

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Kayıslı Çekirdeği Kabuğundan Süper Kapasitörler için Heteroatom Doplanmış
Nanogözenekli Aktif Karbon Hazırlanması ve Fizikokimyasal Özelliklerinin
Araştırılması**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mihrihan GÜLER

Kimya Anabilim Dalı

Haziran 2025

T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Kayısı Çekirdeği Kabuğundan Süper Kapasitörler için Heteroatom Doplanmış
Nanogözenekli Aktif Karbon Hazırlanması ve Fizikokimyasal Özelliklerinin
Araştırılması**

Tezi Hazırlayan: Mihrihan GÜLER
Yüksek Lisans Tezi

Mihrihan GÜLER
(36223613005)

Kimya Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet GÜLTEK

Haziran 2025

İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

**Kayıı Çekirdeği Kabuğundan Süper Kapasitörler için Heteroatom Doplanmış
Nanogözenekli Aktif Karbon Hazırlanması ve Fizikokimyasal Özelliklerinin
Araştırılması**

Tezi Hazırlayan: Mihrihan GÜLER
Yüksek Lisans Tezi

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedi beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet GÜLTEK'e,

Değerli yönlendirmeleri, akademik desteği ve teşvik edici yaklaşımı için Prof. Dr. Serdar ALTIN'a, ve Ebru ELEK'e

Annem, babam, kardeşlerim ve abime kadar bütün ailem ve özellikle halalarım, her biri bu süreçte varlıklarıyla bana güç verdiler; hepsine içten teşekkür ederim. Bu süreçte manevi desteğini her zaman yanımda hissettiren, sevgisiyle içimi ısıtan, canım Satı halama şükranlarımı sunuyorum. Varlığıyla bana güç verdiği, yolumu aydınlattığı ve her zaman sevgiyle yanımda olduğu için ona gönülden teşekkür ederim. Ayrıca, kuzenlerimden sevgili Çiğdem'e; başarılı kariyeriyle bana örnek olduğu, fikirleriyle yol gösterdiği ve her koşulda yanımda olduğu için minnettarım. Doğa'ya; üniversite hazırlık sürecinde olduğundan kendi ihtiyacı olan moral ve motivasyonu bana verdiği ve pozitif enerjisi, içtenliği için teşekkür ediyorum. Buket'e ise; neşesi ve bana her zaman ilham veren içten varlığı için gönülden teşekkür ederim.

Değerli arkadaşlarım Elif Er, Elif Alırcan ve Sümeyye Göl'e; iyi günde kötü günde yanımda oldukları, bir arkadaştan öte kardeş oldukları ve verdikleri manevi destekle moralimi yüksek tuttıkları ve bu zorlu süreçte bana güç verdikleri için içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Tezin uygulama aşamasında FYL-2024-3562 nolu proje ile vermiş oldukları maddi ve manevi destekten dolayı, İnönü Üniversitesi BAP birimine teşekkür ederim.

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Kayısı Çekirdeği Kabuğundan Süper Kapasitörler için Heteroatom Doplanmış Nanogözenekli Aktif Karbon Hazırlanması ve Fizikokimyasal Özelliklerinin Araştırılması” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Mihrihan GÜLER



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	ix
ÖZET.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER	5
2.1. Enerji Depolama Sistemleri	5
2.1.1. Elektrokimyasal enerji depolama sistemleri.....	7
2.2. Süperkapasitörlerin Kullanım Alanları	14
2.3. Elektrot Malzemeleri	15
2.3.1. İletken polimerler	17
2.3.2. Metal oksitler/hidroksitler	18
2.3.1. Elektrot Yapımında Kullanılan Karbon Malzemeler	19
2.4. Elektrolit Malzemeler	25
2.5. Elektrot Performansını Etkileyen Faktörler	26
2.5.1. Karbon Gözenekliliği	27
2.5.2. Yüzey fonksiyonel grupları	28
2.5.3. Hidrofobik Yüzey modifikasyonu	32
2.5.3. Metal oksitler.....	33
2.5.4. İletken polimerler	34
2.5.5. Heteroatom dopingi	35
2.6. Önceki Çalışmalar	37
3. MATERYAL VE YÖNTEM	41
3.1. Materyal.....	41
3.2. Yöntem	41
3.2.1. Nanagözenekli aktif karbonun hazırlanması	42
3.2.2. Nanagözenekli Aktif Karbon Karakterizasyonu	44
3.2.3. Fosforik asit katkılama	51
3.2.4. Elektrot hazırlama	52
3.2.5. Süperkapasitör paketleme.....	53
3.2.6. Elektrokimyasal Performans Testleri	54

4. DENEYSEL BULGULAR.....	59
4.1. Nanagözenekli Aktif Karbon Karakterizasyonu Bulguları.....	59
4.1.1. X-ışınları analizi (XRD) Bulguları	59
4.1.2. Taramalı elektron mikroskobu analizi (SEM) Bulguları	60
4.1.3. Enerji Dağılımlı X-ışını (EDX) Analizi Bulguları	62
4.1.4. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) analizi Bulguları....	64
4.1.8. İyot sayısı analizi bulguları	68
4.1.9. X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) bulguları	68
4.1.10. Elementel analiz	69
4.2. Elektrokimyasal Performans Testleri	70
4.2.1. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS)	70
4.2.2. Döngüsel voltametri (CV) analizi	71
4.2.3. Kapasitans- tarama hızı	73
4.2.4. Galvanostatik (akım kontrollü) ölçüm sonuçları	75
4.2.5. Akım yoğunluğu kapasitans grafikleri	78
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	82
KAYNAKLAR.....	83
ÖZGEÇMİŞ	94

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1: Tez kapsamında çalışılan örneklerin kodları ve tanımları.....	54
Çizelge 4.1: MG-HP-01, MG-HP-04, MG-HP-07 ve MG-HP-08 kodlu örneklerin SEM-EDX sonuçları.....	64
Çizelge 4.2: MG-HP-01, MG-HP-04, MG-HP-07 ve MG-HP-08 kodlu örneklerin BET analiz sonuçları ve İyot testi analiz sonuçları.....	68



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil.1.1: Kapasitör ve süper kapasitörün şematik gösterimi.....	2
Şekil.2.1: Enerji Depolama Sistemlerini Sınıflandırılması.....	7
Şekil.2.2: Ragone Grafiği.....	8
Şekil.2.3. Süperkapasitörlerin Sınıflandırılması.....	11
Şekil.2.4: Süperkapasitör tiplerinin enerji depolama mekanizması.....	11
Şekil.2.5: Süperkapasitör elektrot malzemelerinin yıllara göre gelişimi.....	16
Şekil.2.6: Elektrot malzemelerinin sınıflandırılması.....	16
Şekil 2.7: İletken polimerlerin kullanım alanları.....	17
Şekil 2.8: Çeşitli metal kompozit bazlı elektrot malzemelerin şematik görünümü.....	19
Şekil 2.9: Çeşitli karbon bazlı malzemelerin yapısı.....	20
Şekil 2.10: 0D, 1D, 2D ve 3D karbon nanoyapılara örnekler.....	26
Şekil 2.11: (a) Gözenekli karbon malzemeler, (b) Karbon gözenekliliği	27
Şekil 2.12: Süperkapasitörlerde karbon yüzeyindeki oksijen fonksiyonel gruplarının kapasitif mekanizması.....	29
Şekil 2.13: Oksijen içeren fonksiyonel grupların karbon malzemeler üzerindeki etki faktörlerinin şematik diyagramı.....	30
Şekil 2.14: İletken polimer bazlı süperkapasitörler.....	34
Şekil 2.15: (a) Fosforik asit ile doplanan polibenzimidazol membran, (b) Fosforik asit yapısı.....	35
Şekil 3.1: Süper kapasitörlerin hazırlanmasının temel aşamaları.....	40
Şekil 3.2: Aktif karbon üretim sisteminin şematik görünümü.....	41
Şekil 3.3: Bragg-brentano tipi difraktometre	43
Şekil 3.4: (a) Elektron ışınının numune ile etkileşimi ve numuneden yayılan sinyal, (b) Tüm SEM bilşenleri.....	44
Şekil 3.5: XPS Cihazının bileşenlerinin şematik diyagramı	48
Şekil 3.6: Fosforik asit doplama prosesi.....	49
Şekil 3.7: a) agat havanda karıştırılan aktif karbon ve karbon siyahı b) NMP içinde çözünmekte olan pvdf c) NMP içerisinde de çözülmüş pvdf üzerine eklenen aktif karbon ve karbon siyahı d) vakumlu etüv.....	50
Şekil 3.8: Süperkapasitör bileşenleri.....	51
Şekil 4.1: (a) MG-HP-01, MG-HP-02, MG-HP-03 ve MG-HP-07 kodlu örneklerin XRD deseni ve faz analiz grafikleri, (b) MG-HP-04, MG-HP-05, MG-HP-06 ve MG-HP-08 kodlu örneklerin XRD deseni ve faz analiz grafikleri.....	56
Şekil 4.2: (a) MG-HP-07 kodlu örneğin SEM görüntüsü, (b) MG-HP-08 kodlu örneğin SEM görüntüsü, (c) MG-HP-01 kodlu örneğin SEM görüntüsü, (d) MG-HP-04 kodlu örneğin	

SEM görüntüsü, (e) MG-HP-02 kodlu örneğin SEM görüntüsü, (f) MG-HP-05 kodlu örneğin SEM görüntüsü, (g) MG-HP-03 kodlu örneğin SEM görüntüsü (h) MG-HP-06 kodlu örneğin SEM görüntüsü.....	58
Şekil 4.3: (a) MG-HP-01 kodlu örneğin SEM görüntüsü (b) MG-HP-01 kodlu örneğin EDX spektrumu.....	59
Şekil 4.4: (a) MG-HP-04 kodlu örneğin SEM görüntüsü (b) MG-HP-04 kodlu örneğin EDX spektrumu.....	59
Şekil 4.5: (a) MG-HP-07 kodlu örneğin SEM görüntüsü (b) MG-HP-07 kodlu örneğin EDX spektrumu.....	59
Şekil 4.6: (a) MG-HP-08 kodlu örneğin SEM görüntüsü (b) MG-HP-08 kodlu örneğin EDX spektrumu.....	59
Şekil 4.7: (a) MG-HP-01, MG-HP-02, MG-HP-03 ve MG-HP-07 kodlu örneklerin FT-IR spektrum grafikleri, (b) MG-HP-04, MG-HP-05, MG-HP-06 ve MG-HP-08 kodlu örneklerin FT-IR spektrum grafikleri.....	60
Şekil 4.8: (a) MG-HP-07 kodlu örneğin RAMAN spektrumu, (b) MG-HP-08 kodlu örneğin RAMAN spektrumu, (c) MG-HP-01 kodlu örneğin RAMAN spektrumu, (d) MG-HP-04 kodlu örneğin RAMAN spektrumu.....	62
Şekil 4.9: (a) MG-HP-01, MG-HP-04, MG-HP-07 ve MG-HP-08 kodlu örneklerin BET analizi.....	63
Şeki 4.10: (a) MG-HP-07 kodlu örneğin XPS analizi, (b) MG-HP-08 kodlu örneğin XPS analizi, (c) MG-HP-01 kodlu örneğin XPS analizi, (d) MG-HP-04 kodlu örneğin XPS analizi.....	65
Şekil 4.11: (a) MG-HP-01, MG-HP-02, MG-HP-03 ve MG-HP-07 kodlu örneklerin EIS analizleri, (b) MG-HP-04, MG-HP-05, MG-HP-06 ve MG-HP-08 kodlu örneklerin EIS analizleri.....	64
Şekil 4.12: (a) MG-HP-07 kodlu örneğin CV grafiği, (b) MG-HP-08 kodlu örneğin CV grafiği, (c) MG-HP-01 kodlu örneğin CV grafiği, (d) MG-HP-04 kodlu örneğin CV grafiği, (e) MG-HP-02 kodlu örneğin CV grafiği, (f) MG-HP-05 kodlu örneğin CV grafiği, (g) MG-HP-03 kodlu örneğin CV grafiği, (h) MG-HP-06 kodlu örneğin CV grafiği.....	69
Şekil 4.13: (a) MG-HP-01, MG-HP-02, MG-HP-03 ve MG-HP-07 kodlu örneklerin kapasitans tarama hızı grafiği, (b) MG-HP-04, MG-HP-05, MG-HP-06 ve MG-HP-08 kodlu örneklerin kapasitans tarama hızı grafiği.....	70
Şekil 4.14: (a) MG-HP-07 kodlu örneğin galvanostatik ölçüm sonucu grafiği, (b) MG-HP-08 kodlu örneğin galvanostatik ölçüm sonucu grafiği, (c) MG-HP-01 kodlu örneğin galvanostatik ölçüm sonucu grafiği, (d) MG-HP-04 kodlu örneğin galvanostatik ölçüm sonucu grafiği, (e) MG-HP-02 kodlu örneğin galvanostatik ölçüm sonucu grafiği, (f) MG-HP-05 kodlu örneğin galvanostatik ölçüm sonucu grafiği, (g) MG-HP-03 kodlu örneğin galvanostatik ölçüm sonucu grafiği, (h) MG-HP-06 kodlu örneğin galvanostatik ölçüm sonucu grafiği.....	73
Şekil 4.15: (a) MG-HP-07 kodlu örneğin akım yoğunluğu kapasitans grafiği, (b) MG-HP-08 kodlu örneğin akım yoğunluğu kapasitans grafiği, (c) MG-HP-01 kodlu örneğin akım yoğunluğu kapasitans grafiği, (d) MG-HP-04 kodlu örneğin akım yoğunluğu kapasitans grafiği, (e) MG-HP-02 kodlu örneğin akım yoğunluğu kapasitans grafiği, (f) MG-HP-05	

kodlu örneğin akım yoğunluğu kapasitans grafiği, **(g)** MG-HP-03 kodlu örneğin akım yoğunluğu kapasitans grafiği, **(h)** MG-HP-06 kodlu örneğin akım yoğunluğu kapasitans grafiği.....75

Şekil 4.16: **(a)** MG-HP-07 kodlu örneğin voltaj zaman grafiği, **(b)** MG-HP-08 k kodlu örneğin voltaj zaman grafiği, **(c)** MG-HP-01 kodlu örneğin voltaj zaman grafiği, **(d)** MG-HP-04 kodlu örneğin voltaj zaman grafiği, **(e)** MG-HP-02 kodlu örneğin voltaj zaman grafiği, **(f)** MG-HP-05 kodlu örneğin voltaj zaman grafiği, **(g)** MG-HP-03 kodlu örneğin voltaj zaman grafiği, **(h)** MG-HP-06 kodlu örneğin voltaj zaman grafiği.....77

Şekil 4.17: **(a)** MG-HP-01, MG-HP-02, MG-HP-03 ve MG-HP-07 kodlu örneklerin galvanostatik kapasite sonuç grafikleri, **(b)** MG-HP-04, MG-HP-05, MG-HP-06 ve MG-HP-08 kodlu örneklerin galvanostatik kapasite sonuç grafikleri.....77



SEMBOLLER VE KISALTMALAR

AC	: Aktif karbon
HP-AC	: Fosfor katkılanmış aktif karbon
P	: Fosfor
ESS	: Enerji depolama sistemi
TES	: Termal Enerji Depolama
SMES	: Süper iletken manyetik enerji depolama sistemleri
HEV	: Hibrit Elektrikli Araçlar
EV	: Elektrikli Araçlar
FCV	: Yakıt Pilli Araçlar
UPS	: Kesintisiz Güç Kaynakları
EDLC	: Elektrokimyasal çift katmanlı kapasitörler
LIB	: Li-iyon pil
PC	: Psödokapasitör
LIC	: Lityum-iyon hibrit kapasitörler
MOF	: Metal-organik iskele
PANI	: Polianilin
PPy	: Poliyofen
PTh	: Poliyofen
PEDOT	: Poli(3,4-etilendioksitiyofen)
CNT	: Karbon nanotüpler
PTK	: Polimer türevli karbonlar
PEG	: Polietilen glikol
PVA	: Polivinil alkol
IHP	: İç Helmholtz tabakası
CP	: İletken polimerler
PBI	: polibenzimidazol membran
PA	: Fosforik asit
NMP	: N-metil pirolidon
PVDF	: poliviniliden florür
KOH	: potasyum hidroksit
XRD	: X-ışınları analizi

SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
EDX	: Enerji Dağıtıcı X-ışını
FTIR	: Fourier Dönüümlü Kızılötesi
BET	: Brunauer-Emmett-Teller
XPS	: X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi
EIS	: Elektrokimyasal empedans spektroskopisi
Rb	: bulk resistance
Rct	: charge transfer resistance
CV	: Döngüsel voltametri



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Kayısı Çekirdeği Kabuğundan Süper Kapasitörler için Heteroatom Doplanmış
Nanogözenekli Aktif Karbon Hazırlanması ve Fizikokimyasal Özelliklerinin Araştırılması

Mihrihan GÜLER

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Kimya Anabilim Dalı

98+XIV sayfa

2025

Danışman: Prof. Dr. Ahmet GÜLTEK

Küresel ısınma ve fosil yakıtların tükenmesi nedeniyle düşük maliyetli, yenilenebilir ve çevre dostu enerji dönüştürme ve depolama sistemleri ile ilgili çalışmalar oldukça önem kazanmıştır. Yüksek güç yoğunluğu, yüksek şarj ve deşarj verimliliği ve uzun çevrim ömrü özellikleri ile süper kapasitörler elektrokimyasal pillere göre önemli enerji depolama sistemlerinden biri olarak kabul edilir. Yüksek özgül yüzey alanı, gözenek boyutu, yüksek fizikokimyasal kararlılığı ve elektrokimyasal performansı nedeniyle, karbon bazlı gözenekli malzemeler, elektrot malzemeleri için yaygın olarak kullanılmaktadır. Aktif karbonların yüzey özelliklerini ve yük depolama kapasitesini geliştirmek için fosfor, kükürt ve azot gibi hetero atomlarla aktive edilir.

Bu tez kapsamında, kükürtlenmiş ve kükürtlenmemiş kayısı çekirdeği kabuğundan üretilmiş aktif karbon fosforik asit ile doplanarak süper kapasitör olarak kullanılabilirliğine ve performanslarına etkisi araştırılmıştır. Fosfor katkılanmış aktif karbonun elementel, termal, spektroskopik, mikroskopik ve yüzey analizleri yapılarak süper kapasitör performansları araştırılmıştır. Kükürtlenmiş ve kükürtlenmemiş kayısı çekirdeklerinden üretilmiş aktif karbonlar önce herhangi bir işleme tabi tutulmadan sonra değişik derişimlerde H_3PO_4 ile işleme tabi tutularak süper kapasitör üretilmiş ve kapasitans değerleri araştırılmıştır. Kükürtlenmiş kayısı çekirdeği kabuğundan üretilmiş aktif karbonun kapasitans değerinin kükürtlenmemişten 5 kat daha fazla olduğu bulundu. H_3PO_4 ile işleme tabi tutulmuş kükürtlü ve kükürtsüz aktif karbonlardan üretilmiş süper kapasitörlerin kapasitans değerlerinin ise bir birlerine yaklaşık olduğu bulundu.

Anahtar Kelimeler: Süper kapasitör, aktif karbon, kayısı çekirdeği kabuğu, heteroatom

ABSTRACT

Master Thesis

Preparation of Heteroatom Doped Nanoporous Activated Carbon from Apricot Kernel
Shell for Supercapacitors and Investigation of Its Physicochemical Properties

Mihrihan GÜLER

Inonu University

Graduate School of Nature and Applied Sciences

Department of Chemistry

98+XIV pages

2025

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet GÜLTEK

Due to global warming and depletion of fossil fuels, studies on low-cost, renewable and environmentally friendly energy conversion and storage systems have gained great importance. Supercapacitors are considered to be one of the important energy storage systems compared to electrochemical batteries with their high power density, high charge and discharge efficiency and long cycle life features. Due to their high specific surface area, pore size, high physicochemical stability and electrochemical performance, carbon-based porous materials are widely used for electrode materials. In order to improve the surface properties and charge storage capacity of activated carbons, they are activated with heteroatoms such as phosphorus, sulfur and nitrogen.

Within the scope of this thesis, activated carbon produced from sulfurized and unsulfurized apricot kernel shells was doped with phosphoric acid and its effect on its usability and performance as a supercapacitor was investigated. Elemental, thermal, spectroscopic, microscopic and surface analyses of phosphorus-doped activated carbon were performed to investigate the supercapacitor performances. Supercapacitors were produced by treating activated carbons produced from sulfurized and unsulfurized apricot kernels with different concentrations of H_3PO_4 without any treatment and then their capacitance values were investigated. It was found that the capacitance value of the activated carbon produced from sulfurized apricot kernel shells was 5 times higher than that of the unsulfurized one. It was found that the capacitance values of the supercapacitors produced from sulfurized and unsulfurized activated carbons treated with H_3PO_4 were close to each other.

Keywords: Supercapacitor, activated carbon, apricot kernel shell, heteroatom

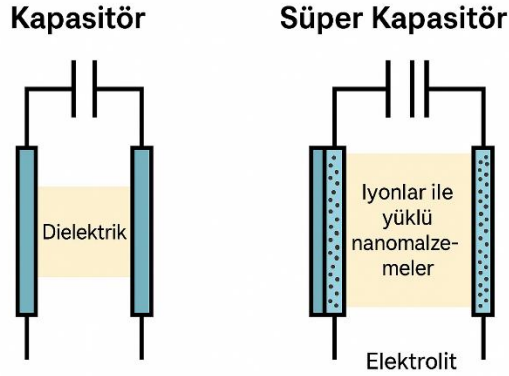
1. GİRİŞ

Enerji, modern dünyada ekonomik büyümenin, teknolojik gelişmelerin ve toplumsal refahın vazgeçilmez unsurlarından biridir. Ancak son yıllarda, dünya genelinde enerjiye olan talebin hızla artması, enerji kaynaklarının verimli ve sürdürülebilir yönetilmesi gerekmektedir. Fosil yakıtlara dayalı enerji üretimi hem sınırlı rezervleri hem de neden olduğu çevresel zararlarından dolayı kullanımı azalmaktadır ve yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi artmaktadır. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının süreklilik göstermeyen yapısı enerjinin güvenilir ve dengeli bir şekilde depolanmasını gerektirir. Bu durum, enerji depolama teknolojilerinin, özellikle de yüksek performanslı enerji depolama cihazlarının geliştirilmesine olan ihtiyacı artırmaktadır [1].

Enerji depolama teknolojilerindeki gelişmeler, taşınabilir elektroniklerden elektrikli araçlara kadar geniş bir alanda kritik önem taşımaktadır. Geleneksel pil ve akü sistemleri yüksek enerji yoğunluğu sunarken, güç yoğunluklarının sınırlı olması ve çevrim ömürlerinin kısıtlılığı hızlı enerji talepli uygulamalarda yetersiz kalabilmektedir. Süperkapasitörler (aynı zamanda elektriksel çift tabakalı kapasitörler veya ultrakapasitörler olarak da bilinir) bu noktada devreye girerek çok daha yüksek güç yoğunluğu ve milyonlarca döngüye varan uzun ömür sunarlar. Üper kapasitörler, yüksek güç yoğunluğu gerektiren uygulamalar için ideal bir enerji depolama çözümü haline gelmiştir. Özellikle yenilenebilir enerji sistemleri, elektrikli araçlar ve taşınabilir elektronik cihazlar gibi alanlarda sıkça tercih edilmektedir.. Ancak, süperkapasitörlerin enerji yoğunluğu hala bataryalara kıyasla düşüktür; bunun başlıca nedeni yalnızca elektrot yüzeylerinde (ve yüzeye yakın bölgelerde) yük depolanabilmesi ve kullanılan elektrolitlerin potansiyel alanlarının sınırlı olmasıdır. [2]

Kapasitör (Kondansatör), elektrik enerjisini elektrik alanı şeklinde depolayan iki iletken plaka arasında bulunan bir devre elemanıdır. Bu iki iletken plaka arasında genellikle bir dielektrik (yalıtkan) malzeme konulur ve elektronik devrelerde elektrik yükü depolamak, AC sinyallerini filtrelemek, güç kaynaklarındaki dalgalanmaları yumuşatmak için zamanlama ve gecikme devrelerinde kullanılır. Süper kapasitör (Ultra kapasitör) ise çok yüksek kapasitans değerlerine sahip kapasitörlerdir. Normal kapasitörlere göre binlerce kat daha fazla enerji depolayabilirler. Yapılarında çok ince bir dielektrik tabaka ve nanoparçacıklı elektrotlar, örneğin aktif karbon, bulunur. Süper kapasitörler geleneksel pillerle kapasitörler arasında bir özellik gösterirler. Örneğin, piller gibi yüksek yoğunluklu

enerji depolarlar ama kapasitörler gibi çok hızlı şarj ve deşarj olurlar. Süper kapasitörler elektrikli araçlarda ani enerji ihtiyaçları, yenilenebilir enerji sistemlerinde ve hafıza yedekleme sistemlerinde (örneğin kısa süreli güç kesintisi durumlarında) yaygın olarak kullanılmaktadır [3].



Şekil 1.1: Kapasitör ve süper kapasitörün şematik gösterimi

Süperkapasitörlerin tarihsel gelişimi incelendiğinde, aktif karbonun bu teknolojiye kullanılan ilk malzemelerden biri olduğu görülmektedir [4]. Süper kapasitörlerin performansı, elektrot malzemelerinin özellikleriyle ilişkilidir. Aktif karbon, Yoğun gözenekli yapı, iyi iletkenlik, geniş yüzey alanı, düşük maliyet ve kimyasal kararlılığı sayesinde süper kapasitör elektrotlarında yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Biyokütle kaynaklı malzemeler, aktif karbon üretimi ekonomik ve çevresel olarak umut vadeden bir çözüm sunmaktadır [5].

Aktif karbon üretimi için genel olarak kullanılan biyokütle kaynakları arasında, hindistancevizi kabuğu, odun (sert ağaçlar ve yumuşak ağaçlar), badem kabuğu, ceviz kabuğu, kayısı çekirdeği kabuğu fındık kabuğu gibi tarımsal atık biyokütller kullanılmaktadır. Her bir biyokütleden üretilen aktif karbonun kendine özgü bir kullanım alanı vardır. Örneğin, hindistancevizi kabuğundan elde edilen aktif karbonun yüksek karbon oranı ve düşük kül içeriğinden kaynaklı en kaliteli aktif karbonlardan biridir. Fındık, ceviz ve badem kabuğundan üretilen aktif karbonlar dayanıklı yapılarından dolayı su ve hava arıtma sistemlerinde kullanılır. Kayısı çekirdeği kabuğundan yapılan aktif karbon ise yüksek karbon içeriği (%40-50 civarında), düşük kül oranı ve sert ve dayanıklı yapıya sahip olmasından dolayı su ve atık su arıtımı (özellikle organik kirleticilerin giderilmesi), hava

filtreleme sistemleri, gaz saflaştırma ve süper kapasitör elektrotlarının yapımında kullanılmaktadır.[6]

Malatya kayısı üretiminde Dünya’da önemli bir potansiyele sahiptir. Dünya kuru kayısı üretiminin yaklaşık %55’ini gerçekleştirmektedir. 2024 yılı verilerine göre Malatya yaş kayısı rekoltesi 658.237 ton, kuru kayısı rekoltesi ise 107.517 ton düzeyinde gerçekleşmiştir. Kuru kayısının 1/6’sını kayısı çekirdeği oluşturur. Kayısı çekirdeğinin kütlece %70’i ise sert odunumsu kabuğudur. Bu oranlara göre 2024 yılında 12.543 ton kayısı çekirdeği kabuğu üretilmiştir. Kurutulmuş kayısı, uzun raf ömrü ve taşıma kolaylığı nedeniyle uluslararası pazarlar için önemli bir ihraç ürünüdür. Ancak kurutma sürecinde meyvenin rengini ve kalitesini korumak için genellikle kükürt dioksit (SO_2) uygulanmaktadır. Kükürtleme, oksidatif bozulmayı önleyerek meyvenin kahverengileşmesini azaltan ve mikrobiyal bozulmayı engelleyen etkili bir yöntemdir. Malatya’da üretilen kayısının %75’i kükürtlenirken %25’i doğal olarak kurutulmaktadır. Bu hesaplamalara göre Malatya’da üretilen kayısı çekirdeği kabuğunun 9.407 tonu kükürt içermektedir.

Kükürtlenmiş kayısı çekirdeği kabuğundan üretilmiş aktif karbonlar kükürt içerdiğinden özellikle su arıtma sistemlerinde kullanıldığında kükürt kokusu gibi problemler oluşturmaktadır. Bu sebeple kükürtlenmiş kayısı çekirdeği kabuğundan üretilen aktif karbonu su arıtma gibi alanlarda kullanmak sorun oluşturmaktadır [7].

Süper kapasitör yapımında kullanılan aktif karbonun azot, fosfor, kükürt gibi heteroatomlarla doplanması, karbon malzemelerinin ıslanabilirlik gibi yüzey özelliklerini ve elektrokimyasal performansını artırmakta ve süper kapasitörlerin kapasitans özelliklerini artırmaktadır[8]. Örneğin, fosfor doplama, karbon elektrotların yüzey kimyasını değiştirerek daha yüksek enerji yoğunluğu ve oksidasyon kararlılığı sağlar [9].

Bu tez kapsamında, kükürtlenmiş ve kükürtlenmemiş kayısı çekirdeği kabuğundan üretilen aktif karbona fosfor doplanarak süper kapasitör elektrot malzemesi olarak potansiyeli araştırılmıştır. Malatya’nın en önemli tarımsal ürünü olan kükürtlenmiş kayısının çekirdek kabuğundan elde edilen aktif karbonlar kükürt içeriğinden dolayı su arıtımı, gıda endüstrisi, vs gibi bazı alanlarda sorun oluştururken, süper kapasitör yapımında doğal doplanmış elektrot malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışma, tarımsal atıkların değerlendirilmesi ve yenilikçi enerji depolama çözümlerinin geliştirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Kükürtlü ve kükürtsüz kayısı çekirdeği kabuğundan üretilen aktif

karbonların fiziksel, kimyasal ve elektro-kimyasal özellikleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiş; gözenek yapısı, elektrik iletkenliği ve yüzey alanı misali malzeme özelliklerinin süper kapasitör performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Ortaya çıkan sonuçlar, literatürdeki bilgilerle karşılaştırılmıştır. Kükürtlü kayısı çekirdeği kabuğundan üretilen böyle bir malzemenin sürdürülebilir enerji teknolojilerindeki rolüne ilişkin çıkarımlar yapılmıştır.



2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Enerji Depolama Sistemleri

Enerji depolama, enerjinin daha sonra kullanılmak üzere farklı formlarda saklanması ifade etmektedir. Enerji depolama sistemleri, modern enerji altyapısının vazgeçilmez bir parçası olarak kabul edilmektedir. Bu sistemler, enerji verimliliğini artırmak, güç kalitesini iyileştirmek ve yenilenebilir enerji kaynaklarının bütünleşmesini sağlamakta kritik bir rol oynamaktadır. Enerji depolama teknolojileri, elektrik şebekesinin istikrarını oluşturmak, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek, enerji sistemlerinin işletim süreçlerini daha verimli hale getirmek açısından gereklidir. Sanayideki hızlı büyüme, ulaşım ve inşaat sektörlerindeki gelişmeler, dünya enerji tüketiminde artışa neden olan temel faktörlerdir. Son yıllarda artan dünya nüfusuyla birlikte yaşam standartlarının yükselmesi, enerji tüketiminde, özellikle elektrik kullanımında önemli bir artışa yol açmıştır [10].

2018 yılında enerji tüketimindeki büyüme oranı %2,13 ile en yüksek seviyesine ulaşmıştır. 2050 yılına kadar küresel enerji talebinin iki katına çıkması, yüzyılın sonuna kadar ise üç katına ulaşması öngörülmektedir. Mevcut enerji ağlarının bu artan talebi kademeli iyileştirmelerle karşılaması mümkün görünmemektedir. Bu nedenle, artan enerji talebini karşılamak için yeni enerji kaynaklarının geliştirilmesi gerekmektedir. Elektrik enerjisinin doğrudan depolanamaması nedeniyle, genellikle başka bir enerji formuna dönüştürülmesi gerekmektedir. Enerji depolama yöntemlerini daha verimli hale getirmek, enerji sektöründe kritik bir öneme sahiptir [11].

Enerji gereksinimi, fosil yakıtlar ve nükleer enerji gibi farklı kaynaklardan sağlanabilmektedir. Ancak, fosil yakıtlar ciddi çevresel zararlar nedeniyle sürdürülebilir bir çözüm sunmamaktadır. Fosil yakıtların hızla tükenmesi ve çevresel etkileri nedeniyle enerji verimliliği yöntemlerinin uygulanması ve temiz, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması gibi tedbirler aciliyet taşımaktadır. Nükleer enerji, düşük karbon salınımı avantajı taşımasına rağmen yüksek maliyetleri ve güvenlik riskleri gibi dezavantajlara sahiptir. Küresel ısınma ve çevresel zararların önüne geçmek amacıyla, yenilenebilir enerji kaynaklarına ve enerji atıklarının geri kazanım sistemlerine odaklanması gereklidir [12].

Yenilenebilir enerji kaynakları, sürdürülebilir yapıları ve geniş kullanım alanları sayesinde enerji gereksinimini sağlamak için etkili bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Özellikle güneş, rüzgar, biyoenerji, hidroelektri, jeotermal gibi yenilenebilir enerji türleri, kaynak çeşitliliği açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Ancak, özellikle güneş ve rüzgar enerjisi gibi kesintili üretimi olan sistemler, dalgalı yapıları nedeniyle bir enerji santralinde tek başına yeterli olamamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının mevsimsel ve günlük dalgalanmaları, bu sorunları daha karmaşık hale getirmektedir. Bu durum, araştırmacıları alternatif çözümler geliştirmeye veya daha verimli enerji kombinasyonlarını değerlendirmeye yönlendirmiştir. Enerji depolama sistemlerinin (ESS'ler), yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegrasyon sağladığında bu sorunu çözebileceği görülmüştür [13].

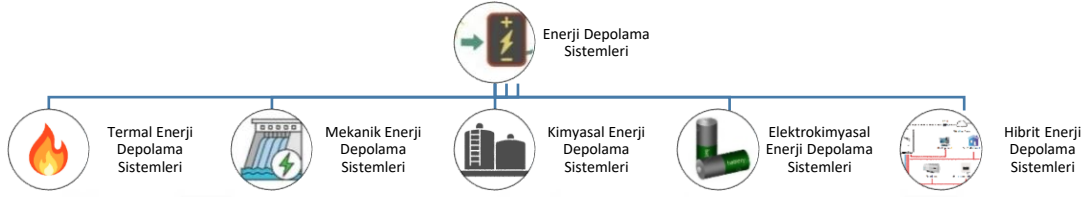
Enerji depolama sistemlerinin temel avantajları yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırır ve sınırlamalarını azaltır. Bu sistemler, yakıt tüketimini ve CO₂ emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilir. Enerji arzı ve talebi arasındaki dengesizlikleri azaltarak yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili yapısından kaynaklanan sorunları hafifletir. Enerji santrallerinin genel verimliliğini artırarak uzun vadede işletme maliyetlerinin düşmesini sağlar [14].

Enerji, mekanik, elektriksel, kimyasal, elektrokimyasal, ve termal sistemler gibi çeşitli yöntemlerle depolanabilmektedir.

- ❖ Termal Enerji Depolama (TES): Isıtma veya soğutma yoluyla depolanan termal enerji, daha sonra kullanılmak için depolanır. Bu yöntemle sıcak su tankları veya eriyebilir tuzlar, enerji depolamak için kullanılır. Gizli ısı depolama sistemleri ve duyuur ısı depolama sistemleri güneş enerjisiyle ısıtma/soğutma gibi uygulamalarda yaygındır.
- ❖ Elektrokimyasal Depolama: Bataryalar ve süperkapasitörler gibi sistemler, elektrokimyasal reaksiyonlar yoluyla enerji depolar. Bu yöntem, elektrikli araçlar ve şebeke ölçekli enerji depolama için yaygın olarak kullanılır.
- ❖ Elektriksel Depolama: Manyetik alanlar aracılığıyla enerji depolayan süper iletken manyetik enerji depolama (SMES) sistemleri hızlı şarj ve deşarj gerektiren uygulamalar için uygundur.
- ❖ Mekanik Depolama: Mekanik sistemler, enerji depolamak için hareketten faydalanır. Örneğin, pompalı hidrolik depolama sistemlerinde su, enerji depolamak için yüksek

bir yere taşınır. Gerekli olduğunda su aşağı bırakılarak enerji tekrar kazanılır. Sıkıştırılmış hava enerjisi depolama gibi sistemler, kinetik veya potansiyel enerji olarak enerji depolar. Bu yöntemler, yüksek güç yoğunluğu ve hızlı tepki süreleri sunar.

- ❖ Kimyasal Depolama: Hidrojen ve diğer kimyasal bileşikler, enerji depolamak için kullanılabilir. Bu yöntem, enerji dönüşüm süreçlerinde esneklik sağlar [15].



Şekil 2.1: Enerji Depolama Sistemlerini Sınıflandırılması

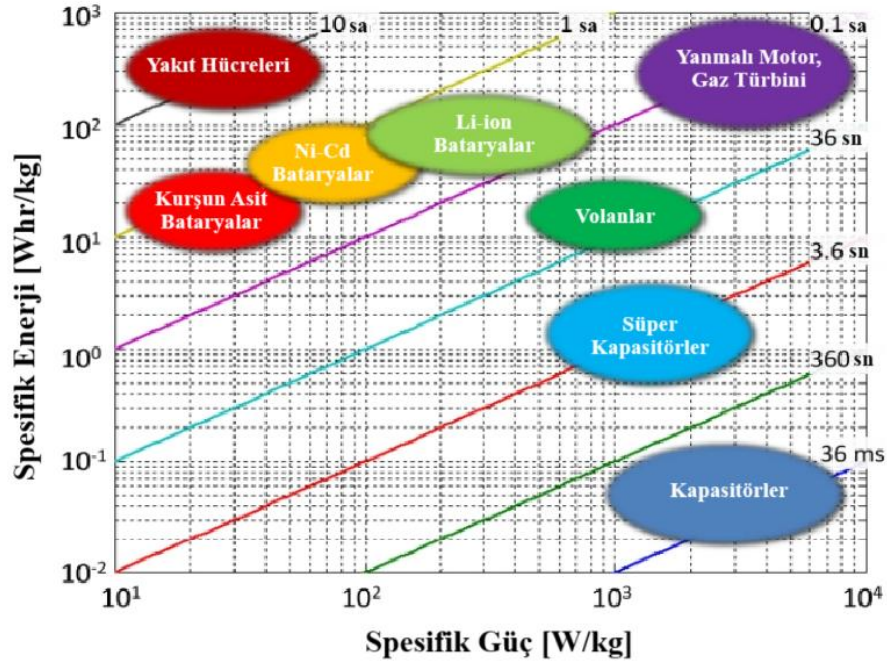
2.1.1. Elektrokimyasal enerji depolama sistemleri

Elektrokimyasal enerji depolama sistemleri, çevre dostu ve sürdürülebilir çözümler sunarak hızla artan küresel enerji ihtiyaçlarını ve çevresel sorunları ele almayı amaçlayan önemli teknolojilerdir. Bu sistemler, elektrokimyasal kapasitörler, piller ve yakıt hücreleri gibi cihazları içerir; enerji güç yoğunlukları, döngüsel dayanıklılık ve verimlilik gibi ayırt edici özellikleri sayesinde ticari uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Elektrokimyasal enerji depolama cihazları, özellikle sabit ve otomotiv uygulamalarına yönelik temiz, akıllı ve yeşil enerji sektörlerinde kritik çözümler sunmaktadır [16].

Elektrokimyasal kapasitörler, yüksek güç yoğunlukları ve uzun döngü ömürleri ile dikkat çeker; hızlı şarj ve deşarj yetenekleri sayesinde hibrit araçlar ve yenilenebilir enerji sistemlerinde etkili bir şekilde yer alır. Piller, enerji depolama sistemlerinde en sık kullanılan teknolojiler arasındadır. Lityum-iyon piller, taşınabilir elektronik cihazlarda ve elektrikli araçlarda geniş uygulama alanına sahipken, kurşun-asit piller düşük maliyetleri ve yüksek güvenilirlikleri nedeniyle sabit enerji depolama çözümlerinde önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Daha çevre dostu ve ekonomik alternatifler olarak geliştirilen sodyum-iyon ve lityum-kükürt piller ise sektörün dikkat çeken yenilikleri arasında yer almaktadır [17].

Yakıt hücreleri, hidrojen gibi yakıtları kullanarak sıfır emisyonlu enerji üretimi sağlar ve bu özellikleriyle ulaşım sektöründe ve sabit enerji üretiminde büyük bir öneme sahiptir. Bunun

yanı sıra, bu sistemler yenilenebilir enerji kaynaklarının, etkili kullanımını teşvik ederek büyük ölçekli enerji depolama teknolojilerinin geliştirilmesine odaklanır. Fosil yakıtların yanmasıyla salınan CO₂ emisyonunu azaltmak amacıyla rüzgar türbinlerinin ve fotovoltaik güneş panelleri kullanımı oldukça önemlidir ve modern elektrokimya bu tür büyük enerji depolama ihtiyaçlarını karşılayan teknolojiler sunabilir [18].



Şekil 2.2: Ragone Grafiği [19].

Ragone grafiği, enerji depolama sistemlerini güç yoğunluğu ve enerji yoğunluğu açısından karşılaştırmaktadır. Süper kapasitörler, yüksek güç yoğunlukları sayesinde milisaniyeler içinde anlık güç sağlayabilirken, enerji yoğunluklarının düşük olması sebebiyle uzun süreli enerji depolamada sınırlıdır. Yakıt hücreleri yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmalarına rağmen şarj/deşarj sürelerinin uzun olması otomotiv uygulamalarını kısıtlamaktadır.

Lityum temelli bataryalar, güç ve enerji yoğunluğu arasında dengeli bir çözüm sunarken, anlık yüksek güç gerektiren durumlarda yetersiz kalmaktadır. Bu yetersizlik, anlık yüksek güç sağlayabilen süper kapasitörler ile dengelenmektedir. Teknolojik ilerlemeler ve yatırımlar, enerji depolama sistemlerindeki güvenlik, dayanıklılık, güvenilirlik ve performansın geliştirilmesine katkıda bulunarak sektörde yenilikçiliği teşvik etmektedir [20].

2.1.1.1. Süperkapasitör

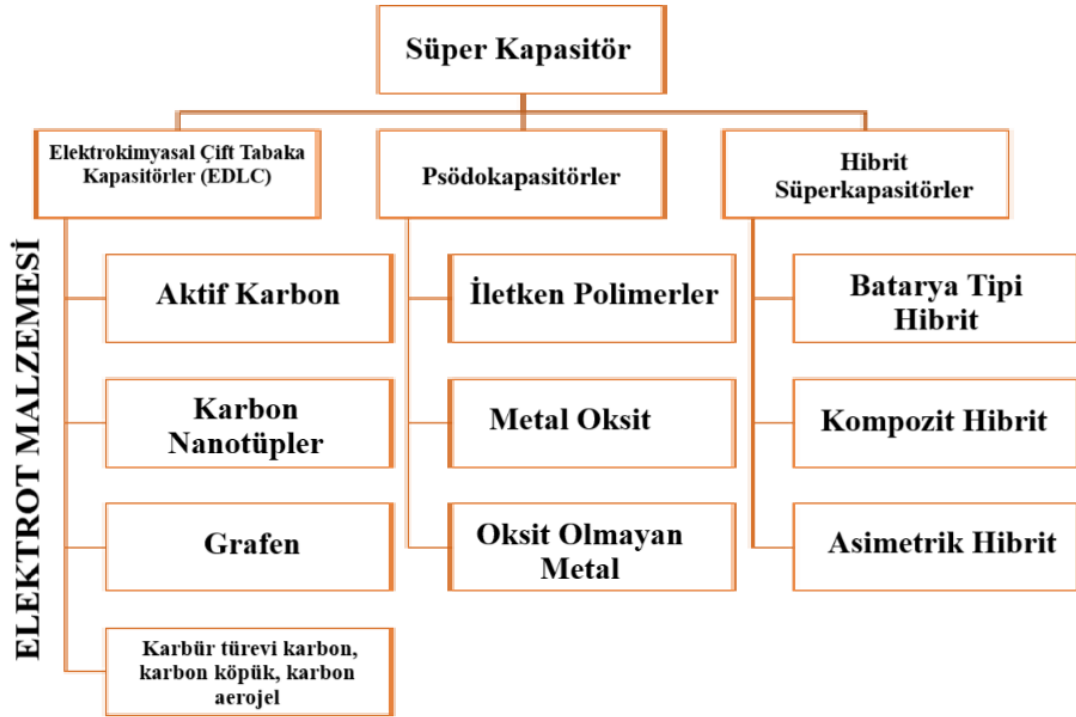
Kapasitör, kondansatör olarak da bilinen elektriksel enerjiyi kısa süreliğine depolayabilen pasif bir elektronik devre elemanıdır. Kapasitörler, iki iletken plakanın arasına yerleştirilen bir dielektrik (yalıtkan) malzeme ile yapılandırılan temel enerji depolama bileşenleridir. Bu yapı, elektrik yüklerinin tutulmasını ve gerektiğinde serbest bırakılmasını sağlar. Kapasitörler ve süper kapasitörler temel olarak aynı prensipte çalışsa da kapasitans değerleri ve kullanım alanları bakımından çok farklıdırlar. Kapasitörlerin kapasitans değeri üretildiği malzemeye bağlı olarak 1pF'tan 1000 μ F'a kadar değişmektedir. Oysa süper kapasitörlerin kapasitans değerleri 0,1F'tan 5000 F'a kadar değişmektedir. Süper kapasitörlerin düşük gerilimde çok büyük kapasitans değerine sahip olmasından dolayı enerji depolama yaygın olarak kullanılır [21].

Süper kapasitör (ya da ultra kapasitör, teknik adıyla elektrokimyasal çift katmanlı kapasitör-EDLC) çok yüksek kapasitans değerlerine sahip, enerji depolama kapasitesi klasik kapasitörlere göre binlerce kat fazla olan bir pasif elektronik bileşendir. Süper kapasitörler pil ile kapasitör arasında bir köprü gibi düşünülebilir. Klasik kapasitörler gibi çok hızlı şarj/deşarj olabilir. Piller gibi çok fazla enerji depolayabilir ama pilden daha kısa sürede boşalır. Aynı zamanda süperkapasitörler, bataryalara kıyasla uzun ömürlü döngü ve hizmet ömrü, yüksek güç yoğunluğu, geniş çalışma sıcaklığı aralığı, nispeten düşük maliyet, daha yüksek güvenlik ve çevre dostu olma özelliklerine sahiptir. Bir enerji depolama cihazının güç yoğunluğu, belirli bir hacim üzerinden enerjinin ne kadar hızlı aktarılabilmesini ifade ederken, enerji yoğunluğu ise aynı hacim içinde depolanabilen toplam enerji miktarını göstermektedir. Basitçe ifade etmek gerekirse, güç yoğunluğu sistemin enerjiyi ne kadar hızlı sağlayabildiğini, enerji yoğunluğu ise sistemin ne kadar enerji depolayabildiğini belirler [22].

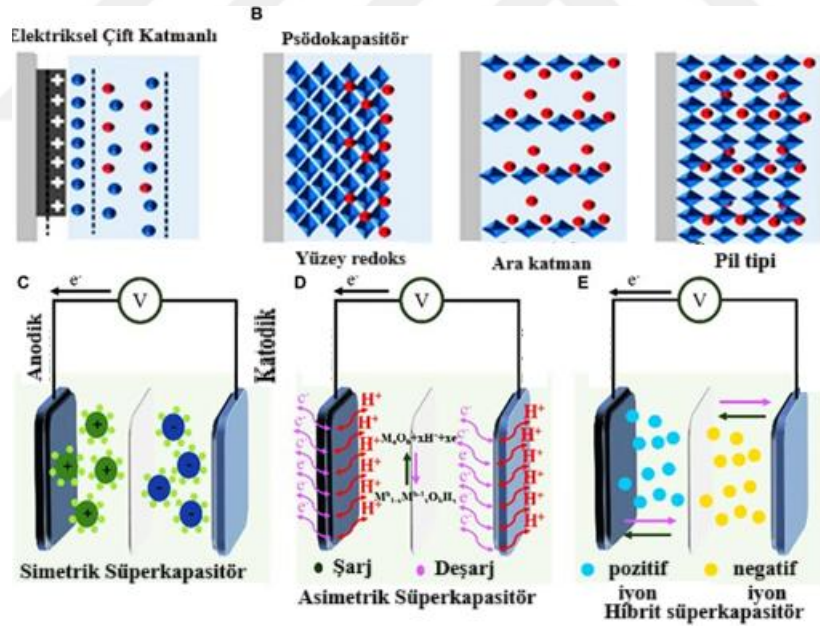
Süperkapasitörler günümüzde üç ana alanda kullanılmaktadır. İlk olarak taşımacılık sektöründe, Hibrit Elektrikli Araçlar (HEV), Elektrikli Araçlar (EV), Yakıt Pili Araçlar (FCV), trenler ve trolleybüsler gibi binek ve ticari araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. İkinci olarak elektronik cihazlarda, Kesintisiz Güç Kaynakları (UPS) ve bilgisayarların uçucu bellek yedekleme sistemlerinde rol oynamaktadır. Üçüncü kullanım alanı ise enerji toplama sistemleridir; bu sistemlerde süperkapasitörler, rüzgar türbinleri ve güneş panelleri gibi yenilenebilir enerji sistemlerinde geleneksel bataryaları tamamlayıcı bir işlev görmektedir. Özellikle otomotiv endüstrisindeki uygulamaları pek çok avantaj sunmaktadır.

Süperkapasitörler, hibrit elektrikli araçlarda enerji verimliliğini artırmak için kullanılabilir. Örneğin, hibrit araçlarda stop-start sistemlerinde enerji depolayıp, motoru yeniden maksimum verimle işlev görmektedir.. Bu sistemle donatılmış 600 binden fazla HEV olduğu bilinmektedir. Ayrıca bazı üreticiler, daha küçük bir kurşun-asit aküyle birleştirilen süperkapasitörleri kullanarak geleneksel araç akülerinin yerini alacak yeni sistemler tasarlamaktadır. Süperkapasitörler elektrikli araçlarda, elektrikli güç trenlerinde rejeneratif frenleme sisteminde hızlı ve yumuşak bir hızlanma sağlamak ve motorun daha kısa sürede çalışmasını sağlamak için kullanılmaktadır. Süperkapasitörlerin gelişimi 1950'lerde başlayarak, 1971'de Standard Oil of Ohio şirketi tarafından patentlenmiş ve 1982'de Panasonic tarafından ticari olarak piyasaya sürülmüştür. Pinnacle Araştırma Enstitüsü aynı yıl, askeri uygulamalarda kullanmak için düşük eşdeğer seri dirençli ilk EDLC süperkapasitörü geliştirmiştir. 1992'de Maxwell Laboratories, 1 kF kapasiteye sahip geniş EDLC serisini sunarak endüstriyel kullanımı yaygınlaştırmıştır. 2007'den itibaren hibrit süperkapasitörler geliştirilmiş, günümüz cihazları birkaç bin Farad kapasiteye ulaşarak nominal gerilim ve daha yüksek enerji yoğunluğu sağlamıştır [23].

Süperkapasitörler, enerji depolama mekanizmalarına göre üç ana sınıfa ayrılmaktadır: elektrokimyasal çift katmanlı kapasitörler (EDLC), psödokapasitörler ve hibrit süperkapasitörler. Her bir sınıf, farklı depolama prensipleri ve malzeme özellikleri ile karakterize edilmekte olup, belirli uygulama alanlarında avantaj sağlamaktadır. Süperkapasitörlerde kullanılan elektrot malzemeleri ise süperkapasitör türlerine göre değişmektedir. Aktif karbon süper kapasitör elektrot üretimi için kullanılan ilk türlerdir. Aktif karbon, düşük maliyeti, geniş kaynak yelpazesi, ve üstün kimyasal ile termal kararlılığı sayesinde süperkapasitörlerde en yaygın kullanılan malzeme olmaya devam etmektedir. [24].



Şekil 2.3: Süperkapsitörlerin Sınıflandırılması.



Şekil 2.4: Süperkapsitör tiplerinin enerji depolama mekanizması [25].

2.1.1.1.1. Elektrokimyasal çift tabaka kapasitörler (EDLC)

Elektrokimyasal çift tabaka kapasitörler (EDLC), elektrik enerjisini depolamak için kullanılan cihazlardır. EDLC'ler, elektrot olarak adlandırılan elektronik iletken ve elektrolit

çözültisi olarak adlandırılan sıvı iyonik iletken arasında arayüzdeki kapasitif özellikleri kullanarak yüksek güç yoğunluğu ve uzun çevrim kabiliyeti gibi birçok avantaj sunan cihazlardır [26].

EDLC'ler elektrot- elektrolit arasındaki arayüzde elektrik çift katmanı oluşturmak için karbonlu malzemelerin yüksek yüzey alanını kullanır. Geleneksel elektriksel iletkenlik sistemleri yüksek bir güç yoğunluğu ve mükemmel bir döngü ömrü (EDLC'lerde >10 000 döngü) sergiler. Bununla birlikte, elektrot malzemelerinin düşük alansal kapasitansı ve dar çalışma potansiyelleri nedeniyle Li-iyon pillerden (LIB'ler, $\sim 150 \text{ W h kg}^{-1}$) daha düşük enerji yoğunluğuna ($< 30 \text{ W h kg}^{-1}$) sahiptirler. Yüksek yüzey alanına sahip karbon malzemeler, EDLC'lerin performansını artırmak için yaygın olarak kullanılır [27].

EDLC'lerin performansını artırmak için, elektrot malzemelerinin ve elektrolitlerin tasarımında yenilikçi yaklaşımlar benimsenmiştir. Örneğin, karbon nanotüpler ve grafen gibi şekil 2.10. da görülen nanoyapılı malzemeler, yüksek yüzey alanı ve iletkenlik sunarak enerji yoğunluğunu artırabilir. Ayrıca, iyonik sıvılar gibi yeni elektrolitler, daha yüksek voltajlarda çalışmayı mümkün kılarak enerji yoğunluğunu daha da artırabilir [28].

2.1.1.1.2. Psödokapasitörler

Psödokapasitörler (PC'ler), geleneksel elektrik çift tabaka kapasitörlerinden (EDLC'ler) farklı olarak, yük depolama mekanizmasında geri dönüşümlü Faradaik (redoks) reaksiyonları kullanır. Bu reaksiyonlar, elektrik yükünün yüzeyde veya yüzeye yakın bölgelerde depolanmasını sağlayarak enerji depolama alanında önemli bir yenilik sunar. EDLC'ler elektrostatik yük birikimine dayanırken, psödokapasitörler Faradaik reaksiyonları aracılığıyla yük depolama gerçekleştirir. Bu iki mekanizma arasındaki farklılık, PC'lerin enerji depolama teknolojileri içindeki benzersiz konumunu açıkça ortaya koyar [29].

PC sistemlerinde yaygın olarak kullanılan malzemeler arasında metal oksitler, sülfidler ve iletken polimerler bulunur. Bu redoks aktif malzemeler, enerji depolama sürecinde önemli rol oynar. Ancak, EDLC'lerin elektrotlarına kıyasla daha düşük kapasitans sergilerler. Bu durum, malzemelerin redoks süreçlerindeki kinetik kısıtlamalar ve yapısal özelliklerinden kaynaklanabilir. Örneğin, metal oksitler ve sülfidler hızlı redoks reaksiyonlarına olanak tanısı da, bu elektrotlar genellikle tekrarlayan reaksiyonlar sırasında düşük döngü performansı ve zayıf elektrik iletkenliği nedeniyle yüksek iç dirençle karşılaşır. İletken polimerler ise daha esnek ve hafif malzeme avantajları sunmasına rağmen, aynı şekilde iç

direnç ve uzun ömür sınırlamalarıyla karşı karşıyadır. Bu yüksek iç direnç, cihazların enerji verimliliğini düşürerek uzun vadeli performanslarını olumsuz etkileyebilir [30].

Psödokapasitörlerin üstün özellikleri enerji depolama teknolojilerindeki uygulamalarını artırmaktadır. Özellikle geniş özgül yüzey alanları, uygun gözenek yapıları ve yenilikçi kompozit malzeme tasarımları, psödokapasitörlerin hızlı enerji transferi ve yüksek güç yoğunluğu yeteneklerini destekler. EDLC'lerin sahip olduğu hızlı şarj/deşarj kabiliyeti, PC'lerin redoks reaksiyonlarının yüksek enerji yoğunluğu ile birleşerek enerji depolama teknolojilerine entegre edildiğinde üstün bir performans sergilemelerine olanak tanır. Psödokapasitörler, sundukları avantajlar sayesinde süperkapasitörler ve yeni nesil enerji depolama sistemleri için etkili bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Psödokapasitörler, hem redoks reaksiyonları hem de yenilikçi malzeme teknolojileriyle enerji depolama sistemlerinde güçlü bir seçenektir. Hem EDLC'ler hem de PC'ler arasındaki mekanizmalardaki farklılıklar, enerji depolama alanındaki malzeme seçimini ve cihaz tasarımını şekillendiren önemli özelliklerdendir. Bu teknolojiler üzerinde yapılan araştırmalar, uzun ömürlü ve daha yüksek performanslı cihazların geliştirilmesi sağlayarak sürdürülebilir enerji çözümlerinin yaygınlaşmasına katkıda bulunmaktadır [31].

2.1.1.1.3. Hibrit süperkapasitörler

Hibrit süperkapasitörler, enerji depolama teknolojilerinde son yıllarda öne çıkan, yüksek enerji yoğunluğunu yüksek güç yoğunluğundan ödün vermeden sunabilen gelişmiş cihazlardır. Bu süperkapasitörler, geleneksel elektrik çift tabaka kapasitörleri (EDLC) ile psödokapasitörlerin avantajlarından yararlanarak, her iki teknolojinin de eksikliklerini gidermeyi amaçlar Genellikle hibrit süperkapasitörler, bir tarafında batarya tipi (Faradaik reaksiyonlu) bir elektrot, diğer tarafında ise kapasitör tipi (kapasitif depolama) bir elektrot bulundurur. Bu asimetrik yapı sayesinde, hibrit süperkapasitörler hem yüksek özgül kapasitans hem de uzun çevrim ömrü sunar ve enerji yoğunluğu ile güç yoğunluğu arasında bir denge kurar [32].

Hibrit süperkapasitörlerin en önemli avantajlarından biri, enerji yoğunluğunun geleneksel süperkapasitörlere göre daha yüksek olmasıdır; bu sayede hibrit elektrikli araçlar ve yüksek güç gerektiren uygulamalarda tercih edilirler Örneğin, lityum-iyon hibrit kapasitörler (LIC), lityum-iyon bataryaların yüksek enerji yoğunluğunu ve süperkapasitörlerin hızlı şarj-deşarj kabiliyetini bir arada sunar. Benzer şekilde, potasyum-iyon ve sodyum-iyon

süperkapasitörler de çevre dostu ve düşük maliyetli alternatiflerdir. Hibrit süperkapasitörlerin performansı, kullanılan elektrot ve elektrolit malzemelerine bağlı olarak değişir. Son yıllarda, nanoyapılı karbon malzemeler, geçiş metali oksitleri ve MXene (MXene'ler, iki boyutlu geçiş metali karbürleri, nitrürleri veya karbonitrürleri içeren yenilikçi malzemelerdir) gibi yeni nesil malzemeler, hem anotta hem de katotta kullanılarak cihazların güç ve enerji yoğunluğu,artırmak için araştırılmaktadır.Ayrıca, hibrit süperkapasitörler, 10.000 çevrim ve üzeri uzun ömürleriyle dikkat çekerler dolayısıyla uzun vadeli enerji depolama uygulamalarında kullanılabilir [33].

Hibrit süperkapasitörler, süperkapasitörlerin yüksek güç yoğunluğu ile bataryaların yüksek enerji yoğunluğunu bir araya getirerek, yeni nesil enerji depolama teknolojilerinde kritik bir bileşen haline gelmiştir. Bu özellikleri sayesinde, hem yüksek performans hem de uzun ömür sunarak farklı uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Gelişen malzeme bilimi ve tasarım stratejileriyle birlikte, hibrit süperkapasitörlerin gelecekte daha da yaygınlaşması ve performanslarının artması beklenmektedir [34].

2.2. Süperkapasitörlerin Kullanım Alanları

Enerji depolama alanında giderek daha fazla kullanılan süperkapasitörler, uzun ömür, hızlı şarj/deşarj yeteneği ve yüksek güç yoğunluğu gibi avantajlar sunmaktadır. Günümüzde süperkapasitörler, hem geleneksel bataryalara alternatif hem de tamamlayıcı olarak birçok farklı uygulama alanında yer almaktadır. Son yıllarda ise malzeme geliştirme ve yeni cihaz tasarımlarıyla ilgili gelişmeler yaşanmıştır. Süperkapasitörler, enerji depolama ve anlık güç sağlayabilmeleri sayesinde birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Taşınabilir elektronik cihazlarda, ani enerji taleplerini karşılayarak akıllı telefonlar, dizüstü bilgisayarlar ve giyilebilir cihazlar gibi ürünlere hızlı şarj avantajı sunmaktadır. Süperkapasitörler, kısa süreli enerji depolama sağlamak ve yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerji dalgalanmalarını dengelemek amacıyla enerji depolama ve şebeke uygulamalarında kullanılmaktadır.Süperkapasitörler, endüstriyel ve tıbbi sistemlerde güç yedekleme ve acil enerji kaynağı sağlama gibi kritik görevlerde tercih edilir. Ayrıca, özellikle rüzgar ve güneş enerjisi gibi değişken kaynaklarla enerji arz ve talebi arasındaki uyumu sağlama noktasında oldukça etkilidir. [35].

Süperkapasitörlerin performans ve dayanıklılığını artırmak amacıyla malzeme bilimi ve cihaz tasarımı üzerine yoğun çalışmalar yürütülmektedir. Karbon bazlı nanomalzemeler,

metal oksitler, iletken polimerler ve MXene gibi yenilikçi elektrot malzemeler, güç ve enerji yoğunluğunu artırmak için geliştirilmiştir. Bunun yanında, mikro-süperkapasitörler, foto-süperkapasitörler (ışıkla şarj olabilen) ve kendini onarabilen cihazlar gibi yeni nesil tasarımlar ortaya çıkmaktadır. Bu yenilikçi cihazlar, farklı uygulama alanlarına özelleştirilebilir olmasıyla dikkat çekmektedir [36].

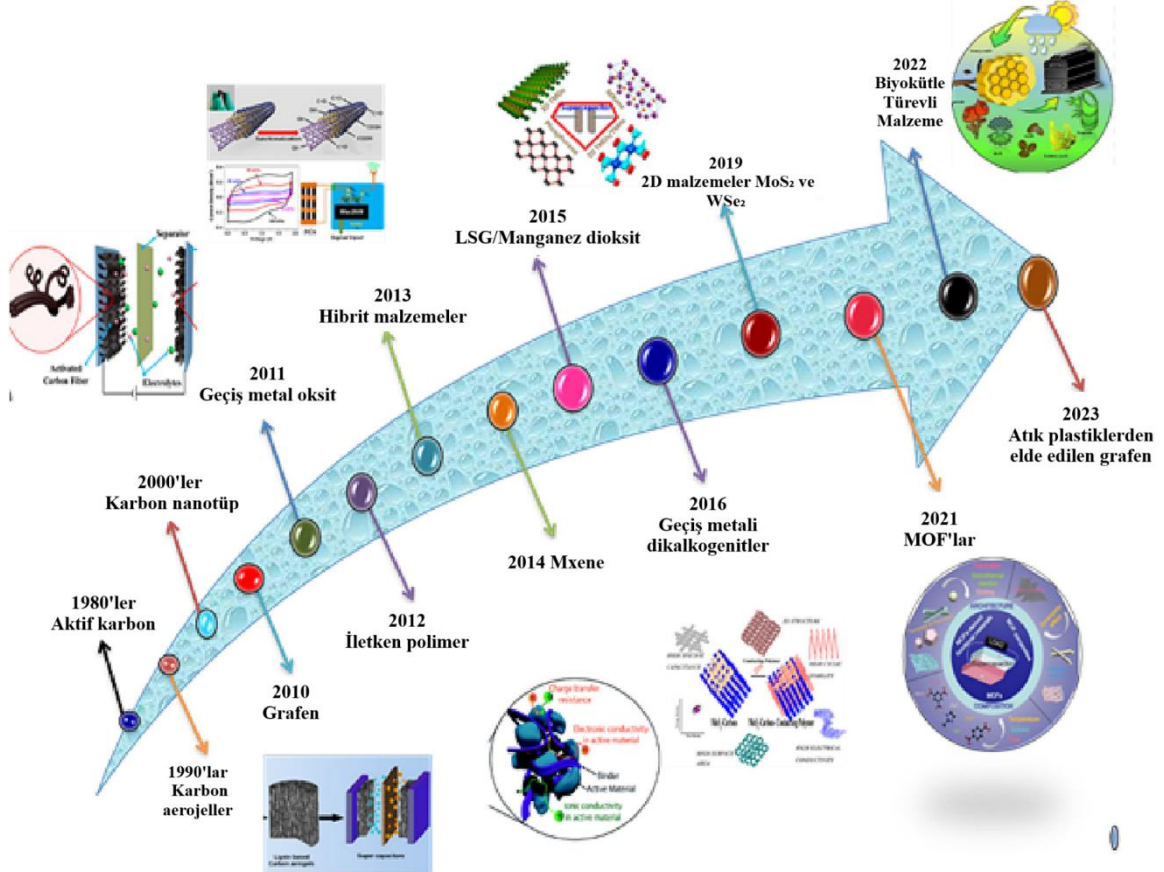
Performans ve döngü ömrü açısından yapılan çalışmalar, süperkapasitörlerin uzun vadede daha güvenilir hale gelmesini hedeflemektedir. Kapasite kaybı ve yaşlanma mekanizmaları üzerine yapılan araştırmalar, kullanıcı güvenliğini ve cihaz dayanıklılığını artırmaktadır. Ayrıca polimerlerin aktif ve pasif bileşenlerde kullanımına yönelik çalışmalar, süperkapasitörlerin enerji yoğunluğunu ve çevresel sürdürülebilirliğini geliştirmektedir. Bu, süperkapasitörlerin hem performans hem de çevre dostu teknolojiler arasındaki önemini artırmaktadır [37].

2.3. Elektrot Malzemeleri

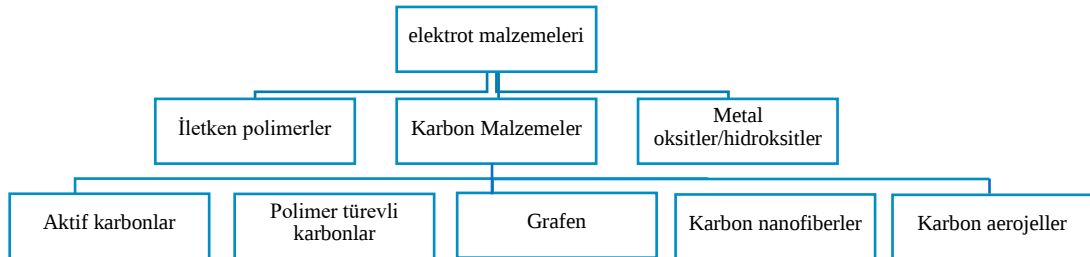
Süperkapasitörlerin performansını belirleyen en önemli bileşen, kullanılan elektrot malzemeleridir. Verimli bir süperkapasitör elektrotu, yüksek yüzey alanı, iyi elektriksel iletkenlik, gözenekli yapı ve iyon-elektron taşınımını kolaylaştıran özelliklere sahip olmalıdır. Bu amaçla, karbon bazlı malzemeler (grafen, karbon nanotüpler, aktif karbon), iletken polimerler (polipirrol, polianilin, politiyofen), metal-organik iskeleler (MOF'lar), perovskit oksitler ve geçiş metali bileşikleri (hidroksitler, oksitler, sülfidler, fosfitler) yaygın olarak tercih edilmektedir [38].

Elektrostatik çift tabaka kapasitörlerinde özellikle yüksek yüzey alanı ve kimyasal kararlılığı ile öne çıkan karbon bazlı malzemeler kullanılmaktadır. Nanoyapılı karbon malzemeler, karbon noktaları, karbon nanotüpler ve grafen gibi ileri düzey yapılarla temsil edilmektedir. süperkapasitörlerin enerji yoğunluğunu ve çevrim ömrünü artırmak amacıyla geliştirilmiştir. İletken polimerler ise esneklikleri, kolay sentezlenebilir olmaları ve düşük maliyetleri nedeniyle süperkapasitör elektrotlarında sıkça araştırılan alternatiflerdir. Metal-organik iskeleler (MOF'lar) ve perovskit oksitler, gözenekli yapıları sayesinde iyon taşınımını iyileştirerek performansı artırmaktadır. Yüksek yüzey alanı ve uzun çevrim ömrü sayesinde, özellikle Co-Mn bazlı MOF'lar öne çıkmaktadır. Ayrıca, NiMn bazlı geçiş metali bileşikleri ve bunların karbon malzemelerle oluşturulan kompozit yapıları, enerji yoğunluğu ve elektrokimyasal kararlılığı optimize etmek amacıyla geliştirilmektedir [67].

Elektrot malzemelerinin özellikleri, süperkapasitörlerin enerji ve güç yoğunluğu, çevrim ömrü ve genel performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Günümüzde, nanoyapılı, kompozit ve fonksiyonel elektrot malzemelerinin geliştirilmesi, yüksek performanslı ve sürdürülebilir enerji depolama sistemlerinin tasarımında önemli bir araştırma alanı olarak değerlendirilmektedir [41].



Şekil 2.5: Süperkapasitör elektrot malzemelerinin yıllara göre gelişimi [42].

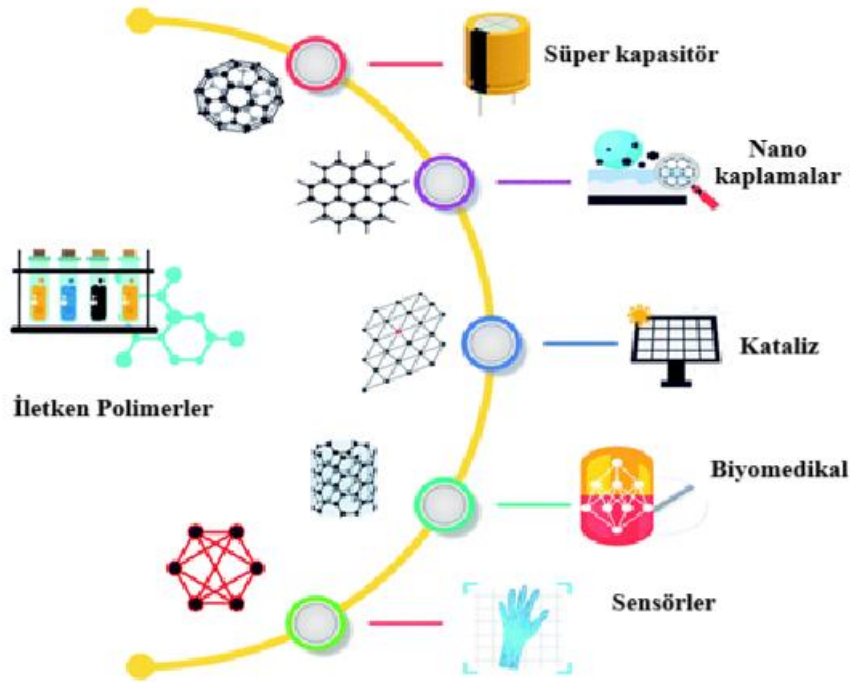


Şekil 2.6: Elektrot malzemelerinin sınıflandırılması

2.3.1. İletken polimerler

İletken polimerler, yüksek özgül kapasite, üstün elektrokimyasal aktivite, hafiflik ve esneklik gibi avantajları sayesinde süperkapasitörlerde elektrot malzemesi olarak yaygın şekilde tercih edilmektedir. İletken polimerler, poli(3,4-etilendioksitiyofen) (PEDOT), poliyofen (PTh), polipirol (PPy) ve polianilin (PANI) gibi çeşitli yapılar özellikle esnek ve gerilebilir süperkapasitörlerin geliştirilmesinde öne çıkmaktadır. Bu polimerler, yüksek iletkenlikleri ve psödokapasitif özellikleri sayesinde enerji depolama kapasitesini artırırken, cihazların mekanik dayanıklılığını ve esnekliğini de koruyabilmektedir [43].

Karbon bazlı malzemelere kıyasla, iletken polimerler daha yüksek enerji yoğunluğu ve üstün elektrokimyasal performans sunabilmektedir. N-doplu ve p-doplu formlarında elektrot olarak kullanıldıklarında, hem yüksek çalışma voltajına olanak tanır hem de elektrotların sürekli iletken durumda olmasını sağlayarak süperkapasitörlerin enerji ve güç performansını optimize eder. Grafen oksitler, karbon nanotüpler, ve metal oksitlerle kompozitleri geliştirilerek, son yıllarda iletken polimerlerin kapasitans ve çevrim ömrü açısından önemli iyileştirmeler sağladığı görülmüştür. Bunun yanı sıra, iletken polimer bazlı hidrojel ve jel yapılar, 3 boyutlu gözenekli nanoyapıları ve yüksek iletkenlikleri sayesinde esnek ve giyilebilir süperkapasitör uygulamalarında büyük bir potansiyel ortaya koymaktadır [44].



Şekil 2.7: İletken polimerlerin kullanım alanları [45]

2.2.2. Metal oksitler/hidroksitler

Metal oksitler ve hidroksitler, süperkapasitörlerde elektrot malzemesi olarak yaygın şekilde tercih edilmektedir. Bu bileşikler, cihazın performansını belirleyen en önemli özelliklerden biri olup, yüksek özgül kapasiteleri ve enerji yoğunlukları sayesinde avantaj sağlamaktadır. Geçiş metali oksitleri ve hidroksitleri, elektrolit iyonları ile gerçekleştirilen geri dönüşümlü değerlik değişimi redoks reaksiyonları aracılığıyla yük depolama kapasitesine sahiptir. Bu redoks-aktif bileşikler, özellikle yüksek kapasitans ve enerji yoğunluğu sağlama potansiyelleri nedeniyle tercih edilmektedir [46].

Ancak, metal oksitler tek başlarına kullanıldığında genellikle düşük elektriksel iletkenlik göstermektedir. İletken polimerlerle veya Karbon bazlı malzemeler kompozitler oluşturulması, elektrot performansını artırmak için yaygın olarak uygulanan bir stratejidir. Nanoyapılı ve amorf fazda sentezlenen metal oksitler ve hidroksitler, daha geniş aktif yüzey alanı ve daha iyi iyon difüzyonu sağlayarak süperkapasitör performansını önemli ölçüde iyileştirebilmektedir. Özellikle amorf metal hidroksitler, yüksek çevrim ömrü ve kapasite koruma oranları ile dikkat çekmektedir. Örneğin, amorf Ni-Co-Fe hidroksit elektrotlar, 20.000 çevrim sonunda başlangıç kapasitesinin %94'ünü koruyarak uzun ömürlü enerji depolama sistemleri için önemli bir çözüm sunmaktadır [47].

Nikel ve kobalt bazlı hidroksitler, yüksek kapasitans ve mükemmel çevrim kararlılığı ile öne çıkmaktadır. $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ve $\text{Co-Ni}(\text{OH})_2$ gibi kompozitler, yüksek özgül kapasitans değerleri (örneğin 1366 F/g) ve %96'nın üzerinde kapasite koruma oranı ile süperkapasitör uygulamalarında geniş çapta kullanılmaktadır. Ayrıca, metal oksitlerin ve hidroksitlerin morfolojisi ve yapısal özellikleri, yük depolama kapasitesini doğrudan etkilemektedir. Hidrotermal sentez ve elektrokimyasal çöktürme gibi teknikler sayesinde bu malzemelerin mikro-yapısal özellikleri optimize edilerek elektrot performansı daha da geliştirilebilmektedir. Metal oksitler ve hidroksitler yüksek enerji ve güç yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve çevre dostu yapıları ile süperkapasitör elektrot malzemeleri arasında önemli bir konuma sahiptir. Gelecekte, iletkenlik ve çevrim kararlılığını artırmaya yönelik nanoyapılı ve kompozit malzeme geliştirme çalışmaları süper kapasitör teknolojisinin ilerlemesinde merkezi bir rol oynayacaktır [48].



Şekil 2.8: Çeşitli metal kompozit bazlı elektrot malzemelerin şematik görünümü [49].

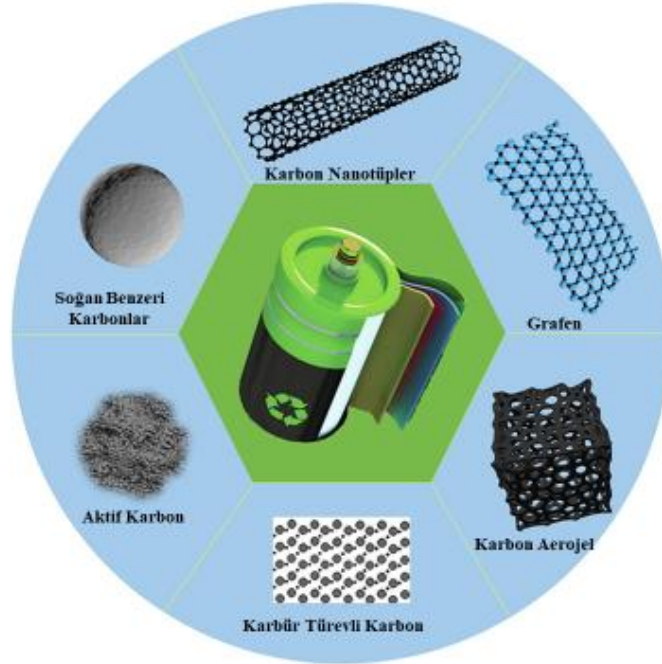
2.3.1. Elektrot Yapımında Kullanılan Karbon Malzemeler

Elektrot üretiminde süperkapasitörler için tercih edilen karbon bazlı malzemeler arasında aktif karbon (AC), karbon nanotüpler (CNT), grafen (GR), karbon nanokafesler (CNC), karbon köpük, karbon kumaş ve biyokütle türevli karbonlar önemli bir yer tutmaktadır.

Karbon bazlı elektrot materyalleri, geniş özgül yüzey alanları, yüksek elektriksel iletkenlikleri ve gözenekli yapıları sayesinde süperkapasitörlerin enerji depolama kapasitelerini ve performanslarını önemli ölçüde artırmaktadır [50].

Düşük maliyet ve sürdürülebilirlik açısından avantaj sunan biyokütle kaynaklı karbonlar, özellikle selüloz, lignin ve hemiselülozdan türetilen malzemeler ile dikkat çekmektedir. Bu karbon türleri, karbonizasyon ve aktivasyon süreçleri aracılığıyla yüzey fonksiyonel grupları elektriksel iletkenlik ve gözenek yapısı bakımından optimize edilebilmektedir. Son yıllarda, karbon bazlı malzemelerin metal oksitler veya iletken polimerlerle kompozit hale getirilmesi, özgül kapasitans ve çevrim ömrü gibi temel parametrelerde iyileştirmeler sağlamıştır. Süperkapasitör elektrotlarında, enerji depolama teknolojilerinde önemli bir rol

oynayan karbon bazlı malzemeler, uzun ömür, yüksek performans ve çevre dostu çözümler sunmaktadır [51].



Şekil 2.9: Çeşitli karbon bazlı malzemelerin yapısı [52].

2.3.1.1. Aktif karbonlar

Süperkapasitör elektrotlarının üretiminde yaygın olarak kullanılan aktif karbon, önemli bir karbon bazlı malzeme olarak öne çıkmaktadır. Genellikle biyokütle veya atık biyokütle gibi yenilenebilir kaynaklardan kimyasal ya da fiziksel aktivasyon süreçleriyle elde edilen aktif karbon, enerji depolama sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Aktif karbonun temel avantajları arasında yüksek özgül yüzey alanı, gelişmiş gözeneklilik ve yüzeydeki oksijenli fonksiyonel gruplar yer almaktadır ve bu özellikler süperkapasitörlerin elektrokimyasal performansını doğrudan etkilemektedir. Aktif karbonun geniş ve hiyerarşik gözenek yapısı, mikro ve mezogözeneklerin bir arada bulunması sayesinde iyon taşınımını ve depolanmasını kolaylaştırarak elektrot malzemesi olarak etkinliğini artırmaktadır. Özellikle KOH ile aktive edilen biyokütle türevli aktif karbonlar, yüksek özgül kapasitans ve uzun çevrim ömrü gibi üstün elektrokimyasal performans sergileyerek enerji depolama sistemlerinin verimliliğini artırmaktadır. Ayrıca, aktif karbon yüzeyinde bulunan oksijen içeren fonksiyonel gruplar, elektrot-elektrolit arayüzünde hızlı ve tersinir redoks

reaksiyonlarını destekleyerek cihazın kapasitesini daha da iyileştirmektedir. Bu özellik, süperkapasitörlerin hem özgül enerji hem de güç yoğunluğu açısından daha yüksek performans göstermesini sağlamaktadır [53].

Endüstriyel ölçekte geniş bir kullanım alanı bulan aktif karbon, düşük maliyetli üretim süreçleri, çevre dostu özellikleri ve yüksek elektrokimyasal performansı nedeniyle süperkapasitör teknolojisinin temel elektrot malzemelerinden biridir. Son yıllardaki araştırmalar, aktif karbonun gözenek yapısının ve yüzey kimyasının optimize edilmesiyle enerji yoğunluğunun ve çevrim ömrünün daha da artırılabilirliğini göstermektedir [54].

2.3.1.2. Karbon Nanotüpler.

Karbon nanotüpler (CNT'ler), süper kapasitör elektrotlarında yaygın olarak tercih edilen karbon bazlı malzemelerdir. Bu tercihin temelinde, CNT'lerin yüksek elektriksel iletkenliği, geniş yüzey alanı, üstün mekanik dayanımı ve fonksiyonelleştirilebilir yüzey özellikleri yatmaktadır. Mezogözenekli yapıları sayesinde, iyonların elektrot-elektrolit arayüzüne erişimi kolaylaşmakta, bu da elektriksel çift tabaka oluşumunu ve hızlı yük transferini desteklemektedir. Dolayısıyla, CNT'ler yalnızca elektrostatik çekim mekanizmasıyla iyon depolamakla kalmayıp, yüzey fonksiyonelleştirmesi sayesinde psödo faradik reaksiyonları da hızlandırabilmektedir. Bu malzemelerin özgül kapasitans değerleri, nanotüp tipi ve uygulanan işlem koşullarına bağlı olarak geniş bir aralıkta (4–135 F/g) değişmektedir. Yüzey alanları orta seviyede ($470 \text{ m}^2/\text{g}$ altında) olmasına rağmen, mezogözenekli yapıları sayesinde yüksek performanslı elektrot malzemeleri olarak öne çıkmaktadırlar [55].

Bunun yanı sıra, CNT'ler esnek süper kapasitör elektrotları için de dikkate değer avantajlar sunmaktadır. Lif, film, aerogel ve sünger gibi çeşitli makroskopik yapılar oluşturma kapasitesine sahip olan CNT'ler, bükülebilirlik, gerilebilirlik ve uzun döngü ömrü gibi gelişmiş mekanik özellikler sergileyerek taşınabilir ve giyilebilir elektroniklerde ideal elektrot malzemeleri haline gelmektedir. Ayrıca, yüzey morfolojisinin ve fonksiyonelleştirilmesinin optimizasyonu ile elektrokimyasal performans daha da artırılabilir. Örneğin, azot katkılı veya kırışık yüzeyli CNT'ler, daha geniş aktif alan ve geliştirilmiş elektrolit etkileşimi sağlayarak kapasitans ve çevrim ömrünü iyileştirebilir [56].

CNT'ler ayrıca metal oksitler ve diğer aktif malzemelerle hibrit yapılar oluşturarak elektrot performansını daha da artırabilir. Süper kapasitör teknolojisinin gelişimine önemli katkılar sunan bu tür kompozit elektrotlar, güç yoğunluğu ve yüksek enerji yoğunluğunun yanı sıra uzun döngü ömrü gibi gelişmiş elektrokimyasal özellikler sergilemektedir. Sonuç olarak, karbon nanotüpler, süper kapasitör elektrotlarında yüksek performans, esneklik ve mekanik dayanıklılığı bir araya getiren çok yönlü ve etkili karbon bazlı malzemeler arasında yer almaktadır [57].

2.3.1.3. Karbon Nanofiberler

Karbon nanofiberler (KNF'ler), süperkapasitör elektrotlarında yaygın olarak kullanılan ileri düzey karbon bazlı malzemeler arasında yer almaktadır. Üstün elektriksel iletkenlik ve yüksek özgül yüzey alanı, kimyasal ve mekanik stabilite, hafiflik ve esneklik gibi avantajları sayesinde, süperkapasitörlerin performansını önemli ölçüde artırmaktadır. KNF'lerin üretimi genellikle elektrospindleme, karbonizasyon ve çeşitli aktivasyon yöntemleriyle gerçekleştirilmekte olup, bu süreçler liflerin gözenek yapısını ve yüzey alanını optimize ederek elektrot performansının iyileştirilmesini sağlamaktadır. Gözenekli ve dallanmış yapı, iyonların hızlı taşınmasını ve elektrot-elektrolit arayüzünde etkin yük depolanmasını kolaylaştırarak yüksek enerji ve güç yoğunluğuna katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, heteroatom katkılama (örneğin azot ve fosfor) veya metal oksitlerle (örneğin Co_3O_4 , Ni-Co LDH) modifikasyon gibi ileri düzey stratejiler, KNF'lerin özgül kapasitans ve enerji yoğunluğunu daha da artırmaktadır. Özellikle, azot katkılı veya biyokütle kaynaklı KNF'ler, çevre dostu ve sürdürülebilir elektrot malzemeleri olarak öne çıkmaktadır [58].

KNF tabanlı elektrotlar, 330–680 F/g aralığında özgül kapasitans, %74–97 oranında kapasite koruma ile uzun döngü ömrü ve yüksek enerji ve güç yoğunluğu gibi üstün elektrokimyasal özellikler sergileyerek, süperkapasitör uygulamalarında kullanılır. Ayrıca, esnek ve kendini taşıyan KNF elektrotlar, özellikle katı-hal ve esnek süperkapasitörler için oldukça uygun yapıdadır. Karbon nanofiberler, süperkapasitör elektrotlarında yüksek performans, çevre dostu üretim süreçleri ve esneklik gibi kritik avantajlarıyla öne çıkmakta olup, ileri düzey enerji depolama teknolojilerinde büyük bir potansiyele sahiptir [59].

2.1.1.4. Karbon Aerojeller

Karbon arojeller, süperkapasitör elektrotlarında yaygın olarak kullanılan üç boyutlu karbon bazlı malzemeler olup, gelişmiş gözenek yapısı ve yüksek özgül yüzey alanı sayesinde enerji depolama kapasitesini önemli ölçüde artırmaktadır. Elektriksel çift tabaka kapasitörlerindeki (süperkapasitörler) performanslarını optimize eden bu malzemeler, genellikle biyokütle kaynaklarından (örneğin nişasta, bambu selülozu, bagas, kitin gibi) veya resorsinol-formaldehit gibi polimerlerden türetilmekte ve karbonizasyon ile aktivasyon işlemlerine tabi tutulmaktadır. Karbon arojellerin mikrogözenekli ve mezogözenekli yapısı, iyon taşınımını hızlandırarak güç yoğunluğu ve yüksek enerjiyi mümkün kılmaktadır. Örneğin, nişasta bazlı karbon arojeller 1349 m²/g gibi yüksek yüzey alanına, %43,7 oranında mikrogözenek içeriğine sahip olup, 10.000 çevrim sonunda %98,91 kapasite koruması sağlamaktadır. Benzer şekilde, bambu selülozundan elde edilen karbon arojeller, KOH aktivasyonu ile 381 F/g özgül kapasitans değerine ulaşabilir ve yüksek tarama hızlarında dahi %90 kapasite koruması sergileyebilir [60].

Aktivasyon yöntemleri (kimyasal veya fiziksel) karbon arojellerin gözenek yapısını ve yüzey alanını kontrol etmekte kritik bir rol oynamaktadır. Örneğin, CO₂ ile fiziksel aktivasyon sonucu elde edilen karbon arojeller 2503 m²/g gibi yüksek yüzey alanlarına ulaşabilir ve 3000 çevrim sonunda %93,2 kapasite koruması sağlayabilir. Kitin bazlı azot katkılı karbon arojeller ise, 2540 m²/g yüzey alanı ve 15.000 çevrim sonunda %98,44 kapasite koruması ile dikkat çekmektedir. Karbon arojeller, sürdürülebilir kaynaklardan üretilmesi, geniş gözenek yapısı, yüksek yüzey alanı ve güçlü elektriksel iletkenlik gibi avantajları sayesinde süperkapasitör elektrotlarında uzun ömür ve yüksek performans sağlayan yenilikçi karbon malzemeleridir [61].

2.1.1.5. Polimer Türevli Karbonlar

Süperkapasitör elektrotlarında kullanılan karbon temelli malzemeler arasında yer alan polimer türevli karbonlar (PTK), yüksek elektriksel iletkenlik gözenekli yapı ve kimyasal stabilite gibi avantajları sayesinde enerji depolama teknolojilerinde önemli bir rol üstlenmektedir. Çeşitli polimerlerin kontrollü karbonizasyonu ile elde edilen PTK'lar, bu süreç sayesinde malzemenin özgül yüzey alanını, gözenek yapısını ve elektriksel özelliklerini optimize ederek elektrokimyasal performansını artırmaktadır [62].

Polimerlerin yapısal çeşitliliği, PTK'ların farklı nanoyapılar ve yüzey özellikleriyle sentezlenmesini mümkün kılmakta olup, bu durum onları yüksek performanslı elektrot malzemeleri için cazip hale getirmektedir. Düşük maliyetli, geniş çapta bulunabilen ve istenilen gözenek yapısına uyarlanabilen bu malzemeler, süperkapasitörlerde yüksek özgül yüzey alanı, hızlı iyon ve elektron transferi ile güç yoğunluğu, yüksek enerji elde edilmesini sağlamaktadır. PTK'lar, sentez ve aktivasyon yöntemlerine bağlı mikro, mezo ve makro gözenekli yapılar oluşturabilmekte olup, bu hiyerarşik gözenekli yapı, elektrotun elektrokimyasal performansını artırmaktadır. Örneğin, karbon nanosheetler veya iç içe geçmiş polimer ağlarından türetilen karbonlar, yüksek özgül kapasitans, hızlı şarj-deşarj kabiliyeti ve uzun çevrim ömrü sunarak süperkapasitörlerin verimliliğini yükseltmektedir. Polimer türevli karbonlar, yüksek performans, uzun çevrim ömrü ve maliyet etkinliği gibi avantajlarıyla süperkapasitör elektrotları için önemli bir alternatif oluşturmakta olup, yapısal olarak ayarlanabilir ve fonksiyonelleştirilebilir özellikleri sayesinde enerji depolama teknolojilerinde geleceğin malzemeleri arasında yer almaktadır [63].

2.1.1.6. Grafen

Grafen, süperkapasitör elektrotlarında kullanılan en dikkat çekici karbon bazlı malzemelerden biri olup, olağanüstü elektriksel iletkenliği, kimyasal stabilitesi ve mekanik dayanıklılığı ile enerji depolama sistemleri için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Teorik olarak $2600 \text{ m}^2/\text{g}$ kadar yüksek özgül yüzey alanı bulundurması, iyonların elektrot yüzeyine etkin bir şekilde ulaşmasını sağlamakta ve bu durum, süperkapasitörlerin yüksek kapasitans ve hızlı şarj-deşarj performansı göstermesine olanak tanımaktadır [64].

Grafenin süperkapasitörlerde farklı yapısal formlarda kullanımı mümkündür. Grafen köpükleri, ince filmler, nanolifler ve nanoparçacıklar gibi çeşitlilik gösteren konfigürasyonlar, elektrot performansını optimize etmek için çeşitli tasarım ve sentez stratejilerinin geliştirilmesine imkân tanımaktadır. Özellikle gözenekli grafen yapıları, elektrolit iyonlarının elektrotun iç yüzeylerine etkin bir şekilde difüze olmasını sağlayarak hem gravimetrik hem de volumetrik kapasitansın artırılmasına katkı sağlamaktadır. Ancak, grafenin tabakalarının üst üste gelerek yeniden istiflenmesi, yüzey alanının azalmasına ve böylece elektrokimyasal performansın düşmesine neden olmaktadır. Bu problemi çözmek için grafen, metal oksitler, iletken polimerler veya karbon nanotüpler gibi malzemelerle kompozit hale getirilerek hem mekanik dayanım hem de elektrokimyasal performans

açısından iyileştirilmektedir. Süperkapasitör teknolojisinde önemli bir yere sahip olan grafen tabanlı elektrotlar, yüksek güç ve enerji yoğunluğu, uzun döngü ömrü ve esneklik gibi avantajlarıyla ileri düzey enerji depolama uygulamalarında büyük bir potansiyel sunmaktadır. [65].

2.4. Elektrolit Malzemeler

Süperkapasitörlerin verimli çalışabilmesi için uygun elektrolit malzemelerinin seçimi kritik bir öneme sahiptir. Elektrolitler, iyonların elektrotlar arasında taşınmasını sağlayarak enerji depolama ve boşaltma süreçlerinde temel bir rol oynar. Süperkapasitörlerde kullanılan elektrolitler genel olarak üç ana kategoriye ayrılmaktadır: sulu (aqueous), organik ve iyonik sıvı (ionic liquid) elektrolitler. Sulu elektrolitler, yüksek iyonik iletkenlikleri ve güvenlikleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Potasyum hidroksit (KOH) ve sodyum sülfat (Na_2SO_4) gibi elektrolitler, elektrot malzemeleriyle birlikte yüksek özgül kapasitans ve uzun çevrim ömrü sunmaktadır. Düşük maliyetli ve çevre dostu olmaları sebebiyle avantaj sağlarlar da, sınırlı çalışma voltajları nedeniyle süperkapasitörlerin enerji yoğunluğunu düşürebilmektedir [66].

Organik elektrolitler, daha yüksek çalışma voltajlarına olanak tanıyarak süperkapasitörlerin enerji yoğunluğunu artırmaktadır. Bununla birlikte, organik çözücüler genellikle uçucu, toksik ve çevreye zararlı olabileceğinden, kullanımları belirli uygulamalarla sınırlı kalmaktadır. İyonik sıvı elektrolitler, hem yüksek çalışma voltajı hem de üstün termal ve kimyasal stabilite sunmaktadır. Esnek ve katı hal süperkapasitörlerinde tercih edilen bu elektrolitler, yüksek viskozite ve düşük iyonik iletkenlik gibi dezavantajlar içerebilir. Ancak, son yıllarda geliştirilen düşük maliyetli ve çevre dostu iyonik sıvılar bu sorunları gidermeye yönelik önemli ilerlemeler kaydetmektedir [67].

Buna ek olarak, katı hal ve jel polimer elektrolitler, esnek ve giyilebilir süperkapasitörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Polietilen glikol (PEG) ve Polivinil alkol (PVA) benzeri polimerler ile hazırlanan hidrojel elektrolitler, yüksek iyonik iletkenlik ve mekanik dayanıklılık sunarak cihazın bükülme ve mekanik zorlanma altında dahi performansını korumasını sağlamaktadır. Süperkapasitörlerde kullanılan elektrolit malzemeleri, döngü ömrü, enerji yoğunluğu, güvenlik ve uygulama alanı açısından farklı avantajlar ve dezavantajlar sunmaktadır. Sulu, organik, iyonik sıvı ve jel polimer elektrolitler,

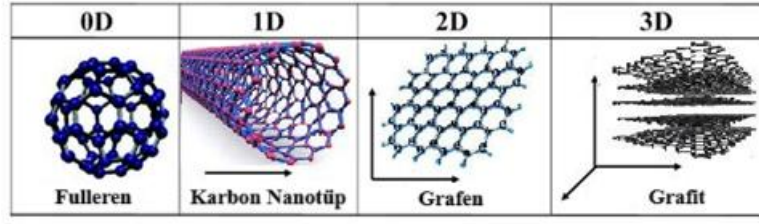
süperkapasitörlerin performansını belirleyen temel bileşenler olarak değerlendirilmektedir [68].

2.5. Elektrot Performansını Etkileyen Faktörler

Süper kapasitörlerde elektrot performansını belirleyen temel faktörler arasında elektrot malzemesinin bileşimi, morfolojisi ve yapısal özellikleri yer almaktadır. Elektrot malzemesinin nano ölçekteki yapısı, iyon depolama ve taşınım mekanizmalarına daha fazla aktif alan sağlayarak özgül kapasitans, döngü ömrü ve güç yoğunluğu, enerji yoğunluğu gibi kritik parametrelerin iyileştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Özellikle, sıfırdan üç boyuta kadar farklı nanoyapı tasarımları, iyon transfer kinetiğini optimize ederek süperkapasitörlerin genel verimliliğini artırmaktadır [69].

Performans üzerinde önemli bir rol oynayan elektrotun gözenekli yapısı, iyonların hareketini kolaylaştırarak kapasite ve iletkenlik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Hiyerarşik bir makro, mezo ve mikrogözenek dağılımı, iyonların hızlı taşınmasını ve depolanmasını kolaylaştırarak elektrokimyasal etkinliği artırmaktadır. Makrogözenekler, elektrolit iyonlarının difüzyon mesafesini azaltarak hızlı taşınım sağlarken; mezogözenekler, iyon hareketliliğini hızlandırmakta ve mikrogözenekler ise yüzey etkileşimlerini güçlendirerek toplam kapasiteyi iyileştirmektedir [70].

Buna ek olarak, elektrot yüzeyinde bulunan heteroatomlar, yapısal kusurlar ve yüzey fonksiyonel grupları da elektrokimyasal performans üzerinde etkili olmaktadır. Heteroatom katkılama, yüzeydeki aktif bölgeleri artırarak iyonların elektrot yüzeyine daha güçlü tutunmasını sağlamakta ve yük transfer kinetiğini iyileştirmektedir. Elektrotun elektriksel iletkenliği, kimyasal kararlılığı ve mekanik dayanıklılığı ise yüksek performans ve uzun döngü ömrü için kritik öneme sahiptir. Son olarak, hibrit elektrot malzemelerinin kullanımı, farklı malzemelerin sinerjik etkilerinden yararlanarak süperkapasitörlerin performansını daha da artırabilmektedir. Metal oksitler, karbon bazlı malzemeler ve iletken polimerlerin kombinasyonu, iyi iletkenlik ve yüksek yüzey alanı sağlayarak özgül kapasitans ve çevrim ömrünü iyileştirmekte, böylece süperkapasitörlerin enerji ve güç yoğunluğu yönünden daha verimli olmasına katkı sağlamaktadır. Süperkapasitörlerde elektrot performansını belirleyen başlıca faktörler; malzeme bileşimi, nanoyapı mimarisi, gözenekli yapı, yüzey özellikleri ve hibrit malzeme tasarımıdır. Bu parametrelerin optimize edilmesi, yüksek performanslı ve uzun ömürlü süperkapasitörlerin geliştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır [71].



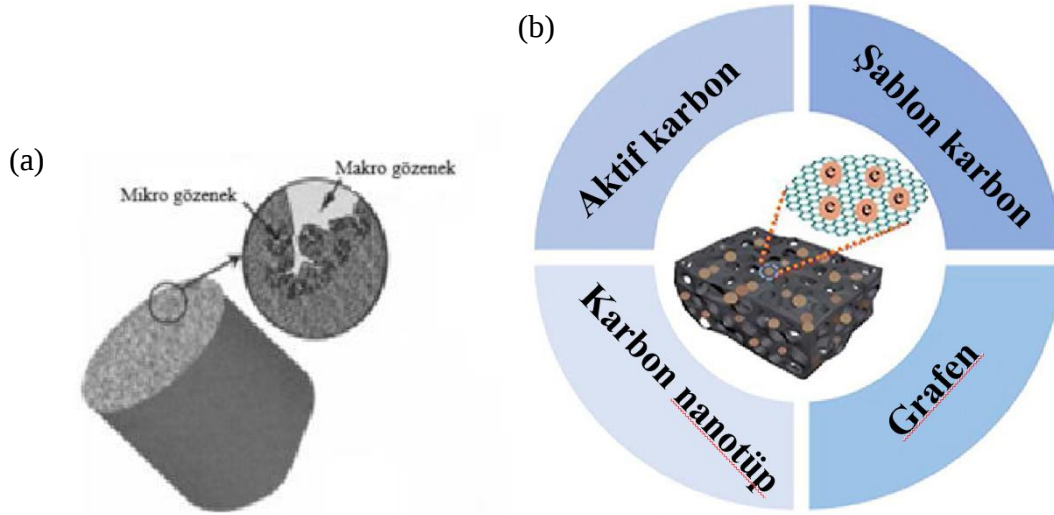
Şekil 2.10: 0D, 1D, 2D ve 3D karbon nanoyapılara örnekler [70]

2.5.1. Karbon Gözenekliliği

Karbonun gözenekliliği, süper kapasitör elektrotlarının elektrokimyasal performansını belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Yüksek gözenekliliğe sahip karbon malzemeleri, geniş özgül yüzey alanı sağlayarak iyonların depolanabileceği daha fazla aktif bölge sunmakta ve böylece elektrotların özgül kapasitansını ve enerji yoğunluğunu artırmaktadır.

Gözenek yapısının hiyerarşik olarak düzenlenmesi, hem iyon depolama kapasitesini hem de iyonların hızlı taşınmasını optimize etmektedir. Mikro gözenekler, aktif bölgelerin artmasını sağlayarak enerji yoğunluğunu yükseltirken; mezo ve makro gözenekler, elektrolit iyonlarının hızlı difüzyonunu destekleyerek hızlı şarj/deşarj ve yüksek güç yoğunluğu performansı sunmaktadır. Elektrot içindeki gözenek boyutlarının ve dağılımının uyumlu şekilde tasarlanması, hem gravimetrik hem de hacimsel enerji yoğunluğunu olumlu yönde etkilemekte ve uzun çevrim ömrü sağlamaktadır [72].

Bununla birlikte, aşırı geniş gözenekler elektrot yoğunluğunu azaltabilir ve pratik uygulamalarda hacimsel performansı düşürebilir. Bu nedenle, gözenek boyutunun optimize edilmesi, süperkapasitörlerin güç ve enerji yoğunluğunu kararlı bir şekilde artırmak açısından kritik bir gereksinimdir. Yüksek gözenekliliğe sahip karbon malzemeleri, elektriksel iletkenlik ve mekanik stabilite açısından da avantaj sunarak uzun çevrim ömrü ve yüksek verimlilik sağlamaktadır. Karbonun gözenekliliği, süperkapasitör elektrotlarının iyon depolama kapasitesini, hızlı iyon taşınımını, yüksek özgül kapasitansını ve çevrim ömrünü doğrudan etkileyen temel bir parametredir. Gözenek yapısının kontrollü tasarımı, yüksek performanslı süperkapasitör elektrotlarının geliştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır [73].

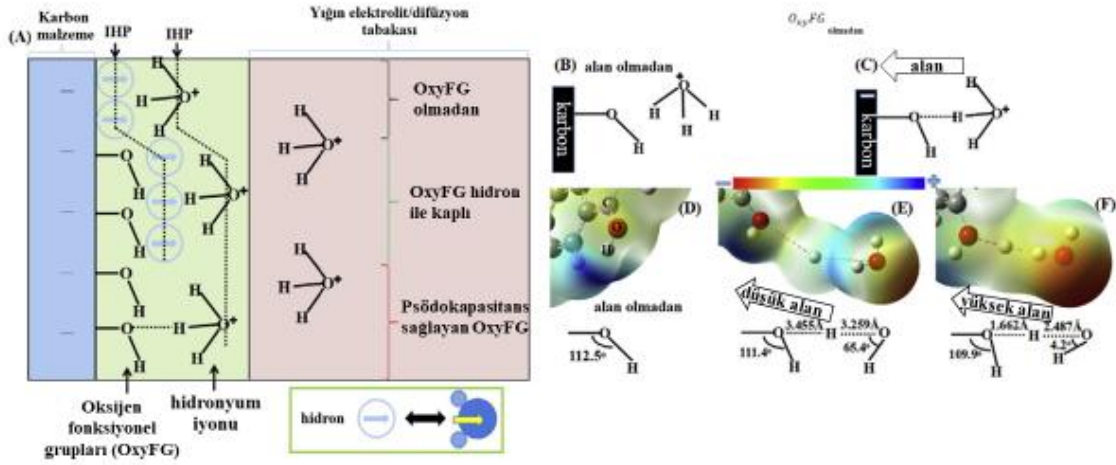


Şekil 2.11: (a) Gözenekli karbon malzemeler [149], **(b)** Karbon gözenekliliği [75]

2.5.2. Yüzey fonksiyonel grupları

Elektrot yüzeyinde bulunan fonksiyonel gruplar, süperkapasitör elektrotlarının performansını doğrudan etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Oksijen, azot ve fosfor gibi heteroatom içeren fonksiyonel gruplar, elektrotun elektriksel iletkenliğini, gözenek yapısını, elektrolitle olan etkileşimini ve iyon iletim mekanizmalarını şekillendirerek cihazın elektrokimyasal performansını belirlemektedir. Özellikle oksijenli fonksiyonel gruplar (karboksil, karbonil, hidroksil gibi), elektrot yüzeyinin ıslanabilirliğini artırarak elektrolit iyonlarının gözeneklere daha kolay difüze olmasını sağlamakta ve böylece özgül kapasitansın yükselmesine katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, bu grupların varlığı elektrot yüzeyinde ek bir psödokapasitans mekanizması oluşturarak toplam enerji depolama kapasitesini artırmaktadır. Bununla birlikte, yüzeyde aşırı miktarda oksijenli grup bulunması gözeneklerin tıkanmasına ve elektrokimyasal performansın düşmesine yol açabileceğinden, fonksiyonel grup miktarının dikkatli bir şekilde dengelenmesi gerekmektedir. Azotlu fonksiyonel gruplar ise (örneğin grafit-N ve kuaterner-N gibi türler), elektron transfer kinetiğini hızlandırarak yüksek akım yoğunluklarında daha iyi performans sağlamaktadır. Azot katkılı elektrotlar, elektriksel iletkenliği artırmakta ve uzun çevrim ömrü boyunca yüksek kapasite korunumu sunmaktadır. Benzer şekilde, fosforlu fonksiyonel gruplar, yüzeyde polifosfat yapılarının oluşumu yoluyla elektrotun enerji depolama kapasitesini iyileştiren bir etkiye sahiptir [76].

Fonksiyonel grupların varlığı, elektrot malzemesinin kimyasal stabilitesi ve çevrim ömrü üzerinde belirleyicidir. Hidroksil ve karboksil grupları elektrotun oksidasyonunu önleyerek uzun süreli kararlılık sağlamakta ve süperkapasitörün çevrimsel dayanıklılığını artırmaktadır. Süperkapasitör elektrotlarında fonksiyonel grupların türü, miktarı ve dağılımı, kapasite, iletkenlik, çevrim ömrü ve genel performans üzerinde önemlidir. Fonksiyonel grup mühendisliği ile optimize edilen elektrot yüzeyleri, uzun süreli performans sunan ve yüksek enerji depolama kapasitesi süperkapasitörlerin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır [77].



Şekil 2.12: Süperkapasitörlerde karbon yüzeyindeki oksijen fonksiyonel gruplarının kapasitif mekanizması

(A) Asidik sulu elektrolitlerde oksijen fonksiyonel gruplarına sahip karbon malzemelerin yüzeyinde elektrokimyasal çift katman modeli: Karbon malzemenin katot olduğu ve yüzeyinin negatif yüklü olduğu varsayılır; karbon yüzeyinin etrafındaki elektrolitte hidronyum iyonları (H_3O^+) bulunur; OxyFG'nin redoks reaksiyonu oluşturamadığı yerlerde, hidronlar iç Helmholtz tabakasını (IHP) oluşturur ve elektrik alanları altında polarize olabilirler; Bu arada, H_3O^+ elektrotun tüm yüzeyinde dış Helmholtz tabakası oluşturur; H_3O^+ 'taki pozitif yük merkezinin tercihli yönelimi negatif karbon yüzeyine yakındır; OxyFG'nin redoks reaksiyonu oluşturabildiği diğer yerlerde, hidroksil grubu üzerindeki O atomu H_3O^+ 'taki H atomlarından biriyle bağ oluşturur;

(B) Elektrik alanı uygulanmadığında hidroksil ve H_3O^+ arasında bağ oluşmaz;

(C) Elektrik alanı altında hidroksil ve H_3O^+ arasında bir bağ oluşumu; (DeF) Elektron bulutu dağılımları, sıfır-alt-yüksek alanlar altında bu makromoleküldeki bağ uzunluğu ve bağ açısındaki değişiklikler.

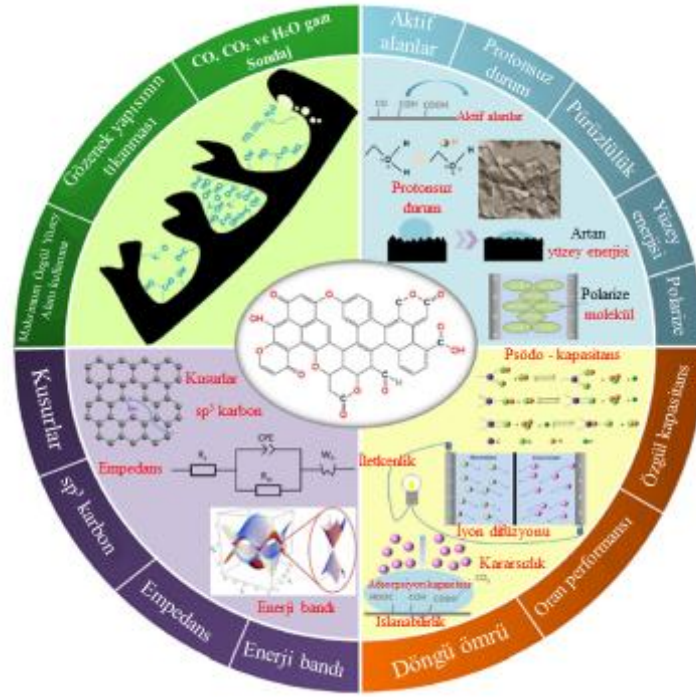
2.5.2.1. Oksijen

Oksijen, süper kapasitör elektrotlarının elektrokimyasal performansını belirleyen önemli faktörlerden biridir. Elektrot malzemelerinde bulunan karboksil, karbonil ve hidroksil gibi oksijen içeren fonksiyonel gruplar, gözenekli yüzeyin ıslanabilirliğini artırarak elektrolit iyonlarının elektrot yapısına daha etkin şekilde difüze olmasını sağlamaktadır. Bu mekanizma, iyon taşınımını kolaylaştırarak özgül kapasitansın yükselmesine katkıda bulunmakta ve ek olarak psödokapasitans etkisiyle enerji depolama kapasitesini artırmaktadır. Ancak, aşırı oksijen içeriği gözeneklerin tıkanmasına neden olarak elektrokimyasal performansın düşmesine yol açabileceğinden, yüzey kimyasında oksijen miktarının optimum seviyede dengelenmesi gerekmektedir. Bu dengeleme, uygun sıcaklıkta gerçekleştirilen tavlama işlemi ile sağlanarak elektrotun performansı optimize edilebilmektedir [78].

Bunun yanı sıra, elektrot malzemelerinde oksijen vakanslarının oluşturulması, performans iyileştirme çalışmalarındandır. Oksijen vakansları, malzemenin elektriksel iletkenliğini artırmakta, iyon difüzyon kinetiğini iyileştirmekte ve elektrokimyasal reaksiyon mekanizmalarını hızlandırmaktadır. Böylece, elektrotlar daha yüksek özgül kapasitans, uzun çevrim ömrü ve artırılmış enerji yoğunluğu sergileyebilmektedir. Oksijen vakansları aynı zamanda yüzeydeki aktif bölge yoğunluğunu artırarak redoks reaksiyonlarını kolaylaştırmakta ve elektrotun yapısal stabilitesini güçlendirmektedir [79].

Sonuç olarak, oksijenin süperkapasitör elektrotlarının performansına etkisi hem fonksiyonel gruplar hem de oksijen vakansları üzerinden çift yönlü olarak gerçekleşmektedir. Elektrot malzemelerinde oksijen içeriğinin ve dağılımının kontrollü optimizasyonu, enerji

depolamakapasitesini, elektriksel iletkenliği ve çevrim ömrünü artırarak süperkapasitörlerin yüksek verimli çalışmasını sağlamaktadır [80].



Şekil 2.13: Oksijen içeren fonksiyonel grupların karbon malzemeler üzerindeki etki faktörlerinin şematik diyagramı [81].

2.5.2.2. Azot

Süperkapasitörlerde kullanılan karbon bazlı elektrotların performansını artırmada önemli bir rol oynayan azot dopingi, yüzey kimyasını ve elektriksel özellikleri iyileştirerek kapasite ve iletkenlik üzerinde olumlu etkiler yaratmaktadır. Azot atomlarının karbon yapısına dahil edilmesi, elektrotun yüzey kimyasını ve gözenekli yapısını değiştirerek, daha fazla elektroaktif alan ve daha iyi iyon iletkenliği sağlar. Bu değişiklikler, elektrotun özgül yüzey alanını artırarak daha fazla yük depolama kapasitesi sunar. Ayrıca, azotun varlığı, karbon iskeletinde yeniden düzenlemelere yol açarak yapısal kararlılığı artırır ve pirrolik-N, kuaterner-N, grafitik-N gibi çeşitli azot fonksiyonel gruplarının oluşumunu teşvik eder. Bu fonksiyonel gruplar, özellikle yüksek akım yoğunluklarında elektron transferini kolaylaştırarak elektrotun enerji depolama performansını iyileştirir [82].

Azotun farklı konfigürasyonları, elektrot performansını çeşitli mekanizmalarla etkileyebilir. Örneğin, pirrolik azot grupları yüksek adsorpsiyon enerjisine sahip olup yük depolama

kapasitesini artırırken, grafitik azot grupları iyon yanıt süresini hızlandırarak elektrotun güç yoğunluğunu optimize eder. Bu nedenle, azot türü ve konsantrasyonu, süperkapasitörün yüksek frekanslı performansı ve genel enerji yoğunluğu üzerinde belirleyici bir rol oynar. Yüksek azot içeriğine sahip gözenekli karbon malzemeler, özgül kapasitans ve çevrim ömrü açısından üstün performans sergilemektedir. Örneğin, azot katkılı elektrotlar, uzun döngü ömrü ve yüksek kapasite koruması ile dikkat çeker; 20.000 şarj/deşarj döngüsünden sonra %83,2 kapasite koruması gibi yüksek dayanıklılık gösterebilir. Azot dopingi, karbon bazlı elektrotların yüzey alanını, gözenekliliğini, elektriksel iletkenliğini ve elektroaktif alanlarını optimize ederek süperkapasitörlerin döngü ömrünü ve enerji depolama kapasitesini önemli ölçüde iyileştirmektedir. Azotun türü, miktarı ve karbon yapısındaki dağılımı, süperkapasitör elektrotlarının verimliliğini artırmada kritik parametrelerdir [83].

2.5.3. Hidrofobik Yüzey modifikasyonu

Süperkapasitör elektrotlarının performansını belirleyen önemli faktörlerden biri, yüzeyin hidrofobik veya hidrofilik karakteridir. Hidrofobik yüzeyler, elektrot-elektrolit etkileşimini sınırlayarak iyon taşınımında direnç oluşturur ve bu durum, özellikle karbon bazlı nanoyapıların süperkapasitör elektrotlarında düşük kapasitans ile zayıf hızlı şarj-deşarj performansına yol açmaktadır. Elektrot yüzeyinin hidrofilik hale getirilmesi ise, elektrolit ile temas yüzeyini artırarak iyonların yüzeye difüzyonunu kolaylaştırmakta ve böylece elektrokimyasal reaksiyonların hızlanmasını sağlamaktadır [84].

Yüzey modifikasyonu sırasında hidrofilik fonksiyonel grupların (örneğin hidroksil veya karboksil grupları) elektrot yüzeyine eklenmesi, yüzey polaritesini ve ıslanabilirliğini artırarak iyon transfer mekanizmasını iyileştirmektedir. Bu modifikasyon, elektrotun özgül kapasitansını artırmakta ve hızlı şarj-deşarj kapasitesini önemli ölçüde iyileştirmektedir. Örneğin, karbon nanoyapıların yüzeyine hidrofilik grupların eklenmesi ile kapasitans ve enerji yoğunluğu değerlerinde belirgin artışlar gözlemlenmiştir [85].

Bununla birlikte, hidrofobik yüzey modifikasyonu, şarj-deşarj hızlarında kapasitansın daha stabil kalmasını sağlamakta, ancak genel olarak hidrofilik modifikasyonun elektrokimyasal performansı artırma açısından daha etkili olduğu rapor edilmektedir. Süperkapasitör elektrotlarında yüzey modifikasyonu yoluyla hidrofiliklik kazandırılması, iyon taşınımını ve elektrokimyasal reaksiyonları optimize ederek elektrot performansını artırmakta ve yüksek

kapasitans, uzun çevrim ömrü ve hızlı şarj-deşarj kapasitesi, gerektiren enerji depolama uygulamalarında önemli bir avantaj sunmaktadır [86].

2.5.3. Metal oksitler

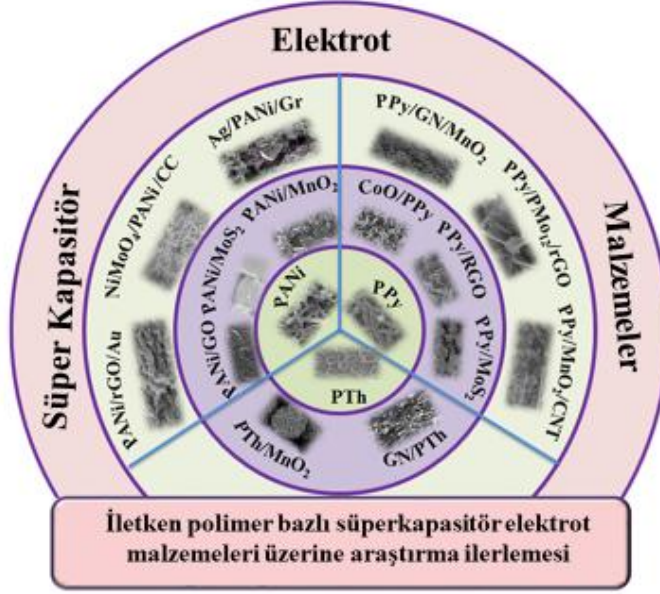
Metal oksitler, süperkapasitör elektrotlarında yüksek enerji yoğunluğu, geniş redoks özellikleri ve değişken değerlik durumları sayesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu malzemeler, elektrotlarda yüksek kapasitans ve gelişmiş enerji depolama kapasitesi sağlayarak süperkapasitörlerin performansını artırmaktadır. Özellikle geçiş metali oksitleri— MnO_2 , NiO , Co_3O_4 , ZnO ve Fe_2O_3 gibi bileşikler—yüksek performanslı elektrot malzemeleri olarak yoğun şekilde araştırılmaktadır [87]. Ancak, elektrokimyasal performansı sınırlayan temel faktör olarak, metal oksitlerin düşük elektriksel iletkenliği öne çıkmaktadır. Bu sorunu gidermek amacıyla, metal oksitlerin karbon bazlı malzemeler veya iletken polimerlerle kompozit hale getirilmesi, hem elektriksel iletkenliği artırmak hem de özgül kapasitansı ve enerji yoğunluğunu iyileştirmek için etkili bir yöntemdir. Bunun yanı sıra, metal oksitlerin morfolojik yapısı—nano ölçekli partiküller, bir boyutlu (1D), iki boyutlu (2D) veya üç boyutlu (3D) nanoyapılar—elektrotun yüzey alanını genişleterek iyon difüzyonunu hızlandırmakta ve böylece elektrokimyasal performansı doğrudan etkilemektedir. Elektrot yüzeyinde oluşturulan oksijen boşlukları, yüzey aktif bölgelerini artırarak redoks reaksiyonlarını desteklemekte ve daha yüksek kapasite sağlayan bir yapı sunmaktadır [88].

Bimetalik oksitler, tekli metal oksitlerin düşük iletkenlik sorunlarını aşmak ve daha yüksek kapasitans elde etmek amacıyla geliştirilen alternatifler arasında yer almaktadır. Elektrot malzemesinin kimyasal bileşimi, yapısal özellikleri ve kullanılan elektrolit türü gibi faktörler, metal oksit bazlı süperkapasitör elektrotlarının performansını belirleyen temel unsurlar arasında bulunmaktadır. Metal oksitlerin elektrot performansına katkısı; yüksek redoks aktivitesi, uygun morfolojik tasarım, kompozit malzeme kullanımı ve kimyasal bileşimin optimize edilmesi ile doğrudan ilişkilidir. Bu faktörlerin titizlikle kontrol edilmesi, süperkapasitörlerde daha yüksek enerji ve güç yoğunluğu elde edilmesini sağlamaktadır [89].

2.5.4. İletken polimerler

İletken polimerler (CP'ler), süperkapasitör elektrotlarında yüksek özgül kapasiteleri, iyi elektriksel iletkenlikleri, esneklikleri ve düşük maliyetleri sayesinde geniş bir kullanım alanı bulan önemli malzemelerdendir. Polianilin (PANI), polipirrol (PPy) ve politiyofen (PTh), gibi iletken polimerler, elektrotlarda hızlı yük transferi sağlayarak hızlı şarj/deşarj ve yüksek güç yoğunluğu özellikleri sunmakta ve enerji depolama sistemlerinin performansını önemli ölçüde artırmaktadır. Ancak, iletken polimerlerin tek başına kullanımı, döngüsel kararlılık ve mekanik dayanıklılık açısından bazı sınırlamalara neden olabilmektedir. Bu nedenle, genellikle karbon bazlı malzemeler (örneğin grafen) veya metal oksitlerle kompozit hale getirilerek hem özgül kapasiteleri hem de çevrim ömürleri artırılmaktadır. Kompozit yapılar, polimerin mikro yapısını ve morfolojisini kontrol ederek elektrolit difüzyonunu iyileştirmekte, iyon taşınımını hızlandırmakta ve böylece süperkapasitörlerin genel elektrokimyasal performansını geliştirmektedir [90].

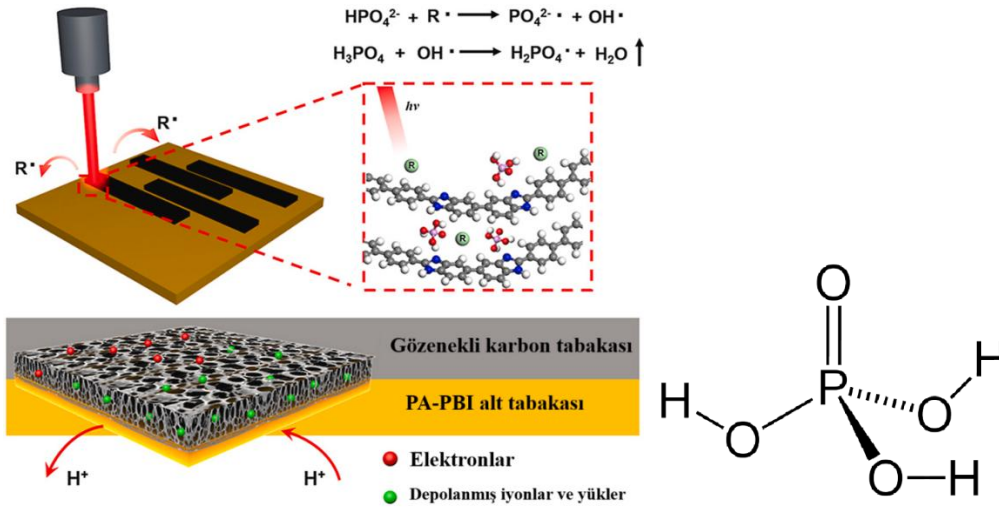
Ayrıca, iki boyutlu koordinasyon polimerleri (örneğin Cu-TCPP) ile polipirrol gibi iletken polimerlerin hibritleştirilmesi, sinerjik bir etki yaratarak yük depolama kapasitesini önemli ölçüde artırmakta ve esnek, katı hal süperkapasitör uygulamalarında yüksek performans sağlamaktadır. Son yıllarda geliştirilen iletken polimer hidrojel kompozitleri, gözenekli yapıları, yüksek iyon iletkenlikleri ve ayarlanabilir mekanik özellikleri sayesinde esnek ve giyilebilir enerji depolama sistemleri için umut vermektedir. İletken polimerler süperkapasitör elektrot performansını artırmada merkezi bir rol oynamakta olup, kompozit ve hibrit yapılar aracılığıyla bu etkinin daha da güçlendirilmesi mümkün olmaktadır. Yapısal optimizasyon ve yüzey mühendisliği ile geliştirilen iletken polimer elektrotlar, süperkapasitörlerin enerji depolama kapasitesi, güç yoğunluğu ve çevrim ömrü açısından üstün performans sergilemesine katkıda bulunmaktadır [91].



Şekil 2.14: İletken polimer bazlı süperkapasitörler [92]

2.5.5. Heteroatom dopingi

Heteroatom, organik bileşiklerin temel iskeletini oluşturan karbon (C) ve hidrojen (H) atomları dışında bulunan atomlardır. Heteroatom dopingi, karbon bazlı süperkapasitör elektrotlarının performansını önemli ölçüde artıran bir modifikasyon yöntemidir. Karbon malzemelere azot, fosfor, kükürt, bor veya oksijen gibi heteroatomların eklenmesi, elektrotun elektriksel iletkenliğini ve yüzey ıslanabilirliğini artırır; ayrıca yüzeydeki aktif alanları çoğaltarak iyon ve elektron taşınımını hızlandırır. Heteroatom dopingi ayrıca karbonun gözenekli yapısını optimize ederek iyonların daha kolay hareket etmesini sağlar ve elektrotun toplam yüzey alanını artırır. Bu, özellikle biyokütle türevli karbonlarda, gözenek yapısının ve aktif bölgelerin geliştirilmesiyle yüksek performanslı, çevre dostu ve düşük maliyetli elektrotların elde edilmesine olanak tanır. Heteroatom dopingi, karbon bazlı süperkapasitör elektrotlarının elektriksel, kimyasal ve yapısal özelliklerini geliştirerek, enerji depolama performansını belirgin şekilde artırır ve sürdürülebilir enerji teknolojileri için umut vadeder [93].



Şekil 2.15: (a) Fosforik asit ile doplanan polibenzimidazol membran [94], **(b)** Fosforik asit yapısı.

Fosforik asit doplanması, süperkapasitör elektrotlarının performansını olumlu etkiler. Fosforik asit, karbon bazlı veya polimer esaslı elektrotlarda gözenekli yapının gelişmesini ve yüzey alanının artmasını sağlar; bu da iyon depolama kapasitesini ve iyonların hızlı taşınmasını destekler. Fosforik asit yardımıyla yapılan heteroatom fosfor dopingi, elektrotun elektriksel iletkenliğini ve proton iletkenliğini artırarak şarj-deşarj hızını ve enerji yoğunluğunu yükseltir. Fosforik asit ile aktive edilen karbon elektrotlar, yüksek özgül kapasitans, mükemmel çevrim ömrü ve yüksek güç/enerji yoğunluğu gibi üstün elektrokimyasal özellikler sergiler. Fosforik asit doplanması, elektrot yüzeyinde fonksiyonel grupların oluşumunu teşvik ederek aktif bölgelerin sayısını artırır ve elektrotun elektrolit ile etkileşimini iyileştirir [95].

2.6. Önceki Çalışmalar

Hegazy ve arkadaşları karbonizasyon ve aktivasyon yöntemlerini kullanarak petrolden aktif karbon üretmişlerdir ve ürettikleri aktif karbona etanol ve di-amonyum hidrojen fosfat yardımıyla fosfor doplamışlardır. Süperkapasitör aktivitesini üç elektrotlu bir sistem kullanılarak 6 M KOH içinde farklı elektrokimyasal yöntemlerle incelemişlerdir ve kapasitans değerlerini 387,38 F/g ve 615,02 F/g ve 1000. döngüden sonra sırasıyla 393,68 F/g ve 619,75 F/g olarak bulmuşlardır [96].

Lingcong Luo ve arkadaşları ultra düşük yoğunluklu balsa ağacını kullanarak, aktif karbon üretmişlerdir ve süperkapasitör uygulamaları için aktif karbona tek adımlı fosforik asit emdirme aktivasyon yöntemi ile P, N ve O katkılanmışlardır. P, N ve O üçlü katkılı aktif karbon malzemeleri, 1191.65 m²/g gibi yüksek bir özgül yüzey alanına ve mikro-, mezo- ve makro gözeneklerden oluşan hiyerarşik bir gözenek yapısına sahip olmuştur. Heteroatom üçlü katkılı balsa ağacı bazlı aktif karbon ile üretilen süperkapasitörler, üç elektrotlu test sistemiyle 0.5 A/g akım yoğunluğunda 263 F/g gibi yüksek bir özgül kapasitansa ulaşmıştır [97].

Murugan ve arkadaşları, Pluronik 123 ve fenol türevli aktif karbon (AC) örneklerinin yapısal özellikleri üzerine H₃PO₄ aktivasyonunun etkisini sistematik olarak incelemişlerdir. SEM analizi, XRD analizi, Raman spektroskopisi analizi ve özgül yüzey alanı (SBET) analizi yapmışlardır. Elektrokimyasal performans değerlendirmelerinde, simetrik süperkapasitörlerin, özgül kapasitans değeri 69-34 F/g aralığında değişmiştir. Asimetrik süperkapasitörün özgül kapasitansının 1 mV s⁻¹ tarama hızında 201 F g⁻¹ olduğu bulunmuştur. Asimetrik süperkapasitörün özgül kapasitansının daha yüksek değeri, pseudokapasitansına bağlı olduğu belirlenmiştir [98].

Guanfeng Lin ve arkadaşları, biyokütle talaşından ve fosforik asitten tek aşamalı karbonizasyon yöntemiyle aktif karbon hazırlamışlardır. Karbon malzemedeki P heteroatom katkısını elektrokimyasal performans testleriyle incelediklerinde 0,1 A/g ve 0,5 A/g akım yoğunluklarında 292 F/g ve 169,4 F/g'lik yüksek özgül kapasitanslar sergilemektedir. Bu çalışma, atık biyokütlenin gelişmiş enerji depolama ekipmanları için yüksek performanslı ve yeşil süperkapasitörlerde yeniden kullanılmasına yönelik sürdürülebilir bir strateji önermektedir [99].

Jianfei Xiao ve arkadaşları N, Pco katkılı gözenekli karbon malzemeleri fitik asitle indüklenen kendi kendine monte edilmiş kitosan aerogelin sentezi ve ardından karbonizasyon ve aktivasyon yoluyla başarıyla üretmişlerdir. Fitik asit, P kaynağı, asit düzenleyici ve yapı yönlendirici ajan olarak görev yapmış ve daha fazla gözenek oluşturmak için aktivasyon verimliliğini artırmıştır. Süperkapasitörler için, 1 A/g da 231.2 F/g'lik yüksek bir kapasitans ve 10000 döngüden sonra yaklaşık %96.7'lik ilk kapasitede olağanüstü bir stabilite sergilemiştir. Bu sonuçlar, bu tür katkılamların CO₂ yakalama ve Süperkapasitörlerdeki büyük potansiyelini vurgulamaktadır [100].

Z. Zhang ve arkadaşları kömür bazlı gözenekli karbon elektrot malzemelerini sentezlemek için uygulanabilir bir azot/fosfor/kükürt in-situ kodlama stratejisi, gözenekli karbonun fosforik asit ve amonyum persülfat ile birlikte ısıtılmasıyla elde etmişlerdir. Oluşturulan gözenekli karbon anot, yüksek bir yük transferi, 83,79 F/g'lık mükemmel bir hız kapasitesi ve 10.000 döngüden sonra %95,61'lik iyi bir döngü tutma özelliği göstermiştir. Bu çalışma, fonksiyonel grupların evrimi ve kömür türevi malzemelerin yüksek değerli kullanımına yönelik bir yol hakkında fikir vermektedir.[101].

Joon-Hyuk Bang ve arkadaşları fosforik asit aktivasyonu yoluyla yüksek güç yoğunluklu bir süper kapasitör için kenaf türevi bir aktif karbon (KAC) geliştirmişlerdir. N₂/77K izotermal adsorpsiyon- desorpsiyon eğrisi, BET ve BJH'ye dayalı olarak KAC'nin dokusal özelliklerini ve gözenek boyutu dağılımını tahmin etmek için kullanılmıştır. KAC'nin elektrokimyasal özellikleri KAC'nin gözenek özellikleri aktivasyon sıcaklığına göre değişmiş ve çoğu KAC mezogözenekli bir yapı göstermiştir. Aktivasyon sıcaklığı arttıkça, mezogözenek hacmi 700 °C'ye kadar artmış, daha sonra azalmıştır. Şarj-deşarj oranı 1 mA/g'den 10 mA/g'ye yükseldikçe KAC'nin özgül kapasitansı 82,9 F/g'den 59,48 F/g'ye düşmüş ve azalma oranı yaklaşık %30 olmuştur. KAC'nin özgül kapasitansındaki azalma oranı, ticari aktif karbon ile

karşılaştırıldığında %50 daha düşüktü; dolayısıyla KAC, yüksek güç yoğunluklu süperkapasitörler için daha uygun bir elektrode-aktif malzemedir.

Fosforik asit aktivasyonu yoluyla üretilen KAC, mezogözenekli yapıya bağlı olarak daha üstün çıkış özellikleri sergilemiştir ve bu, elektrot malzemesi üzerindeki mezogözenek kontrolünün gelecekte süper kapasitör direncini ve çıkışını iyileştirmede anahtar belirleyici olduğunu açıklamaktadır [102].

Manickam Minakshi ve arkadaşları doğal bal özü kimyasal yapısına fosfor (P) ve oksijen (O) heteroatomlarını katkılararak, olası yüksek performanslı enerji depolama uygulamaları için aktif karbon üretmişlerdir. Süperkapasitörlerin performans ölçüm sonuçları, yüksek güç uygulamaları gerektiren alanlarda baskın bir rol oynayabilecek yüzey fonksiyonel gruplarına ve yüksek yüzey alanlı elektrotlara bağlıdır. KOH elektrolitinde test edilen örnekler elektriksel çift katmanlı kapasitans gösterirken, aynı koşullar altında H₂SO₄ elektroliti aktif karbon elektrotundaki yüzey fonksiyonel gruplarını içeren sözde faradaik reaksiyonlar göstermiştir. HDP-AC'nin tek elektrot konfigürasyonu, 66,5 Wh/kg enerji yoğunluğunda 480 F/g spesifik kapasitans ve 662 W/kg maksimum güç yoğunluğu sergilemiştir [103].

Hye-Ryeon Yu ve arkadaşları, fenol bazlı aktif karbonu 1, 2, 4 M fosforik asit konsantrasyonlarıyla işleyerek modifiye etmişlerdir. İşlenmiş aktif karbonun özgül yüzey alanı ve mezogözenek hacmi, genellikle işlenmemiş aktif karbona göre arttığını belirlemişlerdir. Daha sonra üç elektrotlu bir düzenek kullanılarak bilgisayar kontrollü bir potansiyostat/galvanostat ile elektrokimyasal olarak karakterize etmişlerdir. Ag|AgCl referans elektrot olarak ve platin plaka karşı elektrot olarak kullanmışlardır. Döngüsel voltametri (CV), 0–1 V potansiyel aralığında 5 ve 50 mV/s tarama hızlarında elektrot malzemeleri üzerinde gerçekleştirildi. Tüm elektrokimyasal ölçümler 1 M H₂SO₄ elektrolitinde gerçekleştirilmiştir.

AC yüzeyindeki C-O fonksiyonel gruplarının konsantrasyonu belirgin şekilde arttırdığını belirlemişlerdir. Bu değişiklikler, Ham aktif karbonun (256 F/g) 5 mV/s tarama hızındaki özgül kapasitansı (452 F/g) iyileştirdi. Kapasitansın bu şekilde artması, fosforik asit işlemiyle indüklenen AC'deki ve mezogözenek hacmindeki artan elektrokimyasal aktivitenin sinerjik etkisine bağlanabilir. Bu nedenle, oksijen fonksiyonel gruplarının

(özellikle C@O) eş zamanlı olarak aşındırılması ve tanıtılması, AC tabanlı bir EDLC'nin özgül kapasitesini iyileştirmede etkili olduğu kanıtlanmıştır [104]



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışmada, elektrot aktif malzeme olarak Malatya'nın bölgesel önemi ve tarımsal zenginliği içerisinde yer alan kayısı çekirdeği kabuklarından elde edilen aktif karbon kullanılmıştır. Kayısının rengini ve kalitesini korumak için kükürt dioksit (SO_2) kullanılmaktadır. Kükürtlenmiş kayısı çekirdeği kabuğu tüm kabukların ancak 1/4 'i dir. Elde edilen kükürtlenmiş ve kükürtlenmemiş kayısı çekirdek kabukları kontrollü karbonizasyon ve aktivasyon işlemlerine tabi tutularak yüksek yüzey alanı ve gözeneklilik kazandırılmıştır. Kükürt içeren kayısı çekirdeği kabuğundan elde edilen aktif karbonlar, su arıtma sistemlerinde kullanıldığında kükürt kokusu gibi istenmeyen etkiler oluşturmaktadır.

Süper kapasitörlerde kullanılan aktif karbonun fosfor heteroatomuyla doplanması, malzemenin yüzey özelliklerini ve elektrokimyasal performansını iyileştirerek kapasitans değerlerini artırırken, karbon elektrotların yüzey kimyasını değiştirerek daha yüksek enerji yoğunluğu ve oksidasyon kararlılığı sağlamaktadır. Çalışmada 1 Molar, 2 Molar ve 4 Molar derişimlerde fosforik asit uygulanarak, farklı asit konsantrasyonlarının aktif karbon yüzeyleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Elektrot yapısının mekanik bütünlüğünü ve dayanıklılığını artırmak amacıyla poliviniliden florür (PVDF) bağlayıcı olarak tercih edilmiştir. PVDF, N-metil pirolidon (NMP) içerisinde çözündürülerek homojen bir süspansiyon oluşturulmuştur. NMP, PVDF'nin moleküler yapısını çözerek elektrot tabakasının fiziksel ve kimyasal stabilitesini sağlamaktadır. Ayrıca, iletkenlik katkısı olarak kullanılan karbon siyahı, aktif karbon ile PVDF arasındaki elektriksel bağlantıyı güçlendirerek elektron akışını optimize etmekte ve genel elektrot performansına katkıda bulunmaktadır.

3.2. Yöntem

Nanogözenekli aktif karbon üretimi, fosforik asit katkılama, elektrot hazırlama, elektrolit hazırlama ve süperkapasitör paketleme süreçleri, Şekil 3.1'de gösterilen süper kapasitörlerin hazırlanmasında temel aşamaları oluşturmaktadır..



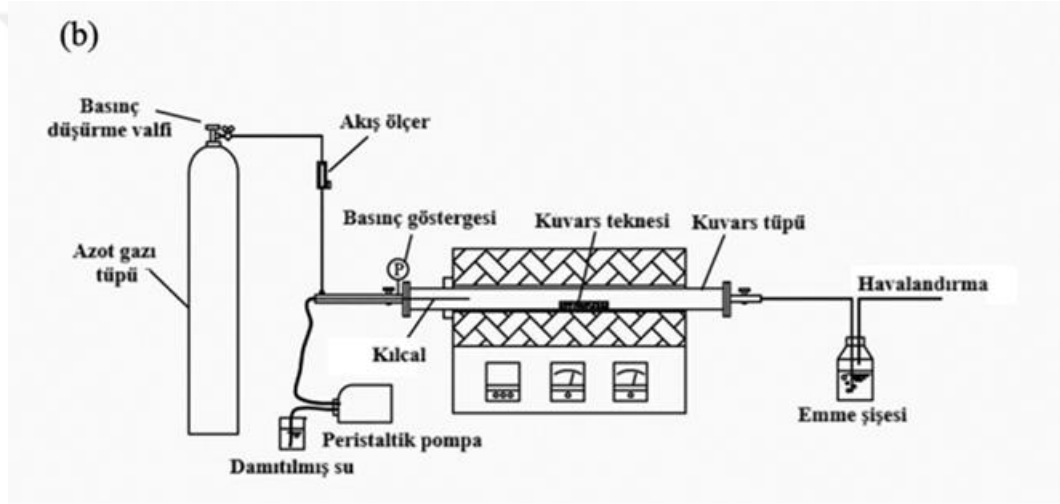
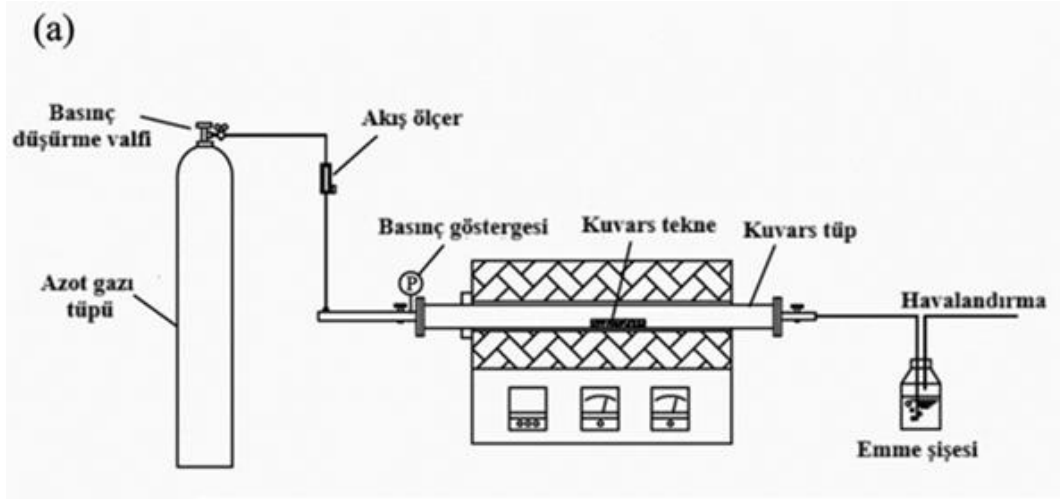
Şekil 1.1: Süper kapasitörlerin hazırlanmasının temel aşamaları

Elektrot hazırlama aşamasında kullanılan aktif karbonun yüzey karakterizasyonları detaylı bir şekilde incelenmiş, yapısal özellikleri analiz edilerek süperkapasitörün verimliliğine olan etkileri belirlenmiştir. Son olarak, hazırlanan süper kapasitörlerin elektrokimyasal performans testleri gerçekleştirilerek enerji depolama kapasitesi, çevrim ömrü ve güç yoğunluğu gibi temel parametreler değerlendirilmiştir.

3.2.1. Nanagözenekli aktif karbonun hazırlanması

Kayısı çekirdeği kabuklarından aktif karbon yatay programlanabilir boru şeklindeki bir karbonizasyon reaktöründe fiziksel aktivasyon yöntemiyle hazırlanmıştır. Şekil 3.2.(a) ve (c)'de gösterildiği gibi fırına yerleştirilen uzunluğu 1200 mm ve iç çapı 90 mm olan kuvars tüp bulunmaktadır. Yaklaşık $5 \pm 0,1$ g'lık bir kayısı çekirdeği numunesi, kuvars tüpün ortasına yerleştirilen bir kuvars tekneye yerleştirilmiştir. Numune, istenen karbonizasyon sıcaklığına ($450\text{ }^{\circ}\text{C}$) ulaşılana kadar 100 mL/dak sabit azot akış hızı altında $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{dak}$ ısıtma hızında ısıtılmıştır. Ardından, sıcaklık 0,5 saat boyunca $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de tutulmuştur. Numuneler daha sonra aynı azot akış hızı altında ortam sıcaklığına ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) soğutulmuştur.

Karbonizasyonun ardından, kömür örnekleri Şekil 3.2.(b) ve (c)'de gösterilen fırında belirlenen sıcaklığa kadar 0,5, 1 ve 1,5 saat gibi sürede su akışı altında fiziksel olarak aktifleştirilmiştir. Buhar, peristaltik bir pompa kullanılarak kuvars tüpün içine su pompalanmasıyla üretilmiştir. Şekil 3.2.b. aktivasyon testinin şematik bir diyagramını göstermektedir. Buhar çalışmalarında, su akış hızı peristaltik pompa yardımıyla farklı aktivasyon sıcaklığı ve zaman koşulları altında 0,075 g/dak'da tutulmuştur. Buhar üretiminde akış hızı 100 mL/dakika (oda sıcaklığında ölçülmüştür) taşıyıcı gaz olarak azot kullanılmıştır. Bu şekilde, farklı gözenek yapılarına sahip aktif karbon hazırlanmıştır.



Şekil 3.2: (a) Aktif karbon üretiminde karbonizasyon aşamasının şematik görünümü (b) Aktif karbon üretiminde aktivasyon aşamasının şematik görünümü [105] (c) Aktif karbon üretiminde kullanılan fırın.

3.2.2. Nanagözenekli Aktif Karbon Karakterizasyonu

Nanogözenekli aktif karbonun karakterizasyonu, gözenek yapısı, yüzey alanı, kimyasal bileşimi ve elektriksel özellikleri gibi temel özelliklerinin analiz edilmesidir. Karakterizasyon için çok çeşitli fiziksel, kimyasal ve yapısal analiz yöntemleri kullanılır.

Temel Karakterizasyon Yöntemlerinden yüzey alanı ve gözenek dağılımı için BET (Brunauer–Emmett–Teller) yöntemiyle yüzey alanı ölçümü ve iyot sayısı analizi yapılır. Yapısal ve Morfolojik Analizler için X-ışını kırınımı (XRD) ile grafitlenme derecesi analizi ve kristal yapı, Raman spektroskopisi ile karbonun düzenlilik ve düzensizlik analizi yapılmaktadır.

Yüzey Kimyası ve Fonksiyonel Gruplar analizi içinse XPS (X-ray fotoelektron spektroskopisi) ile yüzey element analizi ve fonksiyonel grup tespiti (ör. C–F, C–Cl, SO₃H). Elektrokimyasal özellikler ölçümü için süperkapasitör elektrotlarında özgül kapasitans, enerji ve güç yoğunluğu ve döngüsel voltametri ve şarj/deşarj testleriyle performans ve kararlılık ölçümleri yapılmıştır [106].

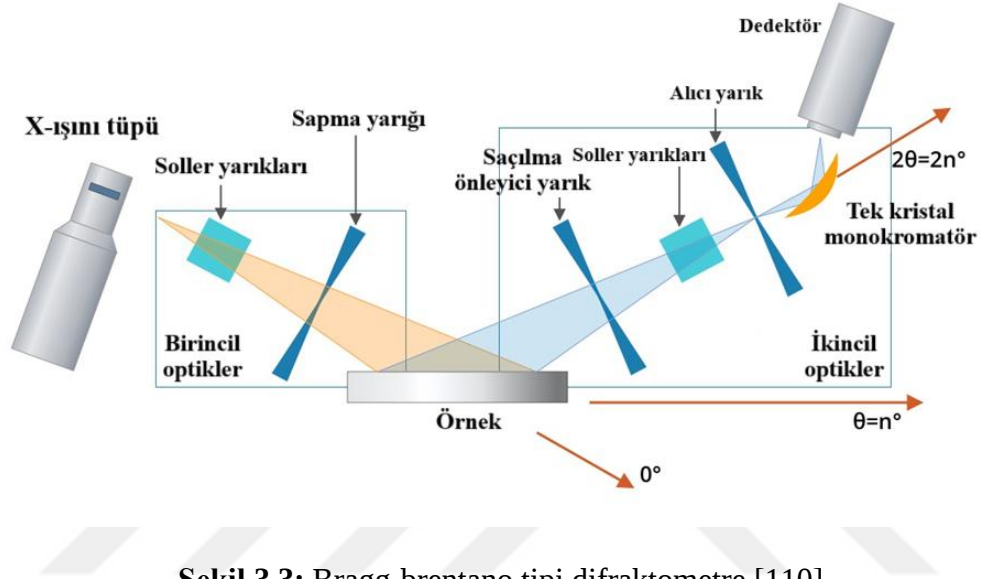
3.2.2.1. X-Işınları Kırınımı (XRD) analizi

X-ışını kırınımı (XRD), atomik düzenin ve kristal yapıların belirlenmesinde kullanılan önemli bir analitik tekniktir. Bu yöntem, monokromatik X-ışınlarının bir kristal numuneyle etkileşime girerek yapıcı girişim oluşturması prensibine dayanır. Kırınım olayını açıklayan Bragg yasası ($n\lambda = 2d\sin\theta$), kristal düzlemler arası mesafe (d) , X-ışınının dalga boyu (λ), ve kırınım açısı (θ) arasındaki bağıntıyı tanımlar [107].

XRD analizinde, katot ışın tüpünde üretilen X-ışınları filtrelendirilir ve numuneye yönlendirilir. Numune, farklı 2θ açılarında tarandığında, toz halindeki malzemelerin rastgele yönelimi sayesinde tüm olası kırınım yönleri incelenebilir. Dedektör tarafından kaydedilen kırınım pikleri, kimyasal bileşiklerin tanımlanmasını sağlar. Bu işlem, elde edilen d-aralıklarının standart referans desenleriyle karşılaştırılması sayesinde gerçekleştirilerek, malzemenin kristal yapısı hakkında detaylı bilgi sağlar. X-ışını difraktometresi, X-ışını tüpü, numune tutucu ve dedektörden oluşan bir sistem olup, kristal yapıların analizinde temel bir rol oynamaktadır. Bu bileşenler, kristal yapılar üzerinde detaylı analizler yapılmasını sağlar.

Elektronlar, katot ışın tüpünde hızlandırılarak hedef malzemeye yönlendirilir ve hedefin iç kabuk elektronlarını uyarak karakteristik X-ışını spektrumları oluşturur [108].

X-ışını difraksiyon (XRD) analizi ,Aktif karbonun kristal yapısını, düzenlilik derecesini ve mikro yapısal özelliklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilir. Bu analiz sayesinde, grafitik yapıdaki tabakalar arasındaki mesafe, tabaka boyutları ve düzenlilik derecesi gibi temel parametreler detaylı bir şekilde incelenebilir [131-133].



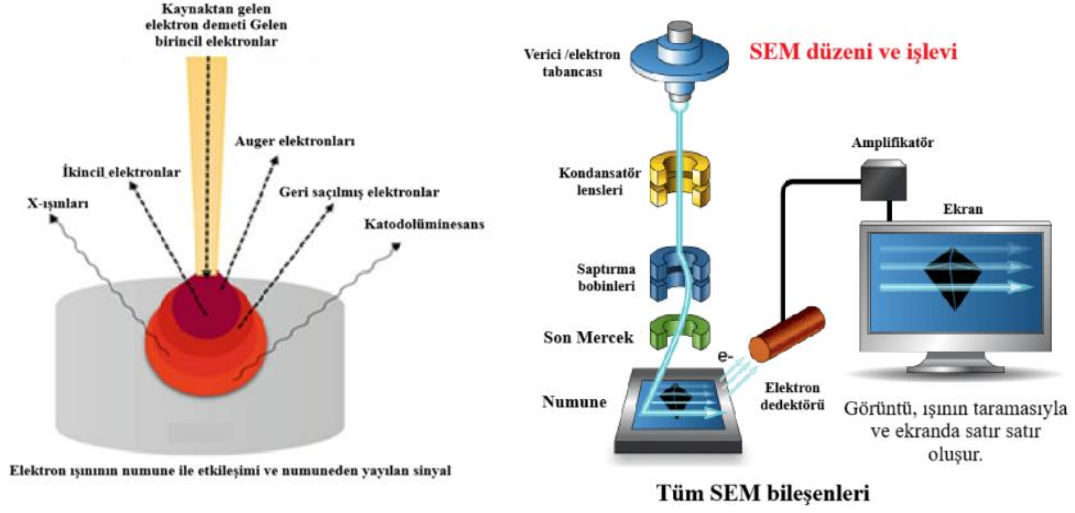
Şekil 3.3: Bragg-brentano tipi difraktometre [110]

3.2.2.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), malzeme yüzeylerinin ve yapılarının yüksek çözünürlükte incelenmesini sağlayan bir elektron mikroskobu tekniğidir. Bu yöntemde, numune, yüksek enerjili elektron ışınına maruz bırakılır ve çıkan elektronlar analiz edilerek malzemenin topografisi, morfolojisi, bileşimi ve kristal yapısı hakkında detaylı bilgiler elde edilir [111].

Elektron ışını, genellikle 10 nm'den daha küçük bir alana odaklanır ve numune yüzeyine 1 µm derinliğine kadar nüfuz ederek sinyaller oluşturur. İkincil elektronlar yüzey detaylarını ortaya çıkarırken, geri saçılan elektronlar yüzey altı bilgileri sağlar. SEM cihazında tarama bobinleri elektron demetini yüzey boyunca hareket ettirir ve elde edilen sinyaller, yüzey özelliklerini görselleştirmek için kullanılır. Yüksek büyütme (10,000x ve üzeri) ve çeşitli hızlandırma voltajları sayesinde yüzey ve alt tabakaların özellikleri detaylı olarak incelenebilir. Düşük voltajlar (<5 kV) yüzey detaylarına odaklanırken, yüksek voltajlar (15-

30 kV) daha derin katmanları inceleme imkânı sağlar. Ayrıca, numunenin eğim açısı (50° - 70°) sinyal yoğunluğunu ve kontrastı artırarak daha net bir görüntü sunar. Bu teknoloji, malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini anlamak için araştırma ve endüstriyel uygulamalarda kritik bir rol oynar [112].



Şekil 3.4: (a) Elektron ışınının numune ile etkileşimi ve numuneden yayılan sinyal, (b) Tüm SEM bileşenleri.

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile aktif karbonun analizi, malzemenin yüzey morfolojisini ve gözenek yapısını detaylı bir şekilde incelemek için yapılır. SEM analizi ile aktif karbonun yüzeyinde bulunan mikro, mezo ve makro gözeneklerin boyutları, dağılımı ve şekilleri doğrudan gözlemlenebilir. Aktif karbonun yüzey alanı adsorpsiyon kapasitesi ve genel performansı, yüzey alanı doğrudan bu gözenek yapısından etkilenmektedir. bu nedenle su arıtımı, hava filtrasyonu ve gaz ayrıştırma gibi uygulamalarda kritik öneme sahiptir [113].

SEM görüntüleri ile aktif karbonun üretiminde kullanılan farklı aktivasyon yöntemlerinin (örneğin kimyasal veya ısı aktivasyonu) malzemenin gözenekli yapısına nasıl etki ettiği de analiz edilebilir. Aktif karbonun yapısal özelliklerini anlamak, performansını değerlendirmek ve uygulama alanlarına uygunluğunu belirlemek amacıyla kullanılan temel karakterizasyon yöntemlerinden biri SEM analizidir [114].

3.2.2.3. Enerji Dağılımlı X-Işını (EDX) Analizi

Bir numunenin elementel bileşimini belirlemek amacıyla kullanılan tekniklerden biri olan Enerji Dağılımlı X-ışını (EDX) analizi, malzeme karakterizasyonunda yaygın olarak tercih edilmektedir. Elektron mikroskobu ile birlikte kullanılarak, numunede bulunan elementlerin karakteristik X-ışınlarının üretilmesiyle gerçekleştirilir. EDX, elementlerin varlığını ve miktarını tespit ederken, iyonize olmuş, bağlı veya serbest atomlar arasında ayrım yapamaz. Bu teknik, özellikle malzeme bilimi ve biyomedikal alanlarında, numunelerin elementel analizini yapmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. EDX analizi, aktif karbon numunelerinin kimyasal bileşimini ve yüzey özelliklerini detaylı bir şekilde incelemek için kullanılır. Bu analiz yöntemi, aktif karbonun üretiminde kullanılan hammaddelerden veya aktivasyon işlemlerinden kaynaklanan elementlerin (örneğin karbon, oksijen, metal katkıları) yüzeydeki oranlarını ve homojenliğini tespit etmeye olanak tanır [115].

3.2.2.4. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) Analizi

Malzemelerin kimyasal yapısını ve fonksiyonel gruplarını tanımlamak amacıyla kullanılan bir spektroskopi tekniği olan Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) analizi, geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu yöntem, kızılötesi ışığın madde ile etkileşimini temel alır ve malzemenin karakterizasyonunu sağlar. Aktif karbon analizinde FTIR, yüzeydeki fonksiyonel grupların belirlenmesi ve bu grupların değişimlerinin izlenmesi için kullanılır. Örneğin, ısıtma işlemi sırasında aktif karbon fiberlerinin yüzey fonksiyonel gruplarındaki değişiklikler FTIR ile incelenmiştir. Isı işlemi sıcaklığı arttıkça, oksijen içeren yüzey fonksiyonel gruplarının miktarının azaldığı ve aktif karbonun daha hidrofobik hale geldiği gözlemlenmiştir [116].

3.2.2.5. Raman spektroskopisi analizi

Raman analizi, kimyasal bileşenlerin ve moleküler yapıların detaylı bilgisini elde etmede kullanılan bir analiz yöntemidir. Raman etkisi, ışığın bir numuneden esnek olmayan bir şekilde saçılması ve moleküler titreşimlerin enerjisiyle frekansının kayması sonucu ortaya çıkar. Bu yöntem, moleküllerin titreşimsel profillerini sağlayarak farklı malzemeleri benzersiz bir şekilde tanımlamayı mümkün kılar. Aktif karbonun yapısal özelliklerini, kristal düzenini ve yüzey kimyasını incelemek amacıyla kullanılan güçlü bir karakterizasyon tekniği olan Raman spektroskopisi, detaylı analizler için yaygın bir yöntemdir. Özellikle

karbon bazlı malzemelerin grafitik yapısını ve düzensizliklerini belirlemek açısından, bu yöntem kritik bir öneme sahiptir [117].

Aktif karbonun Raman spektrumunda genellikle iki temel bant öne çıkar:

- ❖ G bandı ($\sim 1580 \text{ cm}^{-1}$): Grafit benzeri yapıların göstergesidir ve sp^2 hibritleşmiş karbon atomlarının düzenli örgüsünü temsil eder.
- ❖ D bandı ($\sim 1350 \text{ cm}^{-1}$): Kristal yapıda meydana gelen düzensizlikler ve kusurlar ile ilişkilidir. Yüksek D/G oranı, malzemenin amorf yapısının baskın olduğunu ve gözenekliliğin arttığını gösterir [118].

Bu teknik sayesinde aktif karbonun sentez yöntemi, aktivasyon süreçleri ve yaşlanma etkileri gibi parametrelerin malzeme üzerindeki yapısal değişimlere nasıl katkıda bulunduğu anlaşılabilir. Raman spektroskopisi ayrıca yüzeyde gerçekleşen kimyasal modifikasyonları ve metal iyonlarının varlığını tespit etme olanağı sunarak, aktif karbonun adsorpsiyon performansı üzerinde belirleyici olan faktörleri ayrıntılı bir şekilde değerlendirmeye yardımcı olur. Raman spektroskopisi aktif karbonun adsorpsiyon kapasitesini etkileyen yapısal değişiklikleri hızlı ve tahribatsız bir şekilde karakterize etme yeteneği sayesinde, enerji depolama, kataliz ve çevresel arıtım gibi çeşitli uygulamalarda malzeme optimizasyonunu destekleyen temel bir analiz yöntemidir [119].

3.2.2.6. Brunauer-Emmett-Teller (BET) analizi

Brunauer-Emmett-Teller (BET) analizi, gözenekli malzemelerin özgül yüzey alanını belirlemek için yaygın bir tekniktir. Bu yöntem, gaz adsorpsiyonunun yüzey alanı, gaz molekülünün özellikleri ve sistemin bir fonksiyonu olduğu ilkesine dayanır. Belirli bir basınç aralığında adsorbat gaz (örneğin azot) numuneye verilir ve yüzeye adsorbe edilen gaz miktarı ölçülür. Bu veriler, gazın alımı, basıncı ve BET denklemindeki monokatman kapasitesi ile ilişkilendirilerek özgül yüzey alanı hesaplanır [120].

Monokatman kapasitesi, toplam yüzey alanını Avogadro sayısı, adsorbat molekülünün enine kesit alanı ve adsorbatın molar hacmi gibi faktörlere bağlayan bir denklemle belirlenir.

BJH yöntemi ise toplam gözenek hacmini hesaplamada kullanılan bir prosedürdür. Adsorbat gazı numuneye verildikten sonra kısmi basınç kademeli olarak azaltılır ve desorbe edilen gaz hacmi ölçülür. Bu yöntemde, gözeneklerdeki desorpsiyon süreci kılcal yoğunlaşma ve adsorplanan tabaka kalınlığı azalımı üzerinden modellenir. BJH denklemi, desorbe edilen

gaz hacmini tabaka kalınlığı, gözenek yarıçapı ve gözenek hacmi ile ilişkilendirir. Gözenek boyutuna göre dağılım grafik olarak gösterilir ve toplam gözenek hacmi bu dağılımın entegrasyonu ile belirlenir. Her iki yöntem de gözenekli malzemelerin yüzey ve gözenek özelliklerini karakterize etmek için önemli tekniklerdir. Ancak, elde edilen sonuçlar kullanılan malzeme ve gaz türüne bağlı olarak değişiklik gösterebilir [121].

Aktif karbonun Brunauer-Emmett-Teller (BET) analiziyle incelenmesinin temel nedeni, bu malzemenin yüzey alanı ve gözenek yapısının belirlenmesidir. Yüksek yüzey alanı ve gözenek hacmi, aktif karbonun adsorpsiyon kapasitesini büyük ölçüde belirleyen temel faktörler arasındadır. BET analizi, aktif karbonun toplam yüzey alanını ve gözenek hacmini nicel olarak ölçerek, malzemenin adsorban olarak etkinliğini değerlendirmede kritik bir rol oynar. Farklı aktivasyon yöntemleriyle elde edilen aktif karbonların yüzey alanı ve gözenek hacmi, BET analizi kullanılarak karşılaştırılabilir ve böylece hangi yöntemin daha verimli olduğu belirlenebilir. Ayrıca, BET analizi sayesinde aktif karbonun uygulama alanlarına (örneğin, su arıtımı, enerji depolama veya gaz adsorpsiyonu) uygunluğu da değerlendirilebilir. BET analizi aktif karbonun performansını doğrudan etkileyen fiziksel özelliklerini ortaya koyduğu için, bu malzemeye yapılan karakterizasyon çalışmalarında vazgeçilmez bir tekniktir [122].

3.2.2.7. İyot sayısı analizi

Aktif karbonun iyot sayısı analizi, adsorpsiyon kapasitesini belirlemek için kullanılan önemli bir yöntemdir. Aktif karbonun birim kütlesi başına ne kadar iyot adsorbe edebileceğini gösteren iyot sayısı, genellikle mg/g cinsinden ifade edilmektedir. Bu analiz, aktif karbonun gözenek yapısını ve yüzey alanını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılır. İyot sayısı, aktif karbonun mikroporöz yapısının bir göstergesi olarak kabul edilir. Yüksek iyot sayısı, daha fazla mikropor içeren bir yapıya işaret eder. Analiz, genellikle titrasyon veya spektroskopik yöntemlerle gerçekleştirilir. Örneğin, ultraviyole-görünür (UV-vis) spektroskopisi kullanılarak iyot sayısı belirlenebilir. Ölçüm hassasiyetini artırarak, bu yöntem daha hızlı ve doğru sonuçlar elde edilmesine olanak tanımaktadır [123].

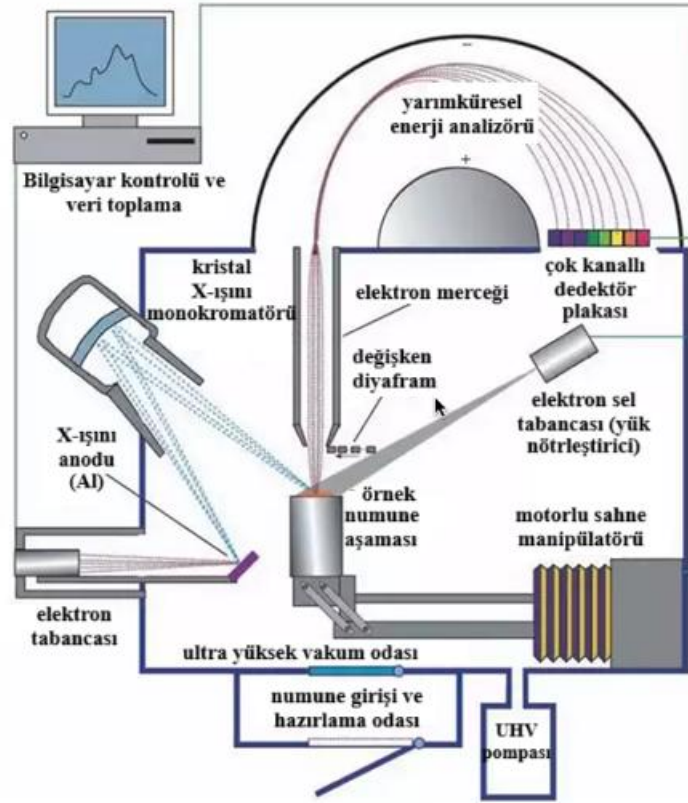
Ayrıca, iyot sayısı analizi, aktif karbonun farklı üretim koşulları altındaki değişimini anlamak için de kullanılır. Aktivasyon sıcaklığı, süre ve kimyasal aktivasyon ajanlarının konsantrasyonu gibi faktörler, aktif karbonun iyot sayısını önemli ölçüde etkileyebilir.

İyot sayısı analizi, aktif karbonun adsorpsiyon kapasitesini ve gözenek yapısını değerlendirmek için kritik bir parametredir. Bu analiz, aktif karbonun çeşitli uygulamalardaki etkinliğini belirlemede kullanılır [124].

3.2.2.8. X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) analizi

X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS), malzeme yüzeylerini analiz etmek için kullanılan tahribatsız bir yöntemdir. Bu teknik, yüzeydeki elementlerin bileşimini, kimyasal durumlarını ve elektronik yapılarını ölçer. Fotoelektronların enerjilerini analiz ederek her elemente özgü karakteristik bilgiler sunar ve malzemenin yüzey bileşimi hakkında nicel ve kimyasal durum bilgisi sağlar

XPS, yüzeyden elektronların fotonlarla çıkarılması prensibine dayanır. Bu süreçte çekirdek elektronlarının kinetik enerjisi, gelen X-ışını fotonlarının enerjisi, elektronların bağlanma enerjisi ve spektrometrenin iş fonksiyonu ile ilişkilendirilir. XPS, hidrojen ve helyum hariç tüm elementlerin toplam element analizini gerçekleştirebilir ve genellikle 1 ila 10 nanometre derinliğindeki yüzey tabakasını incelemek için kullanılır. Özellikle biyomedikal polimerlerin yüzey karakterizasyonu ve analizi açısından, bu yöntem önemli bir araç olarak kabul edilmektedir. XPS, yüzeydeki elementlerin dağılımını ve kimyasal bağlanma bilgilerini sunarak malzemenin yüzey özelliklerini ayrıntılı bir şekilde inceleme olanağı sağlar [125].



Şekil 3.5: XPS Cihazının bileşenlerinin şematik diyagramı [126].

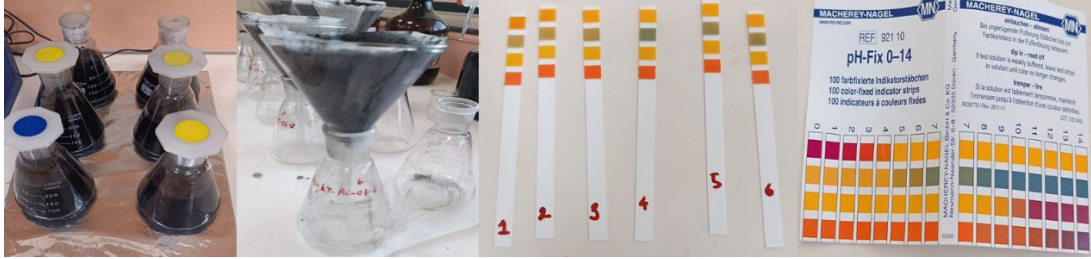
3.2.2.8. Element analizi

Aktif karbona yapılan element analizi, karbonun içeriğinde bulunan temel elementlerin (örneğin karbon, hidrojen, oksijen, azot ve eser miktarda bulunan diğer elementler) miktarlarını belirlemek amacıyla yapılır. Element analizi, aktif karbonun kimyasal yapısını, saflığını ve fonksiyonel özelliklerini anlamak için kritik bir karakterizasyon yöntemidir. Bu analiz sayesinde, aktif karbonun üretiminde kullanılan hammaddelerden veya aktivasyon işlemlerinden kaynaklanan safsızlıklar ve iz elementler tespit edilebilir. Element analizi aktif karbonun kalitesini, uygulama alanına uygunluğunu ve performansını değerlendirmek için temel bir araçtır [127].

3.2.3. Fosforik asit katkılama

1 Molar, 2 Molar ve 4 Molar fosforik asit çözeltileri hazırlanır. 5 g kükürtlenmiş ve kükürtlenmemiş kayısı çekirdeği kabuğundan üretilmiş aktif karbon ve 200 ml fosforik asit çözeltileri (1, 2 ve 4 Molar) oda sıcaklığında 24 saat boyunca magnet yardımıyla karıştırılır.

Aktif karbonu ayırmak için filtrelendir. Filtrat nötrleşene kadar damıtılmış suyla yıkanır ve ardından vakumlu bir fırında, 100°C’de 24 saat boyunca kurutma işlemi gerçekleştirilir. Kükürtlenmiş ve kükürtlenmemiş kayısı çekirdeği kabuğundan örnekleri, sırasıyla 1M, 2M ve 4M derişiminde fosforik asit ile işleme tabi tutuldu. Örneklerin kodları ve açıklamaları Tablo3.1’de verilmektedir.



Şekil 3.6: Fosforik asit doplama prosesi [128]

Çizelge 3.1: Tez kapsamında çalışılan örneklerin kodları ve tanımları

Örnek kodu	
MG-HP-01	1M H ₃ PO ₄ Katkılanmış kükürtlenmemiş kayısı çekirdeği kabuğu
MG-HP-02	2M H ₃ PO ₄ Katkılanmış kükürtlenmemiş kayısı çekirdeği kabuğu
MG-HP-03	4M H ₃ PO ₄ Katkılanmış kükürtlenmemiş kayısı çekirdeği kabuğu
MG-HP-04	1M H ₃ PO ₄ Katkılanmış kükürtlenmiş kayısı çekirdeği kabuğu
MG-HP-05	2M H ₃ PO ₄ Katkılanmış kükürtlenmiş kayısı çekirdeği kabuğu
MG-HP-06	4M H ₃ PO ₄ Katkılanmış kükürtlenmiş kayısı çekirdeği kabuğu
MG-HP-07	Kükürtlenmemiş kayısı çekirdeği kabuğu
MG-HP-08	Kükürtlenmiş kayısı çekirdeği kabuğu

3.2.4. Elektrot hazırlama

Süperkapasitör elektrotunu hazırlamak için ağırlıkça %80 oranında aktif karbon, elektrotlarda iletkenlik artırıcı katkı malzemesi olarak %10 oranında karbon siyahı ve %10

oranında bağlayıcı ve elektrot malzemelerinin mekanik stabilitesini artırmak için polyvinylidene flüoride (PVDF) tartılır.

Tartılan PVDF cam test tüpünde 1.5 ml NMP içerisinde çözünmesi sağlanır. Aktif karbon ve karbon siyahı, agat havanda yaklaşık 15 dakika öğütüldükten sonra cam test tüpü içerisindeki karışıma eklenir ve Oda sıcaklığında, manyetik karıştırıcıda 24 saat boyunca karıştırma işlemi gerçekleştirilir. Karıştırılan numune tartılan boş nikel köpüklere arkalı önlü fırça yardımıyla sürülür. 24 saat boyunca vakumlu etüvde kurumaya bırakılır.



Şekil 3.7: a) agat havanda karıştırılan aktif karbon ve karbon siyahı **b)** NMP içinde çözünmekte olan pvdf **c)** NMP içerisinde de çözünmüş pvdf üzerine eklenen aktif karbon ve karbon siyahı **d)** vakumlu etüv

3.2.5. Süperkapasitör paketleme

Kuruma süreci tamamlandıktan sonra elektrotlar vakumlu etüvden alınarak tekrar tartılır.

Elektrotlar, 6 molar KOH çözeltisine bırakılarak çözeltiyi tamamen emmesi beklenir. Emme sürecinde elektrotların her iki yüzeyi çevrilerek çözeltinin eşit şekilde nüfuz etmesi sağlanır.

Montaj aşamasında, elektrot süperkapasitör bileşenlerinden pozitif bölüm içerisine yerleştirilir ve üzerine yeterli miktarda KOH çözeltisi eklenir. Ardından, membran olarak kullanılan Whatman filtre kağıtları yerleştirilip tekrar KOH çözeltisi ile doyurulur.

Üstüne ikinci elektrot konulup yeniden KOH çözeltisi eklenir. süperkapasitörün iç yapısında bileşenler arasındaki mesafeyi koruyarak düzgün bir yerleşim sağlamak için ara parça yerleştirilir. Elektrotların sıkı temasını sağlayarak iç direnç kayıplarını minimize etmek ve iyon iletkenliğini iyileştirmek amacıyla yay eklenir.

Son olarak, negatif bölüm kapatılır ve montaj tamamlanır. Kapağın tam olarak kapanması için sistem 50-100 MPa arasında sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra süperkapasitör düzenekten çıkarılır ve elektrokimyasal performans testleri gerçekleştirilir.



Şekil 3.8: Süperkapasitör bileşenleri

3.2.6. Elektrokimyasal Performans Testleri

Süperkapasitörlerin elektrokimyasal performans testleri, bu enerji depolama cihazlarının kapasite, verimlilik, kararlılık ve güvenilirlik gibi temel özelliklerini değerlendirmek için yapılan analizlerdir. Alternatif akım sinyalleri kullanılarak, elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) iç direnç, yük transferi ve elektrolit difüzyon davranışını karakterize etmektedir.

Döngüsel voltametri, belirli bir voltaj aralığında hücreye lineer bir voltaj taraması uygulayarak akım-voltaj ilişkisini ölçer; bu yöntem, kapasiteyi belirlemenin yanı sıra elektrot malzemelerinin redoks tepkimelerini ve iletkenliğini analiz etmek için kullanılır.

Galvanostatik şarj-deşarj testi ise sabit bir akımda cihazın şarj vedeşarj süreçlerini izleyerek spesifik kapasite, enerji verimliliği ve uzun vadeli döngüsel kararlılık (örneğin 10.000+ döngü sonrası kapasite kaybı) gibi parametreleri ölçer.

Diğer testler arasında sızıntı akımı (bekleme durumunda enerji kaybı), kendiliğindendeşarj (açık devrede voltaj düşüşü) ve hız performansı (yüksek akımlarda kapasite koruma yeteneği) analizleri bulunur. Bu testler, süperkapasitörlerin gerçek dünya uygulamalarına uygunluğunu belirlemek ve rakip teknolojilere (örn. piller) kıyasla avantajlarını optimize etmekte kullanılmaktadır.

3.2.6.1. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS)

Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS), süperkapasitörlerin elektrokimyasal davranışını analiz etmek için kullanılan güçlü bir karakterizasyon yöntemidir. EIS, süperkapasitörlerin iç direnci, yük transfer kinetiği, elektrot/elektrolit ara yüzey özellikleri

ve dielektrik davranışı hakkında detaylı bilgi sağlar. Özellikle çift katman kapasitansı, faradik reaksiyonlar ve iyon difüzyon süreçlerinin ayrıştırılmasında etkilidir.

EIS, bir elektrokimyasal hücreye farklı frekanslarda küçük bir alternatif akım veya voltaj sinyali uygulanarak, sistemin empedansının (direncinin) frekansa bağlı ölçülmesine dayanır. Bu ölçümler, elektrot-elektrolit arayüzündeki çift tabaka, difüzyon ve yük transferi gibi süreçlerin analizini sağlar. Elde edilen empedans verileri, genellikle Nyquist ve Bode grafikleriyle görselleştirilir ve eşdeğer devre modelleriyle yorumlanır [129].

Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) analizlerinde, R_b (bulk resistance) ve R_{ct} (charge transfer resistance), sistemin temel elektriksel özelliklerini tanımlayarak eşdeğer devre modelleriyle belirlenir ve Nyquist diyagramında farklı bölgelerde gözlemlenir.

R_b , elektrolit, ayırıcı ve elektrot malzemesinin içinden geçen iyonların karşılaştığı toplam “hacimsel direnç”tir. Sistemin iyonik iletkenliğini temsil eder ve genellikle yüksek frekans bölgesinde, Nyquist diyagramında yatay eksenini kestiği noktada ölçülür. R_b değeri, malzemenin iletkenliğiyle ters orantılıdır; yani iletkenlik arttıkça R_b azalır

R_{ct} , elektrot/elektrolit arayüzünde gerçekleşen yük transferi reaksiyonlarının kinetiğini temsil eder. Elektrokimyasal reaksiyonun ne kadar kolay veya zor gerçekleştiğini gösterir.

R_{ct} , genellikle Nyquist diyagramında yarım dairenin çapı olarak gözlemlenir ve düşük frekanslarda belirginleşir. Yüksek R_{ct} , yavaş reaksiyon kinetiği veya arayüzde engeller olduğu anlamına gelir [130].

R_{ct} değeri, sıcaklık, elektrot yüzey durumu, elektrolit bileşimi ve şarj durumu gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir. EIS ölçümleri, İnönü Üniversitesi Fizik Bölümü Enerji Sistemleri Laboratuvarı’nda bulunan Zive marka cihaz kullanılarak alınmıştır.

3.2.6.2. Döngüsel voltametri (CV) analizi

Döngüsel voltametri (CV), süperkapasitörlerin elektrokimyasal performansını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, elektrotlar arasındaki potansiyelin belirli bir hızda (taramalı olarak) değiştirilmesi ve buna karşılık oluşan akımın ölçülmesi esasına dayanır. CV analizi sayesinde, süperkapasitörün enerji depolama mekanizmaları, kapasitans değeri ve elektrot-elektrolit arayüzündeki reaksiyonlar hakkında bilgi edinilebilir. CV eğrilerinin şekli, ideal bir süperkapasitörde genellikle dikdörtgene

yakın olur; ancak tarama hızı arttıkça eğriler eliptik bir forma kayabilir ve bu da sistemin denge koşullarından sapmasını gösterir. CV analizi ile yüzey kontrollü ve difüzyon kontrollü süreçlerin şarj depolamaya katkısı da incelenebilir, bu da süperkapasitörlerin performansını optimize etmek için önemlidir. CV sonuçları süperkapasitörlerin toplam kapasitansını, iç direncini ve enerji yoğunluğunu hesaplamak içinde kullanılır [131].

3.2.6.3. Kapasitans- tarama hızı

Süperkapasitörlerde kapasitansın tarama hızı ile ilişkisi, cihazın enerji depolama performansını anlamak için önemlidir. Genellikle, düşük tarama hızlarında iyonlar elektrot yüzeyine daha kolay ulaşabildiği için kapasitans daha yüksek ölçülür; ancak tarama hızı arttıkça iyonların elektrotun tüm yüzeyine ulaşması zorlaşır ve kapasitans azalır. Matematiksel modellemeler, kapasitansın tarama hızına üstel olarak bağımlı olduğunu ve özellikle seri direnç etkisinin bu düşüşte önemli rol oynadığını göstermektedir

CV ölçümleri kullanılarak kapasitans değeri aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir;

$$C = \frac{\int IdV}{2\Delta V \cdot s \cdot m}$$

Burada C, gram başına kapasitans, I akım, V voltaj, s tarama hızı ve m aktif malzeme kütesidir. Verilen denklem yardımı ile kapasitans değerlerinin tarama hızına karşı değişimi grafikleri elde edilir. Süperkapasitörlerde kapasitans genellikle tarama hızı arttıkça azalır [132].

3.2.6.4. Galvanostatik (akım kontrollü) analizi

Galvanostatik ölçüm, süperkapasitörlerin elektrokimyasal performansını analiz etmek için kullanılan bir yöntemdir. Süperkapasitöre sabit bir akım uygulanır ve zaman içinde voltajdaki değişimler kaydedilir. Süreç, şarj veya deşarj aşamalarında voltajın lineer olarak artması veya azalması üzerinden ilerler [133].

Örneğin, 1 A gibi sabit bir akım uygulandığında, voltajın belirli bir sürede (örneğin 10 saniyede) 2 V artması, kapasiteyi hesaplamak için kullanılır. Formül $C = I \times \Delta t / \Delta V$ ile ifade edilir; burada I akım, Δt süre, ΔV ise voltaj değişimidir. Bu hesaplama, süperkapasitörün depolayabileceği enerji miktarını (kapasite) doğrudan ortaya koyar. Ayrıca, akımın aniden uygulanması veya kesilmesi sırasında voltajda gözlemlenen ani sıçramalar, süperkapasitörün iç direnci olarak bilinen eşdeğer seri direnç (ESR) değerini

belirlemek için kullanılır Galvanostatik ölçüm, özellikle enerji depolama sistemlerinin dinamik davranışını test etmek, elektrot malzemelerinin verimliliğini değerlendirmek ve pil-süperkapasitör hibrit sistemlerinin optimizasyonu için kritik bir araçtır. Kısacası, bu teknik, süperkapasitörlerin performansını anlamak ve iyileştirmek için temel bir köprü görevi görür [134].

Galvanostatik kapasite ölçümü, elektrokimyasal enerji depolama sistemlerinin performansını değerlendirmek için yapılan önemli bir ölçümdür. Bu ölçümün alınmasının temel nedenleri şunlardır:

- ❖ Elektrot Kararlılığı, Süperkapasitör veya batarya elektrotlarının uzun vadeli kararlılığını belirlemek için çevirim sayısına bağlı kapasitans değişimi incelenir.
- ❖ Enerji Depolama Verimliliği, Kapasitansın zamanla nasıl değiştiği, cihazın enerji depolama verimliliğini anlamamıza yardımcı olur.
- ❖ Malzeme Değerlendirmesi, Farklı elektrot malzemelerinin performansını karşılaştırmak için kullanılır. Örneğin, karbon bazlı elektrotlar ile metal oksit elektrotlar arasındaki farkları görmek için bu test yapılır.
- ❖ Deşarj Mekanizması Analizi, Süperkapasitörlerin veya bataryaların şarj-deşarj mekanizmasını anlamak için kapasitansın çevirimlere bağlı değişimi incelenir.
- ❖ Yaşlanma Etkisi, Elektrot malzemelerinin zamanla nasıl bozulduğunu ve kapasite kaybının ne kadar olduğunu görmek için kullanılır [135].

Galvanostatik kapasite, süperkapasitörlerin belirli bir akım yoğunluğunda şarj-deşarj döngüleri sırasında depolayabildiği yük miktarını ölçen bir parametredir. Bu yöntemde, sabit bir akım uygulanarak cihazın şarj vedeşarj süreçleri kaydedilir. Elde edilen gerilim-zaman (V-t) grafiği, genellikle simetrik ve üçgen şeklinde bir profil sergiler. Şarj sırasında gerilim lineer olarak artarken,deşarjda aynı eğimle düşer. Kapasite değeri,deşarj süresi (Δt) ve uygulanan akım (I) kullanılarak $C = I \cdot \Delta t / \Delta V = \Delta Q / \Delta V$ formülüyle hesaplanır [136].

Grafikteki simetri, elektrotların kinetik dengeli olduğunu ve geri dönüşümlü iyon depolama mekanizmasını gösterir. Örneğin, elektriksel çift tabaka (EDLC) sistemlerinde ideal üçgen şekil korunurken, psödokapasitif malzemelerde (MnO_2 , polimerler) redox reaksiyonlarına bağlı olarak hafif eğrilikler veya plato bölgeleri görülebilir. Gerilim düşüşü (IR drop), grafiğin başlangıç noktasındaki ani düşüşle karakterize edilir ve bu, süperkapasitörün iç

direncinin (ESR) yüksek olduğunu işaret eder. Yüksek akım yoğunluklarında deşarj süresinin kısılması ve kapasitenin düşmesi, iyon difüzyonunun sınırlandığını veya elektrot yapısının yetersiz olduğunu gösterir [137].

3.2.6.5. Akım yoğunluğu kapasitans analizi

Süperkapasitörlerde akım yoğunluğu ile kapasitans arasındaki ilişki, cihazın hızlı şarj/deşarj performansını ve enerji depolama kapasitesini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Düşük akım yoğunluklarında iyonlar elektrot yüzeyine daha kolay ulaşır ve tüm aktif alanlar etkin şekilde kullanılır dolayısıyla kapasitans yüksek olur. Ancak akım yoğunluğu arttıkça, iyonların elektrotun iç kısımlarına ulaşması zorlaşır ve kapasitans genellikle azalır [138].

Örnek olarak çok gözenekli karbon elektrotlar düşük akım yoğunluğunda 374.7 F/g gibi yüksek kapasitans değerleri sunarken, akım yoğunluğu 500 A/g gibi çok yüksek değerlere çıktığında kapasitansın %60'ı korunabilmektedir. Bu, gözenekli yapının iyon difüzyonunu kolaylaştırması sayesinde mümkün olur [139].

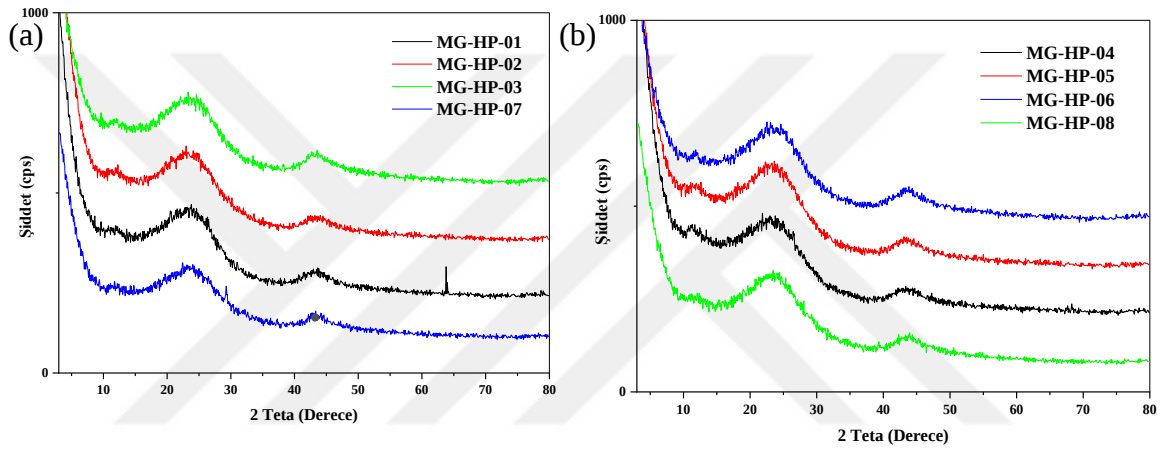
Hibrit elektrotlarda veya metal oksit bazlı süperkapasitörlerde de düşük akım yoğunluğunda yüksek kapasitans elde edilirken, yüksek akım yoğunluğunda kapasitansın bir kısmı korunabilmesi de örnektir. Ni-dopingle geliştirilen Co_3O_4 elektrotlar, akım yoğunluğu 2'den 200 mA/cm^2 'ye çıkarıldığında kapasitansın %86'sını koruyabilmektedir. Bu grafiklerde genellikle kapasitansın akım yoğunluğuna karşı azalan bir eğri izlediği görülür. Ancak gelişmiş gözenekli yapılar, yüksek iletkenlik ve uygun elektrot tasarımları sayesinde bu azalma minimize edilebilir ve yüksek akım yoğunluklarında bile yüksek kapasitans değerleri korunabilir. Bu da süperkapasitörlerin hızlı enerji depolama ve yüksek güç uygulamalarında daha verimli kullanılmasını sağlar [140].

4. DENEYSEL BULGULAR

4.1. Nanagözenekli Aktif Karbon Karakterizasyonu Bulguları

Nanagözenekli Aktif Karbon Karakterizasyonu için X-ışınları (XRD) analizi, Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi, Enerji Dağılımlı X-ışını (EDX) Analizi, Fourier dönüştürümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) analizi, Raman spektroskopisi, Brunauer-Emmett-Teller (BET) analizi, iyot sayısı, X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) analizi yapılmıştır.

4.1.1. X-ışınları analizi (XRD) Bulguları

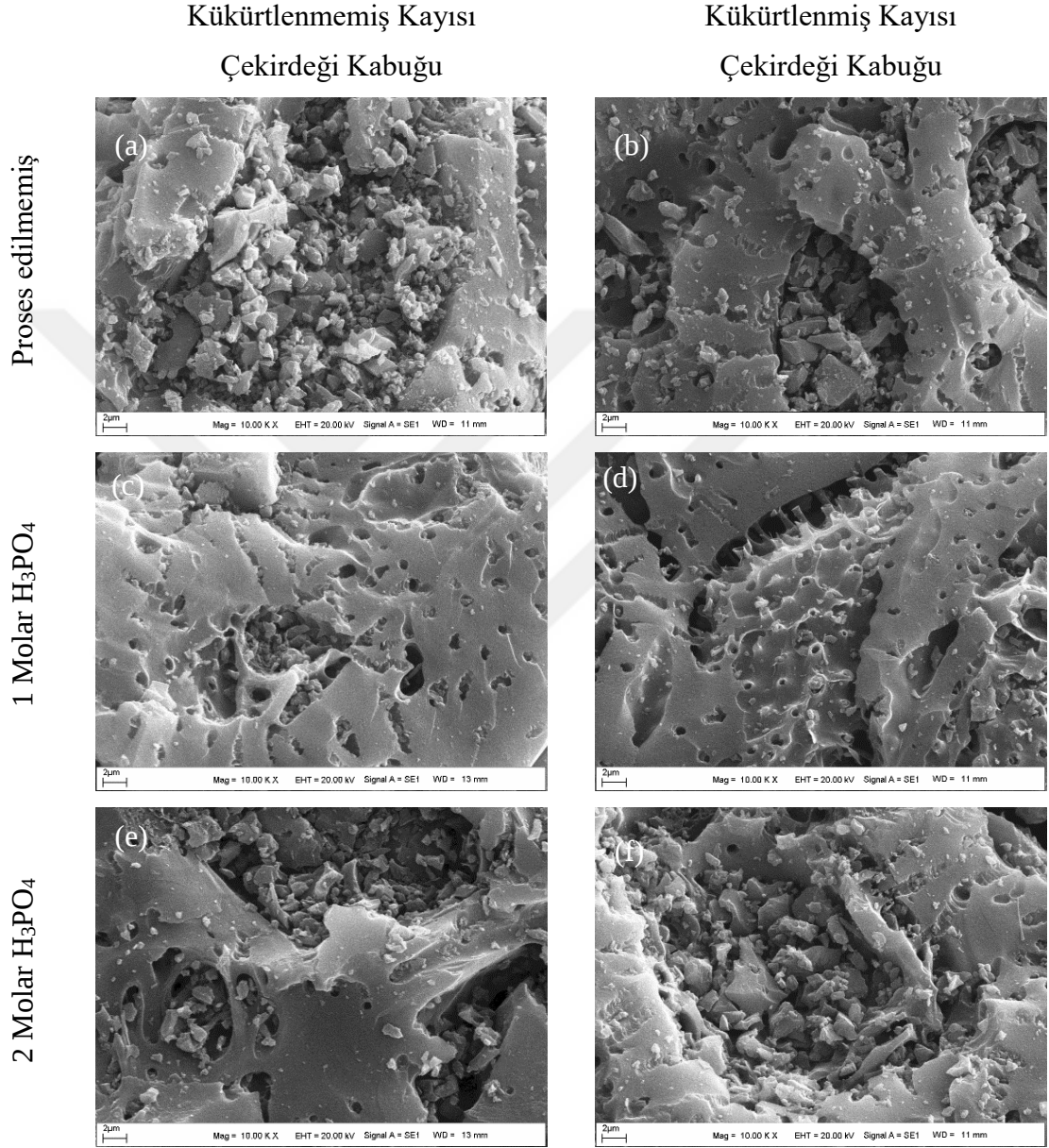


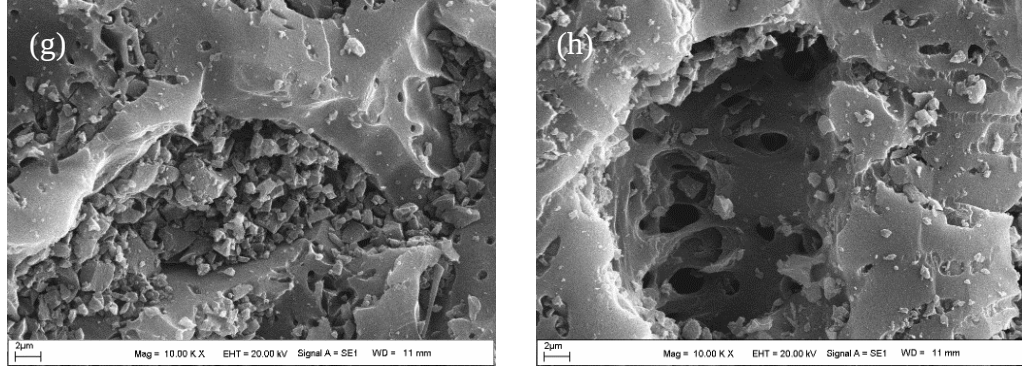
Şekil 4.1: (a) MG-HP-01, MG-HP-02, MG-HP-03 ve MG-HP-07 kodlu örneklerin XRD deseni ve faz analiz grafikleri, (b) MG-HP-04, MG-HP-05, MG-HP-06 ve MG-HP-08 kodlu örneklerin XRD deseni ve faz analiz grafikleri.

Şekil 4.1’den görüleceği üzere, yöntem 3.2’de anlatıldığı şekilde hazırlanan aktif karbonun XRD deseni ve faz analizinden aktif karbonun başarıyla hazırlandığı görülmektedir. 2-tetha 30°’de görülen potasyum oksit piki kayısının zengin potasyum kaynağı olmasından kaynaklanmaktadır. Aktif karbon, X-ışını kırınımı (XRD) analizinde karakteristik bir kırınım desenine sahiptir. Bu desen, genellikle geniş ve düşük şiddetli piklerden oluşur, bu da aktif karbonun amorf yapısını gösteren bir delildir. Şekil 4.1. a ve b de görüldüğü gibi, 2θ açısının yaklaşık 20-30° aralığında geniş bir pik ve 40-50° civarında daha küçük bir pik elde edilmiştir.. Bu pikler, aktif karbonun mikro-kristal yapısını ve düzensiz grafen tabakalarının varlığını işaret eder. XRD deseni, aktif karbonun gözenekli yapısı, yüzey alanı ve adsorpsiyon özellikleri hakkında dolaylı bilgiler sağlar. Ancak, aktif karbonun XRD deseni, malzemenin yüksek derecede amorf doğası nedeniyle genellikle keskin ve belirgin pikler

içermez. Tez çalışması kapsamında yapılan Fosforik asit katkılama çalışmasında kristal bir yapının oluşmaması yapı içerisinde fosforik asitin amorf benzeri bir özellik gösterdiğini göstermektedir.

4.1.2. Taramalı elektron mikroskobu analizi (SEM) Bulguları

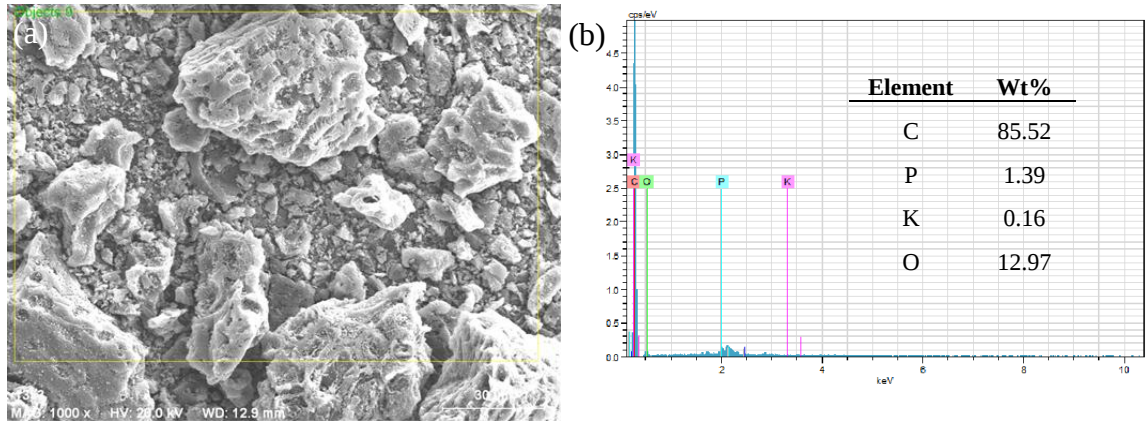




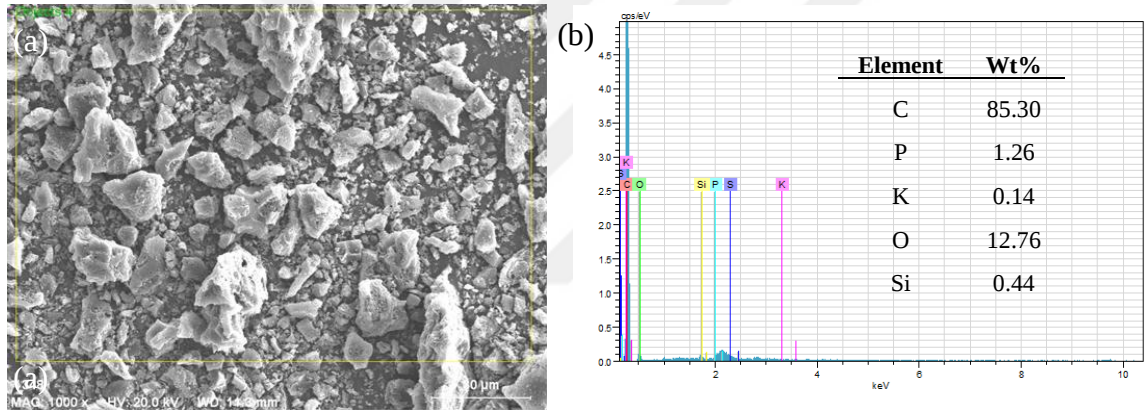
Şekil 4.2: (a) MG-HP-07 kodlu örneğin SEM görüntüsü, (b) MG-HP-08 kodlu örneğin SEM görüntüsü, (c) MG-HP-01 kodlu örneğin SEM görüntüsü, (d) MG-HP-04 kodlu örneğin SEM görüntüsü, (e) MG-HP-02 kodlu örneğin SEM görüntüsü, (f) MG-HP-05 kodlu örneğin SEM görüntüsü, (g) MG-HP-03 kodlu örneğin SEM görüntüsü (h) MG-HP-06 kodlu örneğin SEM görüntüsü.

Şekil 4.2’te aktif karbona özgü sem görüntüsü görülmektedir. Aktif karbonun SEM görüntüsünden, kayısı çekirdeği kabuğundan üretilmiş aktif karbonun gözenek boyutu dağılımının mikron düzeyinde olduğu ve nanogözenekli aktif karbon örneğinin başarıyla sentezlendiğini göstermektedir. Fosforik asit katkılama çalışmasında yüzeysel değişimler incelendiğinde tanelerin yüzeyinde farklı çaplarda boşluklar oluştuğu görülmektedir. Bu durum iki şekilde açıklanabilir, bunlardan ilk olarak fosforik asitin üretilen hard karbondan olası metalleri çözerek yüzey alanının artırıcı bir role sahip olması yada fosforik asit prosesi sırasında malzemenin yüzeysel deformasyonu olarak yorumlanabilir.

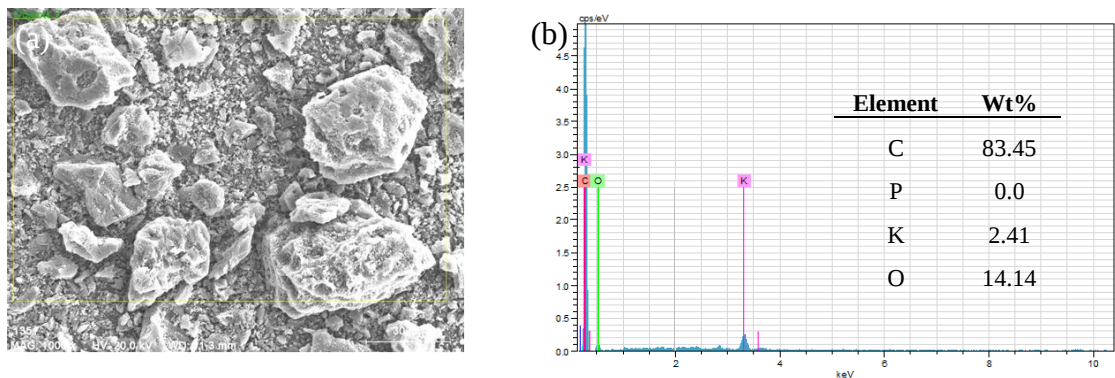
4.1.3. Enerji Dağılımlı X-ışını (EDX) Analizi Bulguları



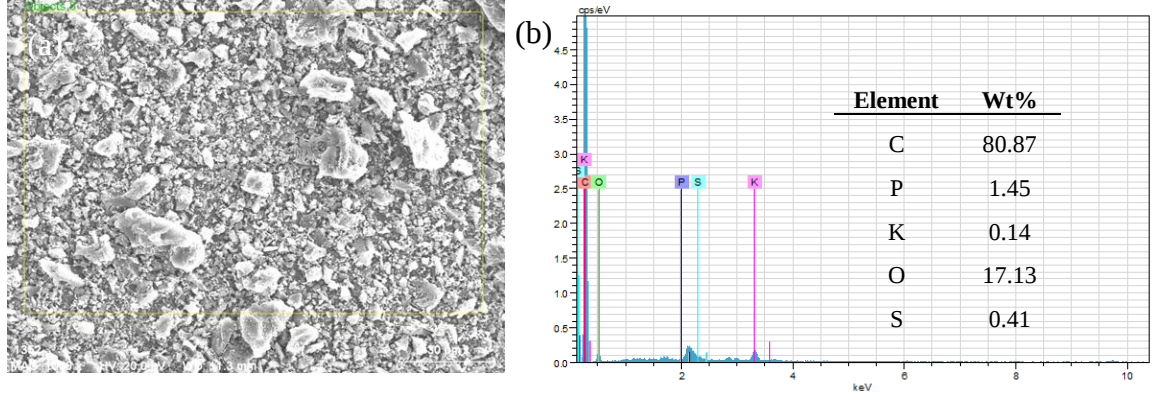
Şekil 2.3: (a) MG-HP-01 kodlu örneğin SEM görüntüsü (b) MG-HP-01 kodlu örneğin EDX spektrumu.



Şekil 4.4: (a) MG-HP-04 kodlu örneğin SEM görüntüsü (b) MG-HP-04 kodlu örneğin EDX spektrumu.



Şekil 4.5: a) MG-HP-07 kodlu örneğin SEM görüntüsü (b) MG-HP-07 kodlu örneğin EDX spektrumu



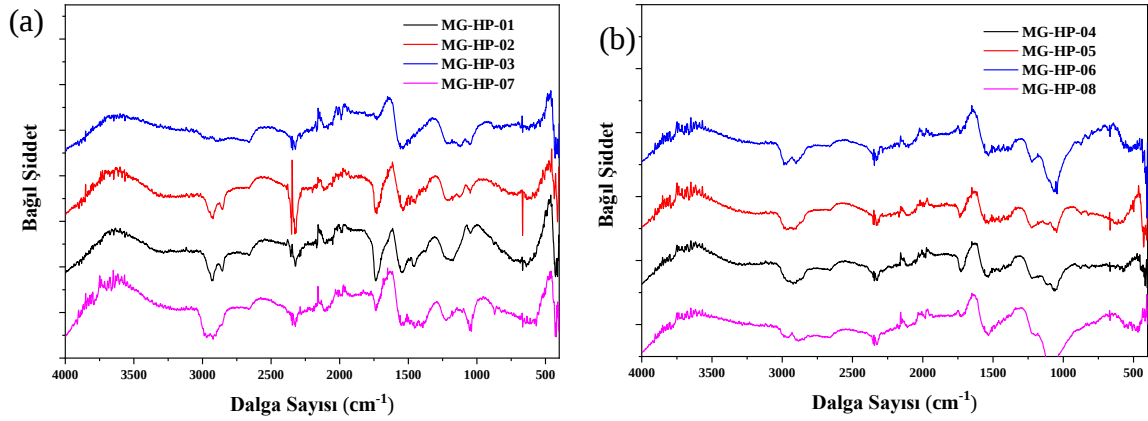
Şekil 4.6: (a) MG-HP-08 kodlu örneğin SEM görüntüsü (b) MG-HP-08 kodlu örneğin EDX spektrumu.

Fosforik asit katkılanması ile üretilen malzemelerin elementel dağılımları incelendiğinde Şekil 4.2- 4.6 ve Çizelge 4.1’de görüldüğü üzere malzemenin genel olarak %85 bandında karbon içerdiği ve oksijen miktarının ile fosfor miktarının değiştiği açık bir şekilde görülmektedir. Bu durum katkılama çalışmasının başarılı bir şekilde tamamlandığını göstermektedir.

Çizelge 4.1: MG-HP-01, MG-HP-04, MG-HP-07 ve MG-HP-08 kodlu örneklerin SEM-EDX sonuçları.

	C%	P%	K%	O%	S%	Si%
MG-HP-01	85.52	1.39	0.16	12.97	0.0	0.0
MG-HP-04	85.30	1.26	0.14	12.76	0.44	0.10
MG-HP-07	83.45	0.0	2.41	14.14	0.0	0.0
MG-HP-08	80.87	1.45	0.14	17.13	0.41	0.0

4.1.4. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) analizi Bulguları



Şekil 4.7: (a) MG-HP-01, MG-HP-02, MG-HP-03 ve MG-HP-07 kodlu örneklerin FT-IR spektrum grafikleri, **(b)** MG-HP-04, MG-HP-05, MG-HP-06 ve MG-HP-08 kodlu örneklerin FT-IR spektrum grafikleri.

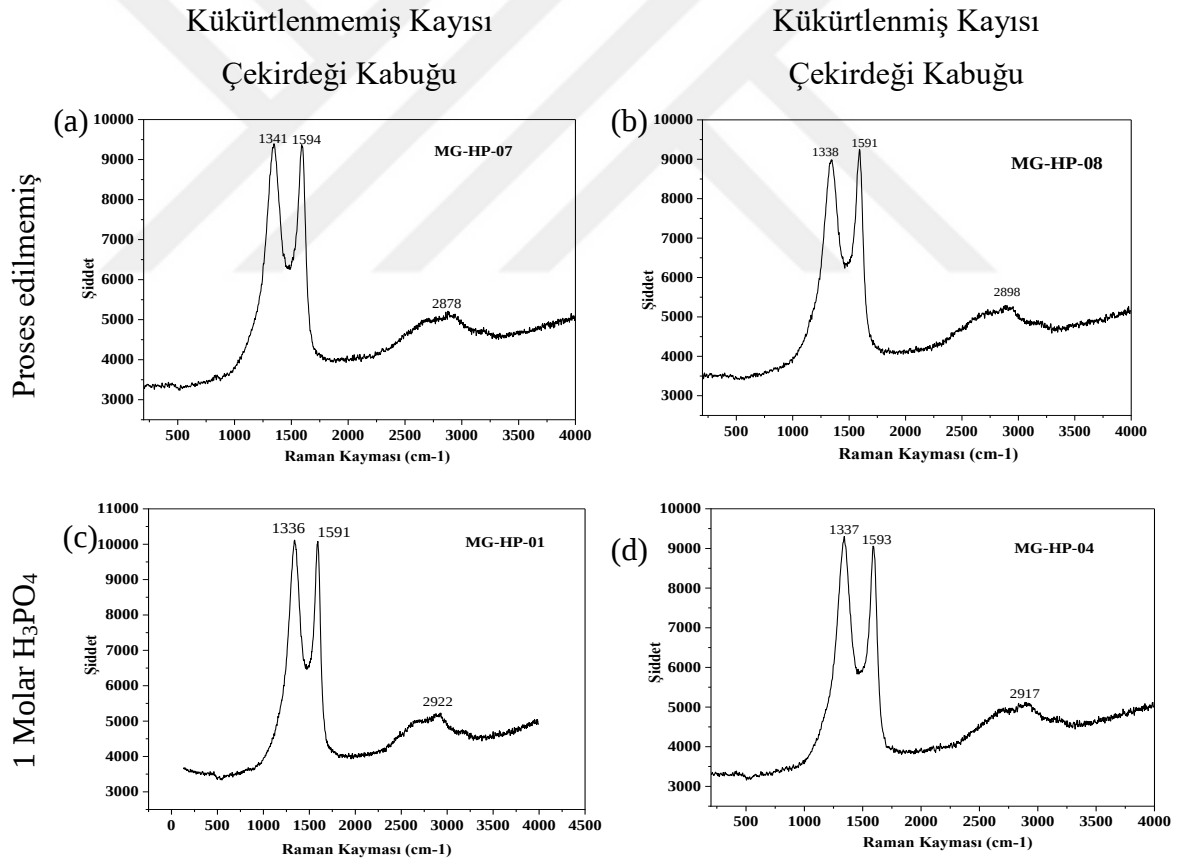
Şekil 4.7’de görülen aktif karbona ait FT-IR spektrumları verilmiştir ve aktif karbon FTIR spektrumu, bu malzemenin yüzey kimyasını ve fonksiyonel gruplarını anlamak için önemli bir analiz yöntemidir. Spektrumda genellikle $3400\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$ civarında geniş bir bant gözlenir, bu hidroksil gruplarının varlığını gösterir. $2850\text{--}2920\text{ cm}^{-1}$ aralığındaki pikler, alifatik C-H gerilmelerini temsil eder. 1700 cm^{-1} civarındaki bant, karbonil gruplarının varlığına işaret eder. 1600 cm^{-1} dolaylarında görülen pik, aromatik C=C bağlarını gösterir. $1000\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$ arasındaki bantlar ise C-O gerilmelerini temsil eder.

4.1.5. Raman spektroskopisi bulguları

Aktif karbon, Raman spektroskopisi ile incelendiğinde karakteristik bantlar sergiler. Spektrumda genellikle iki belirgin pik gözlenir: D bandı (yaklaşık 1350 cm^{-1}) ve G bandı (yaklaşık 1580 cm^{-1}). D bandı, karbon yapısındaki kusurları ve düzensizlikleri temsil ederken, G bandı grafit benzeri sp^2 hibridizasyonlu karbon atomlarının varlığını gösterir. Bu iki bandın göreceli yoğunlukları ve genişlikleri, aktif karbonun yapısal özelliklerini, grafitizasyon derecesini ve yüzey fonksiyonel gruplarını anlamak için kullanılır. Ayrıca, 2700 cm^{-1} civarında gözlenen 2D bandı, grafen tabakalarının istiflenmesi hakkında bilgi verir. Aktif karbonun Raman spektrumu, malzemenin üretim koşulları, aktivasyon yöntemi ve uygulanan işlemlere bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Şekil 4.8 a-d fosforik asit ile proses edilmiş aktif karbon malzemesinin Raman spektrumlarını göstermektedir. elde edilen grafikler incelendiğinde örneklerde 3 farklı karakteristik pik elde edilmiş ve bu pikler aktif

karbon karakteristik yapısına aittir. Forsorik asit katkılama çalışmasında aktif karbonun genel yapısını koruduğu Raman analizlerinden elde edilmektedir.

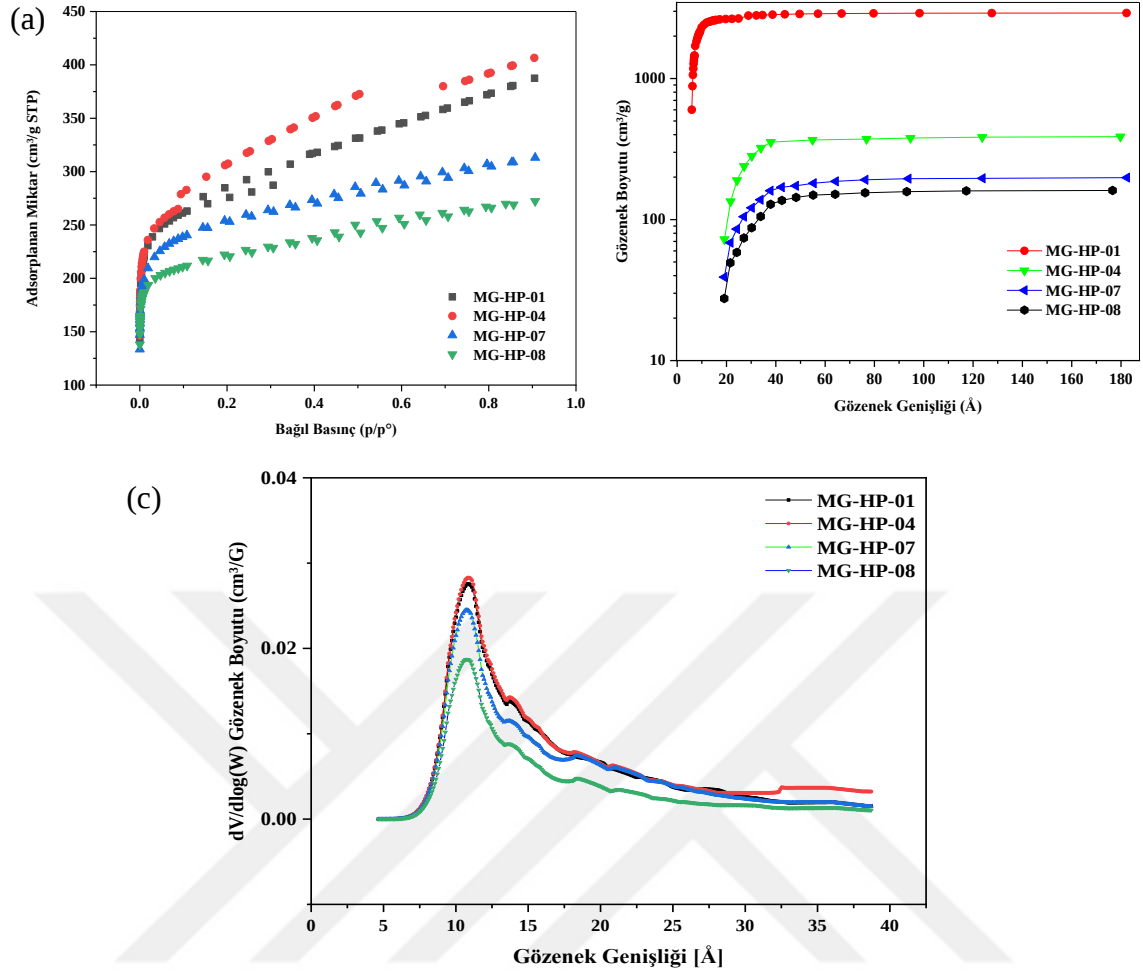
Aktif karbon, Raman spektroskopisi ile incelendiğinde karakteristik bantlar sergiler. Spektrumda genellikle iki belirgin pik gözlenir: D bandı (yaklaşık 1350 cm^{-1}) ve G bandı (yaklaşık 1580 cm^{-1}). D bandı, karbon yapısındaki kusurları ve düzensizlikleri temsil ederken, G bandı grafit benzeri sp^2 hibridizasyonlu karbon atomlarının varlığını gösterir. Bu iki bandın göreceli yoğunlukları ve genişlikleri, aktif karbonun yapısal özelliklerini, grafitizasyon derecesini ve yüzey fonksiyonel gruplarını anlamak için kullanılır. Ayrıca, 2700 cm^{-1} civarında gözlenen 2D bandı, grafen tabakalarının istiflenmesi hakkında bilgi verir. Aktif karbonun Raman spektrumu, malzemenin üretim koşulları, aktivasyon yöntemi ve uygulanan işlemlere bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Elde edilen analizlerde I_D/I_G oranlarının aktif karbon yapısı ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4.8: (a) MG-HP-07 kodlu örneğin RAMAN spektrumu, (b) MG-HP-08 kodlu örneğin RAMAN spektrumu, (c) MG-HP-01 kodlu örneğin RAMAN spektrumu, (d) MG-HP-04 kodlu örneğin RAMAN spektrumu.

4.1.7. Brunauer-Emmett-Teller (BET) analizi bulguları

Aktif karbon BET analizi, malzemenin yüzey alanını ve gözenek yapısını belirlemek için kullanılan önemli bir karakterizasyon yöntemidir. Bu teknik, düşük sıcaklıkta (genellikle sıvı azot sıcaklığında, -196°C) azot gazı adsorpsiyonuna dayanır. BET analizi sonucunda, aktif karbonun spesifik yüzey alanı (m^2/g cinsinden), gözenek hacmi ve gözenek boyut dağılımı hakkında detaylı bilgi elde edilir. Aktif karbonun yüksek yüzey alanı ve gelişmiş gözenek yapısı, adsorpsiyon kapasitesini ve etkinliğini doğrudan etkiler. BET izotermi, malzemenin mikro (<2 nm), mezo (2-50 nm) ve makro (>50 nm) gözeneklerinin varlığını ve oranlarını gösterir. Bu veriler, aktif karbonun çeşitli uygulamalardaki performansını tahmin etmek ve optimize etmek için kullanılır. Şekil 4.9.a Adsorpsiyon-bağıl basınç grafiklerini göstermektedir ve en yüksek adsorpsiyon MG-HP-04 örneğinde elde edilmiştir. Üretilen örneklerde gözenek boyut dağılım grafikleri Şekil 4.9.b de verilmiş ve en yüksek gözenek dağılımı MG-HP-01’de elde edilmiştir. Şekil 4.9.c gözenek dağılım grafiği incelendiğinde mikro gözenekli bir yapıda olduğu görülmektedir.



Şekil 4.9: MG-HP-01, MG-HP-04, MG-HP-07 ve MG-HP-08 kodlu örneklerin BET analizinden elde edilen (a) absorpsiyon-bağıl basınç (b) gözenek çapı gözenek genişliği, (c) gözenek boyutu- gözenek genişliği grafikleri

Üretilen örneklerin BET yüzey alanları Çizelge 4.2’de verilmiştir ve fosforik asit katkılanması ile yüzey alanının arttığı açık bir şekilde görülmektedir. Bu durum SEM yüzey incelemelerinde ekstra oluşan boşluklu yapıları da desteklemektedir.

4.1.8. İyot sayısı analizi bulguları

Çizelge 4.2: MG-HP-01, MG-HP-04, MG-HP-07 ve MG-HP-08 kodlu örneklerin BET analiz sonuçları ve İyot testi analiz sonuçları

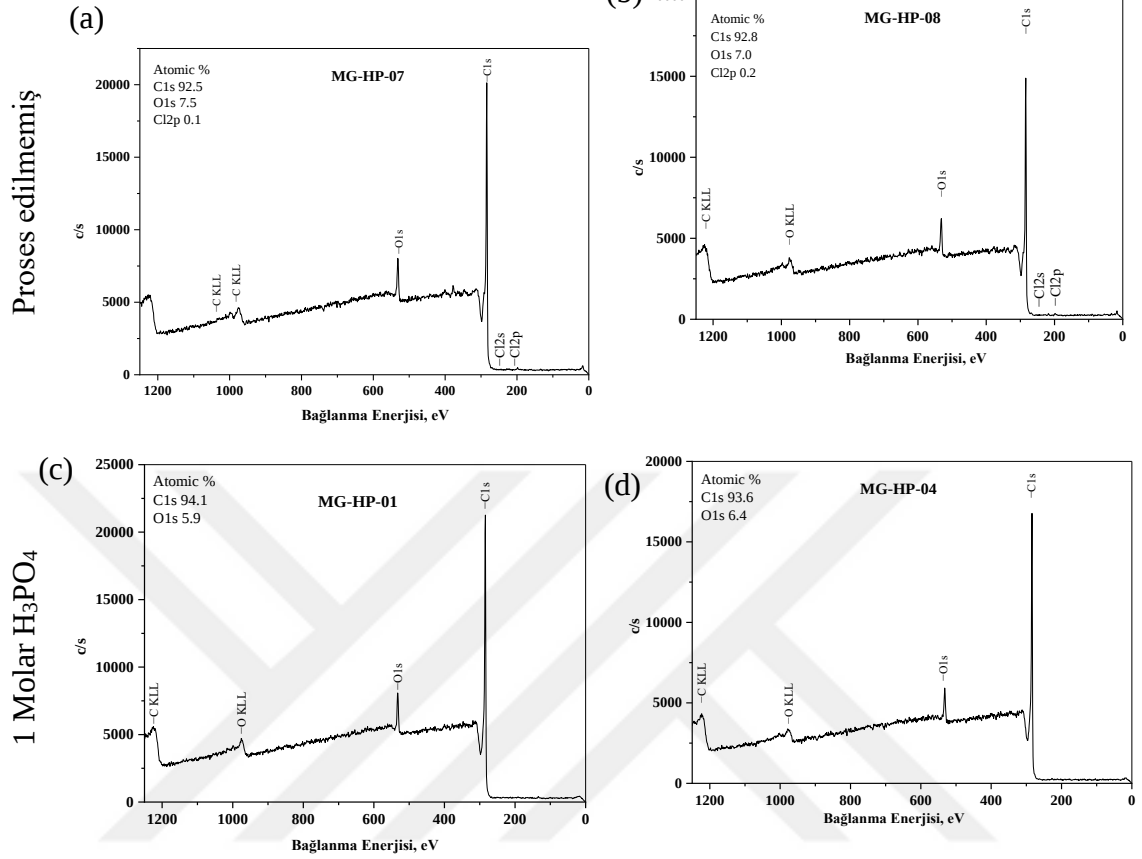
Örnek kodu	Bet Yüzey Alanı (m ² /g)	İyot Sayısı (mg/g)
MG-HP-01	1033	1132
MG-HP-04	1066	1150
MG-HP-07	945.6	998
MG-HP-08	831.4	899

4.1.9. X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) bulguları

Aktif karbon XPS analizi survey spektrumu, karbon bazlı malzemelerin yüzey kimyasal kompozisyonunu incelemek için kullanılan önemli bir tekniktir. Bu spektrum, geniş bir bağlanma enerjisi aralığında ölçülen fotoelektron yoğunluğunu gösterir ve malzemenin yüzeyindeki elementlerin varlığını ve göreceli konsantrasyonlarını ortaya çıkarır. Tipik olarak, aktif karbonun XPS survey spektrumunda C1s, ve O1s gibi ana pikler gözlemlenir. Bu pikler sırasıyla karbon, ve oksijen elementlerinin varlığını gösterir. Spektrumdaki piklerin şiddeti ve alanı, bu elementlerin yüzeydeki göreceli miktarlarını yansıtır. Ayrıca, spektrumda gözlemlenen diğer pikler, aktif karbonun üretim sürecinden veya sonraki işlemlerden kaynaklanan safsızlıkları veya fonksiyonel grupları işaret edebilir. XPS survey spektrumu analizi, aktif karbonun yüzey özelliklerini anlamak ve potansiyel uygulamalarını değerlendirmek için temel bir adımdır. Şekil 4.10 üretilen 4 adet örneğe ait XPS survey spektrumunu göstermektedir. yapılan analizlerde karbon ve oksijene bağlı pikler açık bir şekilde gözlenmiştir.

Kükürtlenmemiş Kayısı
Çekirdeği Kabuğu

Kükürtlenmiş Kayısı
Çekirdeği Kabuğu



Şeki 4.10: (a) MG-HP-07 kodlu örneğin XPS analizi, (b) MG-HP-08 kodlu örneğin XPS analizi, (c) MG-HP-01 kodlu örneğin XPS analizi, (d) MG-HP-04 kodlu örneğin XPS analizi.

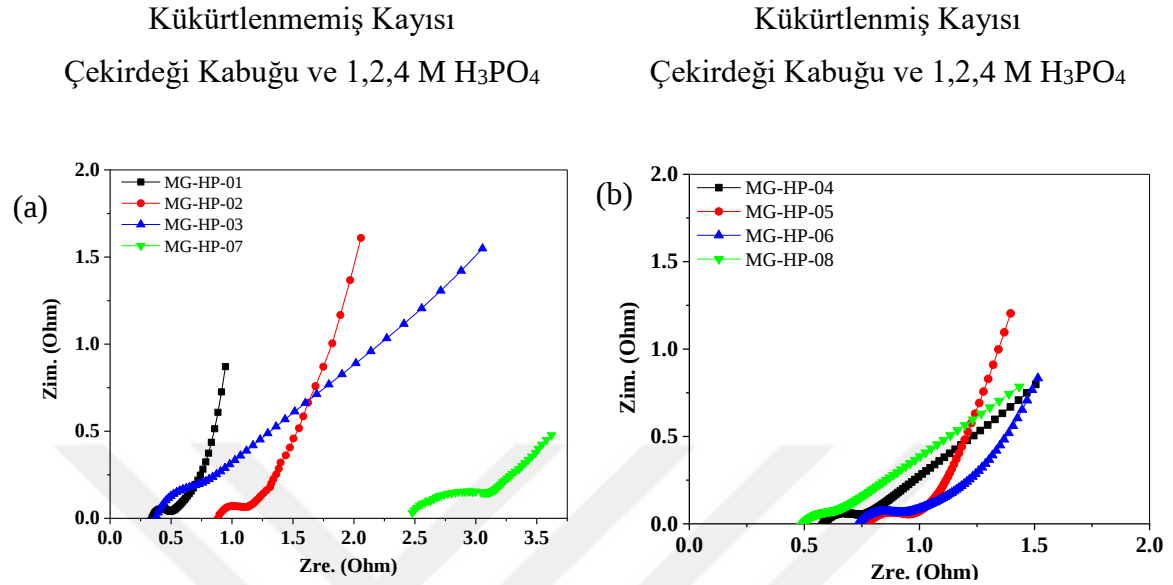
4.1.10. Elementel analiz

Çizelge 4.2: Elementel analiz

Sıra	Örnek Kodu	%C	%H	%N	%S	%P
1	MG-HP-01	79.17	3.656	-	-	
2	MG-HP-02	84.54	1.222	-	-	
3	MG-HP-03	80.99	0.568	-	-	
4	MG-HP-04	70.85	1.011	-	0.215	
5	MG-HP-05	70.48	1.589	-	0.208	
6	MG-HP-06	70.85	1.613	-	0.140	
7	MG-HP-07	84.54	1.222	-	-	
8	MG-HP-08	70.93	5.540	-	0.228	

4.2. Elektrokimyasal Performans Testleri

4.2.1. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS)



Şekil 4.11: (a) MG-HP-01, MG-HP-02, MG-HP-03 ve MG-HP-07 kodlu örneklerin EIS analizleri, **(b)** MG-HP-04, MG-HP-05, MG-HP-06 ve MG-HP-08 kodlu örneklerin EIS analizleri.

Tez kapsamında EDLC formunda üretilen süperkapasitörlerin EIS analiz sonuçları Şekil 4.11 a ve b 'de verilmiştir. EDLC formunda üretilen süperkapasitör hücreleri iki farklı şekilde incelenmiştir. İlk olarak proses edilmemiş ve kükürtlenmemiş aktif karbon (MG-HP-07) kullanılarak üretilen EDLC kapasitörün EIS analizini incelendiğinde RB değerinin 2.48 Ohm olarak ve RCT değerinin (3.12 ohm -2.48 Ohm) ise 0.64 Ohm olarak bulunmuştur.

Daha sonra 1M, 2M ve 4M H₃PO₄ ile proses edilmiş kükürtlenmemiş aktif karbonlar kullanılarak elde edilen EDLC süperkapasitör hücrelerine ait EIS grafikleri incelendiğinde, RB değerlerinin sırası ile 0.32 ohm, 0.86 ohm ve 0.37 ohm olarak; RCT değerleri ise 0.18 ohm, 0.25 ohm, ve 0.33 ohm olarak bulunmuştur.

İkinci olarak proses edilmemiş ve kükürtlenmiş aktif karbon (MG-HP-08) kullanılarak üretilen EDLC kapasitörün EIS analizini incelendiğinde RB değerinin 0.47 Ohm ve RCT değeri ise 0.15 Ohm olarak bulunmuştur. 1M, 2M ve 4M H₃PO₄ ile proses edilmiş kükürtlenmiş aktif karbonlar kullanılarak elde edilen EDLC süperkapasitör hücrelerine ait EIS grafikleri incelendiğinde, RB değerlerinin sırası ile 0.55 ohm, 0.74 ohm ve 0.70 ohm

olarak; RCT değerleri ise 0.21 ohm, 0.22 ohm, ve 0.64 ohm olarak bulunmuştur ve bu değerlerin yaklaşık aynı değerlerde olduğu görülmektedir.

Fosforik asit ile proses edilmemiş aktif karbon kullanılarak elde edilen EDLC süperkapasitör hücresi ile karşılaştırdığımızda, Fosforik asit ile proses edilen aktif karbonun RB değerinin ciddi oranda azaldığı görülmektedir. Bu durum fosfor katkılanması ile iletkenliğin artması olarak yorumlanabilir.

4.2.2. Döngüsel voltametri (CV) analizi

Süperkapasitör CV (döngüsel voltametri) analizi, bu enerji depolama cihazlarının elektrokimyasal performansını değerlendirmek için kullanılan önemli bir tekniktir. Bu yöntemde, süperkapasitöre belirli bir tarama hızında değişen bir potansiyel uygulanır ve elde edilen akım yanıtı kaydedilir. Oluşan CV eğrisi, süperkapasitörün kapasitif davranışı, redoks reaksiyonları ve elektrot malzemesinin stabilitesi hakkında değerli bilgiler sağlar. Eğrinin şekli ve alanı, cihazın spesifik kapasitansı ve enerji depolama kapasitesi hakkında fikir verir. Ayrıca, farklı tarama hızlarında yapılan CV analizleri, süperkapasitörün hızlı şarj-deşarj yeteneklerini ve kapasitans hesaplamak için kullanılır.

CV eğrisinden kapasitans hesaplama, süperkapasitörlerin performansını değerlendirmek için önemli bir adımdır. Bu hesaplama, genellikle eğrinin entegrasyonu yoluyla yapılır. CV eğrisinin kapalı alanı, depolanan toplam yükü temsil eder. Bu alan, tarama hızına bölünerek spesifik kapasitans elde edilir. Hesaplama formülü şu şekildedir:

$$C = (\int IdV) / (2m\Delta V),$$

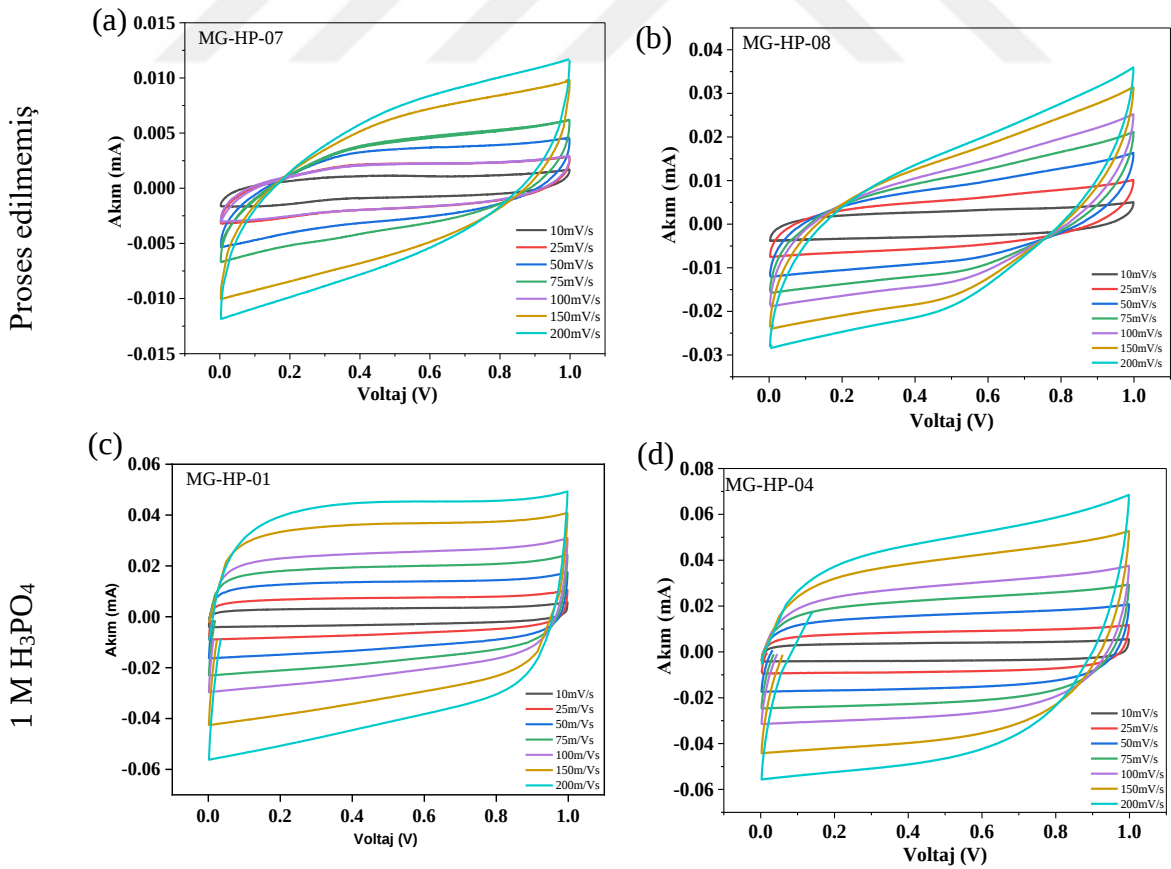
burada I akım, V voltaj, m aktif malzeme kütlesi, v tarama hızı ve ΔV potansiyel aralığıdır. Bu yöntem, farklı elektrot malzemelerinin ve elektrolit kombinasyonlarının kapasitif performansını karşılaştırmak için kullanılır. Ayrıca, farklı tarama hızlarında yapılan ölçümler, süperkapasitörün hız performansını ve güç yoğunluğunu değerlendirmek için önemlidir.

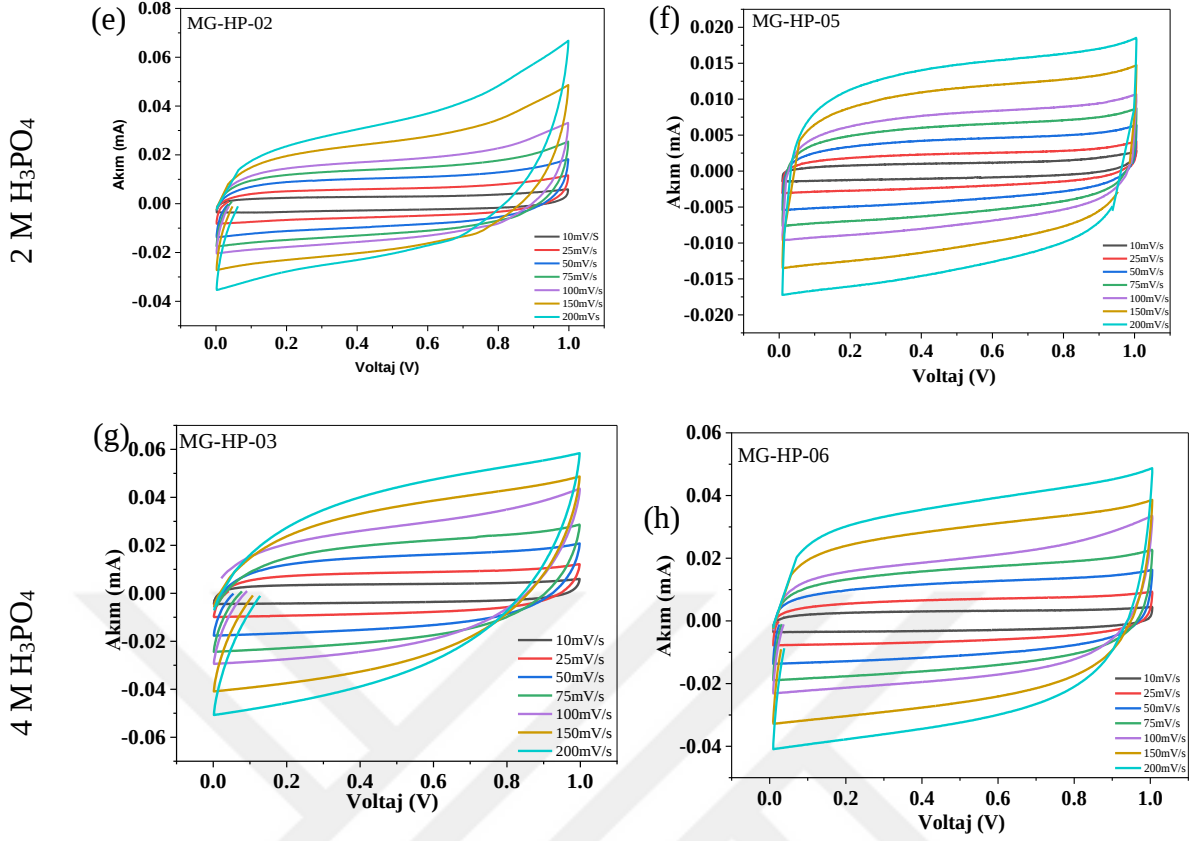
Şekil 4.12 üretilen örnekler kullanılarak dizayn edilen EDLC için farklı tarama hızlarındaki CV ölçüm sonuçlarını göstermektedir. yapılan çalışmada CV ölçümlerinin sanki dikdörtgen benzeri bir oluşumda meydana gelmesi süper kapasitör özellikleri için önemlidir. CV (döngüsel voltametri) eğrisinin dikdörtgen şeklinde olması, süperkapasitörün ideal kapasitif davranış sergilediğini gösterir. Bu durum, aşağıdaki özellikleri yansıtır:

1. Hızlı şarj-deşarj kabiliyeti: Dikdörtgen şekli, elektrotların hızlı bir şekilde yük alıp verebildiğini gösterir.
2. Düşük iç direnç: Keskin köşeler, süperkapasitörün düşük iç dirence sahip olduğunu ve enerji kaybının az olduğunu belirtir.
3. Yüksek kapasitans: Dikdörtgenin alanı ne kadar büyükse, depolanan yük miktarı o kadar fazladır.
4. İdeal tersinirlik: Şarj vedeşarj eğrilerinin simetrik olması, süreçlerin tersinir olduğunu gösterir.
5. Geniş potansiyel penceresi: Dikdörtgenin genişliği, süperkapasitörün geniş bir potansiyel aralığında çalışabildiğini gösterir.
6. Elektrokimyasal stabilite: Tekrarlanan döngülerde şeklin korunması, malzemenin stabilitesini gösterir.

Kükürtlänmemiş Kayısı
Çekirdeği Kabuğu

Kükürtlänmiş Kayısı
Çekirdeği Kabuğu





Şekil 4.12: (a) MG-HP-07 kodlu örneğin CV grafiği, (b) MG-HP-08 kodlu örneğin CV grafiği, (c) MG-HP-01 kodlu örneğin CV grafiği, (d) MG-HP-04 kodlu örneğin CV grafiği, (e) MG-HP-02 kodlu örneğin CV grafiği, (f) MG-HP-05 kodlu örneğin CV grafiği, (g) MG-HP-03 kodlu örneğin CV grafiği, (h) MG-HP-06 kodlu örneğin CV grafiği.

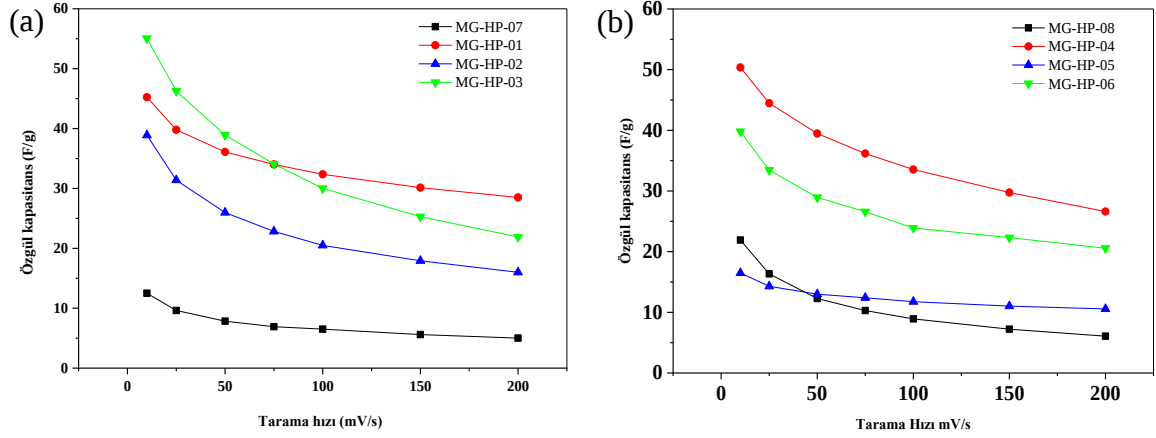
4.2.3. Kapasitans- tarama hızı

Süperkapsitörlerde yatay eksenle tarama hızı (mV/s), dikey eksenle ise kapasitans (F/g) gösterilen grafikler, cihazın hızlı şarj-deşarj performansını ve elektrot malzemesinin iyonlara erişilebilirliğini değerlendirmek için kullanılır. Bu grafikler, özellikle döngüsel voltametri (CV) ölçümlerinden elde edilir ve süperkapsitörün gerçek uygulamadaki davranışını anlamak için önemlidir. Şekil 4.13. a ve b de kükürtlenmemiş ve kükürtlenmemiş kayısı çekirdeği kabuğuna 1,2,4 M H₃PO₄ proses edilen süperkapsitör cihazlarının farklı tarama hızlarındaki kapasitans grafikleri verilmiştir. Döngüsel voltametri (CV) yönteminden ve denklemden () yararlanılarak kapasitans değerleri hesaplanmıştır. Tarama hızları sırasıyla

10 mV/s, 25 mV/s, 50 mV/s, 75 mV/s, 100 mV/s, 150 mV/s ve 200 mV/s olarak ayarlanmıştır. Grafikler incelendiğinde Kapasitans değerinin tarama hızı azalması ile azaldığı görülmektedir. CV tarama hızı, kapasitansı etkileyen önemli bir faktördür. Tarama hızı arttıkça, genellikle ölçülen kapasitans değeri azalır. Bu ilişki şu nedenlerle açıklanabilir:

1. İyon difüzyonu: Yüksek tarama hızlarında, elektrolit iyonlarının elektrot yüzeyine ve gözeneklerine difüzyonu için yeterli zaman olmayabilir. Bu, erişilebilir yüzey alanını azaltarak kapasitansı düşürür.
2. Elektrot direnci: Hızlı taramalarda, elektrot malzemesinin iç direnci daha belirgin hale gelir ve kapasitif davranışı etkiler.
3. Yük transfer kinetiği: Yüksek hızlarda, yük transfer reaksiyonları tam olarak gerçekleşemeyebilir, bu da kapasitansı azaltır.
4. Çift tabaka oluşumu: Düşük tarama hızlarında, elektriksel çift tabaka tam olarak oluşabilirken, yüksek hızlarda bu süreç tamamlanamayabilir.
5. Psödokapasitif etkiler: Bazı malzemelerde görülen yüzey redoks reaksiyonları, düşük tarama hızlarında daha belirgindir ve kapasitansa katkıda bulunur.
6. CV eğrisi şekli: Düşük tarama hızlarında daha dikdörtgensel bir eğri elde edilirken, yüksek hızlarda eğri daha oval bir şekle dönüşür.

İdeal bir süperkapasitör için, geniş bir tarama hızı aralığında kapasitansın sabit kalması istenir. Ancak pratikte, tarama hızı arttıkça kapasitansın bir miktar düşmesi normaldir. Bu etkiyi minimize etmek için elektrot malzemesi ve elektrolit optimizasyonu yapılabilir.



Şekil 4.13: (a) MG-HP-01, MG-HP-02, MG-HP-03 ve MG-HP-07 kodlu örneklerin kapasitans tarama hızı grafiği, **(b)** MG-HP-04, MG-HP-05, MG-HP-06 ve MG-HP-08 kodlu örneklerin kapasitans tarama hızı grafiği.

4.2.4. Galvanostatik (akım kontrollü) ölçüm sonuçları

Kapasitör galvanostatik ölçümü, sabit akım altında kapasitörün şarj ve deşarj davranışını incelemek için kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, kapasitörün performansını değerlendirmek ve kapasitans değerini hesaplamak için kullanılır.

İdeal bir EDLC'nin kapasitansı (F) galvanostatik şarj/deşarj (GC/GD) eğrilerinin eğiminden hesaplanır:

$$C_{GC/GD} = \frac{I \Delta t}{I \Delta U}$$

Burada I uygulanan akım (A), Δt deşarj veya şarj süresi (s) ve ΔU omik düşüşe göre düzeltilmiş hücre potansiyelindeki (V) değişimdir. Böylece, tek bir elektrotun spesifik deşarj kapasitansı ($F g^{-1}$) olur:

$$C_{el,GD} = \frac{2C_{GD}}{0.5m_{el}}$$

Burada m_{el} (g) elektrotların toplam kütlesidir. Faradaik süreçlere (redoks elektrolitler, hidrojen elektrosorpsiyonu, metal oksitler, iletken polimerler, vb.) ve herhangi bir bozunma sürecine sahip EDLC'ler için, GC/GD eğrilerinde doğrusal olmayan bir durum ortaya çıkar ve yeterli bilgi elde etmek için farklı hesaplamalar uyarlanmalıdır. Doğrusal olmayan

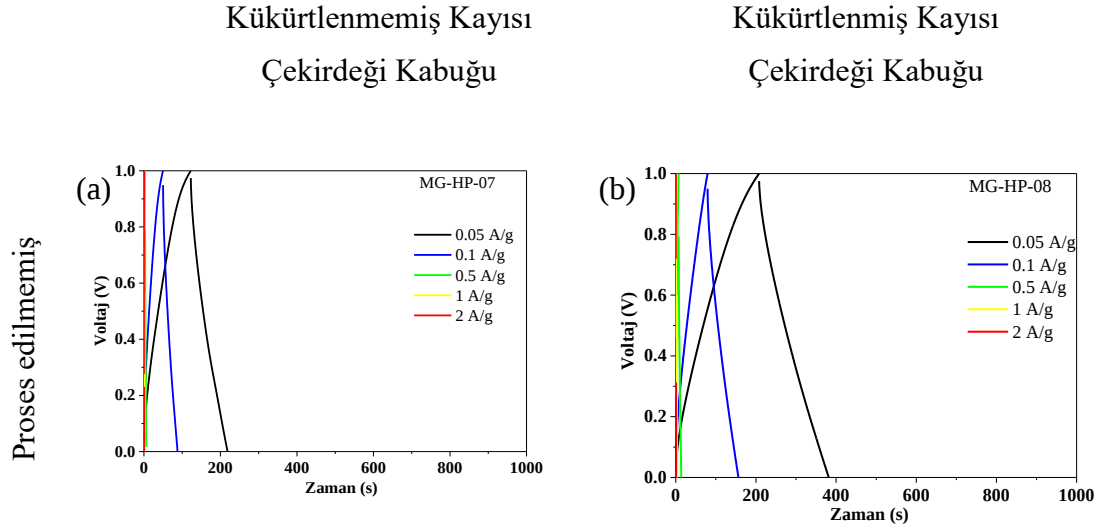
GC/GD özellikleri durumunda, deşarj enerjisi entegre edilerek, yani GD eğrisinin altındaki alan (veya GC'den yük enerjisi E_{int}/C) bulunarak hesaplanmalıdır:

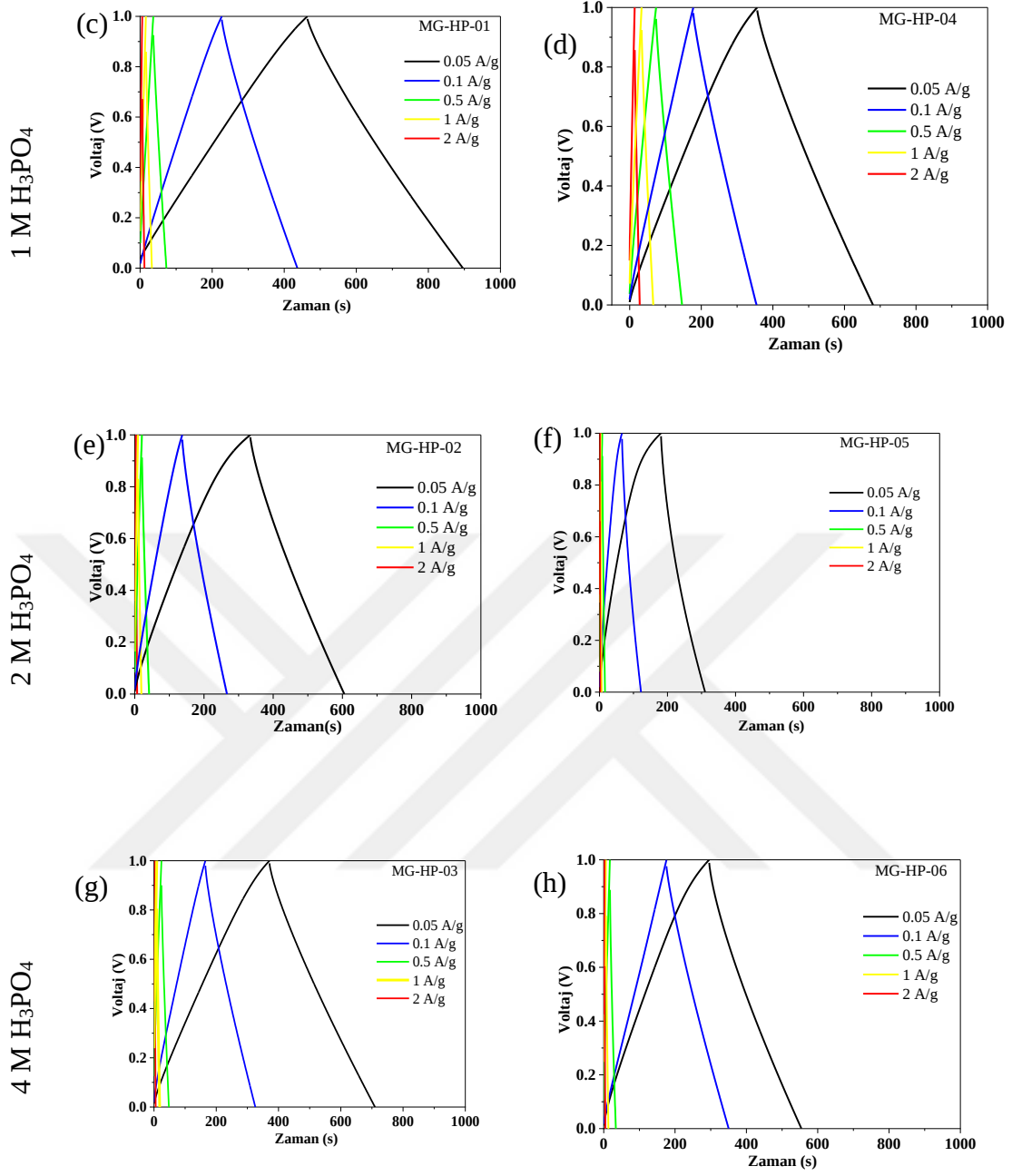
$$E_{int/D} = I \int_{t(U_{max})}^{t(U_{min})} U(t) dt$$

Daha sonra kapasitans $E_{int/D}$ 'den ortalama bir deşarj kapasitansı $C_{int/D}$ çıkarılabilir. Açıkçası EDLC doğrusal eğilimi için CGD'de olduğu gibi çeşitli kapasitör şarj/deşarj seviyelerindeki davranışı yansıtmaz. Bu nedenle, yaygın uygulamanın aksine, ilk adımda uygun deşarj enerjisini doğrudan GD eğrisinden belirlemeyi ve ardından enerji-kapasitans ilişkisini kullanarak sistem kapasitansını çıkarmayı öneriyoruz:

$$C_{int/D} = \frac{2E_{int/D}}{U_{max}^2}$$

Ortalama bir elektrot spesifik kapasitansı ($C_{el,int/D}$) uygulanarak $C_{int/D}$ 'den belirlenebilir. Çalışma kapsamında farklı akım yoğunlukları ve farklı elektrotlar ile üretilen EDLClerin Voltaj-time grafikleri Şekil 4.14'de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde akım yoğunluğu arttıkça kapasitörün şarj deşarj süresi kısalmaktadır ve bu beklenen bir durumdur.



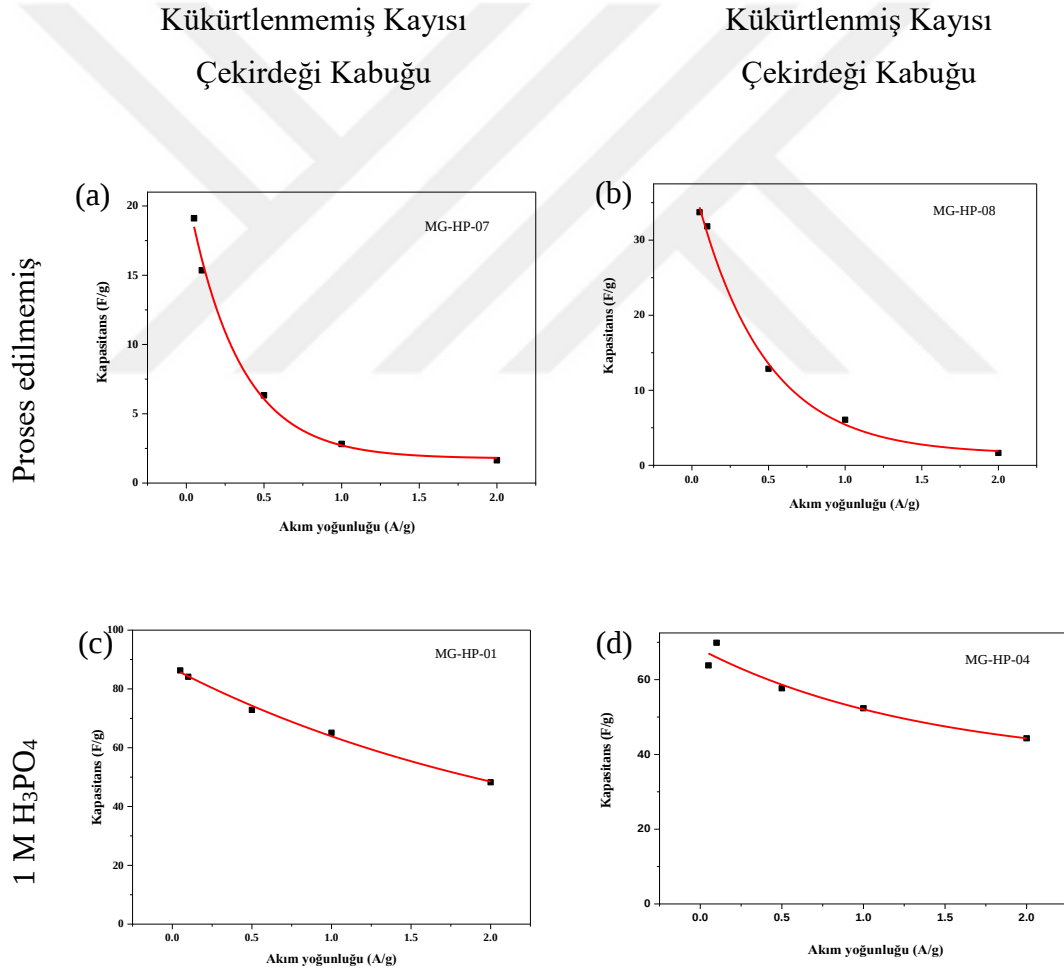


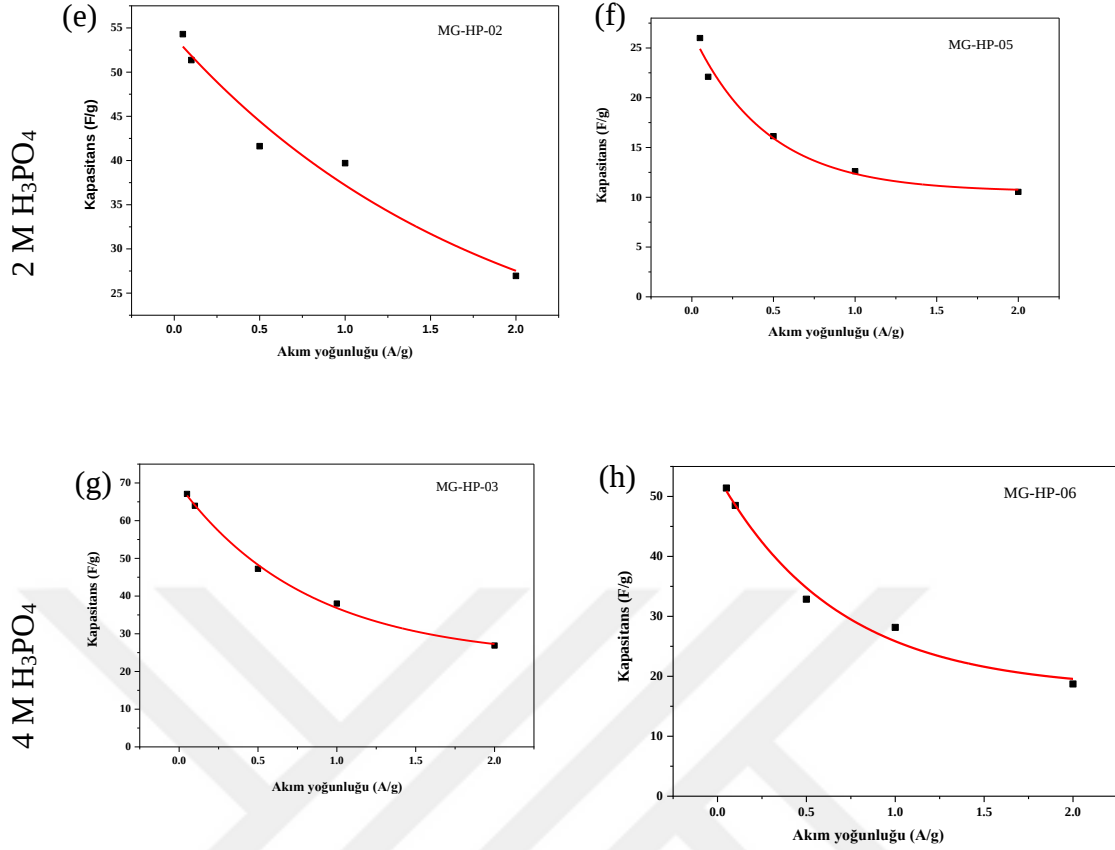
Şekil 4.14: (a) MG-HP-07 kodlu örneğin galvanostatik ölçüm sonucu grafiği, (b) MG-HP-08 kodlu örneğin galvanostatik ölçüm sonucu grafiği, (c) MG-HP-01 kodlu örneğin galvanostatik ölçüm sonucu grafiği, (d) MG-HP-04 kodlu örneğin galvanostatik ölçüm sonucu grafiği, (e) MG-HP-02 kodlu örneğin galvanostatik ölçüm sonucu grafiği, (f) MG-HP-05 kodlu örneğin galvanostatik ölçüm sonucu grafiği, (g) MG-HP-03 kodlu örneğin galvanostatik ölçüm sonucu grafiği, (h) MG-HP-06 kodlu örneğin galvanostatik ölçüm sonucu grafiği.

0.05A/g altında şarj ve deşarj edilen kapasitörler incelendiğinde en uzun süre enerji sağlayan sistemin MG-HP-01 olduğu tespit edilmiştir.

4.2.5. Akım yoğunluğu kapasitans grafikleri

Voltaj-zaman grafikleri kullanılarak hesaplanana kapasitans değerleri Şekil 4.15’de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde akım yoğunluğu arttıkça kapasitansın azaldığı görülmektedir. Üretilen EDLC kapasitörlerde en yüksek kapasitans değeri MG-HP-03 kodlu örnekte elde edilmiştir.





Şekil 4.15: (a) MG-HP-07 kodlu örneğin akım yoğunluğu kapasitans grafiği, (b) MG-HP-08 kodlu örneğin akım yoğunluğu kapasitans grafiği, (c) MG-HP-01 kodlu örneğin akım yoğunluğu kapasitans grafiği, (d) MG-HP-04 kodlu örneğin akım yoğunluğu kapasitans grafiği, (e) MG-HP-02 kodlu örneğin akım yoğunluğu kapasitans grafiği, (f) MG-HP-05 kodlu örneğin akım yoğunluğu kapasitans grafiği, (g) MG-HP-03 kodlu örneğin akım yoğunluğu kapasitans grafiği, (h) MG-HP-06 kodlu örneğin akım yoğunluğu kapasitans grafiği.

Üretilen EDLC süperkapasitör cihazların performansları sabir akım yoğunluğunda 2000 çevrime kadar ölçülmüş ve bu ölçümler sırasında elde edilen Voltaj-zaman grafikleri şekil 4.16'da verilmiştir. Sabit akımda şarjdeşarj işlemi sırasında zamanı en büyük olan en iyi kapasitans özelliği göstermektedir. ayrıca çevrim sayısı arttıkça zamandaki azalma da kapasitansın düştüğünü göstermektedir.

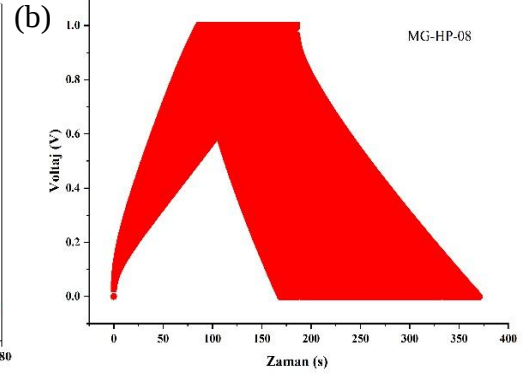
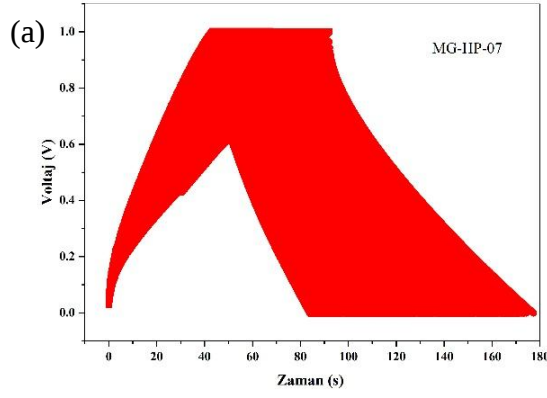
Kükürtlenmemiş Kayısı

Kükürtlenmiş Kayısı

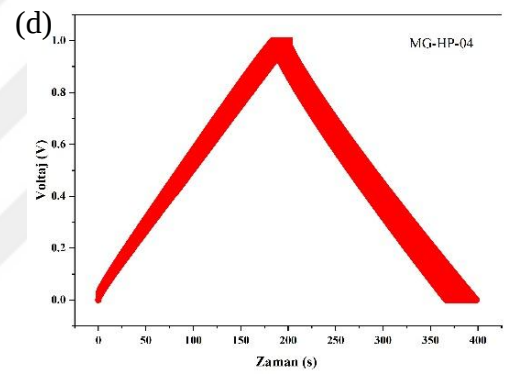
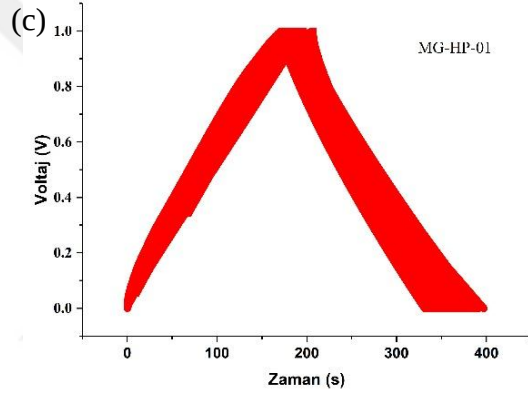
Çekirdeği Kabuğu

Çekirdeği Kabuğu

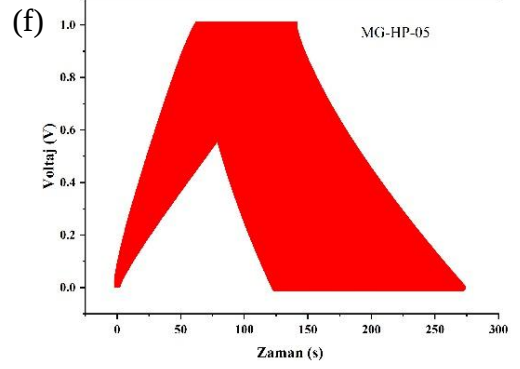
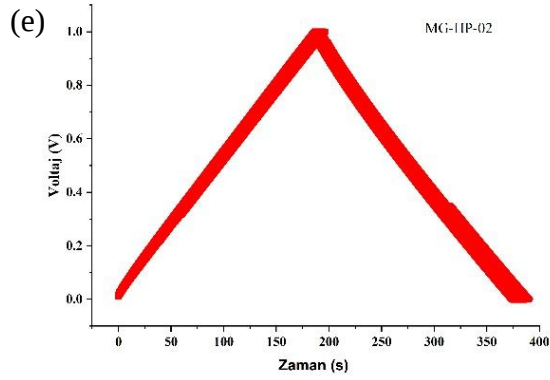
Proses edilmemiş

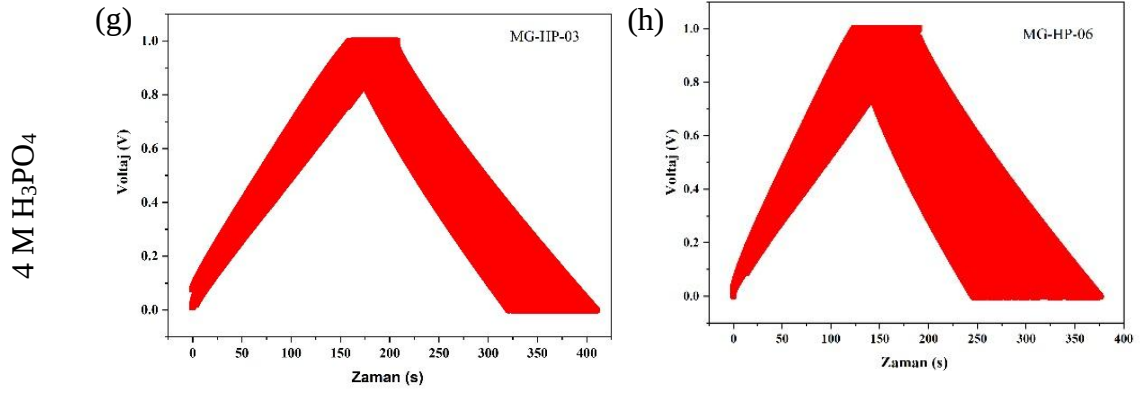


1 M H_3PO_4



2 M H_3PO_4

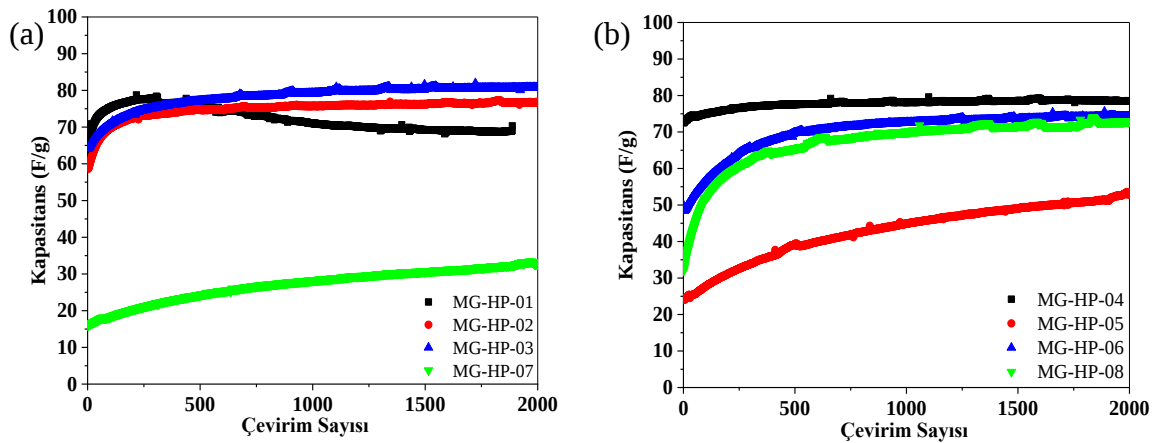




Şekil 4.16: (a) MG-HP-07 kodlu örneğin voltaj zaman grafiği, (b) MG-HP-08 k kodlu örneğin voltaj zaman grafiği, (c) MG-HP-01 kodlu örneğin voltaj zaman grafiği, (d) MG-HP-04 kodlu örneğin voltaj zaman grafiği, (e) MG-HP-02 kodlu örneğin voltaj zaman grafiği, (f) MG-HP-05 kodlu örneğin voltaj zaman grafiği, (g) MG-HP-03 kodlu örneğin voltaj zaman grafiği, (h) MG-HP-06 kodlu örneğin voltaj zaman grafiği.

4.2.6. Galvanostatik Kapasite sonuçları

Voltaj-zaman grafikleri kullanılarak hesaplanan kapasitans değerleri şekil 4.17’de verilmektedir. Grafikler incelendiğinde kapasitans değerlerinin MG-HP-03 kodlu ve MG-HP-04 kodlu örneklerle ait olduğu görülmektedir. Kapasitans değerinin çevrim sayısı ile artmasında yapı içerisindeki gözeneklerin açılarak yüzey alanını artırmayla ilişkilendirilebilir.



Şekil 4.17: (a) MG-HP-01, MG-HP-02, MG-HP-03 ve MG-HP-07 kodlu örneklerin galvanostatik kapasite sonuç grafikleri, (b) MG-HP-04, MG-HP-05, MG-HP-06 ve MG-HP-08 kodlu örneklerin galvanostatik kapasite sonuç grafikleri.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Malatya'nın önemli tarım ürünlerinden biri olan kükürtlenmiş ve kükürtlenmemiş kayısı çekirdeği kabuğundan elde edilen aktif karbonlar, fosfor ve kükürt gibi heteroatomlarla doplanarak süper kapasitör elektrotu olarak kullanılabilirliği açısından değerlendirilmiştir. Amaç; sürdürülebilir ve yerli biyokütle temelli karbon malzemelerle enerji depolama sistemleri için çevre dostu bir alternatif sunmaktır.

Yapılan karakterizasyon analizleri (XRD, SEM, EDX, FTIR, XPS, BET, iyot sayısı), fosfor katkılamanın aktif karbonun yüzey alanını artırdığını, gözenek yapısını geliştirdiğini ve yüzey fonksiyonel gruplar açısından zenginleştirdiğini ortaya koymuştur. Elektrokimyasal analizler (CV, EIS ve galvanostatik ölçümler) ise bu modifikasyonların aktif karbonun spesifik kapasitansını ve döngüsel kararlılığını artırdığını, kükürtlü kayısı çekirdeği kabuğundan elde edilen aktif karbonların fosfor doplanmadan dahi kapasitans değerinin yüksek olduğunu göstermiştir.

Özellikle MG-HP-03 ve MG-HP-04 kodlu örneklerde elde edilen yüksek kapasitans değerleri, yapıdaki gözeneklerin optimize edildiğini ve iyon taşınımının kolaylaştırıldığını ortaya koymuştur. Bu durum, heteroatomların karbon matrisine başarıyla entegre edildiğini ve enerji depolama kapasitesine olumlu katkı sağladığını göstermektedir.

Bu tür biyobazlı karbon malzemelerin sürdürülebilir enerji teknolojilerinde yaygın kullanılabilmesi için üretim süreçlerinin ölçeklendirilmesi ve maliyet-etkinlik analizlerinin yapılması önerilmektedir.

Bu çalışmada fosfor ve kükürt heteroatomları tercih edilmiştir. Gelecekte azot, bor gibi farklı dopantların da kullanılarak karşılaştırmalı çalışmalar yapılması önerilir.

Aktif karbonlar, iletken polimerler veya metal oksitlerle hibritleştirilerek enerji yoğunluğu daha yüksek süperkapasitör sistemleri geliştirilebilir.

Bu tez, yerli ve tarımsal atık kaynaklı malzemelerin enerji teknolojilerinde değerlendirilmesine yönelik önemli bir örnek sunmakta; aynı zamanda sürdürülebilirlik, çevresel duyarlılık ve döngüsel ekonomi açısından da katkı sağlamaktadır. Literatürdeki mevcut bilgilerle uyumlu olarak, kükürtlenmiş kayısı çekirdeği kabuğundan türetilen aktif karbonların elektrokimyasal uygulamalarda gelecek vaat eden bir elektrot malzemesi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] **P. Moriarty ve D. Honnery**, “Can renewable energy power the future?”, *Energy Policy*, c. 93, ss. 3-7, Haz. 2016, doi: 10.1016/j.enpol.2016.02.051.
- [2] **F. Bu, W. Zhou, Y. Xu, Y. Du, C. Guan, ve W. Huang**, “Recent developments of advanced micro-supercapacitors: design, fabrication and applications”, *Npj Flex. Electron.*, c. 4, sy 1, ss. 1-16, Kas. 2020, doi: 10.1038/s41528-020-00093-6.
- [3] **I. Shaikhiev vd.**, “Removing Pollutants from Sewage Waters with Ground Apricot Kernel Shell Material”, *Materials*, c. 15, sy 10, Art. sy 10, Oca. 2022, doi: 10.3390/ma15103428.
- [4] **D. Majumdar, M. Mandal, ve S. K. Bhattacharya**, “Journey from supercapacitors to supercapatteries: recent advancements in electrochemical energy storage systems”, *Emergent Mater.*, c. 3, sy 3, ss. 347-367, Haz. 2020, doi: 10.1007/s42247-020-00090-5.
- [5] **M. B. Ahmed vd.**, “Activated carbon preparation from biomass feedstock: Clean production and carbon dioxide adsorption”, *J. Clean. Prod.*, c. 225, ss. 405-413, Tem. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.342.
- [6] **M. Gayathiri, T. Pulingam, K. T. Lee, ve K. Sudesh**, “Activated carbon from biomass waste precursors: Factors affecting production and adsorption mechanism”, *Chemosphere*, c. 294, s. 133764, May. 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.133764.
- [7] **M. Satayev, R. Alibekov, L. Satayeva, O. Baiysbay, ve B. Mutaliyeva**, “Characteristics of Activated Carbons Prepared from Apricot Kernel Shells by Mechanical, Chemical and Thermal Activations”, *Mod. Appl. Sci.*, c. 9, sy 6, Art. sy 6, Nis. 2015, doi: 10.5539/mas.v9n6p104.
- [8] **G. Hasegawa vd.**, “High-Level Doping of Nitrogen, Phosphorus, and Sulfur into Activated Carbon Monoliths and Their Electrochemical Capacitances”, *Chem. Mater.*, c. 27, sy 13, ss. 4703-4712, Tem. 2015, doi: 10.1021/acs.chemmater.5b01349.
- [9] **W. Ma vd.**, “Influence of phosphorus doping on surface chemistry and capacitive behaviors of porous carbon electrode”, *Electrochimica Acta*, c. 266, ss. 420-430, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.electacta.2018.02.031.
- [10] **M. Aneke ve M. Wang**, “Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review”, *Appl. Energy*, c. 179, ss. 350-377, 2016, doi: 10.1016/J.APENERGY.2016.06.097.
- [11] **A. G. Olabi, C. Onumaegbu, T. Wilberforce, M. Ramadan, M. A. Abdelkareem, ve A. H. Al – Alami**, “Critical review of energy storage systems”, *Energy*, c. 214, s. 118987, Oca. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.118987.
- [12] **C. K. Das, O. Bass, G. Kothapalli, T. Mahmoud, ve D. Habibi**, “Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2018.03.068.
- [13] **I. Sârbu ve C. Sebarchievici**, “A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage”, *Sustainability*, c. 10, 2018, doi: 10.3390/SU10010191.

- [14] **A. Aghmadi ve O. A. Mohammed**, “Energy Storage Systems: Technologies and High-Power Applications”, *Batteries*, 2024, doi: 10.3390/batteries10040141.
- [15] **F. Hussain, M. Z. Rahman, A. N. Sivasengaran, ve M. Hasanuzzaman**, “Chapter 6 - Energy storage technologies”, içinde *Energy for Sustainable Development*, MD. Hasanuzzaman ve N. A. Rahim, Ed., Academic Press, 2020, ss. 125-165. doi: 10.1016/B978-0-12-814645-3.00006-7.
- [16] **S. Maddukuri, D. Malka, M. S. Chae, Y. Elias, S. Luski, ve D. Aurbach**, “On the challenge of large energy storage by electrochemical devices”, *Electrochimica Acta*, c. 354, s. 136771, Eyl. 2020, doi: 10.1016/j.electacta.2020.136771.
- [17] **K. Detka ve K. Górecki**, “Selected Technologies of Electrochemical Energy Storage—A Review”, *Energies*, c. 16, sy 13, Art. sy 13, Oca. 2023, doi: 10.3390/en16135034.
- [18] **S. P. S. Badwal, S. S. Giddey, C. Munnings, A. I. Bhatt, ve A. F. Hollenkamp**, “Emerging electrochemical energy conversion and storage technologies”, *Front. Chem.*, c. 2, Eyl. 2014, doi: 10.3389/fchem.2014.00079.
- [19] **B. Dunn, H. Kamath, ve J.-M. Tarascon**, “Electrical energy storage for the grid: a battery of choices”, *Science*, c. 334, sy 6058, ss. 928-935, Kas. 2011, doi: 10.1126/science.1212741.
- [20] **Y. Wu ve C. Cao**, “The way to improve the energy density of supercapacitors: Progress and perspective”, *Sci. China Mater.*, c. 61, sy 12, ss. 1517-1526, Ara. 2018, doi: 10.1007/s40843-018-9290-y.
- [21] **Poonam, K. Sharma, A. Arora, ve S. K. Tripathi**, “Review of supercapacitors: Materials and devices”, *J. Energy Storage*, c. 21, ss. 801-825, Şub. 2019, doi: 10.1016/j.est.2019.01.010.
- [22] **Zhang, Y., Wang, L., Chen, X., & Li, J.** (2015). High-performance flexible supercapacitors based on carbon nanomaterials. *Advanced Energy Materials*, 5(7), 1401401. <https://doi.org/10.1002/aenm.201401401>
- [23] **J. Libich, J. Máca, J. Vondrák, O. Čech, ve M. Sedlaříková**, “Supercapacitors: Properties and applications”, *J. Energy Storage*, c. 17, ss. 224-227, Haz. 2018, doi: 10.1016/j.est.2018.03.012.
- [24] **Zhang, Y., Wang, L., & Chen, X.** (2022). Carbon nanomaterials-enabled high-performance supercapacitors: A review. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/366140436_Carbon_Nanomaterials-Enabled_High-Performance_Supercapacitors_A_Review
- [25] “What is a supercapacitor? Construction, Types, Working and Applications”. Erişim: 29 Nisan 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.ntchip.com/electronics-news/what-is-a-supercapacitor>
- [26] **A. Lewandowski ve M. Galinski**, “Practical and theoretical limits for electrochemical double-layer capacitors”, *J. Power Sources*, c. 173, sy 2, ss. 822-828, Kas. 2007, doi: 10.1016/j.jpowsour.2007.05.062.
- [27] **E. Lim, C. Jo, ve J. Lee**, “A mini review of designed mesoporous materials for energy-storage applications: from electric double-layer capacitors to hybrid supercapacitors”, *Nanoscale*, c. 8, sy 15, ss. 7827-7833, Nis. 2016, doi: 10.1039/C6NR00796A.

- [28] **Q. Luo, P. Wei, Q. Huang, B. Gurkan, ve E. B. Pentzer**, “Carbon Capsules of Ionic Liquid for Enhanced Performance of Electrochemical Double-Layer Capacitors”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, c. 10, sy 19, ss. 16707-16714, May. 2018, doi: 10.1021/acsami.8b01285.
- [29] “Conducting Polymers for Pseudocapacitive Energy Storage | Chemistry of Materials”. Erişim: 28 Nisan 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemmater.6b01762>
- [30] **A. M. Bryan, L. M. Santino, Y. Lu, S. Acharya, ve J. M. D’Arcy**, “Conducting Polymers for Pseudocapacitive Energy Storage”, *Chem. Mater.*, c. 28, sy 17, ss. 5989-5998, Eyl. 2016, doi: 10.1021/acs.chemmater.6b01762.
- [31] **Q. Wei vd.**, “High-Energy and High-Power Pseudocapacitor–Battery Hybrid Sodium-Ion Capacitor with Na⁺ Intercalation Pseudocapacitance Anode”, *Nano-Micro Lett.*, c. 13, sy 1, s. 55, Oca. 2021, doi: 10.1007/s40820-020-00567-2.
- [32] **S. Zhang, C. Li, X. Zhang, X. Sun, K. Wang, ve Y. Ma**, “High Performance Lithium-Ion Hybrid Capacitors Employing Fe₃O₄–Graphene Composite Anode and Activated Carbon Cathode”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, c. 9, sy 20, ss. 17136-17144, May. 2017, doi: 10.1021/acsami.7b03452.
- [33] **H. Li vd.**, “A High-Performance Sodium-Ion Hybrid Capacitor Constructed by Metal–Organic Framework–Derived Anode and Cathode Materials”, *Adv. Funct. Mater.*, c. 28, sy 30, s. 1800757, 2018, doi: 10.1002/adfm.201800757.
- [34] **J. Libich, J. Máca, J. Vondrák, O. Čech, ve M. Sedlaříková**, “Supercapacitors: Properties and applications”, *J. Energy Storage*, c. 17, ss. 224-227, Haz. 2018, doi: 10.1016/j.est.2018.03.012.
- [35] **E. Pameté vd.**, “The Many Deaths of Supercapacitors: Degradation, Aging, and Performance Fading”, *Adv. Energy Mater.*, c. 13, sy 29, s. 2301008, 2023, doi: 10.1002/aenm.202301008.
- [36] **S. Kumar vd.**, “Supercapacitors based on Ti₃C₂T_x MXene extracted from supernatant and current collectors passivated by CVD-graphene”, *Sci. Rep.*, c. 11, sy 1, s. 649, Oca. 2021, doi: 10.1038/s41598-020-80799-9.
- [37] **M. M. Momeni, S. Navandian, H. M. Aydisheh, ve B.-K. Lee**, “Photo-assisted rechargeable supercapacitors based on nickel-cobalt-deposited tungsten-doped titania photoelectrodes: A novel self-powered supercapacitor”, *J. Power Sources*, c. 557, s. 232588, Şub. 2023, doi: 10.1016/j.jpowsour.2022.232588.
- [38] “Research progress on conducting polymer based supercapacitor electrode materials”, *Nano Energy*, c. 36, ss. 268-285, Haz. 2017, doi: 10.1016/j.nanoen.2017.04.040.
- [39] **F. Wang vd.**, “Latest advances in supercapacitors: from new electrode materials to novel device designs”, *Chem. Soc. Rev.*, c. 46, sy 22, ss. 6816-6854, Kas. 2017, doi: 10.1039/C7CS00205J.
- [40] **Y. Zhang vd.**, “Rational design of NiMn-based electrode materials for high-performance supercapacitors”, *Coord. Chem. Rev.*, c. 499, s. 215494, Oca. 2024, doi: 10.1016/j.ccr.2023.215494.

- [41] **G. Wang, L. Zhang, ve J. Zhang**, “A review of electrode materials for electrochemical supercapacitors”, *Chem. Soc. Rev.*, c. 41, sy 2, ss. 797-828, Oca. 2012, doi: 10.1039/C1CS15060J.
- [42] **S. Sahani, H. Mahajan, ve S. S. Han**, “Unveiling the hybrid era: Advancement in electrode materials for the high-performance supercapacitor: A comprehensive review”, *J. Energy Storage*, c. 90, s. 111808, Haz. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.111808.
- [43] **M. Mastragostino, C. Arbizzani, ve F. Soavi**, “Polymer-based supercapacitors”, *J. Power Sources*, c. 97-98, ss. 812-815, Tem. 2001, doi: 10.1016/S0378-7753(01)00613-9.
- [44] **N. N. Loganathan, V. Perumal, B. R. Pandian, R. Atchudan, T. N. J. I. Edison, ve M. Ovinis**, “Recent studies on polymeric materials for supercapacitor development”, *J. Energy Storage*, c. 49, s. 104149, May. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104149.
- [45] **N. K ve C. Sekhar Rout**, “Conducting polymers: a comprehensive review on recent advances in synthesis, properties and applications”, *RSC Adv.*, c. 11, sy 10, ss. 5659-5697, 2021, doi: 10.1039/D0RA07800J.
- [46] **T. Nguyen ve M. de F. Montemor**, “Metal Oxide and Hydroxide-Based Aqueous Supercapacitors: From Charge Storage Mechanisms and Functional Electrode Engineering to Need-Tailored Devices”, *Adv. Sci.*, c. 6, sy 9, s. 1801797, 2019, doi: 10.1002/advs.201801797.
- [47] **S. Naeem vd.**, “A Review of Cobalt-Based Metal Hydroxide Electrode for Applications in Supercapacitors”, doi: 10.1155/2023/1133559.
- [48] **C. An, Y. Zhang, H. Guo, ve Y. Wang**, “Metal oxide-based supercapacitors: progress and perspectives”, *Nanoscale Adv.*, c. 1, sy 12, ss. 4644-4658, Ara. 2019, doi: 10.1039/C9NA00543A.
- [49] **P. Pazhamalai, V. Krishnan, M. S. Mohamed Saleem, S.-J. Kim, ve H.-W. Seo**, “Investigating composite electrode materials of metal oxides for advanced energy storage applications”, *Nano Converg.*, c. 11, sy 1, s. 30, Tem. 2024, doi: 10.1186/s40580-024-00437-2.
- [50] **Y. Wang vd.**, “Recent progress in carbon-based materials for supercapacitor electrodes: a review”, *J. Mater. Sci.*, c. 56, sy 1, ss. 173-200, Oca. 2021, doi: 10.1007/s10853-020-05157-6.
- [51] “Recent progress on porous carbon and its derivatives from plants as advanced electrode materials for supercapacitors - ScienceDirect”. Erişim: 30 Nisan 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775321013707?via=ihub>
- [52] **Z. Zhai vd.**, “A review of carbon materials for supercapacitors”, *Mater. Des.*, c. 221, s. 111017, Eyl. 2022, doi: 10.1016/j.matdes.2022.111017.
- [53] **E. Huarote-Garcia vd.**, “Activated Carbon Electrodes for Supercapacitors from Purple Corn cob (*Zea mays* L.)”, *ACS Environ. Au*, c. 4, sy 2, ss. 80-88, Mar. 2024, doi: 10.1021/acsenvironau.3c00048.

- [54] **F. Cheng, X. Yang, S. Zhang, ve W. Lu**, “Boosting the supercapacitor performances of activated carbon with carbon nanomaterials”, *J. Power Sources*, c. 450, s. 227678, Şub. 2020, doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.227678.
- [55] **E. Frackowiak, K. Metenier, V. Bertagna, ve F. Beguin**, “Supercapacitor electrodes from multiwalled carbon nanotubes”, *Appl. Phys. Lett.*, c. 77, sy 15, ss. 2421-2423, Eki. 2000, doi: 10.1063/1.1290146.
- [56] **S. Zong vd.**, “N-doped crumpled carbon nanotubes as advanced electrode material for supercapacitor”, *J. Alloys Compd.*, c. 928, s. 167222, Ara. 2022, doi: 10.1016/j.jallcom.2022.167222.
- [57] **M. Kim vd.**, “All-Soft Supercapacitors Based on Liquid Metal Electrodes with Integrated Functionalized Carbon Nanotubes”, *ACS Nano*, c. 14, sy 5, ss. 5659-5667, May. 2020, doi: 10.1021/acsnano.0c00129.
- [58] “Biomass-Derived Nitrogen-Doped Carbon Nanofiber Network: A Facile Template for Decoration of Ultrathin Nickel-Cobalt Layered Double Hydroxide Nanosheets as High-Performance Asymmetric Supercapacitor Electrode - Lai - 2016 - Small - Wiley Online Library”. Erişim: 01 Mayıs 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sml.201600412>
- [59] **J. Cai vd.**, “High-Performance Supercapacitor Electrode Materials from Cellulose-Derived Carbon Nanofibers”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, c. 7, sy 27, ss. 14946-14953, Tem. 2015, doi: 10.1021/acsami.5b03757.
- [60] **Z. Zhai vd.**, “Starch-based carbon aerogels prepared by an innovative KOH activation method for supercapacitors”, *Int. J. Biol. Macromol.*, c. 257, s. 128587, Şub. 2024, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.128587.
- [61] “Highly Porous Carbon Aerogels for High-Performance Supercapacitor Electrodes”. Erişim: 01 Mayıs 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.mdpi.com/2079-4991/13/5/817>
- [62] **Z. Zhao, L. Sun, Y. Li, ve W. Feng**, “Polymer-derived carbon materials for energy storage devices: A mini review”, *Carbon*, c. 210, s. 118066, Haz. 2023, doi: 10.1016/j.carbon.2023.118066.
- [63] **P. C. Himadri Reddy, J. Amalraj, S. Ranganatha, S. S. Patil, ve S. Chandrasekaran**, “A review on effect of conducting polymers on carbon-based electrode materials for electrochemical supercapacitors”, *Synth. Met.*, c. 298, s. 117447, Eyl. 2023, doi: 10.1016/j.synthmet.2023.117447.
- [64] **F. Ahmad vd.**, “Advances in graphene-based electrode materials for high-performance supercapacitors: A review”, *J. Energy Storage*, c. 72, s. 108731, Kas. 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.108731.
- [65] “Graphene in Supercapacitor Applications - ScienceDirect”. Erişim: 01 Mayıs 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359029415000734?via%3Dihub>
- [66] **M. Jayachandran, A. Rose, T. Maiyalagan, N. Poongodi, ve T. Vijayakumar**, “Effect of various aqueous electrolytes on the electrochemical performance of α -MnO₂ nanorods as electrode materials for supercapacitor application”, *Electrochimica Acta*, c. 366, s. 137412, Oca. 2021, doi: 10.1016/j.electacta.2020.137412.

- [67] **A. D. T. Medagedara vd.**, “Triethylammonium thiocyanate ionic liquid electrolyte-based supercapacitor fabricated using coconut shell-derived electronically conducting activated charcoal electrode material”, *J. Energy Storage*, c. 55, s. 105628, Kas. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105628.
- [68] **N. S. Shaikh vd.**, “Novel electrodes for supercapacitor: Conducting polymers, metal oxides, chalcogenides, carbides, nitrides, MXenes, and their composites with graphene”, *J. Alloys Compd.*, c. 893, s. 161998, Şub. 2022, doi: 10.1016/j.jallcom.2021.161998.
- [69] **Z. Yu, L. Tetard, L. Zhai, ve J. Thomas**, “Supercapacitor electrode materials: nanostructures from 0 to 3 dimensions”, *Energy Environ. Sci.*, c. 8, sy 3, ss. 702-730, Mar. 2015, doi: 10.1039/C4EE03229B.
- [70] **E. Mohamed**, “Nanotechnology: Future of Environmental Air Pollution Control”, *Environ. Manag. Sustain. Dev.*, c. 6, s. 429, Eki. 2017, doi: 10.5296/emsd.v6i2.12047.
- [71] **S. Verma, S. Arya, V. Gupta, S. Mahajan, H. Furukawa, ve A. Khosla**, “Performance analysis, challenges and future perspectives of nickel based nanostructured electrodes for electrochemical supercapacitors”, *J. Mater. Res. Technol.*, c. 11, ss. 564-599, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.01.027.
- [72] **X. Luo, Y. Chen, ve Y. Mo**, “A review of charge storage in porous carbon-based supercapacitors”, *New Carbon Mater.*, c. 36, sy 1, ss. 49-68, Şub. 2021, doi: 10.1016/S1872-5805(21)60004-5.
- [73] **Zhang, Y., Wang, Y., & Li, J.** (2023). *A case report of primary pulmonary synovial sarcoma with a rare SS18-NEDD4 gene fusion*. *The Cancer Reports*, 6(5), e161. <https://doi.org/10.1002/tcr.202300161>
- [74] **M. Endo, T. Takeda, Y. Kim, K. Koshiba, ve K. Ishii**, “High Power Electric Double Layer Capacitor (EDLC’s); from Operating Principle to Pore Size Control in Advanced Activated Carbons”, *Carbon Lett.*, c. 1, Oca. 2001.
- [75] **K. Yang vd.**, “Enhanced functional properties of porous carbon materials as high-performance electrode materials for supercapacitors”, *Green Energy Resour.*, c. 1, sy 3, s. 100030, Eyl. 2023, doi: 10.1016/j.gerr.2023.100030.
- [76] **M. Ö. A. Çolak, A. Güngör, M. B. Akturk, E. Erdem, ve R. Genç**, “Unlocking the full potential of citric acid-synthesized carbon dots as a supercapacitor electrode material via surface functionalization”, *Nanoscale*, c. 16, sy 2, ss. 719-733, Oca. 2024, doi: 10.1039/D3NR04893D.
- [77] **N. F. Sylla vd.**, “Ex-situ nitrogen-doped porous carbons as electrode materials for high performance supercapacitor”, *J. Colloid Interface Sci.*, c. 569, ss. 332-345, Haz. 2020, doi: 10.1016/j.jcis.2020.02.061.
- [78] **H. Cao, X. Peng, M. Zhao, P. Liu, B. Xu, ve J. Guo**, “Oxygen functional groups improve the energy storage performances of graphene electrochemical supercapacitors”, *RSC Adv.*, c. 8, sy 6, ss. 2858-2865, Oca. 2018, doi: 10.1039/C7RA12425B.

- [79] **S. K. Hussain ve J. H. Bang**, “Overview of the oxygen vacancy effect in bimetallic spinel and perovskite oxide electrode materials for high-performance supercapacitors”, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, c. 25, sy 17, ss. 11892-11907, May. 2023, doi: 10.1039/D3CP00472D.
- [80] **Zhang, Y., Zhang, Y., Wang, Y., & Li, J.** (2023). A novel SS18-NEDD4 gene fusion in primary pulmonary synovial sarcoma: A case report. *Small*, 19(28), 2302479. <https://doi.org/10.1002/sml.202302479>
- [82] **A. Ilnicka vd.**, “Combined effect of nitrogen-doped functional groups and porosity of porous carbons on electrochemical performance of supercapacitors”, *Sci. Rep.*, c. 11, sy 1, s. 18387, Eyl. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-97932-x.
- [83] **D. Dong vd.**, “High performance aqueous supercapacitor based on nitrogen-doped coal-based activated carbon electrode materials”, *J. Colloid Interface Sci.*, c. 580, ss. 77-87, Kas. 2020, doi: 10.1016/j.jcis.2020.07.018.
- [84] “Superhydrophilic nickel hydroxide ultrathin nanosheets enable high-performance asymmetric supercapacitors | Rare Metals”. Erişim: 05 Mayıs 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12598-023-02386-x>
- [85] **V. Burtsev vd.**, “Covalent surface grafting of Ti3C2Tx flakes for enhancement of symmetric supercapacitor performance”, *J. Power Sources*, c. 609, s. 234710, Tem. 2024, doi: 10.1016/j.jpowsour.2024.234710.
- [86] **Y.-W. Ju, S.-Y. Lee, I.-Y. Jeon, J. Shin, ve Y.-W. Ju**, “Influence of the Hydrophilic Surface of Nanofiber Support on the Performance of Hybrid Supercapacitors”, 19 Ekim 2021, *Preprints*: 2021100278. doi: 10.20944/preprints202110.0278.v1.
- [87] **M. Mustaqeem vd.**, “Rational design of metal oxide based electrode materials for high performance supercapacitors – A review”, *J. Energy Storage*, c. 55, s. 105419, Kas. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105419.
- [88] **Y. Ma vd.**, “Recent advances in transition metal oxides with different dimensions as electrodes for high-performance supercapacitors”, *Adv. Compos. Hybrid Mater.*, c. 4, sy 4, ss. 906-924, Ara. 2021, doi: 10.1007/s42114-021-00358-2.
- [89] **R. S. Kate, S. A. Khalate, ve R. J. Deokate**, “Overview of nanostructured metal oxides and pure nickel oxide (NiO) electrodes for supercapacitors: A review”, *J. Alloys Compd.*, c. 734, ss. 89-111, Şub. 2018, doi: 10.1016/j.jallcom.2017.10.262.
- [90] **A. E.-S. Etman, A. M. Ibrahim, F. A.-Z. M. Darwish, ve K. F. Qasim**, “A 10 years-developmental study on conducting polymers composites for supercapacitors electrodes: A review for extensive data interpretation”, *J. Ind. Eng. Chem.*, c. 122, ss. 27-45, Haz. 2023, doi: 10.1016/j.jiec.2023.03.008.
- [91] **L. Li, J. Meng, M. Zhang, T. Liu, ve C. Zhang**, “Recent advances in conductive polymer hydrogel composites and nanocomposites for flexible electrochemical supercapacitors”, *Chem. Commun.*, c. 58, sy 2, ss. 185-207, Ara. 2021, doi: 10.1039/D1CC05526G.
- [92] **Q. Meng, K. Cai, Y. Chen, ve L. Chen**, “Research progress on conducting polymer based supercapacitor electrode materials”, *Nano Energy*, c. 36, ss. 268-285, Haz. 2017, doi: 10.1016/j.nanoen.2017.04.040.

- [93] “High-performance electrode materials of heteroatom-doped lignin-based carbon materials for supercapacitor applications - ScienceDirect”. Erişim: 14 Haziran 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813024038224?via%3Dihub>
- [94] **M. Han, M. He, G. Wang, ve S. Luo**, “Phosphoric acid involved laser induced microporous graphene via proton conducting polybenzimidazole for high-performance micro-supercapacitors”, *J. Power Sources*, c. 514, s. 230579, Ara. 2021, doi: 10.1016/j.jpowsour.2021.230579.
- [95] **Z. Zhang, J. Xiao, ve Q. Zhong**, “Structural evolution of porous carbon heteroatom doping under oxidant on supercapacitor performance”, *Mater. Today Chem.*, c. 29, s. 101416, Nis. 2023, doi: 10.1016/j.mtchem.2023.101416.
- [96] **M. A. Hegazy, M. M. Mohammedy, ve A. S. Dhmees**, “Phosphorous and sulfur doped asphaltene derived activated carbon for supercapacitor application”, *J. Energy Storage*, c. 44, s. 103331, Ara. 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.103331.
- [97] **L. Luo vd.**, “Enhanced capacitance of phosphorus, nitrogen, and oxygen tri-doped balsa wood-based porous carbon for supercapacitors”, *J. Energy Storage*, c. 58, s. 106339, Şub. 2023, doi: 10.1016/j.est.2022.106339.
- [98] **M. Murugan, G. Dineshkumar, M. Ganesan, N. G. Sahoo, ve M. Sivanantham**, “Influence of Phosphoric Acid Activation on Physiochemical Characteristics of Activated Carbons and Their Performance as Supercapacitor”, *Energy Storage*, c. 6, sy 7, s. e70050, 2024, doi: 10.1002/est2.70050.
- [99] “Preparation of phosphorus-doped porous carbon for high performance supercapacitors by one-step carbonization - RSC Advances (RSC Publishing)”. Erişim: 23 Haziran 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/ra/d0ra02398a>
- [100] **J. Xiao, Y. Wang, T. C. Zhang, L. Ouyang, ve S. Yuan**, “Phytic acid-induced self-assembled chitosan gel-derived N, P-co-doped porous carbon for high-performance CO₂ capture and supercapacitor”, *J. Power Sources*, c. 517, s. 230727, Oca. 2022, doi: 10.1016/j.jpowsour.2021.230727.
- [101] **Z. Zhang, J. Xiao, ve Q. Zhong**, “Structural evolution of porous carbon heteroatom doping under oxidant on supercapacitor performance”, *Mater. Today Chem.*, c. 29, s. 101416, Nis. 2023, doi: 10.1016/j.mtchem.2023.101416.
- [102] **J.-H. Bang, B.-H. Lee, Y.-C. Choi, H.-M. Lee, ve B.-J. Kim**, “A Study on Superior Mesoporous Activated Carbons for Ultra Power Density Supercapacitor from Biomass Precursors”, *Int. J. Mol. Sci.*, c. 23, sy 15, Art. sy 15, Oca. 2022, doi: 10.3390/ijms23158537.
- [103] **M. Minakshi vd.**, “Phosphorous – Containing Activated Carbon Derived From Natural Honeydew Peel Powers Aqueous Supercapacitors”, *Chem. – Asian J.*, c. 19, sy 19, s. e202400622, 2024, doi: 10.1002/asia.202400622.
- [104] **H.-R. Yu, S. Cho, M.-J. Jung, ve Y.-S. Lee**, “Electrochemical and structural characteristics of activated carbon-based electrodes modified via phosphoric acid”, *Microporous Mesoporous Mater.*, c. 172, ss. 131-135, May. 2013, doi: 10.1016/j.micromeso.2013.01.018.

- [105] “Preparation and characterisation of activated carbon from waste tea by physical activation using steam”.
- [106] **L. M. Grishchenko vd.**, “Surface reactivity of nanoporous carbons: preparation and physicochemical characterization of sulfonated activated carbon fibers”, *Appl. Nanosci.*, c. 10, sy 8, ss. 2923-2939, Ağu. 2020, doi: 10.1007/s13204-019-01069-3.
- [107] **A. A. Bunaciu, E. G. Udriștioiu, ve H. Y. Aboul-Enein**, “X-ray diffraction: instrumentation and applications”, *Crit. Rev. Anal. Chem.*, c. 45, sy 4, ss. 289-299, 2015, doi: 10.1080/10408347.2014.949616.
- [108] **C. F. Holder ve R. E. Schaak**, “Tutorial on Powder X-ray Diffraction for Characterizing Nanoscale Materials”, *ACS Nano*, c. 13, sy 7, ss. 7359-7365, Tem. 2019, doi: 10.1021/acsnano.9b05157.
- [109] **B. S. Girgis, Y. M. Temerk, M. M. Gadelrab, ve I. D. Abdullah**, “X-ray Diffraction Patterns of Activated Carbons Prepared under Various Conditions”, *Carbon Lett.*, c. 8, sy 2, ss. 95-100, 2007, doi: 10.5714/CL.2007.8.2.095.
- [110] **MyScope. (n.d.)**. Anatomy of an X-ray diffractometer – Intro – XRD. https://myscope.training/XRD_Anatomy_of_an_X_ray_diffractometer___Intro
- [111] **K. Akhtar, S. A. Khan, S. B. Khan, ve A. M. Asiri**, “Scanning Electron Microscopy: Principle and Applications in Nanomaterials Characterization”, içinde *Handbook of Materials Characterization*, S. K. Sharma, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2018, ss. 113-145. doi: 10.1007/978-3-319-92955-2_4.
- [112] **ScienceDirect. (n.d.)**. Field emission scanning electron microscopy. Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/field-emission-scanning-electron-microscopy>
- [113] **B. Pokharel vd.**, “A Comparative Study of State-of-the-Art Deep Learning Models for Semantic Segmentation of Pores in Scanning Electron Microscope Images of Activated Carbon”, *IEEE Access*, c. 12, ss. 50217-50243, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3381523.
- [114] **R. Dungani, S. S. Munawar, T. Karliati, J. Malik, P. Aditiawati, ve SULISTYONO**, “Study of Characterization of Activated Carbon from Coconut Shells on Various Particle Scales as Filler Agent in Composite Materials”, *J. Korean Wood Sci. Technol.*, c. 50, sy 4, ss. 256-271, 2022, doi: 10.5658/WOOD.2022.50.4.256.
- [115] **Singh, N., & Kang, J. H.** (2019). Chalcogenide platforms for photonic metamaterials. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/333370958_Chalcogenide_platforms_for_photonic_metamaterials
- [116] **P. J. Wibawa, M. Nur, M. Asy'ari, ve H. Nur**, “SEM, XRD and FTIR analyses of both ultrasonic and heat generated activated carbon black microstructures”, *Heliyon*, c. 6, sy 3, s. e03546, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03546.
- [117] **D. Georgiev, S. V. Pedersen, R. Xie, Á. Fernández-Galiana, M. M. Stevens, ve M. Barahona**, “RamanSPy: An open-source Python package for integrative Raman spectroscopy data analysis”, 07 Temmuz 2023, *bioRxiv*. doi: 10.1101/2023.07.05.547761.

- [118] **Shimodaira, N., & Masui, A.** (2002). Raman spectroscopic investigations of activated carbon materials. *Journal of Applied Physics*, 92(2), 902–909. <https://doi.org/10.1063/1.1487434>
- [119] **Tuinstra, F., & Koenig, J. L.** (1970). Raman microprobe studies on carbon materials. *Carbon*, 8(5), 659–662. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(94\)90148-1](https://doi.org/10.1016/0008-6223(94)90148-1)
- [120] **T. Virtanen vd.**, “Analysis of membrane fouling by Brunauer-Emmett-Teller nitrogen adsorption/desorption technique”, *Sci. Rep.*, c. 10, sy 1, s. 3427, Şub. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-59994-1.
- [121] **S. Shimizu ve N. Matubayasi**, “Surface Area Estimation: Replacing the Brunauer–Emmett–Teller Model with the Statistical Thermodynamic Fluctuation Theory”, *Langmuir*, c. 38, sy 26, ss. 7989-8002, Tem. 2022, doi: 10.1021/acs.langmuir.2c00753.
- [122] **M. S. Michael ve K. Surya**, “Feasibility study on conversion of biowaste of lemon peel into carbon electrode for supercapacitor using ZnCl₂ as an activating agent”, *Mater. Renew. Sustain. Energy*, c. 13, sy 3, ss. 409-420, Ara. 2024, doi: 10.1007/s40243-024-00273-8.
- [123] **E. R. Raut, M. A. Bedmohata (Thakur), ve A. R. Chaudhari**, “Study of synthesis and characterization of raw bagasse, its char and activated carbon prepared using chemical additive”, *Water Sci. Technol.*, c. 87, sy 9, ss. 2233-2249, May. 2023, doi: 10.2166/wst.2023.134.
- [124] **Du, C., Liu, B., Hu, J., & Li, H.** (2021). Determination of iodine number of activated carbon by the method of ultraviolet–visible spectroscopy. *Chemical Physics Letters*, 772, 138627. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.138627> “Determination of iodine number of activated carbon by the method of ultraviolet–visible spectroscopy - ScienceDirect”. Erişim: 22 Mayıs 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi:
- [125] **M. Aziz ve A. F. Ismail**, “Chapter 5 - X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)”, içinde *Membrane Characterization*, N. Hilal, A. F. Ismail, T. Matsuura, ve D. Oatley-Radcliffe, Ed., Elsevier, 2017, ss. 81-93. doi: 10.1016/B978-0-444-63776-5.00005-X.
- [126] **Mogk, D.** (2021, August 13). X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS; aka Electron Spectroscopy for Chemical Analysis, ESCA). Nanotechnology in STEM – Instruments and Analytical Methods Common to Nano. Montana State University. https://serc.carleton.edu/msu_nanotech/methods/xps.html
- [127] **C. F. Ramirez-Gutierrez, R. Arias-Niquepa, J. J. Priás-Barragán, ve M. E. Rodriguez-Garcia**, “Study and identification of contaminant phases in commercial activated carbons”, *J. Environ. Chem. Eng.*, c. 8, sy 1, s. 103636, Şub. 2020, doi: 10.1016/j.jece.2019.103636.
- [128] **H.-R. Yu, S. Cho, M.-J. Jung, ve Y.-S. Lee**, “Electrochemical and structural characteristics of activated carbon-based electrodes modified via phosphoric acid”, *Microporous Mesoporous Mater.*, c. 172, ss. 131-135, May. 2013, doi: 10.1016/j.micromeso.2013.01.018.
- [129] **S. Wang, J. Zhang, O. Gharbi, V. Vivier, M. Gao, ve M. E. Orazem**, “Electrochemical impedance spectroscopy”, *Nat. Rev. Methods Primer*, c. 1, sy 1, ss. 1-21, Haz. 2021, doi: 10.1038/s43586-021-00039-w.

- [130] **A. Ch. Lazanas ve M. I. Prodromidis**, “Electrochemical Impedance Spectroscopy—A Tutorial”, *ACS Meas. Sci. Au*, c. 3, sy 3, ss. 162-193, Haz. 2023, doi: 10.1021/acsmesuresciau.2c00070.
- [131] **Y. Lan ve L. Changshi**, “Reliably and accurately estimate energy in super-capacitor via a model of cyclic voltammetry”, *J. Energy Storage*, c. 75, s. 109688, Oca. 2024, doi: 10.1016/j.est.2023.109688.
- [132] **F. G. Benitez Jara, A. J. Peruzzi Bardella, ve R. N. Faria**, “Mathematical expressions for simulation of supercapacitor voltammetry curves and capacitance dependence on scan rate”, *J. Energy Storage*, c. 87, s. 111267, May. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.111267.
- [133] **G. A. M. Ali, M. M. Yusoff, Y. H. Ng, H. N. Lim, ve K. F. Chong**, “Potentiostatic and galvanostatic electrodeposition of manganese oxide for supercapacitor application: A comparison study”, *Curr. Appl. Phys.*, c. 15, sy 10, ss. 1143-1147, Eki. 2015, doi: 10.1016/j.cap.2015.06.022.
- [134] **M. Hota, Q. Jiang, Y. Mashraei, K. Salama, ve H. Alshareef**, “Fractal Electrochemical Microsupercapacitors”, *Adv. Electron. Mater.*, c. 3, Ağu. 2017, doi: 10.1002/aelm.201700185.
- [135] **K. Jin vd.**, “Electrodeposited CuS nanosheets on carbonized cotton fabric as flexible supercapacitor electrode for high energy storage”, *Electrochimica Acta*, c. 295, ss. 668-676, Şub. 2019, doi: 10.1016/j.electacta.2018.10.182.
- [136] **F. Mahdi, M. Javanbakht, ve S. Shahrokhian**, “Facile In-Situ Electrosynthesis of MnO₂/RGO Nanocomposite for Enhancing the Electrochemical Performance of Symmetric Supercapacitors”, *J. Electroanal. Chem.*, c. 957, s. 118099, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.jelechem.2024.118099.
- [137] **Yazar, S.** (2023). Construction of enriched CuO/Cu₂O electrode materials with discrete heteroatom-doped graphene oxide and investigation of capacitance performance for symmetrical supercapacitor application. *Chemical Papers*, 77, 5259–5273. <https://doi.org/10.1007/s11696-023-02860-x>
- [138] **Z.-Y. Zhang, Y.-J. Gu, W. Wen, Z.-Z. Ye, ve J.-M. Wu**, “Excellent rate performance enabled by Ni-doping for Co₃O₄ nanosheet electrodes in supercapacitors”, *J. Power Sources*, c. 591, s. 233808, Oca. 2024, doi: 10.1016/j.jpowsour.2023.233808.
- [139] **Wang, Y., Wang, L., Yang, T., Li, X., & Zhang, Y.** (2017). Highly Stretchable and Self-Healable Conductive Hydrogel for Wearable Strain Sensors. *Nano Letters*, 17(12), 7381–7386. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b00533>
- [140] **Zhang, Y., Li, J., Wang, Y., & Chen, X.** (2020). Flexible and Stretchable Electronics Based on Carbon Nanotube Films for Strain Sensing Applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(5), 5675–5684. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b19977>

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mihrihan GÜLER

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans : 2022, İnönü Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü

Yüksek Lisans : 2025, İnönü Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM:

2022-2023: Karbontürk A.Ş, Kimyager

35. Ulusal Kimya Kongresi, Elektrot malzemesi olarak kayısı çekirdeği kabuğundan nanogözenekli aktif karbon hazırlanması ve süper kapasitör performanısının araştırılması konulu sözlü sunum

Yabancı Dil:

İngilizce, B1