cm<sup>3</sup>/g toplam mezogözenek hacmi, 0,281 cm<sup>3</sup>/g toplam mikro gözenek hacmi ve ortalama gözenek boyutunun 2,05 nm olarak hesaplanmıştır. Elektrokimyasal çalışmalar, SbAC'nin 1,6 V çalışma voltajı için sulu elektrolitte (1 M Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 2 mV/s tarama hızında 102,6 F/g'lık maksimum spesifik kapasitansı sağladığını göstermiştir. SbAC, 1 M Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sulu elektrolitinde 120000 şarj/deşarj döngüsünden sonra iyi bir döngü kararlılığı sergilemiştir. Tüm bu sonuçlar, Saccharum bengalense'nin türetilmiş aktif karbon (SbAC) yapraklarından elde edilen aktif karbonun, enerji depolama teknolojisi için EDLC elektrot malzemesi olarak iyi bir aday olabileceğini ortaya koymuştur.

Tian ve ark. (2015) tarafından yapılan çalışmada, bambu bazlı biyoaktif madde ekstraksiyon kalıntılarının endüstriyel atığından, hidrotermal karbonizasyon, aktivasyon ve vakumlu tavlamanın basit ve ölçeklenebilir birleştirilmiş bir işlemiyle biyo-ilhamlı arı kovani benzeri hiyerarşik nano gözenekli karbon (BHNC) üretilmiştir. Çalışmalar sonucunda BHNC, 1472 m<sup>2</sup>/g'lık spesifik yüzey alanına ve 4,5 S c/m'lık elektronik iletkenliğe sahip olduğu görülmüştür. BHNC numunesi, 0,1 A/g akım yoğunluğunda 301 F/g'lık yüksek spesifik kapasitans sergilemiştir 100 A/g akım yoğunluğunda bile kapasitans değeri 192 F/g olmuştur. 1 A/g'da 20000 döngüden sonra ihmal edilebilir

kapasitans kaybı ve sulu elektrolit sisteminde 26000 W k/g yüksek güç yoğunluğunda 6,1 Wh k/g enerji yoğunluğu elde edilmiştir. Aktif karbon üretiminde kullanılan biyokütle kaynaklı bambu, sergilemiş olduğu elektrokimyasal özellikleri sayesinde, süperkapasitörlerin elektrot malzemeleri için umut vadetmiştir.

Ahmed ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmada, gözenekli aktif karbon (AC), kimyasal aktivasyon yöntemi ve  $ZnCl_2$  aktivasyon maddesi kullanılarak inert atmosfer altında farklı aktivasyon sıcaklık değerlerinde çürük havuçtan elde edilmiştir. Yüzey alanı ve gözenek boyutu analizi ile gözlemlenen sonuçlara dayanarak, aktivasyon sıcaklığının sentezlenen AC üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Hazırlanan AC'nin morfolojisi, termal kararlılığı, titreşim tepkisi ve kristal yapısı gibi diğer malzeme özellikleri, standart malzeme karakterizasyon teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca, sentezlenen AC'nin elektrokimyasal performansı, sulu, organik ve iyonik sıvı bazlı elektrolitte bir elektrot olarak incelenmiştir. AC'nin yüksek spesifik yüzey alanı ( $1253 \text{ m}^2/\text{g}$ ) ve gözenek hacmi ( $0,95 \text{ cm}^3/\text{g}$ ) bulunmuştur. Sentezlenen AC tabanlı elektrotun sulu elektrolitte en yüksek spesifik kapasitans değeri 10 mHz frekansta 135,5 F/g elde edilmiştir. En yüksek enerji yoğunluğu ise 2,2 A/g'da 142,5 kW k/g güç yoğunluğunda 29,1 Wh k/g iyonik sıvı bazlı elektrolit içinde elde edilmiştir. Bu, sentezlenen malzeme süperkapasitör elektrotlarının kullanımı için uygun olduğunu göstermiştir.

Teo ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmada, pirinç kabuğundan (RH) türetilmiş ve farklı sıcaklıklarda aktive edilen yüksek yüzey alanlı AC numuneleri, süperkapasitör elektrot malzemesinde kullanmak için performansını değerlendirmek üzere elektrokimyasal olarak incelenmiştir. Farklı yüzey alanlarına sahip üç AC numunesi, farklı aktivasyon sıcaklıklarında hazırlanmış ve döngüsel voltametri, galvanostatik yük-deşarj ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi kullanılarak elektrokimyasal ölçüm yöntemleri kullanılmıştır. 6 M KOH elektrolitinde, maksimum spesifik kapasitans ( $147 \text{ F/g}$ ) 850 °C aktivasyon sıcaklığında hazırlanan AC850 ( $2696 \text{ m}^2/\text{g}$  yüzey alanı ile) numunesinden elde edilmiştir. AC850 numunesinin enerji yoğunluğu da 5,11 Wh k/g olarak bulunmuştur. Ayrıntılı empedans çalışmaları, AC örneğinin düşük direncini ( $0,23 \Omega$ ) ve süperkapasitör elektrotunun hızlı frekans tepkisini ( $0,11 \text{ s}$ ) ortaya çıkarmıştır. 1 A/g akım yoğunluğunda 10000 şarj-deşarj döngüsünden sonra kapasitansının yaklaşık %85'ini koruduğu görülmüştür. Ek olarak, CDC eğrileri değişmeden kalmış ve 10000 döngüden sonra Columbic verimlilik %90'da tutulmuştur. Elektrokimyasal bulgular, RH'den türetilen AC'nin süperkapasitör elektrotları için potansiyel olarak uygun bir malzeme olduğunu göstermiştir.

Jia ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada, nitrojen katkılı gözenekli karbon, Metasequoia'nın (şafak sekoya konisi, DRC) meyvesinden ön karbonizasyon ve kimyasal aktivasyon adımıyla elde edilmiştir. Elektrotlar olarak gözenekli karbonla kaplanmış akım toplayıcılar, elektrokimyasal kapasitörlerin uygulanması için 6,0 M temel elektrolitte değerlendirilmiştir. Sonuçlar, 700 C aktif sıcaklıkta elde edilen gözenekli karbonun en yüksek spesifik yüzey alanını (1,831 m<sup>2</sup>/g) ve en büyük gözenek hacmini (0,92 cm<sup>3</sup>/g) göstermiştir. Üç elektrot testinde, karbon bazlı elektrot, sırasıyla 0,5 A/g ve 10 A/g akım yoğunluklarında 326 F/g ve 236 F/g'a kadar olağanüstü bir kapasitif performansa sahip olduğunu göstermiş ve iyi bir döngü kararlılığı göstermiştir. İki elektrotlu simetrik cihaz ayrıca 1,0 A/g'lık akım yoğunluğunda 197 F/g'lık bir spesifik kapasitans ve 129 W k/g güç yoğunluğunda 7,6 W h k/g kadar yüksek mükemmel bir enerji yoğunluğu elde edilmiştir. Sonuçlar süperkapasitör için gözenekli karbon numunelerinin imalatında umut verici ve neredeyse sıfır maliyetli bir öncü olarak uygulanabileceğini öne sürülmüştür. Bu çalışma, şafak sekoya konisinin, yüksek kaliteli süperkapasitörler için verimli, gelişmiş gözenekli karbon üretiminde umut verici ve sıfır maliyetli bir öncü olarak kullanılabilmesini öne sürülmüştür.

Chang ve ark. (2015) tarafından yapılan çalışmada hem mikro gözenekleri hem de mezo/makro gözenekleri içeren aktif gözenekli karbonlar, biyokütle kaynağı pavlonya çiçeğinin (PF) yüksek sıcaklıkta karbonizasyon ve ardından alkali aktivasyonu ile hazırlanmıştır. Aktivasyon adımı sırasında KOH'nin PF'den türetilmiş karbona (PFC) kütle oranı 3 olacak şekilde sentezlenen a-PFC3'e dayalı simetrik süperkapasitör, 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> elektrolitte 1 A/g akım yoğunluğunda 297 F/g'lık bir spesifik kapasitans elde edilmiştir. Yüksek özgül kapasitans ve geniş potansiyel aralığı sayesinde süperkapasitör, 247~3781 W k/g güç çıkışları altında 44,5~22,2 Wh k/g yüksek enerji yoğunlukları sağlamıştır. PFC3 süperkapasitörü, iyi hız kapasitesi, üstün döngü kararlılığı ve mükemmel kapasitans tutma yeteneği, enerji depolama uygulamaları için umut kaynağı olmuştur.

Wan ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada, portakal kabuklarından türetilen gözenekli karbonların sentezi için aktivasyon maddesi olarak bazik bakır karbonat kullanılmıştır. Aktivasyon sıcaklığı, karbon malzemelerin heteroatom içeriği ve gözenek yapısı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. OPC-800 numunesi, 912,4 m<sup>2</sup>/g'lık yüksek bir spesifik yüzey alanına, birbirine bağlı mezo/makro gözeneklere sahip hiyerarşik gözenek mimarisine ve zengin miktarda nitrojen, oksijen ve kükürt heteroatomlarına sahip olduğu görülmüştür. Elektrotta kullanılan gözenekli karbon, 1

A/g'da 375,7 F/g'lık yüksek bir spesifik kapasitans ve 1 ile 100 A/g arasında %50,9'luk kapasitans tutma performansı sergilemiştir. Ek olarak, monte edilmiş karbon bazlı simetrik süperkapasitör, 1,0 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> elektrolitte 499,5 W k/g güç yoğunluğunda 31,3 W h k/g yüksek enerji yoğunluğu göstermiştir. OPC-800 tabanlı simetrik süperkapasitör, 0-2,0 V'lik bir gerilim aralığında 50000 döngüden sonra %92,7 kapasitans tutma ile üstün çevrim kararlılığı göstermiştir. Bu çalışma hem yüksek güç hem de enerji yoğunluğuna sahip hiyerarşik gözenekli karbon malzemelerin sentezi için kolay ve uygulanabilir bir yol sağlamıştır.

Hong ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada, mikro gözenekler, mezo gözenekler ve makro gözeneklerden oluşan 3 boyutlu hiyerarşik gözenekli karbon, KHCO<sub>3</sub> aracılığıyla kestane kabuğunun aktivasyonu yoluyla hazırlanmıştır. Optimize edilmiş KHCO<sub>3</sub> miktarı ile, yüksek özgül gözenek yüzey alanı (2298 m<sup>2</sup>/g), yüksek toplam gözenek hacmi (1,51 cm<sup>3</sup>/g) ve 2,62 nm ortalama gözenek çapı elde edilmiş, bu da üç elektrotlu sistemde ultrakapasitörler olarak elektrot için avantajlı elektrokimyasal özellikler sağlamıştır. 2 A/g'da 387 F/g'lık yüksek bir spesifik kapasitansa ulaşılmış ayrıca 50 A/g'da bile 303 F/g'lık spesifik kapasitans elde edilmiştir. En iyi elektrokimyasal performansa sahip PC-3 numunesinin 30 A/g'da 10000 döngüden sonra %98,68 kapasite tutma oranının olduğunu ve bunun iyi bir döngü kararlılığı göstermiştir. Olağanüstü elektrokimyasal performanslar, esas olarak yüksek özgül yüzey alanı (SSA) ve üstün gözenek hacmi ile hiyerarşik gözenekli yapıdan kaynaklanmıştır. Bu, KHCO<sub>3</sub> kullanılarak aktive edilerek hazırlanan bu hiyerarşik gözenekli karbonun, süperkapasitör uygulamalarında kullanılabileceği görülmüştür.

Bu tez çalışmasında süperkapasitörlerin elektrotlarında kullanılmak üzere, meşe mazısı biyokütlesinden karbonizasyon ve baz aktivasyonu yoluyla elde edilen aktif karbon, belli sürelerde ve farklı güç değerlerinde mikrodalga enerjisine maruz bırakılmıştır. Mikrodalga destekli aktif karbondan elektrot olarak kullanılmak üzere farklı süperkapasitör hücreleri geliştirilmiştir. Üretilen süperkapasitör elektrotlarının elektrokimyasal performansları oda sıcaklığında galvanostatik şarj-deşarj, Döngüsel voltametri ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi teknikleri kullanılarak test edilmiştir ve elektrotların kapasitesi ve kararlılığı belirlenerek elde edilen bulgular sonuç kısmında sunulmuştur.

### **3. MATERYAL VE METOT**

#### **3.1. Materyal**

Fagaceae familyasının *Quercus* cinsine ait bir meyve olan *Quercus infectoria* (Mazı meşesi), 12 metreye kadar boy, 80 santimetreye kadar çap yapabilen geniş tepeli bir ağaçtır. Mazı arısı (*Cynips insana* (West.) Mayr)'nın dişisi yumurtalarını mazı meşesi'nin tomurcuklarına bırakmasından belli bir süre sonra yumurtaların etrafında ince zarlı, yağlı maddeler, şeker ve proteince zengin bir beslenme tabakası gomalaklar (gal) oluşur. Beslenme tabakasının dışında da sert bir koruyucu tabaka bulunur. Bu iki tabaka mazıyı oluşturur. Oluşan mazı 1,5 ile 2 santimetre çapında ve yuvarlaktır (Karadağ, 2007). Türkiye'nin güneydoğu bölgesinde bol miktarda yetişen Meşe mazısı, deri ve boyamada nadiren kullanılmasına rağmen ürünlerin çoğu toplanmamakta ve atık olarak doğaya karışmaktadır. Daha önce yaptığımız çalışmada meşe mazısı biyokütlesini karbonizasyon ve farklı asit-baz aktivasyonları kullanarak ilk kez aktif karbona dönüştürülmüş ve süperkapasitörler üretilmişti (Akdemir, 2022). Bu tez çalışması kapsamında KOH-karbonizasyon yoluyla üretilen kapasitörün kapasitans değerini, kararlılığını, empedans değerlerini, enerji ve güç yoğunluğu değerlerini iyileştirmek amacıyla üretilen aktif karbonu çeşitli sürelerde ve farklı güçlerde mikrodalga ısıtmaya maruz bırakılmıştır.

#### **3.2. Metot**

##### **3.2.1 Hammaddenin hazırlanması**

Aktif karbon üretimi için meşe mazısı biyokütlesi kullanılmıştır. Meşe mazısı biyokütlesi (MMB) saf su ile yıkanmış, kurutulmuş daha sonra küçük parçalara bölünmüştür. Üretilen aktif karbonun yüzey alanını daha fazla artırmak için kimyasal ön işlem uygulanmıştır. Kimyasal aktivasyon için potasyum hidroksit (KOH) çözeltisi ile MMB 1:1 oranında karıştırılmıştır. 10 gr. MMB, 10 gr. KOH çözeltisi ve 20 gr. saf su ile karıştırılıp etüvde 80 °C'de 4 gün bekletilmiştir. Etüvden çıkarılan MMB'nin içerisindeki fazla KOH'u uzaklaştırmak için 0,5 HCl ile yıkanmıştır. Daha sonra saf su ile yıkanmış, süzölmüş ve kurutulmuştur. MMB Şekil 3.1'de görülen kül fırınında inert gaz ortamında (N<sub>2</sub>), 850 °C'de 10 °C'lik artışlarla 1 saat süreyle yakılarak aktif karbon üretimi gerçekleştirilmiştir.



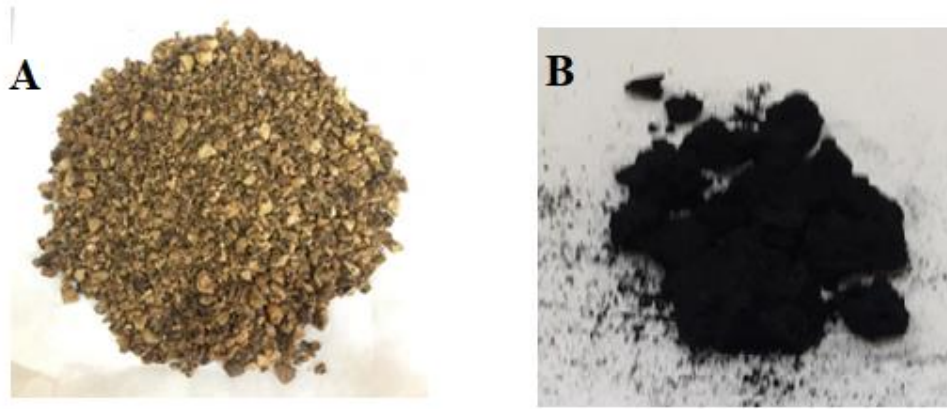
Şekil 3.1. Kül fırını görünümü

Şekil 3.2 de aktif karbonun üretimi sürecinde yapılan işlem akış şemasında gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Aktif karbonun üretim süreci akış şeması gösterimi

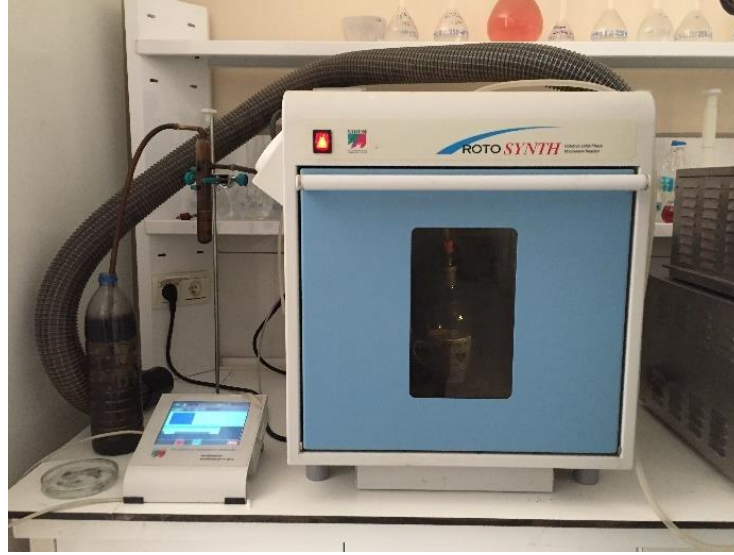
Şekil 3.3.'te küçük parçalara ayrılmış meşe mazısı örneği ve yukarıda belirtilen akış şeması işlemleri sonucunda elde edilmiş aktif karbon görüntüsü yer almaktadır.



**Şekil 3.3.** A) Küçük parçalara bölünmüş meşe mazısı B) MMB den aktivasyon ve karbonizasyon sonucu elde edilmiş aktif karbon

### 3.2.2 Mikrodalga enerjisiyle aktivasyon

KOH aktivasyonu ve karbozinasyon sonucunda Meşe mazısından elde edilen aktif karbonlar (MAQ-0) çeşitli sürelerde ve güçlerde Şekil 3.4’de gösterilen katı faz mikrodalga reaktörde (Roto SYNTH Milestone) mikrodalga enerjisine maruz bırakılmıştır. Katı faz mikrodalga reaktörde sıcaklık ve güç kontrollü şekilde artırılıp azaltılabilmesi ve diğer mikrodalga etüvlerinden daha hassas ve güvenilir sonuçlar vermesi nedeniyle tercih edilmiştir. İlk etapta Tablo 3.1’de görüldüğü üzere 10 dk.’lık sabit sürelerde sırasıyla 500W, 750W ve 1000W güç değerlerinde mikrodalga enerjisine maruz bırakılan numuneler elde edilmiştir. Elde edilen numuneler kullanılarak elektrot malzemeleri hazırlanmış ve üretilen süperkapasitörlerin elektrokimyasal özellikleri incelenmiştir. Böylece mikrodalga enerjisinin numune üzerinde en iyi kapasitans değerinin elde edildiği güç değeri bulunmuştur. Ardından mikrodalga enerjisinin süre etkisinin incelenmesi için en iyi kapasitans değerinin elde edildiği numune 20 dk. boyunca mikrodalga enerjisine maruz bırakılmıştır.



Şekil 3.4. Katı faz mikrodalga reaktör

Tablo 3.1. Elektrot türleri için aktif karbona uygulanan mikrodalga güçleri ve süreleri

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

### 3.2.3 Süperkapasitör elektrotlarının oluşturulması

Mikrodalga aktivasyonu sonucunda meşe mazısından elde edilen aktif karbona iletkenliğini artırmak ve yük geçişini kolaylaştırmak için iletkenliği artırıcı madde eklenmiştir. Elektrot karışımında iletkenliği artırıcı madde olarak nanotüpler kullanılmıştır. Toz haline getirilmiş olan katı gözenekli MAQ'ın birbirine tutunabilmesi ve metal yüzeyine tutunabilmesi için kullanılan yapıştırıcı özelliğe sahip Poliviniliden florür (PVDF) eklenmiştir. PVDF, aktif karbonun gözeneklerini tıkaşından veya homojen olarak dağılmama durumunda yalıtkanlığı artırma ihtimali olduğundan kapasitansı olumsuz etkileyebilmektedir. Bu yüzden bağlayıcı madde, nanotüp ve aktif karbon belli oranlarda ve homojen karıştırılmıştır. Toz halindeki aktif karbon (kütlece %80), nanotüp (kütlece %10) ve PVDF (kütlece %10) bir beher içerisinde karıştırılmıştır. Karışımındaki PVDF'yi çözmek için N-metil-2 piroldon (NMP) kullanılmıştır. Karışım 10

1 dakika ultrasonik banyoda sonikasyon işlemine tabi tutularak iyice çözünmesi sağlanmıştır. Son olarak elektrot karışımında homojen bir dağılım elde etmek için manyetik karıştırıcıda (WN-H320) 80 dakika boyunca karıştırılmıştır. Elektrotların hazırlanma sürecinde kullanılan ultrasonik banyo ve manyetik karıştırıcı ile ilgili görseller şekil 3.5’de verilmiştir.



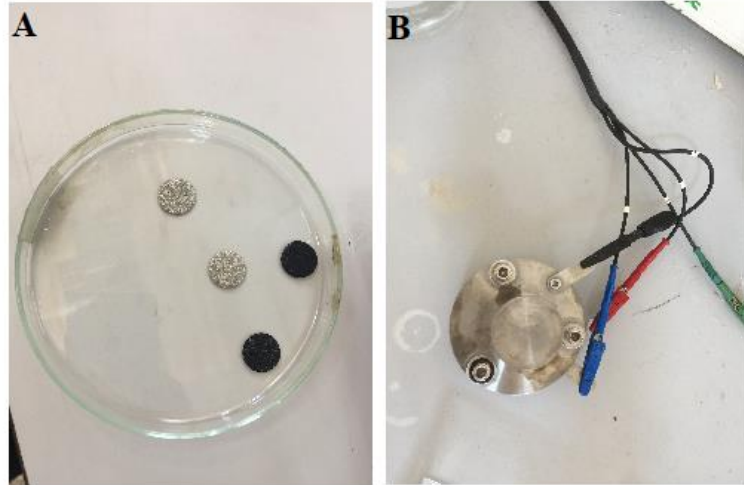
Şekil 3.5. A) Ultrasonik banyo B) Manyetik karıştırıcı (WN-H320)

Bulamaç haline getirilen karışım, akım toplayıcı olarak kullanılan nikel köpük üzerine Şekil 3.6’da görüldüğü gibi püskürtme yöntemiyle önceden temizlenen püskürtme tabancası ile belli aralıklarla homojen olarak püskürtülmüştür. Daha sonra NMP’yi karışımdan çıkartmak için elektrotlar 24 saat boyunca 80°C’de etüvde kurutulmuştur. İki elektrotlu bir hücre konfigürasyonu, Sızdırmaz bir alüminyum test cihazında, 15 mm çapında dairesel şekilli anot ve katottan, 24 mm çapında ince bir ayırıcı kâğıttan ve elektrolit çözeltisi olarak 6 M KOH'den oluşan iki özdeş elektrot ile oluşturulmuştur.



Şekil 3.6. Püskürtme yöntemiyle nikel köpüklerin kaplanma görüntüsü

Süperkapasitörleri elektrot malzemesi yukarıda belirtilen şekilde yapılmış, 24 mm çapında ince bir ayırıcı kâğıt ise piyasada bulunan kapasitörlerin içindeki seperatörden alınmıştır. Daha sonra 15 mm çaplı elektrotlar, elektrolit-elektrot arayüzünde iyon geçişini kolaylaştırmak için elektrolit dolu beherin içerisine konulmuş ve gözeneklerin ıslanması sağlanmıştır. Ayırıcı da çözelti içerisinde aynı şekilde ıslatılmış. Daha sonra ıslanan elektrotlar alüminyum test cihazına yerleştirilip elektrotların arasına da ayırıcı konulmuş ve elektrotlar üst üste gelecek şekilde ve hava almayacak şekilde kapatılmıştır. Bu şekilde EDLC performans testleri için hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. A) 15 mm çapında kesilmiş elektrotlar B) İki elektrotlu süperkapasitör hücresi

#### **3.2.4. Elektrotların performans testleri**

Üretilen süperkapasitör elektrotlarının elektrokimyasal performansları oda sıcaklığında galvanostatik şarj-deşarj (GCD), Döngüsel voltametri (CV) ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) teknikleri kullanılarak test edilmiş ve elde edilen buglular sonucunda elektrotların kapasitesi ve kararlılığı hesaplanmıştır.

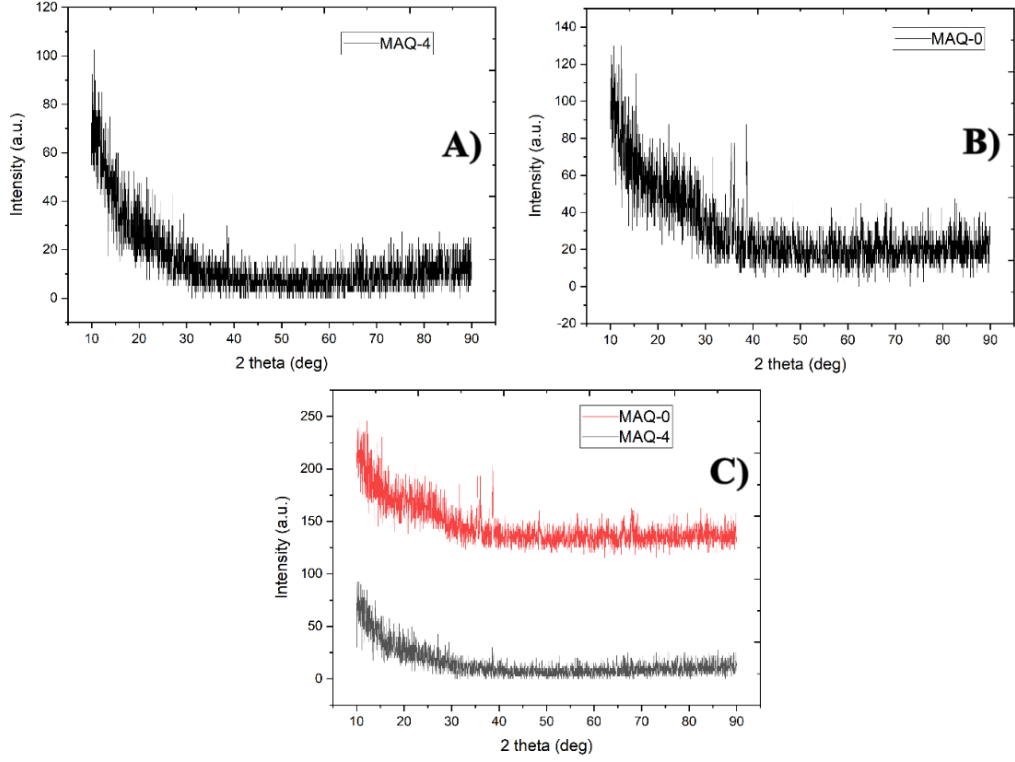


## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Yüzey Karakterizasyonu

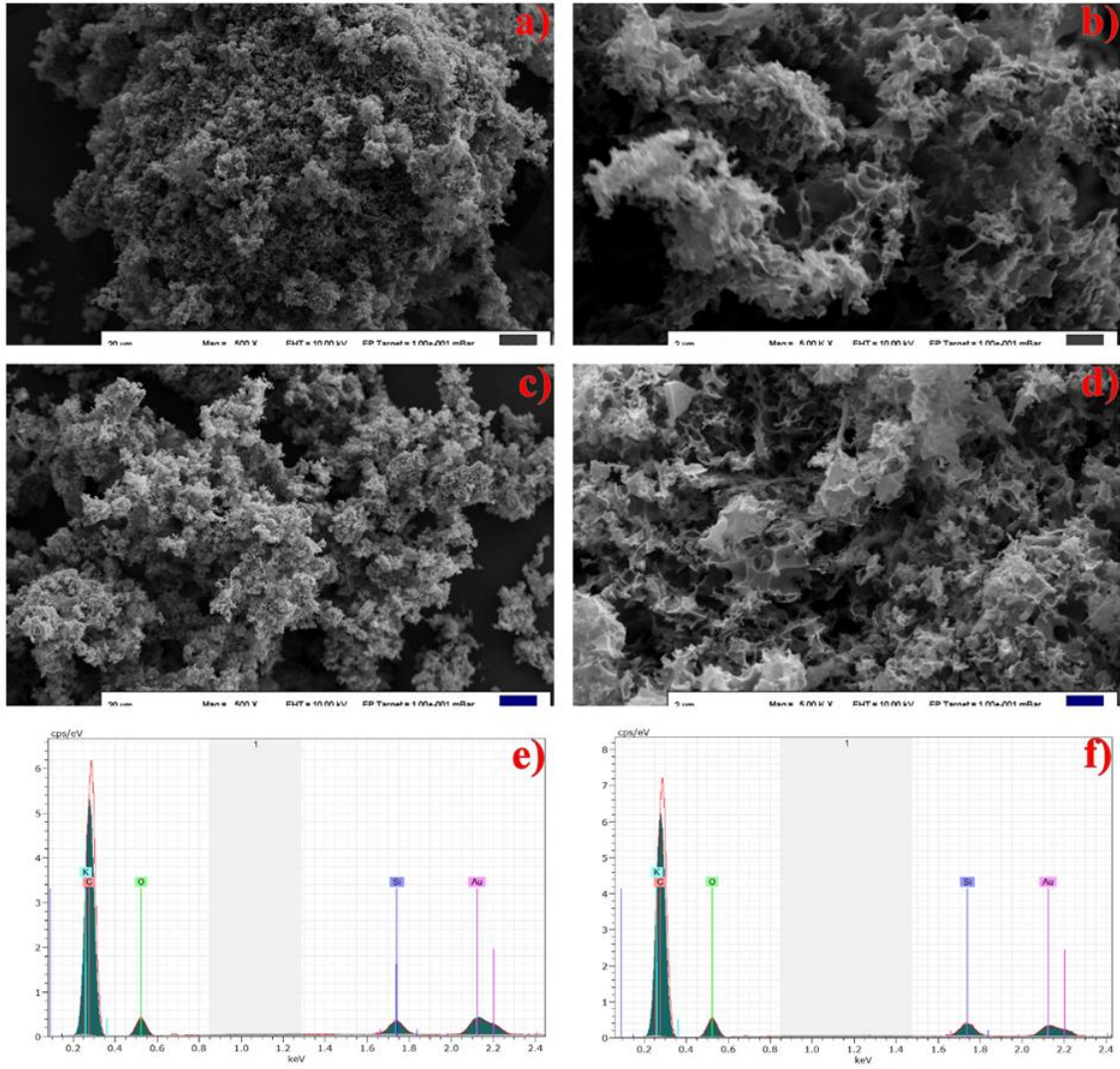
Bu bölümde mazi meşesi biyokütlesinin KOH ile etkileşimi sonucunda üretilen aktif karbonların (MAQ-0) ve bu aktif karbonların belli sürelerde ve farklı güç değerlerinde mikrodalga enerjisine maruz bırakılmasıyla üretilen yeni malzemelerden en iyi spesifik kapasitans değerine sahip MAQ-4 süperkapasitör elektrot malzemesinin kimyasal özellikleri incelenmiştir. Üretilen 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.

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 4.1’de sunulmuştur. Her iki XRD grafiği incelendiğinde yapının değişmediği açıkça görülmektedir. Ancak mikrodalğanın etkisiyle MAQ-0 malzemesinde görülen gürültünün azaldığı gözlemlenmiştir. Böylece mikrodalga etkisi ile amorf yapının daha belirgin bir hale geldiği söylenebilir.



**Şekil 4.1.** 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 Mikroskobu (SEM) metodu kullanılmıştır. Mikrodalga uygulanmış ve uygulanmamış malzemelere ait SEM görüntüleri Şekil 4.2 a-d'de sunulmuştur. Şekillerde 2 µm ve 20 µm 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 (Akdemir, 2022; Tufan ve ark., 2022). Şekil 4.2 e-f'de malzemelerin EDX sonuçları ve Tablo 4.1'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 amorfleştiği söylenebilir.



Şekil 4.2. Mikrodalga uygulanmış ve uygulanmamış malzemelere ait SEM görüntüleri ve EDX sonuçları

Tablo 4.1. 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 yapılmıştır. Tablo 4.2 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 4.2.** 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

## 4.2. Elektrokimyasal Ölçümler

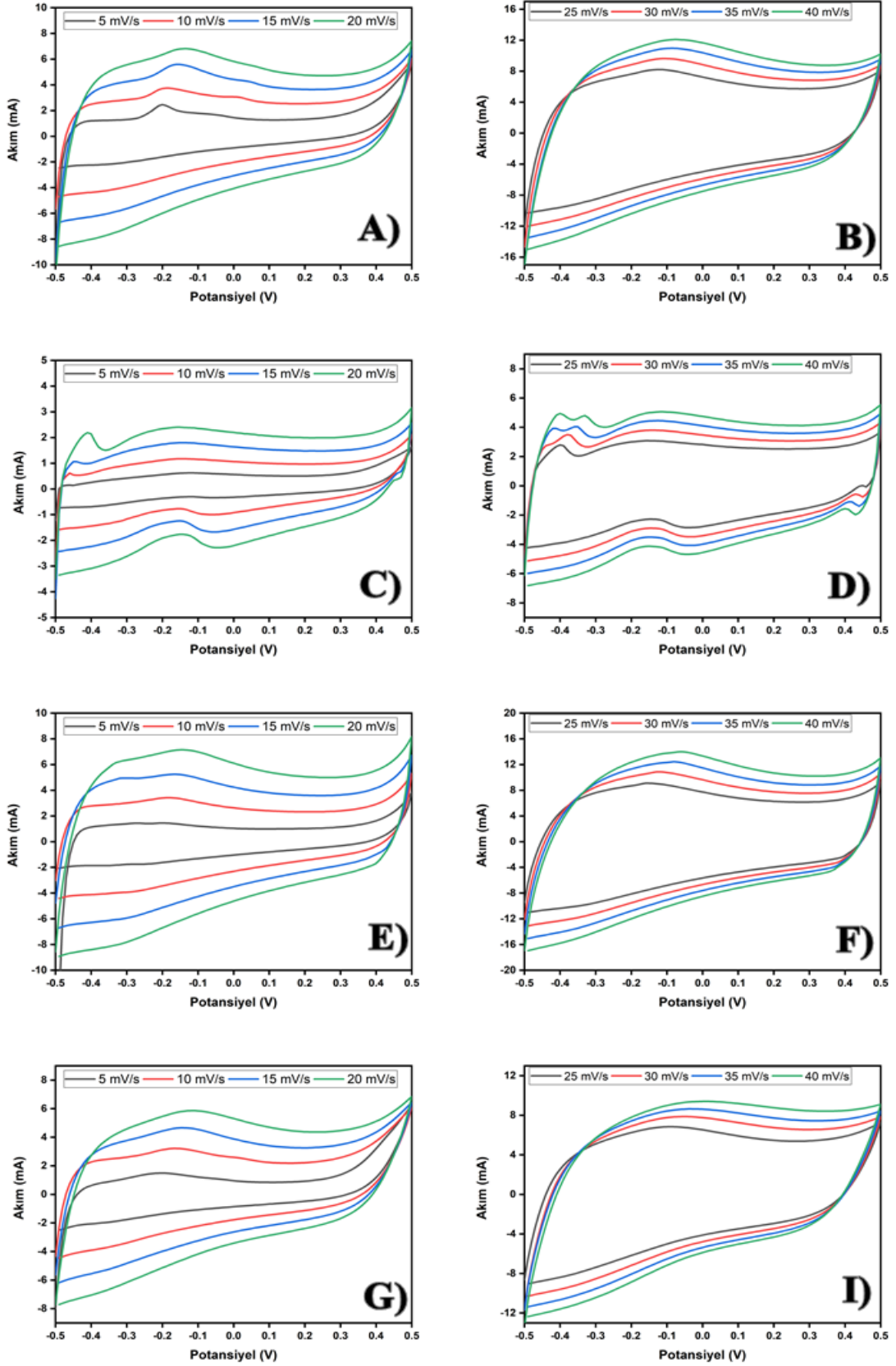
KOH aktivatörü biyokütle materyal ile etkili bir şekilde etkileşime girmiş, bu da materyalin elektrokimyasal performansını etkileyerek güçlü bir aktivasyon etkisine neden olmuştur. Mikrodalga gücünün ve uygulama süresinin hazırlanan aktif karbonlar üzerindeki etkisini incelemek için hazırlanan MAQ-1, MAQ-2, MAQ-3 ve MAQ-4 süperkapasitör hücrelerinin elektrokimyasal sonuçları iki elektrotlu 6 M KOH elektrolit çözeltisi kullanılarak elde edilmiştir. Elektrotlara dönüştürülen malzemelerin elektrokimyasal performansları oda sıcaklığında galvanostatik şarj-deşarj (GCD), Döngüsel voltametri (CV) ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) teknikleriyle belirlenmiş, elde edilen bulgular kullanılarak elektrotların kapasiteleri ve kararlılıkları hesaplanmıştır.

### 4.2.1 Döngüsel voltametri (CV) sonuçları

Şekil 4.3' de gösterildiği üzere (-0,5) - (+0,5) V potansiyel aralıkları arasında 5 mV/s ile 40 mV/s arasında değişen farklı tarama hızlarında MAQ-1, MAQ-2, MAQ-3 ve MAQ-4 elektrotlarının CV eğrileri elde edilmiştir. 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 eğriler dikdörtgen benzeri yapısını koruyarak mükemmel kararlılık sergilediğini göstermektedir (Kim ve ark., 2010; Bora ve ark., 2022). Bu durum, ortamda oluşan iyonların hızlı hareketine izin veren bu malzemenin hiyerarşik yapısına atfedilir (Irfan ve ark., 2021; Wang ve ark., 2021). 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. Uygulanan mikrodalga uygulama süresi ideale daha yakın eğrilerin elde edilmesini sağlamıştır. MAQ-4 süperkapasitörü en geniş kapalı CV eğrisi alanını göstermiştir. Bu dikdörtgensel alanın büyüklüğü daha yüksek spesifik kapasitansın varlığını gösterir. Aynı şekilde MAQ-4 süperkapasitörünün ideal EDLC eğrilerine en yakın CV eğrilerine sahip olduğu görülmüştür. MAQ-4 elektrotunun daha simetrik CV eğrisinin, daha hızlı bir iyon difüzyonunu ve yüksek tarama hızlarında daha iyi difüzyon oranını gösterdiği sonucuna varılabilir (Feng ve ark., 2015). Nitekim GCD eğrileri ve bu eğriler yardımıyla hesaplanan elektrotların kapasitans değerleri de bu iddiaları desteklemektedir.





Şekil 4.3. Farklı tarama hızlarında (A,B) MAQ-1 (C,D) MAQ-2 (E,F) MAQ-3 ve (G,H) MAQ-4'ün CV eğrileri

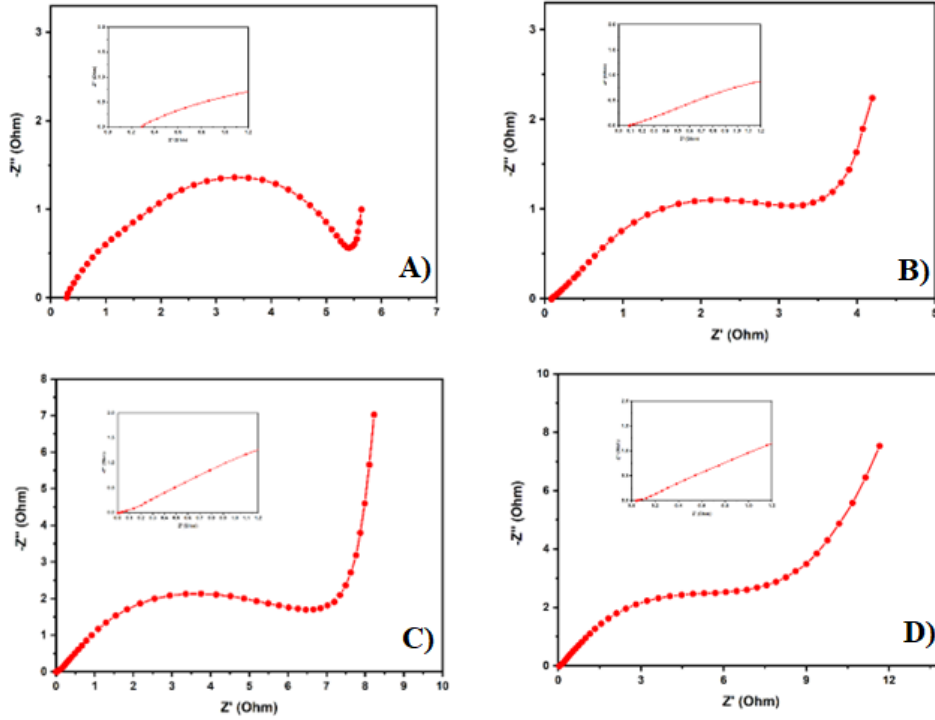
#### 4.2.2 Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) sonuçları

Hazırlanmış MAQ-1, MAQ-2, MAQ-3 ve MAQ-4 süperkapasitör hücrelerinin empedansını, iletkenliğini ve elektrolit ile aktif materyalin iyon etkileşimini incelemek için elektrokimyasal empedans spektroskopisi testi uygulanmış ve elde edilen Nyquist grafikleri Şekil 4.4'de verilmiştir. Ölçümler, oda sıcaklığında 10 mV genlik ve 0 V DC ön gerilim ile 1 Hz. ile 50 kHz frekans aralığında yapılmıştır. Farklı frekans bölgelerinde her bir süperkapasitör kendine has farklı değerler ve davranışlar gösterir. 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  $90^\circ$  olması beklenir. Difüzyon direnci en düşük MAQ-3 ve en yüksek MAQ-1 elektrodudur. Uygulanan mikrodalganın gücü arttıkça eğim artmıştır. Aynı zamanda mikrodalga uygulanma süresinin artışı 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 Yüksek frekans bölgesindeki yarım daire, elektrot/elektrolit arayüzünün yük transfer direncini ve gözeneklerdeki elektrolit direncini ( $R_{ct}$ ) temsil eden elektrot reaksiyon kinetiği ile ilgilidir. Bu direnç elektrolit ile aktif malzeme arasındaki çift katmanlı kapasitansa atfedilir. Yarım daire çapı ne kadar küçük olursa,  $R_{ct}$  değeri o kadar küçük olur ve arayüzdeki yük aktarım hızı o kadar hızlı olur. Daha yüksek eşdeğer seri direnç, daha yavaş iyon transferi ve daha fazla süperkapasitör blokajı, daha yüksek  $R_{ct}$  değerleri ile gösterilir (Cheng ve ark., 2011; Cai ve ark., 2015). Hazırlanan süperkapasitörlere ait  $R_{ct}$  ve  $R_s$  dirençleri tablo 4.3.'te verilmiştir. Nyquist çizimlerindeki küçük yarım daire, şarj transfer işlemlerinin hızlı olduğunu ve bunun nispeten hızlı şarj/deşarjda önemli bir rol oynadığını gösterir. Ayrıca üretilen süperkapasitörlerin  $R_s$  değeri çok düşüktür ve dolayısıyla eşdeğer seri dirençlere bağlı olarak oluşan (IR kaynaklı) gerilim düşümleri de düşük olmuştur. Bu da üretilen süperakapsitörlerin güç aktarımlarını yüksek seviyelerde yapılabileceğini ve enerji depolamada önemli bir avantaj sağladığını göstermektedir (Cheng ve ark., 2011; Yan ve ark., 2014). 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. Mikrodalga uygulanma süresinin artışı  $R_{ct}$  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 4.3.** 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



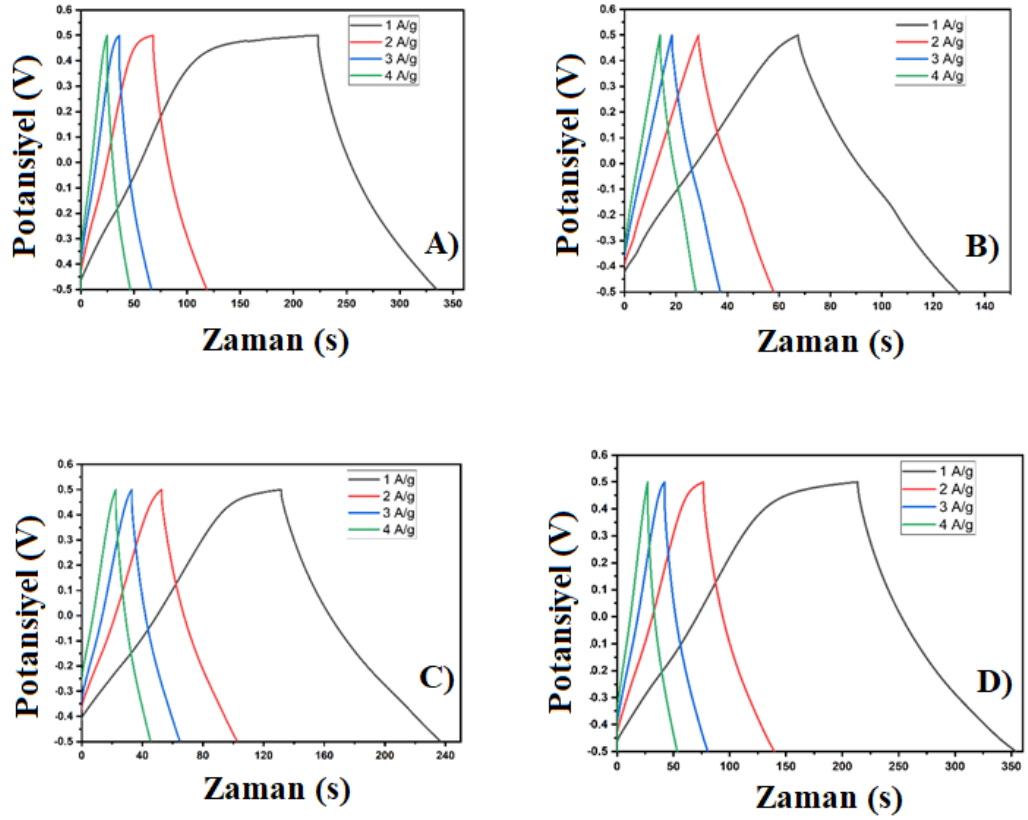
**Şekil 4.4.** (A) MAQ-1, (B) MAQ-2, (C) MAQ-3, (D) MAQ-4 Süperkapasitörlerin empedans eğrileri

#### 4.2.3 Galvanostatik şarj-deşarj (GCD) sonuçları

Farklı akım yoğunluklarında (1 A/g, 2 A/g, 3 A/g ve 4 A/g) MAQ-1, MAQ-2, MAQ-3 ve MAQ-4 süperkapasitörlerine ait galvanostatik şarj-deşarj (GCD) ölçüm sonuçlarında elde edilen eğriler Şekil 4.5'te verilmiştir. Şekiller incelendiğinde süperkapasitörlerin şarj deşarj eğrileri simetrik üçgensel şekiller göstermiş, bu da elektrolit sıvısı ile MAQ elektrotlarının aktif yüzeyleri arasındaki iyon değişiminin hızlı

ve tersinir olduğunu göstermiştir. Eğriler, tipik bir elektriksel çift katmanlı kapasitör özelliği göstermiş ve herhangi bir psödokapasitans katkı gözlenmemiştir (Özarslan ve ark., 2021). Elektrotlar üzerindeki aktif maddenin ağırlığı dikkate alınarak GCD eğrileri yardımıyla özgül kapasitans değerleri hesaplanmıştır. Farklı akım yoğunluklarında hesaplanan spesifik kapasite değerleri, Tablo 4.4.'te verilmiştir.

Buna göre 6 M KOH elektrolit sıvısı içindeki elektrot materyalleri ile oluşturulan EDLC'ler için en yüksek spesifik kapasitans değeri, 1 A/g akım yoğunluğunda 283,9 F/g kapasitans değeri ile 20 dk boyunca 500 W gücünde mikrodalga enerjisine maruz bırakılan MAQ-4 elektrodu için, en düşük spesifik kapasitans değeri ise 116,57 F/g kapasitans değeri ile MAQ-2 elektrodu için elde edilmiştir. Mikrodalga uygulanmamış elektrodun kapasitans değeri 1 A/g akım yoğunluğunda 89 F/g olarak elde edilmişti. MAQ-4 elektrodu 1 A/g'da 283,9 F/g'a ulaşmış, 4 A/g'lık yüksek akım yoğunluğunda bile 219,62 F/g spesifik kapasitans değeri ile yaklaşık %77,3'lük yüksek hız kapasitesi ve olağanüstü çevrim kararlılığı göstermiştir. 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 (Fan ve ark., 2021). 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 (Li ve ark., 2023). Mikrodalga gücü arttıkça farklı akım yoğunluklarındaki kapasitans değerleri arasındaki fark oldukça azaltmıştır. Fakat mikrodalga uygulanan süresinin artışı akım yoğunlukları arasındaki bu farkı arttırmıştır.



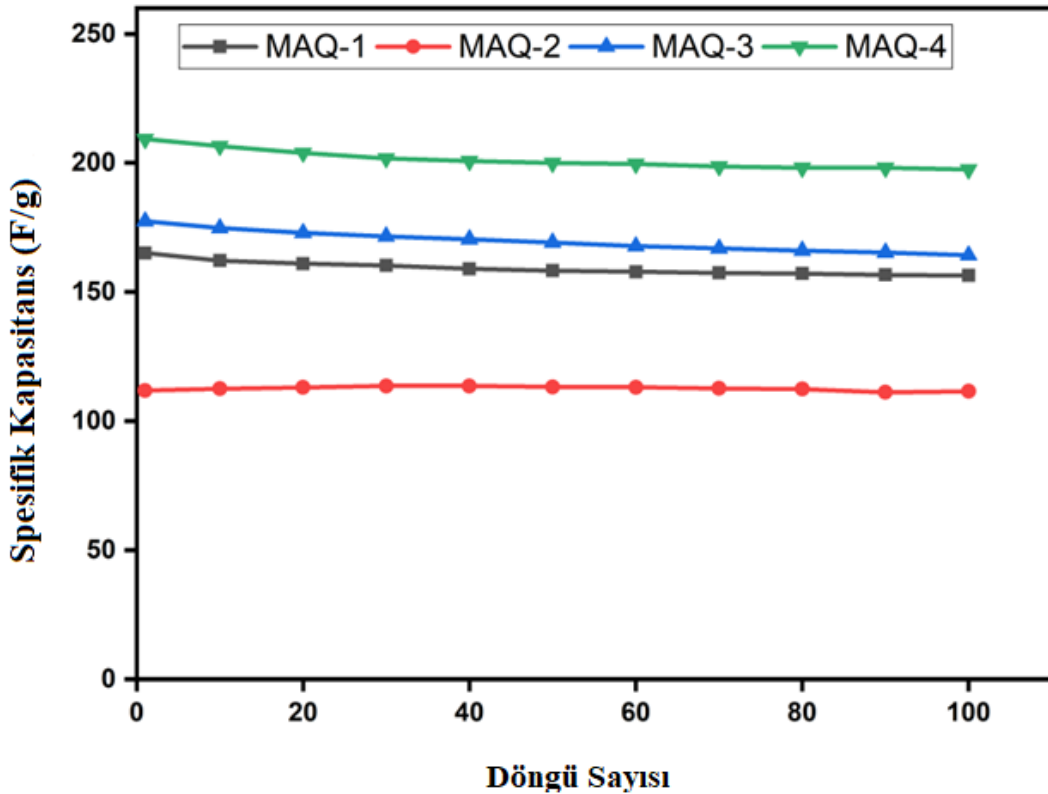
Şekil 4.5. Farklı akım yoğunluklarında (A) MAQ-1, (B) MAQ-2, (C) MAQ-3, (D) MAQ-4 süperkapasitörler için GCD eğrileri

Tablo 4.4. Çeşitli akım yoğunluklarında her bir elektrotun spesifik kapasitans değerleri

Elektrot Materyali	Spesifik Kapasitans (F/g)			
	1 A/g	2 A/g	3 A/g	4 A/g
MAQ-1	89,14	87,40	-	-
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

Süperkapasitörlerin pratik uygulamalar için iyi kapasitans değerlerine sahip olması beklenirken, öte yandan kararlı olmaları da oldukça önem arz etmektedir. Elektrotların kararlılığı 4 A/g akım yoğunluğunda 100 şarj-deşarj döngüsü ile test edilmiş ve döngü sayısına bağlı kapasitans değerleri Şekil 4.6'da verilmiştir. 4 A/g akım

yoğunluğunda 100 DGC döngüsünden sonra MAQ-1, MAQ-2, MAQ-3 ve MAQ-4 elektrotlarının kapasitans tutma oranları sırasıyla, %94,4, %99,7, %92,6 ve %94,4 olarak bulunmuştur, bu mükemmel kapasitans tutma oranları MAQ elektrotlarının çok iyi döngüsel kararlılığa sahip olduğunu göstermiştir. 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 (Wu ve ark., 2021).



Şekil 4.6. 4 A/g akım yoğunluğunda MAQ süperkapasitörlerine ait döngüsel kararlılık performansı

## 5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, süperkapasitör elektrodunda kullanılmak üzere biyokütle kaynaklı Meşe Mazısı kullanılarak, azot gazı ( $N_2$ ) ortamında karbonizasyon ve KOH aktivasyonu yoluyla nano gözenekli aktif karbonlar üretilmiştir. Daha sonra mikrodalga enerjisinin güç ve süre parametrelerinin etkisini incelemek için üretilen aktif karbonlar ilk etapta 10 dakikalık sabit sürelerde sırasıyla 500W, 750W ve 1000W güç değerlerinde mikrodalga enerjisine maruz bırakılarak yeni elektrot aktif materyalleri elde edilmiştir. Bu materyaller kullanılarak yeni elektrotlar hazırlanmış ve üretilen süperkapasitörlerin elektrokimyasal özellikleri incelenmiştir. Böylece mikrodalga enerjisinin numune üzerinde en iyi kapasitans değerinin elde edildiği güç değeri bulunmuştur. Ardından mikrodalga enerjisinin süre etkisinin incelenmesi için en iyi kapasitans değerinin elde edildiği numune 20 dk. boyunca mikrodalga enerjisine maruz bırakılmıştır. Bu şekilde dört farklı süperkapasitör test hücresi hazırlanmıştır.

MAQ-4 süperkapasitörü en geniş kapalı CV eğrisi alanını göstermiştir. Bu dikdörtgenel alanın büyüklüğü daha yüksek spesifik kapasitansın varlığını gösterir. Aynı şekilde MAQ-4 süperkapasitörünün ideal EDLC eğrilerine en yakın CV eğrilerine sahip olduğu görülmüştür. MAQ-4 elektrotunun daha simetrik CV eğrisinin, daha hızlı bir iyon difüzyonunu ve yüksek tarama hızlarında daha iyi difüzyon oranını gösterdiği sonucuna varılabilir. 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. Uygulanan mikrodalga uygulama süresinin artışı ideale daha yakın CV eğrilerin elde edilmesini sağlamıştır.

Uygulanan mikrodalğanın gücü arttıkça Nyquist eğrisinin düşük frekans bölgesindeki eğimi artmıştır. Aynı zamanda mikrodalga uygulanma süresinin artışı eğimi arttırmıştır. Uygulanan mikrodalğanın 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. Mikrodalğanın Uygulanma süresinin artması da  $R_{ct}$  direncini arttırmıştır.

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 değerini arttırmıştır. Mikrodalga gücü arttıkça farklı akım yoğunluklarındaki kapasitans değerleri arasındaki fark oldukça azalmıştır. Fakat mikrodalga'nın uygulanma süresinin artışı bu farkı arttırmıştır.

Uygulanan mikrodalga gücü genel olarak elektrotların kararlılığını arttırmıştır. Kararlılık-mikrodalga gücü arasındaki ilişki konkav parabolik bir eğri şeklinde elde edilmiştir. Uygulanan mikrodalga enerjisinin süresi kararlılık üzerinde kayda değer bir değişiklik sergilememiştir. Elektrotların kararlı performansı, iyonların hızlı taşınmasını kolaylaştıran gözenekli hiyerarşik yapılarından kaynaklanmaktadır.

Sonuç olarak, mikrodalga enerjisinin MAQ numuneleri üzerinde farklı güç değerlerinde ve farklı maruz bırakılma süreleri, her bir elektrot numunesinin farklı elektrokimyasal performanslara sahip olmasına neden olmuştur. Mikrodalga destekli meşe mazısı biyokütlesinden türetilen aktif karbonun iletkenliği, üstün döngüsel kararlılığı, mükemmel kapasitans tutma yeteneği, çevre dostu ve düşük maliyetli olması nedeniyle EDLC elektrot malzemesi olarak kullanımlarının enerji depolama teknolojisi için iyi bir seçenek olabileceğini göstermiştir.

## 6. KAYNAKLAR

- Abbas, A.F., and Ahmed, M.J., 2016. Mesoporous activated carbon from date stones (*Phoenix dactylifera L.*) by one-step microwave assisted  $K_2CO_3$  pyrolysis, *Journal of Water Process Engineering*, 9, 201-207.
- Abdalla, A.N., Nazir, M.S., Tao, H., Cao, S., Ji, R., Jiang, M., Yao, L., 2021. Integration of energy storage system and renewable energy sources based on artificial intelligence: An overview, *Journal of Energy Storage*, 40, 102811.
- Abruña, H.D., Kiya, Y., Henderson, J.C., 2008. Batteries and electrochemical capacitors. *Physics Today*, 61(12), 43-47.
- Ahmed, S., Ahmed, A., Rafat, M., 2018. Supercapacitor performance of activated carbon derived from rotten carrot in aqueous, organic and ionic liquid based electrolytes, *Journal of Saudi Chemical Society*, 22(8), 993-1002.
- Akdemir, M., 2022. Electrochemical performance of *Quercus infectoria* as a supercapacitor carbon electrode material, *International Journal of Energy Research*, 46(6), 7722-7731.
- Alsayegh, O., Alhajraf, S., Albusairi, H., 2010. Grid-connected renewable energy source systems: Challenges and proposed management schemes, *Energy Conversion and Management*, 51(8), 1690-1693.
- Anonymous, 2022. Renewables 2022 Global Status Report, United States of America, 35-38.
- Arico, A.S., Bruce, P., Scrosati, B., Tarascon, J. M., Van Schalkwijk, W., 2005. Nanostructured materials for advanced energy conversion and storage devices, *Nature Materials*, 4(5), 366-377.
- Banaei, M.R., Hosseini, S.H., Khanmohamadi, S., Gharehpetian, G.B., 2006. Verification of a new energy control strategy for dynamic voltage restorer by simulation, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 14(2), 112-125.
- Barrade, P., Pittet, S., Rufer, A., 2000. Series connection of supercapacitors, with an active device for equalizing the voltages, *PCIM2000 Power Conversion and Intelligent Motion*, Nürnberg, Germany.
- Bora, M., Tamuly, J., Benoy, S.M., Hazarika, S., Bhattacharjya, D., Saikia, B.K., 2022. Highly scalable and environment-friendly conversion of low-grade coal to activated carbon for use as electrode material in symmetric supercapacitor, *Fuel*, 329, 125385.
- Burke, A., 2000. Ultracapacitors: why, how, and where is the technology, *Journal of Power Sources*, 91(1), 37-50.
- Cai, J., Niu, H., Li, Z., Du, Y., Cizek, P., Xie, Z., Lin, T., 2015. High-performance supercapacitor electrode materials from cellulose-derived carbon nanofibers, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(27), 14946-14953.

- Cao, W. and Yang, F., 2018. Supercapacitors from high fructose corn syrup-derived activated carbons, *Materials today energy*, 9, 406-415.
- Cao, Y., Wang, K., Wang, X., Gu, Z., Fan, Q., Gibbons, W., Shrestha, M., 2016. Hierarchical porous activated carbon for supercapacitor derived from corn stalk core by potassium hydroxide activation, *Electrochimica Acta*, 212, 839-847.
- Chang, J., Gao, Z., Wang, X., Wu, D., Xu, F., Wang, X., Jiang, K., 2015. Activated porous carbon prepared from paulownia flower for high performance supercapacitor electrodes, *Electrochimica Acta*, 157, 290-298.
- Chen, X., Paul, R., Dai, L., 2017. Carbon-based supercapacitors for efficient energy storage, *National Science Review*, 4(3), 453-489.
- Cheng, Q., Tang, J., Ma, J., Zhang, H., Shinya, N., Qin, L.C., 2011. Graphene and nanostructured MnO<sub>2</sub> composite electrodes for supercapacitors, *Carbon*, 49(9), 2917-2925.
- Conte, M., 2010. Supercapacitors technical requirements for new applications, *Fuel cells*, 10(5), 806-818.
- Deng, H., Li, G., Yang, H., Tang, J., Tang, J., 2010. Preparation of activated carbons from cotton stalk by microwave assisted KOH and K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> activation, *Chemical Engineering Journal*, 163(3), 373-381.
- Ding, Y., Li, Y., Dai, Y., Han, X., Xing, B., Zhu, L., Qiu, K., Wang, S., 2021. A novel approach for preparing in-situ nitrogen doped carbon via pyrolysis of bean pulp for supercapacitors, *Energy*, 216, 119227.
- Dong, X., Jin, H., Wang, R., Zhang, J., Feng, X., Yan, C., Lu, J., 2018. High Volumetric Capacitance, Ultralong Life Supercapacitors Enabled by Waxberry-Derived Hierarchical Porous Carbon Materials, *Advanced Energy Materials*, 8(11), 1702695.
- Du, C. and Pan, N., 2006. Supercapacitors using carbon nanotubes films by electrophoretic deposition, *Journal of Power Sources*, 160(2), 1487-1494.
- Dupont, M.F., Hollenkamp, A.F., Donne, S.W., 2014. Large amplitude electrochemical impedance spectroscopy for characterizing the performance of electrochemical capacitors, *Journal of The Electrochemical Society*, 161(4), A648.
- Endo, M., Muramatsu, H., Hayashi, T., Kim, Y.A., Terrones, M., Dresselhaus, M.S., 2005. 'Buckypaper' from coaxial nanotubes, *Nature*, 433(7025), 476-476.
- Evans, D.A., 1994. Containers with Anodes and Cathodes with Electrolytes. U.S. Patent, 5369547.
- Fan, S., Wei, L., Liu, X., Ma, W., Lou, C., Wang, J., Zhang, Y., 2021. High-density oxygen-enriched graphene hydrogels for symmetric supercapacitors with ultrahigh gravimetric and volumetric performance, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(80), 39969-39982.

- Feng, H., Zheng, M., Dong, H., Xiao, Y., Hu, H., Sun, Z., Liu, Y., 2015. Three-dimensional honeycomb-like hierarchically structured carbon for high-performance supercapacitors derived from high-ash-content sewage sludge, *Journal of Materials Chemistry A*, 3(29), 15225-15234.
- Foo, K.Y. and Hameed, B.H., 2011. Preparation of activated carbon from date stones by microwave induced chemical activation: Application for methylene blue adsorption, *Chemical Engineering Journal*, 170(1), 338-341.
- Frackowiak, E. and Beguin, F., 2001. Carbon materials for the electrochemical storage of energy in capacitors, *Carbon*, 39(6), 937-950.
- Fu, M., Zhu, Z., Zhang, Z., Zhuang, Q., Gao, F., Chen, W., Liu, Q., 2021. Microwave assisted growth of MnO<sub>2</sub> on biomass carbon for advanced supercapacitor electrode materials, *Journal of Materials Science*, 56(11), 6987-6996.
- Fu, M., Zhu, Z., Zhang, Z., Zhuang, Q., Chen, W., Liu, Q., 2019. Microwave deposition synthesis of Ni(OH)<sub>2</sub>/sorghum stalk biomass carbon electrode materials for supercapacitors, *Journal of Alloys and Compounds*, 782, 952-960.
- Futaba, D.N., Hata, K., Yamada, T., Hiraoka, T., Hayamizu, Y., Kakudate, Y., Iijima, S., 2006. Shape-engineerable and highly densely packed single-walled carbon nanotubes and their application as super-capacitor electrodes, *Nature Materials*, 5(12), 987-994.
- Gong, C., Wang, X., Ma, D., Chen, H., Zhang, S., Liao, Z., 2016. Microporous carbon from a biological waste-stiff silkworm for capacitive energy storage, *Electrochimica Acta*, 220, 331-339.
- Guidi, G., Undeland, T.M., Hori, Y., 2008. An interface converter with reduced volt-ampere ratings for battery-supercapacitor mixed systems, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 128(4), 418-423.
- Halper, M.S. and Ellenbogen, J.C., 2006. Supercapacitors: A brief overview, *The MITRE Corporation*, McLean, Virginia, USA, 1.
- He, X., Li, R., Qiu, J., Xie, K., Ling, P., Yu, M., Zheng, M., 2012. Synthesis of mesoporous carbons for supercapacitors from coal tar pitch by coupling microwave-assisted KOH activation with a MgO template, *Carbon*, 50(13), 4911-4921.
- Hong, P., Liu, X., Zhang, X., Peng, S., Wang, Z., Yang, Y., Wang, Y., 2020. Hierarchically porous carbon derived from the activation of waste chestnut shells by potassium bicarbonate (KHCO<sub>3</sub>) for high-performance supercapacitor electrode, *International Journal of Energy Research*, 44(2), 988-999.
- Hu, B., Wang, K., Wu, L., Yu, S.H., Antonietti, M., Titirici, M.M., 2010. Engineering carbon materials from the hydrothermal carbonization process of biomass, *Advanced Materials*, 22(7), 813-828.

- Irfan, M., Liu, X., Mushtaq, S., Ahmed, A., Wang, J., Li, Y., Zhang, P., 2021. Value-added apple-derived carbonaceous aerogel for robust supercapacitor, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(60), 30727-30738.
- Jayalakshmi, M. and Balasubramanian, K., 2008. Simple capacitors to supercapacitors- an overview, *International Journal of Electrochemical Science*, 3(11), 1196-1217.
- Jia, H., Wang, S., Sun, J., Yin, K., Xie, X., Sun, L., 2019. Nitrogen-doped microporous carbon derived from a biomass waste-metasequoia cone for electrochemical capacitors, *Journal of Alloys and Compounds*, 794, 163-170.
- Jian, X., Liu, S., Gao, Y., Tian, W., Jiang, Z., Xiao, X., Yin, L., 2016. Carbon-based electrode materials for supercapacitor: progress, challenges and prospective solutions, *Journal of Electrical Engineering*, 4(2), 75-87.
- Jiang, H., Lee, P.S., Li, C., 2013. 3D carbon based nanostructures for advanced supercapacitors, *Energy & Environmental Science*, 6(1), 41-53.
- Jin, H., Wang, X., Shen, Y., Gu, Z., 2014. A high-performance carbon derived from corn stover via microwave and slow pyrolysis for supercapacitors, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 110, 18-23.
- Karadağ, R., 2007. Doğal Boyamacılık. *Dösım*, Ankara, 1-128.
- Kim, B.K., Sy, S., Yu, A., Zhang, J., 2015. Electrochemical supercapacitors for energy storage and conversion, *Handbook of Clean Energy Systems*, 1-25.
- Kim, W., Kang, M.Y., Joo, J.B., Kim, N.D., Song, I.K., Kim, P., Yi, J., 2010. Preparation of ordered mesoporous carbon nanopipes with controlled nitrogen species for application in electrical double-layer capacitors, *Journal of Power Sources*, 195(7), 2125-2129.
- Kötz, R. and Carlen, M.J. E.A., 2000. Principles and applications of electrochemical capacitors, *Electrochimica acta*, 45(15-16), 2483-2498.
- Kwon, O. J., Jung, Y.S., Kim, J.H., Oh, S.M., 2004. A simple preparation method for spherical carbons and their anodic performance in lithium secondary batteries, *Journal of Power Sources*, 125(2), 221-227.
- Largeot, C., Portet, C., Chmiola, J., Taberna, P.L., Gogotsi, Y., Simon, P., 2008. Relation between the ion size and pore size for an electric double-layer capacitor, *Journal of the American Chemical Society*, 130(9), 2730-2731.
- Lee, J., 2019. Ultracapacitor applications for uninterruptible power supplies (UPS), *Maxwell Technologies*, 1-6.
- Lerner, E. J., 2004. Less is more with aerogels, *Industrial Physicist*, 10(5), 26-27
- Li, L., Wei, X.Y., Shao, C.W., Yin, F., Sun, B.K., Liu, F.J., Zong, Z.M., 2023. Honeycomb-like N/O self-doped hierarchical porous carbons derived from low-rank coal and its derivatives for high-performance supercapacitor, *Fuel*, 331, 125658.

- Li, T., Ma, R., Xu, X., Sun, S., Lin, J., 2021. Microwave-induced preparation of porous graphene nanosheets derived from biomass for supercapacitors, *Microporous and Mesoporous Materials*, 324, 111277.
- Liang, J., Qu, T., Kun, X., Zhang, Y., Chen, S., Cao, Y.C., Guo, X., 2018. Microwave assisted synthesis of camellia oleifera shell-derived porous carbon with rich oxygen functionalities and superior supercapacitor performance, *Applied Surface Science*, 436, 934-940.
- Libich, J., Máca, J., Vondrák, J., Čech, O., Sedlářiková, M., 2018. Supercapacitors: Properties and applications, *Journal of Energy Storage*, 17, 224-227.
- Liu, C., Chen, W., Hong, S., Pan, M., Jiang, M., Wu, Q., Mei, C., 2019. Fast microwave synthesis of hierarchical porous carbons from waste palm boosted by activated carbons for supercapacitors, *Nanomaterials*, 9(3), 405.
- Lu, H. and Zhao, X.S., 2017. Biomass-derived carbon electrode materials for supercapacitors, *Sustainable Energy and Fuels*, 1(6), 1265-1281.
- Lu, P., Xue, D., Yang, H., Liu, Y., 2013. Supercapacitor and nanoscale research towards electrochemical energy storage, *International Journal of Smart and Nano Materials*, 4(1), 2-26.
- Mastragostino, M., Arbizzani, C., Soavi, F., 2002. Conducting polymers as electrode materials in supercapacitors, *Solid State Ionics*, 148(3-4), 493-498.
- Miller, J.R. and Burke, A., 2008. Electrochemical capacitors: challenges and opportunities for real-world applications, *The Electrochemical Society Interface*, 17(1), 53.
- Muzaffar, A., Ahamed, M.B., Deshmukh, K., Thirumalai, J., 2019. A review on recent advances in hybrid supercapacitors: Design, fabrication and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 123-145.
- Namisnyk, A. and Zhu, J., 2003. A survey of electrochemical super-capacitor technology, *In Australian Universities Power Engineering Conference*, University of Canterbury, New Zealand.
- Niu, C., Sichel, E.K., Hoch, R., Moy, D., Tennent, H., 1997. High power electrochemical capacitors based on carbon nanotube electrodes, *Applied Physics Letters*, 70(11), 1480-1482.
- Özarslan, S., Atelge, M. R., Kaya, M., Ünalán, S., 2021. A Novel Tea factory waste metal-free catalyst as promising supercapacitor electrode for hydrogen production and energy storage: A dual functional material, *Fuel*, 305, 121578.
- Simon, P. and Gogotsi, Y., 2013. Capacitive energy storage in nanostructured carbon–electrolyte systems, *Accounts of Chemical Research*, 46(5), 1094-1103.
- Peng, C., Lang, J., Xu, S., Wang, X., 2014. Oxygen-enriched activated carbons from pomelo peel in high energy density supercapacitors, *Rsc Advances*, 4(97), 54662-54667.

- Pfeifer, A., Dobravec, V., Pavlinek, L., Krajačić, G., Duić, N., 2018. Integration of renewable energy and demand response technologies in interconnected energy systems, *Energy*, 161, 447-455.
- Qian, Y., Liu, R., Wang, Q., Xu, J., Chen, D., Shen, G., 2014. Efficient synthesis of hierarchical NiO nanosheets for high-performance flexible all-solid-state supercapacitors, *Journal of Materials Chemistry A*, 2(28), 10917-10922.
- Qu, D. and Shi, H., 1998. Studies of activated carbons used in double-layer capacitors, *Journal of Power Sources*, 74(1), 99-107.
- Rawal, S., Joshi, B., Kumar, Y., 2018. Synthesis and characterization of activated carbon from the biomass of *Saccharum bengalense* for electrochemical supercapacitors, *Journal of Energy Storage*, 20, 418-426.
- Rui, S., Lu, J., Chunxu, P., 2011. A single-step process for preparing supercapacitor electrodes from carbon nanotubes, *Soft Nanoscience Letters*, 2011.
- Simon, P. and Burke, A., 2008. Nanostructured carbons: double-layer capacitance and more, *The Electrochemical Society Interface*, 17(1), 38.
- Simon, P. and Gogotsi, Y., 2008. Materials for electrochemical capacitors, *Nature materials*, 7(11), 845-854.
- Smith, B.D., Wills, R. G.A., Cruden, A.J., 2020. Aqueous Al-ion cells and supercapacitors-A comparison, *Energy Reports*, 6, 166-173.
- Stoller, M.D., Park, S., Zhu, Y., An, J., Ruoff, R.S., 2008. Graphene-based ultracapacitors, *Nano letters*, 8(10), 3498-3502.
- Sun, F., Wu, D., Gao, J., Pei, T., Chen, Y., Wang, K., Zhao, G., 2020. Graphitic porous carbon with multiple structural merits for high-performance organic supercapacitor, *Journal of Power Sources*, 477, 228759.
- Tang, W., Zhang, Y., Zhong, Y., Shen, T., Wang, X., Xia, X., Tu, J., 2017. Natural biomass-derived carbons for electrochemical energy storage, *Materials Research Bulletin*, 88, 234-241.
- Teo, E.Y.L., Muniandy, L., Ng, E.P., Adam, F., Mohamed, A.R., Jose, R., Chong, K.F., 2016. High surface area activated carbon from rice husk as a high performance supercapacitor electrode, *Electrochimica Acta*, 192, 110-119.
- Tian, W., Gao, Q., Tan, Y., Yang, K., Zhu, L., Yang, C., Zhang, H., 2015. Bio-inspired beehive-like hierarchical nanoporous carbon derived from bamboo-based industrial by-product as a high performance supercapacitor electrode material, *Journal of Materials Chemistry A*, 3(10), 5656-5664.
- Tian, X., Zhu, S., Peng, J., Zuo, Y., Wang, G., Guo, X., Ma, L., 2017. Synthesis of micro- and meso-porous carbon derived from cellulose as an electrode material for supercapacitors, *Electrochimica Acta*, 241, 170-178.

- Tufan, A., Hansu, T.A., Akdemir, M., 2022. Production of a novel supercapacitor electrode material from Rheum ribes and its application, *Bulletin of Materials Science*, 45(3), 141.
- Vangari, M., Pryor, T., Jiang, L., 2013. Supercapacitors: Review of Materials, *Journal Of Energy Engineering*, 2, 72-79.
- Vinayagam, M., Babu, R.S., Sivasamy, A., Barros, A.L.F., 2020. Biomass-derived porous activated carbon from Syzygium cumini fruit shells and Chrysopogon zizanioides roots for high-energy density symmetric supercapacitors, *Biomass and Bioenergy*, 143, 105838.
- Viswanathan, B., 2017. Supercapacitors, *In Energy Sources, Elsevier*, 315-328.
- Zhang, W., Qu, Y.H., Gao, L.J., 2012. Performance of PbO<sub>2</sub>/activated carbon hybrid supercapacitor with carbon foam substrate, *Chinese Chemical Letters*, 23(5), 623-626.
- Wan, L., Chen, D., Liu, J., Zhang, Y., Chen, J., Du, C., Xie, M., 2020. Facile preparation of porous carbons derived from orange peel via basic copper carbonate activation for supercapacitors, *Journal of Alloys and Compounds*, 823, 153747.
- Wang, H., Wang, M., Wang, J., 2021. Nickel silicate hydroxide on hierarchically porous carbon derived from rice husks as high-performance electrode material for supercapacitors, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(71), 35351-35364.
- Wang, S., Lai, X., Cheng, S., 2013. An analysis of prospects for application of large-scale energy storage technology in power systems, *Dianli Xitong Zidonghua (Automation of Electric Power Systems)*, 37(1).
- Wang, X., Liu, Y., Chen, M., Luo, M., Yang, P., Chen, W., Zhou, X., 2019. Direct microwave conversion from lignin to micro/meso/macroporous carbon for high-performance symmetric supercapacitors, *European Chemical Societies Publishing*, 6(18), 4789-4800.
- Wang, Y., Chen, Y., Zhao, H., Li, L., Ju, D., Wang, C., An, B., 2022. Biomass-Derived Porous Carbon with a Good Balance between High Specific Surface Area and Mesopore Volume for Supercapacitors, *Nanomaterials*, 12(21), 3804.
- Wang, Y., Ding, Y., Guo, X., Yu, G., 2019. Conductive polymers for stretchable supercapacitors, *Nano Research*, 12(9), 1978-1987.
- Wang, Y., Wang, H., Chen, Y., Srinivasakannan, C., Tang, R., Duan, X., 2022. Microwave-assisted preparation of novel graphene-like carbon material from waste bamboo for high-performance supercapacitors, *Journal of Porous Materials*, 1-10.
- Wu, Y., Cao, J.P., Yang, Z.H., Wei, Y.L., Zhuang, Q.Q., Zhao, X.Y., Bai, H.C., 2021. Green and facile synthesis of porous carbon spheres from waste solution for high performance all-solid-state symmetric supercapacitors, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(64), 32373-32384.

- Xie, X., Zhang, B., Wang, Q., Zhao, X., Wu, D., Wu, H., Du, W., 2021. Efficient microwave absorber and supercapacitors derived from puffed-rice-based biomass carbon: Effects of activating temperature, *Journal of Colloid and Interface Science*, 594, 290-303.
- Xuan, H., Lin, G., Wang, F., Liu, J., Dong, X., Xi, F., 2017. Preparation of biomass-activated porous carbons derived from torreyia grandis shell for high-performance supercapacitor, *Journal of Solid State Electrochemistry*, 21(8), 2241-2249.
- Yan, X., Yu, Y., Yang, X., 2014. Effects of electrolytes on the capacitive behavior of nitrogen/phosphorus co-doped nonporous carbon nanofibers: an insight into the role of phosphorus groups, *RSC Advances*, 4(48), 24986-24990.
- Ye, R., Cai, J., Pan, Y., Qiao, X., Sun, W., 2020. Microporous carbon from malva nut for supercapacitors: effects of primary carbonizations on structures and performances, *Diamond and Related Materials*, 105, 107816.
- Yoshida, A., 1986. Electric Double layer Capacitor and Method for Producing the Same, US Patent Number 4, 597, 028.
- Yu, A., Chabot, V., Zhang, J., 2013. Electrochemical supercapacitors for energy storage and delivery: fundamentals and applications, *Taylor and Francis*, 383.
- Yu, G., Xie, X., Pan, L., Bao, Z., Cui, Y., 2013. Hybrid nanostructured materials for high-performance electrochemical capacitors, *Nano Energy*, 2(2), 213-234.
- Zhai, Y., Dou, Y., Zhao, D., Fulvio, P. F., Mayes, R. T., Dai, S., 2011. Carbon materials for chemical capacitive energy storage, *Advanced Materials*, 23(42), 4828-4850.
- Zhang, G. and Lou, X.W., 2013. General solution growth of mesoporous NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanosheets on various conductive substrates as high-performance electrodes for supercapacitors, *Advanced Materials*, 25(7), 976-979.
- Zhang, H., Xiao, W., Zhou, W., Chen, S., Zhang, Y., 2019. Hierarchical porous carbon derived from Sichuan pepper for high-performance symmetric supercapacitor with decent rate capability and cycling stability, *Nanomaterials*, 9(4), 553.
- Zhang, L. L. and Zhao, X.S., 2009. Carbon-based materials as supercapacitor electrodes, *Chemical Society Reviews*, 38(9), 2520-2531.
- Zhang, S. and Pan, N., 2015. Supercapacitors performance evaluation, *Advanced Energy Materials*, 5(6), 1401401.
- Zhao, X., Sánchez, B.M., Dobson, P.J., Grant, P.S., 2011. The role of nanomaterials in redox-based supercapacitors for next generation energy storage devices, *Nanoscale*, 3(3), 839-855.
- Zhu, Y., Chen, M., Zhao, W., Wang, C., 2018. A biomass-derived nitrogen-doped porous carbon for high-energy supercapacitor, *Carbon*, 140, 404-412.

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** Musa ALTINIŞIK

### EĞİTİM

<b>Derece</b>	<b>Adı, İlçe, İl</b>	<b>Bitirme Yılı</b>
Lise	: Çınar Anadolu Lisesi, DİYARBAKIR	<b>2013</b>
Üniversite	: Gazi Üniversitesi, ANKARA	<b>2017</b>

### İŞ DENEYİMLERİ

<b>Yıl</b>	<b>Kurum</b>	<b>Görevi</b>
2022-	TEİAŞ	Mühendis

### UZMANLIK ALANI

### YABANCI DİLLER

İngilizce

### BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

### YAYINLAR