Fēndēk Kabuĵ undan ¦ retilen Aktif Karbonlarēn S¿perkapasitº r Elektrotlarēnda Kullanēmē

Pelin ¥ zpēnar

Y¦ KSEK LĶSANS TEZĶ

Kimya M¿hendisliĵ i Anabilim Dalē

Aĵ ustos 2021

Use of Activated Carbons Produced from Hazelnut Shell in Supercapacitor Electrodes

Pelin ¥ zpēnar

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Chemical Engineering

August 2021

Fēndēk Kabuĵ undan ¦ retilen Aktif Karbonlarēn S¿perkapasitº r Elektrotlarēnda Kullanēmē

Pelin ¥ zpēnar

Eskiĸehir Osmangazi ¦ niversitesi

Fen Bilimleri Enstit¿s¿

Lisans¿st¿ Yº netmeliĵ i Uyarēnca

Kimya M¿hendisliĵ i Anabilim Dalē

Termodinamik ve Temel Ķklemler Bilim Dalēnda

Y¦ KSEK LĶSANS TEZĶ

Olarak Hazērlanmēĸtēr

Danēĸman: Prof. Dr. Hakan Demiral

Bu tez ESOG¦ BAP tarafēndan 2020-2980 noĵlu proje -er- evesinde desteklenmiĸtir.

Aĵ ustos 2021

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Prof. Dr. Hakan Demiral danışmanlığında hazırlamış olduğum "Fındık Kabuğundan Üretilen Aktif Karbonların Süperkapasitör Elektrotlarında Kullanımı" başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın bütün aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri, akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçlarımı bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 16/08/2021

Pelin Üzpınar

İmza

¥ ZET

Son yıllarda, fosil yakıtların tüketiminin artmasıyle enerjiye ihtiya- artmaktadır. Bu enerjinin üretilmesi ve ihtiya- durumunda kullanılmasıi-in enerjinin depolanmasıgerekmektedir. Bu tez -alışmasıkapsamında, elektriksel enerji depolama sistemleri cihazlarından biri olan süperkapasitörlerin elektrot malzemeleri i-in fındık kabuğundan aktif karbon üretilmiş ve elektrokimyasal analizleri yapılmıştır. Fındık kabuğundan H_3PO_4 ve $ZnCl_2$ kullanılarak kimyasal aktivasyon yöntemi ile farklı sıcaklıklarda aktif karbon üretilmiştir. Belirlenen sıcaklıkta, aktif karbon ve Fe (II) ve Fe (III) -öz eltileri hazırlanarak manyetik aktif karbon üretimi yapılmıştır. Üretimi tamamlanan aktif karbon ve manyetik aktif karbonların karakterizasyonlarıger-ekleştirilmiştir. Elektrot üretimi i-in, 8:1:1 (% 80 aktif karbon, % 10 iletkenlik arttırıcımadde ve % 10 bağlayıcı) oranında elektrot -öz eltisi hazırlanmıştır. Üretilen elektrotların elektrokimyasal analizleri, dönüşümsel voltametri (CV), galvanostatik şarj-deşarj (GCD) ve elektrokimyasal empedans spesktroskopisi (EIS) teknikleri kullanılarak ger-ekleştirilmiştir. CV ve GCD analizlerinden hesaplanan spesifik kapasitans değerlerleri, H_3PO_4 ve $ZnCl_2$ kullanılarak üretilen aktif karbon/manyetik aktif karbon ve farklı bağlayıcı -eşitleri i-in karşılaştırılmıştır. Sonu-lar değerlendirildiğinde, $ZnCl_2$ aktivasyonu ile üretilen aktif karbon ve PVDF bağlayıcısıile hazırlanan elektrotun CV analiz sonucunda spesifik kapasitans değeri 118,01 F/g olarak hesaplanmış ve en yüksek değer elde edilmiştir. GCD analizinde, H_3PO_4 aktivasyonu ile üretilen aktif karbon ve PTFE bağlayıcısıile hazırlanan elektrotta spesifik kapasitans değeri 247,82 F/g olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: aktif karbon, kimyasal aktivasyon, süperkapasitör, elektrot hazırlama, spesifik kapasitans

SUMMARY

In recent years, the need for energy has increased with the increase in the consumption of fossil fuels. In order to produce this energy and use it in case of need, energy must be stored. Within the scope of this thesis, activated carbon was produced from hazelnut shell for the electrode materials of supercapacitors, which is one of the devices of electrical energy storage systems, and electrochemical analyzes were made. Activated carbon was produced at different temperatures by chemical activation method using H_3PO_4 and $ZnCl_2$ from hazelnut shells. Magnetic activated carbon was produced by preparing activated carbon and Fe (II) and Fe (III) solutions at the determined temperature. The characterizations of activated carbon and magnetic-activated carbons, whose production was completed, were carried out. For the production of electrodes, an electrode solution of 8:1:1 (80% active carbon, 10% conductivity enhancer, and 10% binder) was prepared. Electrochemical analyzes of the produced electrodes were performed using cyclic voltammetry (CV), galvanostatic charge-discharge (GCD), and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) techniques. Specific capacitance values calculated from CV and GCD analyzes were compared for activated carbon/magnetic activated carbon produced using H_3PO_4 and $ZnCl_2$ and for different types of binders. When the results were evaluated, the specific capacitance value of the electrode prepared with activated carbon produced by $ZnCl_2$ activation and PVDF binder was calculated as 118.01 F/g as a result of the CV analysis, and the highest value was obtained. In the GCD analysis, the specific capacitance value of the electrode prepared with activated carbon and PTFE binder produced by H_3PO_4 activation was calculated as 247.82 F/g.

Key Words: activated carbon, chemical activation, supercapacitor, electrode preparation, specific capacitance

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **vi**
SUMMARY ..... **vii**
TEŞEKKÜR ..... **viii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **xi**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xiv**
1. GİRİŞ VE AMAÇ **1**
2. AKTİF KARBON **3**
2.1. Aktif Karbon Üretimi 4
2.1.1. Karbonizasyon 4
2.1.2. Fiziksel aktivasyon 5
2.1.3. Kimyasal aktivasyon 5
2.2. Aktif Karbon Kullanım Alanları 7
3. ENERJİ DEPOLAMA **9**
3.1. Elektriksel Enerji Depolama 11
4. SÜPERKAPASİTÖRLER **15**
4.1. Elektrik Çift Tabaka Kapasitörler (EDLC) 16
4.2. Pseudokapasitörler (PC) 18
4.3. Hibrit Süperkapasitörler 19
4.4. Süperkapasitör Performansına Bağlı Olan Faktörler 20
4.4.1. Şarj-deşarj hızı ve çevrim ömrü 21
4.4.2. Kapasitans 21
4.4.3. Eşdeğer seri direnç (ESR) 22
4.5. Süperkapasitörlerin Elektrokimyasal Analiz Yöntemleri 22
4.5.1. Döngüsel voltametri (CV) 23
4.5.2. Galvanostatik şarj-deşarj (GCD) 24
4.5.3. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) 25
4.6. Aktif Karbonların Süperkapasitör Elektrotlarındaki Rolü 26
5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **27**
6. MATERYAL VE YÖNTEM **33**
6.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Cihazlar 33
6.2. Fındık Kabuğunun Hazırlanması 34
6.3. Aktif Karbon Üretimi 34
6.3.1. Manyetik aktif karbonların hazırlanması 36
6.4. Fındık Kabuğunun Karakterizasyonu 37

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

6.4.1. Nem tayini 37
6.4.2. Kül tayini 38
6.4.3. Uçucu madde tayini 39
6.4.4. Yaş analizi 39
6.4.5. Ham selüloz tayini 40
6.5. Aktif karbonun ve Manyetik Aktif Karbonun Karakterizasyonu 41
6.6. Aktif Karbon Elektrotların Hazırlanması 41
6.6.1. Elektrot çözeltisinin hazırlanması 41
6.6.2. Elektrotların kaplanması ve elektrokimyasal analizleri için hazırlanması 42
6.7. Aktif Karbon Elektrotların Elektrokimyasal Analizleri 43
7. BULGULAR VE TARTIŞMA 45
7.1. Fındık Kabuğunun Karakterizasyonu 45
7.1.1. Fındık kabuğunun kaba ve yapısal analiz sonuçları 45
7.1.2. Fındık kabuğunun SEM analizi sonuçları 45
7.1.3. Fındık kabuğunun EDS analizi 46
7.2. Aktif Karbon ve Manyetik Aktif Karbonların Karakterizasyonu 48
7.2.1. Fosforik asit aktivasyonu ile üretilen aktif karbon ve manyetik aktif karbonların N_2 adsorpsiyon/desorpsiyon izotermleri 48
7.2.2. Çinko Klorür aktivasyonu ile üretilen aktif karbon ve manyetik aktif karbonların N_2 adsorpsiyon/desorpsiyon izotermleri 52
7.2.3. Fosforik asit aktivasyonu ile üretilen aktif karbon ve manyetik aktif karbonların göze nek boyut dağılımları 54
7.2.4. Çinko klorür aktivasyonu ile üretilen aktif karbon ve manyetik aktif karbonların göze nek boyut dağılımları 56
7.2.5. Fosforik asit aktivasyonu ile üretilen aktif karbon ve manyetik aktif karbonların SEM analizi sonuçları 58
7.2.6. Çinko klorür aktivasyonu ile üretilen aktif karbon ve manyetik aktif karbonların SEM analizi sonuçları 59
7.2.7. Fosforik asit aktivasyonu ile üretilen aktif karbon ve manyetik aktif karbonların EDS analizi sonuçları 61
7.2.8. Çinko klorür aktivasyonu ile üretilen aktif karbon ve manyetik aktif karbonların EDS analizi sonuçları 63
7.2.9. Fosforik asit aktivasyonu ile üretilen aktif karbon ve manyetik aktif karbonların FT-IR analizi sonuçları 65

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

7.2.10. Çinko klorür aktivasyonu ile üretilen aktif karbon ve manyetik aktif karbonların FT-IR analizi sonuçları 66
7.3. Fosforik Asit Aktivasyonu İle Üretilen Aktif Karbon ve Manyetik Aktif Karbonların Elektrokimyasal Analizleri 68
7.3.1. PTFE bağlayıcısıyle hazırlanan AC-400 ve MAC-400 elektrotlarının dönüşümlü voltametri (CV) analizi sonuçları 68
7.3.2. PVDF bağlayıcıyle hazırlanan AC-400 ve MAC-400 elektrotların dönüşümlü voltametri (CV) analizi sonuçları 71
7.3.3. PTFE bağlayıcıyle hazırlanan AC-400 ve MAC-400 elektrotlarının galvanostatik şarj-deşarj (GCD) analizi sonuçları 72
7.3.4. PVDF bağlayıcıyle hazırlanan AC-400 ve MAC-400 elektrotlarının galvanostatik şarj-deşarj (GCD) analizi sonuçları 74
7.4. Çinko Klorür Aktivasyonu İle Üretilen Aktif Karbon ve Manyetik Aktif Karbonların Elektrokimyasal Analizleri 76
7.4.1. PTFE bağlayıcısıyle hazırlanan AC-500 ve MAC-500 elektrotlarının dönüşümlü voltametri (CV) analizi sonuçları 77
7.4.2. PVDF bağlayıcısıyle hazırlanan AC-500 ve MAC-500 elektrotlarının dönüşümlü voltametri (CV) analizi sonuçları 79
7.4.3. PTFE bağlayıcıyle hazırlanan AC-500 ve MAC-500 elektrotlarının galvanostatik şarj-deşarj (GCD) analizi sonuçları 81
7.4.4. PVDF bağlayıcıyle AC-500 ve MAC-500 elektrotlarının galvanostatik şarj-deşarj (GCD) analizi sonuçları 83
7.5. Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) Analizleri 85
7.6. Elektrotların şarj-Deşarj Dönüşüm Denemeleri 88
8. SONUÇ VE ÖNERİLER 90
KAYNAKLAR DİZİNİ 94

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

3.1. Farklı elektriksel enerji depolama sistemlerinin karşılaştırmalı Ragone grafiği 13
4.1. EDLC'lerin şarj ve deşarj olmuş durumlarının göstermiş olduğu kimyasal diyagramları 17
4.2. Hibrit kapasitör genel görünümü 20
6.1. Fındık kabuğunun elek analizi a) titreşimli elek sallayıcı cihazı
b) - alınan tanecik boyutları 34
6.2. Aktif karbon aktivasyon işlemi a) kimyasal ajanlar ile emdirilmiş fındık kabuğu
b) emdirme işlemi sonrası süzülen fındık kabukların görüntüsü 35
6.3. Karbonizasyon işlemi için kullanılan reaktör görünümü. 35
6.4. Fındık kabuğundan üretilen aktif karbonun üretim akış şeması 36
6.5. Manyetik aktif karbon üretim akış diyagramı 37
6.6. Aktif karbonlardan süperkapasitör elektrotların hazırlanması aşamaları 43
6.1. ¦ - lü elektrot sistemi a) Elektrokimyasal hücre bileşenleri b) Hücrenin genel görünümü
c) ¦ - lü elektrot sisteminin elektrokimyasal analiz genel görünümü 44
7.1. Ham fındık kabuğunun SEM görüntüsü 46
7.2. Ham fındık kabuğunun EDS grafiği 47
7.3. H_3PO_4 aktivasyonu ile üretilen aktif karbonların farklı sıcaklıklardaki
N_2 adsorpsiyon/desorpsiyon izotermleri 49
7.4. AC-400 ve MAC-400'ün N_2 adsorpsiyon/desorpsiyon izotermleri. 51
7.5. $ZnCl_2$ aktivasyonu ile üretilen aktif karbonların farklı sıcaklıklardaki
N_2 adsorpsiyon/desorpsiyon izotermleri 52
7.6. AC-500 ve MAC-500'ün N_2 adsorpsiyon/desorpsiyon izotermleri. 54
7.7. AC-400'ün farklı sıcaklıklardaki görünen boyut dağılım grafiği. 55
7.8. AC-400 ve MAC-400 aktif karbonlarının görünen boyut dağılım grafiği. 56
7.9. AC-500 örneğinin farklı sıcaklıklardaki görünen boyut dağılım grafiği. 57
7.10. AC-500 ve MAC-500 örneklerinin görünen boyut dağılım grafiği. 58
7.11. AC-400 örneğinin SEM görüntüsü a) 100 µm b) 20 µm 59
7.12. MAC-400 numunesinin SEM görüntüsü a) 100 µm b) 20 µm 59
7.13. AC-500 örneğinin SEM görüntüsü a) 100 µm b) 20 µm 60
7.14. MAC-500 örneğinin SEM görüntüsü a) 100 µm b) 20 µm 60
7.15. AC-400 örneğinin EDS grafiği. 61
7.16. MAC-400 örneğinin EDS grafiği. 62

ŞEKİLLER DİZİNİ(devam)

Şekil **Sayfa**

7.17. AC-500 ºrneği inin EDS grafiği i. 63
7.18. MAC-500 ºrneği inin EDS grafiği i. 64
7.19. MAC-400, AC-400 ve fəndək kabuğ unun FTIR spektrumu. 65
7.20. MAC-500, AC-500 ve fəndək kabuğ unun FTIR spektrumu. 67
7.21. PTFE bağ layıcısı ile hazırlanan elektrotların CV eğ rileri a) AC-400 b) MAC-400 70
7.22. PVDF bağ layıcısı ile hazırlanan elektrotların CV eğ rileri a) AC-400 b) MAC-400..... ..72
7.23. PTFE bağ layıcısı ile hazırlanan elektrotların galvanostatik şarj-deşarj eğ rileri
a) AC-400 b) MAC-400é ...74
7.24. PVDF bağ layıcısı ile hazırlanan elektrotların galvanostatik şarj-deşarj eğ rileri
a) AC-400 b) MAC-400é é é é é ..... .76
7.25. PTFE bağ layıcısı ile hazırlanan elektrotların CV eğ rileri a) AC-500 b) MAC-500é é . ..é 79
7.26. PVDF bağ layıcısı ile hazırlanan elektrotların CV eğ rileri a) AC-500 b) MAC-500..... 81
7.27. PTFE bağ layıcısı ile hazırlanan elektrotların galvanostatik şarj-deşarj eğ rileri
a) AC-500 b) MAC-500é ..
833
7.28. PVDF bağ layıcısı ile hazırlanan elektrotların galvanostatik şarj-deşarj eğ rileri
a) AC-500 b) MAC-500é 85
7.29. Aktif karbon (H_3PO_4 aktivasyonuyla çıretilen) elektrotların Nyquist eğ rileri
a) eşdeğ er devre modeli b) genel göº rünüm c) yüksek frekans bºlgesindeki
göº rünümé 86
7.30. Aktif karbon ($ZnCl_2$ aktivasyonuyla çıretilen) elektrotların Nyquist eğ rileri
a) eşdeğ er devre modeli b) genel göº rünüm c) yüksek frekans bºlgesindeki
göº rünümé 87
7.31. Dº ngü sayısına karşı spesifik kapasitans grafiği i a) AC-400-PTFE,
MAC-500-PVDF ve AC-400-PVDF i-in b) MAC-500-PTFE i-in.....89

¢ KZELGELER DKZKNK

¢ izelge **Sayfa**

3.1. Elektriksel enerji depolama sistemlerinin (Kapasitor ve piller) ozelliklerinin karkdlaktrdmasé ...14

7.1. Fndk kabuj unun kaba ve yapsal analiz sonu-lré é é é é é é é é é é é é é é é é ...45

7.2. Fndk kabuj unun EDS analizi sonu-lr 47

7.3. Aktif karbon ve manyetik aktif karbonun y¿zey ozellikleri. 50

7.4. Aktif karbon ve manyetik aktif karbonun y¿zey ozellikleri. 53

7.5. AC-400 ornejinin EDS analiz sonu-lr 61

7.6. MAC-400 ornejinin EDS analizi sonu-lr 62

7.7. AC-500 ornejinin EDS analiz sonu-lr 63

7.8. MAC-500 ornejinin EDS analiz sonu-lr 64

7.9. PTFE bajlayccsckullandarak hazrlanan AC-400 ve MAC-400 elektrotlarnn CV ejrilerinden hesaplanan spesifik kapasitans dejerlerié é é é é é é é é é é é é é ...70

7.10. PVDF bajlayccsckullandarak hazrlanan AC-400 ve MAC-400 elektrotlarnn CV ejrilerinden hesaplanan spesifik kapasitans dejerlerié é é é é é é é é é é é é é .71

7.11. PTFE bajlayccsckullandarak hazrlanan AC-400 ve MAC-400 elektrotlarnn GCD ejrilerinden hesaplanan spesifik kapasitans dejerlerié é é é é é é é é é é é é é .73

7.12. PVDF bajlayccsckullandarak hazrlanan AC-400 ve MAC-400 elektrotlarnn GCD ejrilerinden hesaplanan spesifik kapasitans dejerlerié é é é é é é é é é é é é é .75

7.13. PTFE bajlayccsckullandarak hazrlanan AC-500 ve MAC-500 elektrotlarnn CV ejrilerinden hesaplanan spesifik kapasitans dejerlerié é é é é é é é é é é é é é .78

7.14. PVDF bajlayccsckullandarak hazrlanan AC-500 ve MAC-500 elektrotlarnn CV ejrilerinden hesaplanan spesifik kapasitans dejerlerié é é é é é é é é é é é é é .80

7.15. PTFE bajlayccsckullandarak hazrlanan AC-500 ve MAC-500 elektrotlarnn GCD ejrilerinden hesaplanan spesifik kapasitans dejerlerié é é é é é é é é é é é é é .82

7.16. PVDF bajlayccsckullandarak hazrlanan AC-500 ve MAC-500 elektrotlarnn GCD ejrilerinden hesaplanan spesifik kapasitans dejerlerié é é é é é é é é é é é é é .84

7.17. Aktif karbon elektrotlarn (H_3PO_4 aktivasyonu) Ekdejer Randles devre modeli sonu-lr ve hata paylrdejerlerié 87

7.18. Aktif karbon elektrotlarn ($ZnCl_2$ aktivasyonu) Ekdejer Randles devre modeli sonu-lr ve hata paylrdejerlerié ...88

8.1. Elektrotlarn CV ejrilerinden 5 mV/s tarama hzndan hesaplanan spesifik kapasitans dejerlerié é ...é 91

8.2. Elektrotlarn GCD ejrilerinden d¿k¿k akm yojunluklarndan hesaplanan spesifik kapasitans dejerlerié ...92

8.3. Atk biyok¿tlelerden ¿retilen aktif karbonlarn s¿perkapasitor uygulamalarnda kullanddjc-alkmalarn ozetié .93

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Son zamanlarda, fosil yakıtların tüketiminin artmasıyle birlikte enerji ihtiyacının ve çevre kirliliğinin giderek arttığı araştırmacılar tarafından tartışma konusu olarak gündeme sürekli gelmektedir (Li vd., 2020). Aynı zamanda araştırmacılar, artan enerji ihtiyacıyle birlikte toplumun yenilenebilir ve sürdürebilir enerji kaynaklarına yönelmesinin teşvik edilmesi ve bu enerjinin verimli sistemlerde kullanılmasıiçin yöntemler geliştirilmesi gerekliliğini önemle vurgulamaktadırlar (Abioye ve Ani, 2015). Yenilebilir bir enerji üretiminin hızlanmasına başlıca olarak, çevre koruma bilinci toplum tarafından giderek arttığı, enerji depolama sistemlerinin hayatımızda rol oynamasıyle geliştiği ve yeni yöntemler uygulanmaya başlandığı bildirilmektedir (Simon ve Gogotsi, 2010). Elektrokimyasal enerji depolama sistemlerinden biri olan süperkapasitör cihazlarıyüksek enerji depolama kapasitesi ile yoğun ilgi görmektedir. Süperkapasitörlerin depolama mekanizmalarına göre bir tipi olan elektrik çift tabaka kapasitörler (EDLCler) elektrot/elektrolit arayüzünde tersinir iyon adsorpsiyonu ile yük depolamaktadırlar (Yu vd., 2015). EDLCler için gelişmiş elektrot malzemesi seçimi önem taşımaktadır. Elektrot malzemeleri karbon içerikli, iletken polimerler ve metal oksitler olabilmektedir. Karbon içerikli malzemelerin, iyi gelişmiş gözenek yapıları ve yüzey alanları yüksek spesifik kapasite elde edilmesini sağlamaktadır. Süperkapasitörler için yüksek bir spesifik kapasitans, uzun bir kullanım ömrü sağlamaktadır (Wang vd., 2020). Aktif karbonlar karbon içerikli malzemelerdir. Biyokütlelerden üretilen aktif karbonların elektrik çift tabaka kapasitörlerinde elektrot malzemeleri olarak kullanımı ilgi çekmektedir. Tarımsal veya canlı atıklarının depolanabilmesi probleminin ortadan kalkmasıiçin biyokütle kullanımı enerji depolama sistemlerinde kullanımı bir alternatif olabilmektedir (Wang vd., 2020). Literatürdeki çalışmalara bakıldığında, soya küspesinden (Ding vd., 2021), pamuk sapları (Cheng vd., 2021), şeker kamışı küspesi (Okonkwo vd., 2021), buğday kabuklarından (Baig ve Gul, 2021), mısır koçanı (Ai vd., 2021), kahve telveleri (Hossain vd., 2021) gibi malzemelerden biyokütle içerikli aktif karbon üretimi ve süperkapasitör elektrot malzemelerinde kullanımıiçin çok fazla sayıda araştırma bulunmaktadır.

Çift tabaka kapasitörler için elektrot malzemelerinin kapasitif davranışlarını değerlendirmek için elektrokimyasal analizlerden biri olan döngüsel voltametri (CV) tekniği yaygın olarak kullanılmaktadır. İki elektrotlu sistemlerde elektrotların kapasitif davranışları EDLCler için döngüsel voltametri eğriler dikdörtgensel şekil sergilemektedir

(Abioye ve Ani, 2015). Dº ng¿sel voltametri (CV) ¿-l¿ elektrot sistemlerinde, -alēkma elektrotu, karkēt elektrot ve referans elektrot ile belirli bir -alēkma potansiyeli aralę ēnda uygulanmasēdēr. Sisteme uygulanan potansiyel saniyede artan bir tarama hēzē ile elde edilmektedir. EDLCôlerin y¿k depolama mekanizmalarē hakkēnda bilgi sahibi olmak i-in dº ng¿sel voltametri tekniî i en iyi uygulamalardan biri olarak kabul edilmektedir (Ratha ve Samantara, 2018).

Fēndēk kabuî u aî ērlę ēnēn neredeyse yarēsē odunsu bir yapēya sahip ve -ok b¿y¿k bir enerji kaynaî ē potansiyeline sahip, atēk biyok¿tle t¿r¿d¿r (Haykiri vd., 2013). Fēndēk, T¿rkiyeôde ¿retilen en ºnemli tarēm ¿r¿nlerinden biridir. Fēndę ēn %80ôi T¿rkiyeônin kuzey kēyēlarēnda yetikmektedir (Haykiri-Acma, 2006). T¿rkiye d¿nya fēndēk ¿retiminde lider konumundadēr ve 2019 yēlē verilerine gº re toplam ¿retimin %58ôini karkēlamaktadēr. T¿rkiyeôde Karadeniz Bº lgesiônde fēndēk ¿retimi baklamēk olup, Batē Karadeniz Bº lgeôsi ve diî er bº lgelere yayēlmēktēr. D¿nyada fēndēk ¿retimini T¿rkiyeôden sonra, Ķalya, Azerbaycan ve ABD takip etmektedir. D¿nyada 2019 yēlēnda fēndēk ¿retimi, 1154 ton olarak bildirilmiktir. Bu fēndēk ¿retiminin 776 tonu T¿rkiyeôye aittir. Son bek yēlda ¿lkelerin ortalama ¿retim miktarlarē sērasēyla, Ķalya 112 bin ton, ABD 35 bin ton Azerbaycan 34 bin ton ve ¢in 25 bin tondur (Bars, T., 2020 ; T¦ Ķ, 2020).

Fēndēk kabuî unun yaklakēk yarēsēnēn odunsu bir yapēya sahip olmasē sebebiyle biyok¿tlenin enerji kaynaî ē olarak geri kazanēlmasē -ok b¿y¿k bir potansiyel yaratmaktadēr. Fēndę ēn T¿rkiyeôde ¿retiminin -ok fazla olmasē ve kabuklarēnēn atēk oluktурmasē sebebiyle bu tez -alēkmasēnda kullanēmēnēn uygun olduî una karar verilmiktir. Fēndēk kabuklarēndan H_3PO_4 ve $ZnCl_2$ aktivasyonu ile aktif karbonlar ¿retilmiktir. ¦ retilen aktif karbonlarēn karakterizasyonlarē N_2 adsorpsiyon/desorpsiyon, FTIR, SEM ve EDS analizleri ile yapēlmēktēr. ¦ retilen aktif karbondan elde edilen elektrot malzemelerinin elektrokimyasal analizleri, dº ng¿sel voltametri (CV), galvanostatik karj-dekarj (GCD) ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) teknikleri kullanēlarak deî erlendirilmiktir. CV ve GCD eî rilerinden hesaplanan spesifik kapasitans deî erlerindeki fark kullanēlan deî erlendirilmik ve tartēkēlmēktēr.

2. AKTİF KARBON

Aktif karbonlar, geniş gözenek hacmi ve özgül yüzey alanı gibi özellikleri sebebiyle yaygın olarak adsorbanlardan biridir. Aktif karbonların polar olmayan özellikleri hidrofobik karaktere sahip olmasını sağlamaktadır (Kwiatkowski ve Broniek, 2017).

Aktif karbon, mikro ve mezo aralıklarında olduk-a gelişmiş gözenekli yapılara sahip grafit esaslı malzemelerdir. Grafen katmanlarının -- boyutlu ağlarından düzenlenen ve gözeneklerin -- boyutlu boş alanları geliştiren ağlardan oluşmaktadır. Geniş bir gözenek boyutu aralığına sahip olduğu için yapısı grafitten farklılık göstermektedir. Aktif karbon, yüksek yüzey alanı, fiziksel ve kimyasal olarak kararlı üstün bir fizikokimyasal özelliklere sahiptir (Nicholas vd., 2019). Iş yüzey alanı genel olarak 800-1500 m^2/g arasında değişken yüksek gözenekli bir malzemedir. Aktif karbonun heterojen yüzey özelliğine sahip olmasının önemli derecede adsorpsiyon özelliklerine katkı sağlamaktadır (Bagheri ve Julkapli, 2016). Gözenek boyutları şu şekilde sınıflandırılmaktadır (Knappe, 2006) :

- Mikro gözenekler (<1 nm),
- Mezo gözenekler (2-50 nm),
- Makro gözenekler (>50 nm)

Aktif karbonların yapı taşlarını oluşturan poliaromatik tabakaların kenarlarında karbon dışında atomlar diğer bir deyişle heteroatomlar bulunur. Bu karbon dışındaki atomlar yani heteroatomlar aktif karbon gözenek yüzeylerinin kimyasal özelliklerini belirlemektedir. Aktif karbonun temel bileşimi % 88 karbon, % 6-7 O, % 1 S, % 0,5 N, % 0,5 H ve geri kalan kısmı mineral maddeden oluşmaktadır. Bunlara ek olarak, aktif karbonların temel bileşimleri, bu yaklaşık değerlerden farklılık gösterebilmektedir. Örneğin, oksijen içeriği % 1-25 arasında değişebilirken, kül içeriği %1-20 arasında değişebilmektedir. Oksijen, aktif karbonun yüzey kimyasına-ısından önemli bir heteroatom olarak görülmektedir (Knappe, 2006). Aynı zamanda aktif karbonlar hem asidik hem de bazik özellikler sergilediği bildirilmiştir. Asidik özellikler, fenolik ve karboksilik asit gruplarının varlığını gösterirken, aktif karbonun temel yapısında aldehitler, ketonlar, laktonlar ve kinonlar gibi gruplar tanımlanmıştır (Rouquerol vd., 2013).

Aktif karbonlar tipik olarak, toz ve gran¿l formda bulunmaktadır. Bu aktif karbonlar su arıtma tesislerinde kullanılmaktadır. Kº m¿r, linyit, hindistan cevizi kabukları, odun gibi heterojen bazlı malzemelerden ¿retilmektedirler. Ayrıca sº z konusu aktif karbonlar sel¿loz, poliakrilonitril veya fenolik re-ine gibi homojen polimerik bazlı malzemelerden de hazırlanabilir, fakat bu t¿r aktif karbonlar g¿n¿m¿zde i-me suyu ıslemlerinde uygulanmamaktadır (Knappe, 2006).

2.1. Aktif Karbon ¦ retimi

Aktif karbon, fiziksel ve kimyasal aktivasyon yºntemleriyle ¿retilebilmektir. Aktivasyon ıslerimden ºnce, yıkama, g¿nefte/fırında kurutma, kırma, º¡ ¿tme gibi º n ıslem s¿re-leri i-ermektedir. K¿l bileşenlerinin ortak kaynakları olan organik bileşen, toz, kum ve safsızlıkları gidererek k¿l bileşiklerini azaltma potansiyeli i-in su ile yıkama ºnemli bir adımdır. Soğuk ya da sıcak yıkama ıslemi ºnemli miktardaki mineral i-eriğini de ortadan kaldırmaktadır. Y¿ksek k¿l i-eriği zayıf adsorpsiyon kapasitesine neden olduğu ve aktif karbonun mekanik dayanıklılığı da etkilemesi sebebiyle kurutma ile birlikte basit bir yıkama ıslemi uygulanmaktadır (Rashidi ve Yusup, 2017).

2.1.1. Karbonizasyon

Organik malzemeler, inert bir atmosfer altında pirolitik ayrışmaya uğramaktadır. Poliaromatik halka yapıları, karbonizasyonun erken aşamalarında gelişirilmiştir. Karbonizasyon sıcaklığı arttık-a, katı ¿r¿n (char) veya kok, bozulmuş grafitik lameller oluşumu kazanmaya başlamaktadır (Rouquerol vd., 2013).

Ahşap ve diğer doğal olarak meydana gelen organik malzemeler, ¿- boyutlu polimerik sel¿loz ve lignin ağlarından oluşmaktadır. 700 ÜC'nin ¿st¿ndeki sıcaklıklarda karbonizasyon, su, karbon dioksit ve -eşitli organik molek¿llerin (alkoller,ketonlar,asitler gibi) kaybına neden olmaktadır. C/H ve C/O oranları aşamalı olarak artmaya başlar fakat heteroatomlar (O, H, Cl, N, S gibi) aromatik makro molek¿llerin kenarlarında kimyasal olarak bağlı kalmaktadır. Bu aşamaların sonunda heteroatomlar, y¿zey komplekslerine dº n¿şt¿r¿lmektedir (Rouquerol vd., 2013).

2.1.2. Fiziksel aktivasyon

Fiziksel aktivasyon, inert bir atmosfer altında karbonizasyon sürecini ve ardından buhar, karbondioksit, karbondioksit-azot ikili karışımı gibi oksitleyici gaz atmosferi altında bir aktivasyonu içeren iki aşamalı bir mekanizmayı ifade etmektedir (Rashidi ve Yusup, 2017).

Fiziksel aktivasyon yönteminde, aktifleştirici ajan olarak yüksek sıcaklıklarda CO_2 veya buhar gibi oksitleyici gazlar kullanılmaktadır. Bu yöntem de, numuneler saf azot gibi inert atmosfer altında fırında yüksek bir sıcaklıkta karbonize edilmekte ve ardından CO_2, buhar veya gaz karışımlarını gibi oksitleyici gazların varlığında numunenin aktifleştirildiği aktivasyon işlemi yapılmaktadır (Nicholas vd., 2019). Karbonizasyon süreci dört adımdan oluşmaktadır:

-Birinci adım; 200 °C düşük olan, ateşin yapısındaki nemin giderildiği dehidrasyon sürecidir,

-İkinci adım; 170-270 °C sıcaklık arasında gerçekleşen, hafif katran ve organik asit bozunduğu biyokütlenin ayrışmaya başladığı süreçtir,

-Üçüncü adım; 270-350 °C sıcaklık aralığında değişken, biyokütlenin ayrıştırıldığı ve biyo-char üretiminde önemli miktarda sıvı ve gazın birleştiği süreçtir,

- Dördüncü adım; sıcaklığın 350 °C'den fazla olduğu dördüncü adımda, kalan uçucuların uzaklaştırılmasıyla karbon içeriğinde bir ivmelenme oluşmaya başlar.

Fiziksel aktivasyon sırasında, aktif karbonun yüzey alanını ve gözenek hacmini arttırmak aktifleştirici ajanın görevidir. Bu durum genellikle karbonun yanması ve uçucu maddelerin uzaklaştırılması ile gerçekleştirilmektedir. Karbonun yanması, aktivasyon sıcaklığına ve süresine gibi deneysel parametrelere bağlı olmaktadır. Bu süreçler aktif karbonun kalitesini belirlemektedir (Abioye ve Ani, 2015). Fiziksel aktivasyon ile üretilen aktif karbonun uzun aktivasyon süresi, düşük adsorpsiyon kapasitesi ve yüksek enerji tüketimi dezavantajı olarak kabul edilmektedir (Heidarinejad vd., 2020).

2.1.3. Kimyasal aktivasyon

Kimyasal aktivasyon, inert atmosferde farklı sıcaklık aralıklarında ve ısıl işlemden önce ıslatma aşamasının uygulandığı tek aşamalı bir işlemi içermektedir. Emdirme

ıklemi esnasında belli oranlarda (0,5:1,1:1,1,5:2) biyok¿tle ile birlikte eklenen aktiflextirici madde u-ucu maddelerin salınmasını azaltırken, partik¿llerin b¿z¿lmesini engellemektedir. Bº ylece biyok¿tlenin aktif karbona dº n¿ık¿m¿ verimli bir ıekilde ilerlemektedir (Girgis ve El-Hendawy, 2002; Ziñzio vd., 2020)). Fiziksel aktivasyona kıyasla, daha d¿ık¿k aktivasyon sıcaklığında, kısa ıklem s¿resine, daha iyi bir gº zenek yapısına (Nicholas vd., 2019), y¿ksek karbon verimine sahip olduğu i-in ekonomik olarak uygun olduğu bildirilmiıtir (Rashidi ve Yusup, 2017). Fiziksel aktivasyondan baıka bir farkıda, kimyasal aktivasyonla ¿retilen aktif karbonun daha gº zenekli bir yapıya sahip olmasıdır. Kimyasal ajanlar karbon matrisleriyle tepkimeye girmekte ve gº zenekli bir yapı oluıturmak i-in gaz ¿r¿nlerini serbest bırakmaktadır. Aktivasyon s¿recinde kullanılan aktiflextirici maddeleri karıımdan ayırmak i-in uzun bir yıkama aıamasına ihtiya- duyulmaktadır. Bu aıamada toksik atık su ¿retilmesi, su kirliliğine sebep olmaktadır. Yıkama ıklemine ihtiya-duyulmasız kimyasal aktivasyonun dezavantajlarından biri olarak kabul edilmiıtir (Heidarinejad vd., 2020).

Kimyasal aktivasyonda, y¿ksek y¿zey alanı ve gº zeneklilik elde etmek i-in genellikle asidik veya bazik bir -º zelti aktive edici ajan kullanılmakta ve ajanlar adsorpsiyon davranıılarını da etkilemektedir (Nicholas vd., 2019). Aktiflextirici madde olarak uygulanan kimyasal -eıitleri arasında alkali grup; KOH, K_2CO_3, asidik grup; H_3PO_4, H_2SO_4, ge-iı metal tuzu; $ZnCl_2$ bulunmaktadır (Rashidi ve Yusup, 2017).

Fosforik Asit (H_3PO_4) kullanımı : Kimyasal aktivasyon ıkleminde aktive edici ajan olan fosforik asit, -eıitli lignosel¿lozik materyallerin aktivasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Fosforik asitin lignosel¿loz ile reaksiyonunda sel¿loz, asitin hidrolizine diren-li olduğu i-in, bileıiklerin karıımının bıklangıcında asit ilk olarak sel¿loz ve lignin ile reaksiyona girmektedir. Emdirme aıamasında fosforik asitin y¿ksek polaritesi sebebiyle, -º zeltinin b¿y¿k bº l¿m¿nde ve alt katman ile meydana gelen fiziksel ve kimyasal etkileıimlerin kontrol edilmesi º nem tıkamaktadır. Karbonizasyon aıamasında aktif karbonun y¿zeyinde oluıan gº zenek ve boılukların fosforik asitin buharlaımasız sebebiyle oluıtuğu belirlenmiıtir. Fosforik asit, aktif karbonda mikro ve mezo gº zeneklerin geliımesine yardımcı olmaktadır. Bunlara ek olarak, fosforik asit kimyasal ajanı kullanılarak lignosel¿lozik atıklardan ¿retilen aktif karbonun -ok gº zenekli olduğu belirtilmiıtir. Asidik gruplar, fosforik asit ile aktif karbon º nc¿s¿ arasındaki reaksiyonun t¿revidir. Fosforik asit ile aktivasyon, karbon yapısındaki fosfor elementi ile bileıimine yol

a-maktadır. En yaygın kullanılan kimyasal ajanlardan biridir ve hammaddelerden yüksek gözenekli aktif karbon üretilmektedir (Heidarinejad vd., 2020).

Fosforik asit (H_3PO_4) yaygın kullanılan kimyasal ajanlardan biri olarak, karbonlu malzemenin -apraz bağlı yapısının oluşumuna katkı sağladığı bilinmektedir. Fosforik asit aktivasyon mekanizmasında adımda gerekmektedir:

1. Organik maddenin daha düşük molar kütleye sahip yarı-mamul ürünlere ayrışmasıve aktivasyonun ilk aşamasında gazlı,u-ucu maddelerin salınır,
2. Fosforik asit bozulmaya bırakır ve katran, char oluşur,
3. P_2O_5 (u-ucu fosfor bileşiği) ile char reaksiyonu gözeneklerin genişlemesine neden olur (Ziňzio vd., 2020).

Çinko Klorür ($ZnCl_2$) kullanımı : Aktifleştirici maddelerin kullanımı aktif karbonun yüzey özelliklerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Çinko klorür ($ZnCl_2$) kimyasal aktivasyonda aktivasyon ajanı olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun sebebi, aktif karbona yüksek yüzey alanı ve yüksek verim kazandırmasıolduğu bilinmektedir (Nicholas vd., 2019).

Çinko klorür, aktivasyon esnasında emdirme işlemi yapılan hammaddeler için nemlendirme ajanı görevi görmektedir. Çinko klorür ile aktivasyon işlemi sırasında aktif karbon yüzeyinden u-ucu maddelerin salınımı gerçekleşmektedir. Çinko klorür aktive edici ajanı kullanılırken, kütle oranının arttırılması ile birlikte u-ucu maddelerin daha kolay salınımına sebep olmaktadır (Heidarinejad vd., 2020). Çinko klorür ile aktivasyonda, selülozun molekülleri yapısındaki yan bağların kırılmasıyla boşluklar oluşmaktadır. Bu sebeple aktif karbonda daha yüksek bir yüzey alanı elde edilmektedir (Saka, 2012). Ayrıca -inko klorürün aktivasyonunda, -inko klorür hidrojen ve oksijen atomlarını karbonun yapısındaki organik oksijen bileşikleri hari- sudan uzaklaştırır ve böylece gözenek oluşumu ile birlikte karbon iriliğinin artışına sebep olmaktadır (Chistyakov ve Tsodikov, 2018).

2.2. Aktif Karbon Kullanım Alanları

Aktif karbonlar, nispeten ucuz ve kullanışlı absorbanların arasında en yaygını olarak bilinmektedir. Aktif karbonun evrensel öneminin nedeni, geniş bir mikro gözenek

yelpazesinde bulunan geniş i- y¿zeyleri olarak kabul edilmiştir. Bir makro gº zenek aşğ molek¿llerin mikro gº zeneklere taşınmasını saş lamaktadır. Gazlardan ve sıvılardan safsızlıkların giderilmesi i-in bir-ok uygulamada, mikro gº zenekli yapılarğ b¿y¿k bir adsorpsiyon kapasitesi saş lamaktadır (Rouquerol vd., 2013).

Toz veya gran¿l formdaki aktif karbonlar, i-me suyunun arıtılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Içme suyundaki saflaştırmayğ saş lamak i-in, pestisitler ve toksinler gibi olduk-a b¿y¿k -º z¿nen molek¿llerin uzaklaştırılmasını saş lamak i-in yeterli gº zenek boyuta sahip aktif karbonun kullanılmasğ olduk-a º nem taşımaktadır. Mikro gº zenekli aktif karbonların gaz fazğ uygulamalarğ arasında, gaz ayırma ve depolama, toksik bileşenlerin egzoz gazlarından uzaklaştırılmasğ ve H_2S ve CS_2 bileşiklerinin geri kazanımğ bulunmaktadır. Aktif karbonun diğer uygulama alanğ olan yiyecek ve i-ecek end¿strilerindeki, şeker renginin giderilmesi, kafein ve klorun giderilmesi yer almaktadır (Rouquerol vd., 2013).

3. ENERJİ DEPOLAMA

Son yıllarda, fosil yakıtların kullanımına bağlı olarak gelişen sebepler arasında enerji kalitesi ve çevre kirliliği sorunları yer almaktadır. Bu sorunlara daha fazla önem verilmektedir (Ding vd., 2021). Dünya nüfusundaki artışa bağlı olarak tüketicilerin alışkanlıklarının çeşitlenmesi son on yılda enerji kullanımı artışının sebebi olmaktadır. Dünya enerji talebinin önümüzdeki 30 yıl içinde iki katından fazla olacağı da tahmin edilmektedir (Guney ve Tepe, 2017). Artan bu enerji ihtiyacı ile birlikte, enerjinin depolanabilmesi ve verimli kullanılabilmesi zorunluluğunu beraberinde getirmektedir. Enerjinin verimli kullanılabilmesi için depolama yöntemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarına katkı sağlayıp, etkili olacağı bildirilmiştir (Turan ve Yönetken, 2016). Enerji depolama yöntemleri ile birlikte ekonomik etkilerini de en aza indirmek için yeni teknolojiler ile ilerlemek gerekmektedir (Jain vd., 2021). Bütün bu sebeplerle birlikte yalnızca, yenilenebilir ve sürdürebilir güneş, rüzgar enerjilerinin yanında çevre dostu ve düşük maliyetli enerji dönüşümleri için enerji depolama cihazlarına da talep olmaktadır (Yan vd., 2014).

Enerji depolama sistemleri, enerjiye doğru şekilde ulaşmak amacıyla kullanılan çeşitli teknolojilere sahip olmaktadır. Enerji depolama sistemlerine olan ihtiya- enerji üretimindeki gelişmeler ile arttığı, bildirilmiştir (Khawaja vd., 2019). Enerjinin varlığı göze alındığında, yeniden dönüştürme ve depolanabilir bir şekle getirmek gerekmektedir. Herhangi bir sistemin daha verimli olmasını sağlamak için, bu sistemlerin yavaşladığı ve durduğu durumlarda kinetik enerjinin bir yerde depolanması gereklidir. Depolanması gereken bu enerji, güneş panelleri, süper kapasitörler, yakıt hücreleri gibi bir enerji cihazında depolanmaktadır (Afif vd., 2019).

Enerjiyi daha iyi depolamadaki ilerlemeler için, yeni malzemeler bulmak ve bu yeni malzemelerin işleyiş biçimini anlamak en önemli adımlardan biri olmaktadır. Enerji farklı yöntemler (kimyasal, elektrokimyasal, elektrik ve termal sistemler gibi) ile depolanabilmektedir (Guney ve Tepe, 2017). Her enerji depolama sistemi farklı özelliklere sahiptir. Pompalı hidro depolama sistemi, yüksek bir su kütlesi ile ilgili olarak potansiyel enerjiyi depolamaktadır. Volanlar elektrik gücü ile motorlarını mekanik enerjiye

dº n¿ kt¿ rmek i- in kullanmaktadē r. Termal enerjiyi depolayan sistemlerde elektriî i dº n¿ kt¿ rmek i- in enerjiyi sē vē dakt ē rē dmē k hava kē klinde depolayabilen deneysel sistemleri de bulunmaktadē r (Breeze, 2018).

Enerji depolama sistemlerinde, en uygun cihazē se- mek i- in bazē parametrelerin incelenmesi gerekmektedir. Bu parametreler ku kē kilde sē ralanabilir; verimlilik, dayanē klē lē k, enerji ve g¿ - yoî unluî u, g¿ venilirlik, maliyetleri, deê arj s¿ resi, g¿ - aktarē m hē zē (Ferreira vd., 2013; Ibrahim vd., 2008). Aê aî ē da bu parametrelerden kē saca bahsedilmiê tir.

- **Verimlilik :** Enerjiyi depolayan cihazlarē n bazē kayē plar verdiî i bilinmektedir. Enerji depolama kē kline baî lē olarak deî iê en bu cihazlarē n bazē larē nda enerjiyi tutmasē beklenirken, bazē larē nda da enerji zamanla kaybedilmektedir. Bu iki durumda da verimlilik kaybē olduî u kabul edilmektedir. Verimlilik, depolanan enerji ile a- ē ja - ē kan enerjinin arasē ndaki oran olarak belirtilmiê tir.
- **Dayanē klē lē k :** Dayanē klē lē k veya kalan º m¿ r, enerji depolama teknolojileri i- in º nemli olmakla birlikte, dº ng¿ sayē sē na, geri dº n¿ ê¿ m¿ olmayan deê arj seviyesine baî lē olmaktadē r. Maksimum dº ng¿ sayē sē olarak ifade edilmektedir.
- **G¿ venilirlik :** Enerji depolama sistemlerinde kullanē lan cihazlarē n, belirli koê ullardaki ve belirlenen s¿ resi boyunca hedeflenen iê levini yerine getirmesi olasē lē ē olarak tanē mlanmaktadē r.
- **Maliyetler :** S¿ rd¿ rebilinir kalkē nmanē n devamlē lē ē a- ē sē ndan, enerji ve - evresel maliyetleri de kapsayarak, ¿ retimden geri dº n¿ ê¿ me kadar malzemelerin toplam maliyetleri dikkate alē nmasē gerekmektedir.
- **Deê arj s¿ resi :** Sistemin - alē ê ma koê ullarē na, deê arj yoî unluî una ve sabit bir g¿ ce baî lē lē ē ē na baî lē olup, sistemin yeterli olup olmamasē nē n bir º zelliî i olarak tanē mlanmaktadē r.

- **G¿- aktarām hēzē :** G¿- aktarām hēzē, enerji depolamada enerjinin istek ¿zerine hēzlē bir ĸekilde serbest bērakēlmasē gereken yavaĸ bir s¿reci ifade etmektedir. G¿- aktarām hēzēda bu arada ge-en s¿reyi belirlemektedir.
- **Enerji ve g¿- yoĵunluĵu :** Enerji depolama i-in kullanēlan teknolojinin, enerji/g¿- oranēnē deĵerlendirmek ve belirlenen -ºz¿m¿n boyutunu belirlemek ºnem taĸēmaktadēr (Ferreira vd., 2013; Ibrahim vd., 2008).

3.1. Elektriksel Enerji Depolama

Elektrik enerjisinin depolanmasē enerjinin baĸka bir bi-imine dºn¿ĸt¿r¿lmesine dayanmaktadēr. Fakat elektrik enerjisini baĸka bir enerji bi-imine dºn¿ĸt¿r¿lmez ise kullanēmē zorlaĸmaktadēr. Elektrik enerjisi, elektrostatik ya da manyetik/akēm enerjisi ĸeklinde depolanabilmektedir. Kapasitºrler ve s¿perkapasitºrler elektrostatik enerji depolama sistemi olarak bilinmektedir. Kimyasal ve elektrik enerjisinin dºn¿ĸ¿m¿ elektrokimyasal enerjiyi oluĸturmaktadēr (Khawaja vd., 2019).

Elektriksel enerji depolama sistemleri, kapasitºrler, ultra kapasitºrler ve s¿per iletken manyetik enerji depolama olarak sēnēflandērēlmaktadēr. Bu sistemler aĸaĵēda a-ēklanmēĸtēr.

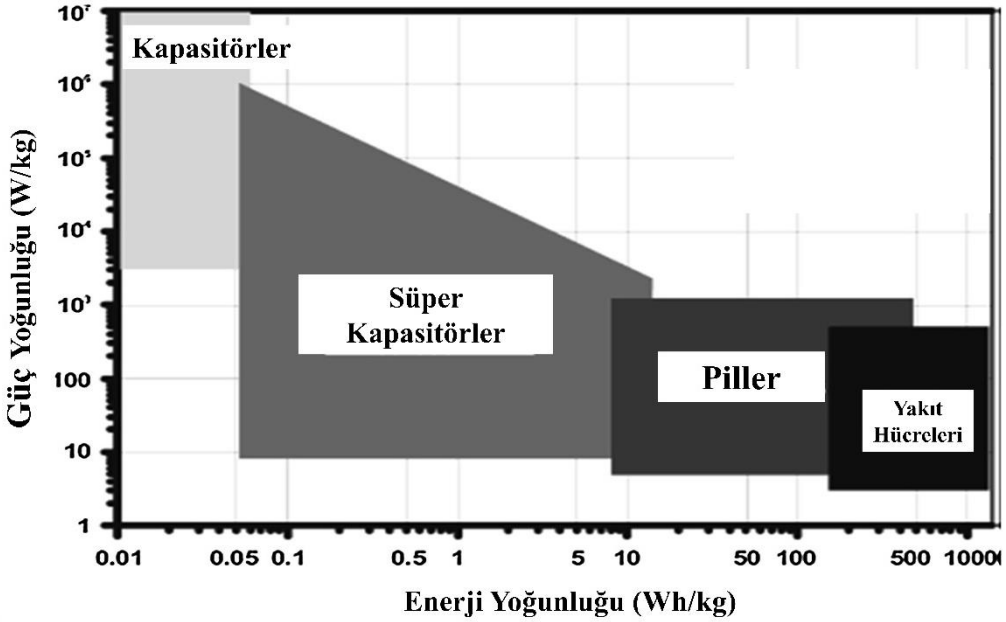
- **S¿per iletken manyetik enerji depolama (SMES)** : SMES elektrik enerjisini, s¿per iletken bir malzemeden ve bobinden ge-en doĵru akēm olarak depolamaktadēr. S¿per iletken bobin ĸarj edildikten sonra akēmdan kayēp olmaz ve sonsuz dºng¿ ile devam edilmekte ve enerji depolanmaktadēr (Rahman vd., 2012). SMES sisteminin avantajē, -ok fazla sayēdaki ĸarj-deĸarj dºng¿s¿ ile %95 yakēn olan verimliliĵidir. Bu sistemlerin dezavantajē ise y¿ksek maliyetli olmasēdēr (Ibrahim vd., 2008).
- **S¿perkapasitºr / Ultrakapasitºr :** S¿perkapasitºrler (SC), elektrikli -ift katmanlē kapasitºrler, elektrokimyasal -ift katmanlē kapasitºrler (EDLC) ya da ultrakapasitºrler olarak bilinmektedir (Amrouche vd., 2016). Kapasitºrler, elektrik enerjisini doĵrudan depolayan sistemler olarak bilinmektedir. Herhangi bir

kapasitör dielektrik olarak adlandırılan ve iletken olmayan bir tabaka ile ayrılmış iki metal plakadan oluşmaktadırlar. Plakalardan biri doğru akım kaynağından elektrik ile yüklendiğinde, diğer plaka üzerinde zıt yüklü elektrik akımı oluşacaktır. Bu şekilde bir metal elektrot yüzeyinde enerjiyi depolayabilmektedirler. Bu kapasitörler düşük enerji yoğunluğuna sahip olduklarından, kısa bir süre için yüksek akımlarını iletebilmektedirler (Guney ve Tepe, 2017). Süperkapasitörler, klasik kapasitörlere göre enerji daha fazla depolamaktadırlar. EDLC'ler, klasik kapasitörlere göre defalarca şarj-deşarj yeteneklerinden dolayı daha çok tercih edilmektedir (Khawaja vd., 2019).

- **Lityum iyon (Li-on) pilleri :** Lityum iyon pillerinin çalışma prensibi, şarj esnasında lityum iyonlarının pozitif elektrottan negatif elektrota aktarılmasıdır ve deşarj esnasında da bu aktarımın tam tersi şekilde aktarılmasına dayanmaktadır. Pozitif elektrot, lityum metal oksitlerin herhangi birinden, negatif elektrot ise bir karbon elektrottan oluşmaktadır. Elektrolit, lityum tuzlarından oluşmaktadır. Lityum iyon pilleri, taşınabilir cihazlar, elektrikli araçlarda kullanılmaktadır (Amrouche vd., 2016). Küçük ev aletlerinde de çok fazla kullanılan lityum iyon pilleri, çok iyi bir enerji yoğunluğuna ve yüksek verimliliğe sahip olmaktadırlar (Ferreira vd., 2013).

- **Yakıt hücreleri :** Bir yakıtın (genellikle hidrojen) kimyasal enerjisini elektriğe dönüştürerek elektrik üretmektedir. Yakıt hücrelerinde, yakıt varlığı sürekli olduğu sürece enerji üretmektedir. Genellikle şarj edilemezler fakat akış pilleri olarak adlandırılan hücreler şarj edilecek şekilde yapılmıştır. Bu piller enerjiyi serbest bırakmak için, iki elektrolit arasındaki elektrokimyasal reaksiyonu tersine çevirerek elektrik enerjini depolayıp, serbest bırakmaktadır (Khawaja vd., 2019).

Enerji depolanan sistemlerde kullanılan cihazlar için, enerji-güç yoğunluğu arasındaki ilişkiyi Ragone grafiği ile tanımlanmaktadır (Raza vd., 2018). David Ragone, pillerin, elektrokimyasal kapasitörlerin ve diğer cihazların enerji-güç yoğunluklarında performans özelliklerini ve uygulama gereksinimlerinin gösterilmesini yararlı bulmuştur. Enerji depolama için kullanılan her cihazın bir başka yararlı özelliğinin verimlilik-güç ilişkisi olduğunu belirtmiştir (Christen, 2020).



Şekil 3.1. Farklı elektriksel enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılmalı Ragone grafiği (Poonam vd., 2019).

Şekil 3.1'deki Ragone grafiğine bakıldığında, yakıt hücrelerinin yüksek enerjili sistemler olduğunu, süperkapasitörlerin ise yüksek güce sahip sistemler olduğunu göstermektedir. Pillerde ise enerji-güç yoğunluğu arasında bir uyum var olduğu görülmektedir (Poonam vd., 2019). Ragone grafiği enerji depolamada kullanılan cihazların performanslarını karşılaştırma kullanmasına rağmen maliyet tahmini ve çevrim ömrü gibi faktörleri içermemektedir.

Süperkapasitörler, saniyeler içerisindeki hızlı şarj-deşarj ve $<10^6$ döngü sayılarıyle piller ve yakıt pillerine kıyasla daha fazla üstünlük göstermektedir (Jie Wang vd., 2017). Süperkapasitörler için deşarj hızı çok yüksekken, pillerde ise şarj hızı kinetik olarak sınırlı olmaktadır. Çizelge 3.1'de elektriksel enerji depolama sistemlerinde kullanılan kapasitör, süperkapasitör ve pillerin özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu çizelgeye bakıldığında, süperkapasitörlerin dönüşel kararlılığı 1 milyon saat ile 30000 saat arasında değişirken, pillerde bu zaman 500 saat olarak göstermekte ve süperkapasitörlere kıyasla çok düşük bir değere sahip olmaktadır (Raza vd., 2018).

¢izelge 3.2. Elektriksel enerji depolama sistemlerinin (Kapasitº r ve piller) º zelliklerinin karкdaкtёrёdmasё (Pandolfo ve Hollenkamp, 2006).

¥ zellik	Kapasitº r	S¿perkapasitº r	Pil
Spesifik Enerji (Wh kg^{-1})	<0.1	1-10	10-100
Spesifik G¿- (W kg^{-1})	>> 10000	500-10000	< 1000
Deкarj S¿resi	10^{-6} ï 10^{-3} (s)	s-dk	0.3-3 sa
ķarj S¿resi	10^{-6} ï 10^{-3} (s)	s-dk	1-5 sa
ķarj-deкaj Verimliliî i (%)	~100	85-98	70-85
Dº ng¿ Sayёsё	Sonsuz	> 500000	~ 1000
Y¿k Depolama Etkenleri	Elektrot alanёve dielektrik	Elektrotun mikro yapёsёve dielektrik	Aktif k¿tle ve termodinamik

4. SÜPERKAPASİTÖRLER

Araştırmacılar enerji depolamanın daha çok geliştirilmesi gerektiğine odaklanmaktadır. Geliştirilen enerji depolama sistemlerinde kullanılan cihazlar arasında pilin görüşü kadar süperkapasitörler de ilgi görmektedir. Ultrakapasitör ve elektrokimyasal kapasitör olarak da adlandırılan süperkapasitörler, yüksek yüzey alanlı elektrot malzemeleri kullanılarak, yüksek kapasitans değerleri elde etmek için kullanılmaktadır. Piller ve süperkapasitörler çalışma prensibi olarak benzer özellikler göstermektedir. İki sistemde de elektriksel olarak enerjiyi depolamaktadır (Afif vd., 2019).

Enerji depolama cihazlarının iyi bir performans göstermesi için bazı özelliklerinin göz önüne alınarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu parametrelerden bir tanesi de çalışma sıcaklık aralığı olarak bilinmektedir. Süperkapasitörler için çalışma sıcaklığı, kullanılan malzemeler ve elektrolit ile ayarlanarak, -40 ^{0}C ile 100 ^{0}C sıcaklık aralığında olmaktadır. Piller için bu sıcaklık aralıkları -20 ^{0}C ile 60 ^{0}C arasında değişmektedir (Raza vd., 2018).

Süperkapasitörlerin, piller ve kapasitörler ile bazı benzerlik ve aynı zamanda bazı farklılıkları olmasına rağmen bu cihazlar arasındaki boşluğu doldurduğu bilinmektedir. Süperkapasitörlerde klasik kapasitörlerdeki gibi dielektrik malzemeler yerine elektrolit kullanılmaktadır. Kapasitörlerde elde edilen kapasitans değeri mF aralığında olurken, süperkapasitörlerde F aralığında olduğu bulunmuştur. Süperkapasitörler, ayırıcılar, elektrolit ve iki elektrottan oluşmaktadır (De vd., 2020).

Süperkapasitörlerin sahip olduğu elektrolit, ayırıcı ve elektrotlar arasında en önemli bileşeni elektrotlar olmaktadır. Aynı zamanda bu bileşenlerin elektron taşınmasını ve iyon difüzyonunu kolaylaştırmak için gelişmiş malzemelerin seçilmesi önem taşımaktadır (Raza vd., 2018). Elektrot malzemeleri olarak karbonlu malzemeler sıklıkla kullanılmakta ve bu malzemeler süperkapasitörlerin performansını ciddi bir şekilde etkilemektedir. Karbonlu malzemeler genel olarak biyokütlelerden üretilmekte olup, biyokütlelerin gelişmiş karbon kaynağı olmasını, rahat bulunabilirliği, çevre dostu ve düşük maliyetli olmasını özelliklerinden dolayı kullanımı ilgi çekmektedir (De vd., 2020).

S¿perkapasitº rlerin genel olarak enerji depolama mekanizmasē, elektrolitin y¿kl¿ iyonlarē elektrotlarēn y¿zey alanlarēna daĵ ētēlmasē ile (Saikia vd., 2020) ve faradaik olarak elektrot y¿zeyindeki y¿kleri sº zde kapasite olarak enerjiyi depolamaktē (Zhang ve Pan, 2015).

4.1. Elektrik ¢ ift Tabaka Kapasitº rler (EDLC)

¢ ift tabaka kapasitº rler en yaygēn kullanēlan elektrik kapasitº rler (EC) olarak bilinmektedir. EDLCôlerde depolanan y¿k (kapasitans), elektrot/elektrolit aray¿z¿nde katman oluĸturarak biriken elektrostatik y¿klerden meydana gelmektedir. Bu kapasitº rlerin elektrot malzemeleri olarak karbonlu malzemeler, d¿ĸ¿k maliyetli olmasē ve eriĸebilirlikleri sebebiyle yaygēn olarak kullanēlmaktadē r. Karbonlu malzemelere alternatif olarak -ift tabaka kapasitº rlerin elektrot malzemeleri i-in -eĸitli karbonlar (CNT, grafen gibi) kullanēmlarē geliĸtirilmiĸtir.

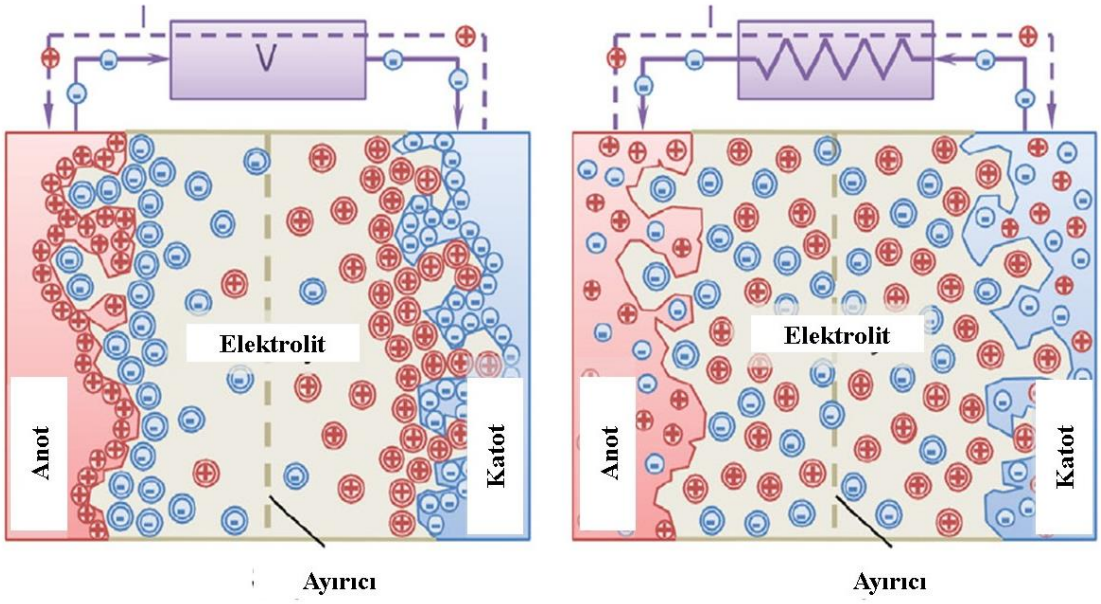
Elektrot y¿zeyinde y¿k katmanē oluĸturmak i-in, elektrotlarēn bir elektrottan diĵ erinin y¿zeyine ve tam tersi olacak ĸekilde y¿k birikimi olmasē, enerji depolamada y¿ksek bir kapasite oluĸturmak i-in gerekli olmaktadē r. EDLCôlerin bazē º zellikleri kapasitif davranēĸlarēna etki etmektedir. Bunlardan bazēlarē aĸaĵ ēda verilmiĸtir.

- Elektrot y¿zeyinde y¿k birikimi ile katman oluĸturmak i-in, º nemli bir spesifik y¿zey alanēna sahip olmasē gerekmektedir.
- Se-ilen elektrot malzemesinin, elektrolit iyonlarēnēn boyutlarē ile uygun olacak ĸekilde dengeli gº zenek daĵ ēlēmēna sahip malzemelerin tercih edilmesi gerekmektedir.
- Elektrot malzemesinin elektrolit ile ēslanabilirliĵ i kapasitif davranēĸē i-in º nem taĸēmaktadē r (Zhang vd., 2011).

EDLCôler faradaik olmayan s¿re-ler i-ermesi sebebiyle, kimyasal reaksiyonlar i-ermemektedir. Depolama mekanizmalarēnēn -ok hēzlē enerjiyi almasē ve daĵ ētmasē iyi bir performans saĵ lamaktadē r. EDLCôler pillere kēyasla, daha fazla dº ng¿ye sahip olmakta ve y¿k depolama mekanizmasē elektrolit -º z¿c¿s¿n¿ i-ermemektedir. Pillerde ise bu durum, y¿ksek potansiyele sahip anotlar ve katotlar kullanēldē ĵ ēnda katē elektrolit ara faza katkēda bulunmaktadē r (Iro vd., 2016). Aynē zamanda, pillerin aksine EDLCôlerin enerji depolama

mekanizmalarē iyonlarēn elektrot y¿zeylerine hareketini i-erdiĵinden hēzlē ger-ekleĸmektedir. Pillerde, kimyasal faz deĵiĸikliĵi gibi adēmlar bulunduĵundan, enerji depolama s¿reci daha yavaĸ ilerlemektedir (Pandolfo ve Hollenkamp, 2006).

ķekil 4.1óde y¿klerin, elektrot (iletken karbon veya metal oksit katē partik¿leri) /elektrolit aray¿z¿nde depolandēğē (ĸarj) ve ayrēldēğē (deĸarj) gº sterilmektedir.



ķekil 4.1. EDLCólerin ĸarj ve deĸarj olmuĸ durumlarēnē gº steren ĸematik diyagramlarē (Scibioh ve Viswanathan, 2020).

Elektrik -ift tabakanēn temeli, herhangi bir y¿kl¿ par-acēk veya madde sēvēnēn i-ine yerleĸtiĵinde ortaya -ēkan bir yapē olarak bilinmektedir. Dengeleyici iyonlar sēvē¿zerinde oluĸacaktēr. Bu sayede deriĸimleri y¿zeye daha yakēn olacaktēr. Bº yle bir yapēnēn, sēvē ve katē arasēndaki aray¿z¿ i-in bir-ok farklē modelin varlēğē bilinmektedir. Helmholtz modeli y¿k daĵēlēmē modellemek i-in kullanēlan en yaygēn model olarak bilinmektedir. Model, atomik bir mesafede elektrot/elektrolit aray¿z¿nde iki zēt tabakanēn oluĸtuĵunu belirtmektedir (Dubey ve Guruviah, 2019). Bu model Gouy-Chapman ve Stern tarafēndan revize edilmiĸtir. Elektrot y¿zeyine yakēn iyonlarēn birikmesi sebebiyle elektrolitte daĵēnēk bir tabakanēn varlēğēnēº ne s¿rm¿ĸlerdir (Simon ve Gogotsi, 2010).

EDLCólerin aktif karbon ya da grafen oksit gibi elektrot malzemelerinin y¿zeyi yapēsal ve kimyasal olarak d¿zensizlikler bulunmaktadēr. Bu elektrot y¿zeylerinin tek bir bi-imli olmamasē y¿zeye adsorbe olacak y¿klerin d¿zg¿n daĵēlēmēna izin vermemektedir.

Bu elektrot yüzeylerinin düzgün dağılımı, yüzeydeki bozulmayı önlemede ve süperkapasitörlerin yük biriktirme süreci için önemli bir role sahip olmaktadır. EDLC'lerde çift katman oluşumu aynı zamanda yüzey reaksiyon süre-lerinin eşit zamanda ger-çekleşebildiğinden, ayırt edilmesi zor faradaik reaksiyonları tetikleyebilmektedir (Ratha ve Samantara, 2018).

4.2. Psödokapasitörler (PC)

Psödokapasitörler, 1971 yılına kadar elektrot/elektrolit arayüzeyindeki yük aktarımı yolu ile yük depolamasına çekli ile keşfedilmiştir. Faradaik süre-lerden kaynaklı olarak EDLC'lere göre yüksek spesifik kapasitans ve enerji yoğunluğuna sahip olmaktadır. Faradaik süre-ler, düşük potansiyel biriktirme, redoks sözde kapasitans, arakatman sözde kapasitans mekanizmalarından kaynaklanmaktadır. Metal iyonları, redoks potansiyellerinin üstünde farklı bir metalin yüzeyinde adsorbe edilmiş tek bir katman oluştuğunda düşük potansiyel birikimi meydana gelmektedir. Redoks reaksiyonu ise, iyonların yüzey üzerinde veya yakınında elektrokimyasal adsorpsiyonu ve redoks aktif bölgelerinde art arda elektron transferi ger-çekleşen yüzey yük depolama işlemi olarak bilinmektedir. Sözde kapasitif malzemeleri, metal oksitler, metal sülfürler, metal hidroksitler, metal nitrürler ve iletken polimeler olarak bilinen örneklerdir. Arakatman sözde kapasitans, katmandaki elektroaktif türlerin interkalasyonuna (arakatman) dayandığı bilinmektedir. Psödokapasitörlerin modellenmesinde redoks ve arakatman sözde kapasitansları sık kullanılmaktadır. Bu faradaik reaksiyonlar hızlı bir şarj-deşarj performansı göstermektedir. Psödokapasitörlerin kinetik davranışlarını daha iyi anlamak için kapasitif ve difüzyon katkılarını ayırt etmek önemli bir aşama olduğu düşünülmektedir (Wang vd., 2017).

Psödokapasitörler, elektron yük transferini adsorbe edilmiş ve çözünmüş iyondan gelen elektrolit ve elektrot arasında ger-çekleştirmektedir. Adsorplanmış iyonlar, elektrot malzemesinin atomları ile reaksiyona girmemektedir. Elektrot gözeneklerinin boyutu, yapısı ve elektrot yüzeyine adsorplanmış iyonların kimyasal afinitesi, elektrot malzemelerinin psödokapasitans etkisini elde etme kapasitesine bağlı olmaktadır (Poonam vd., 2019). Yüzeydeki veya elektrot malzemesinin yapısının kendi aralıklarındaki etkileşimleri, uygulanan potansiyel üzerinde geliştirilmiş yük genişlemesini belirlemektedir. Psödokapasitörlerde kullanılan elektrot malzemelerinin EDLC'ye göre,

ıarj sırasında oluıan elektron transfer reaksiyonlarē sebebiyle kapasitansē 10 ile 100 kat artırarak fark saŷlamaktadır (Yu vd., 2011). Psº dokapasitº rlerdeki kimyasal iılem, redoks reaksiyonlarē aracılığē ile yı¿k transferini i-ermektedir. Yı¿k depolamak i-in hareket eden bir-ok iılem sebebiyle, sº zde kapasitº rlerdeki kapasitans deŷerlerinin yı¿ksek olduŷu bildirilmiıtir (Afif vd., 2019).

Psº dokapasitº rlerde elektrot malzemesi olarak kullanılan ge-iı metal oksitlerinin zayıf iletkenlikleri ve negatif elektrot olarak -º zı¿nme (elektroaktiviteleri) sebebiyle sınırlē olmaktadır. Bazē malzemelerin (RuO_2 gibi) -ok iyi performans gº stermesine karıın, yı¿ksek maliyetli ve toksisitesi sebebiyle kullanımın uygun olmamasē bildirilmiıtir. Bu dezavatajlarla birlikte, psº dokapasitº rler i-in karbonlu malzemeler ile bı¿tı¿nleıtirilmesi gerekmektedir (Yu vd., 2011).

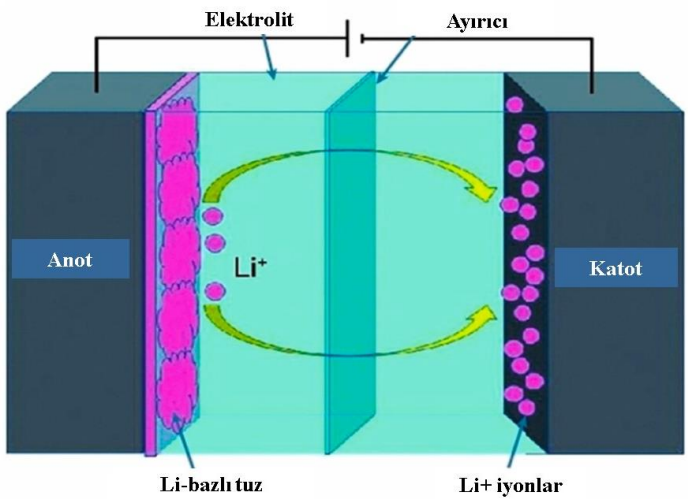
4.3. Hibrit Sı¿perkapasitº rler

Hibrit sı¿per kapasitº r, enerji yoŷunluŷunu arttırmak amacē ile ortaya -ıkmııtır. Kapasitº rlerin meydana gelmesi, grafen veya grafit, metal oksitler, aktif karbonlar ve iletken polimerler gibi redoks (faradaik) malzemelerinin ve EDLCÂ'lerin (faradaik olmayan) birleıtirilmesi olarak bilinmektedir. Bu sistemlerin birleıtirilmesi, -ok daha yı¿ksek kapasitans saŷlamaktadır (Muzaffar vd., 2019).

Hibrit kapasitº rler, enerji depolama yeteneŷini geliıtirmek amacıyla EDLCÂ'lerden ya da psº dokapasitº rlerden -eıitli elektrotlarē pil elektrotlarē ile birleıtirerek yapılan kapasitº rler olarak bilinmektedir. Hibrit sistem en yaygın olarak, pozitif elektrot aktif karbonlar veya geliıtirilmiı grafit malzemeleri, negatif elektrot olarak $Li_4Ti_5O_{12}$ nanokristalleri kullanılarak ı¿retilen Li-iyon kapasitº rlerdir. Yı¿k depolama mekanizmasē, Li+ interkalasyonu ile ger-ekleıtirilmektedir (Zhang ve Pan, 2015).

Psº dokapasitº r elektrotlarē, hibrit kapasitº rlerin kapasitif performansınē arttırmak ile birlikte, -alıkma potansiyelini de arttırarak redoks reaksiyonlarē ile yı¿kı¿ depolamaktadır. Hibrit kapasitº rlerin enerji yoŷunluŷu EDLCÂ'lere gº re daha yı¿ksek sahip olabileceŷi bildirilmiıtir. Aynē zamanda hibrit kapasitº rlerin tasarımında metal oksitler veya iletken polimer malzemeler de kullanılmaktadır (Zhang vd., 2009). Hibrit kapasitº rler

¿- gruba ayrılmaktadır; asimetrik, pil tipi ve kompozit hibrit (Afif vd., 2019). Şekil 4.2'de Li ve karbon elektrottan oluşan hibrit kapasitör¿n şekli verilmiştir.



Şekil 4.2. Hibrit kapasitör genel gör¿n¿m¿ (Muzaffar vd., 2019).

4.4. S¿perkapasitör Performansına Baş lı Olan Faktörler

Bazı terimler s¿perkapasitörlerin performansını yönetmekte ve etkilemektedir. Bu faktörler aşağıda detaylandırılmıştır.

Genel olarak elektrokimyasal kapasitörlerin performans özellikleri aşağıda maddeler halinde yazılmıştır (Scibioh ve Viswanathan, 2020).

- Enerji yoğunluğu (Whkg^{-1} veya Wkg^{-1})
- H¿crenin potansiyeli (V) ve kapasitansı (F)
- G¿- yoğunluğu (%95 verimliliğinde şarj-deşarj i-in) (Wkg^{-1})
- Farklı potansiyel aralığında kendi kendine deşarj
- Eşdeğer seri diren- (ı)

Yan vd.nin yaptığı -alışmada da bu maddelere ek olarak, s¿perkapasitör performansını etkileyecek faktörler i-in, iyi bir -evrim ömr¿ olması, saniyeler i-in hızlı bir şekilde şarj ve deşarj olması, g¿venli bir -alışma ve d¿ş¿k maliyet gibi özelliklerin -ok önemli olduğu belirtmişlerdir (Yan vd., 2014). Aynı zamanda Pandolfo vd.nin yaptığı bir başka -alışmada, elektrot malzemesinin spesifik y¿zey alanı ve gözenek boyutu dağılımı,

elektrolitin ºzellikleri, elektrot malzemelerinin morfolojisi ve elektriksel iletkenliÎinin de s¿per kapasitºrlerin deÎerlendirilmesinde etkili olacak parametreler olarak bildirmiıtlerdir (Pandolfo ve Hollenkamp, 2006).

4.4.1. ķarj-deıarj hēzē ve -evrim ºmr¿

S¿perkapasitºrlerin kararlē olmasē -evrim ºmr¿ gibi faktºrlere baÎlē olmaktadēr. Bu kapasitºrlerin bileıenleri elektrokimyasal olarak inert olmasē sebebiyle, sonsuz s¿rede bozulmadan -alēımasē beklenmektedir. S¿perkapasitºrlerin, elektrolit ve elektrot malzemeleri arasēnda y¿k transferinin olmamasē sebebiyle Faradaik olmayan durumlarla ilgili yapēsal ya da kimyasal bir deÎiıiklik bulunmamaktadēr. S¿perkapasitºr¿n bozulmasē/yaılanmasēnēn sebebi, sēvē elektrolitin zamanla sēcaklēk ve -alēıma potansiyeline baÎlē olarak buharlaıma hēzēna gºre deÎiıtiÎi d¿ı¿n¿lmektedir.

S¿perkapasitºrlerin geniı bir zaman aralēğēnda enerji depolamasēnē belirlemek i-in, kendiliÎinden ger-ekleıen deıarj hēzēnē belirlemek gerekmektedir. Bir s¿perkapasitºr belirli bir potansiyelde ıarj edildikten sonra, potansiyel yavaı bir ıekilde d¿ımeye baılamakta ve bu d¿ı¿ıe kendi kendine deıarj denilmektedir. Deıarjdaki d¿ı¿ı, uzun s¿re sabit enerji yoÎunluÎuna da sēnērlamalar getireceÎi bildirilmiıtir. Deıarj sērasēnda bu potansiyel d¿ı¿ı¿n sebebi, elektrolitin ayrēımasē, safsēzlēktan kaynaklanabileceÎi d¿ı¿n¿lmektedir. Araıtērmacēlar da elektrokimyasal s¿per kapasitºrlerin enerji ve g¿-yoÎunluÎunu geliıtirmek ve iyileıtirmek i-in -alēımalar yapmaktadērlar (Saikia vd., 2020).

4.4.2. Kapasitans

Bir kapasitºr¿n kapasitansē, kapasitansēn depolanan y¿k¿n her iki elektotuna uygulanan potansiyele oranē ile elde edilmektedir (Saikia vd., 2020). Eıitlik (4.1)ôde bu oran gºsterilmektedir.

$$C = \frac{Q}{V} \qquad (4.1)$$

Burada, kapasitºr¿n kapasitansē C, depolanan y¿k miktarē Q, uygulanan potansiyel ise Vôdir.

¢ift tabaka kapasitº rlerde ise kapasitans her iki elektrotta oluxmaktadā r. Her bir elektrottaki kapasitans sā rasā yla C_{DL1} ve C_{DL2} olarak adlandā rā lmaktadā r. Bu kapasitº rler seri olarak alā nmakta ve exitliî i axaî ā daki gibi yazā lmaktadā r.

$$C_T = \frac{C_{DL1} * C_{DL2}}{C_{DL1} + C_{DL2}} \quad (4.2)$$

4.4.3. Exdeî er seri diren- (ESR)

Exdeî er seri diren- (ESR), kapasitº r ve elektrot malzemesi -exitlerinden ayrā olarak kapasitº rde her zaman var olmaktadā r. Elektrot y¿zeyinin, elektrolit ortamā nā n ve akā m toplayā cā nā n diren-leri exdeî er seri dirence katkā da bulunmaktadā r. S¿perkapasitº rlerde, sisteme uygulanan potansiyel arttā rā ldeî ā nda, dif¿zyon katmanā nā n inceleceî i beklenmekte ve ESR deî erini d¿xererek kapasitans deî erinin y¿ksek deî eri ile sonu-lanacaî ā d¿x¿n¿lmektedir.

S¿perkapasitº rlere mekanik olarak basā n- uygulandeî ā nda da dif¿zyon katmanā ve ESR deî erinin d¿xeceî i dolayā sā ile kapasitans deî erinin artacaî ā da beklenmektedir (Li vd., 2015). Aynā zamanda elektrolit deriximinin arttā rā lmasā , dif¿zyon katmanā nā n azalmasā ile birlikte kapasitans deî eri ESR deî erinin d¿xmesi ile artmasā na neden olacaî ā d¿x¿n¿lmektedir (Saikia vd., 2020).

4.5. S¿perkapasitº rlerin Elektrokimyasal Analiz Yº ntemleri

S¿perkapasitº rlerin performanslarā nā deî erlendirmek i-in, bazā teknikler kullanā lmaktadā r. Bunlar; dº ng¿sel voltametri (CV), galvanostatik xarj-dexarj (GCD), elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS)îdir. Bu ¿- teknik potansiyel, akā m ve zaman, kapasitans, elektrolit ve y¿k aktarā m diren-leri, -alā xma potansiyel araleî ā nā n belirlenmesi gibi parametreleri º l-mek ve deî erlendirmek i-in kullanā lmaktadā r (Zhang ve Pan, 2015; Zhang ve Zhao, 2012).

4.5.1. Dº ng¿sel voltametri (CV)

Elektrik -ift tabaka kapasitº rler ve psº dokapasitº rlerin y¿k depolama mekanizmalarēnē incelemek ve deĵerlendirmek i-in, ¿- elektrotlu sistemlerde dº ng¿sel voltametri analizi uygun olduĵu kabul edilmektedir. Bir CV eĵrisi gº z º n¿ne alēndeĝēnda, bu eĵrideki kapasitans EDLCôden kaynaklandeĝē d¿ķ¿n¿ld¿ĵ¿nde ve elektrot malzemesi ve elektrolit arasēnda faradaik olmayan bir s¿recin varleĝēnda, eĵri genellikle dikdº rtgen bir ķeklini almaktadēr. Sº zde kapasitans sº z konusu olduĵunda, dikdº rtgen ķekillerinden sapma gº zlenmekte ve redoks tepelerinin varleĝē gº r¿lmektedir (Zhang ve Zhao, 2012).

Dº ng¿sel voltametri, ¿- elektrotlu sistemlerde referans ve -alēķma elektrotlarē i-in ya da iki elektrotlu sistemlerdeki pozitif ve negatif elektrotlarē arasēnda doĵrusal olarak bir elektrik potansiyeli uygulamaktadēr. Saniyede uygulanan bu potansiyele tarama hēzē olarak tanēmlanmakta ve birimi mV/sôdir. Aynē zamanda potansiyelin deĵiķtiĵi aralēk da -alēķma potansiyeli olarak tanēmlanmaktadēr (Zhang ve Pan, 2015).

Dº ng¿sel voltametri grafiĵi, sabit bir tarama hēzē ÑVôden kaynaklanan eķdeĵer bir akēm Ñi ile gº sterilmektedir. ¢alēķdan potansiyel aralēĝēnda -ift katmanēn ilk ķarj ve deķarjē sērasēnda dif¿zyon diren-leri sebebiyle ideal diktº rtgen ķeklinden saptēĝē belirtilmiķtir. Aynē zamanda elektrot malzemelerinin diren-leri sebebiyle sabit bir kapasitans deĵerleri de sergileyemedikleri de bildirilmiķtir (Zhang vd., 2011).

Raza vd. nin yaptēĝē bir -alēķmada, tarama hēzēnēn kapasitansa etkisi tartēķēlmēķtēr. Tarama hēzēndaki artēķ, iyon dif¿zyon s¿re-lerindeki azalma sebebiyle d¿ķ¿k bir kapasitif davranēķ sergileyeceĵi d¿ķ¿n¿lm¿ķt¿r. Sonu- olarak, d¿ķ¿k tarama hēzlarēnda -alēķdeĝēnda, iyon dif¿zyonu, -alēķma elektrotunun i- gº zeneklerine n¿fuz etmek i-in yeterli zamana sahip olacak ve kapasitans deĵerinin artēķēna sebep olacaĵē bildirilmiķtir (Raza vd., 2018).

CV eĵrilerinin sonu-larēndan kapasitansēn belirlenmesinde kullanēlan eķitlik aķaĵēda verilmiķtir (Ratha ve Samantara, 2018).

$$C_T = \frac{\text{CV eğrisinin altında kalan mutlak alan}}{2x\text{Tarama hızıxÇalışma potansiyel aralığı}} \qquad (4.3)$$

$$C_T = \frac{\int I(V)dV}{2xrxV_0} \quad (4.4)$$

C_T = Spesifik kapasitans (F g^{-1})

r = Tarama hızı (mV s^{-1})

V_0 = ¢alışma potansiyel aralığı (V)

4.5.2. Galvanostatik şarj-deşarj (GCD)

Galvanostatik şarj-deşarj yöntemi, sabit bir akımda süperkapasitörlerin kapasitif özelliklerinin değerlendirilmesinde yaygın olan yöntemlerden biri olmaktadır. Aynı zamanda potansiyel aralığın belirlenmesinde de bu yöntem kullanılmaktadır. Sistem dengeye gelene kadar hücreye ya da elektrota sabit bir akım genellikle kabul edilir kendi kendine deşarj akımı uygulanmaktadır. Sisteme uygulanan yüksek akım yoğunluğunun sonucu olarak yüksek bir -alışma potansiyeli oluşturacağından, uygulanacak olan akımın dikkatli se-ilmesi önem taşımaktadır (Zang vd., 2019).

Galvanostatik şarj-deşarj ö l-üm süreci, süperkapasitörlerin sabit akım ile şarj olmasıve belirli bir potansiyel aralığında da deşarj olmasıolarak iki adımdan oluşmaktadır. Bu tekniğin kullanımın en önemli sebeplerinden biri, süperkapasitörlerin stabilitesini kontrol etmek olduğu bildirilmiştir. Uygulanan uzun dönüşler ile birlikte kapasitans değerinin korunmasıbeklenmektedir (Raza vd., 2018).

GCD analizlerinde kapasitans değeri aşağıdaki eşitlikten hesaplanmaktadır (Raza vd., 2018).

$$C_S = \frac{i\Delta V}{m\Delta t} \quad (4.5)$$

Bu eşitlikte,

C_S = Spesifik kapasitans (F g^{-1})

i = Deşarj akımı(A)

m = Elektrottaki aktif madde kütlesi (g)

æV = ¢ alēkma potansiyel aralęē (V)

4.5.3. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS)

S¿perkapasitºrlerin elektrokimyasal s¿re-leri analiz etmek i-in sđklđkla kullanđlan tekniklerden biri olmaktadđr. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi, elektrokimyasal h¿cre hakkđnda kapasitif, diren-li ve dif¿zyonlu davranđklarđn sebebi olarak empedanslarđ ile birlikte bir-ok bilgi vermekte olan bir teknik olduę u bilinmektedir (Zang vd., 2019).

EIS analizinde º l-¿m, 0,01 Hz ile 0,01 MHz genik bir frekans aralęđnda, Ñ5 mV ve Ñ10 mV genlię ine sahip alternatif bir potansiyel uygulanarak ger-ekletirilmektedir. Bu frekans aralęđnđn cevabđ olarak elde edilen grafik, Nyquist eę risi olarak tanđmlanmaktadđr. Nyquist eę risinin x ekseni, ger-ek kđsmđ ifade etmekte ve Z_{real} veya Zô olarak adlandđrđlmaktadđr. Y ekseni ise sanal kđsđmdđr ve Z_{imag} veya Zôô olarak ifade edilmektedir (Zhang ve Zhao, 2012).

Elektrokimyasal empedans spektroskopisinde Nyquist grafię indeki d¿ę¿k frekans bº lgesi, kapasitif davranđkđ temsil eden s¿perkapasitºrler i-in kullanđlan elektrokimyasal analiz teknikleri arasđnda yer almaktadđr. Piller, psedokapasitºrler ve -ift tabaka kapasitºrlerin empedans modelleri frekans aralęđ sebebi ile farklđ davranđklar sergilemesine raę men birbirine benzemektedir. EISôden elde edilen Nyquist grafię inde, y¿ksek frekanslđ bº lgede yarđm daire, orta frekanslđ bº lgede Warburg empedansđ ve d¿ę¿k frekanslđ bº lgede kapasitif davranđk oluęmaktadđr. Nyquist grafię indeki yarđm daire, elektrot/elektrolit aray¿z¿ndeki y¿k aktarđm direncini gº stermektedir (Eftekhari, 2018).

Nyquist grafię indeki yarđm dairenin -apđndan, elektrot/elektrolit aray¿z¿ndeki y¿k aktarđm direnci elde edilmektedir. Y¿ksek frekans bº lgesi, aktif malzemelerin ve elektrolitlerin iletkenlię ini ifade etmektedir. Elektrotlarđn gº zenek yapđlarđ ile baę lantđlđ olan y¿k aktarđm direnci, y¿ksek ile orta frekans bº lgesinden elde edilmektedir. D¿ę¿k frekans bº lgesi de kapasitif davranđkđ gº sterip, Nyquist grafię inde y eksenine paralel bir -izgi olarak gº sterildię i bildirilmiętir (Wang vd., 2012).

4.6. Aktif Karbonların Süperkapasitör Elektrotlarındaki Rolü

Elektrokimyasal süperkapasitörler için aktif karbonlar, sık kullanılan elektrot malzemeleri arasında yer almaktadır. Aktif karbonların, yüksek karbon içeriği, doğada kolay ve fazla bulunması ve fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılmasına yardımcı olması sebebiyle süperkapasitör elektrotların üretimi daha cazip hale gelmiştir (Chand ve Joshi, 2021). Aktif karbonlar, hindistan cevizi, fındık kabuğu, meyve çekirdekleri gibi bitkisel hammaddelerden üretilebilmektedir. Süperkapasitörlerin elektrokimyasal ve kapasitif performansları üzerinde, aktif karbonların yüzey kimyasal özellikleri, gözenekli yapıları önemli bir etkiye sahip olmaktadır. EDLC'ler için belirlenen spesifik kapasitans değeri sulu elektrolitlerde 50-200 F/g aralığında olmaktadır (Volfkovich, 2021).

Yüksek kapasitans değeri veren süperkapasitör elektrot malzemelerinde, aktif karbonların mikro ve mezo gözeneklerinin boyutu önem taşımaktadır. Mikro gözenekler, yükler arasındaki mesafeyi azaltarak yüksek bir kapasitans değeri elde etmek için gerekli olmaktadır. Aynı zamanda mezo gözenekler, yüksek akım yoğunluklarında elektrot yüzeyindeki iyon difüzyonunu hızlandırdığı belirtilmiştir. Kapasite değerinin maksimum seviye çıkarmak için bu iki gözenek arasında bir denge sağlanması da gerekmektedir. Bu bilgilere ek olarak, yüksek bir spesifik yüzey alanına sahip bir aktif karbonun elektrolit çözeltisinin elektrot malzemesi ile ıslanabilirliğini geliştirmek için önem taşımaktadır (Zhang vd., 2011).

Afif vd.nin yaptığı bir çalışmada, mikro gözeneklerin elektrolit ile ıslanabilirliği sağlanmış olsa bile, mikro gözeneklerdeki iyon hareketi yavaş olup kapasitif davranışı sınırlayabileceğini tartışmışlardır. Mikro, mezo ve makro gözeneklerin birbiri ile düzenli olarak dağılması gerekmektedir. Birbirine düzenli bir şekilde bağlı bu gözenekler EDLC elektrot malzemesi olarak daha çok tercih edileceği bildirilmiştir (Afif vd., 2019).

5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Süperkapasitörler için elektrot malzemelerinin seçimi kapasitif davranışlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu sebeple süperkapasitör cihazlarının bir çeşiti olan elektrik çift tabaka kapasitörlerde karbon içerikli malzemelerin yüksek yüzey alana sahip olmasıve gözenekli bir yapıya sahip olmalarısebebi ile kullanımı artmaktadır. Biyokütle atıklarından üretilen aktif karbonlar EDLC'ler için elektrot malzemesi olarak çok sık kullanılmaktadır. Böylece enerjinin depolama sistemleri için, yeni yöntemler geliştirilmiş ve çevre dostu sistemler elde edilmiş olacaktır. Akçağda EDLC'ler için elektrot malzemeleri olarak atık malzemelerden üretilen aktif karbon çalışmalarıözetlenmiştir.

Lu vd. tarafından yapılan bir çalışmada, süperkapasitör elektrot malzemesi için kullanılacak olan aktif karbon pitaya kabuğundan üretilmiştir. Pitaya kabuğunun aktif karbon üretimi aşamasında, 1:2 emdirme oranında KOH ile aktivasyonu sağlanmıştır. Aktivasyon işleminden sonra 800 °C'de karbonizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Pitaya kabuğundan üretilen aktif karbonun yüzey özellikleri için N_2 adsorpsiyon/desorpsiyon izotermleri çizilmiş ve spesifik yüzey alanı 1872 m^2 g^{-1} olarak bulunmuştur. Elektrot malzemesinin karışımında, ağırlık-a %80 aktif karbon, %10 PTFE ve %10 grafit oranlarında hazırlanmış ve akım toplayıcı olarak kullanılan nikel köpük üzerine kaplama yapılmıştır. Elektrokimyasal analizler 6 M KOH elektroliti kullanılarak, üç elektrot sisteminde gerçekleştirilmiştir. Karşıt elektrot Pt ve referans elektrot olarak Hg/HgO elektrotu kullanılmıştır. Elektrokimyasal analizleri dönüşümlü voltametri (CV), galvanostatik şarj-deşarj (GCD) ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) teknikleri kullanılarak yapılmıştır. CV analizinde aktif karbon elektrotları, 10 mV s^{-1} tarama hızında iyi bir dikdörtgen şekil sergilemiştir. GCD eğrileri simetrik üçgen şekli sergilemiş ve 1,00 A g^{-1} akım yoğunluğunda en yüksek spesifik kapasitans değeri 255 F g^{-1} olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda analizi yapılan şarj-deşarj döngü denemelerinde, 5000 şarj-deşarj döngü sonrasıkapasitans değerinin %96,4 oranında koruduğu gözlemlenmiştir. EIS analizinde, Nyquist grafiğindeki yarım dairenin kesişme noktasından elde edilen şarj aktarım direncinin 0,7 Ω olarak bulunmuştur. Çok düşük diren- değerine sahip olması -alışma elektrotunun yüzey alanının elektrolite erişebilirliğini göstermektedir. Bulunan bu değerler süperkapasitör elektrot malzemeleri için pitaya kabuğundan üretilen aktif karbonların kullanılabilirliğini kanıtlamıştır (Lu vd., 2020).

Yang vd.nin yaptığı bir çalışmada, süperkapasitör elektrot malzemeleri için bambu bazlı aktif karbon üretilmiştir. Aktif karbon üretimi iki farklı yöntem kullanılarak yapılmıştır. İlk olarak bambu toz haline getirilmiş ve 700 °C, 800 °C, 900 °C ve 1000 °C sıcaklıklarında argon gazı kullanılarak karbonizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. İkinci adımda, bambu numunelerin yüzey alanını arttırmak amacıyla 1:4 emdirme oranında KOH ile aktivasyon işlemi yapılmıştır. 800 °C ve 900 °C karbonizyon sıcaklıklarında örnekler üretilmiştir. Örneklerin yüzey alanı ve gözenek hacimleri BET analizi ile elde edilmiştir. En yüksek yüzey alanı 900 °C'de KOH ile aktive edilen örnekte 2960 m^2 g^{-1} olarak hesaplanmıştır. Elektrokimyasal analizleri 6 M KOH kullanılarak, referans elektrot Ag/AgCl ve karşıt elektrot Pt olarak üç elektrot sistemlerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma elektrotu ise 1 ml izopropil alkol ve örneklerden 10 mg kullanılarak camsı karbon üzerine damlatılarak hazırlanmıştır. CV analizleri 2, 5, 10, 50, 100 mV s^{-1} tarama hızlarında gerçekleştirilmiştir. Galvanostatik şarj-deşarj (GCD) analizi 0.10, 0.50, 1.00, 2.00, 5.00 A g^{-1} akım yoğunluklarında yapılmıştır. GCD analizinde 0.10 A g^{-1} akım yoğunluğunda 800 °C'de KOH aktivasyonu sağlanarak üretilen örneğin en yüksek spesifik kapasitans değeri 258 F g^{-1} olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda bu örnek 3000 döngüden sonra kapasitans değerinin % 89'unu korumuştur. Bu sonuçlar bambu için erikli üretilen aktif karbonların süperkapasitör elektrot malzemesi olarak kullanılacağını öne sürmektedir (Yang vd., 2014).

He vd. tarafından yapılan bu çalışmada, hammadde olarak pirinç kabuğu kullanılarak süperkapasitör elektrotları için aktif karbon üretilmiştir. Pirinç kabukları farklı emdirme oranlarında (1:1, 2:1, 3:1 ve 4:1) 850 °C'de $ZnCl_2$ ile aktivasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı emdirme oranlarındaki örneklerin BET analizi sonucunda en yüksek yüzey alanı değeri 1768 m^2 g^{-1} olarak bulunmuştur. Aynı zamanda örneklerin karakterizasyonu XRD, EDS, SEM ve FTIR analizleri de gerçekleştirilmiştir. Süperkapasitör elektrot karışımı %5 karbon siyahı, %6 PTFE ve %89 aktif karbon içeren oranlardan oluşmaktadır. Hazırlanan karışım 15 mPa basınç ile nikel köpüğün üzerine preslenmiştir. Elektrokimyasal analizlerinde CV analizi 2 mV s^{-1} ve 100 mV s^{-1} tarama hızlarında gerçekleştirilmiştir. CV eğrileri iyi bir iyon difüzyonu anlamına gelen dikdörtgen şekil sergilemiştir. 2 mV s^{-1} tarama hızındaki kapasitans değeri artan emdirme oranı ile artış göstermiştir. Bu değerler 1:1 emdirme oranında 156 F g^{-1} iken 4:1 emdirme oranında ise 242 F g^{-1} olarak bulunmuştur. Galvanostatik şarj-deşarj analizinde, 0.05 A g^{-1}

akām yoĵunluĵunda 4:1 emdirme oranēna sahip aktif karbon ºrneĵinin en yę¿ksek kapasitans deĵeri 245 F g^{-1} olarak hesaplanmēktēr. Ayrēca GCD analizinde yapēlan ĸarj-deĸarj dºng¿ denemelerinde, 1000 ĸarj-deĸarj dºng¿ sonrasēnda 4:1 emdirme oranēnda hazērlanan ºrneklerin aynē akām yoĵunluĵunda 243 F g^{-1} olarak hesaplanmēĸ ve kapasitans deĵerini koruduĵu gºzlemlenmiĸtir. Bu -alēĸma $ZnCl_2$ ile aktivasyonu saĵlanan pirin-kabuklarēnēn sę¿perkapasitºr elektrotlarē i-in yę¿ksek performans gºsterdiĵi ve kullanēlabilirliĵini kanētlamēktēr (He vd., 2013).

Tobi vd. tarafēndan yapēldęē-alēĸma, palm yaĵēndan fiziksel ve kimyasal aktivasyonla hazērlanan aktif karbon ºrneklerinin sę¿perkapasitºr elektrotu olarak deĵerlendirilmesini i-ermektedir. Kimyasal aktivasyon 1:1,5 emdirme oranēnda KOH ile ger-eklętirilmiĸtir. Elektrot ę¿retimi i-in karēĸēmēn 1,5 g polivinilidenflorę¿r (PVDF) -ºzę¿cę¿sę¿ NMPôden 40 ml kullanēlmēĸ ve belirli bir miktar aktif karbon ºrneklerindan hazērlanmēktēr. Hazērlanan karēĸēm nikel kºpę¿k ę¿zerine dºkę¿lmę¿ĸ ve 1 cm ôlik par-alara ayērmēklardēr. Daha sonra 7 mPa basēn- altēnda presleme iĸlemi ger-eklętirilmiĸtir. Kapasitif davranēĸlērē deĵerlendirmek i-in yapēlan CV analizi 5, 10, 20, 40, 60, 80 mV s^{-1} tarama hēzlarēnda ger-eklętirilmiĸtir. Galvanostatik ĸarj-deĸarj analizinde, 0.10, 0.30, 0.50 ve 1.00 A g^{-1} akām yoĵunluklarēnda -alēĸēlmēktēr. En dę¿ĸę¿k akām yoĵunluĵunda spesifik kapasitans deĵeri 108 F g^{-1} olarak hesaplanmēktēr. Palm yaĵēndan ę¿retilen aktif karbon elektrotlarēnēn kapasitif performansēnēn arttērēlmasē gerektiĵi bildirilmiĸtir (Tobi vd., 2021).

Baig vd.nin yaptęē bir -alēĸmada, aktif karbon ę¿retimi i-in biyokę¿tle olarak buĵday kabuĵu kullanēlmēktēr. KOH ile 1:5 oranēnda kimyasal aktivasyonu ger-eklętirilmiĸtir. Aktivasyon sēcaklęklarē sērasęyla, 700 ÜC, 800 ÜC ve 900 ÜC olarak -alēĸēlmēktēr. ¦ retilen aktif karbon ºrneklerinin FTIR, SEM, XRD (X- Iĸēnē Kērēnēm) ve N_2 adsorpsiyon/desorpsiyon izotermleri BET yę¿zey alanēnē hesaplamak i-in analizleri yapēlmēktēr. Elektrot karēĸēmę, iletkenlik arttērēcē olarak karbon siyahę, baĵlayēcē olarak Nafion kullanēlmēktēr (oranlar belirtilmemiĸ). Elektrokimyasal analizi i-in hazērlanan elektrotlar Ni kºpę¿k ę¿zerine damlatēlmēktēr. ¦ -lę¿ elektrot sistemi kullanēlmēĸ, referans elektrot olarak Ag/AgCl, karĸēt elektrot olarak Pt ve elektrolit 6 M KOH kullanēlmēktēr. Elektrotlar 1x1 cm^2 ĸeklinde boyutlandērēlmēktēr. BET analizi sonu-larēnda 800 ÜCôdaki aktif karbon ºrneĵi en yę¿ksek yę¿zey alanē deĵeri 1200 m^2 g^{-1} sahip olduĵu bulunmuĸtur.

CV analizinde 5 mV s^{-1} tarama hızında -alınan ¿- sıcaklık 700 ÜC, 800 ÜC ve 900 ÜCönin sırasıyla spesifik kapasitans değerleri, 246 F g^{-1}, 269 F g^{-1}, 103 F g^{-1} olarak hesaplanmıştır. GCD analizinde, 0.5 A g^{-1} akım yoğunluğunda 800 ÜCde en yüksek spesifik kapasitans değeri 271 F g^{-1} olarak bulunmuştur. 800 ÜC sıcaklıkta üretilen aktif karbon örneğinin en yüksek spesifik kapasitansa sahip olmasına sebebiyle, 1 A g^{-1} akım yoğunluğunda 5000 çarj-deşarj döngüsü yapılmış ve kapasite değerinin %89 korunduğu tespit edilmiştir. Sonu- olarak buğday kabuğunun, geniş bir yüzey alana sahip olmasına hızlı iyon taşınmasına sağlamakta ve yüksek bir kapasitans değeri ile sonu-lanmaktadır. Bu sebeple buğday kabuğu süperkapasitör elektrot üretimi için potansiyel bir biyokütle kaynağı olarak kullanılabilmektedir (Baig ve Gul, 2021).

Taslim vd. tarafından yapılan bir -alışmada, Endonezyaôda yetişen Angsana yapraklarından aktif karbon üretimi için 1 M $ZnCl_2$ 850 ÜCde aktivasyonu ile ger-ekleştirmişlerdir. ¦ retilen aktif karbonların N_2 adsorpsiyon/desorpsiyon izotermlerinden hesaplanan yüzey alanı 477 m^2 g^{-1} olarak bulmuşlardır. Aktif karbonların mezo gözenek boyutu 2.1 nm ile 2.5 nm arasında değişmektedir. Elektrokimyasal analizleri iki elektrotlu bir sistemde ger-ekleştirilmiş ve 1 M H_2SO_4 elektroliti kullanılmıştır. CV analizi 0.0 V ile 0.50 V potansiyel aralığında yapılmıştır. Daha yüksek kapasitans değeri elde edebilmek için 1 mV s^{-1} tarama hızında -alışılmış ve spesifik kapasitans değeri 202 F g^{-1} olarak hesaplanmıştır. Angsana yapraklarından elde edilen süperkapasitör elektrotları iyi bir kapasitans değeri ile başarıyla tamamlanmıştır (Taslim vd., 2020).

He vd.nin yaptığı -alışmada, biyokütle olarak kullanılan fıstık kabuklarından aktif karbonu mikrodalga destekli ve tek aşamalı olarak üretimini yapmışlardır. Aktif karbon üretiminde kimyasal aktivasyon işlemi farklı oranlarda ve 850 ÜCde $ZnCl_2$ ile ger-ekleştirilmiştir. ¦ retilen aktif karbon örneklerinden simetrik süperkapasitör elektrotlar hazırlanmıştır. Elektrot karışımı % 87 aktif karbon %5 karbon siyahı ve %8 PTFE kullanılarak hazırlanmıştır. Elektrokimyasal ölçümler 6 M KOH elektroliti ile CHI-760C ismine sahip bir iş istasyonunda ger-ekleştirilmiştir. BET analizinden hesaplanan aktif karbon örneklerinin en yüksek spesifik yüzey alanı 1528 m^2 g^{-1} olarak bulunmuştur. BET analizinin bir başka sonucu olarak aktif karbonlar genellik mezo gözenekli bir yapıya sahip olduğu belirtilmektedir. Elektrokimyasal analizlerinden biri olan CV analizindeki eğriler

değerlendirildiğinde, 100 mV s^{-1} tarama hızında çıkarılan aktif karbonlardan bazılarının daha çok mikro gözenekli bir yapıya sahip olmasına sebebiyle CV eğrilerinin bozulduğunu bildirmişlerdir. Çıkarılan bütün aktif karbonlar 1000 şarj-deşarj döngüsü sonrasında kapasitans değerlerinin %92 ve %94 korumaktadır. GCD analizinde, 0.05 A g^{-1} akım değerinde en yüksek kapasitans değeri 184 F g^{-1} olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde, fıstık kabuklarından çıkarılan aktif karbonlar yüksek yüzey alanına sahip olmasına ve gelişmiş mezo gözenek yapısına sebebiyle süperkapasitörlerin elektrot malzemeleri olarak kullanabilirliğini kanıtlamaktadır (He vd., 2013).

Söğüt yapraklarından aktif karbon hazırlayan Liu vd. üç farklı tabaka kapasitörlerde değerlendirmek için elektrot üretmişlerdir. Kimyasal aktivasyonu $ZnCl_2$ kullanılarak yapılmış ve emdirme oranları 1:0,5, 1:1 ve 1:3 olarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra piroliz işlemi 700 °C, 800 °C ve 900 °C sıcaklıklarında yapılmıştır. Çıkarılan aktif karbonların XRD, SEM ile karakterize edilmiş ve yüzey alanı hesabı için BET yöntemi kullanılmıştır. Elektrokimyasal analizleri üç elektrot sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üç elektrot sisteminde referans elektrot olarak doymuş kalomel elektrot (SCE), karşıt elektrot olarak Pt ve 6 M KOH elektroliti kullanılarak yapılmıştır. Elektrot karışımı 85:10:5 oranında sırasıyla, aktif karbonlar, asetilen siyahı ve PTFE kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. N_2 adsorpsiyon/desorpsiyon izoterm eğrileri yorumlandığında, 800 °C sıcaklık ve 1:1 emdirme oranında en yüksek spesifik yüzey alanı değeri 1031 m^2 g^{-1} olarak bulunmuştur. CV analizi, 5, 10, 30 ve 50 mV s^{-1} tarama hızlarında gerçekleştirilmiştir. GCD analizi, 0.50, 1.00, 2.00 ve 5.00 A g^{-1} akım yoğunluklarında gerçekleştirilmiştir. En düşük akım yoğunluğunda 800 °C sıcaklık ve 1:1 emdirme oranında üretilen aktif karbon örneğinin spesifik kapasitans değeri 216 F g^{-1} olup en yüksek değere ulaşmıştır. Elektrotların uzun vadede kullanımı için yapılan 1000 şarj-deşarj döngüsü sonrası kapasite değerinin %97 korunduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, söğüt yaprakları süperkapasitör elektrotları için kararlı olduğu sebebiyle kullanılabilmekte olduğunu bildirmişlerdir (Liu vd., 2016).

Mondal vd. tarafından yapılan bir çalışmada, narenciya kabuğu atıklarından KOH aktivasyonu ile aktif karbon üretimi yapılmıştır. Emdirme oranı 1:4 kütle oranında ve N_2 gazı altında 900 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan aktif karbon örneklerinin

elektrokimyasal ºl-¿mleri i-in hazērlanan -alēkma elektrotu karēkēmlarē, %90 aktif karbon ve N-metil-2-pirolidon (NMP) -ºz¿c¿s¿ i-inde %10 poliviniliden flor¿r (PVDF) -ºzeltisi кeklindedir. Hazērlanan karēkēmdan 10 mgôē 1x1 cm^2 ºl-¿lerinde nikel kºp¿k ¿zerine dºk¿lm¿кt¿r. Elektrokimyasal analiz i-in ¿-l¿ elektrot sistemi, referans elektrot Ag/AgCl, karкēt elektrot platin tel ve elektrolit 2 M KOH olarak ger-eklекtirilmiкtir. Aktif karbonlarēn karakterizasyonu i-in XRD, FTIR, SEM ve BET y¿zey analizi cihazē kullanēlmēктēr. CV analizi 2, 5, 10, 20, 50 ve 100 mV s^{-1} tarama hēzlarēnda ger-eklекtirilmiкtir. ¢alēkma potansiyel aralēğē 0.0 V ile -1.00 V olup EDLCônin ºzelliği olan dikdºrtgen кeklini sergilemiктir. CV analizlerinden hesaplanan spesifik kapasitans değeri 2 mV s^{-1} tarama hēzēnda 426.7 F g^{-1} olarak hesaplanmēктēr. GCD analizinde de 0.50 A g-1 akēm yoğunluğunda spesifik kapasitans 565.2 F g^{-1} olarak bulunmuктur. Aynē zamanda 10000 dºng¿de kapasitans değerinin %98 korumuктur. Narenciye kabuğunun uzun -evrim ºmr¿ ve y¿ksek kapasitans değerleri s¿perkapasitºr elektrot uygulamalarēi-in potansiyel olarak gº sterilmektedir (Mondal vd., 2021).

6. MATERYAL VE Y¥ NTEM

Bu tez -alı¬masında fındık kabuklarından kimyasal aktivasyon yo ntemi ile aktif karbon ve manyetik aktif karbon ¿retilmi¬tir. En y¿ksek y¿zey alanına sahip aktif karbonlar, elektrot hazırlanmasında kullanılmı¬tır.

6.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Cihazlar

Aktif karbon ve manyetik aktif karbon ¿retimi i-in H_3PO_4, $ZnCl_2$, $FeCl_3.6H_2O$, $FeSO_4.7H_2O$ ve etanol Sigma Aldrichôden temin edilmi¬tir. Aktif karbon elektrot hazırlamak i-in kullanılan % 99,9 saflıkta PTFE, karbon siyahı ve nikel ko p¿k Nanografiôden temin edilmi¬tir. Elektrokimyasal o l-¿mler i-in kullanılan KOH Isolabôdan temin edilmi¬tir.

Aktif karbon ¿retimi i-in fındık kabuJu biyok¿tlesi Retsch marka SM 100 deJirmeni ile o J¿t¿lm¿¬t¿r. Fındık kabuklarının elek analizi i-in Retsch marka Woven Wire Mesh Sieves test elekleri kullanılmı¬tır. Aktif karbon ¿retimi proseslerinden biri olan karbonizasyon i¬lemi i-in Carbolite marka TZF 12/75/700 t¿p fırın kullanılmı¬tır. Aktif karbon ¿retimi kimyasal aktivasyon i¬lemleri sonrası numune kurutma i-in Ecocell marka MMM Medcenter et¿v kullanılmı¬tır. Aktif karbon ve elektrot ¿retim a¬amalarında SMHS WiseStir Dijital Manyetik Karı¬tırıcı kullanılmı¬tır. Aktif karbon elektrot ¿retimi i-in N¿ve marka Ev 018 Vakumlu Fırın, 600 mmHg basıncında kullanılmı¬tır. Manyetik ve orijinal aktif karbonların y¿zey alanı, go zenek hacmi, go zenek boyutu daJılımları ve ortalama go zenek -apı Autosorb 1C (Quantachrome) ile 77 K'de azot gazı adsorpsiyon-desorpsiyon izotermleri alınarak belirlenmi¬tir. Fındık kabuJunun, normal ve manyetik aktif karbonun fonksiyonel gruplarının karakterizasyonu i-in Bruker Tenor 27 FT-IR cihazı kullanılmı¬tır. Numunelerin y¿zey morjolojisi Hitachi Regulus 8230 Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) cihazı ile karakterize edilmi¬tir. Aktif karbon elementel analizi Enerji Dispursive Spektroskopi (EDS) cihazı ile yapılmı¬tır. T¿m elektrokimyasal o l-¿mler Gamry Framework ve Gamry Echem Analyst programları e¬liJinde Gamry Reference 3000 potentiostat/galvanostat/ZRA cihazında yapılmı¬tır.

6.2. Fındık Kabuğunun Hazırlanması

Aktif karbonların üretimi için fındık kabuğu kullanılmıştır. Karadeniz Bölgesinden temin edilen fındık kabukları, 1 mm tanecik boyutundan küçük olacak şekilde değirmende öğütülmüştür. Öğütülen fındık kabukları elek analizi yapılarak 0,4 mm <Dp< 0,6 mm tanecik boyutu aralığındaki örnekle üretimi için kullanılmıştır. Fındık kabuğunun elek analizindeki tanecik boyutu aralıkları şekil 6.1.'de sunulmuştur.

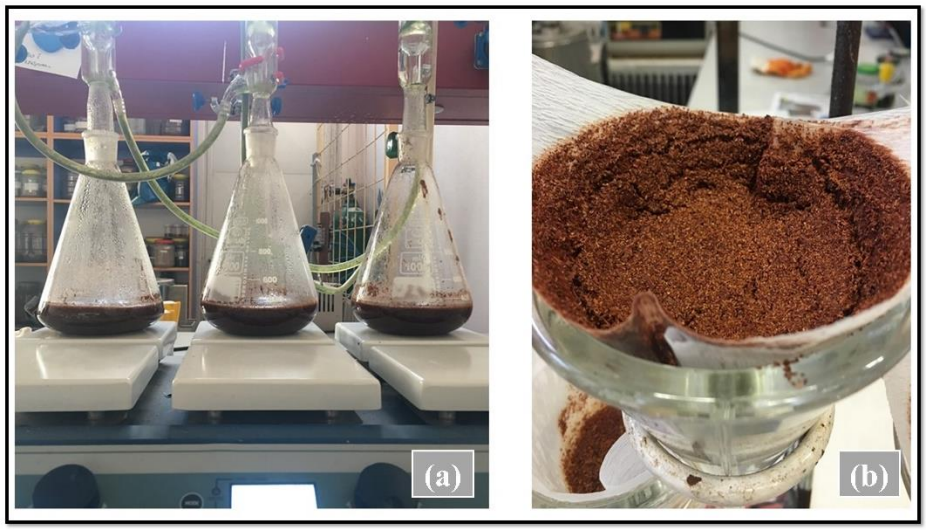


Şekil 6.2. Fındık kabuğunun elek analizi a) titreşimli elek sallayıcı cihazı b) -alınan tanecik boyutları

Fındık kabuğu örneklerinin değirmende öğütüldükten sonra elek analizi için kullanılan cihaz şekil 6.2.'de gösterilmiştir.

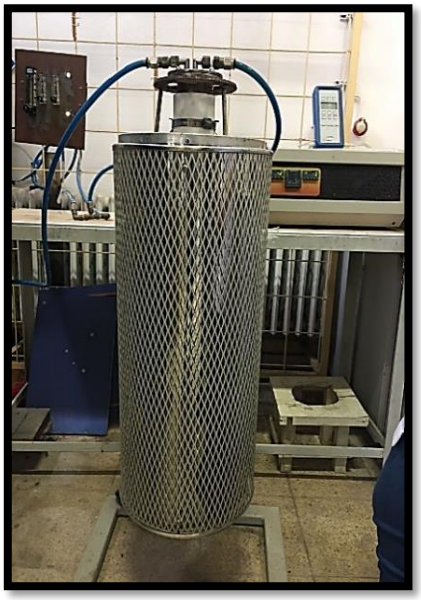
6.3. Aktif Karbon Üretimi

Kimyasal aktivasyonda 3:1 emdirme oranı (kimyasal ajan/fındık kabuğu) kullanılmıştır. Belirli miktarda tartılan fındık kabuğunun 3 katı kadar H_3PO_4/ $ZnCl_2$ distile suda -özündürülmüştür. Fındık kabuğu ve kimyasal madde geri soğutucu altında 80 °C'de manyetik karıştırıcıda 6 saat süre ile karıştırılmıştır. Emdirme işleminin ardından, numuneler süzülüp 70 °C'de etüvde 24 saat boyunca kurutulmuştur. Etüvden alınan numuneler karbonizasyon işlemi için hazır hale gelmiştir. Şekil 6.2'de kimyasal aktivasyonda geri-eklektirilen örneklerin emdirme ve süzme işlemleri gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Aktif karbon aktivasyon işlemi a) kimyasal ajanlar ile emdirilmiş fındık kabuğu b) emdirme işlemi sonrasında oluşan fındık kabuklarının görüntüsü

Kimyasal emdirilmiş hammadde şekil 6.3'de reaktör içine, reaktör ise dikey tüp fırın içine yerleştirilmiştir. Reaktör, 10 ^{0}C/dk ısıtma hızında 400 mL/dk azot akışı altında istenilen sıcaklığa kadar (400 °C, 500 °C ve 600 °C) ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 1 saat tutulmuştur. 1 saat sonunda reaktör azot gazı akışı altında soğutulmuştur.



Şekil 6.4. Karbonizasyon işlemi için kullanılan reaktör üniteleri.

Karbonizasyon ıklemeninden sonra H_3PO_4 ile ¿retilen aktif karbon i-in reaktºrden alınan numuneler oda sıcaklığına geldikten sonra, pH değeri 6-7 arası olacak şekilde sıcak saf su ile yıkandıktan sonra etüvde kurutulmuş ve numune kaplarına konulmuştur. $ZnCl_2$ ile ¿retilen de ise karbonizasyon ıklemi sonrası 0.5 M HCl -ºzeltisi ile 1 saat boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra sıcak saf su ile pH 6-7 arasında oluncaya kadar yıkanmış ve yıkandıktan sonra etüvde kurutulmuştur. Şekil 6.4'de aktif karbon ¿retiminin akış şeması verilmiştir.

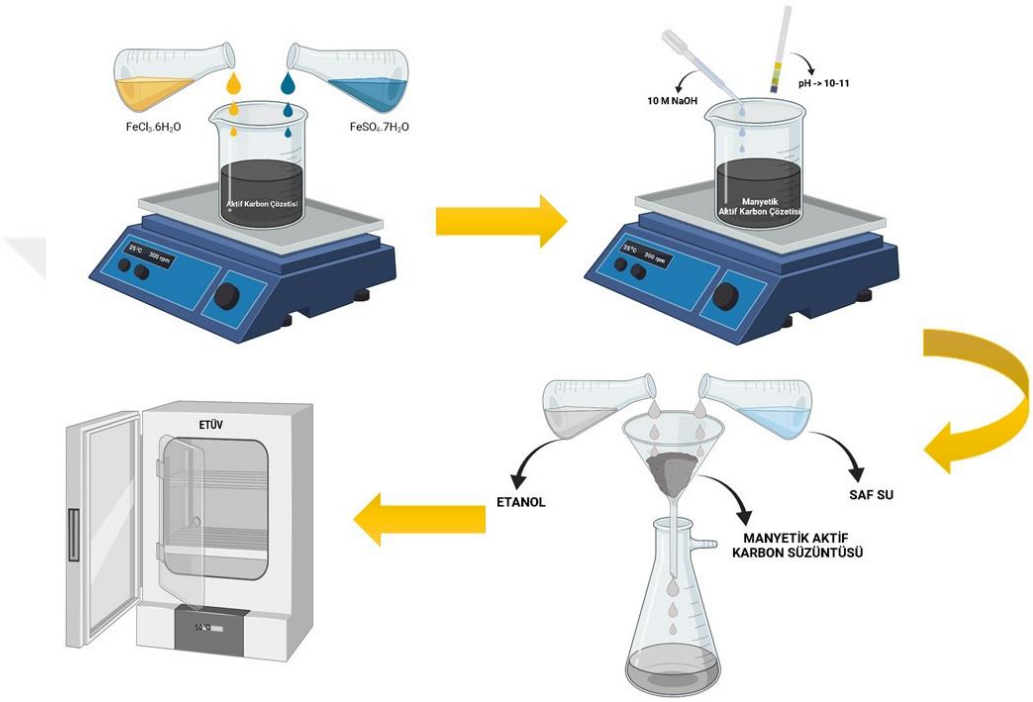


Şekil 6.5. Fındık kabuğundan ¿retilen aktif karbonun ¿retim akış şeması

6.3.1. Manyetik aktif karbonların hazırlanması

Manyetik aktif karbon ¿retimi i-in 10 g aktif karbon numunesi 100 mL saf su i-erisine konulup sı¿spanse edilmiştir. 260 mL'sinde 3,6 g $FeCl_3.6H_2O$ i-eren Fe(III) -ºzeltisi ile 30 mL'sinde 4 g $FeSO_4.7H_2O$ i-eren Fe(II) -ºzeltisi hazırlanıp, bu iki -ºzeltinin karıştırılmasıyla Fe(III) ve Fe(II) i-erikli bir -ºzelti elde edilmiştir. Elde edilen bu -ºzelti, hazırlanan aktif karbon sı¿spansiyonu i-erisine yavaş yavaş ilave edilerek

karışım oda sıcaklığında 30 dakika manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. 10 M NaOH çözeltisi karışım pH'ı 10-11 arasında oluncaya kadar damla damla ilave edilmiştir. İstenilen pH değerine ulaşıldığında, karışım oda sıcaklığında 60 dakika daha karıştırılarak 24 saat süre ile yıkandırılmıştır. 24 saatlik sürenin sonunda karışım süzülerek, önce saf su ile defalarca yıkanmıştır. Daha sonra etanol ile yıkanıp etüvde 24 saat boyunca 50 °C'de kurutulmuştur. Şekil 6.5'de manyetik aktif karbon üretimin akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 6.6. Manyetik aktif karbon üretim akış diyagramı

6.4. Fındık Kabuğunun Karakterizasyonu

Aktif karbon üretimi için biyokütle olarak kullanılan fındık kabuğunun fiziksel ve yapısal özellikleri, nem tayini, kül tayini, uçucu madde tayini, yağ analizi, SEM analizi ve FTIR analizi yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir.

6.4.1. Nem tayini

Analiz için hazırlanan fındık kabuğu örnekleri için kullanılan saat camları öncelikli olarak sabit tartıma getirilmiştir. Daha sonra numuneler saat camına alınmış, 103±2°C

sıcaklığa getirilmiş etüvde, iki tartım arasındaki fark eşitleninceye kadar 3 saat ara ile tartımlarına alınmaktır. Numunelerin %nem içeriği Eşitlik (6.1) kullanılarak hesaplanmaktır.

$$\text{Nem}(\%) = \left[\frac{g_1 - g_2}{g_1}\right] \times 100 \qquad (6.1)$$

Bu eşitlikteki g_1 ve g_2 değerleri,

g_1 : Numunenin başlangıç ağırlığı, (g)

g_2 : Numunenin kurutma işleminden sonraki ağırlığı, (g) şeklindedir.

6.4.2. Kül tayini

Par-acık boyutu 0,2 mm<Dp<0.4 mm arasına se-ilen numuneden yaklaşık olarak 2 g alınmaktır. Tartımı alınan numune daha sonra 600 ÁC sıcaklıkta sabit tartıma getirilmiş krozeye aktarılmaktır. Kül miktarının hata olmadan hesaplayabilmek için numunelerin kroze ile birlikte tekrar tartımı alınmaktır. Krozeler öncelikle 100 ÁC sıcaklığa getirilen etüve konulmuş, 1 saat sonra krozeler desikatöre alınmış ve ardından tartımı alınmaktır. İki tartım arasındaki fark 0,1 mg olana dek bu işleme devam edilmiştir. Daha sonra etüv, numunenin alev almaması için 580-600 ÁC sıcaklık arasına yavaş yavaş getirilmiştir. Krozenin kapağı ça-ık olacak şekilde etüve konulmuş, fırında yakılmaktır. Etüvden alınan numune tekrar desikatöre konmuş ve soğutulmuştur. Daha sonra yarım saat ara ile tartımı alınmaya başlanmış ve tartımlar arasındaki fark 0,2 mg olana dek bu işlemler tekrarlanmaktır. Numunenin %kül içeriği aşağıdaki Eşitlik (6.2) öden hesaplanmaktır.

$$Kül\ (\%) = \left[\frac{g_1}{g_2}\right] \times 100 \qquad (6.2)$$

Eşitlik (4.2)ôdeki g_1 ve g_2 değerleri,

g_1: Kül ağırlığı, (g)

g_2: Fırındaki kuru örneğin ağırlığı, (g) şeklindedir.

6.4.3. U-ucu madde tayini

Hava ortamında kurutulan numunenin 1 g tartımı alınarak, sabit tartıma getirilmiş krozenin iç ine konulmuştur. Numunenin yanmamasına dikkat edilerek, kapaklı kapalı kroze 950 ÁC sıcaklığındaki etüve koyulmuştur. Etüvde 7 dakika bekleyen kroze çıkarılarak, desikatöre konulup, soğutulmuştur. Daha sonra tartımı alınan numunenin uçucu madde miktarı Eşitlik (6.3)'den hesaplanmıştır.

$$\text{U-ucu Madde (\%)} = \left[\frac{g_1 - g_2}{g_1}\right] \times 100\text{- M} \qquad (6.3)$$

Eşitlik (4.3)'deki g_1, g_2 ve M değerleri,

gı: Numunenin ağırlığı, (g)

g_2 : Numunenin etüv sonrası ağırlığı, (g)

M : Numunenin %nem içeriği

6.4.4. Yağ analizi

Yağ analizi için Soxhlet özütleme cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz -özütçü haznesi gövrevini yapan balon, özütleme işleminin gerçekleştiği özütleme haznesi ve geri soğutucudan oluşmaktadır. Ýğüt ülmüş fındık kabuğundan 20 g tartım alınarak nem tayini yapılmıştır. Nem miktarı bilinen numune kartuşun içine konulmuş, numunenin üst kısma ilerlemesini önlemek için pamuk yerleştirilmiştir. Daha sonra 250 mL'lik özütleme cihazının haznesine yerleştirilmiştir. Cam balonun içine 250 mL -özütçü olarak kullanılacak olan petrol eteri ve yaklaşık 10 adet kaynama taşı konulmuştur. Kaynama taşı konulmuş cam balonun tartımı alınmıştır. Cam balon, geri soğutucuya takılıp su geçişi sağlanmıştır. Sıcaklık 40-60 ÜC arasına ayarlanmış ve analize başlanmıştır. 4 saat süre sonunda, haznedeki kartuş çıkartılmış tartımı alınmıştır. Cam balon içinde yağ miktarı kalmıştır. Yağ miktarı hesaplamak için cam balon tartımı da alınmıştır. Yağ miktarı kartuş

tartımı ve cam balon tartımı alınarak hesaplanmaktadır. Bu alınmada cam balon tartımı alınıp hesaplanmıştır. Eşitlik (6.4)'den yağ miktarı hesaplanmıştır.

$$\%\ Yağ = \frac{(B+Y)-B}{W} \times 100 \qquad (6.4)$$

Burada, B cam balonun ağırlığı (g), Y cam balonda kalan yağın ağırlığı (g), W numunenin ağırlığı (g)'dır.

6.4.5. Ham selüloz tayini

Numuneden 3 g tartım alınarak, 200 mL 0,255 N H_2SO_4 -'lik zeltisi ile kaynatılmış ve süzülmüştür. Daha sonra süzgeç kağıdı saf su ile yıkanmıştır. Yıkanmış numune, kaynatma kabında 200 mL 0,313 N NaOH -'lik zeltisi ile kaynatılmıştır. Daha sonra süzülmüş ve saf su ile yıkanmıştır. 25 mL 0,255 N H_2SO_4 -'lik zeltisi ile yıkanmış ve 50 mL etanol ile susuzlaştırılmıştır. Süzgeç kağıdında kalan kısım sabit tartıma getirilmiş krozede 103Ñ2 ÁC sıcaklıkta iki tartım arasındaki fark 0,001 g olana kadar etüvde kurutulmuştur. Etüvde kurutma işleminden sonra tartım alınmıştır. Kül fırınında 550Ñ15 ÜC'de iki tartım arasındaki fark 0,001 g olana kadar yakılmıştır. Ham selüloz miktarı aşağıdaki eşitlikten hesaplanmıştır.

$$\text{Ham Selüloz Miktarı } (\%) = \left[\frac{g_1 - g_2}{g_0}\right] \times 100 \qquad (6.5)$$

Eşitlikteki değerler,

g_0 : Ürün için kütlesi, (g)

g_1 : Kurutma işleminden sonra kroze ve numunenin toplam ağırlığı, (g)

g_2 : Yakma işleminden sonra kroze ve kül için toplam ağırlığı, (g)

6.5. Aktif karbonun ve Manyetik Aktif Karbonun Karakterizasyonu

Aktif karbon ve manyetik aktif karbonların yüzey alanı, gözenek hacmi, gözenek boyutu dağılımları ve ortalama gözenek çapı Autosorb 1C (Quantachrome) ile 77 K'de N_2 gazı adsorpsiyon-desorpsiyon izotermleri alınarak belirlenmiştir. Aktif karbon numunelerini analize hazır hale getirmek için 200 ^{0}C'de 12 saat vakum altında bekletilmiştir. N_2 adsorpsiyon izotermleri 10^{-3}- 1 bağıl basınç- (P/Po) aralığında elde edilmiştir. S_{BET} yüzey alanı 0,01 - 0,15 bağıl basınç- aralığında BET (Brunauer, Emmett ve Teller) denklemi ile hesaplanmıştır. Numunelerin gözenek boyutu dağılımı, adsorpsiyon izotermine Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi (DFT) yöntemi ile elde edilmiştir. Numunelerin yüzey morfolojisi Hitachi Regulus 8230 Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) cihazı ile belirlenmiştir. Fündük kabuğunun, aktif karbon ve manyetik aktif karbonun fonksiyonel gruplarının belirlenmesi için Bruker Tenor 27 FT-IR cihazı kullanılmıştır. Aktif karbon elementel analizi Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS) cihazı ile yapılmıştır.

6.6. Aktif Karbon Elektrotların Hazırlanması

Aktif karbon ve manyetik aktif karbonlardan belirli oranlarda elektrik - ift tabaka kapasitörlerin elektrot malzemesi olarak kullanılması amacıyla hazırlanmıştır.

6.6.1. Elektrot - çözeltisinin hazırlanması

¦ retilen aktif karbon ve manyetik aktif karbonların süperkapasitör elektrot malzemesi olarak hazırlaması için elektrot - çözeltisinde kullanılan malzemeler, aktif karbon, iletkenlik arttırıcı madde ve bağlayıcıdır. Çözeltide i- erisinde en - ok kullanılan malzeme aktif karbondur. Yüzey özellikleri belirlenen aktif karbonların kapasitif davranışları üzerinde etkisi büyük öneme sahip olmaktadır. Bu sebeple - çözeltide fazla kullanılmasının sebebi bu kapasitif davranışının maksimum seviyede belirlenmek istenmesidir. Elektrot - çözeltisinde iletkenlik arttırıcı olarak, karbon siyahı kullanılmıştır. Karbon siyahı kullanılmasının sebebi, iyonlar arasındaki iletkenliği arttırarak yük aktarımını hızlandırmaktır. Bağlayıcı olarak PVDF (Poliviniliden florür) ve PTFE (Politetrafloro etilen) kullanılmıştır. Çözücüleri olarak PVdF için NMP (N-metil

pirolidon), PTFE i-in etanol kullanılmaktır. Baş layıcı aktif karbonun gözeneklerini tıkayabildiği i-in -özelti i-erisinde az miktarda kullanılmaktır.

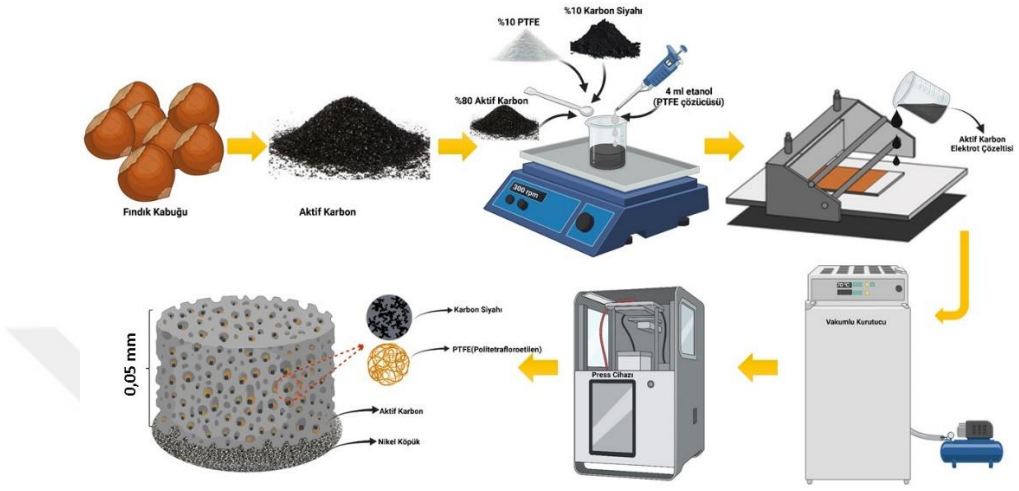
Literatürdeki oranlar ile ilişkilendirilerek sırasıyla, aktif karbon kütlece %80, iletkenlik arttırıcı karbon siyahı % 10, baş layıcı PTFE % 10 oranlarında elektrot -özeltisi hazırlanmaktır. Ön celikle aktif karbon ve karbon siyahı ayrı bir beherde karıştırılarak homojen bir katı karışım elde edilmiştir. Daha sonra PTFEönin tartımı alınıp, solventi olan etanolden 4 mL ayrı bir behere i-erisine konularak -özünmesi i-in 1 saat manyetik karıştırıcıda -özündürülmüştür. ¢özünme işleminden sonra aktif karbon ve karbon siyahı yavaş-a PTFEönin i-ine ilave edilerek homojen olması sağlanıncaya kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir. Katı karışımın eklenmesi işleminden sonra elektrot -özeltisinin tamamen homojen olması i-in 1 saat daha karıştırılmaktır. Tüm bu işlemlerden sonra elektrot -özeltisi kaplama i-in hazır hale gelmiştir. PVDF baş layıcısı ile hazırlanan elektrot -özeltisi PTFE ile aynı oran ve şekilde hazırlanmaktır.

6.6.2. Elektrotların kaplanması ve elektrokimyasal analizleri i-in hazırlanması

Kaplama işleminden önce akım toplayıcı olarak kullanılan nikel köpük etanol ile temizlenip etüvde kurutulmuştur. Etüvden alınan nikel köpük, film kaplama i-in kullanılacak olan Dr. Bladeöde 0,05 mm kalınlığında ayarlanmaktır. Nikel köpüğün üzerine döküm kıvamda hazırlanan elektrot -özeltisi spatül yardımı ile nikel köpüğün üzerine dökülmüş, Dr. Blade ile ince bir film şerit şeklinde -ekilerek kaplanması sağlanmaktır.

Elektrokimyasal analizler i-in kaplanması sağlanan aktif karbon elektrotlar, 70 ÜCöde vakumlu kurutucuya konularak gece boyunca kuruması sağlanmaktır. Vakumlu kurutucudan alınan elektrot -özeltisi ile kaplanmış olan nikel köpük, 8 mPa basın- altında preslenmiştir. Bu işlemden sonra 0.833 cm^2 alana sahip şekilli delge-ler yardımı ile şekil verilmiştir. Elektrolit/elektrot yüzeyinde iyon aktarımının daha kolay olması i-in gözeneklerin elektrolit -özeltisi ile ıslanabilirliği önem taşımaktadır. Aktif karbon elektrotların analizlerde kullanılacak olan 6 M KOH elektrolit -özeltisi i-erisinde daldırılıp, 24 saat bekletilmiştir. Elektrolit i-erisinden alınan elektrotlar elektrokimyasal

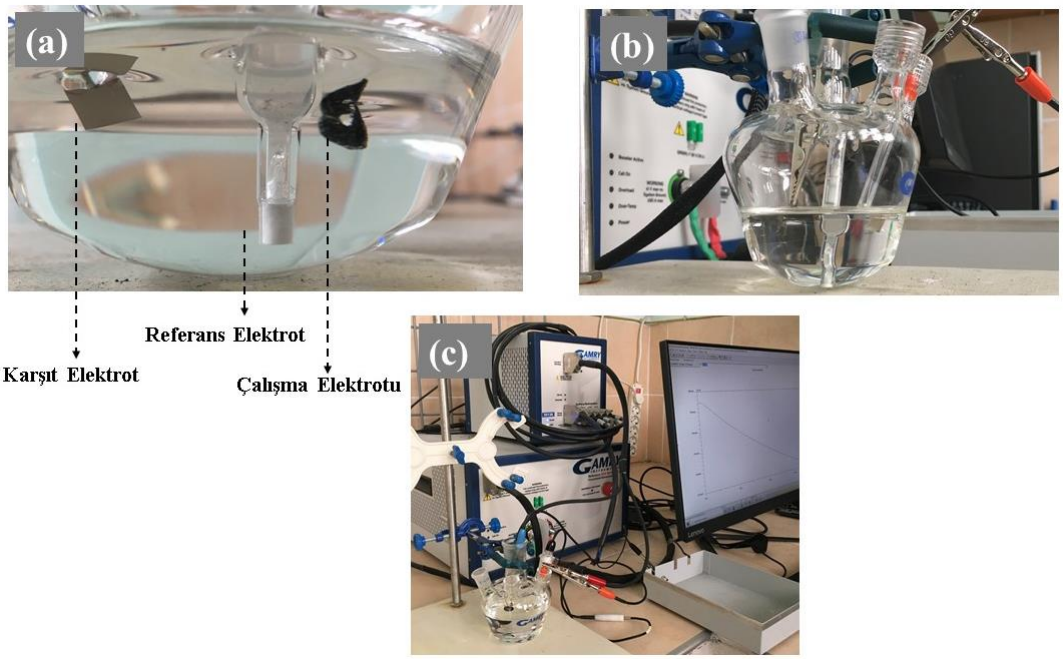
analizi i-in -alēkma elektrotu olarak kullanēma hazēr hale getirilmiktir. ķekil 6.6ôde aktif karbonlarēn s¿perkapasitº r elektrot malzemesi olarak hazērlama akamalarēgº sterilmiktir.



ķekil 6.7. Aktif karbonlardan s¿perkapasitº r elektrotlarēn hazērlanmasē akamalarē.

6.7. Aktif Karbon Elektrotlarēn Elektrokimyasal Analizleri

T¿m elektrokimyasal º l-¿mler Gamry Framework ve Gamry Echem Analyst programlarē ekliî inde Gamry Reference 3000 potentiostat/galvanostat/ZRA cihazēnda yapēlmēktēr. ¢ alēkmada kullanēlan ¿-l¿ elektrot sisteminde 0.833 cm^2 alana sahip -alēkma elektrotu aktif karbon (0,05 mm kalēnlēîēnda), karkēt elektrot Pt ve referans elektrot ise doymuk kalomel elektrotu (SCE) kullanēlarak ger-eklektirilmiktir. Bu ¿-l¿ elektrot sistemi elektrokimyasal h¿crenin i-erisinde ger-eklektirilmik ve analizler i-in 6 M KOH elektrolit -º zeltisi kullanēlmēktēr. ķekil 6.7ôde elektrokimyasal h¿cre ve ¿-l¿ elektrot sisteminin genel gº r¿n¿m¿ verilmiktir.



Şekil 6.8. Üç elektrot sistemi a) Elektrokimyasal hücre bileşenleri b) Hücrenin genel görünümü c) Üç elektrot sisteminin elektrokimyasal analiz genel görünümü.

Tez çalışması kapsamında, aktif karbon ve manyetik aktif karbon numuneleri için gerçekleştirilen elektrokimyasal analizler ve çalışılan koşullar aşağıda açıklanmıştır.

Dönüşümlü Voltametri (CV) : Çalışma elektrotların zamana bağlı olarak değişken akım-potansiyel uygulanarak elektrotların yük depolama davranışları ile bilgi veren CV analizinde, (0,00)-(− 0,60) V potansiyel aralığında, 5 mV/s, 10 mV/s, 20 mV/s, 30 mV/s, 40 mV/s, 50 mV/s, 75 mV/s ve 100 mV/s tarama hızlarında çalışılmıştır.

Galvanostatik Şarj-Deşarj (GCD) : Elektrotların uzun süre kararlılıkları ve CV analizindeki gibi yük depolama davranışları ile bilgi veren GCD analizinde, (0.0-(-0.60) V potansiyel aralığında, (0,25), (0,50), (0,75), (1,00), (1,25), (1,50), (1,75), (2,00), (2,25), (2,50), (2,75) ve (3,00) A g^{-1} spesifik akım yoğunluklarında geri-eklektirilmiş ve büt ün akım yoğunluklarıçin spesifik kapasitans değerleri hesaplanmıştır.

Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) : Sisteme herhangi bir hasar vermeden, elektrokimyasal reaksiyonlar ve difüzyonu hakkında bilgi veren EIS analizinde, 1 mV genliğinde ve 100 kHz ile 10 mHz frekans aralığında geri-eklektirilmiştir.

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

7.1. Fındık Kabuğunun Karakterizasyonu

Tez çalışması kapsamında aktif karbon üretimi için biyokütle olarak seçilen fındık kabuğunun nem, kül uçucu madde, yağ içeriği analizleri yapılmış ve değerlendirilmiştir. Aynı zamanda fındık kabuğunun yüzey morfolojisini görüntülemek için SEM analizi yapılmış ve element içeriği için EDS analizi yapılmıştır.

7.1.1. Fındık kabuğunun kaba ve yapısal analiz sonuçları

Çalışmış fındık kabuklarının kaba ve yapısal analiz sonuçları Çizelge 7.1'de sunulmuştur. Fındık kabuğunun yapısı % 40'ın üstünde selüloz içeriğine sahiptir (Zhao vd., 2018). Fındık kabuğunun yapısal bileşeninde selüloz % 56,77 ve % 8,79 yağ içeriği ve kaba analizinde nem, kül, uçucu madde , sabit karbon içeriği deneysel çalışmalarla elde edilmiştir.

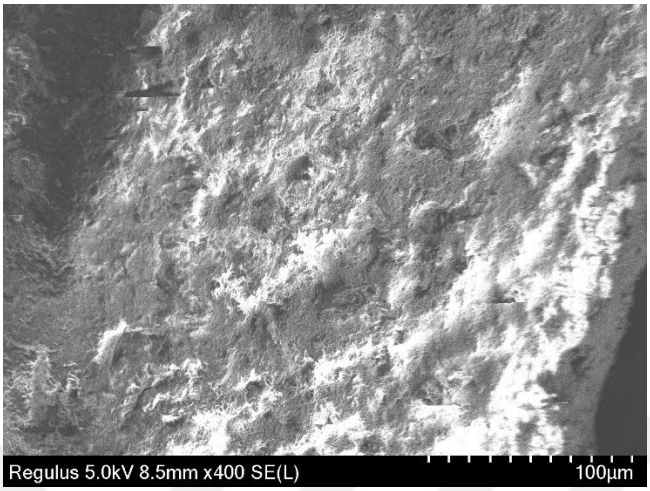
Çizelge 7.1. Fındık kabuğunun kaba ve yapısal analiz sonuçları

Kaba Analiz	**(Kütlece %)**	**Yapısal Bileşenler**	**(Kütlece %)**
Nem	8,6	Yağ	8,79
Kül	15,99	Ham Selüloz	56,77
Uçucu Madde	64,43		
Sabit Karbon	10,98		

7.1.2. Fındık kabuğunun SEM analizi sonuçları

Yüzey morfolojisindeki değişimleri belirlemek için analizi yapılan ham fındık kabuğunun SEM görüntüsü şekil 7.1'de verilmiştir. şekil 7.1'de görülen fındık kabuğu

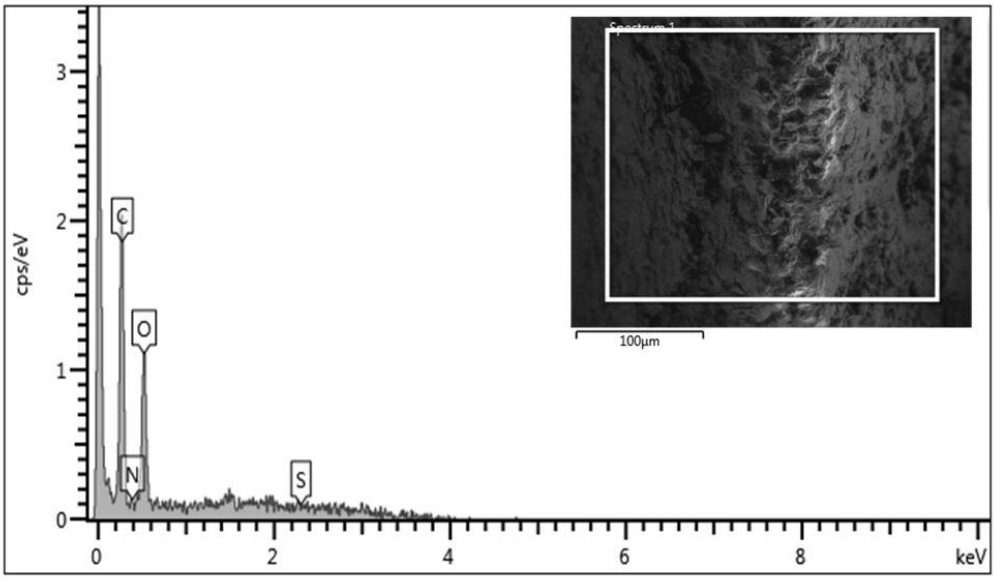
y¿zeyinin bazē bº lgelerinde girintiler ve -ēkēntēlar belirgin bir ĸekilde i-ermekte olup, d¿zenli bir yapēya sahip olmadēĵ ē SEM gº r¿nt¿s¿nden net bir ĸekilde gº r¿lmektedir.



ķekil 7.1. Ham fēndēk kabuĵ unun SEM gº r¿nt¿s¿.

7.1.3. Fēndēk kabuĵ unun EDS analizi

Fēndēk kabuĵ unun EDS analizi sonu-larē ķekil 7.2 ôde verilmiĸtir. EDS analizi sonu-larēna bakēldēĵ ēnda fēndēk kabuĵ u C, O, N ve S elementlerini i-erdiĵ i gº r¿lmektedir. ķekil 7.2 ôdeki EDS analizi yapēlan fēndēk kabuĵ unun SEM gº r¿nt¿s¿n¿ de i-ermekte olup, bu gº r¿nt¿n¿n homojen olmayan bir yapēya sahip olduĵ u gº r¿lmektedir. Fēndēk kabuĵ undaki gº zenekli yapēnēn aktivasyondan º nce oluĸmadēĵ ē SEM gº r¿nt¿s¿nden a-ēk-a gº r¿lmektedir.



Şekil 7.2. Hamfındık kabuğunun EDS grafiği.

Çizelge 7.2'de fındık kabuğunun EDS analizi ile belirlenen element içeriği yüzdeleri verilmiştir. Fındık kabuğu ağırlıkça, % 66,90 C, % 30,53 O, % 1,37 N ve % 1,20 S elementlerini içermektedir. Fındık kabuğunun yüksek karbon içeriğine sahip olması aktif karbon üretimi için uygun bir hammadde olmaktadır. Aynı zamanda Güney vd.nin yaptığı bir çalışmada, fındık kabuğu yüksek organik madde içeriğine sahip ligno-selülozik bir hammadde olması sebebiyle karbon içeriği % 45-69 arasında değiştiğini bildirmişlerdir (Guney, 2013).

Çizelge 7.2. Fındık kabuğunun EDS analizi sonuçları.

Element (Wt %)	**Fındık Kabuğu**
C	66,90
O	30,53
N	1,37
S	1,20

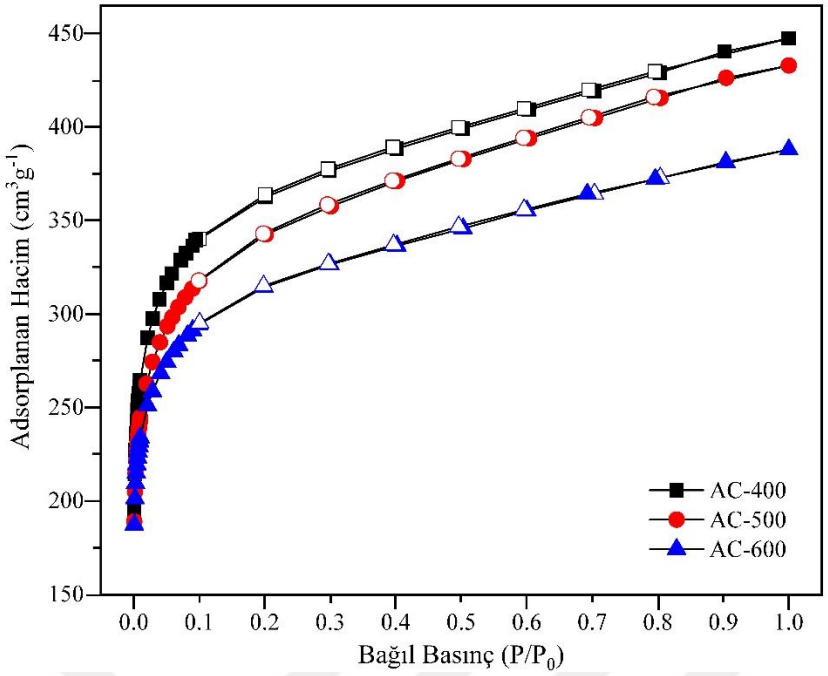
7.2. Aktif Karbon ve Manyetik Aktif Karbonların Karakterizasyonu

Fındık kabuğundan kimyasal aktivasyon ile üretilen aktif karbonlar ve manyetik aktif karbonlar N_2 gazı adsorpsiyonu, SEM-EDS ve FTIR analizi ile karakterize edilmiştir.

7.2.1. Fosforik asit aktivasyonu ile üretilen aktif karbon ve manyetik aktif karbonların N_2 adsorpsiyon/desorpsiyon izotermleri

Aktif karbon örneklerinin N_2 adsorpsiyon/desorpsiyon izoterm eğrileri çizilmiş, bu eğrilerden yüzey özellikleri hesaplanmış ve çizelgede verilmiştir.

Farklı sıcaklıklarda üretilen aktif karbonların adsorpsiyon/desorpsiyon izoterm eğrileri şekil 7.3'de verilmiştir. Şekle bakıldığında sıcaklık arttığında adsorplanan gaz hacminin azaldığı açık-ça görülmektedir. Ayrıca bu izotermler yoğun mikro yapıların temsil eden Tip I izoterm sergilemektedir. Bu izotermlerde, 1'e yakın bağıl basınç-larında adsorbe edilen miktar, mikro, mezo ve makro gözeneklerde adsorbe edilen toplam miktara karşılık gelmektedir. Mikro gözeneklerde düşük bağıl basınç-larında oluşmaktadır. Mezo gözenekler ise 0,2'nin üstündeki bağıl basınç-larında meydana gelmektedir (Demiral vd., 2011). Şekil 7.3'de de görüldüğü gibi düşük bağıl basınç-larda mikro gözenekli yapının varlığını göstermektedir. İzotermlerde histeresisin olmaması, -oğunlukla mikro gözeneklerin oluştuğunu ve daha az mezo gözenekli yapının oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 7.3. H_3PO_4 aktivasyonu ile üretilen aktif karbonların farklı sıcaklıklardaki N_2 adsorpsiyon/desorpsiyon izotermleri.

Fosforik asit aktivasyonu ile farklı sıcaklıklarda üretilen aktif karbonların ve optimum koşulda üretilen manyetik aktif karbon numunesinin yüzey özellikleri çizelge 7.3'de verilmiştir.

Çizelge 7.3'e bakıldığında, 400 °C, 500 °C ve 600 °C için karbonizasyon sıcaklığında üretilen AC örneklerinin spesifik yüzey alanları görülmektedir. Aktif karbonların spesifik yüzey alanları sırasıyla, 1363 m^2/g, 1274 m^2/g ve 1177 m^2/g olarak hesaplanmıştır. Bu değerler incelendiğinde karbonizasyon sıcaklığının artmasıyle spesifik yüzey alanlarının azaldığı görülmektedir. Aynı zamanda artan sıcaklık ile gözenek hacim değerleri de azalmıştır. Karbonizasyon sıcaklığının en düşük olduğu 400 °C'de mikro ve mezo gözenek hacimleri diğer sıcaklıklarda üretilen aktif karbon örneklerine göre daha fazla olduğu da çizelgede görülmektedir.

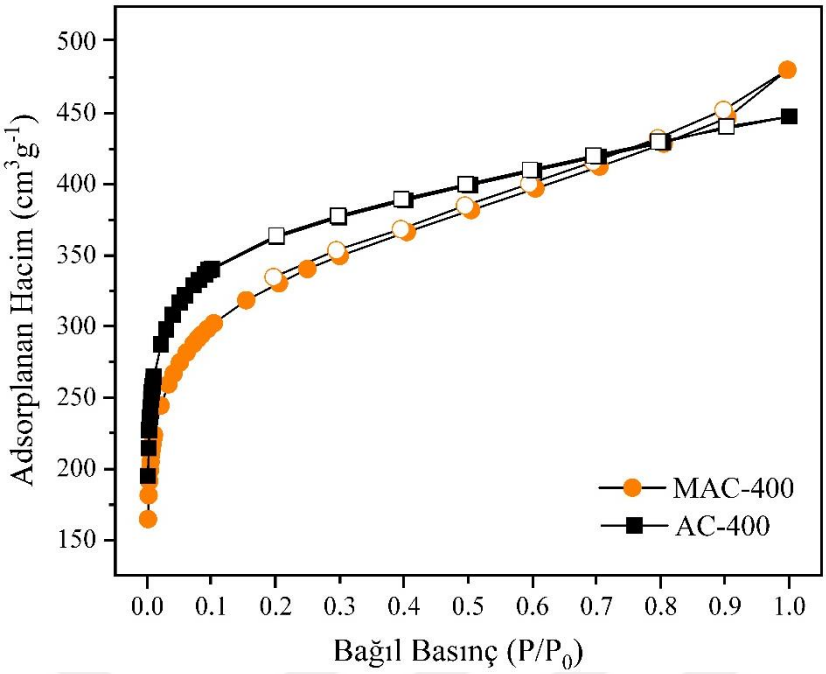
Çizelge 7.3 incelendiğinde, 400 °C sıcaklığında aktif karbonun en yüksek spesifik yüzey alan değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu sebeple çalışmada 400 °C sıcaklıkta aktif karbon üretimine devam edilmiştir. Aynı zamanda 400 °C'de manyetik aktif karbon üretilmiştir. Uygun koşullar için 400 °C'de üretilen aktif karbon ve manyetik aktif karbon örneklerine sırasıyla AC-400 ve MAC-400 kodu verilmiştir. MAC-400 örneğinin spesifik yüzey alanı, AC-400 örneğinden daha düşük olduğu çizelge 7.2'de görülmektedir. MAC-400'ün spesifik yüzey alanı, 1212 m^2/g olarak hesaplanmıştır. Çizelge 7.3'e

bakıldığında, toplam gözenek hacminin arttığı fakat mikro gözenek hacminin azaldığı gözlemlenmiştir. AC-400'e göre bakıldığında mezo gözenek hacminin de arttığı gözlemlenmiştir. Manyetik aktif karbonlarda yüzey alanının azalmasının sebebi, oluşan demir oksit partiküllerinin gözeneklerin tıkanmasına olarak bildirilmiştir. Aynı zamanda aktif karbonda demir oksit partiküllerinin mezo gözenekli yapıları katkı sağlamaktadır (Cazetta vd., 2016; Rodríguez-Sánchez vd., 2021; Yaşmur ve Kaya, 2021).

Çizelge 7.3. Aktif karbon ve manyetik aktif karbonun yüzey özellikleri.

Aktif Karbon Örnekleri	S_{BET} (m^2/g)	V_{mikro} (cm^3/g)	V_{total} (cm^3/g)	V_{mezo} (cm^3/g)	Dp (Å)
AC-400	1363	0,520	0,683	0,163	20,05
AC-500	1274	0,464	0,661	0,197	20,76
AC-600	1177	0,430	0,591	0,161	20,10
MAC-400	1212	0,441	0,744	0,303	24,56

Şekil 7.4'de uygun sıcaklık belirlendikten sonra, aktif karbon ve manyetik aktif karbonun N_2 adsorpsiyon/desorpsiyon izotermleri görülmektedir. AC-400 ve MAC-400'ün izoterm eğrilerine bakıldığında IUPAC sınıflandırılmasına göre tip I izotermine uygun olmaktadırlar. P/P0<0,1 bağıl basınçlardaki keskin artış AC-400 ve MAC-400 örneklerinin önemli miktarda mikro gözenekliliğe sahip olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda MAC-400'ün mikro gözeneklilik gelişimi AC-400'e göre daha az olduğu da Çizelge 7.3 ile desteklenmektedir. MAC-400 ve AC-400 arasındaki farklı gözenek boyut dağılımı ve yüzey özellikleri Çizelgesinde açıkça belli olmaktadır.



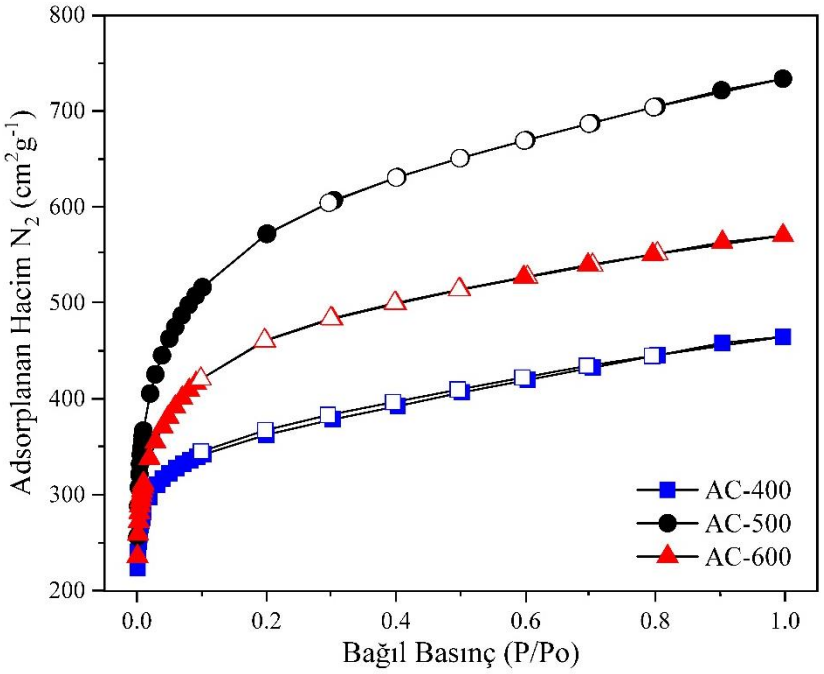
Şekil 7.4. AC-400 ve MAC-400ün N_2 adsorpsiyon/desorpsiyon izotermleri.

Gözenek hacmindeki azalmanın nedeni, artan sıcaklıkla bazı gözeneklerin çökmesidir. Fosforik asit ile yapılan aktivasyonlar, fosfat esterleri şeklinde çapraz bağların oluşmasına sellozik gözenekliliğin gelişiminden kaynaklı olabilmektedir. Hammaddedeki bağ-yaratma reaksiyonlarının düşük sıcaklık (50-200 ÁC) aralıklarında gerçekleştiği bilinmektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda (200ï 450 ÁC) bu yapılar H_3PO_4 ile birleşerek çapraz fosfat bağlarına dönüşür ve sert bir yapı oluşturmaktadır. Bu yapı genişler ve çapraz bağlanma reaksiyonları, bağ parçalama reaksiyonlarından daha baskın olmaktadır. H_3PO_4 aktivasyonunda 400 ÁCôe kadar yüksek gözeneklilik ve yüzey alanı elde edilmesinin nedeni bu yapılar olabilmektedir. Fosfat ester çapraz bağlarının termal kararlılığı, 450ï 500 ÁC sıcaklıklarda bir sınıra ulaşmaktadır. Artan sıcaklıkla bu çapraz bağların bozulması karbondaki gözenekli yapının çökmesine neden olduğunu bildirmişlerdir (Vernersson vd., 2002; Yorgun ve Yıldız, 2015). Bu nedenle yapının gözenekliliğinin ve yüzey alanının azalması sonucuna varılmıştır.

7.2.2. ¢inko Klor¿r aktivasyonu ile ¿retilen aktif karbon ve manyetik aktif karbonlarēn N_2 adsorpsiyon/desorpsiyon izotermleri

Aktif karbon ºrneklerinin N_2 adsorpsiyon/desorpsiyon izoterm eĵrileri -izilmiĸ, bu eĵrilerden y¿zey ºzellikleri hesaplanmāĸ ve -izelgede verilmiĸtir.

¢inko klor¿r aktivasyonu ile ¿retilen aktif karbon ºrneklerinin 400 ÜC, 500 ÜC ve 600 ÜC sēcaklarēndaki N_2 adsorpsiyon/desorpsiyon izotermleri ĸekil 7.5âde verilmiĸtir. ĸekil incelendiĵinde, 500 ÜC sēcaklēĵēndaki ºrneĵin en y¿ksek adsorplanan gaz hacmine sahip olduĵu gºr¿lmektedir. Ayrēca bu izotermler daha -ok mikro gºzenekli yapēlarē temsil eden Tip I izoterm sergilemektedir. ĸzotermlerde histeresis halkalarēnēn oluĸmamāĸ olmasē aktif karbon ºrneklerinin, daha -ok mikro gºzenekli bir yapēda olduĵu ve daha az mezo gºzeneklere sahip olduĵunu gºstermektedir.



ĸekil 7.5. $ZnCl_2$ aktivasyonu ile ¿retilen aktif karbonlarēn farklē sēcaklēklardaki N_2 adsorpsiyon/desorpsiyon izotermleri.

Farklē sēcaklēklardaki aktif karbonlarēn ve manyetik aktif karbonlarēn y¿zey ºzellikleri ¢izelge 7.4âde verilmiĸtir. Karbonizasyon sēcaklēĵēnēn, y¿zey alanlarēndaki ve gºzenek yapēsēndaki deĵiĸim ¢izelge 7.4âden a-ēk-a gºr¿lmektedir. Farklē sēcaklēklardaki

aktif karbon örneklerinin spesifik yüzey alanları sırasıyla, 1355 m^2/g, 2092 m^2/g ve 1701 m^2/g olarak hesaplanmıştır. Karbonizasyon sıcaklığının artmasıyla spesifik yüzey alan değerini ve toplam gözenek hacim değerini düşürdüğü açıklanmıştır. En yüksek değerler 500 °C'de bulunmuştur. Çinko klorür ile aktivasyonu gerçekleştirilen aktif karbonlarda, çok yüksek sıcaklıklarda çalışıldığında, yüksek miktarda uçucu madde kaybı olmasına, bazı gözeneklerin daralmasına ve karbon yapısının büzülmesi sebebiyle yüzey alanı ve gözenek yapısını etkileyeceği bildirilmiştir (Angin, 2014). Bu sebeple 500 °C sıcaklıkta aktif karbon ve manyetik aktif karbon üretimine devam edilmiştir. Aktif karbon ve manyetik aktif karbonlara sırasıyla AC-500 ve MAC-500 olarak kodlanmıştır. AC-500 örneğinde, gelişmiş mikro gözenekli ve daha az gelişmiş mezo gözenekli bir yapıda olduğu görülmektedir.

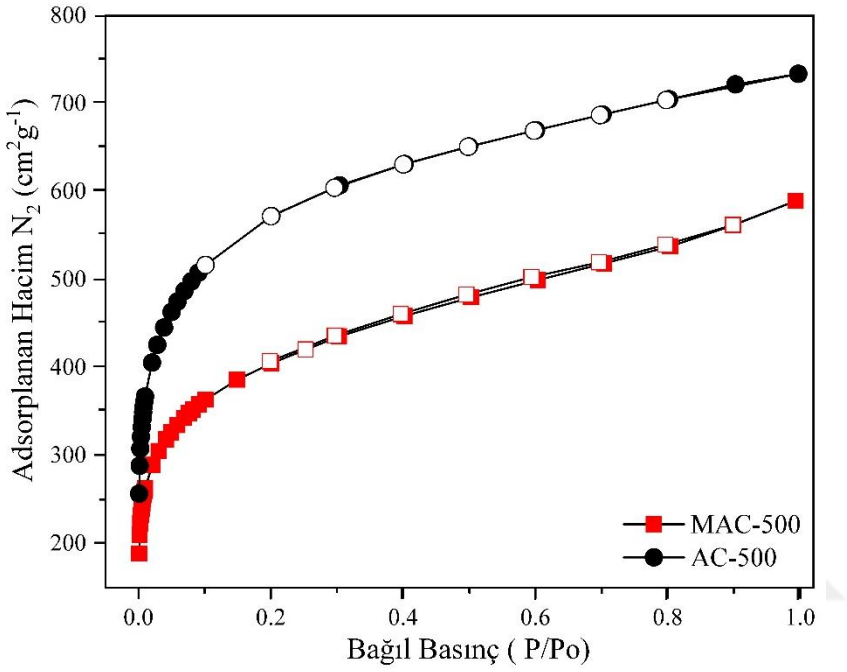
Çizelge 7.4'de üretilen MAC-500 örneğinin 1470,5 m^2/g spesifik yüzey alanı değeri ile AC-500'e göre daha düşük bir değere sahip olduğu görülmektedir. Aynı zamanda toplam gözenek hacminde de düşük olduğu görülmektedir. Mikro gözenek hacminde azalma ve mezo gözenek hacminde çok az bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Gözenek yapısındaki bu azalış ve artışın sebebi, manyetik aktif karbon üretiminde demir oksit partiküllerinin gözenekleri tıkamasına ve aynı zamanda mezo gözenekli yapıya katkıda bulunmasına olarak düşünülür.

Çizelge 7.4. Aktif karbon ve manyetik aktif karbonun yüzey özellikleri.

Aktif Karbon Örnekleri	S_{BET} (m^2/g)	V_{mikro} (cm^3/g)	V_{total} (cm^3/g)	V_{mezo} (cm^3/g)	Dp (Å)
AC-400	1355	0,526	0,711	0,185	20,99
AC-500	2092	0,752	1,119	0,367	21,41
AC-600	1701	0,601	0,873	0,272	20,55
MAC-500	1470.5	0.529	0.914	0,385	24,71

Çinko klorür ile aktivasyonu gerçekleştirilen aktif karbon ve manyetik aktif karbon örneklerinin N_2 adsorpsiyon/desorpsiyon izotermleri şekil 7.6'da verilmiştir. 500 ^0C sıcaklık için hazırlanan aktif karbon örneklerinin şekil 7.6'da izoterm eğrilerine bakıldığında, IUPAC sınıflandırmasına göre Tip I izotermine uygun olduğu

gº r¿lmektedir. AC-500 º rneÎ i i-in ĸekle bakēldēÎ ēnda, adsorplanan gaz hacminin MAC-500ôe gº re daha fazla olduÎ u gº r¿lmektedir. Aynē zamanda AC-500 ve MAC-500 i-in, d¿ĸ¿k baÎ ēl basēn-larēndaki keskin artēĸēndan dolayē daha fazla mikro gº zenekli bir yapēya sahip olacaÎ ēnē a-ēk-a gº stermektedir. Her iki º rnek i-in kēsmen farklē bir gº zenek yapēsēna sahip olduÎ u ¢ izelge 7.4ôdeki sonu-lar desteklemektedir.

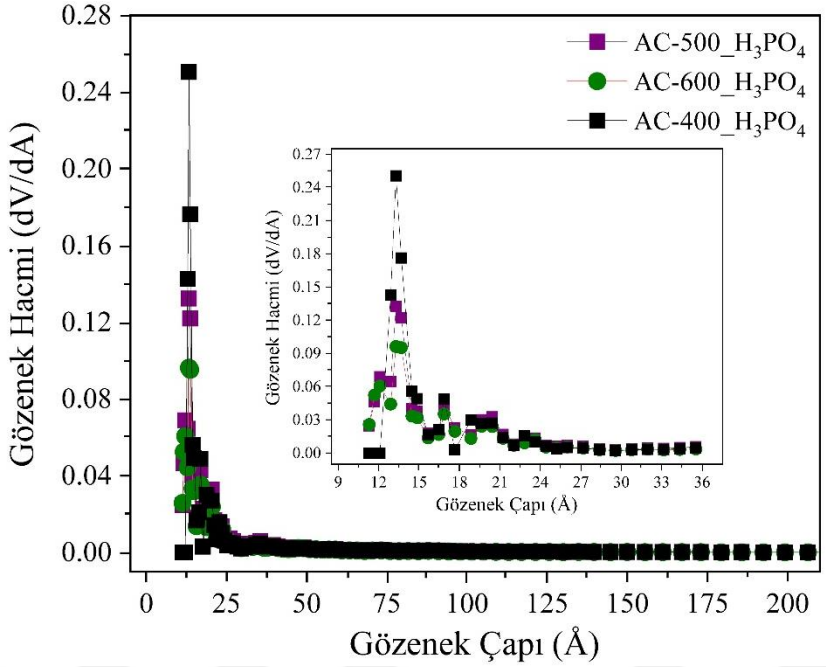


ķekil 7.6. AC-500 ve MAC-500óç¿n N_2 adsorpsiyon/desorpsiyon izotermleri.

7.2.3. Fosforik asit aktivasyonu ile ¿retilen aktif karbon ve manyetik aktif karbonlarēn gº zenek boyut daÎ ēlēmlarē

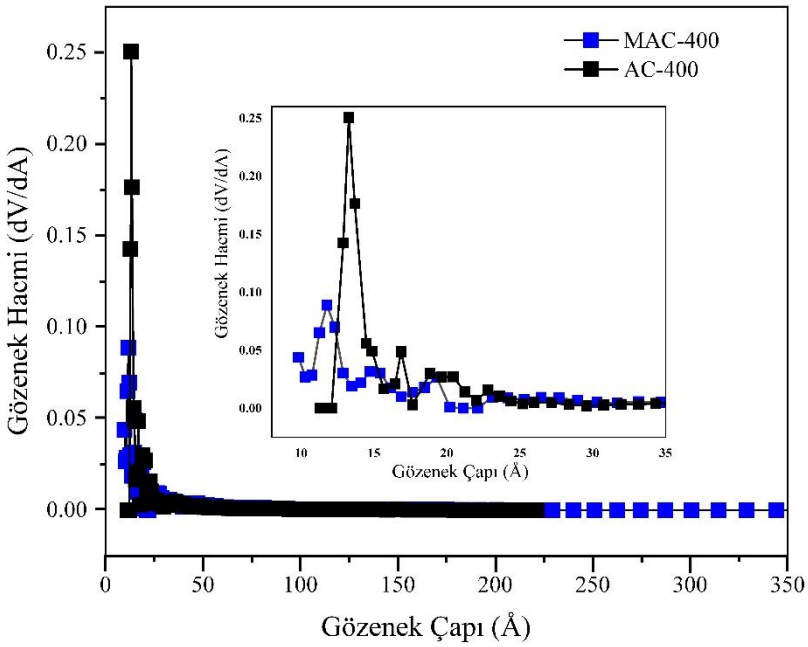
Fosforik asit aktivasyonu ile ¿retilen aktif karbonlarēn farklē sēcaklēklardaki gº zenek daÎ ēlēm grafikleri ķekil 7.7ôde verilmiĸtir. IUPAC sēnēflandērēlmasēna gº re, mikro gº zenekli (<20 ¡), mezo gº zenekli (20-500 ¡) ve makro gº zenekli (>500 ¡) olmak ¿zere ¿- gruba ayrēlmaktadēr. ķekil 7.7ôdeki 12 ¡ ve 20 ¡ arasēnda deÎ iĸen gº zenek -apēnda, mikro gº zenekli yapēnēn t¿m sēcaklēklarda daha geliĸmiĸ olduÎ u gº zlemlenmektedir. Aktivasyon sēcaklēÎ ēnēn azalmasē ile gº zenek yapēsēnēn deÎ iĸtiÎ i ķekil 7.7ôde gº r¿lmektedir. 400 ÜC sēcaklēÎ ēndaki gº zenek boyut daÎ ēlēm grafiÎ i incelendiÎ inde, diÎ er sēcaklēklara gº re geliĸmiĸ mikro ve mezo gº zenekli bir yapēya sahip olmaktadēr. 600 ÜCôde ise 10 ¡ ile 20 ¡ arasēnda deÎ iĸen gº zenek -apēnda, mikro gº zenekli yapēnēn diÎ er

sıcaklıklara göre daha az gelişmiştir. 500 °C sıcaklık için şekil 7.7'ye bakıldığında, 12 Å ile 20 Å göze nek çapı aralığında mikro gözeneklilik in gelişti i ve 20 Å sonrasında ise mezo gözenekli bir yapıya sahip olmaktadır. Şekil 7.7'de fosforik asit aktivasyonu ile 400 °C sıcaklıkta üretilen aktif karbonun gözenek özelliğinin daha iyi geliştiği görülmektedir.



Şekil 7.7. AC-400'ün farklı sıcaklıklardaki gözenek boyut dağılım grafiği.

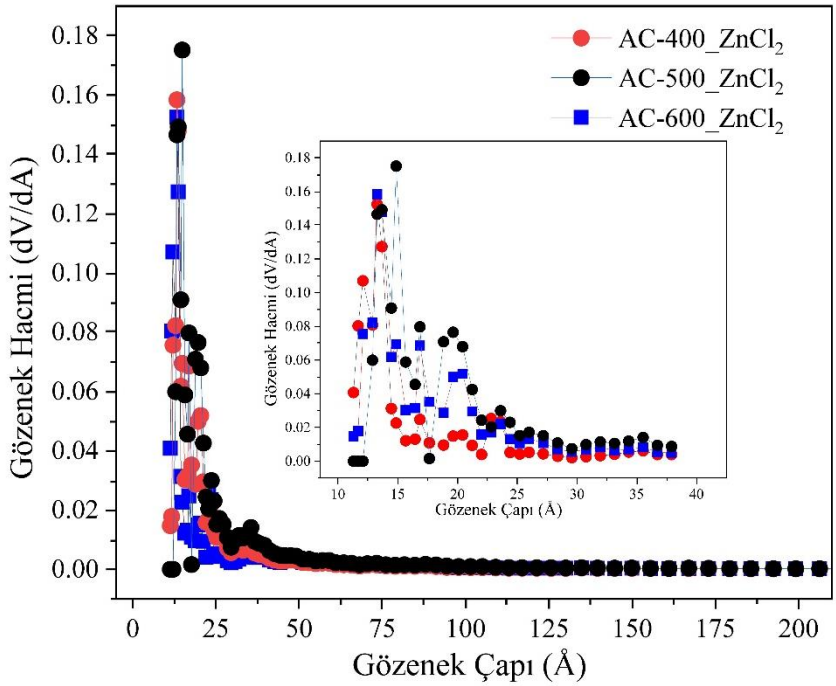
Şekil 7.8'de AC-400 örneklerinin gözenek boyut dağılımı verilmiştir. Her iki aktif karbon örneklerinin, gözenek boyut dağılımlarının birbirine benzer olduğu görülmektedir. MAC-400 ve AC-400 örneklerinin 10-25 Å aralığında, gözenek boyut dağılımları yoğun olduğu gözlemlenmiştir. AC-400 ve MAC-400 örnekleri için yoğun mikro gözenekli yapıda olduğu şekil 7.8'de görülmektedir. Yüzey özellikleri dışında de bu mikro gözenekli yapının daha fazla olduğu saptanmıştır. Ayrıca MAC-400'deki gözenek hacimlerindeki azalma, gözenek boyutu dağılım grafiğinde de gözlemlenmiştir. AC-400 örneği 11-16 Å aralığında büyük bir tepe noktasına sahip olup, MAC-400 örneği 10-13 Å aralığında büyük bir tepe noktasına sahiptir. Bu sonuçlara bakıldığında, her iki aktif karbon örneğinin yoğun bir şekilde mikro gözenekli yapıya ve daha az mezo gözenekli yapıya sahip olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 7.8. AC-400 ve MAC-400 aktif karbonlarının gözenek boyut dağılım grafiği.

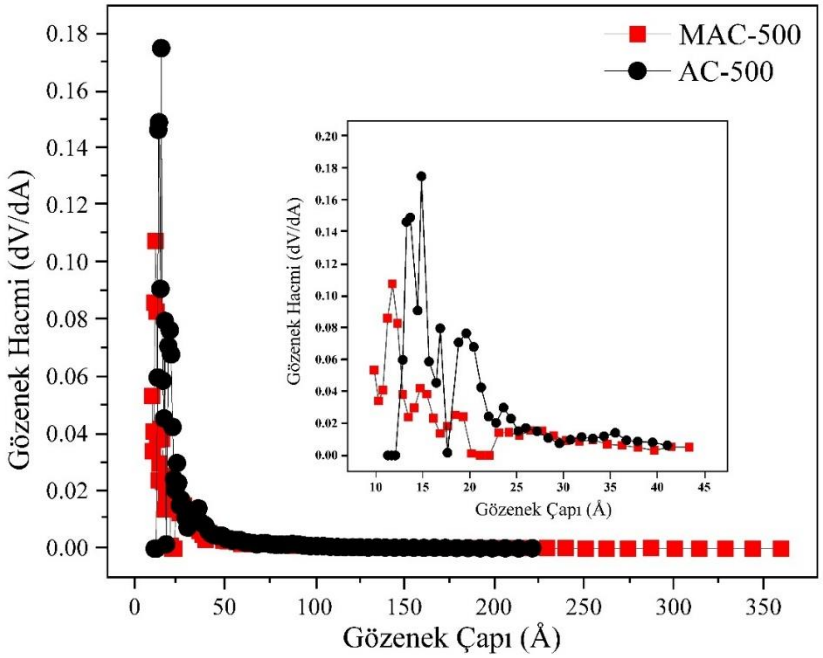
7.2.4. Çinko klorür aktivasyonu ile üretilen aktif karbon ve manyetik aktif karbonların gözenek boyut dağılımları

Çinko klorür aktivasyonu ile üretilen aktif karbonların farklı sıcaklıklardaki gözenek boyut dağılım grafikleri şekil 7.9'da sunulmuştur. Grafiğe genel olarak bakıldığında, tüm sıcaklıklarda mikro ve mezo gözenekli yapının gelişmiş olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, aktif karbonların 10 Å ile 20 Å gözenek çapı aralığında mikro gözenekli yapının yoğun olduğu şekil 7.9'da görülmektedir. Düşük aktivasyon sıcaklığında üretilen aktif karbonun gözenek yapısının gelişmediği yüzey özellikleri izelgesinden anlaşılmaktadır. Yüksek aktivasyon sıcaklığında ise, karbon yapısının tekrar düzenlenmesi ve gözenek alanlarının azalmasına sebep olabileceği bildirilmiştir (Mohanty vd., 2006). Şekil 7.9'da görüldüğü gibi, 500 °C sıcaklığındaki aktif karbonun gözenek boyut dağılımında mikro ve mezo gözenek yapısının 10 Å ile 20 Å arasında daha iyi gelişmiş olduğu görülmektedir. Çizelge 7.4'deki yüzey özelliklerinde, BET yüzey alanının bu sıcaklıkta en yüksek değere ulaştığı saptanmıştır.



Şekil 7.9. AC-500 örneğinin farklı sıcaklıklardaki gözenek boyut dağılım grafiği.

MAC-500 ve AC-500 örneklerinin gözenek dağılım grafikleri şekil 7.10'da verilmiştir. Şekilde her iki örnek için bazı farklılıklar açık bir şekilde görülmektedir. IUPAC sınıflandırılmasına göre, mikro gözenekli (<20 Å), mezo gözenekli (20-500 Å) ve makro gözenekli (>500 Å) olmak üzere üç- gruba ayrılmaktadır. 10-30 Å aralığında gözenek dağılımları daha yoğun olduğu görülmektedir. AC-500 örneğinin daha çok mikro gözenekli bir yapıya sahip olduğu, MAC-500'ün ise daha az mikro gözenekli bir yapıda olduğu şekil 7.10'dan gözlemlenmiştir. MAC-500'ün çizelge 7.3'de verilen gözenek hacimlerindeki azalma şekil 7.10'den de net bir şekilde gösterilmektedir. MAC-500'ün AC-500'e göre 25-35 Å arasında değişken tepe noktalarında, daha çok mezo gözenekli bir yapıya sahip olduğunu sergilemektedir. Bu grafik genel olarak değerlendirildiğinde, her iki örneğin de daha çok mikro gözenekli bir yapıya sahip olduğu ve daha az mezo gözenekli bir yapının varlığı görülmektedir.

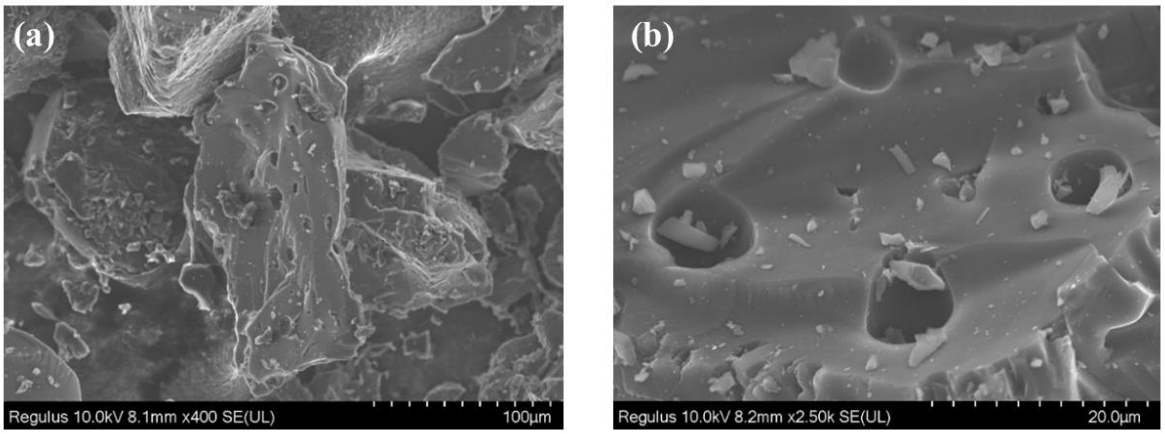


Şekil 7.10. AC-500 ve MAC-500 örneklerinin gözenek boyut dağılım grafiği.

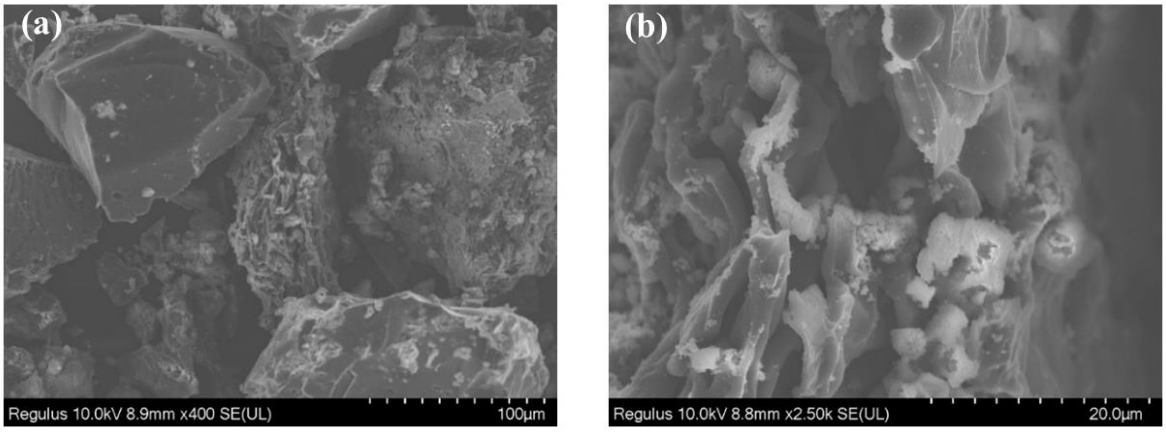
7.2.5. Fosforik asit aktivasyonu ile üretilen aktif karbon ve manyetik aktif karbonların SEM analizi sonuçları

AC-400 örneğinin SEM görüntüsü Şekil 7.11'de verilmiştir. Görüntüye bakıldığında, aktivasyon ısısı ve karbonizasyon sıcaklığının etkisiyle oluşan gözenekler görülmektedir. 20 Ôm'de yüzeye daha yakından bakıldığında gözeneklerin daha çok çukurlara benzediği, gözenekli yapıların aktif karbon yüzeyinden içeriye doğru devam etmediği ve gözeneklerin birbirine bağlı olmadığı görülmektedir.

Şekil 7.12'de MAC-400 örneğinin SEM görüntüsü sunulmaktadır. Görüntü incelendiğinde, demir oksit partiküllerinin, gözeneklerinin tıkanmasına sebep olup, süngerimsi bir gözenek yapısı gözlemlenmektedir. Aynı zamanda, demir oksit partiküllerinin gözenekleri tıkamasının sonucu olarak yüzey alanının da azalacağı da bildirilmiştir (Mohan vd., 2011).



ķekil 7.11. AC-400 º rneĵ inin SEM gº r¿nt¿s¿ a) 100 Õm b) 20 Õm



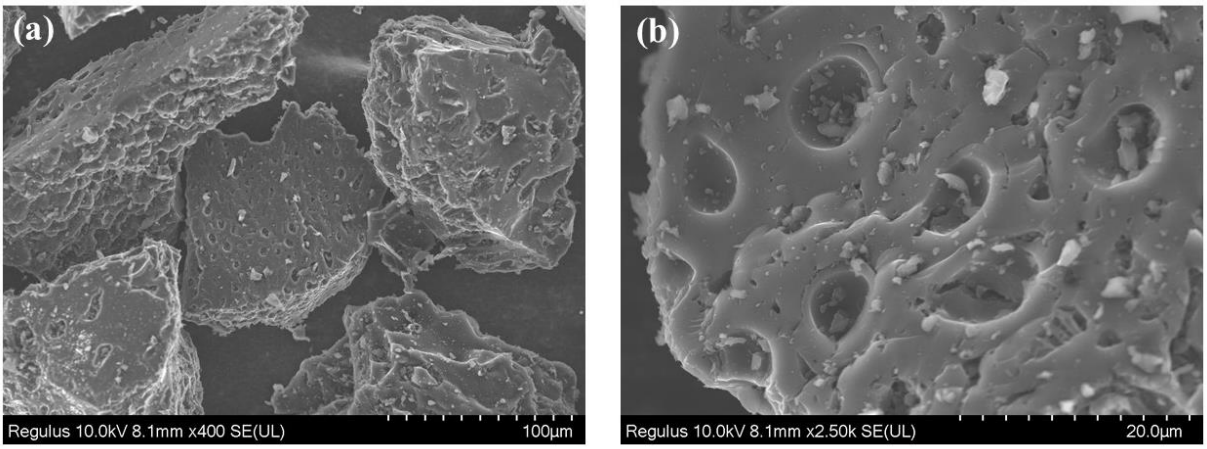
ķekil 7.12. MAC-400 numunesinin SEM gº r¿nt¿s¿ a) 100 Õm b) 20 Õm

7.2.6. ¢inko klor¿r aktivasyonu ile ¿retilen aktif karbon ve manyetik aktif karbonlarēn SEM analizi sonu-larē

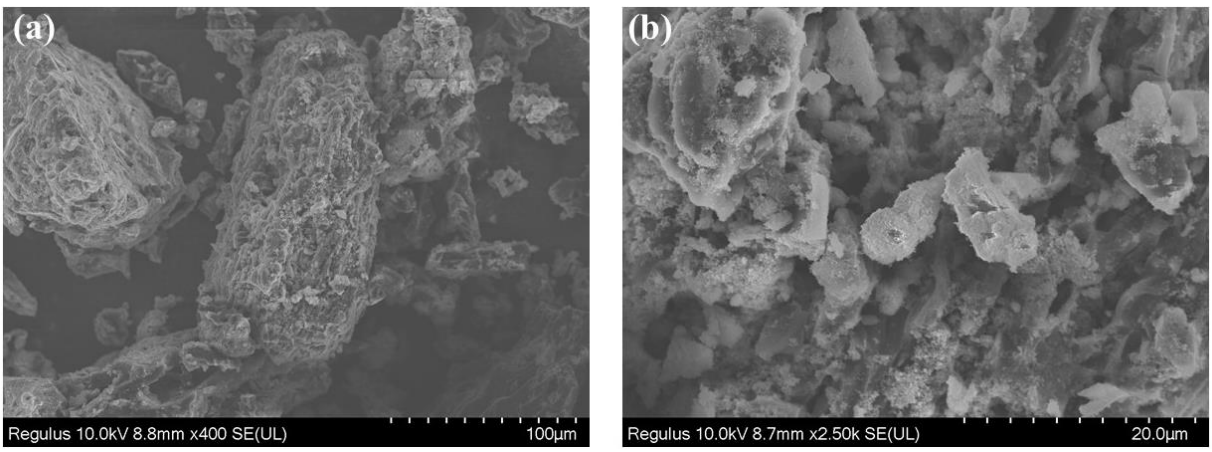
AC-500 º rneĵ inin SEM gº r¿nt¿s¿ ķekil 7.13ôde verilmiĸtir. SEM gº r¿nt¿s¿ incelendiĵ inde, -inko klor¿r aktivasyonu ve karbonizasyon sēcaklēĝēnēn etkisi oluĸan gº zenekli bir yapēyē gº stermektedir. Hammadde olan fēndēk kabuĵ unun SEM gº r¿nt¿s¿ ile karĸēlaĸtērēldēĝēnda, homojen bir yapēya sahip olduĵ u ve p¿r¿zs¿z gº zenekli bir yapē olmadēĝē a-ēk-a gº r¿lmektedir. Aynē zamanda ķekil 7.13ôde karbonizasyon iĸlemi sonrasēnda -inko klor¿r buharlaĸmasē sonucu oluĸan boĸluklar gº r¿lmektedir (H. Demiral ve Demiral, 2008). Gº zeneklerin farklē boyutlarda olduĵ unu gº zenek boyut daĵ ēlēm grafiĵ i desteklemektedir. ¢inko klor¿r ile aktivasyonu saĵ lanan aktif karbonlarēn, y¿ksek bir

spesifik y¿zey alana ve iyi gelikmik bir gº zenek yapēsēna sahip olacaĵ ē bildirilmikтir (Demiral vd., 2016). Bu tez - alēkmasēndaki sonu - lar literat¿r ile ekleкmektedir

ķekil 7.14óde aktivasyonu - inko klor¿r ile yapēlmēk ve MAC-500 º rneĵ inin SEM gº r¿nt¿s¿ gº r¿lmektedir. Gº r¿nt¿ incelendiĵ inde demir oksit y¿klemesinden sonra, gº zenek yapēsēnēn deĵ ikтiĵ i ve demir oksit partik¿llerinin gº zeneklerdeki varlēĵ ē ķekil 7.14ôde a- ēk- a gº r¿lmektedir. Manyetik aktif karbon ¿retiminden sonra MAC-500 º rneĵ inin y¿zey alanēnēn azaldēĵ ē ¢ izelge 7.4 ile desteklenmektedir.



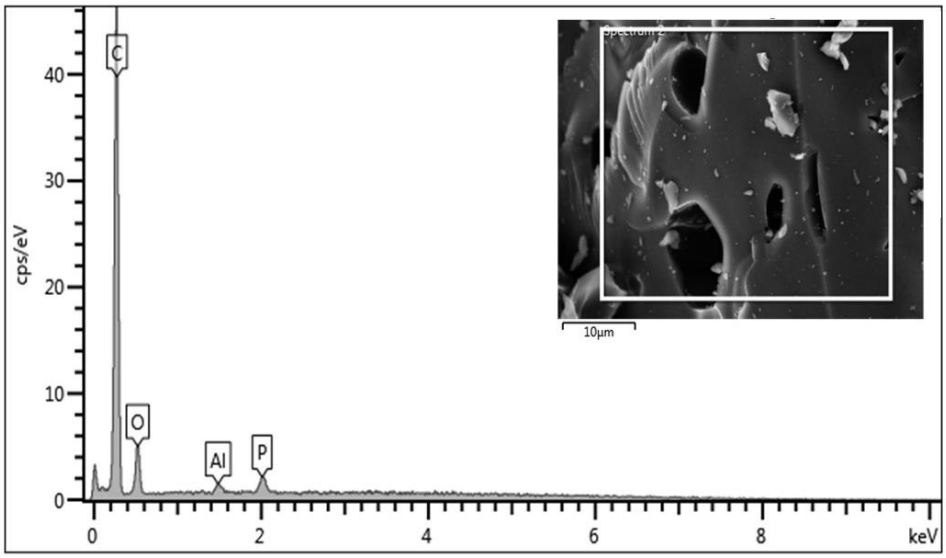
ķekil 7.13. AC-500 º rneĵ inin SEM gº r¿nt¿s¿ a) 100 Õm b) 20 Õm



ķekil 7.14. MAC-500 º rneĵ inin SEM gº r¿nt¿s¿ a) 100 Õm b) 20 Õm

7.2.7. Fosforik asit aktivasyonu ile üretilen aktif karbon ve manyetik aktif karbonların EDS analizi sonuçları

AC-400 örneğinin EDS grafiği şekil 7.15'de verilmiştir. EDS grafiğine ve özelgeye bakıldığında % C içeriğinin fındık kabuğuna göre daha fazla olduğu görülmektedir. Fındık kabuğunda % 66,90 C içerirken, AC-400 örneğinde bu değer % 84,40'a yükselmiştir. Aktif karbon üretiminde uçucu bileşenler yapıdan uzaklaştırılırken yüksek karbon içeren göze nekli bir yapı elde edilmektedir.



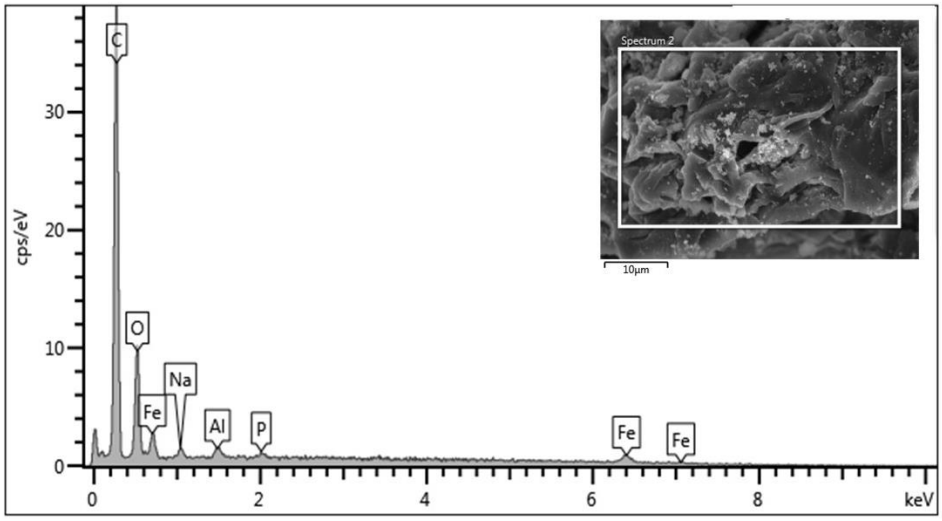
Şekil 7.15. AC-400 örneğinin EDS grafiği.

Çizelge 7.5'de AC-400'ün EDS analiz sonuçları verilmiştir. Şekil 7.15'den de görüldüğü gibi AC-400 örneğinde %C içeriği en fazla olduğu gözlemlenmiştir. % 2,85 P içeriğinin görülmesi ise kimyasal aktivasyonun H_3PO_4 ile yapılmasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 7.5. AC-400 örneğinin EDS analiz sonuçları

Element (Wt %)	AC-400
C	84,40
O	11,69
Al	1,05
P	2,85

Şekil 7.16 ve ¢izelge 7.6'deki EDS sonu-larına bakıldığında, MAC-400'ün % C i-eriği inin AC-400'den daha d¿ş¿k olduğu g°r¿lmektedir. % O i-eriği i ise AC-400'e g°re daha y¿ksektir. Bunun sebebi demir oksit bileşenlerinin aktif karbonun y¿zey fonksiyonel gruplarını etkilemiş olup % O i-eriği ini arttırmasına olabilmektedir. ¦ retilen manyetik aktif karbon °rneği inin Fe(II) ve Fe(III) y¿klemesi sonrası EDS sonu-larında % Fe i-eriği inin g°r¿nmesini sağ lamıştır. Aynı zamanda şekil ve -izelgeden g°r¿len % Na i-eriği inin sebebi, manyetik aktif karbonun ¿retim aşamasında derişik NaOH ile pH ayarlanmasın kaynaklanmaktadır. Şekil 7.16'daki SEM g°r¿nt¿s¿nden demir oksit partik¿lleri aktif karbon y¿zeyinde a-ğır-a g°r¿lmektedir.



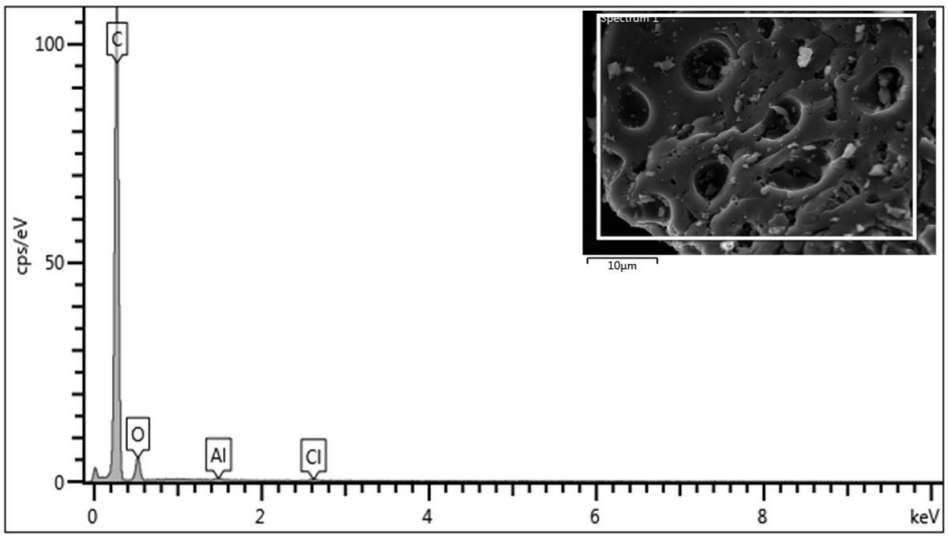
Şekil 7.16. MAC-400 °rneği inin EDS grafiği i.

¢izelge 7.6. MAC-400 °rneği inin EDS analizi sonu-ları

Element (Wt %)	**MAC-400**
C	73,34
O	13,33
Al	0,79
P	0,58
Na	0,89
Fe	11,07

7.2.8. ¢inko klor¿r aktivasyonu ile ¿retilen aktif karbon ve manyetik aktif karbonlarēn EDS analizi sonu-larē

AC-500 º rneĵ inin EDS grafiĵ i ķekil 7.17ôde verilmiķtir. EDS grafiĵ i ve ¢izelge 7.7 incelendiĵ inde, % C i-eriĵ inin aktif karbon ¿retimi sonrasē º nemli bir oranda arttē gº r¿lmektedir. AC-500 º rneĵ inin % C i-eriĵ i, 91,47 deĵ erine y¿kselmiķtir. Hammaddeden ¿retilen aktif karbonun hammadde arasēndaki C i-eriĵ inin farklē olmasēnēn sebebi, karbonizasyon iķlemi ile u-ucu maddelerin uzaklaķmasē ve karbon olmayan t¿rlerin ortadan kaldērēlmasēyla karbonun zenginleķmesi olarak d¿ķ¿n¿lmektedir (Ayg¿n vd., 2003). Aynē zamanda ¢izelge 7.7ôda gº r¿nen % 0,41 Cl i-eriĵ i aktif karbonun $ZnCl_2$ aktivasyonu ile hazērlanmasēndan kaynaklanmaktadēr (Zhang vd., 2020). EDS analizindeki SEM gº r¿nt¿s¿nden de a-ēk-a gº r¿lebileceĵ i gibi, $ZnCl_2$ aktivasyonundan sonra y¿ksek y¿zey alana sahip gº zenekli bir yapē meydana gelmiķtir.

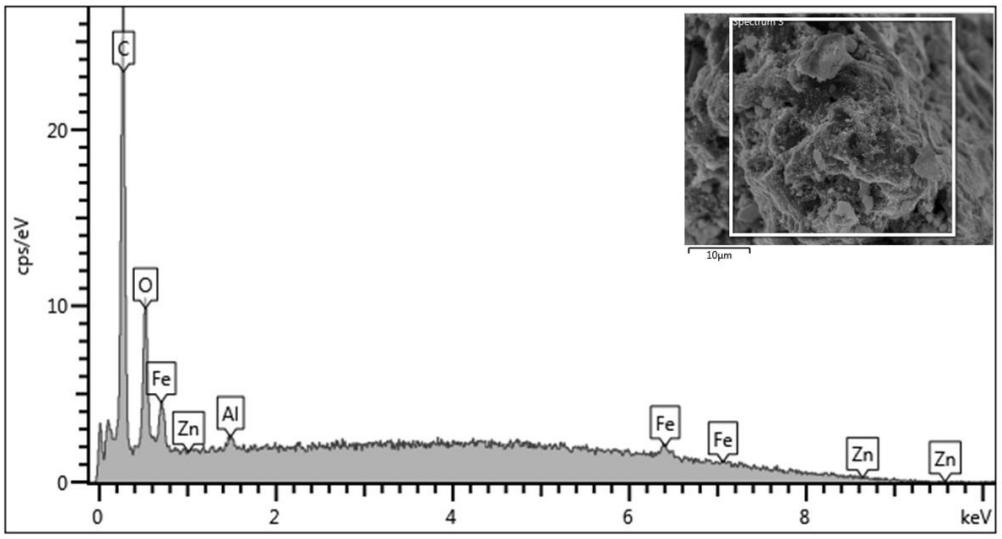


ķekil 7.17. AC-500 º rneĵ inin EDS grafiĵ i.

¢izelge 7.7. AC-500 º rneĵ inin EDS analiz sonu-larē

Element (Wt %)	AC-500
C	91,47
O	7,85
Al	0,27
Cl	0,41

Şekil 7.18'de MAC-500'ün EDS grafiği verilmiştir. Şekil 7.18 ve Çizelge 7.8'e bakıldığında, MAC-500'ün AC-500'e göre % C içeriğinin azaldığı görülmektedir. Aynı zamanda % O içeriğinin arttığı da gözlemlenmiştir. % O içeriğinin artmasının sebebi, demir oksit bileşiklerinin aktif karbonun yüzeyinde fonksiyonel grupların ortaya çıkmak olmasından kaynaklanmaktadır. Manyetik aktif karbonun demir oksit yüklemesinden sonra EDS sonuçlarında % Fe içeriğinin meydana geldiği görülmektedir. % Fe içeriğinin EDS analizi sonucunda 27,08 olarak bulunmuştur.



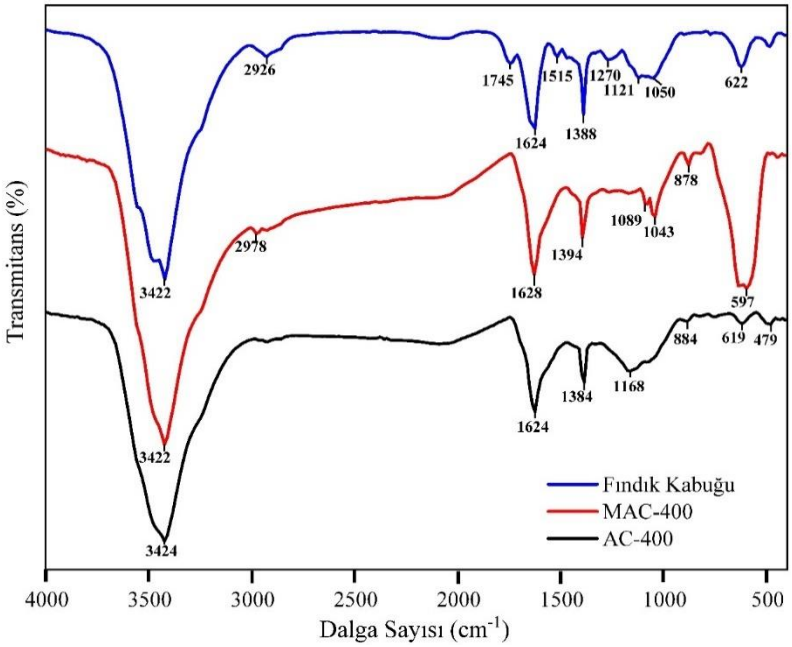
Şekil 7.18. MAC-500 örneğinin EDS grafiği.

Çizelge 7.8. MAC-500 örneğinin EDS analiz sonuçları

Element (Wt %)	**MAC-500**
C	57,32
O	14,64
Al	0,96
Fe	27,08
Zn	0,00

7.2.9. Fosforik asit aktivasyonu ile ¿retilen aktif karbon ve manyetik aktif karbonlarēn FT-IR analizi sonu-larē

Fēndēk kabuĵu, AC-400 ve MAC-400 ºrneklerinin FTIR analiz sonu-larē ķekil 7.19ôda verilmiĸtir. Fēndēk kabuĵunun FTIR analiz sonucunun bu baĸlēk altēnda verilmesinin sebebi, bu biyok¿tleden ¿retilen aktif karbonlarēn, fonksiyonel gruplara katkēsēnē daha a-ēk bir ĸekilde gº sterilmek ve karĸēlaĸtērma yapmak i-in daha net sonu-larē ortaya koymak i-in d¿ĸ¿n¿lm¿ĸt¿r.



ķekil 7.19. MAC-400, AC-400 ve fēndēk kabuĵunun FTIR spektrumu.

Fēndēk kabuĵu ve fēndēk kabuĵundan ¿retilen aktif karbon ve manyetik aktif karbonlarda gº r¿len 3420 cm^{-1} dalga aralēĵēndaki geniĸ titreĸim, bantlarē hidrojen baĵlē OH gruplarēndan kaynaklanan absorbans pikleridir. 1600 cm^{-1}ôdeki tepe noktasē aromatik halka (C=C) gerilme titreĸimlerine karĸēlēk gelmektedir (Luo vd., 2019). ķekil 7.19ôda AC-400, MAC-400 ve fēndēk kabuĵu piklerinin sērasēyla 1624 cm^{-1},1628 cm^{-1} ve 1624 cm^{-1} karĸēlēk gelip C=C -ift baĵlarēna sahip olduĵu gº r¿lmektedir. 1300-1000 cm^{-1} dalga sayēlarēna karĸēlēk gelen zayēf bantlar hem hidroksil hem de eter tipi C-O yapēlarēnēn varlēĵēnē gº stermektedir (Mohan vd., 2011).

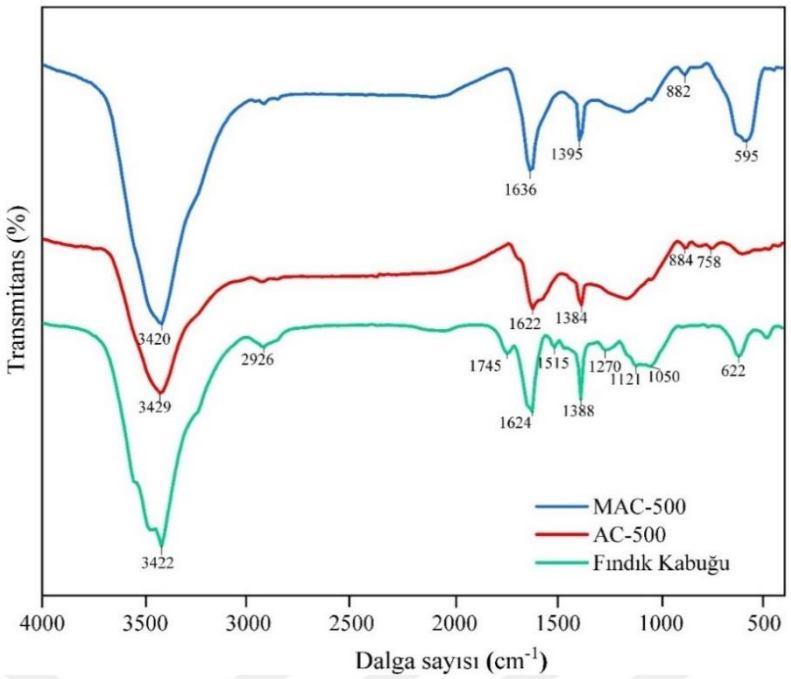
Fosforik asit ile aktive edilmiĸ olan aktif karbonun (AC-400), Fe(II) ve Fe(III) modifikasyonundan sonra y¿zey ºzelliklerini koruduĵu a-ēk-a gº r¿lmektedir.

J.Kazmierczak-Razna vd.nin yaptığı bir çalışmada, H_3PO_4 ile aktivasyonu sağlanan aktif karbonlarda fosforik bileşikler 1300-900 cm^{-1} arasında ayrışmakta olduğunu bildirmişlerdir (Kazmierczak-Razna vd., 2017). 1220-1180 cm^{-1}'deki tepe noktalarında, hidrojen bağlı P=O gerilme moduna, aromatik P-O-P bağlarındaki gerilme titreşimlerine ve P=OOH bağlarına ait olduğunu da aynı zamanda bildirmişlerdir. 1080-1070 cm^{-1} dalga sayıları arasında P-O-P polifosfat zincirindeki titreşime ait olduğu düşünülmektedir. AC-400'ün 1168 cm^{-1}'deki piki P=O bağlarının ve O-C gerilme titreşimlerinin (Luo vd., 2019) varlığını olduğunu göstermektedir. Fe-O bağlarının 500-750 cm^{-1} aralığında gözlemlendiği bildirilmiştir. MAC-400'ün FT-IR spektrumundaki 597 cm^{-1}'deki geniş pik yüzeyde Fe_3O_4'ten Fe-O bağının oluştuğunu göstermektedir (Altintig vd., 2018; Ece, 2021; Yaşmur ve Kaya, 2021).

Fındık kabuğu ve AC-400 'de görülmeyen 1100-1000 cm^{-1} arasında görülen iki pik aromatik eterlerdeki =C-O-C bağı titreşimine aittir (Barroso-Bogeat vd., 2016). Yüzeyde bulunan oksijen içerikli fonksiyonel grupların varlığı aktif karbon yüzeyini hidrofilik hale getirebilir, bu da MAC-400'ün yüzeyindeki elektrolit iyonlarının transfer direncinin azaltılmasına ve süperkapasitörlerin elektrot karbon malzemesi olarak elektrokimyasal özelliklerinin iyileştirilmesine katkıda bulunur (Cheng vd., 2021; Ding vd., 2021; Zheng vd., 2021).

7.2.10. Çinko klorür aktivasyonu ile üretilen aktif karbon ve manyetik aktif karbonların FT-IR analizi sonuçları

Fındık kabuğu, MAC-500 ve AC-500 örneklerinin FTIR analiz sonuçları şekil 7.20'de verilmiştir. Fındık kabuğunun FTIR analiz sonucunun bu başlık altında verilmesinin sebebi, bu biyokütleden üretilen aktif karbonların, fonksiyonel gruplara katkısını daha açık bir şekilde göstermek ve karşılaştırma yapmak için daha net sonuçları ortaya koymak içindir.



Şekil 7.20. MAC-500, AC-500 ve fındık kabuğ unun FTIR spektrumu.

Ham fındık kabuğ u, AC-500 ve MAC-500ğ¿n 3600-3200 cm^{-1}ğdeki oksijene adsorbe edilmiş hidrojen protonlarına ait O-H bağ larının varlığ ını gº stermektedir (Tangjuank vd., 2009). Şekil 7.19ğdeki MAC-500, AC-500 ve fındık kabuğ unun FT-IR spektrumunda sırasıyla 3422 cm^{-1}, 3429 cm^{-1} ve 3420 cm^{-1} dalga sayılarına karşılık gelip O-H bağ larının varlığ ını kanıtlamaktır. Ham fındık kabuğ undaki alkolik gruplara ve sel¿loziklere adsorbe edilmiş O-H gruplara aittir (Şencan vd., 2015). 2950-2800 cm^{-1} arasında gº zlenen pikler alifatik hidrokarbonların C-H gerilme titreşimlerine ait olduğ u bildirilmiştir (Kaya vd., 2018). Ham fındık kabuklarının 2926 cm^{-1}ğdeki dalga sayısı C-H bağ larının varlığ ını gº stermektedir. Tangjuank vd. 1630 cm^{-1}daki C=C titreşimlerine ait bağ lar olduğ unu yorumlamışlardır. Bu dalga sayısında aldehit, keton ve asit grupları oluşmaktadır (Kaya vd., 2018). Şekil 7.20ğde AC-500, MAC-500 ve fındık kabuklarının sırasıyla 1622 cm^{-1}, 1636 cm^{-1} ve 1624 cm^{-1} dalga sayılarındaki geniş pikler C=C bağ larına ait olduğ unu gº stermektedir. 1250-1000 cm^{-1} arasındaki pikler fenollerde, alkollerde ve eterlerde gerilen O-C bağ larına bağ lanabildiğ i bildirilmiştir (Yağ mur ve Kaya, 2021). Bu gruplar ham fındık kabuğ unun sel¿lozik yapısının doğ rulamaktadır. FT-IR spektrumunda Yağ mur vd.nin bildirdiğ i dalga sayısı aralığ ında, ham fındık kabuğ unda pikler gº r¿lmektedir. Literat¿rde 900-700 cm^{-1} arasında orta derecede C-H bağ larına atfedilmiştir (Yang vd., 2007). Şekil 7.20ğde MAC-500, 882 cm^{-1} ve AC-500 i-in 884 cm^{-1},758 cm^{-1} dalga sayılarındaki pikleri C-H bağ larının varlığ ını kanıtlamaktadır. FT-IR spektrumunda

ham fəndək kabuğu ile MAC-500 ve AC-500 karkədaktərədləğında piklerin azaldığı gör¿lmektedir. 1250-1000 cm^{-1} arasəndaki piklerde fenol, alkol ve eter gruplarənə olukturan pikler azalməktər. Bunun sebebi, karbonizasyon ve kimyasal aktivasyon s¿resinde kimyasal bağlarən koptuğu olarak d¿k¿n¿lmektedir. Fe-O bağlarənən 500-750 cm^{-1} aralığında gözlemlendiği bildirilmiktir (Yağmur ve Kaya, 2021). şekil 7.20'da MAC-500'¿n FT-IR spektrumundaki 595 cm^{-1}'deki genik piki Fe_3O_4'ten Fe-O bağənən oluktuğunu doğruladığənə göstermektedir.

7.3. Fosforik Asit Aktivasyonu ile ¦retilen Aktif Karbon ve Manyetik Aktif Karbonlarən Elektrokimyasal Analizleri

S¿perkapasitör elektrot malzemeleri olarak ¿retilen manyetik ve aktif karbon örnekleri i-in spesifik kapasitans, elektrolit direnci, y¿k aktarəm direnci ve % kapasitesini koruma gibi sonu-larə değerlendirmek i-in elektrokimyasal analizleri yapəlməktər. Elektrokimyasal Emdepans Spektroskopisi (EIS)'de diren- değerleri uygun devre modeli ile modellenip değerlendirilmiktir. Döng¿sel voltametri (CV) analizinde, s¿perkapasitör elektrotlar karj(adsorpsiyon) ve dekarj(desorpsiyon) iklemleri sonucu spesifik kapasitans değerleri hesaplanməktər. Galvanostatik şarj-Dekarj (GCD) analizlerinde, sabit akəmda ve belirli bir -alək potansiyel aralığında elektrotlar karj ve dekarj edilmik, spesifik kapasitans değerleri hesaplanmək ve spesifik kapasitans değeri en y¿ksek bulunan elektrot malzemesi i-in kapasitans değerinin % ka-ənə koruduğunu belirlemek i-in karj-dekarj döng¿ denemeleri yapəlməktər.

7.3.1. PTFE bağlayəcəsə ile hazərlanan AC-400 ve MAC-400 elektrotlarənən döng¿sel voltametri (CV) analizi sonu-larə

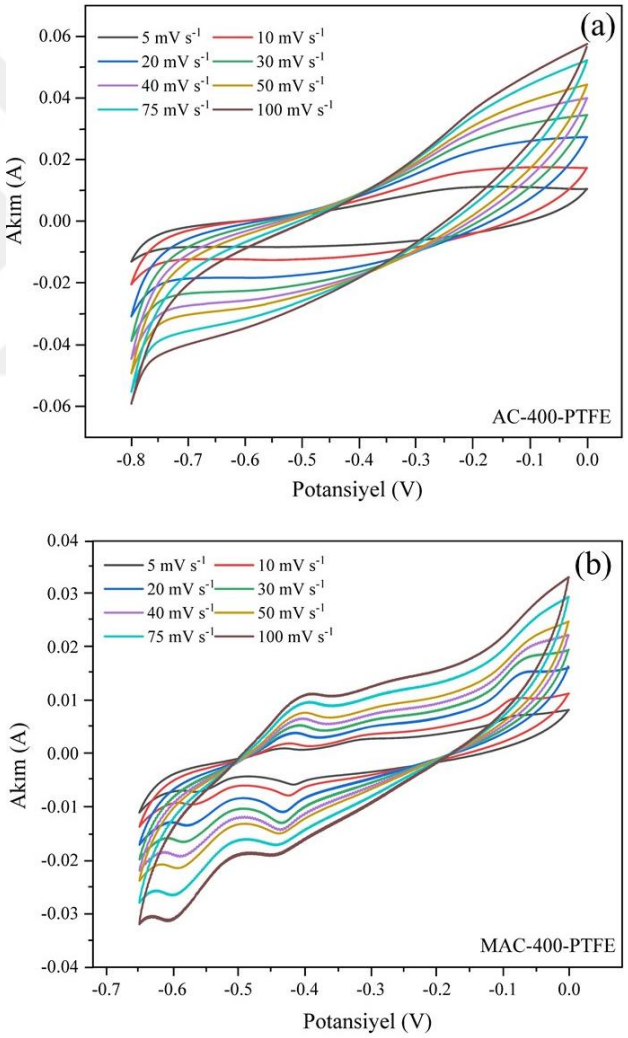
Aktif karbon elektrotlarən döng¿sel voltametri eğrileri şekil 7.21'de sunulmuktur. Aktif karbon elektrotlarən döng¿sel voltametri analizinde farklə tarama hözlarənda -alədəlməktər. AC-400 elektrotunun -ift tabaka kapasitif davranəkə olan yarə-dikdörtgen keklini koruduğu gör¿lmektedir. MAC-400 elektrotu ı 0.40 V ve ı 0.60 V potansiyel aralığında indirgenme ve y¿kseltgenme pikleri göstermik ve dikdörtgen keklinden

sapmaktır. Gözlemlenen indirgenme/yükseltgenme pikleri MAC-400 elektrotunun manyetik özelliklerine bağlanabilir. Negatif -alınma potansiyel aralıklarında, faradaik süre-lerin meydana gelebileceği ve sözde kapasitans etkisi oluşturulabileceği bildirilmiştir (Volfkovich, 2021). Tarama hızının artmasıyla MAC-400'e göre AC-400 elektrotunun akım yanıtının arttığı şekil 7.21'de görülmektedir. Aynı zamanda tarama hızının artmasıyla CV eğrileri arasında kalan alanın arttığı gözlemlenmiştir.

CV analizi ile elde edilen spesifik kapasitans değerleri çizelge 7.9'da verilmiştir. Çizelge 7.9'daki spesifik kapasitans değerleri incelendiğinde, -alınandan tüm tarama hızlarında MAC-400 elektrotu AC-400 elektrotuna göre düşük kapasitans değerleri göstermiştir. 5 mV/s tarama hızında, AC-400 elektrotu 95,30 F/g spesifik kapasitans değeri elde edilmiştir. MAC-400 elektrotu ise 32,6 F/g spesifik kapasitans değeri ile AC-400'e göre daha düşük bir değere sahip olmaktadır. MAC-400 elektrotunun S_{BET} yüzey alanı, AC-400 elektrotuna göre daha düşüktür (çizelge 7.3). MAC-400 elektrotunun AC-400 elektrotuna göre daha düşük spesifik kapasitans değeri göstermesi, düşük yüzey alanına sahip olması ve demir oksit partiküllerinin aktif karbon gözeneklerini tıkamasına bağlanabilir. Aynı zamanda artan tarama hızı ile her iki elektrot için de spesifik kapasitans değerinin azaldığı görülmektedir. Düşük tarama hızlarında, elektrolitten gelen iyonların elektrot malzemesindeki gözeneklerin iç kısmına adsorbe olmak için yeterli zamanı bulabilmektedir. Bunun sonucu olarak depolanan yük miktarı artmakta ve spesifik kapasitans değerine daha fazla katkı sağlayabilmektedir. Tam tersi durumda, yüksek tarama hızlarında, iyonların verimliliği azalmakta ve düşük kapasitans değerinin elde edilmesine neden olmaktadır (Raza vd., 2018).

¢izelge 7.9. PTFE baĵlayēcēsē kullanēlarak hazērlanan AC-400 ve MAC-400 elektrotlarēnēn CV eĵrilerinden hesaplanan spesifik kapasitans deĵerleri.

	(0,00)V-(ĭ0,80)V AC-400-PTFE	**(0.0)V-(ĭ0,65)V MAC-400-PTFE**
Tarama Hēzē(mV/s)	**Spesifik Kapasitans (F/g)**	**Spesifik Kapasitans (F/g)**
5	95,30 Ñ0,305	32,6 Ñ0,206
10	66,99 Ñ0,486	21,0 Ñ0,312
20	43,05 Ñ0,403	14,2 Ñ0,105
30	31,91 Ñ0,216	11,5 Ñ0,113
40	25,21 Ñ0,117	9,9 Ñ0,075
50	20,67 Ñ0,080	8,8 Ñ0,060
75	13,97 Ñ0,068	7,1 Ñ0,063
100	10,50 Ñ0,028	6,2 Ñ0,030



ķekil 7.21. PTFE baĵlayēcēsē ile hazērlanan elektrotlarēn CV eĵrileri a) AC-400 b) MAC-400

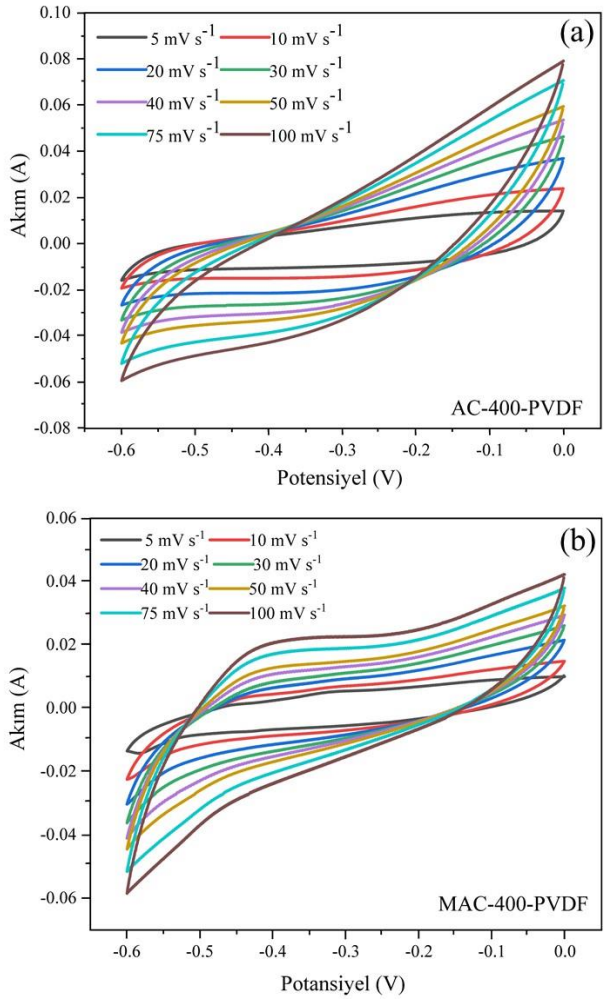
7.3.2. PVDF baÞlayëcë ile hazërlanan AC-400 ve MAC-400 elektrotlarën dº ng¿sel voltametri (CV) analizi sonu-larë

BaÞlayëcë olarak PVDF kullanëlarak ¿retilen aktif karbon elektrotlarën dº ng¿sel voltametri eÞrileri ßekil 7.22âde verilmißtir. Elektrotlarën -alëßma potansiyel aralëÞë 0,0V ile ï0,60 V olarak belirlenmißtir, bu potansiyel aralëÞënda dº ng¿sel voltametri analizleri yapëlmëßtër. Her iki elektrot artan tarama hëzlarënda -ift tabaka kapasitº rler i-in gº zlemlenen dikdº rtgen ßeklini koruduÞu gº r¿lmektedir. MAC-400 elektrotunun PVDF baÞlayëcësënda tepe noktasë gº stermemißtir. PTFE baÞlayëcë kullanëlarak hazërlanan elektrotlardaki CV eÞrilerindeki gibi artan tarama hëzë ile akëm cevabë da arttëÞë gº r¿lmektedir.

¢izelge 7.10 incelendiÞinde, AC-400 elektrotunun en d¿ß¿k tarama hëzënda (5 mV/s) 102,93 F/g spesifik kapasitans deÞerine sahip olarak, en y¿ksek kapasitans deÞerini gº stermißtir. MAC-400 elektrotu ise 5 mV/s tarama hëzënda 74,66 F/g spesifik kapasitans deÞeri ile AC-400 elektrotuna gº re daha d¿ß¿k kapasitif performans sergilemißtir. Ayrëca -izelgeye bakëldëÞënda artan tarama hëzëile spesifik kapasitans deÞerinin de azaldëÞëa-ëk-a gº r¿lmektedir.

¢izelge 7.10. PVDF baÞlayëcësë kullanëlarak hazërlanan AC-400 ve MAC-400 elektrotlarëndën CV eÞrilerinden hesaplanan spesifik kapasitans deÞerleri.

	(0,00)V-(ï 0,60)V	**(0,00)V-(ï 0,60)V**
	AC-400-PVDF	**MAC-400-PVDF**
Tarama Hëzë(mV/s)	**Spesifik Kapasitans (F/g)**	**Spesifik Kapasitans (F/g)**
5	102,93 Ñ3,364	74,66 Ñ0,922
10	68,64 Ñ0,090	48,46 Ñ0,325
20	44,56 Ñ0,286	30,82 Ñ0,335
30	34,20 Ñ0,167	24,44 Ñ0,198
40	27,96 Ñ0,097	21,48 Ñ0,120
50	23,71 Ñ0,004	19,48 Ñ0,150
75	17,24 Ñ0,003	16,19 Ñ0,066
100	13,74 Ñ0,052	14,27 Ñ0,038



Şekil 7.22. PVDF bağlayıcısı ile hazırlanan elektrotların CV eğrileri a) AC-400 b) MAC-400

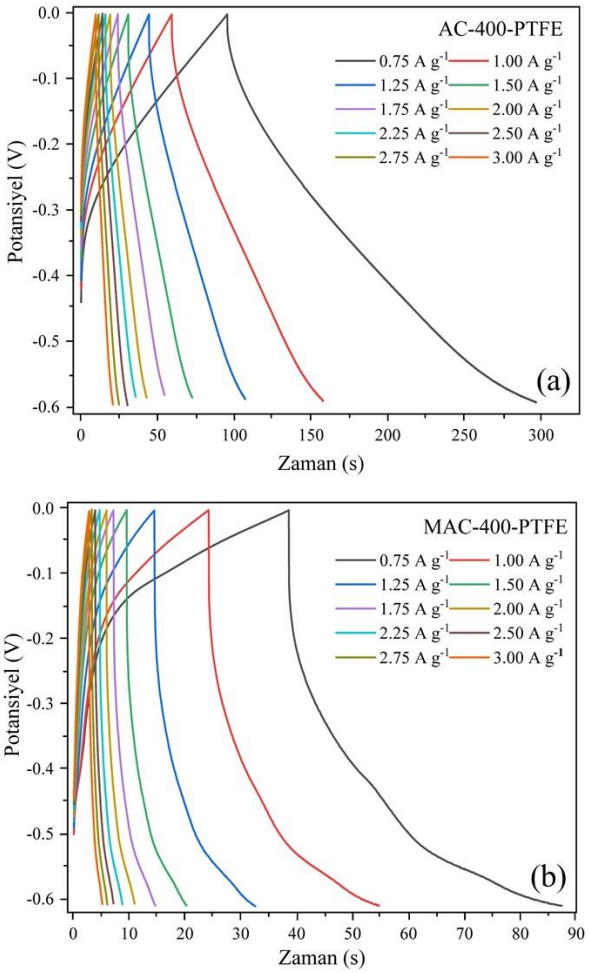
7.3.3. PTFE bağlayıcı ile hazırlanan AC-400 ve MAC-400 elektrotlarının galvanostatik şarj-deşarj (GCD) analizi sonuçları

Bağlayıcı olarak PTFE kullanılan aktif karbon elektrotlarının galvanostatik şarj-deşarj eğrileri şekil 7.23'de verilmiştir. Her iki elektrot için 0,75 A/g ile 3,00 A/g arasında değişen akım yoğunluklarında şarj-deşarj analizleri yapılmıştır. AC-400 elektrotu MAC-400 elektrotuna göre elektrik çift kapasitör davranışından gösteren daha iyi bir simetrik üçgen şekli sergilemiştir. Diğer bir deyişle, AC-400 elektrotu için elde edilen şarj ve deşarj eğrilerinin daha düzgün olduğu gözlemlenirken, MAC-400 elektrotu için elde edilen şarj ve deşarj eğrilerinde görülen bükülmelerle üçgen şeklinden saplamalar gözlemlenmiştir.

ķarj-deкarj analizlerinde -alēкdan en d¿к¿k akēm yoĵunluĵu deĵerinde (0,75 A/g) AC-400 elektrotunun en y¿ksek spesifik kapasitans deĵerine sahip olduĵu ¢izelge 7.11ôde g°r¿lmektedir. Aynē akēm yoĵunluĵunda MAC-400 elektrotunun spesifik kapasitans deĵeri 76,23 F/gôa d¿кm¿кt¿r. Artan akēm yoĵunluĵu ile birlikte her iki elektrotta da spesifik kapasitans deĵerinin keskin bir кekilde d¿кt¿ĵ¿ g°r¿lmektedir. Akēm yoĵunluĵunun artmasēyla birlikte spesifik kapasitanstaki g°zlemlenen d¿к¿к MAC-400 elektrotu AC-400 elektrotuna g°re daha fazladēr. Bunun sebebi, MAC-400 elektrotu i-in ¢izelge 7.3ôde verilen BET analizi sonu-larēndan g°zlemlenen spesifik y¿zey alanēn d¿кmesi ve SEM analizlerinden g°zlemlenen demir oksit partik¿llerinin g°zenekleri tēkamasē sebebiyle elektrolit iyonlarēn kolaylēkla кarj ve deкarj olamamasē olarak d¿к¿n¿lmektedir.

¢izelge 7.11. PTFE baĵlayēcēsē kullanēlarak hazērlanan AC-400 ve MAC-400 elektrotlarēnēn GCD eĵrilerinden hesaplanan spesifik kapasitans deĵerleri.

	(0,00)V-(ĩ 0,60)V	**(0,00)V-(ĩ 0,60)V**
	AC-400-PTFE	**MAC-400-PTFE**
Akēm Yoĵunluĵu (A/g)	**Spesifik Kapasitans (F/g)**	**Spesifik Kapasitans (F/g)**
0,75	247,82 Ñ7,548	76,23 Ñ6,29
1,00	165,79 Ñ1,653	66,31 Ñ9,91
1,25	131,72 Ñ1,615	48,20 Ñ10,13
1,50	105,77 Ñ0,915	28,96 Ñ0,11
1,75	90,90 Ñ1,157	22,87 Ñ0,23
2,00	80,22 Ñ0,895	19,03 Ñ1,82
2,25	77,13 Ñ11,124	16,81 Ñ1,19
2,50	68,73 Ñ0,313	14,78 Ñ0,95
2,75	60,98 Ñ0,355	13,45 Ñ0,55
3,00	56,64 Ñ0,782	12,9 Ñ1,14



Şekil 7.23. PTFE bağlayıcısı ile hazırlanan elektrotların galvanostatik şarj-deşarj eğrileri a) AC-400 b) MAC-400

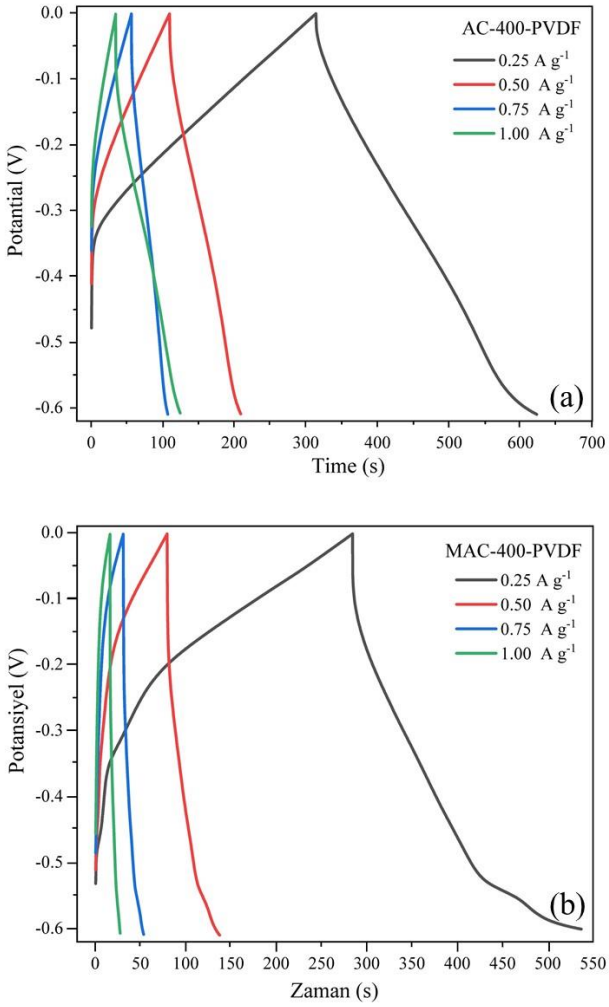
7.3.4. PVDF bağlayıcı ile hazırlanan AC-400 ve MAC-400 elektrotlarının galvanostatik şarj-deşarj (GCD) analizi sonuçları

PVDF bağlayıcı kullanılarak hazırlandığı AC-400 ve MAC-400 elektrotlarının şarj-deşarj analizi sonuçları şekil 7.24'de verilmiştir. Bu analizler 0,00 V ile – 0,60 V arasında gerçekleştirilmiş ve 0,25 A/g ile 1,00 A/g akım yoğunluklarında alınmıştır. PTFE bağlayıcısı kullanılarak üretilen aktif karbon elektrotlarındaki gibi şekil 7.23'de görüldüğü üzere AC-400 elektrotu MAC-400 elektrotuna göre daha simetrik bir üçgen şekli sergilemiştir. Bu da AC-400 elektrotunun daha iyi bir şekilde tersine çevrilebilirliği göstermektedir. MAC-400 elektrotu belirgin bir şekilde IR düşüşü sergilemektedir.

AC-400 ve MAC-400 elektrotlarının spesifik kapasitans değerleri çizelge 7.12'de verilmiştir. Her iki elektrot da kullanılan en düşük akım yoğunluğunda (0,25 A/g) en yüksek spesifik kapasitans değerlerini göstermiştir. AC-400 elektrotu 126,86 F/g ve MAC-400 63,90 F/g olarak spesifik kapasitans değerleri hesaplanmıştır. PTFE bağlayıcı kullanılarak üretilen elektrotlardaki gibi AC-400 ve MAC-400 elektrotlarında da akım yoğunluğu arttıkça spesifik kapasitans değerlerinde düşük göz önünde bulundurulmuştur. Aynı zamanda AC-400 elektrotu büyük akım yoğunluklarında MAC-400 elektrotuna göre daha yüksek spesifik kapasitans değerleri göstermiştir. Burada da aynı şekilde MAC-400 örneğinin manyetik aktif karbon üretimi sonrasında demir oksit partiküllerinin mikro ve mezo gözenekleri tıkamış olmasının kapasitif davranışına etkilediği düşünülmektedir.

Çizelge 7.12. PVDF bağlayıcısı kullanılarak hazırlanan AC-400 ve MAC-400 elektrotlarının GCD eğrilerinden hesaplanan spesifik kapasitans değerleri.

	(0,00)V-(−0,60)V	**(0,00)V-(−0,60)V**
	AC-400-PVDF	**MAC-400-PVDF**
Akım Yoğunluğu (A/g)	**Spesifik Kapasitans (F/g)**	**Spesifik Kapasitans (F/g)**
0,25	126,87±0,39	63,90±1,13
0,50	79,60±2,05	43,12±3,47
0,75	60,75±1,76	32,29±3,78
1,00	48,78±1,383	32,60±7,79



Şekil 7.24. PVDF bağlayıcısı ile hazırlanan elektrotların galvanostatik şarj-deşarj eğrileri a) AC-400 b) MAC-400

7.4. Çinko Klorür Aktivasyonu İle Üretilen Aktif Karbon ve Manyetik Aktif Karbonların Elektrokimyasal Analizleri

Süperkapasitör elektrot malzemeleri olarak üretilen çinko klorür ($ZnCl_2$) kimyasal aktivasyon ajanı kullanılarak hazırlanan aktif karbon ve manyetik aktif karbon örnekleri için spesifik kapasitans, elektrolit direnci, yük aktarım direnci ve % kapasitesini koruma gibi sonuçları değerlendirmek için elektrokimyasal analizleri yapılmıştır. Elektrokimyasal Emdepans Spektroskopisi (EIS)ünde direnç değerleri uygun devre modeli ile modellenip değerlendirilmiştir. Döngüsel voltametri (CV) analizinde, süperkapasitör elektrotlar şarj (adsorpsiyon) ve deşarj (desorpsiyon) işlemleri sonucu spesifik kapasitans değerleri hesaplanmıştır. Galvanostatik Şarj-Deşarj (GCD) analizlerinde, sabit akımda ve belirli bir

-alēkma potansiyel aralęğında elektrotlar ĸarj ve deĸarj edilmiĸ, spesifik kapasitans değerleri hesaplanmāĸ ve spesifik kapasitans değeri en yüksek bulunan elektrot malzemesi için kapasitans değerinin % kaçını koruduğunu belirlemek için ĸarj-deĸarj döngü denemeleri yapılmıştır.

7.4.1. PTFE bağlayıcısı ile hazırlanan AC-500 ve MAC-500 elektrotlarının döngüsel voltametri (CV) analizi sonuçları

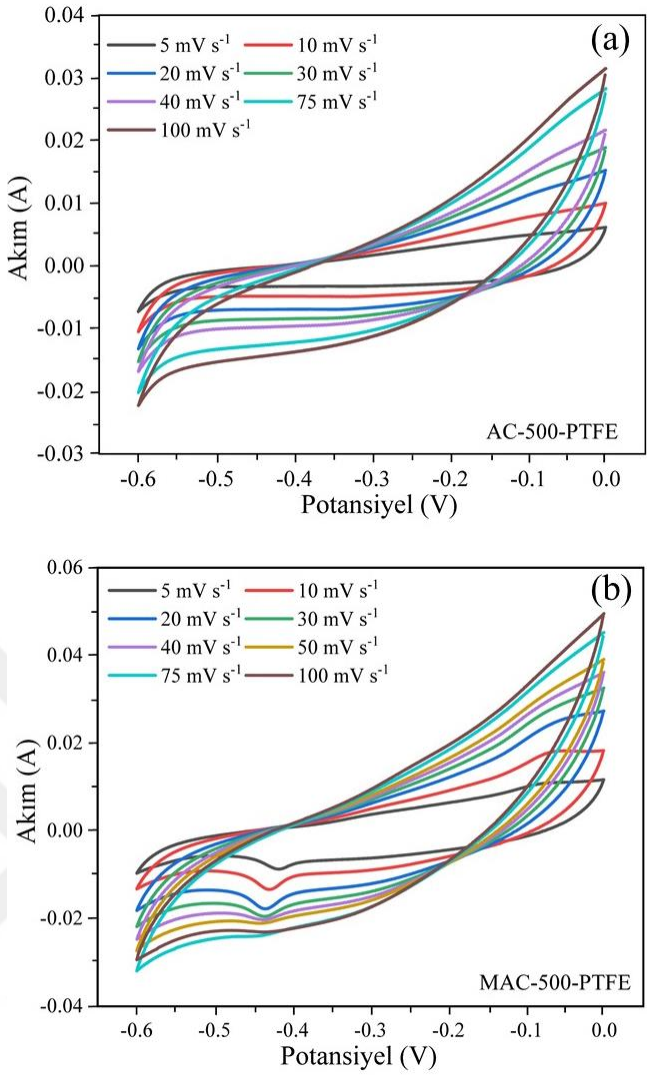
AC-500 ve MAC-500 elektrotlarının CV eğrileri şekil 5.25'de verilmiĸtir. Şekil 7.25a incelendiğinde, 0.0 ile ı 0.60 V -alēkma potansiyel aralęğında AC-500 elektrotunun yarı-dikdörtgen ĸekil sergilemesi -ift tabaka kapasitif davranıĸı gösterdiği kanıtlamaktadır. Aynı zamanda bu yarı-dikdörtgen ĸekil -ift tabaka kapasitörlerin -ift tabaka oluĸumunu da desteklemektedir. Şekil 7.25b'ye bakıldığında, MAC-500 elektrotunun -0,30 V ile -0,50 V potansiyel aralęğında indirgenme ve yükseltgenme pikleri göstermiĸ ve yarı-dikdörtgen ĸekilden sapma gözlemlenmiĸtir. Bu sapmanın sebebi aktif karbonun manyetik özelliklerinden kaynaklabileceği düşünülmektedir. Oluĸan bu tepe noktaları redoks pikleri olarak tanımlanmaktadır. Redoks pikleri, aktif karbonun yüzey fonksiyon grup dağılımları ile ilgili olup, daha -ok oksijenli grupların varlığı ile oluĸmaktadır (Rawal vd., 2018). Aynı zamanda FT-IR ve EDS sonuçları bu sebebi desteklemektedir. EDS sonucunda, artan % O içeriği ve FT-IR sonucunda Fe-O bağlarının piklerde görülmesi, oksijen içeren grupların arttığını göstermektedir. Şekil 7.25a'da farklı tarama hızlarında -alēkdığı ve bu tarama hızlarının akım cevabı ile değiĸerek CV eğrilerinde alanın arttığı açıkça görülmektedir.

Çizelge 7.13'deki tarama hızlarına karşı spesifik kapasitans sonuçları değerlendirildiğinde, en yüksek tarama hızı olan 5 mV/s'de en kapasitans değerinin bulunduğu görülmektedir. Fakat tüm tarama hızlarında, MAC-500 elektrotu AC-500'e göre daha yüksek spesifik kapasitans değerleri elde edilmiĸtir. MAC-500'ün BET analizi sonuçları tekrar değerlendirildiğinde, spesifik yüzey alanı AC-500'e göre azalmasına rağmen yüksek kapasitans değeri ile sonuçlanmıştır. Bunun sebebi, daha iyi bir gözenek yapısına sahip olduğu ile açıklanmaktadır. AC-500 daha iyi mikro gözenekli bir yapıya sahipken, MAC-500 mezo gözenek oluĸumuna katkısı daha fazladır. Bu sebeple elektrolitten gelen iyonlar daha geniĸ gözeneklere eriĸebilir olması sebebiyle, iyi bir

kapasitif davranēk sergilemiktir. Aynē zamanda, artan tarama hēzē ile t¿m elektrotlarda kapasitans deĵerinin net bir ĸekilde d¿ĸ¿ĸ¿ ¢izelge 7.13ôde g°r¿lmektedir. D¿ĸ¿k tarama hēzlarēnda elektrolitten gelen iyonlarēn elektrot malzemesindeki g°zeneklerin i- kēsmēna adsorbe olmak i-in yeterli zamanē bulabilmesidir.

¢izelge 7.13. PTFE baĵlayēcēsē kullanēlarak hazērlanan AC-500 ve MAC-500 elektrotlarēnēn CV eĵrilerinden hesaplanan spesifik kapasitans deĵerleri.

	(0,00)V-(ĭ 0,60)V	**(0,00)V-(ĭ 0,60)V**
	AC-500-PTFE	**MAC-500-PTFE**
Tarama Hēzē (mV/s)	**Spesifik Kapasitans (F/g)**	**Spesifik Kapasitans (F/g)**
5	57,34 Ñ0,282	73,10 Ñ0,973
10	41,06 Ñ0,223	52,34 Ñ0,288
20	27,01 Ñ0,161	33,67 Ñ0,135
30	20,51 Ñ0,065	25,02 Ñ0,043
40	16,67 Ñ0,033	19,99 Ñ0,025
50	-	16,75 Ñ0,006
75	10,18 Ñ0,008	12,14 Ñ0,012
100	8,14 Ñ0,040	9,22 Ñ0,010



Şekil 7.25. PTFE bağlayıcısı ile hazırlanan elektrotların CV eğrileri a) AC-500 b) MAC-500

7.4.2. PVDF bağlayıcısı ile hazırlanan AC-500 ve MAC-500 elektrotlarının döngüsel voltametri (CV) analizi sonuçları

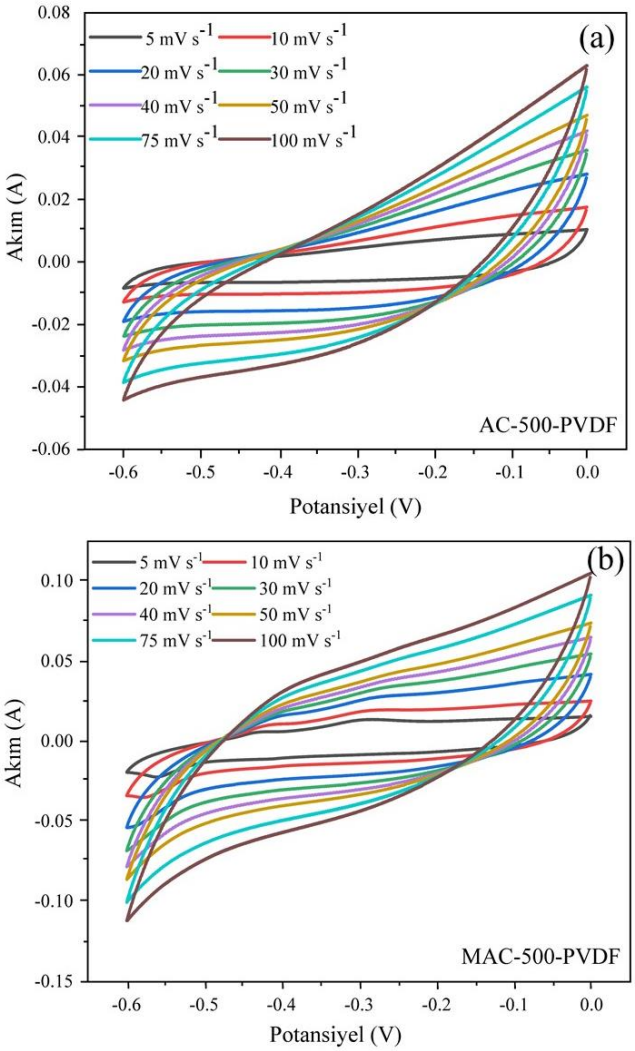
PVDF bağlayıcısı kullanılarak üretilen AC-500 ve MAC-500 elektrotlarının CV eğrileri şekil 7.26'da sunulmuştur. şekle bakıldığında, AC-500 ve MAC-500 elektrotlarının çift tabaka oluşumunu sağlayan yarı-dikdörtgen şeklini koruduğu gözlemlenmiştir. MAC-500'ün artan tarama hızındaki akım cevabı ile birlikte CV eğrileri arasında kalan alanın artması, AC-500 elektrotuna göre daha fazla olduğu şekil 7.26'da görülmektedir. şekil 7.26b'de MAC-500'ün CV eğrilerine bakıldığında, herhangi bir

indirgenme ve y¿kseltgenme pikleri gº r¿lmemektedir. Bunun sebebi, PVDF baî layācēsēnēn MAC-500ôç¿n elektrik iletkenliî ini iyilekтirmesi olarak d¿ķç¿n¿lmektedir.

¢izelge 7.14 incelendiî inde, artan tarama hēzē ile spesifik kapasitans deî erlerindeki azalēk net bir ķekilde gº r¿lmektedir. En d¿ķç¿k tarama hēzē olan 5 mV/s óde AC-500ôç¿n spesifik kapasitans deî eri 93,03 F/g, MAC-500ôç¿n ise 118,01 F/g olarak hesaplanmēķtēr. MAC-500 t¿m tarama hēzlarēnda AC-500ôe gº re daha y¿ksek spesifik kapasitans deî erine sahiptir. Aynē zamanda her iki elektrotun da artan tarama hēzlarē ile kapasitans deî erlerindeki d¿ķç¿ķ gº r¿lmektedir. Bunun sebebi, d¿ķç¿k tarama hēzlarēnda elektrolitten gelen iyonlarēn elektrot malzemesindeki gº zeneklerin i- kēsmēna adsorbe olmak i-in yeterli zamanē bulabilmesidir. AC-400 ve MAC-400 elektrotlarēndaki CV sonu-larēnda yazēlan yorumla ekdeî er kabul edilebilmektedir.

¢izelge 7.14. PVDF baî layācēsē kullanēlarak hazērlanan AC-500 ve MAC-500 elektrotlarēnēn CV eî rilerinden hesaplanan spesifik kapasitans deî erleri.

	(0,00)V-(ĭ 0,60)V	**(0,00)V-(ĭ 0,60)V**
	AC-500-PVDF	**MAC-500-PVDF**
Tarama Hēzē(mV/s)	**Spesifik Kapasitans (F/g)**	**Spesifik Kapasitans (F/g)**
5	93,03 Ñ1,107	118,01 Ñ1,304
10	72,72 Ñ0,231	90,75 Ñ0,203
20	51,20 Ñ0,251	65,43 Ñ0,276
30	40,14 Ñ0,169	52,55 Ñ0,200
40	33,16 Ñ0,094	44,65 Ñ0,140
50	28,32 Ñ0,087	39,32 Ñ0,121
75	20,78 Ñ0,004	30,64 Ñ0,093
100	16,55 Ñ0,037	25,76 Ñ0,033



Şekil 7.26. PVDF bağlayıcısı ile hazırlanan elektrotların CV eğrileri a) AC-500 b) MAC-500

7.4.3. PTFE bağlayıcı ile hazırlanan AC-500 ve MAC-500 elektrotlarının galvanostatik karj-deşarj (GCD) analizi sonuçları

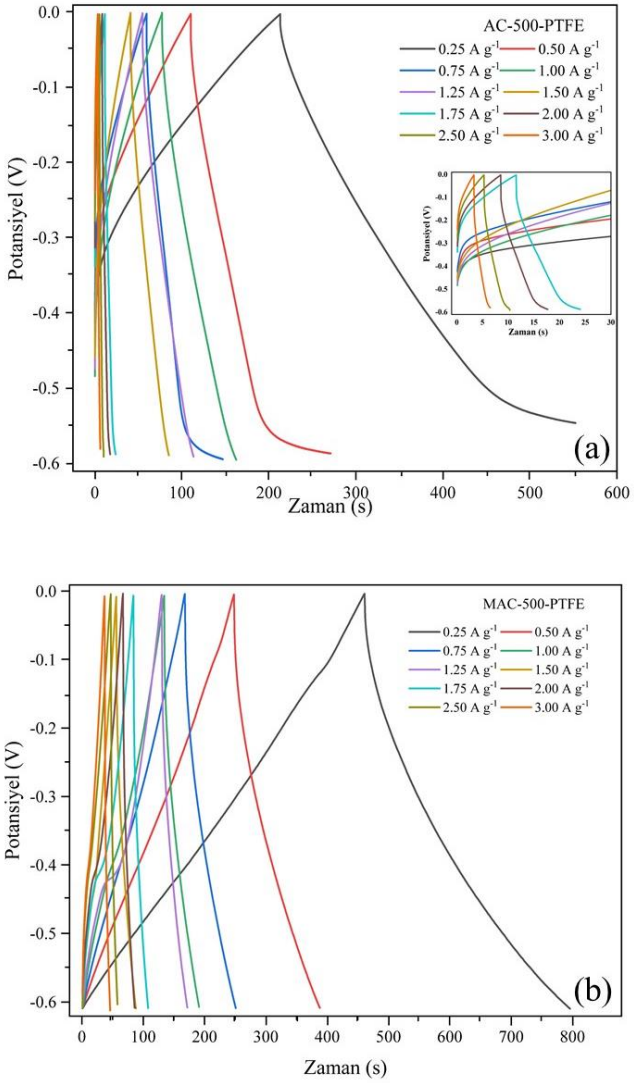
AC-500 ve MAC-500 elektrotlarının galvanostatik karj-deşarj eğrileri şekil 7.27'de sunulmuştur. Şarj-deşarj analizleri, 0,25 A/g ile 3,00 A/g arasında değişken akım yoğunluklarında yapılmıştır. MAC-500 elektrotu AC-500 elektrotuna göre daha iyi bir simetrik üçgen şekli sergilediği görülmektedir. Aynı zamanda MAC-500 elektrotunun GCD eğrilerinde, çalışılan akım yoğunluklarının net bir şekilde görülmektedir. AC-500'de ise bükülmeler gözlemlenmiştir. Deşarj süresi spesifik kapasitans hesaplanmasında bir etkiye sahip olmaktadır. AC-500 elektrotunun GCD eğrilerine bakıldığında, yüksek akım yoğunluklarına çıkıldığında, karj-deşarj döngüsünün MAC-500'e göre kısaldığı

gº r¿lmektedir. Dolayısıyla spesifik kapasitans değerinin de daha d¿ş¿k -ıkacağı d¿ş¿n¿lmektedir.

Çizelge 7.15'de farklı akım yoğunluklarında hesaplanan spesifik kapasitans değerleri verilmiştir. En d¿ş¿k akım yoğunluğunda AC-500 elektrotunun spesifik kapasitans değeri 149,3 F/g iken, MAC-500'ün 194,22 F/g olarak hesaplanmıştır. Artan akım yoğunluğu ile birlikte her iki elektrotta da spesifik kapasitans değerinin net bir şekilde d¿ştüğü gº r¿lmektedir. Bu d¿ş¿ş¿n sebebi, aktif karbonun gº zeneklerine elektrolit iyonların rahat-a erişebilir olmamasından kaynaklanmaktadır (Inal ve Aktas, 2020). MAC-500 elektrotunun t¿m akım yoğunluklarında AC-500 elektrotuna gº re y¿ksek -ıkmasının sebebi, AC-500'e gº re gelişmiş mezo gº zenek yapısından kaynaklanabileceği d¿ş¿n¿lmektedir. Aktif karbondaki mezo gº zenek hacminin elektrolitten dif¿ze olmuş iyonların, daha geniş gº zeneklere erişebilirliğine izin vermesi olduğu bildirilmiştir (Pandolfo ve Hollenkamp, 2006).

Çizelge 7.15. PTFE bağlayıcısı kullanılarak hazırlanan AC-500 ve MAC-500 elektrotlarının GCD eğrilerinden hesaplanan spesifik kapasitans değerleri.

	(0,00)V-(ğ 0,60)V	**(0,00)V-(ğ 0,60)V**
	AC-500-PTFE	**MAC-500-PTFE**
Akım Yoğunluğu (A/g)	**Spesifik Kapasitans (F/g)**	**Spesifik Kapasitans (F/g)**
0,25	149,30 Ñ6,131	194,22 Ñ7,229
0,50	192,70 Ñ19,640	124,47 Ñ1,378
0,75	131,0 Ñ20,510	119,75 Ñ14,118
1,00	138,90 Ñ3,320	159 Ñ15,248
1,25	122,80 Ñ1,574	112,98 Ñ2,728
1,50	110,20 Ñ1,389	91,75 Ñ0,935
1,75	37,47 Ñ0,521	78,16 Ñ0,630
2,00	30,20 Ñ0,666	68,33 Ñ0,503
2,50	25,70 Ñ0,697	52,63 Ñ0,196
3,00	16,20 Ñ0,472	42,83 Ñ0,235



Şekil 7.27. PTFE bağlayıcısı ile hazırlanan elektrotların galvanostatik şarj-deşarj eğrileri a) AC-500 b) MAC-500

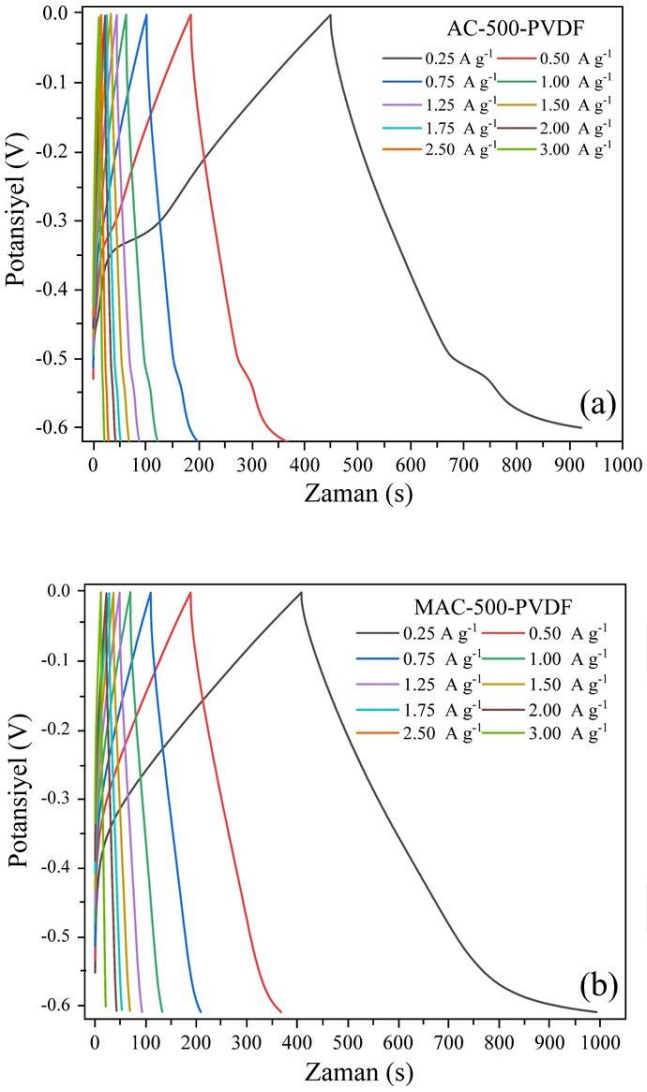
7.4.4. PVDF bağlayıcı ile AC-500 ve MAC-500 elektrotlarının galvanostatik şarj-deşarj (GCD) analizi sonuçları

Bağlayıcı olarak PVDF'nin kullanıldığı elektrotların şekil 7.28'de galvanostatik şarj-deşarj eğrileri sunulmuştur. Şarj-deşarj analizleri, 0,75 A/g ile 3,00 A/g arasında değişen akım yoğunluklarında yapılmıştır. MAC-500 elektrotu AC-500 elektrotuna göre daha iyi bir simetrik üçgen şekli sergilediği görülmektedir. Şekil 7.28'deki iki elektrotun GCD eğrileri incelendiğinde, salınımdan bağımsız akım yoğunluklarının net bir şekilde ayırt edilebildiği görülmektedir. Benzer eğriler sergiledikleri ve şarj-deşarj süreleri incelendiğinde, birbirine yakın değerler çıkacağı tahmin edilmektedir.

¢izelge 7.16ôde AC-500 ve MAC-500ô¿n farklē akēm yoĵunluklarēndaki spesifik kapasitans sonu-larē verilmiĸtir. En d¿ĸ¿k akēm yoĵunluĵunda AC-500 elektrotunun spesifik kapasitans deĵeri 149,3 F/g iken, MAC-500ô¿n 213,33 F/g olarak hesaplanmēĸtēr. ¢izelge 7.16ôde akēm yoĵunluklarē ile kapasitans deĵerleri karĸēlaĸtērēldeĵēnda, akēm yoĵunluĵunu artēĸē kapasitans deĵerlerini d¿ĸ¿rd¿ĵ¿ g° r¿lmektedir. Elektrolit iyonlarēnēn dif¿zyonu y¿ksek akēm yoĵunluklarēnda zorlaĸabileceĵi bildirilmiĸtir (Decaux vd., 2014).

¢izelge 7.16. PVDF baĵlayēcēsē kullanēlarak hazērlanan AC-500 ve MAC-500 elektrotlarēnēn GCD eĵrilerinden hesaplanan spesifik kapasitans deĵerleri.

	(0,00)V-(ĭ 0,60)V	**(0,00)V-(ĭ 0,60)V**
	AC-500-PVDF	**MAC-500-PVDF**
Akēm Yoĵunluĵu (A/g)	**Spesifik Kapasitans (F/g)**	**Spesifik Kapasitans (F/g)**
0,25	242,86 Ñ3,484	213,33 Ñ16,875
0,50	149,92 Ñ3,361	138,30 Ñ8,913
0,75	126,34 Ñ5,527	122,01 Ñ20,695
1,00	103,24 Ñ0,396	88,72 Ñ3,435
1,25	80,56 Ñ1,087	83,27 Ñ0,873
1,50	72,34 Ñ0,387	73,00 Ñ1,919
1,75	66,12 Ñ0,335	66,55 Ñ2,079
2,00	55,86 Ñ0,249	60,88 Ñ0,168
2,50	57,06 Ñ1,729	50,48 Ñ1,828
3,00	47,29 Ñ0,060	44,71 Ñ1,800

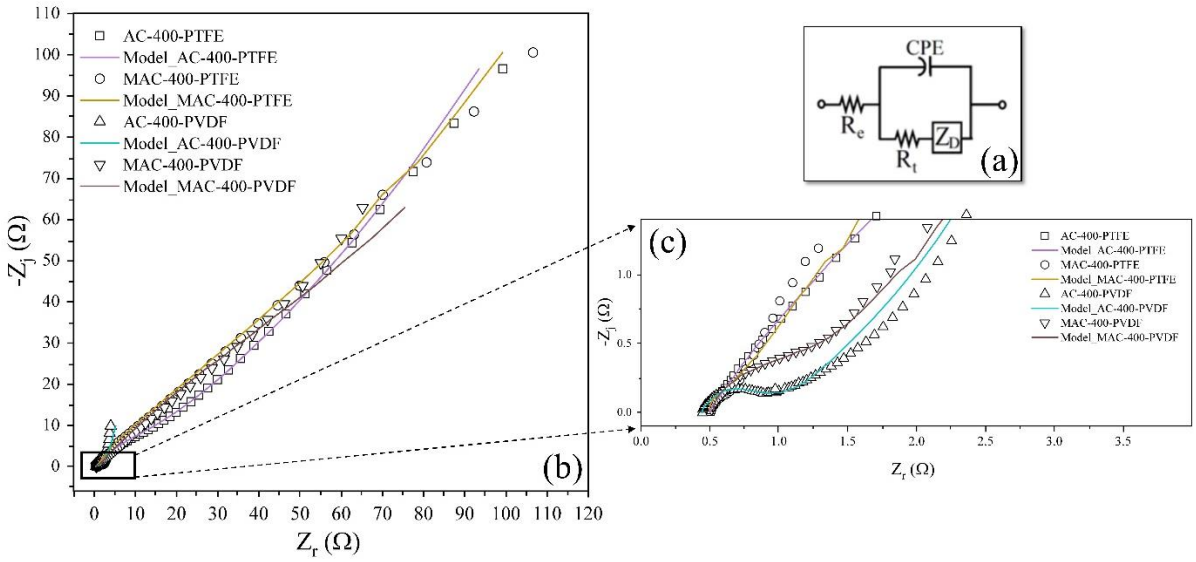


Şekil 7.28. PVDF bağlayıcısı ile hazırlanan elektrotların galvanostatik şarj-deşarj eğrileri a) AC-500 b) MAC-500

7.5. Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) Analizleri

Aktivasyonu H_3PO_4 ile sağlanarak üretilen aktif karbondan oluşan elektrotların EIS analizinden elde edilen Nyquist eğrileri şekil 7.29'da sunulmuştur. Nyquist eğrileri EDLC'ler için, frekans değerlerine göre üç farklı bölgeden oluşmaktadır. Yüksek frekans bölgesindeki ilk dirençten EDLC'lerin elektrolit çözeltisi tarafından belirlenmektedir (R_e). Orta frekans bölgesi, iyonların hareketliliği ve elektrot malzemesinin iletkenliği ve akım toplayıcı arasındaki temas direnci ile belirlenmektedir (R_t). Düşük frekans bölgesi ise düz bir çizgi şeklinde görünen Warburg cevabıdır. Elektrotların parçacık içi gözeneklerindeki iyon taşınma süreçleri olarak tanımlanmaktadır (Yang vd., 2018). EIS yanıtının ayrıntılı

analizinde bu parametreleri daha ayrıntılı incelemek için matematiksel modelleme uygulanmaktadır (Ko- vd., 2021). Nyquist eğrisinde şekil 5.29c'de yüksek frekans bölgesindeki oluşan yarım daireleri göstermektedir. şekil 5.29b'deki genel görünüm olarak verilen eğrileri düşük frekans bölgesinde düz bir -izgi olarak görülmektedir. Çizelge 7.17'deki eş değer devre modelindeki sonu- lara bakıldığında, önemli parametre olan elektrot ara yüzeyindeki direnci gösteren yük aktarım diren- (karşı-aktarım direnci) değerleri görülmektedir. Bu değerler karşılaştırıldığında, en yüksek değere sahip R_t değeri AC-400-PTFE elektrotunda görülmektedir. R_c sonu- larının için sıralama AC-400-PTFE>AC-400-PVDF>MAC-400-PVDF>MAC-400-PTFE şeklinde olmaktadır. Çizelge 7.17'deki başka bir parametre olan α değeri yüzey pürüzlülüğü hakkında bilgi vermektedir. Bu değer 1'e ne kadar yakında yüzey pürüzlülüğün daha az olduğunu göstermektedir. Sonu- lara bakıldığında 1'e en yakın 0.835 değerine sahip MAC-400-PTFE elektrotudur.

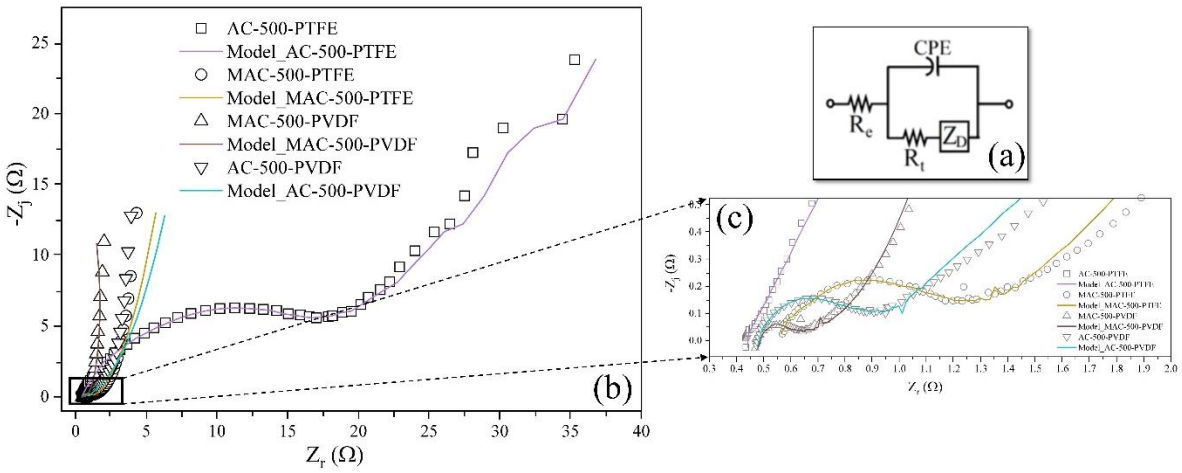


Şekil 7.29. Aktif karbon (H_3PO_4 aktivasyonuyla üretilen) elektrotların Nyquist eğrileri a) eşdeğer devre modeli b) genel görünüm c) yüksek frekans bölgesindeki görünüm

¢izelge 7.17. Aktif karbon elektrotlarēn (H_3PO_4 aktivasyonu) Eĸ deĵer Randles devre modeli sonu-larēve hata paylarēdeĵerleri.

Parametre	AC-400-PTFE	MAC-400-PTFE	AC-400-PVDF	MAC-400-PVDF
R_e / q	0,481 Ñ0,0052	0,4926 Ñ0,0095	0,4158 Ñ0,0076	0,5185 Ñ0,0073
Q / F $s^{\alpha-1}$	0,0092 Ñ0,0003	0,0013 Ñ0,0001	0,0112 Ñ 0,0018	0,0002 Ñ0,0001
α	0,5977 Ñ0,0057	0,835 Ñ0,0769	0,5729Ñ 0,0198	0,8881 Ñ0,0380
R_t / q	21,8 Ñ1,169	0,0495 Ñ0,3148	0,7377 Ñ0,0194	0,5767 Ñ0,0447
Wd/ S $s^{(1/2)}$	0,027 Ñ0,0004	0,0278 Ñ0,0003	0,6839 Ñ0,0002	0,0378 Ñ0,0002

ĸekil 7.30âda aktivasyonu $ZnCl_2$ ile saĵlanarak ¿retilen aktif karbondan oluĸan elektrotlarēn EIS analizinden elde edilen Nyquist eĵrileri sunulmuĸtur. Nyquist eĵrisinde ĸekil 7.30cãde y¿ksek frekans bº lgesindeki oluĸan yarēm daireleri gº stermektedir. ĸekil 7 .30bãdaki genel gº r¿n¿m olarak verilen eĵrileri d¿ĸ¿k frekans bº lgesinde d¿z bir -izgi olarak gº r¿lmektedir. ĸekil 7.30cãye bakēldēĵēnda yarēm dairenin -apē en d¿ĸ¿k olan MAC-500-PVDF elektrotudur. Y¿ksek frekans noktalarēnda sa-ēlma olduĵu i-in uygun bir ĸekilde model oluĸturulamamēĸtēr. ¢izelge 7.18 ãde Rc deĵerleri kēyaslandēĵēnda, en y¿ksek deĵere AC-500-PTFE elektrotunun sahip olduĵu gº r¿lmektedir. Y¿zey p¿r¿zl¿l¿k deĵerleri karĸēlaĸtērēldēĵēnda 1ãe en yakēn MAC-500-PVDF elektrotunun sahip olduĵu gº r¿lmektedir.



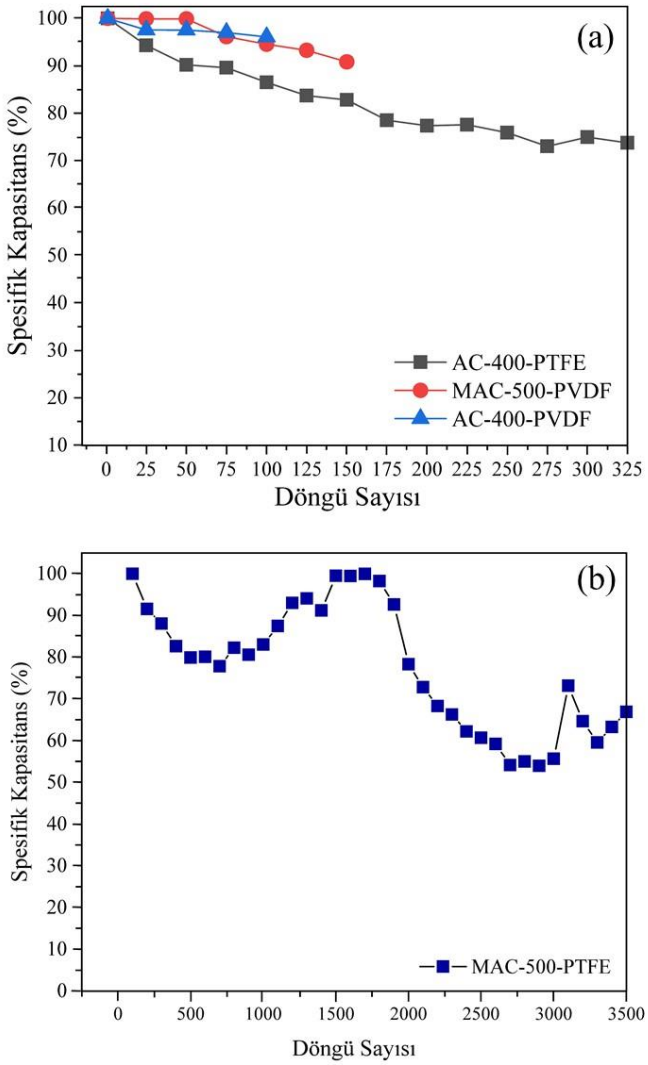
ĸekil 7.30. Aktif karbon ($ZnCl_2$ aktivasyonuyla ¿retilen) elektrotlarēn Nyquist eĵrileri a) eĸdeĵer devre modeli b) genel gº r¿n¿m c) y¿ksek frekans bº lgesindeki gº r¿n¿m.

¢izelge 7.18. Aktif karbon elektrotlarēn ($ZnCl_2$ aktivasyonu) Eк deĵer Randles devre modeli sonu-larēve hata paylarēdeĵerleri.

Parametre	AC-500-PTFE	MAC-500-PTFE	AC-500-PVDF	MAC-500-PVDF
R_e / q	0,4356 Ñ0,0035	0,519 Ñ0,0112	0,4596 Ñ0,0077	0,3062 Ñ0,234
Q / F $s^{\alpha-1}$	0,0051 Ñ0,0001	0,0052 Ñ0,0009	0,0027 Ñ0,0006	0,5783 Ñ0,9559
α	0,7215 Ñ0,0042	0,591 Ñ0,0204	0,692 Ñ0,0261	0,7477 Ñ0,3631
R_t / q	16,51 Ñ0,2349	0,8661 Ñ0,0209	0,5097 Ñ0,0140	0,9224 Ñ1,979
Wd/ S $s^{(1/2)}$	0,1338 Ñ0,0026	0,6509 Ñ0,0001	0,527 Ñ0,0001	0,3493 Ñ0,5374

7.6. Elektrotlarēn ķarj-Deкarj Dº ng¿ Denemeleri

Aktif karbon elektrotlarēnēn GCD analizinde yapēlan кarj-deкarj dº ng¿ denemeleri ķekil 7.31ôda sunulmuкtur. Elektrotlarēn кarj-deкarj dº ng¿ denemeleri 1 A/g akēm yoĵunluĵunda ger-eklekтirilmiкtir. ķarj-deкarj dº ng¿ denemeleri farklē baĵlayēcēlarda hazērlanan elektrotlardan GCD analizinde orijinal ve manyetik aktif karbonlardan y¿ksek spesifik kapasitans deĵerine sahip olanlar se-ilmiк ve denemeler bu elektrotlar i-in yapēlmēкtēr. Bu tez -alēкmasēnda bu denemeler imkanlar dahilinde, AC-400-PTFE i-in 325, MAC-500-PTFE i-in 3500, AC-400-PVDF i-in 100 ve MAC-500-PVDF i-in 150 кarj-deкarj dº ng¿ denemesi yapēlmēкtēr. ķekil 7.31aôdaki eĵriler incelendiĵinde, AC-400-PTFE elektrotunun 325 кarj-deкarj dº ng¿ sonrasēnda spesifik kapasitans deĵerinin % 73ó¿n¿ koruduĵu gº r¿lmektedir. MAC-500-PVDF elektrotu 150 кarj-deкarj dº ng¿ sonrasē kapasitans deĵerinin % 90 koruduĵu, AC-400-PVDF elektrotu ise 100 кarj-deкarj dº ng¿ sonrasē % 96 koruduĵu gº zlemlenmiкtir. ķekil 7.29bôdeki MAC-500-PTFE elektrotu i-in incelendiĵinde spesifik kapasitans y¿zdelerinde dalgalanmalar gº r¿lm¿к ve 3500 кarj-deкarj dº ng¿s¿ sonunda kapasitans deĵerinin % 66 ósēnē koruduĵu gº r¿lm¿кt¿r.



ķekil 7.31. Dº ngį sayēsēna karкē spesifik kapasitans grafiĵ i a) AC-400-PTFE, MAC-500-PVDF ve AC-400-PVDF i- in b) MAC-500-PTFE i- in.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasının kapsamında, ilk aşamada fındık kabuklarından kimyasal aktivasyon yöntemi ile H_3PO_4 ve $ZnCl_2$ kimyasallarının kullanılarak 3:1 emdirme oranında ve farklı aktivasyon sıcaklıklarında aktif karbon üretimi yapılmıştır. N_2 gazı adsorpsiyonu ile yüzey özellikleri belirlenen aktif karbonların en uygun karbonizasyon sıcaklığı H_3PO_4 aktivasyonunda 400 °C, $ZnCl_2$ aktivasyonunda ise 500 °C belirlenmiştir. Çalışmalarda da bu sıcaklıklarda üretilen aktif karbonlar kullanılmıştır. Uygun koşullarda üretilen aktif karbon örneklerinden $FeCl_3.6H_2O$ ve $FeSO_4.7H_2O$ kimyasallarından Fe(II) ve Fe(III) -çözeltileri hazırlanarak manyetik aktif karbon üretimi yapılmıştır.

SEM analizi incelendiğinde, manyetik aktif karbondaki demir oksit partikülleri açık-ça görülmektedir. EDS analizde de % Fe demir içeriği görülmesi ve FTIR analizinde düşük dalga boylarındaki Fe-O bileşikleri görülmesi aktif karbonun manyetik özelliğini kanıtlamıştır. Manyetik aktif karbondan hazırlanan elektrotların kapasitif davranışının bakır üstü olacağı düşünülmüştür. Ancak $ZnCl_2$ aktivasyonu ile üretilen manyetik aktif karbonlarda daha iyi performans göstermiştir. Bunun sebebi olarak, MAC-500'ün spesifik yüzey alanının daha yüksek bir değere sahip olması ve gözenek yapısının daha gelişmiş olmasından kaynaklanacağı düşünülmüştür.

Tezin ikinci aşamasında ise, üretilen aktif karbon ve manyetik aktif karbonlardan süperkapasitörlerin elektrot malzemesi olarak kullanımı için hazırlanması ve elektrokimyasal ölçümleri üçlü elektrot sisteminde gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan elektrotlarda bağlayıcının spesifik kapasitans değerine etkisinin olabileceği düşünülerek PVDF ve PTFE bağlayıcıları için elektrokimyasal analizleri gerçekleştirilmiştir.

Üç elektrotların CV eğrileri değerlendirildiğinde, yarı-dikdörtgenimsi bir eğriye sahiptir. Tarama hızı arttıkça, spesifik kapasitans değerinde düşük gözlemlenmiştir. Düşük tarama hızlarında, dikdörtgenimsi şekli korumuş ve sabit akıma ulaşmıştır. Bu da elektrot elektrolit arayüzünde iyon hızının daha iyi olduğu ve elektrolitten gelen iyonların elektrot gözeneklerine adsorbe olabilmesi için yeterli zamanı bulduğunun göstergesidir. GCD analizindeki eğrilere bakıldığında, şarj ve deşarj eğrileri açık-a görülmüş ve EDLC'ler için üçgen şeklini koruduğu gözlemlenmiştir.

Baî layēcē etkisini incelemek i-in, CV ve GCD eî rilerinden hesaplanan kapasitans deî erleri ¢izelge 8.1 ve ¢izelge 8.2ôde sunulmuktur. ¢izelge 8.1 óde d¿k¿k tarama hēzēnda elde edilen en y¿ksek kapasitans deî erler verilmiktir. PVDF baî layēcē kullanēlarak hazērlanan elektrotlarēn kapasitif performansē iyilektirdiî i -izelgedeki deî erlerden gº r¿lmektedir. T¿m elektrotlarēn PTFE baî layēcēsēna gº re daha y¿ksek kapasitans deî erine ulakmēktēr. Bunun sebebi, PVDF baî layēcēsēnēn elektrik iletkenliî ini arttērdē ē ve iyon ge-ikini hēzlandērdē ē olarak yorumlanmēktēr.

¢izelge 8.1. Elektrotlarēn CV eî rilerinden 5 mV/s tarama hēzēndan hesaplanan spesifik kapasitans deî erleri.

Baî layēcē	**Spesifik Kapasitans (F/g)**			
	AC-400	**MAC-400**	**AC-500**	**MAC-500**
PTFE	95,30	32,6	57,34	73,10
PVDF	102,93	74,66	93,03	118,01

¢izelge 8.2ôde GCD eî rilerinden hesaplanan spesifik kapasitans deî erleri sunulmuktur. Kapasitans deî erleri incelendiî inde, PVDF baî layēcē ile hazērlanan AC-500 ve MAC-500 elektrotlarēnda daha y¿ksek deî ere ulakt ē, ancak AC-400 ve MAC-400 elektrotlarēnda kapasitans deî erini d¿k¿rd¿î ¿ gº r¿lmektedir. Bu sonu-lar CV eî rilerinden hesaplanan AC-400 ve MAC-400 elektrotlarēnēn kapasitans deî erleri ile -elikmektedir. Bunun sebebi, elektrotlarēn elektrolit tarafēndan zayē ēslanabilirliî i olarak d¿k¿n¿lm¿kt¿r.

¢izelge 8.2. Elektrotlarēn GCD eĵrilerinden d¿ĸ¿k akēm yoĵunluklarēndan hesaplanan spesifik kapasitans deĵerleri.

¥rnek	S_{BET} (m^2/g)	Spesifik Kapasitans (F/g)	
		PTFE	PVDF
AC-400	1363	247,82	126,87
MAC-400	1212	76,23	63,90
AC-500	2092	149,30	242,86
MAC-500	1470,5	194,22	213,33

Elektotlarēn ĸarj-deĸarj dºng¿ denemeleri deĵerlendirildiĵinde, PTFE baĵlayēcēile hazērlanan MAC-500 elektrotu ile 3500 dºng¿den sonra % 66 kapasite tutma oranē sergilemiĸtir. Ķmkanlar dahilinde yapēlan ĸarj-deĸarj dºng¿ denemeleri i-in MAC-500 elektrotu y¿ksek oranda ve uzun s¿re dºng¿ kararlēlēēē saĵlayamamēĸtēr. EIS analizleri sonu-larē incelendiĵinde, manyetik aktif karbon ile hazērlanan elektrotlarda y¿k aktarēm direncinin arttēēē gºzlemlenmiĸtir. Bunun sebebi demir oksit partik¿llerinin aktif karbon gºzeneklerini tēkamēk olabileceĵi olarak d¿ĸ¿n¿lm¿ĸt¿r. Y¿zey ºzellikleri -izelgeleri incelendiĵinde, spesifik y¿zey alanē deĵerlerinin azaldēēē gºr¿lmektedir. ¢izelge 8.3ôde farklē biyok¿tlelerden ¿retilen aktif karbonlarēn s¿perkapasitºr uygulamalarēnda kullanēlan -alēĸmalarēn ºzeti sunulmuĸtur.

¢izelge 8.3. Atık biyok¿tlelerden ¿retilen aktif karbonların s¿perkapasitº r uygulamalarında kullanıldı ı -alı kmalarının ºzeti.

Aktif Karbon	Aktivasyon	S_{BET} (m^2/g)	Analiz Yº ntemi	Baj layıcı	Tarama hızı veya akım yoj unluj u	Spesifik Kapasitans (F/g)	Referans
¢ am fıstı ı kabukları	H_3PO_4	1107	3li ¿ elektrot	PTFE	0,50	170	(Qin vd., 2020)
Argan tohum kabukları	KOH	2132	3li ¿ elektrot	PTFE	1,00	291	(Elmouwahidi vd., 2012)
Hindistan cevizi kabuj u	Buhar	1532	3li ¿ elektrot	PTFE	5 mV/s	228	(Mi vd., 2012)
ıeker kamışı k¿spesi	$ZnCl_2$	1788	2li elektrot	PVDF	0,25 A/g	300	(Rufford vd., 2010)
Pirin-kabuj u	H_3PO_4	1493	2li elektrot	PVDF	1,00 A/g	112	(Ganesan vd., 2014)
Muz lifleri	$ZnCl_2$	1097	3li ¿ elektrot	PVDF	5 mV/s	86	(Subramanian vd., 2007)
Fıstık kabukları	KOH	1096	3li ¿ elektrot	PVDF	10 mV/s	120	(Wu vd., 2005)
Portakal kabuj u	KOH	1577	2li elektrot	PVDF	0,70 A/g	168	(Ahmed vd., 2018)
Mısır ko-anı	KOH	1182	3li ¿ elektrot	PTFE	1,00 A/g	394	(Xu vd., 2021)

¥zetle tez -alı kmasının kapsamında, ¿retilen aktif karbonların N_2 gazı adsorpsiyonu ile y¿zey º zellikleri belirlenmiıtir. Y¿zey morfolojisini dej erlendirmek i-in SEM, EDS, FTIR analizleri ger-ekleıtirilmiıtir. Bu aktif karbonlar ile s¿perkapasitº r elektrot malzemesi ¿retilmiı ve elektrokimyasal analizleri CV, GCD ve EIS tekniklerini kullanılarak dej erlendirilmiıtir. Bu analizler sonucunda, kendi ¿rettij imiz elektrotların elde edilen spesifik kapasitans dej erleriyle kullanımının uygun olduj unu gº stermiıtir. Atık biyok¿tle kullanılarak ¿retilen aktif karbonların kolay bulunabilir ve -evre dostu olması sebebiyle s¿perkapasitº r elektrot malzemesi olarak kullanımını m¿mk¿n kılmaktadır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Abioye, A. M., Ani, F. N., 2015, Recent development in the production of activated carbon electrodes from agricultural waste biomass for supercapacitors: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 52, 1282-1293. doi:10.1016/j.rser.2015.07.129

Afif, A., Rahman, S. M., Azad, A. T., Zaini, J., Islan, M. A., Azad, A. K., 2019, Advanced materials and technologies for hybrid supercapacitors for energy storageï a review, Journal of Energy Storage, 25, 100852.

Ahmed, S., Rafat, M., Ahmed, A., 2018, Nitrogen doped activated carbon derived from orange peel for supercapacitor application, Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology, 9(3), 035008.

Ai, J., Yang, S., Sun, Y., Liu, M., Zhang, L., Zhao, D., Cao, B., 2021, Corncob cellulose-derived hierarchical porous carbon for high performance supercapacitors, Journal of Power Sources, 484, 229221.

Altintig, E., Onaran, M., Sarē, A., Altundag, H., Tuzen, M., 2018, Preparation, characterization and evaluation of bio-based magnetic activated carbon for effective adsorption of malachite green from aqueous solution, Materials Chemistry and Physics, 220, 313-321.

Amrouche, S. O., Rekioua, D., Rekioua, T., Bacha, S., 2016, Overview of energy storage in renewable energy systems, International Journal of Hydrogen Energy, 41(45), 20914-20927.

Angin, D., 2014, Production and characterization of activated carbon from sour cherry stones by zinc chloride, Fuel, 115, 804-811.

Anonim, 2020, TİK Meyveler Sert Kabuklular ve Çecek Bitkileri Denge Tablolarē, https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Bitkisel-Urun-Denge-Tablolari-2018-2019-33740, erikim tarihi : 19.03.2020

Aygün, A., Yenisoy-Karakaş, S., Duman, I., 2003, Production of granular activated carbon from fruit stones and nutshells and evaluation of their physical, chemical and adsorption properties, Microporous and Mesoporous Materials, 66(2-3), 189-195.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Bagheri, S., Julkapli, N. M., 2016, Effect of hybridization on the value-added activated carbon materials, International Journal of Industrial Chemistry, 7(3), 249-264. doi:10.1007/s40090-016-0089-5

Baig, M. M., Gul, I. H., 2021, Conversion of wheat husk to high surface area activated carbon for energy storage in high-performance supercapacitors, Biomass and Bioenergy, 144, 105909.

Barroso-Bogeat, A. n., Alexandre-Franco, M., Fernández-González, C., Mac²as-Garc²a, A., Gómez-Serrano, V., 2016, Preparation of activated carbon-SnO_2, TiO_2, and WO_3 catalysts, Study by FT-IR spectroscopy. Industrial and Engineering Chemistry Research, 55(18), 5200-5206.

Breeze, P., 2018, An introduction to energy storage technologies, Power System Energy Storage Technologies; Elsevier BV: Amsterdam, The Netherlands, 1-11.

Cazetta, A. L., Pezoti, O., Bedin, K. C., Silva, T. L., Paesano Junior, A., Asefa, T., Almeida, V. C., 2016, Magnetic activated carbon derived from biomass waste by concurrent synthesis: efficient adsorbent for toxic dyes, ACS Sustainable Chemistry and Engineering, 4(3), 1058-1068.

Chand, P., Joshi, A., 2021, Biomass derived carbon for supercapacitor applications, Journal of Energy Storage, 39, 102646.

Cheng, J., Hu, S.-C., Sun, G.-T., Kang, K., Zhu, M.-Q., Geng, Z.-C., 2021, Comparison of activated carbons prepared by one-step and two-step chemical activation process based on cotton stalk for supercapacitors application, Energy, 215, 119144.

Chistyakov, A. V., Tsodikov, M. V., 2018, Methods for Preparing Carbon Sorbents from Lignin (Review), Russian Journal of Applied Chemistry, 91(7), 1090-1105. doi:10.1134/s1070427218070054

Christen, T., 2020, Ragone plots and discharge efficiency-power relations of electric and thermal energy storage devices, Journal of Energy Storage, 27, 101084.

De, S., Acharya, S., Sahoo, S., Chandra Nayak, G., 2020, Present status of biomass-derived carbon-based composites for supercapacitor application, In (pp. 373-415): Elsevier.

KAYNAKLAR DĶZĶNĶ(devam)

Decaux, C., Ghimbeu, C. M., Dahbi, M., Anouti, M., Lemordant, D., Beguin, F., . . . Raymundo-Pinero, E., 2014, Influence of electrolyte ionï solvent interactions on the performances of supercapacitors porous carbon electrodes, Journal of Power Sources, 263, 130-140.

Demiral, H., Demiral, Ķ, 2008, Surface properties of activated carbon prepared from wastes, Surface and Interface Analysis: An International Journal devoted to the development and application of techniques for the analysis of surfaces, interfaces and thin films, 40(3 4), 612-615.

Demiral, H., Demiral, Ķ, Karabacakoĵlu, B., T¿msek, F., 2011, Production of activated carbon from olive bagasse by physical activation, Chemical Engineering Research and Design, 89(2), 206-213.

Demiral, I., Aydēn ķamdan, C., Demiral, H., 2016, Production and characterization of activated carbons from pumpkin seed shell by chemical activation with $ZnCl_2$, Desalination and Water Treatment, 57(6), 2446-2454.

Ding, Y., Li, Y., Dai, Y., Han, X., Xing, B., Zhu, L., Wang, S., 2021, A novel approach for preparing in-situ nitrogen doped carbon via pyrolysis of bean pulp for supercapacitors, Energy, 216, 119227.

Dubey, R., Guruviah, V., 2019, Review of carbon-based electrode materials for supercapacitor energy storage, Ionics, 25(4), 1419-1445.

Ece, M. ķ., 2021, Synthesis and characterization of activated carbon supported magnetic nanoparticles (Fe_3O_4/AC@ SiO_2@ Sulfanilamide) and its application in removal of toluene and benzene, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 617, 126231.

Eftekhari, A., 2018, The mechanism of ultrafast supercapacitors. Journal of Materials Chemistry A, 6(7), 2866-2876.

Elmouwahidi, A., Zapata-Benabithe, Z., Carrasco-Mar²n, F., Moreno-Castilla, C., 2012, Activated carbons from KOH-activation of argan (Argania spinosa) seed shells as supercapacitor electrodes, Bioresource Technology, 111, 185-190. doi:10.1016/j.biortech.2012.02.010

Ferreira, H. L., Garde, R., Fulli, G., Kling, W., Lopes, J. P., 2013, Characterisation of electrical energy storage technologies, Energy, 53, 288-298.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Ganesan, A., Mukherjee, R., Raj, J., Shaijumon, M. M., 2014, Nanoporous rice husk derived carbon for gas storage and high performance electrochemical energy storage, Journal of Porous Materials, 21(5), 839-847.

Girgis, B. S., El-Hendawy, A.-N. A., 2002, Porosity development in activated carbons obtained from date pits under chemical activation with phosphoric acid, Microporous and Mesoporous Materials, 52(2), 105-117.

Guney, M. S., 2013, Utilization of hazelnut husk as biomass, Sustainable Energy Technologies and Assessments, 4, 72-77.

Guney, M. S., Tepe, Y., 2017, Classification and assessment of energy storage systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 75, 1187-1197.

Haykiri-Acma, H., 2006, The role of particle size in the non-isothermal pyrolysis of hazelnut shell, Journal of analytical and applied pyrolysis, 75(2), 211-216.

Haykiri-Acma, H., Baykan, A., Yaman, S., Kucukbayrak, S., 2013, Effects of fragmentation and particle size on the fuel properties of hazelnut shells, Fuel, 112, 326-330.

He, X., Li, R., Han, J., Yu, M., Wu, M., 2013, Facile preparation of mesoporous carbons for supercapacitors by one-step microwave-assisted $ZnCl_2$ activation, Materials Letters, 94, 158-160.

He, X., Ling, P., Yu, M., Wang, X., Zhang, X., Zheng, M., 2013, Rice husk-derived porous carbons with high capacitance by $ZnCl_2$ activation for supercapacitors, Electrochimica Acta, 105, 635-641.

Heidarinejad, Z., Dehghani, M. H., Heidari, M., Javedan, G., Ali, I., Sillanp[a a], M., 2020, Methods for preparation and activation of activated carbon: a review, Environmental Chemistry Letters, 18(2), 393-415. doi:10.1007/s10311-019-00955-0

Hossain, R., Nekouei, R. K., Mansuri, I., Sahajwalla, V., 2021, In-situ O/N-heteroatom enriched activated carbon by sustainable thermal transformation of waste coffee grounds for supercapacitor material, Journal of Energy Storage, 33, 102113.

Ibrahim, H., Ilinca, A., Perron, J., 2008, Energy storage systemsð Characteristics and comparisons, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12(5), 1221-1250.

Inal, I. I. G., Aktas, Z., 2020, Enhancing the performance of activated carbon based scalable supercapacitors by heat treatment, Applied Surface Science, 514, 145895.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Iro, Z. S., Subramani, C., Dash, S., 2016, A brief review on electrode materials for supercapacitor, Int. J. Electrochem. Sci, 11(12), 10628-10643.

Jain, A., Ghosh, M., Krajewski, M., Kurungot, S., Michalska, M., 2021, Biomass-derived activated carbon material from native European deciduous trees as an inexpensive and sustainable energy material for supercapacitor application, Journal of Energy Storage, 34, 102178.

Kaya, N., Yıldız, Z., Ceylan, S., 2018, Preparation and characterisation of biochar from hazelnut shell and its adsorption properties for methylene blue dye, Politeknik Dergisi, 21(4), 765-776.

Kazmierczak-Razna, J., Nowicki, P., Wiśniewska, M., Nosal-Wiercińska, A., Pietrzak, R., 2017, Thermal and physicochemical properties of phosphorus-containing activated carbons obtained from biomass, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 80, 1006-1013. doi:10.1016/j.jtice.2017.09.015

Khawaja, M. K., Alkhalidi, A., Mansour, S., 2019, Environmental impacts of energy storage waste and regional legislation to curtail their effects: highlighting the status in Jordan, Journal of Energy Storage, 26, 100919.

Knappe, D., 2006, Surface chemistry effects in activated carbon adsorption of industrial pollutants, In Interface Science and Technology (Vol. 10, pp. 155-177): Elsevier.

Koç, Y., Moralı, U., Erol, S., Avci, H., 2021, Electrochemical Investigation of Gold Based Screen Printed Electrodes: An Application for a Seafood Toxin Detection, Electroanalysis, 33(4), 1033-1048.

Kwiatkowski, M., Broniek, E., 2017, An analysis of the porous structure of activated carbons obtained from hazelnut shells by various physical and chemical methods of activation, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 529, 443-453. doi:10.1016/j.colsurfa.2017.06.028

Li, K.-B., Shi, D.-W., Cai, Z.-Y., Zhang, G.-L., Huang, Q.-A., Liu, D., Yang, C.-P., 2015, Studies on the equivalent serial resistance of carbon supercapacitor, Electrochimica Acta, 174, 596-600.

Li, Z., Guo, D., Liu, Y., Wang, H., Wang, L., 2020, Recent advances and challenges in biomass-derived porous carbon nanomaterials for supercapacitors, Chemical Engineering Journal, 125418.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Liu, Y., Wang, Y., Zhang, G., Liu, W., Wang, D., Dong, Y., 2016, Preparation of activated carbon from willow leaves and evaluation in electric double-layer capacitors, Materials Letters, 176, 60-63.

Lu, W., Cao, X., Hao, L., Zhou, Y., Wang, Y., 2020, Activated carbon derived from pitaya peel for supercapacitor applications with high capacitance performance, Materials Letters, 264, 127339. doi:10.1016/j.matlet.2020.127339

Luo, Y., Li, D., Chen, Y., Sun, X., Cao, Q., Liu, X., 2019, The performance of phosphoric acid in the preparation of activated carbon-containing phosphorus species from rice husk residue, Journal of Materials Science, 54(6), 5008-5021. doi:10.1007/s10853-018-03220-x

Mi, J., Wang, X.-R., Fan, R.-J., Qu, W.-H., Li, W.-C., 2012, Coconut-shell-based porous carbons with a tunable micro/mesopore ratio for high-performance supercapacitors, Energy and Fuels, 26(8), 5321-5329.

Mohan, D., Sarswat, A., Singh, V. K., Alexandre-Franco, M., Pittman, C. U., 2011, Development of magnetic activated carbon from almond shells for trinitrophenol removal from water, Chemical Engineering Journal, 172(2-3), 1111-1125. doi:10.1016/j.cej.2011.06.054

Mohanty, K., Das, D., Biswas, M., 2006, Preparation and characterization of activated carbons from Sterculia alata nutshell by chemical activation with zinc chloride to remove phenol from wastewater, Adsorption, 12(2), 119-132.

Mondal, M., Goswami, D. K., Bhattacharyya, T. K., 2021, Lignocellulose based bio-waste materials derived activated porous carbon as superior electrode materials for high-performance supercapacitor, Journal of Energy Storage, 34. doi:10.1016/j.est.2020.102229

Muzaffar, A., Ahamed, M. B., Deshmukh, K., Thirumalai, J., 2019, A review on recent advances in hybrid supercapacitors: Design, fabrication and applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 101, 123-145.

Nicholas, A. F., Hussein, M. Z., Zainal, Z., Khadiran, T., 2019, Activated Carbon for Shape-Stabilized Phase Change Material, In (pp. 279-308): Elsevier.

Okonkwo, C. A., Menkiti, M. C., Obiora-Okafo, I. A., Ezenwa, O. N., 2021, Controlled pyrolysis of sugarcane bagasse enhanced mesoporous carbon for improving capacitance of supercapacitor electrode, Biomass and Bioenergy, 146, 105996.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Pandolfo, A. G., Hollenkamp, A. F., 2006, Carbon properties and their role in supercapacitors, Journal of Power Sources, 157(1), 11-27.

Poonam, Sharma, K., Arora, A., Tripathi, S. K., 2019, Review of supercapacitors: materials and devices, Journal of Energy Storage, 21, 801-825. doi:10.1016/j.est.2019.01.010

Qin, L., Hou, Z., Zhang, S., Zhang, W., Jiang, E., 2020, Supercapacitive charge storage properties of porous carbons derived from pine nut shells, Journal of Electroanalytical Chemistry, 114140.

Rahman, F., Rehman, S., Abdul-Majeed, M. A., 2012, Overview of energy storage systems for storing electricity from renewable energy sources in Saudi Arabia, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(1), 274-283.

Rashidi, N. A., Yusup, S., 2017, A review on recent technological advancement in the activated carbon production from oil palm wastes, Chemical Engineering Journal, 314, 277-290. doi:10.1016/j.cej.2016.11.059

Ratha, S., Samantara, A. K., 2018, Supercapacitor: Instrumentation, Measurement and Performance Evaluation Techniques: Springer.

Rawal, S., Joshi, B., Kumar, Y., 2018, Synthesis and characterization of activated carbon from the biomass of Saccharum bengalense for electrochemical supercapacitors, Journal of Energy Storage, 20, 418-426.

Raza, W., Ali, F., Raza, N., Luo, Y., Kim, K.-H., Yang, J., . . . Kwon, E. E., 2018, Recent advancements in supercapacitor technology, Nano Energy, 52, 441-473.

Rodr²guez-S§nchez, S., Ruiz, B., Mart²nez-Blanco, D., S§nchez-Arenillas, M., Diez, M. A., Marco, J. F., . . . Fuente, E., 2021, Towards advanced industrial waste-based magnetic activated carbons with tunable chemical, textural and magnetic properties, Applied Surface Science, 551, 149407.

Rouquerol, J., Rouquerol, F., Llewellyn, P., Maurin, G., Sing, K. S., 2013, Adsorption by powders and porous solids: principles, methodology and applications: Academic press.

Rufford, T. E., Hulicova-Jurcakova, D., Khosla, K., Zhu, Z., Lu, G. Q., 2010, Microstructure and electrochemical double-layer capacitance of carbon electrodes prepared by zinc chloride activation of sugar cane bagasse, Journal of Power Sources, 195(3), 912-918.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Saikia, B. K., Benoy, S. M., Bora, M., Tamuly, J., Pandey, M., Bhattacharya, D., 2020, A brief review on supercapacitor energy storage devices and utilization of natural carbon resources as their electrode materials, Fuel, 282, 118796.

Saka, C., 2012, BET, TGï DTG, FT-IR, SEM, iodine number analysis and preparation of activated carbon from acorn shell by chemical activation with $ZnCl_2$, Journal of analytical and applied pyrolysis, 95, 21-24.

Scibioh, M. A., Viswanathan, B., 2020, Materials for Supercapacitor Applications: Elsevier.

İçencan, A., Karaboyacı, M., Kılıç, M., 2015, Determination of lead (II) sorption capacity of hazelnut shell and activated carbon obtained from hazelnut shell activated with $ZnCl_2$, Environmental Science and Pollution Research, 22(5), 3238-3248.

Simon, P., Gogotsi, Y., 2010, Materials for electrochemical capacitors, Nanoscience and technology: a collection of reviews from Nature journals, 320-329.

Subramanian, V., Luo, C., Stephan, A. M., Nahm, K., Thomas, S., Wei, B., 2007, Supercapacitors from activated carbon derived from banana fibers, The Journal of Physical Chemistry C, 111(20), 7527-7531.

Tangjuank, S., Insuk, N., Tontrakoon, J., Udeye, V., 2009, Adsorption of lead (II) and cadmium (II) ions from aqueous solutions by adsorption on activated carbon prepared from cashew nut shells, World Academy of Science, Engineering and Technology, 52, 110-116.

Taslim, R., Suwandana, Jelita, M., Afriani, S., Agustino, Apriwandi, Taer, E., 2020, Activated carbon material based on angsana leaves (Pterocarpus indicus) prepared by $ZnCl_2$ activation method as electrode for high performance supercapacitor, Paper presented at the AIP Conference Proceedings.

Tobi, A. R., Dennis, J., Zaid, H., 2021, Evaluation of low-cost high performance solid-state supercapacitor derived from physically and chemically activated oil palm fiber, Materials Letters, 285, 129127.

Turan, D., Yönetken, A., 2016, Enerji depolama sistemlerinin araştırılması ve analizi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16, 113-121.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Vernersson, T., Bonelli, P., Cerrella, E., Cukierman, A., 2002, Arundo donax cane as a precursor for activated carbons preparation by phosphoric acid activation, Bioresource Technology, 83(2), 95-104.

Volfkovich, Y. M., 2021, Electrochemical Supercapacitors (a Review), Russian Journal of Electrochemistry, 57(4), 311-347.

Wang, G., Zhang, L., Zhang, J., 2012, A review of electrode materials for electrochemical supercapacitors, Chemical Society Reviews, 41(2), 797-828.

Wang, J., Dong, S., Ding, B., Wang, Y., Hao, X., Dou, H., Zhang, X., 2017, Pseudocapacitive materials for electrochemical capacitors: from rational synthesis to capacitance optimization, National Science Review, 4(1), 71-90.

Wang, J., Zhang, X., Li, Z., Ma, Y., Ma, L., 2020, Recent progress of biomass-derived carbon materials for supercapacitors, Journal of Power Sources, 451, 227794.

Wu, F.-C., Tseng, R.-L., Hu, C.-C., Wang, C.-C., 2005, Effects of pore structure and electrolyte on the capacitive characteristics of steam-and KOH-activated carbons for supercapacitors, Journal of Power Sources, 144(1), 302-309.

Xu, M., Huang, Q., Lu, J., Niu, J., 2021, Green synthesis of high-performance supercapacitor electrode materials from agricultural corncob waste by mild potassium hydroxide soaking and a one-step carbonization, Industrial Crops and Products, 161, 113215.

Yaĵ mur, H. K., Kaya, Ķ, 2021, Synthesis and characterization of magnetic $ZnCl_2$-activated carbon produced from coconut shell for the adsorption of methylene blue, Journal of Molecular Structure, 1232, 130071. doi:10.1016/j.molstruc.2021.130071

Yan, J., Wang, Q., Wei, T., Fan, Z., 2014, Recent advances in design and fabrication of electrochemical supercapacitors with high energy densities, Advanced Energy Materials, 4(4), 1300816.

Yang, C.-S., Jang, Y. S., Jeong, H. K., 2014, Bamboo-based activated carbon for supercapacitor applications, Current Applied Physics, 14(12), 1616-1620.

Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., Zheng, C., 2007, Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis, Fuel, 86(12-13), 1781-1788. doi:10.1016/j.fuel.2006.12.013

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Yang, I., Kwon, D., Kim, M.-S., Jung, J. C., 2018, A comparative study of activated carbon aerogel and commercial activated carbons as electrode materials for organic electric double-layer capacitors, Carbon, 132, 503-511.

Yorgun, S., Yıldız, D., 2015, Preparation and characterization of activated carbons from Paulownia wood by chemical activation with H_3PO_4, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 53, 122-131.

Yu, A., Davies, A., Chen, Z., 2011, Electrochemical supercapacitors, Electrochemical technologies for energy storage and conversion, 1, 317-382.

Yu, Z., Tetard, L., Zhai, L., Thomas, J., 2015, Supercapacitor electrode materials: nanostructures from 0 to 3 dimensions, Energy and Environmental Science, 8(3), 702-730.

Zang, X., Shen, C., Sanghadasa, M., Lin, L., 2019, High voltage supercapacitors based on aqueous electrolytes, ChemElectroChem, 6(4), 976-988.

Zhang, J., Zhang, L., Liu, H., Sun, A., Liu, R.-S., 2011, Electrochemical Technologies for Energy Storage and Conversion, 2 Volume Set (Vol. 1): John Wiley and Sons.

Zhang, J., Zhao, X., 2012, On the configuration of supercapacitors for maximizing electrochemical performance, ChemSusChem, 5(5), 818-841.

Zhang, S., Pan, N., 2015, Supercapacitors performance evaluation, Advanced Energy Materials, 5(6), 1401401.

Zhang, S., Zhu, S., Zhang, H., Liu, X., Xiong, Y., 2020, Synthesis and characterization of rice husk-based magnetic porous carbon by pyrolysis of pretreated rice husk with $FeCl_3$ and $ZnCl_2$, Journal of analytical and applied pyrolysis, 147, 104806.

Zhang, Y., Feng, H., Wu, X., Wang, L., Zhang, A., Xia, T., Zhang, L., 2009, Progress of electrochemical capacitor electrode materials: A review, International Journal of Hydrogen Energy, 34(11), 4889-4899.

Zhao, B., Xu, X., Zeng, F., Li, H., Chen, X., 2018, The hierarchical porous structure bio-char assessments produced by co-pyrolysis of municipal sewage sludge and hazelnut shell and Cu (II) adsorption kinetics, Environmental Science and Pollution Research, 25(20), 19423-19435.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Zheng, L.-H., Chen, M.-H., Liang, S.-X., Lü, Q.-F., 2021, Oxygen-rich hierarchical porous carbon derived from biomass waste-kapok flower for supercapacitor electrode, Diamond and Related Materials, 113, 108267.

Zięzio, M., Charmas, B., Jedynak, K., Hawryluk, M., Kucio, K., 2020, Preparation and characterization of activated carbons obtained from the waste materials impregnated with phosphoric acid(V), Applied Nanoscience. doi:10.1007/s13204-020-01419-6