

T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BOR KATKILI VE BİYOKÜTLE TEMELLİ KARBON
SÜPERKAPASİTÖR ENERJİ DEPOLAMA MALZEMELERİNİN
GELİŞTİRİLMESİ

Ayşenur KARAMUSTAFA

TEZ DANIŞMANI
Dr. Öğr. Üyesi Gökçen AKGÜL
JÜRİ ÜYELERİ
Doç. Dr. Ercüment YÜZÜAK
Dr. Öğr. Üyesi İbrahim DÜZGÜN

RİZE-2021
Her Hakkı Saklıdır

ÖNSÖZ

Bu çalışma Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Çalışmamızda yerli ve yerel çay fabrika atıklarının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çay atıklarının pirolizi ile üretilen karbonize materyalin yerli ve milli kaynağımız olan bor ile grafitizasyonu ve bu grafitik karbona bor katkılanması ile enerji depolama kapasitesi yüksek süperkapasitör için enerji depolama materyali üretilmesi hedeflenmiştir. Böylece yerli kaynaklar kullanılarak enerji depolama malzemelerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Tez sürecim ve proje çalışmalarım boyunca karamsarlığa kapıldığım her an tüm içtenliğiyle, sabrıyla, sevgisiyle, güler yüzüyle bana destek olup beni yüreklendiren, bilgi ve tecrübesi ile her koşulda yanımda hissettiğim sevgili danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Gökçen AKGÜL'e sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Lisans yıllarından başlayarak bu zamanlara kadar hep yanımda olan, her başım sıkıştığı zaman yardım elini uzatan canım arkadaşım Merve ÇALIŞ'a, yüksek lisansa başladığımız andan itibaren her zaman omuz omuza çalıştığım sevgili arkadaşım Sözer SÖZER'e teşekkür ederim.

Uzaktan da olsa her zaman yanımda olduğunu hissettiğim, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman ödeyemeyeceğim yüreği kocaman annem Songül YAŞAR'a, ve kız kardeşlerim İrem ve Aysu'ya, son olarak attığım her adımda beni destekleyip bana yapabileceğimi söyleyen, ısrarla bana vazgeçmemeyi öğreten, kocaman sevgi dolu yüreği ve sabrı için sevgili eşim Murat KARAMUSTAFA'ya teşekkür ederim.

Bu Yüksek Lisans Tezi Bor Enstitüsü (BOREN) tarafından 2019-30-06-95-001 nolu proje ile ve Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi FYL-2019-1059 nolu proje ile desteklenmiştir.

Ayşenur KARAMUSTAFA

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Tarafımdan hazırlanan “Bor Katkılı ve Biyokütle Temelli Karbon Süperkapasitör Enerji Depolama Malzemelerinin Geliştirilmesi” başlıklı bu tezi, Yükseköğretim Kurulu Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesindeki hususlara uygun olarak hazırladığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal işlemi kabul ettiğimi beyan ederim.

07/01/2021

Ayşenur KARAMUSTAFA

Uyarı: Bu tezde kullanılan özgün ve/veya başka kaynaklardan sunulan içeriğin kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

BOR KATKILI VE BİYOKÜTLE TEMELLİ KARBON SÜPERKAPASİTÖR ENERJİ DEPOLAMA MALZEMELERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Ayşenur KARAMUSTAFA

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Gökçen AKGÜL

Üretilen enerjiyi daha sonra kullanmak üzere depolamaya enerji depolama denir. Enerji depolamanın birden fazla çeşidi vardır. Süperkapasitör yüksek enerji ve güç yoğunluğu, yüksek çevrim ömrü, hızlı şarj/deşarj özelliklerine sahip enerji depolama sistemlerinden biridir. Süperkapasitörlerin enerji depolama kapasitelerinin ve enerji yoğunluğunun artırılması ile ilgili elektrot malzemesi geliştirilmesi üzerine birçok çalışmalar yapılmaktadır. Süperkapasitör elektrot malzemesi olarak karbon temelli malzemeler de kullanılmaktadır. Bu çalışmada karbon enerji depolama malzemesi, yenilenebilir biyokütle kaynağından geliştirilmiştir. Yenilenebilir biyokütle olarak yerel çay atıkları kullanılmıştır. Çay atıkları biyokütlesinin pirolizi ile karbonize materyal türetilmiştir. Karbon materyalin enerji depolama kapasitesinin artırılması için grafitizasyon, aktivasyon ve heteroatom/bor katkılama işlemleri uygulanmıştır. Ayrıca nitrik asit ile partikül boyutunun geliştirilmesi ve enerji depolama özelliğinin değişimi de incelenmiştir. Elde edilen elektrot malzemelerinin detaylı karakterizasyonları yüzey alanı ölçümü (BET), taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışınımı kırınım yöntemi (XRD), Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR), termogravimetrik analiz (TGA), Parçacık Boyutu Dağılımı yöntemleriyle yapılmıştır. Kapasitansların belirlenmesi için üç elektrotlu sistem ile elektrokimyasal ölçümler (CV ölçümü) gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda geliştirilen BC-B-Y-KOH2-B2 materyalinin 69,3 F/g ile en yüksek yarı hücre enerji depolama kapasitesine sahip olduğu gözlenmiştir. Grafitizasyon, aktivasyon ve katkılama işlemleri ile amorf yapının geliştirilip enerji depolama kapasitesinin artırılacağı ve yenilenebilir çay atığı biyokütlesinin enerji depolama materyali olarak kullanılabileceği gösterilmiştir.

2021, 69 sayfa

Anahtar Kelimeler: Biyokütle, Çay Atıkları, Bor, Süperkapasitör, Enerji Depolama

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF BORON DOPED AND BIOMASS BASED CARBON SUPERCAPACITOR MATERIALS

Ayşenur KARAMUSTAFA

**Recep Tayyip Erdogan University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Energy Systems Engineering
Master Thesis
Supervisor: Assist. Prof. Dr. Gökçen AKGÜL**

Storing the produced energy for later use is called energy storage. There are various types of energy storage systems. Supercapacitor is one of the energy storage systems with high energy and power density, high cycle life, fast charge / discharge features. Many studies have been carried out on the development of electrode material to increase the energy storage capacity and energy density of supercapacitors. Carbon-based materials are also used as the supercapacitor electrode material. In this study, the carbon energy storage material has been developed from a renewable biomass resource. Local tea wastes were used as renewable biomass. Carbonized material was derived by pyrolysis of tea waste biomass. Graphitization, activation and heteroatom / boron doping processes have been applied to increase the energy storage capacity of the derived carbon material. In addition, the improvement of particle size with nitric acid and the change of energy storage properties were also investigated. Detailed characterizations of the obtained electrode materials were made by Brunauer–Emmett–Teller (BET), Scanning Electron Microscopy (SEM), X-ray diffraction analysis (XRD), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR), Thermogravimetric analysis (TGA), particle size distribution methods. Electrochemical measurements (CV measurement) were carried out with a three-electrode system to determine capacitances. It was observed that developed BC-B-Y-KOH₂-B₂ material has the highest half cell energy storage capacity with 69,3 F / g. With graphitization, activation and doping processes, it has been shown that the amorphous structure can be improved, energy storage capacity can be increased and renewable tea waste biomass can be used as energy storage material.

2021, 69 pages

Keywords: Biomass, Tea Waste, Boron, Supercapacitor, Energy Storage

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	I
TEZ ETİK BEYANNAMESİ	II
ÖZET.....	III
ABSTRACT	IV
İÇİNDEKİLER	V
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VII
TABLolar DİZİNİ	IX
SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ	X
1. GENEL BİLGİLER	12
1.1. Giriş.....	12
1.2. Enerji Depolama	13
1.3. Süperkapasitörler	15
1.4. Elektrotlar.....	18
1.5. Karbon Elektrotlar.....	21
1.6. Yenilenebilir Karbon.....	22
1.7. Bor Katkılama	24
1.8. Elektrokimyasal Enerji Depolamanın Değerlendirilmesi	25
1.9. Literatür Özeti	26
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	30
2.1. Grafitizasyon, Gözenek Geliştirme ve Bor Katkılama.....	31
2.2. Yapısal Karakterizasyonlar	33
2.3. Elektrokimyasal Analizler.....	33
3. BULGULAR.....	35
3.1. Yapısal Karakterizasyonlar	35
3.1.1. BET Analizleri	35
3.1.2. Partikül Dağılımları.....	36
3.1.3. TGA Analizleri	37
3.1.4. FTIR Analizleri	41
3.1.5. XRD Analizleri	43
3.1.6. SEM Analizleri	47
3.2. Elektrokimyasal Karakterizasyonlar	50
4. TARTIŞMA ve SONUÇLAR	55
4.1. Biyokömürde Yapısal Gelişme	55
4.2. Biyokömürde Kapasitans Gelişimi	58

5. ÖNERİLER.....	60
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	69



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Enerji depolama çeşitleri	13
Şekil 2. Ragon diyagramı (Christen ve Carlen, 2000)	14
Şekil 3. a) Kapasitör yapısı, b) elektrik alan oluşumu (URL-1)	15
Şekil 4. Kapasitör şarj-deşarj (Sharma ve Bhatti, 2010).....	15
Şekil 5. Elektrokimyasal çift tabaka ve Helmholtz tabakası oluşumu (Liu vd., 2019).....	16
Şekil 6. Süperkapasitör grupları.....	17
Şekil 7. Elektrot materyalleri (Wang vd., 2012).....	19
Şekil 8. Elektrolit-elektrot gözeneği etkileşimi (Berrueta ve Ursúa, 2019).....	20
Şekil 9. Karbonun bazı allotropları (URL-2).....	21
Şekil 10. Deneysel akış şeması	30
Şekil 11. Çay fabrikası son ürün atıklar	31
Şekil 12. a) Piroлиз ünitesi, b) grafitizasyon pirolizi ısıtma programı, c) KOH ile muamele pirolizi ısıtma programı.....	32
Şekil 13. a) üç elektrotlu düzenek, b) potansiyostat/galvanostat sistemi	34
Şekil 14. Grafitizasyon, aktivasyon ve bor katkılamanın numunelerin yüzey alanlarına etkisi .	36
Şekil 15. BC-B numunesinin partikül dağılım grafiği	37
Şekil 16. BC-B-Y-KOH ₂ numunesinin partikül dağılımı	37
Şekil 17. Metal impregne edilmiş ve yıkanmış numunelerin TGA verileri	38
Şekil 18. KOH ile yüzey alanı geliştirilmiş numunelerin TGA verileri	39
Şekil 19. Bor katkılı numunelerin TGA verileri	39
Şekil 20. Fe (a) ve B (b) ile işleme tabi tutulmuş numunelerin kendi içinde TGA verileri	40
Şekil 21. BC-HNO ₃ numunesinin TGA grafiği	40
Şekil 22. Metal impregne edilmiş ve yıkanmış numunelerin FTIR verileri	41
Şekil 23. KOH ile yüzey alanı geliştirilmiş numunelerin FTIR verileri	42
Şekil 24. Bor katkılı numunelerin FTIR verileri.....	42
Şekil 25. BC-HNO ₃ numunesinin FTIR grafiği.....	43
Şekil 26. Metal impregne edilmiş ve yıkanmış numunelerin XRD verileri.....	44
Şekil 27. KOH ile yüzey alanı geliştirilmiş numunelerin XRD verileri	45
Şekil 28. Bor katkılı numunelerin XRD verileri	46
Şekil 29. BC-HNO ₃ numunesinin XRD grafiği	46
Şekil 30. Metal impregne edilmiş ve yıkanmış numunelerin SEM görüntüleri.....	47
Şekil 31. KOH ile yüzey alanı geliştirilmiş numunelerin SEM görüntüleri	48
Şekil 32. Bor katkılı numunelerin SEM görüntüleri.....	49
Şekil 33. BC-HNO ₃ numunesinin SEM görüntüsü.....	50

Şekil 34. 10-500 mV/s tarama hızları aralığında metal impregne edilmiş ve yıkanmış numunelerin CV eğrileri	51
Şekil 35. 10-500 mV/s tarama hızları aralığında KOH ile yüzey alanı geliştirilmiş numunelerin CV eğrileri	52
Şekil 36. 10-500 mV/s tarama hızları bor katkılı numunelerin CV eğrileri.....	52
Şekil 37. 10-500 mV/s tarama hızları BC-HNO ₃ CV eğrileri.....	53
Şekil 38. Numunelerin farklı tarama hızlarında kapasitans eğrileri.....	54



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Süperkapasitör gelişiminin tarihsel aşamaları (Moseley ve Garche, 2015)	26
Tablo 2. Bazı çalışmalarda karbon materyalin enerji depolama miktarları	29
Tablo 3. Numunelerin yüzey alanları	35
Tablo 4. Fe muamele edilmiş numunelerin 10-500 mV/s tarama hızları aralığında kapasitans değerleri	53
Tablo 5. B muamele edilmiş numunelerin farklı tarama hızlarında kapasitans değerleri	53



SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ

EDLC	Elektrik Çift Tabaka Kapasitör
PTFE	Politetrafloretilen
PVDF	Polivinilidenflorid
NMP	N-Metilprolidin
ESR	Süperkapasitör Hücre Direnci
PANI	Polianilin
CV	Döngüsel Voltametri
GCD	Galvanostatik Şarj Deşarj
EIS	Elektrokimyasal Impedans Spektroskopi
C	Kapasitans
Q	Yük
I	Akım
V	Volt
nm	Nanometre
E_s	Spesifik Enerji
P_s	Spesifik Güç
AC	Alternatif Akım
mV	Milivolt
CE	Sayım Elektrot
RE	Referans Elektrot
WE	Çalışma Elektrot
s	Tarama Hızı
A	Alan
F	Farad
BET	Yüzey Alanı Analizi
XRD	X-Işını Deseni
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi
SEM	Yüzey Morfolojisi Analizi
TGA	Termogravimetrik Analiz
HNO_3	Nitrik Asit
HCl	Hidroklorik Asit

HF	Hidroflorik Asit
H ₂ SO ₄	Sülfürik Asit
ZnCl ₂	Çinko Klorür
H ₃ PO ₄	Fosforik Asit
K ₂ CO ₃	Potasyum Karbonat
FeCl ₃	Demir(III) Klorür
H ₃ BO ₃	Borik Asit
KOH	Potasyum Hidroksit
TW (Tea Waste)	Çay Atığı



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Enerji, modern ekonomilerin anahtar parçalarından bir tanesidir. Yaşam standartlarının artması, gelişmiş ekonomiler, sosyal ve ekonomik kalkınma için enerji gereklidir. Modern hayatın, teknolojinin ve sanayinin gelişmesi ve nüfusun artması ile de enerji ihtiyacı artmaktadır (Jacobson ve Delucchi, 2011)

Günümüzde enerji ihtiyacı birincil olarak petrol, kömür ve doğalgaz gibi fosil kaynaklar kullanılarak sağlanmaktadır. Ancak bu kaynaklar sonsuz değildir ve günümüzde rezervleri giderek azalmaktadır. Yakın bir gelecekte tükeneceği öngörülmektedir (Abas vd., 2015). Diğer yandan bu kaynakların kullanımı sonucu oluşan sera gazları dünya iklimine dolayısıyla üretim sektörlerine ve insan sağlığına zarar vermektedir (Krane, 2017). İklim değişikliğine neden olan fosil kaynaklı emisyonların en bariz etkisi Covid-19 salgını sırasında da görülmüştür (Bogdan, 2020).

Fosil kaynakların giderek tükendiği ve sebep olduğu iklim değişikliğinin etkilerinin iyice hissedildiği günümüzde yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve enerji depolama teknolojilerinin geliştirilmesi, hem insanlığın artan enerji ihtiyacının karşılanması hem de iklim değişikliği ve çevre kirliliğine neden olan negatif faktörlerin azaltılması için çok önemlidir. İçinde bulunduğumuz yüzyılın fosil enerji devrinin kapanmaya doğru gideceği bir dönem olacağı söylenebilir (Kåberger, 2018).

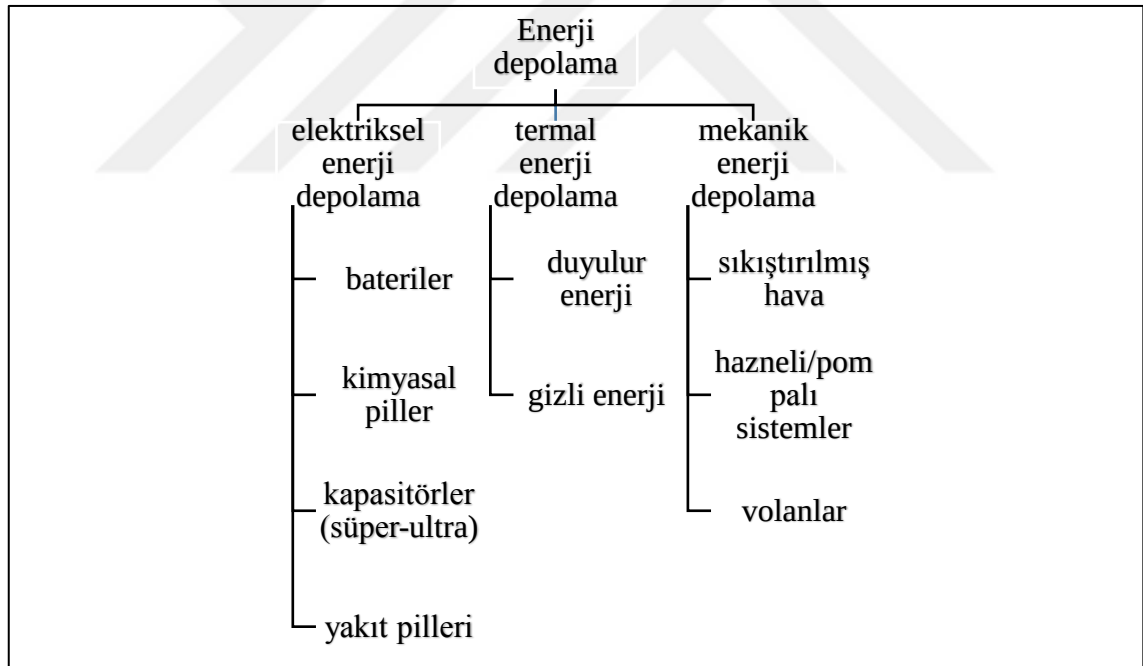
Yenilenebilir enerji doğal süreçlerden meydana gelmektedir. Doğal kaynaklar tükenme hızından daha kısa sürede kendini yenileyebilmektedir; rüzgâr, güneş, biyokütle, dalga gibi. Bu kaynaklar modern hayatta kullanılan elektrik enerjisi gibi enerji türlerine çevrilebilirler ve doğayı kirletmeyen enerji kaynaklarıdır. Havadaki rüzgârın hareket gücünden, barajlarda depolanan suyun potansiyelinden, güneşin solar etkisinden, biyokütlenin temelde karbon potansiyelinden faydalanılarak enerji üretilmektedir (Biarent, 2010).

Enerji, cihazlarda üretildiği anda harcanarak kullanılabildiği gibi depolanarak herhangi bir iletim-dağıtım kanalına bağlı olmadan taşınabilir şekilde de kullanılabilir (Kozak ve Kozak, 2012). Enerji alanındaki uygulamalarda enerjinin üretimi kadar depolanması da günümüzün önemli araştırma konularındandır (Bullich-Massagué vd.,

2020). Özellikle yenilenebilir kaynaklarla üretilen enerji sezonluk, aylık, günlük ve hatta anlık bile farklı olabilmektedir. Bu sürekli değişim enerjiye verimli şekilde ulaşımı engellemektedir. Enerji sürekliliğinin ve taşınabilirliğinin sağlanması için enerjinin depolama sistemleri ile depolanması gerekir. Sürdürülebilir, temiz ve yenilenebilir enerjiye erişmek için enerji dönüşümü ve depolaması önemli rol oynamaktadır.

1.2. Enerji Depolama

Günümüzde güç sistemlerinde kullanılan birçok enerji depolama sistemleri vardır. Enerji depolamanın birçok çeşidi vardır (Şekil 1). Bunlar sistemin kurulacağı çevre, depolama kapasitesi, boyutu, sistem ömrü ve maliyeti gibi birçok faktöre bağlı olarak değişiklik gösterir. Genel olarak elektriksel enerji depolama, termal enerji depolama ve mekanik enerji depolama şeklinde üç başlığa ayrılabilir (Kozak ve Kozak, 2012).



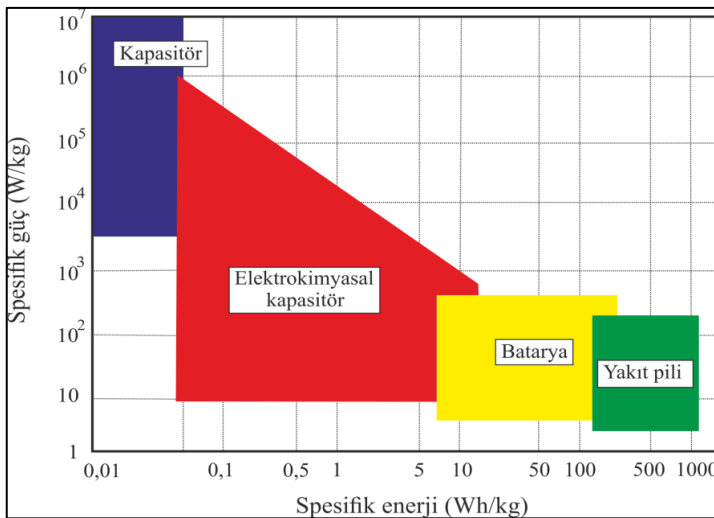
Şekil 1. Enerji depolama çeşitleri

Mekanik enerji depolama, bir cismin hem hareketinden hem de konumundan dolayı sahip olduğu enerjinin kısa veya uzun süreli depolanmasıdır. Hazneli pompalı sistemler, sıkıştırılmış hava ve volanlar birer çeşididir. Örneğin hazneli/pompalı sistemlerde enerji nehir veya gölden sağlanan hidro enerji, yüksek bir yere depolanır. Daha sonra enerji ihtiyacı olduğu durumlarda yüksek bir yere depolanan su aşağıya

doğru akıtılarak türbini çevirme vasıtası ile elektriğe çevrilir. Sıkıştırılmış hava depolamada da benzer olarak depolanan potansiyel enerji kinetik enerjiye çevrilir. Volanlar ise mekanik sistemlerde darbeli çalışan yüklerde tahrik gücünün fazla olduğu periyotlarda fazla enerjiyi üzerine alan ve ihtiyaç anında bu enerjiyi yüke aktararak yük dengelemesi yapan bir makine elemanlarıdır (Kocaman, 2013).

Termal enerji bir maddenin sıcaklığı ve/veya fazının değişimi sırasında depolanan ısıtma, soğutma, erime, katılaşma ve buharlaşma yoluyla depolanan enerjidir. Bu değişim duyulur veya gizli olarak gerçekleşebilir ve ortaya çıkan enerji kullanılabilir (Yilmazoğlu, 2010).

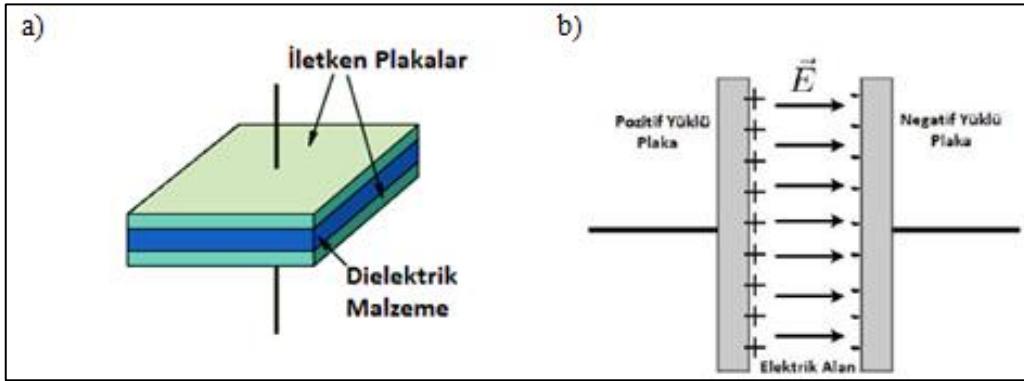
Elektrik enerjisi depolamada genellikle kimyasal piller, lityum-iyon piller ve bateriler gibi elektrokimyasal çevrim sistemleri, yakıt hücreleri ve kapasitörler kullanılmaktadır (Berrueta ve Ursúa, 2019). Genel olarak süperkapasitör, elektrokimyasal çift tabakalı kapasitörler (EDLC) şeklinde adlandırılan kapasitörler, yüksek güç yoğunluğu, hızlı şarj ve deşarj özellikleri olan enerji depolama araçları, mobil araçlardan devasa boyutlu elektrikli araçlara kadar geniş ölçekte uygulama alanı bulmaktadır. Pil ve bataryalara göre daha fazla şarj/deşarj döngüsü, yüksek ve hızlı güç yoğunluğu, geniş çalışma sıcaklığı, düşük iç direnç gibi özelliklere sahiptirler (Şekil 2). Süperkapasitörler; fiziksel prensipleri, elektrolit, elektrot materyalleri, enerji depolama mekanizmaları, modelleme, dizayn, fabrikasyon ve uygulamaları konusunda çokça araştırmalar yapılan güncel enerji depolama teknolojilerindendir (Berrueta ve Ursúa, 2019). Malzeme ve teknoloji geliştirilmesi alanında süperkapasitör araştırmaları önemli yere sahip olacaktır.



Şekil 2. Ragon diyagramı (Christen ve Carlen, 2000)

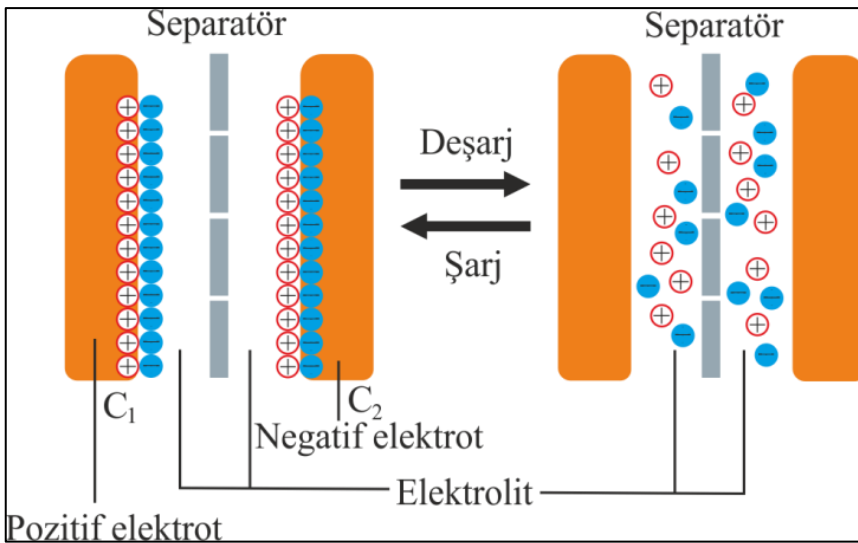
1.3. Süperkapasitörler

Süperkapasitörler elektrik enerjisini elektrik alanı olarak depolayan sistemlerdir. Temel olarak iki iletken plaka ve arasında yalıtkan/iyon geçirgen malzeme içerirler (Şekil 3). Kapasitöre gerilim uygulandığı zaman iki levha birbirine zıt şekilde elektrik yükü ile yüklenir ve bir elektrik alanı oluşur. Levhalar arasında bulunan ayırıcı ile levhaların teması önlenir ve kutuplaşma sağlanır.



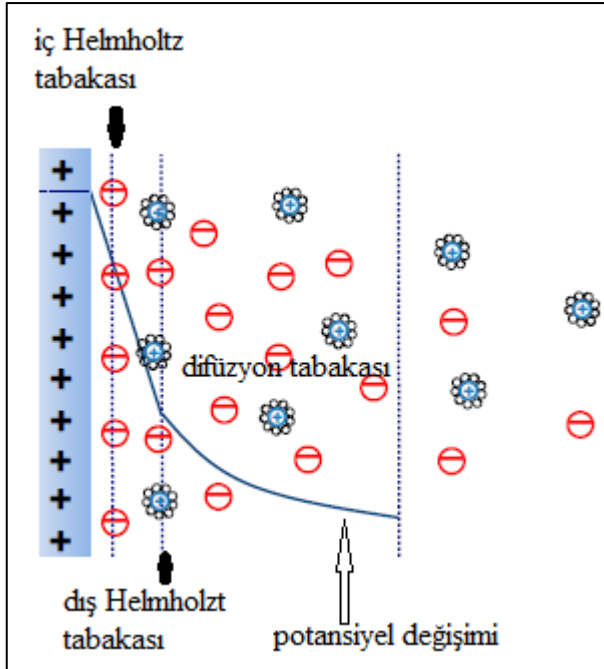
Şekil 3. a) Kapasitör yapısı, b) elektrik alan oluşumu (URL-1)

Süperkapasitörler ile enerji depolama (+) ve (-) yüklenmiş 2 adet gözenekli elektrot arasında iyonlardan oluşan elektrolit ortam ile sağlanmaktadır. Elektrolitin yüküne göre zıt yüklü iyonlar elektrot yüzeyine doğru hareket ederek bir çift tabaka oluşturur (double layer). Her iki yük, aradaki iyon geçirgen dielektrik tabaka ile birbirinden ayrılır. Yük depolama mekanizması bu çift tabaka yüklenmesinin bir etkisidir (Şekil 4).



Şekil 4. Kapasitör şarj-deşarj (Sharma ve Bhatti, 2010)

Şarj anında elektrot (elektronik iletken) ve elektrolit (sıvı iyonik iletken) arasında faz sınırı oluşmaktadır. Oluşan bu faz sınırı Helmholtz katmanı olarak adlandırılmaktadır (Şekil 5). Elektrot bölgesine en yakın olan tabaka iç Helmholtz tabakası olarak adlandırılır. Çözeltiye doğru olan, iç kısımda çözücü moleküller ile sarılmış ve elektrot yüzeyindeki yükün tersi yük biriken tabaka ise dış Helmholtz olarak adlandırılmaktadır. Bu iki tabaka ardından gelen ve iyonların elektrot yüzeyine belirli kuvvetle hareket ettiği tabaka ise difüzyon tabakası olarak adlandırılmaktadır. Çift tabakada yükün yüzey yoğunluğu, uygulanan potansiyelle birlikte anyon ve katyonların adsorpsiyon-desorpsiyon döngüsüne bağlıdır.



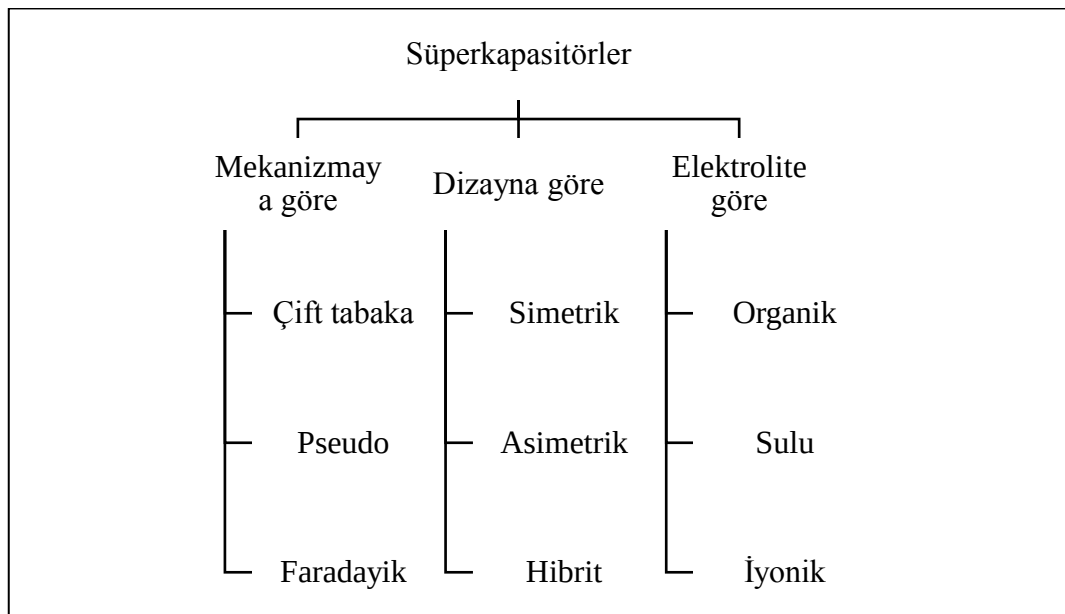
Şekil 5. Elektrokimyasal çift tabaka ve Helmholtz tabakası oluşumu (Liu vd., 2019)

Süperkapasitörlerde enerji depolama, çift tabaka dışında pseudokapasitif ve faradayik davranışlarla da olabilir. Pseudokapasitanslar kısmen tersinir olmayan elektrokimyasal reaksiyonları da içerir. Faradayik kapasitanslarda ise batari tipi tersinir redox reaksiyonları önemlidir. Pseudo ve faradayik kapasitör tipinde elektroaktif materyal reaksiyonları etkindir.

Elektrotlarda her üç davranışı birbirinden keskin çizgilerle ayırmak mümkün olmayabilir. Çift tabaka davranış, katkısı az olmakla birlikte diğer iki tür kapasitansta da gözlenebilir.

Süperkapasitörler anot ve katottaki mekanizmaya göre de sınıflandırılabilirler: Simetrik süperkapasitörler her iki elektrotta aynı tür materyal kullanılan kapasitörlerdir. Enerji ve güç yoğunlukları düşük olmakla birlikte uzun ömürlü ve ucuzdurlar. Asimetrik süperkapasitörlerde iki farklı kapasitör benzeri materyal kullanılır. Güç ve enerji yoğunlukları fazla ancak maliyetleri yüksektir. Hibrit süperkapasitörlerde ise kapasitör benzeri ve faradayik materyallerle elektrotlar hazırlanır, enerji yoğunluğu yüksektir.

Süperkapasitörlerde elektrik yükünü taşıyan elektrolitler organik, sulu veya iyonik tür olabilir. Organik elektrolitlerin bozunma potansiyellerinin yüksek olması (~3V) bir avantaj olmakla birlikte mikro gözenekli elektrotlar için uygun değildir, viskoziteleri çoğu zaman bir sorun teşkil etmektedir ve toksik olabilirler. Suyun bozunma voltajı 1,23 V olduğu için sulu elektrolitlerin kullanım potansiyeli sınırlıdır. Sulu elektrolitler hem ucuz, hem de mikro gözenekli elektrotlar için uygundur ve iyon taşınımı hızlıdır. İyonik sıvılar ise sulu elektrolitlere alternatif olabilirler ve organik solventlerin avantajlarını gösterebilirler (~4.0V). Ancak güncel maliyetleri yüksek olduğu için tercih edilmemektedir (Xia vd., 2017). Bunların dışında solvent-free katı hal (solid state) süperkapasitörler üzerine çalışmalar da yapılmaktadır (Ye vd., 2020). Bu tür elektrolitlerin redoks reaksiyonları ile kapasitansa psödokapasitif ve faradayik olarak katkısı olabilmektedir. Uygun elektrolit seçimi enerji yoğunluğunu arttırmakla kalmaz iç direncin azalması, spesifik güç artışı ve deşarj süresinin azalmasına da yardımcı olur.



Şekil 6. Süperkapasitör grupları

Kapasitör çeşitleri Şekil 6’da verilmiştir. Süperkapasitörlerin baterilere göre dezavantajı spesifik enerjilerinin düşük olmasıdır ancak spesifik güçleri yüksektir. Şarj-deşarj döngüleri hızlı ve çalışma sıcaklık aralığı da yüksektir. Spesifik güç ve enerji Eşitlik 1 ve 2’de tanımlanmaktadır (Balakrishnan ve Subramanian., 2014).

$$E_s = C \times V^2 / (2) \quad (1)$$

$$P_s = V^2 / (4 \times ESR) \quad (2)$$

Burada E_s spesifik enerji, P_s spesifik güç, C kapasitans, V voltaj, ESR iç direnci gösterir. Buradaki eşitliklerden de görüleceği üzere kapasitansı veya çalışma voltajını artırmak, enerji yoğunluğunu artırır. Voltaj, elektrolide bağlı iken kapasitans artırımı elektrot materyaline bağlıdır. Bu yüzden özellikle elektrot malzemelerinin geliştirilmesi, süperkapasitör araştırmaları açısından önemli yere sahiptir.

Süperkapasitörlerdeki performansı etkileyen en önemli parça elektrotlardır. Enerji, elektrot-elektrolit ara yüzeyinde depolandığı için elektrot materyali süperkapasitörlerin kalbini oluşturur.

Elektrot materyali olarak metal oksitler, polimerler ve karbon esaslı malzemeler kullanılır (Afif vd., 2019; Pan vd., 2019) . Metal oksitler ve polimerler, yüksek kapasitans özelliği göstermesine rağmen, düşük yüzey alanı, zayıf iletkenlikleri ve zayıf kararlılıkları gibi negatif özellikleri nedeniyle ticarileşmenin önünde önemli engel oluşturmuşlardır. Karbon esaslı malzemeler ucuzluk, kolay bulunurluk, kimyasal kararlılık, yüksek kapasitans ve yüksek sıcaklıklarda çalışabilme gibi özellikleri açısından tercih edilirler.

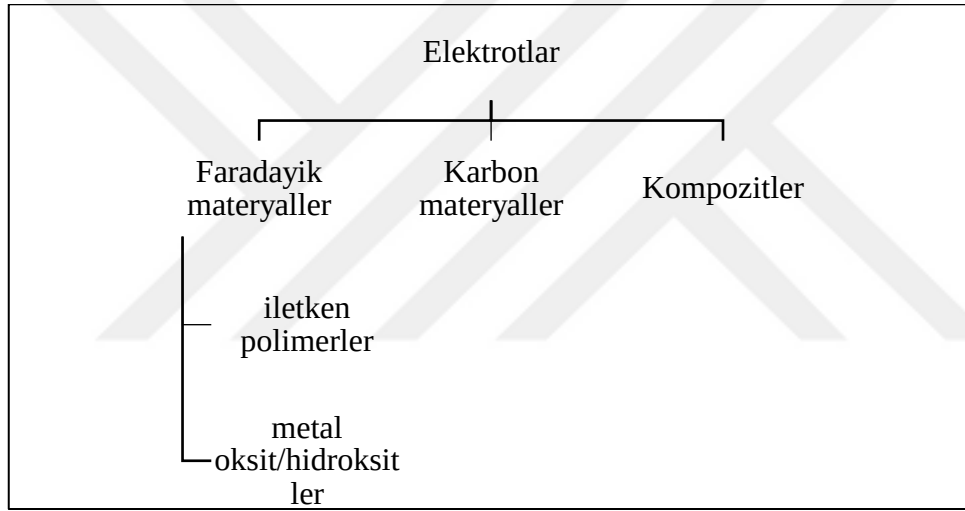
1.4. Elektrotlar

Süperkapasitör elektrot materyalleri, kullanılan malzeme ve yük depolama şekli bakımından gruplara ayrılabilir (Şekil 7).

Metal oksitler elektrot üzerinde redoks reaksiyonları gerçekleştirerek yük depolama gerçekleştirirler. Yüksek iletkenliğe, uzun çevrim ömrüne sahiptirler (Balakrishnan ve Subramanian, 2014). Bu tip materyalle üretilen elektrotlar geleneksel elektrotlara göre daha verimli enerji depolama kapasitesi ve yüksek spesifik kapasitans özelliği gösterirler.

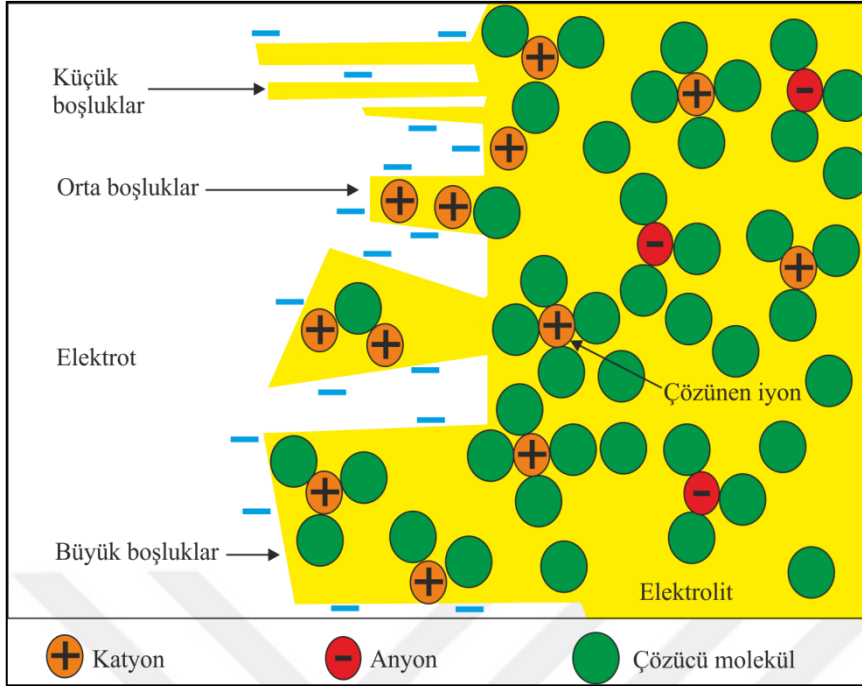
İletken polimerler elektrot-elektrolit ara yüzeyinde redoks davranışları sergileyerek enerji depolama özelliği göstermektedirler. Düşük maliyet, geniş çalışma potansiyel aralığı, düşük seri direnç, ayarlanabilir redoks aktivitesi, yüksek kapasitans gibi özelliklere sahiptirler. İletken polimerlerin bu özellikleri süperkapasitör elektrot materyali geliştirmek için uygun bir aday olmasını sağlamaktadır (Vangari vd., 2013).

Kompozit malzemeler hibrit süperkapasitörlerde kullanılmaktadır. Karbon esaslı malzemeler ile metal oksit veya iletken polimerlerin birleşimini içermektedir. Malzemelerin kombinasyonu ile elektrolitin elektrot yüzey alanına erişimi kolaylaştırılarak spesifik kapasitans değeri arttırılabilmektedir (Samantara ve Ratha, 2018).



Şekil 7. Elektrot materyalleri (Wang vd., 2012)

Süperkapasitörlerde elektrot malzemesinin gözenek boyutunun elektrolit cinsine uygun olması gerekir (Şekil 8). Sulu asit elektroliti kullanıldığında gözeneklerin mikro boyutlu ($<2\text{nm}$) olmasının yüksek enerji yoğunluğu sağlayacağı bildirilmiştir (Afif vd., 2019). İdeal gözenek boyutunun 3 nm civarında olması tercih edilir ki iyonların difüzyonu ve dolayısıyla süperkapasitörün şarj-deşarj zamanı çok uzun veya çok kısa olmaz (Moseley ve Garche, 2015). Ancak mezo-gözeneklerin varlığının hızlı iyon transferini ve iyonların gözeneklere girişini artıracak ve dolayısıyla enerji depolamayı artıracakını bildiren çalışmalar da mevcuttur (Moussa vd., 2018).



Şekil 8. Elektrolit-elektrot gözeneği etkileşimi (Berrueta ve Ursúa, 2019)

Süperkapasitörlerde gözenekli elektrotlar yüksek performans için olmazsa olmazlardandır. Elektrot materyallerinde yüzey alanı büyüdükçe enerji depolama kapasitesi artar ancak yüksek yüzey alanı, yüksek kapasitans için tek başına yeterli değildir. İyonların yüzeye adsorpsiyon-desorpsiyonu ile gözenekli ve yüksek yüzey alanlı elektrotlardaki kapasitansın, metal film kapasitörlere göre daha fazla olduğu bildirilmiştir (Liu vd., 2019; Moseley ve Garche, 2015). Eşitlik 3’de kapasitansın parametreleri verilmiştir.

$$C = \frac{A}{s\Delta V} = \frac{A}{2 \cdot V \cdot m \cdot EW} \quad (3)$$

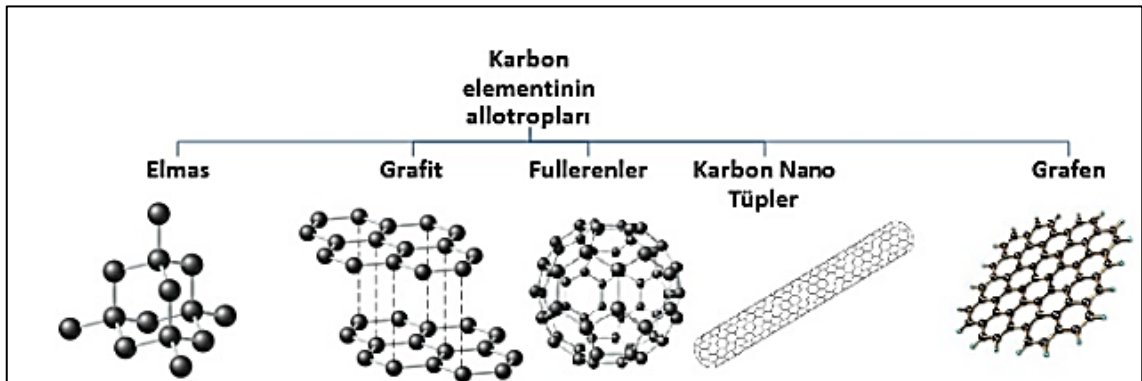
Eşitlik 3’te C kapasitans, A elektrotun yüzey alanı, sΔV potansiyel değişimi, V tarama hızı voltajı, m elektrot kütlesini, EW ise potansiyel pencereyi ifade etmektedir. Çoğu elektrot malzemelerinde enerji yoğunluğu düşük olduğundan yüksek güç yoğunluğundan ödün vermeden enerji yoğunluğunu artırmak için kompozit materyaller geliştirilmektedir (Samantara ve Ratha, 2018).

1.5. Karbon Elektrotlar

Birçok materyal süperkapasitör elektrot materyali olarak araştırılmaktadır. Bunların arasında karbon materyaller, yüksek yüzey alanı ve gözenek özellikleri, kontrol edilebilir gözenek boyutu, yüksek elektriksel iletkenlik, birkaç milyon şarj-deşarj döngüsünde dahi stabil ve kararlı olması gibi özellikleri nedeniyle süperkapasitör uygulamalarında esas malzeme olarak düşünülmektedir. Ayrıca kapasitörler için gerekli olan iyonların adsorpsiyon-desorpsiyon mekanizmaları için oldukça iyi bir taşıyıcı (host, support) görevi görmektedir. Karbon doğada bol bulunması, ucuz olması, kimyasal kararlılığı, iyi döngüsel kararlılık, potansiyel olarak yüksek çalışma voltajı, yüksek sıcaklıklara dayanıklılık, çevre dostu olması gibi özelliklere sahip olduğu için de süperkapasitör uygulamalarında tercih edilir (Lu vd., 2015).

Karbon malzemelerde yüzey fonksiyonel gruplarının varlığı kimyasal sorpsiyona olanak sağlar ve ıslanabilirlik (wettability) oranını artırarak iyonların gözeneklere difüzyonunu ve hatta kristal yapıda ara tabakalara nüfusunu (intercalation) kolaylaştırır (Şekil 8).

Karbon tabanlı süperkapasitör elektrotları denildiğinde karbon nano-materyallerden bahsedilir (Hou vd., 2020). Karbonun farklı kristal ve gözenek yapısına sahip birçok allotropu bulunmaktadır; grafit, grafen, elmas, karbon fiber, aktif karbon, karbon siyahı, karbon nanotüp, fulleren gibi (Şekil 9) (Jiang vd., 2013). Her bir allotropun gösterdiği farklı fiziksel ve kimyasal özellikleri, karbon süperkapasitörleri de çeşitlendirmektedir.



Şekil 9. Karbonun bazı allotropları (URL-2)

Karbon nanotüp süperkapasitör uygulamalarında elektronik, mekanik, optiksel ve kimyasal karakteristiği bakımından avantajlıdır. Karbon aerogeller gözenekli, nano

parçacık ağı karbon yapısından dolayı bir bağlayıcı madde kullanmadan elektrotlarda kullanılabilir. Elektrotların eşdeğer dirençleri düşüktür. Grafit, yüksek termal kararlılığa, elektriksel ve termal iletkenliğe sahiptir. Fullerenler basınca dayanıklıdır ve katılanma ile elektriksel iletkenliği artırılabilir (Klupp vd., 2016). Grafen, son zamanların popüler karbon materyali olarak süperkapasitör uygulamalarında çokça araştırılmaktadır (Candelaria vd., 2012). Güçlü kovalent bağlara sahip, oldukça kuvvetli bir malzemedir. Metal ve yarı iletkenlerin arasında belirgin özellikleri sayesinde ayarlanabilir bant aralığı sunar, elektron/boşluk transferini destekleyerek, korozyon direncini arttırmaktadır.

Bu tür 0-2 boyutlu karbon materyallerin hazırlanma prosedürleri karmaşık ve maliyetleri yüksek olabilir (Tiwari vd., 2016). Dolayısıyla daha ucuz olan aktif karbon gibi 3 boyutlu karbon materyaller de süperkapasitör uygulamalarında araştırılmaktadır (Ayinla vd., 2019). 3 boyutlu karbonların dezavantajı ise elektriksel iletkenlik ve gözenek yapısının daha düşük boyutlu karbonlara göre istenilen seviyede olmamasıdır. Bu dezavantaj, karbonun çeşitli modifikasyonları ile giderilebilmektedir (Liu vd., 2019).

1.6. Yenilenebilir Karbon

Elektrot yapımında kullanılan temel karbon malzemelerin çoğu fosil kaynaklıdır. Fosil kaynakların rezervlerinin giderek azaldığı ve çevresel etkileri düşünüldüğü zaman süperkapasitör karbon elektrotlarının geliştirilmesinde yenilenebilir karbon önem kazanmaktadır. Yenilenebilir tek karbon kaynağı biyokütledir.

Biyokütleden türetilen gözenekli karbon; ucuz, bol bulunur, sürdürülebilir, boyut-elektriksel iletkenlik ve yüzey alanı ayarlanabilir, elektrokimyasal stabilite gibi özellikleri nedeniyle süperkapasitör uygulamaları için iyi bir aday olabilir (Yang vd., 2019). Ayrıca, bu karbonun aktif merkezlerinin ve yüzey fonksiyonel gruplarının bulunması, elektrolitin materyale iyi şekilde işlemlerini (impregnation) de sağlar (Chen vd., 2017).

Biyokütleden karbon üretmek için karbonizasyon gerçekleştirilir. Bunun için havasız veya çok az hava içeren ortamda ısıtarak piroliz işlemi-kuru karbonizasyon şeklinde yapılabileceği gibi, hidrotermal koşullarda sulu ortamda da karbonizasyon gerçekleştirilebilir. Kuru karbonizasyonda elde edilen karbon ürün oranı daha fazladır ve türetilen karbon biyokömür (biochar) olarak adlandırılır. Saf karbon değildir,

içerisinde mineraller, yapısında H, O gibi elementler mevcuttur, çoğunlukla amorf bir yapıya sahiptir ve elektriksel iletkenliği düşüktür (Sizmur vd., 2017).

Biyokömür, türetildiği haliyle süperkapasitör uygulamaları için genellikle uygun değildir. Amorf yapısı piroliz sırasında veya piroliz sonrasında grafitizasyon araçları ve ısı ile düzenlenir, fiziksel ve kimyasal aktivasyon ile süperkapasitör uygulamaları için istenilen yüzey alanı, gözenek yapısı veya diğer özellikler kazandırılabilir (Yang vd., 2019).

Grafitizasyon, amorf bir yapının fiziksel ve/veya kimyasal yöntemlerle (piroliz, Modifiye Hummers gibi) grafitik bir yapıya dönüştürülme süreci olarak tanımlanabilir. Demir ve bor gibi metal/metal bileşikler, amorf karbon yapısının grafitize olmasını da sağlamaktadır (Li vd., 2018). Atom numarası karbona yakın olduğu için bor, tercih edilen bir elementtir (Niu vd., 2013). Bor atomu yük transferini ve karbonun termal kararlılığını iyileştirir, karbon materyalin yapısal düzenlenmesini sağlar (Zhan vd., 2016).

Fiziksel aktivasyon; karbonizasyon sırasında veya sonrasında genellikle karbondioksit veya buhar yardımı ile yüzeyin aktive edilmesi, gözenekliliğin ve yüzey alanının geliştirilmesi için yapılır. Gözenekli yapı elektrolit difüzyonunu artırmakla kalmayıp elektrot malzemesinin elektriksel iletkenliğini de geliştirmektedir (Wang vd., 2017). Metal kloritler, biyokütle kaynaklı karbon malzemelerin mikro gözenek yapılarını geliştirmede kullanılmaktadır.

Kimyasal aktivasyonda piroliz öncesi-sırası veya sonrasında çeşitli kimyasallarla gözenek yapısı ve yüzey fonksiyonel özellikleri geliştirilebilir Karbon malzemeler kimyasal aktivasyon sonucunda yüksek yüzey alanına sahip, gözenek dağılımı düzenli yapılar gösterebilmektedirler (Gao vd., 2017).

Karbon yapısına heteroatom (nitrojen (N), bor (B), fosfor (P), sülfür (S), oksijen (O) vb.) katkılamanın da elektrokimyasal enerji depolamayı artırdığı gösterilmiştir (Li vd., 2020). Heteroatom katkılama, yapıdaki elektrokimyasal aktif alanları yani etkin depolama alanlarını ve difüzyon kinetik seviyesini artırır, karbon tabakaları arasındaki mesafeyi artırır. Dolayısıyla enerji depolama kapasitesine ek faradayik etki (pseudokapasitans) veya adsorpsiyon-desorpsiyon etkisi ile katkıda bulunur. Tek atom yerine iki veya daha fazla atomun eş olarak katkılanması (co-dopping), sinerjik olarak enerji depolama kapasitesini iyileştirebilmektedir. Diğer yandan biyokütleden türetilen biyokömür karbonunda biyokütle türlerinin yapısında bolca bulunabilecek N, P, S gibi

atomlar da kendiliğinden katkılama (self-doping) sağlayabilir.

1.7. Bor Katkılama

Heteroatom katkılama (doping), karbon malzemenin birçok özelliğini geliştirir; ıslanabilirlik, elektrokimyasal aktivite, elektronik özellikler, elektrokimyasal aktif yüzey alanı, pseudokapasitif özellik, iç yapıda band aralığı, elektriksel iletkenlik, iyonların işlenmesi-difüzyonunu gibi (Qian vd., 2020).

Bor katkılamada bor atomları karbon çerçeve yapısına trigonal yapıda girer ve elektron akseptörü rolünün oluşmasını sağlar. Değerlik elektronu +3 ile iletkenlik bandında fermi seviyesinin iletkenlik bandına kaymasını sağlar (p-tipi iletkenlik). Bu da elektron transferinin sadece karbon atomları tarafından değil katkılanan bor ve karbon atomu arasında oluşan iletkenlik bandları ile de gerçekleşmesini sağlar ve elektriksel iletkenliğin kontrol edilebilirliğini artırır. Elektronik yapıdaki bu değişim, karbonun elektrokimyasal enerji depolamasını ve difüzyon kinetiğini iyileştirir. Ayrıca oksijen kemisorpsiyon prosesinde katalitik etki gösterebilir; karbonun yüzeyindeki oksijen içeren fonksiyonel gruplarla redoks reaksiyonlarını katalitik olarak iyileştirir, depolama alanlarını zenginleştirir. Bor, amorf karbon yapısının grafitik düzenlenmesinde de etkili bir katalizördür.

Guo vd. (2018) nişastadan ürettikleri karbona bor ve azotu eş zamanlı katkılamışlar ve bu katkılamanın süperkapasitör malzemesinde faradayik kapasitansı artırdığını göstermişlerdir.

Liu vd. (2015) yenilenebilir karbon kaynağı kavak ağacı talaşından ürettikleri gözenekli karbona bor katkılamış ve polianilin (PANI) pseudokapasitif elektroduyla birlikte kullanmışlardır. Tek başına PANI ile 290 F/g kapasitans elde edilirken bor katkılı karbon ilaveli elektrodun kapasitesi 421 F/g'a kadar çıkmıştır. Karbonun gözenekliliği, borun karbon yapısının grafitizasyonuna katkısı ve kompozit materyale sinerjetik etkisi, bu artışın gerçekleşmesine neden olmuştur.

Zhang vd. (2017) bor ile modifiye edilmiş fenolik reçinenin mezo yapılı olduğunu, hidrojen bağlama yeteneğinin yüksek olduğunu ve fermi seviyesinin azaldığını göstermiştir. Bu da kapasitansın artmasını sağlamıştır. Xin vd. (2017), siklodekstrine bor katkılanarak türetilen mezo gözenekli karbon malzemenin adsorpsiyon özelliklerinin güçlü olduğunu raporlamışlardır. Yenilenebilir karbon

kaynağı biyokütleden karbon türetilmesi ve bor heteroatom katkılanarak enerji depolamadaki kapasitesinin belirlenmesi hakkında çalışmalar güncel olmakla birlikte sınırlıdır.

1.8. Elektrokimyasal Enerji Depolamanın Değerlendirilmesi

Süperkapasitörlerce depolanan enerji miktarının hesaplanması, elektrot materyalinin gösterdiği direnç ve şarj-deşarj döngüsünün karakterizasyonu için elektrokimyasal analizler yapılır. Bunlar başlıca döngüsel voltametri (CV), galvanostatik şarj-deşarj (GCD) ve elektrokimyasal impedans spektroskopisidir (EIS).

CV analizi, enerji depolama mekanizmalarında kullanılan malzemede depolanan yük hakkında bilgi veren bir ölçüm sistemidir. Elektrot sisteminde bulunan çalışma ve referans elektrodu arasında uygulanan doğrusal potansiyel ile akım değişiminin ölçülmesi ile elde edilmektedir (Moseley ve Garche, 2015). Malzemelerin gram, cm² veya cm³'ünde Farad olarak kapasitanslarını ifade etmektedir. İdeal bir kapasitör dikdörtgen bir çevrim göstermektedir. Oluşan çevrim eğrileri aktif elektrot malzemesinin gözenek yapısı ve işlevselliği, yük yayılımı, iyon difüzyonu vb. hakkında da bilgi vermektedir (Samantara ve Ratha, 2018).

GCD, depolama sistemlerinin seri direnç kullanılarak yük depolama özellikleri hakkında bilgi veren bir elektrokimyasal analiz çeşididir. Ölçüm, potansiyel uygulanan sabit bir akımla zamanın bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Ölçüm sonucunda şarj/deşarj eğrisi elde edilmektedir. Oluşan eğriler ile depolama sisteminde kullanılan aktif elektrot malzemesinin gözenek yapısı, iyon taşınımı ve kapasitif davranışı yorumlanabilmektedir (Samantara ve Ratha, 2018).

EIS küçük genlikli AC sinyali uygulanarak elde edilen frekansın oluşturduğu grafiklerle yorum yapılan bir analiz tekniğidir. Bu ölçüm yöntemi ile elde edilen empedans spektrumlarından süperkapasitörlerin seri direnç (ESR) ölçümü yapılabilmekte ve cihazın özgül gücü hesaplanabilmektedir. Aynı zamanda elde edilen grafiklerden kullanılan aktif elektrot malzemesinin iç direnci, gözenek yapısı iyon erişimi vb. yorumları yapılabilmektedir (Samantara ve Ratha, 2018).

Elektrokimyasal karakterizasyonlar iki veya üç elektrotlu sistemler ile belirlenebilir. Üç elektrotlu sistemler ile daha hassas ölçümler gerçekleştirilebilir. Elektrotlar; çalışma elektrotu, referans elektrot ve yardımcı elektrottur. Bir

potantiyostat/galvanostat ile istenilen karakterizasyonlar gerçekleştirilir. Karbon partikülleri, aralarında elektriksel iletkenliği de sağlamak üzere PTFE, PVDF, NMP gibi iletken bir bağlayıcı ile birleştirilir ve preslenerek veya ince tabakalar halinde kapasitörlerde uygulanır.

1.9. Literatür Özeti

Süperkapasitör keşfi tarihsel olarak 1800'lü yıllara dayanmaktadır. İlk süperkapasitör 1957 yılında H.I Becker tarafından karbon elektrot kullanılarak çift katman üzerinde depolama olarak tasarlanmıştır. Anot ve katot uçları elektrolit içerisine batırılmış Becker'in ilk süperkapasitörü bataryaya benzemiştir (Samantara ve Ratha, 2018).

2000-2010 yılları arasında farklı enerji depolama aygıtları geliştirilmeye başlanmış ve nanoyapılı seramik oksit malzemeler üzerine birçok makale yayımlanıp patent alınmıştır (Tablo 1). Günümüzde de süperkapasitör üretimi için farklı yollar denenerek, güç ve enerji yoğunluğu ve depolama kapasitesi yüksek, yenilenebilir, sürdürülebilir malzemelerle elektrotlar geliştirilmektedir.

Tablo 1.Süperkapasitör gelişiminin tarihsel aşamaları (Moseley ve Garche, 2015)

Yıllar	Olaylar
1957	H.I Becker ilk süperkapasitörü üretti.
1960-1970	1970 yılında süperkapasitör teknolojisini geliştiren D.Boos, patentini aldı.
1970-1980	1978 yılında NEC, süperkapasitörü ticarileştirdi. 1980 yılında SOHIO Maxcap adında çift katmanlı kapasitör geliştirdi.
1980-1990	Rusya ilk asimetrik süperkapasitörü piyasaya sürdü. 1990 yılında ELIT, iki aktif karbon elektrot ve potasyum hidroksit ile simetrik süperkapasitör üzerine odaklanmaya başladı.
1990-2000	1996 yılında NEC, FG serisi, yüksek güçlü FT serisi ve FC serisi gibi yeni ürünler tanıttı.

Yenilenebilir biyokütle temelli karbon malzemeler, elektriksel ve fiziksel özelliklerinden dolayı süperkapasitörlerde elektrot malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Biyokütle temelli karbon malzemenin süperkapasitör uygulamaları ile ilgili güncel bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir ve Tablo 2’de de verilmiştir.

Qiu vd. (2018) enerji ve güç yoğunluğu yüksek biyokömür temelli süperkapasitör elektrot materyali üretmeyi amaçlamışlardır. Aktif elektrot materyali olarak mısır samanını (püskülü) kullandılar. Mısır samanı piroliz yöntemi kullanılarak biyokömüre dönüştürülmüş ve KOH ile aktifleştirilmiştir. Bu aktivasyon, karbon yapısında bulunan mikro gözenekleri önemli ölçüde geliştirmiş, bu da kapasitansı artırmıştır. Sonuç olarak mısır samanından 327 F/g kapasitans özelliğine sahip 120 bin şarj-deşarj çevrimi yapabilen elektrot materyali türetilmiştir.

Zhang vd. (2014) akağaç tahtasının 750 °C’de 2 saat boyunca azot atmosferi altında pirolizi sonucu elde edilen biyokömürü süperkapasitör elektrot materyali olarak kullanmışlardır. Akağaç tahtasından elde edilen biyokömür ile türetilmiş elektrot ile 32 F/g spesifik kapasitans ve 2600 şarj-deşarj çevrimi elde edilmiştir.

Jiang vd. (2013) ginkgo kabuğu ile grafitize edilmiş ginkgo temelli aktif karbon materyali üretmişlerdir. Ginkgo kabuğu 600 °C sıcaklıkta azot atmosferi altında 1 saat boyunca tutularak piroliz edilmiştir. Daha sonra elde edilen malzeme KOH ile aktive edilen ginkgo kabuklu aktive edilmiş karbona kobalt nitrat emdirilerek 900°C de 2 saat boyunca azot atmosferi altında sıcaklık ile muamele edilmiştir. Yapılan karakterizasyonlar sonucu 178 F/g spesifik kapasitans, iyi elektrik iletkenliği ve yüksek yüzey alanına sahip elektrot materyali elde etmişlerdir.

Jiang vd. (2013) kırmızı sedir tahtasından 750°C’de piroliz ile yüksek karbon içerikli düzenli gözeneklere sahip materyal elde etmişlerdir. 14 F/g kapasitansa sahip olan biyokömür, seyreltik nitrik asit ile muamele edildiği zaman spesifik kapasitans değerinin 7 kat arttığı gözlemlenmiştir (115 F/g).

Oliveras-Marin vd. (2009) kiraz çekirdeklerinden süperkapasitör elektrot materyali üretmişlerdir. Piroliz öncesi seyreltik H₂SO₄ ve çeşitli sıvı solüsyonlarla (KOH, ZnCl₂, H₃PO₄) aktive edilen biyokütle, azot atmosferi altında 400-900 °C arasında piroliz edilerek biyokömüre dönüştürülmüştür. Ölçümler sonucu KOH ile aktive edilmiş örneklerin gözenek boyutlarının daha iyi geliştiği, elektriksel iletkenliğinin daha iyi olduğu ve H₂SO₄ sıvı elektrolitte 120 F/g enerji depolama kapasitesine sahip olduğu gösterilmiştir.

İnal vd. (2015) çay atıklarının K₂CO₃, H₃PO₄ ile kimyasal aktivasyonu, azot atmosferi altında 450°C’de 1 saat boyunca karbonizasyonu sonucunda mikro-mezo

gözenekli aktif karbon türetmiş ve süperkapasitör elektrot uygulamasında kullanmışlardır. Oluşturulan aktif karbonun gözenek yapısı ve yüzey işlevselliğinin elektrokimyasal performans üzerine etkisi değerlendirilmiştir. Farklı kimyasallarla aktive edilen elektrotların her ikisinin de çevrim stabilitesinin iyi olduğunu ve sırasıyla 203 F/g ve 89 F/g kapasitif performans gösterdiğini belirlemişlerdir.

Peng vd. (2013) çay atık yapraklarını kullanarak süperkapasitör elektrot malzemesi üretmişlerdir. Çay yapraklarını önce kaynamış su içerisinde ıslatmışlar, ıslatılmış çay yapraklarını kurutmuşlar ve argon atmosferinde 600°C 'de 2 saat boyunca karbonize etmişlerdir. Karbonize edilmiş çay atıklarını karbon/KOH kütle oranı 1:4 olacak çözeltide emdirme işlemine tabi tutmuşlardır. KOH ile aktive edilmiş çay yapraklarını 800°C'de 1 saat boyunca tekrar karbonize etmişlerdir. Karbonize materyalin yüksek yüzey alanına sahip, gözenekli ve amorf benzeri bir yapıya sahip olduğunu belirlemişlerdir. Sıvı KOH elektrolit içerisinde yapılan ölçümlerde kapasitif davranışının 330 F/g olduğunu ölçmüşlerdir. Düşük maliyetli enerji depolama aygıtlarının geliştirilebileceğini belirtmişlerdir.

Mısır koçanını mikrodalga ve yavaş piroliz yöntemlerini kullanarak biyokömüre dönüştüren Jin vd. (2014), biyokömür yavaş pirolizin elektrokimyasal özellikleri daha fazla iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir. Elektrokimyasal ölçümler sonucunda 245,5 F/g spesifik kapasitans elde etmişlerdir.

Chen vd. (2015), bambu biyokütlesinden kimyasal aktivasyon (KOH ile) ve karbonizasyon ile işlenmemiş bambudan daha yüksek BET yüzey alanına sahip materyal elde etmişlerdir. Yan vd. (2014), fiziksel aktive edilmiş karbon malzemelerin, kimyasal aktive edilmiş olanlara göre daha düşük yüzey alanına sahip olduklarını belirtmişlerdir.

Bunun gibi literatürde antep fıstığı kabuğu (Goldfarb vd. 2017), toz şeker (Harmas vd., 2017), pirinç kabuğu (Teo vd., 2016), muz lifi (Subramanian vd., 2007), çekirdek kabuğu (Li vd., 2011) gibi çok farklı biyokütle kaynakları kullanılarak yenilenebilir süperkapasitör karbon elektrot materyalleri türetilmiş ve enerji depolama kapasiteleri belirlenmiştir (Tablo 2). Karbonize materyallere bor gibi heteroatom katkılamanın da gözenek yapısını geliştirdiği, elektriksel iletkenliği artırdığı ve kapasitansları iyileştirdiği yayımlanmıştır (Han vd., 2019; Guo ve Gao, 2009; Wang vd., 2008; Thirumal vd., 2016; Niu vd., 2013).

Bu çalışmada yerel çay fabrika atıklarının pirolizi ile karbonize materyalin

türetilmesi ve bor ile katkılanması sonucu enerji kapasitesi geliştirilen süperkapasitör elektrot malzemesi elde edilmesi amaçlanmıştır. Grafitizasyon, aktivasyon ve bor katkılama basamakları ile çay atıkları biyokütlerinden elde edilen karbon materyalin enerji depolama özelliğinin geliştirilebileceği belirlenmiştir. Böylece yerli, yenilenebilir biyokütle enerji kaynağı kullanılarak enerji depolama materyallerinin/sistemlerinin geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Tablo 2. Bazı çalışmalarda karbon materyalin enerji depolama miktarları

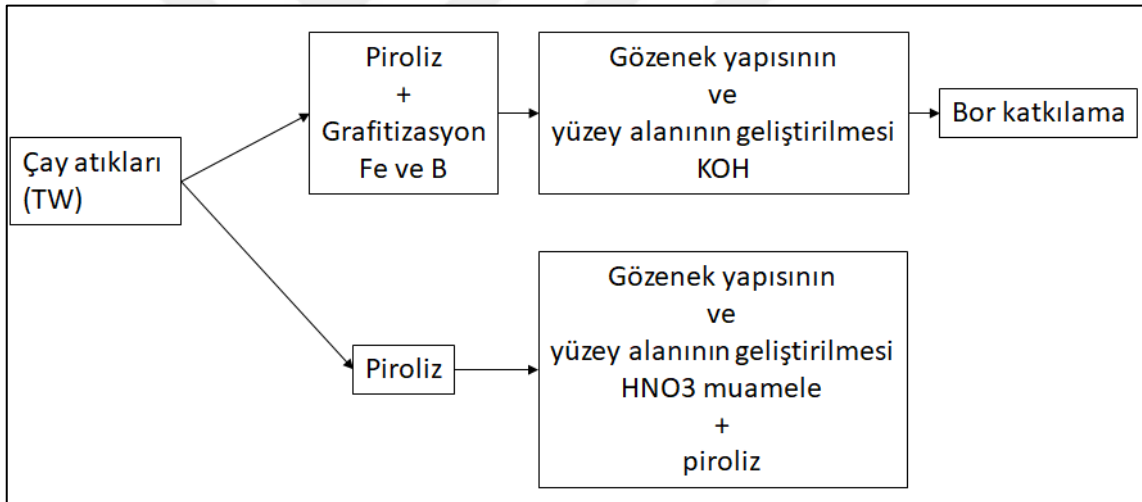
Biyokütle	Aktivasyon Metodu	S _{BET} (m ² /g)	Kapasitans (F/g)	Elektrolit	Referans
Tahta	KOH	2925	259	KOH	Chen vd., 2015
Ayçiçeği tohumu	KOH CO ₂ +KOH	1162 2509	244 311	KOH KOH	Li vd., 2011
Atık kağıt	KOH	526	180	KOH	Kalpana vd., 2009
Balık pulu	KOH	2273	168	KOH	Chen vd., 2010
Mısır püskülü	KOH	2790	327	KOH	Qiu vd., 2018
Atık çay	H ₃ PO ₄ K ₂ CO ₃	1327 1127	117 199	H ₂ SO ₄	Inal vd., 2015
Beyaz şeker	ZnCl ₂	2100	125	-	Harmas vd., 2017
Antep fıstığı kabuğu	KOH	1900	45	Li-tuz	Goldfarb vd.,2017
Kiraz çekirdeği	KOH	1100-1300	230	H ₂ SO ₄	Oliveras vd., 2009
Pirinç kabuğu	KOH	2696	147	KOH	Teo vd., 2016
Mısır tanesi	KOH	2936-3420	257	KOH	Balathanigaimani vd., 2008
Muz lifi	KOH ZnCl ₂	1097 686	66 74	Na ₂ SO ₄	Subramanian vd., 2007
Pamelo kabuğu	KOH	1181	190	KOH	Han vd., 2019
Karbon	KOH	894	268	KOH	Guo ve Gao, 2009
Silika KIT-6	KOH	956,8	267,8	KOH	Gao vd., 2016
Grafit tozu	H ₂ SO ₄	-	113	H ₂ SO ₄	Thirumal vd., 2016
Grafit tozu	KOH	91	172,5	KOH	Niu vd., 2013
Grafen oksit	KOH	466	200	KOH	Han vd., 2013

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tezde çay fabrikasında son ürün olarak ortaya çıkan çay atıkları biyokütlesi kullanılarak yenilenebilir karbon türetilmesi, karbon yapısının grafitizasyon, aktivasyon ve heteroatom-bor ile katkılanarak geliştirilmesi ve enerji depolama kapasitelerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Çalışmalar genel olarak 3 aşamada gerçekleştirilmiştir (Şekil 10):

- Yerel bir çay fabrikasından elde edilen çay atıkları biyokütlesinin grafitizasyon ajanları (bor ve demir) impregnasyonu ile pirolizi
- Elde edilen karbon ürünün gözenek yapısının aktivasyon ile geliştirilmesi
- Karbon materyale bor katkılama

Ayrıca gözenek yapısının HNO_3 ile geliştirilmesi ve kapasitif davranışı da incelenmiştir.



Şekil 10. Deneysel akış şeması

Çay fabrikası son ürünü olan ve çayın işlenmesi sonucunda ortaya çıkan çay atıkları biyokütlesi yenilenebilir karbon kaynağı kullanılmıştır (Şekil 11). Enerji depolama karbon materyali bu biyokütlenin karbonizasyonu ile türetilmiştir. Bunun için çay atıkları öğütülüp (Spice&HerbGrinder IC-04A) 0,5 mm elekten geçirilmiştir ve etüvde kurutulmuştur ve TW olarak adlandırılmıştır. Yapısı geliştirilmiş karbon materyal üretmek ve elektrokimyasal özelliklerini/enerji depolama kapasitesini belirlemek için izlenen deneysel yol, aşağıda açıklanmaktadır.

2.1. Grafitizasyon, Gözenek Geliştirme ve Bor Katkılama

TW numunesinin bir kısmı grafitizasyon işlemine tabi tutulmuştur; ağırlıkça 2:1 oranında (TW : metal tuzu) grafitizasyon ajanları olan FeCl_3 veya H_3BO_3 TW'ye su yardımı ile impregne edilerek tekrar kurutulmuştur (TW-Fe ve TW-B). Kuru örnekler Şekil 12a'da görülen piroliz sisteminde 850°C 'de 1 saat alıkonma süresinde ve azot inert atmosferinde (1 L/min) Şekil 12b'de verilen ısıtma programına göre piroliz edilmiştir. Türetilen numuneler BC-Fe ve BC-B olarak adlandırılmıştır.

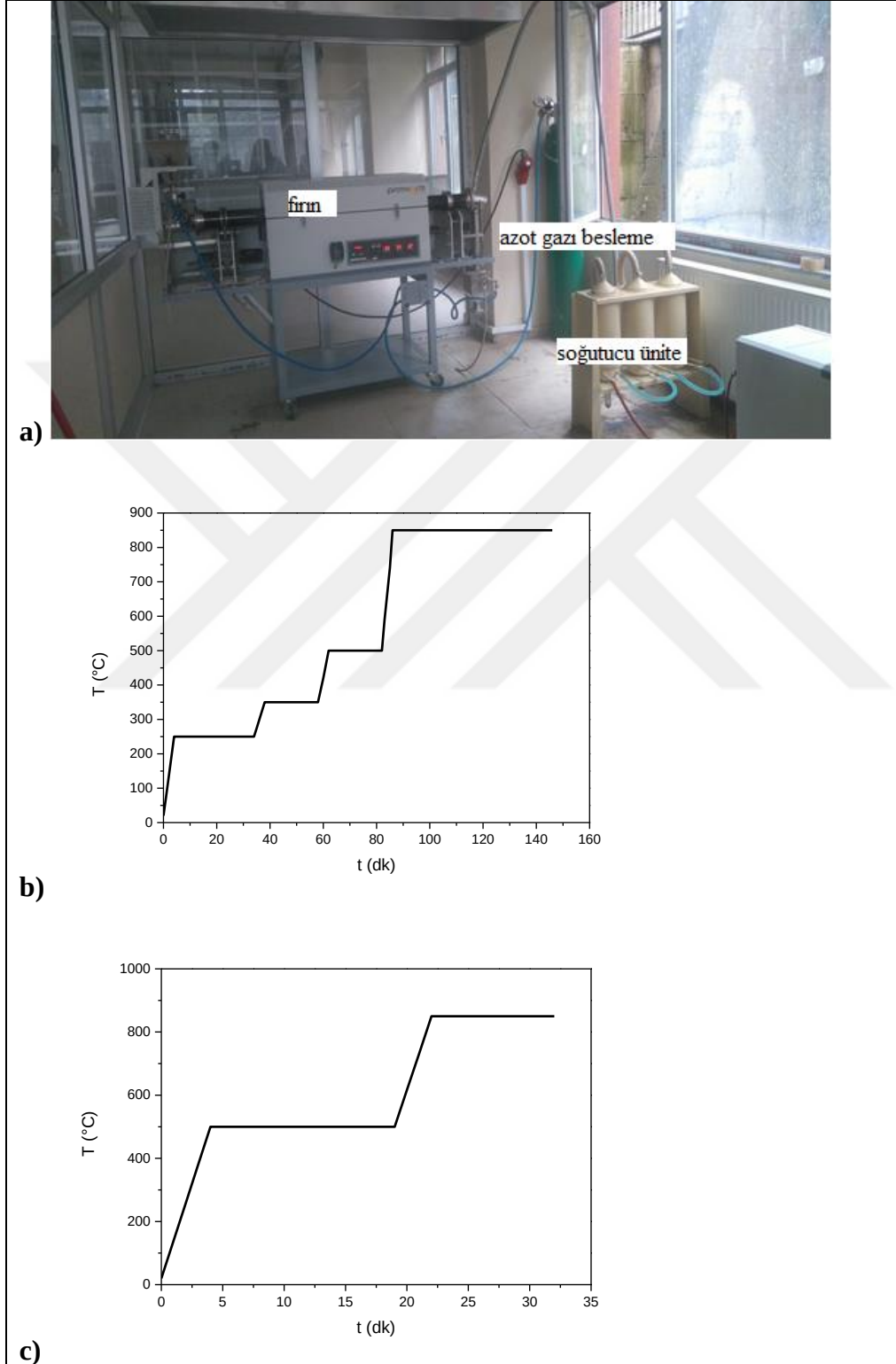


Şekil 11. Çay fabrikası son ürün atıklar

Piroliz ünitesi; fırın (Protherm RTR 11/100/500) , azot gazı besleme ve soğutucu ünite kısımlarından oluşmaktadır (Şekil 12a). Türetilen karbon numunler (BC-Fe ve BC-B) pulverizör ile (Fritsch-Pulverisette 9) 750 rpm'de 2 dk öğütülmüştür. Karbon numunelerdeki grafitizasyon ajanlarını uzaklaştırmak için numuneler 6M HCl ve 6M HF ile yıkanmıştır. Su ile de yıkanan ve nötrale edilen numuneler kurutulmuştur ve BC-Fe-Y ve BC-B-Y olarak adlandırılmıştır.

BC-Fe-Y ve BC-B-Y karbon malzemelerinin gözenek yapılarının geliştirilmesi KOH ile yapılmıştır. Doğru aktivasyon oranını belirlemek için öncelikle BC-Fe-Y numunesi ağırlıkça çeşitli oranlarda (BC-Fe-Y: KOH (w/w) 1:4, 1:2, 4:1) KOH ile muamele edilmiş ve numuneler 85°C 'de etüvde kurutulmuştur. Numuneler ısıtma programı Şekil 12c'de verildiği gibi 850°C 'de azot atmosferinde tekrar piroliz edilmiştir. 4:1 oranı ile hazırlanan numune piroliz sonrası hemen yanmıştır. Diğer numuneler önce seyreltik asit ile nötrale edilmiş ve su ile yıkanarak kurutulmuştur. Bunlardan 1:4 oranlı numunesi BC-Fe-Y-KOH1, 1:2 oranlı numunesi de BC-Fe-Y-KOH2 olarak adlandırılmıştır. Numunelerin yüzey alanı ölçümlerinden edinilen

sonuçlara göre 1:2 oranında aktivasyonun uygun olduğu belirlenmiş ve BC-B-Y numunesinden sadece BC-B-Y-KOH2 hazırlanmıştır.



Şekil 12. a) Piroliz ünitesi, b) grafitizasyon pirolizi ısıtma programı, c) KOH ile muamele pirolizi ısıtma programı

BC-M-Y-KOH2 (M; metal Fe veya B) numunelerine bor katkılar için BC-M-Y-KOH2 : H₃BO₃ oranı ağırlıkça 1:1 ve 2:1 olacak şekilde H₃BO₃'ün doymuş çözeltisi ile numuneler impregne edilmiş ve 80 °C'de etüvde kurutulmuştur. Kuru numuneler 200 °C'de hava atmosferinde 1 saat süre ile ısıtılarak aktive edilmiştir. Numuneler BC-Fe-Y-KOH2-B1, BC-B-Y-KOH2-B1, BC-Fe-Y-KOH2-B2, BC-B-Y-KOH2-B2 olarak isimlendirilmiştir.

Bir kısım TW numunesi grafitizasyon olmadan gözenek yapısı geliştirilerek karbonize materyale dönüştürülmüştür. TW numunesi 850 °C'de Şekil 12b'de verilen ısıtma programına uygun olarak piroliz edilmiştir (BC). Pulverize edilen BC, 1M HNO₃ ile karıştırılarak 75 °C'de ısıtıcı tabla üzerinde 2 saat ısıtılmıştır. Süzülmeden kurumaya bırakılan numune 850 °C'de tekrar piroliz edilmiştir. Daha sonra su ile yıkanan ve nötralize edilen numune kurutulmuş ve BC-HNO₃ olarak adlandırılmıştır.

2.2. Yapısal Karakterizasyonlar

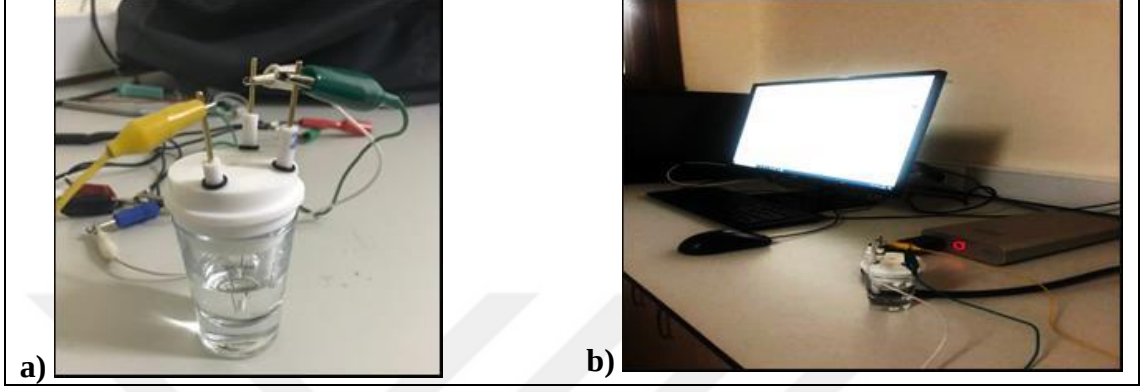
Türetilen karbon materyaller; yüzey alanı-BET (Quantachrome Autosorb 1C and Quantachrome Asi Qwin™), partikül dağılımı (Malvern Mastersizer 3.60, refraktif indeks 1,746 olarak kabul edilmiştir), X ışını deseni XRD (PANalytical/Empreyan X-ray diffractometer non-monochromatographic Cu K α 1-radiation (45 kV, 40 mA, λ = 1.54 Å)), morfolojik görüntüleme SEM (taramalı elektron mikroskobu Jeol JSM-6610), termogravimetrik analiz TGA (NETZSCH STA 449F3), Fourier Dönüşüm Kızılötesi Spektroskopisi FTIR (Varian/660-IR) ile detaylı olarak yapısal karakterize edilmiştir.

2.3. Elektrokimyasal Analizler

Numunelerin kapasitans özellikleri potantiyostat / galvanostat (IviumVertex) kullanılarak yapılan döngüsel voltametri (CV) ölçümleri ile belirlenmiştir. Üç elektrotlu sistemde sayım elektrodu (CE) platin tel, referans elektrodu (RE) Ag/AgCl elektrot ve çalışma elektrodu (WE) camsı (glassy) karbon elektrot (0,071 cm²)'dur (Şekil 13).

Karbon materyallere ağırlıkça %20 bağlayıcı materyal PTFE eklenmiş ve az miktarda metanol ile iğne uçlu sonikatör aracılığıyla iyice karıştırılmıştır. Numune, çalışma elektrodu yüzeyine damlalıkla damlatma yöntemi ile yerleştirilmiştir. Kuru

numunenin elektrot yüzeyindeki ağırlığı tartım ile belirlenmiştir. Düzenek hazırlandıktan sonra 1M H_2SO_4 çözeltisi içerisinde 10-500 mV/s tarama aralığında 0-0,8 V potansiyel penceresinde voltamogramlar elde edilmiştir. Her bir ölçüm 2 elektrot ile tekrarlanmıştır.



Şekil 13. a) üç elektrotlu düzenek, b) potansiyostat/galvanostat sistemi

3. BULGULAR

3.1. Yapısal Karakterizasyonlar

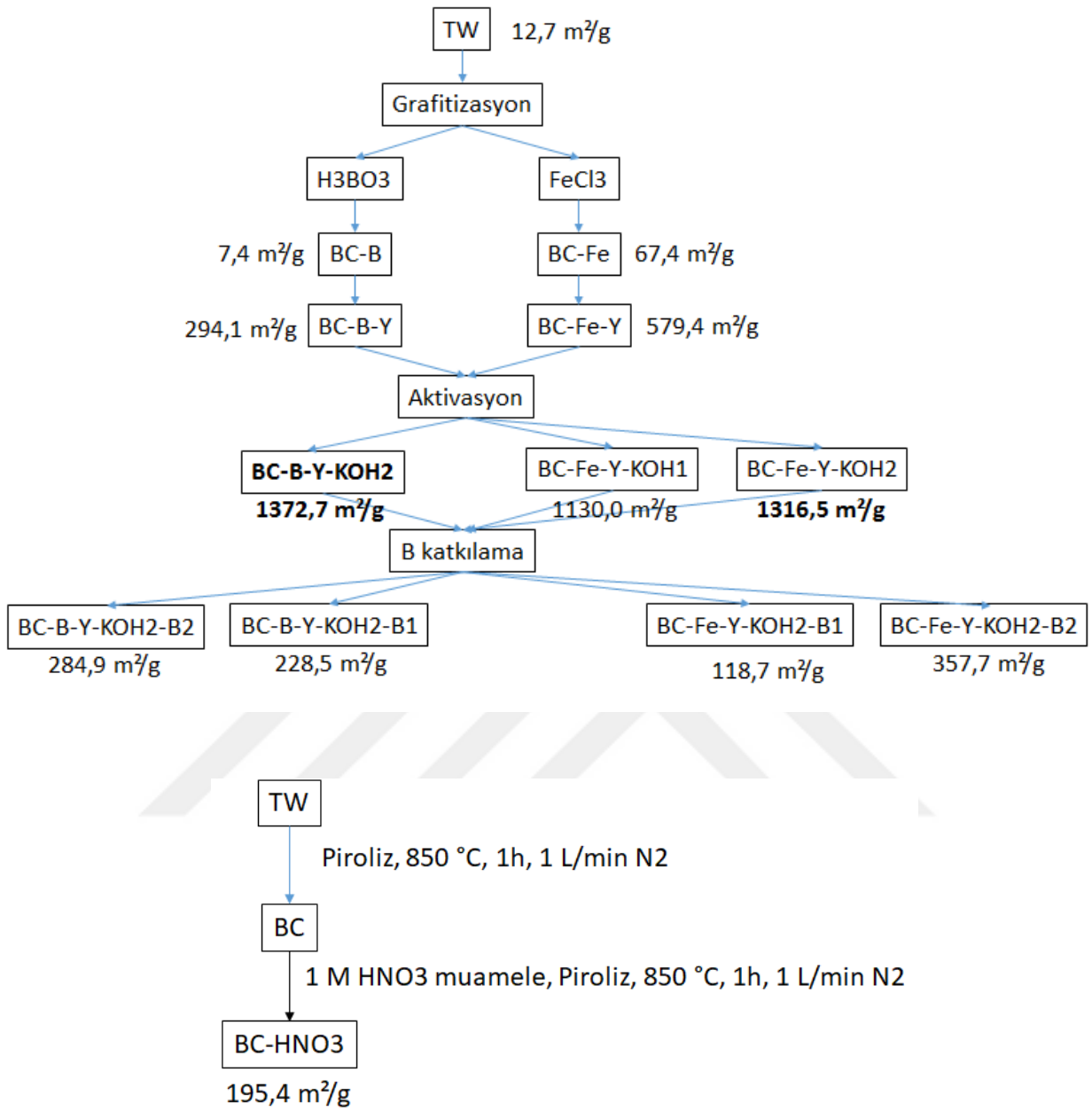
Çay atığı biyokütlesinden geliştirilen karbon materyallerin yapısal özellikleri ve gelişimleri detaylı olarak belirlenmiştir.

3.1.1. BET Analizleri

Çay atığı biyokütlesinden geliştirilen karbon materyallerin yüzey alanı özellikleri Tablo 3’de verilmiştir. Akgül vd. (2018)’nin yaptığı çalışmada çay atıklarından türetilen işlenmemiş biyokömürün yüzey alanı 5,7 m²/g olarak verilmiştir. Bu çalışmada bor ve demir impregnasyonu ile yüzey alanları geliştirilmiştir. Demir ve bor bileşiklerinin karbondan uzaklaştırılması ve KOH ile aktivasyonu yüzey alanlarını 1000 m²/g’ın üzerine geliştirmiştir. Metal bileşiklerinin biyokömür yüzeyinde bulunması gözenek yapılarının tıkanmasına neden olabilir. Bu etki daha az bor katkılanan son ürünler BC-M-Y-KOH2-B2 numunelerindeki yüzey alanı değişimlerinde de gözlenmektedir. KOH ile yüzey alanı gelişimi 1373 m²/g’a kadar çıkmıştır. Yüzey alanlarının değişimi üzerine grafitizasyon, aktivasyon ve bor katkılamanın etkileri Şekil 14’de de görülebilir.

Tablo 3. Numunelerin yüzey alanları

Numune	Dış yüzey alanı (m ² /g)	Mikro gözenek alanı (m ² /g)	Ortalama yüzey alanı (m ² /g)	Ortalama gözenek çapı (Å°)
BC-Fe	50,3	17,1	67,4	23,9
BC-B	7,4	0	7,4	122,2
BC-Fe-Y	112,1	467,3	579,4	13,9
BC-B-Y	146,8	147,3	294,1	2,9
BC-Fe-Y-KOH1	216,4	913,6	1130,0	12,2
BC-Fe-Y-KOH2	223,0	1093,5	1316,5	12,0
BC-B-Y-KOH2	369,1	1003,7	1372,7	12,1
BC-Fe-Y-KOH2-B1	87,0	31,6	118,7	28,1
BC-Fe-Y-KOH2-B2	117,6	240,2	357,7	26,0
BC-B-Y-KOH2-B1	174,1	54,4	228,5	22,3
BC-B-Y-KOH2-B2	197,3	87,6	284,9	19,9
BC-HNO3	56,5	138,9	195,4	14,9

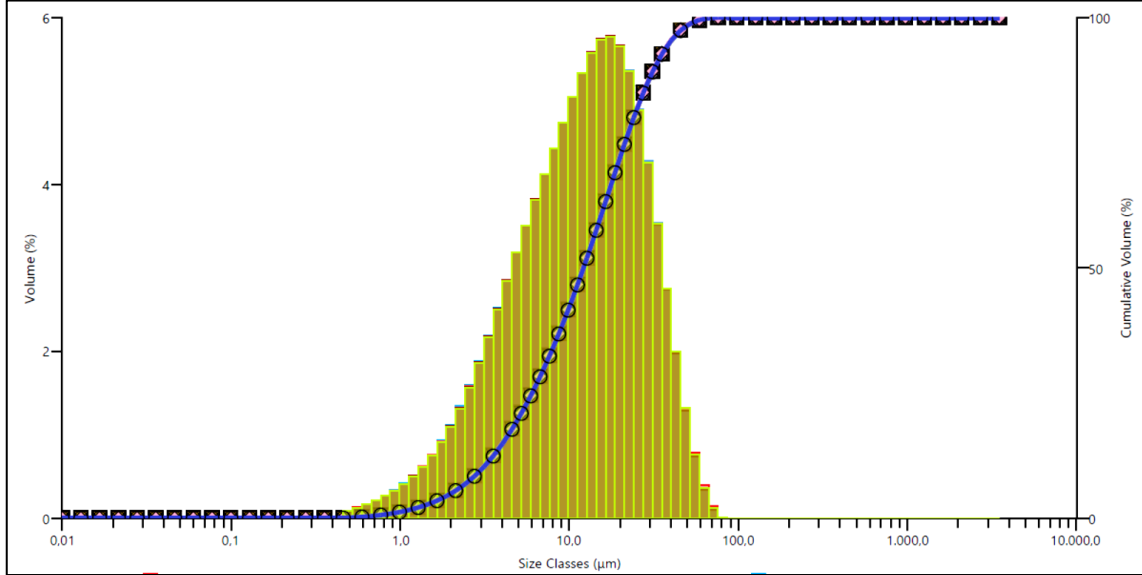


Şekil 14. Grafitizasyon, aktivasyon ve bor katkılamanın numunelerin yüzey alanlarına etkisi

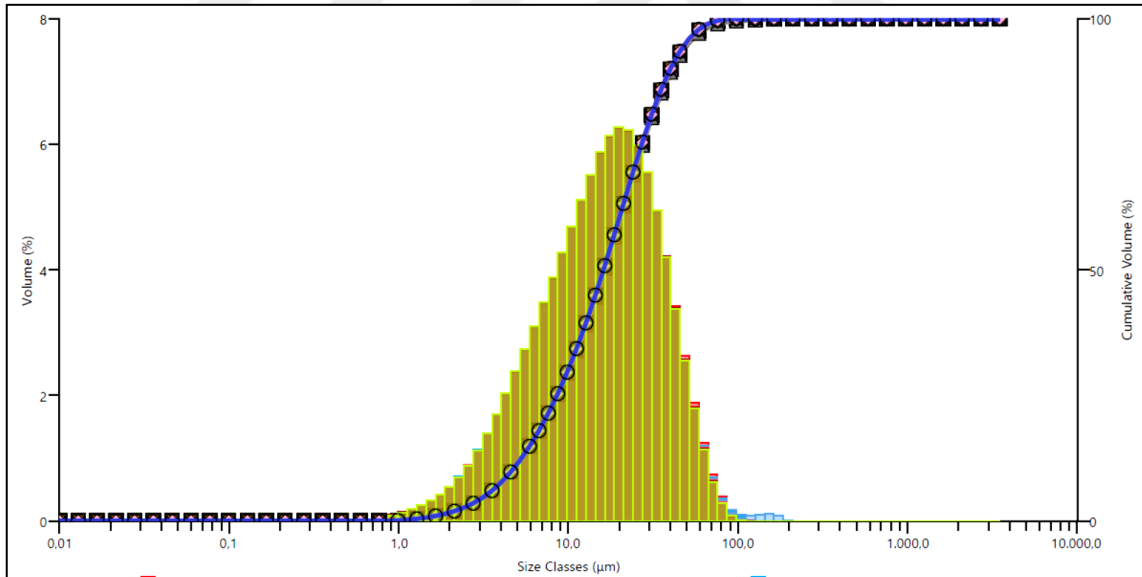
3.1.2. Partikül Dağılımları

Biyokömür numunelerindeki yüzey alanlarının gelişiminin partikül boyutlarına etkisi Şekil (15-16)'da ortalama yüzey alanı en küçük olan BC-B ve en yüksek olarak belirlenen BC-B-Y-KOH2 numuneleri için verilmektedir. Yüzey alanlarının gelişimi ile kümülatif hacmin azaldığı yani o boyutlardaki parçacık sayılarının azaldığı görülmektedir. Partikül dağılımı analizi tüm numuneler için ~10 µm civarında bir

dağılım göstermiştir. Parçacık olarak numuneler homojen partiküllerden oluşmamaktadır.



Şekil 15. BC-B numunesinin partikül dağılım grafiği



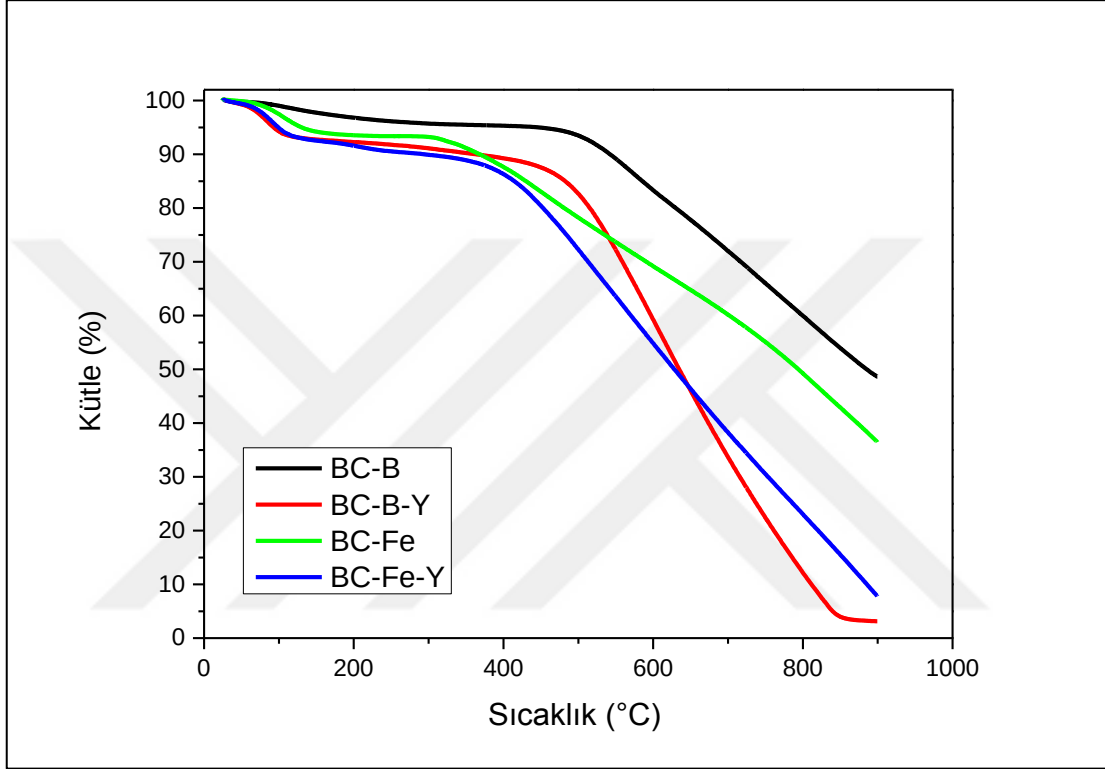
Şekil 16. BC-B-Y-KOH2 numunesinin partikül dağılımı

3.1.3. TGA Analizleri

Termogravimetrik analizler ile numunelerdeki mineral-metal bileşiklerinin oranları belirlenmiştir. Çay atığı biyokütlesinin kül içeriği %4 civarındadır (Akgül vd., 2018) Şekil 17’de görüldüğü gibi metal bileşikleri impregne edilmiş BC-B ve BC-Fe numunelerinde sırasıyla çoğunlukla %48,7 B, %36,4 Fe bileşikleri mevcuttur (kül

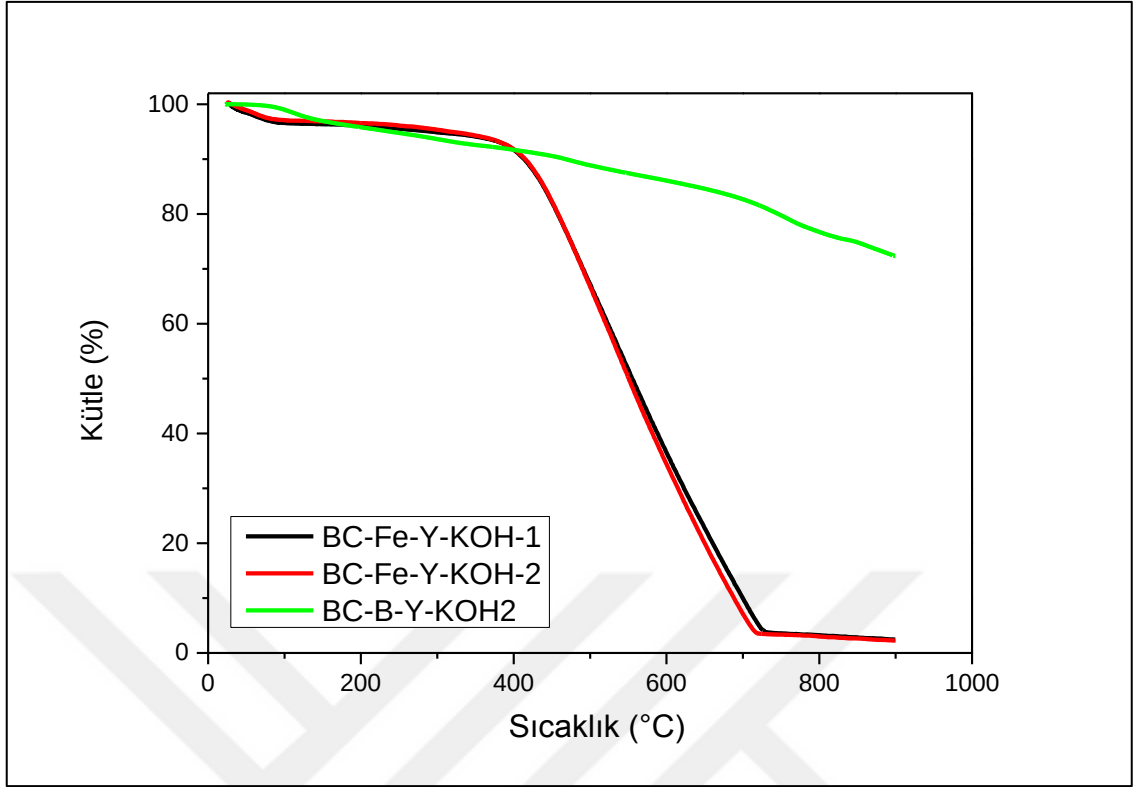
içeriği dahil). Bu numunelerin asit ile yıkanması sonucu yüzeysel mineraller uzaklaştırılmıştır.

TGA analizi sırasında numunelerde var olabilecek nem 100 °C civarında uzaklaşmaktadır. BC-Fe ve BC-Fe-Y numunelerinin termal kararlılıklarının kısmen BC-B ve BC-B-Y'ye göre düşük olduğu görülebilir. Numuneler genel olarak 500 °C'den sonra bozunmaya başlamaktadır.

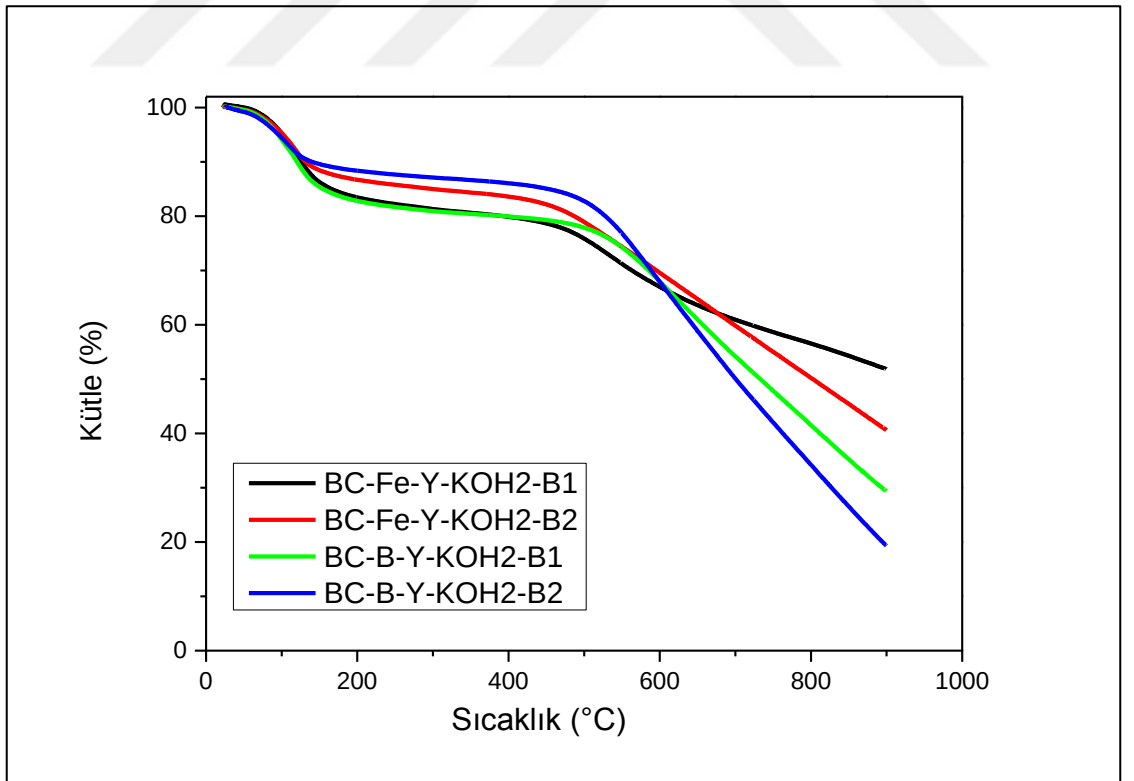


Şekil 17. Metal impregne edilmiş ve yıkanmış numunelerin TGA verileri

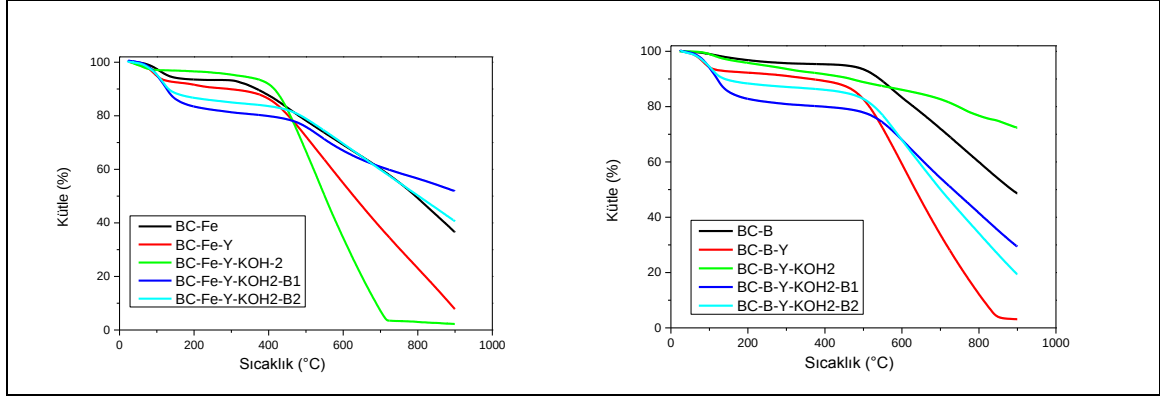
Yüzey alanı KOH ile geliştirilen numunelerde B ile işleme tabi tutulmuş karbonun termal kararlılığının Fe ile işleme tabi tutulmuş karbona göre kat be kat daha fazla olduğu gözlenmiştir (Şekil 18-19). Bu karbonlara bor katkılanması ile Fe ya da B ile işleme tutulması farketmeksizin benzer bozunma eğrileri vermiştir (Şekil 20). Fe ve B oranları ise BC-Fe-Y-KOH2-B1 ve B2 için %50 ile %41 civarında iken, BC-B-Y-KOH2-B1 ve B2 için %30 ile %20 civarındadır (kül içeriği dahil). Aynı impregnasyon oranlarında ağırlıkça uygulama sonucu bu farklılıklar ortaya çıkmıştır.



Şekil 18. KOH ile yüzey alanı geliştirilmiş numunelerin TGA verileri



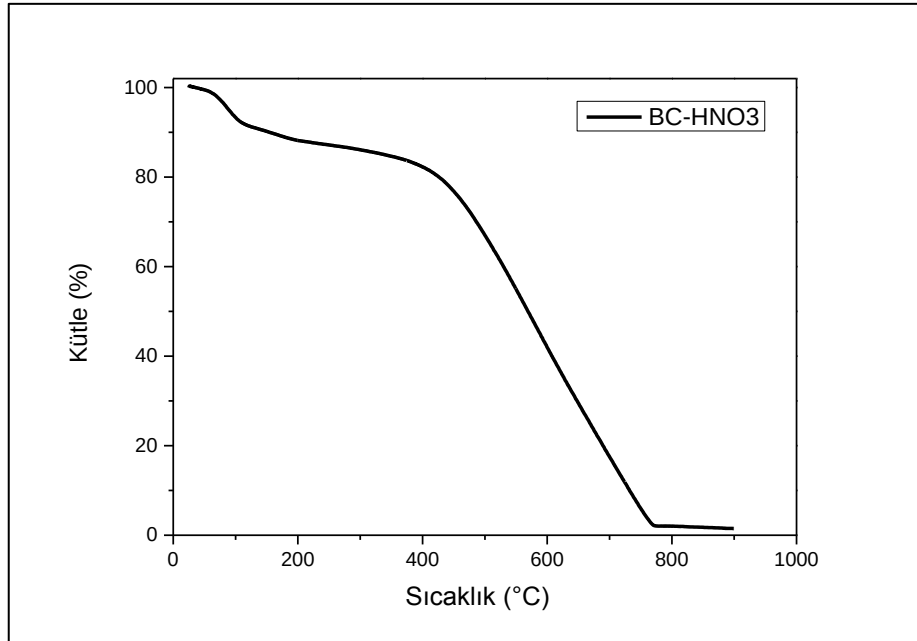
Şekil 19. Bor katkılı numunelerin TGA verileri



Şekil 20. Fe (a) ve B (b) ile işleme tabi tutulmuş numunelerin kendi içinde TGA verileri

Şekil 20’de ise Fe ve B ile işleme tabi tutulmuş numunelerin kendi içinde TGA verileri verilmektedir. Karbon yapısının grafitizasyon, gözenek geliştirme ve bor katkılama ile geliştirilmesi genel olarak termal kararlılığı artırmaktadır. Bu kararlılık bor ile işleme tabi tutulmuş biyokömürde bir miktar daha fazladır ve BC-B-Y-KOH2 numunesi genel özelliklerden farklı bir eğilim göstermiştir.

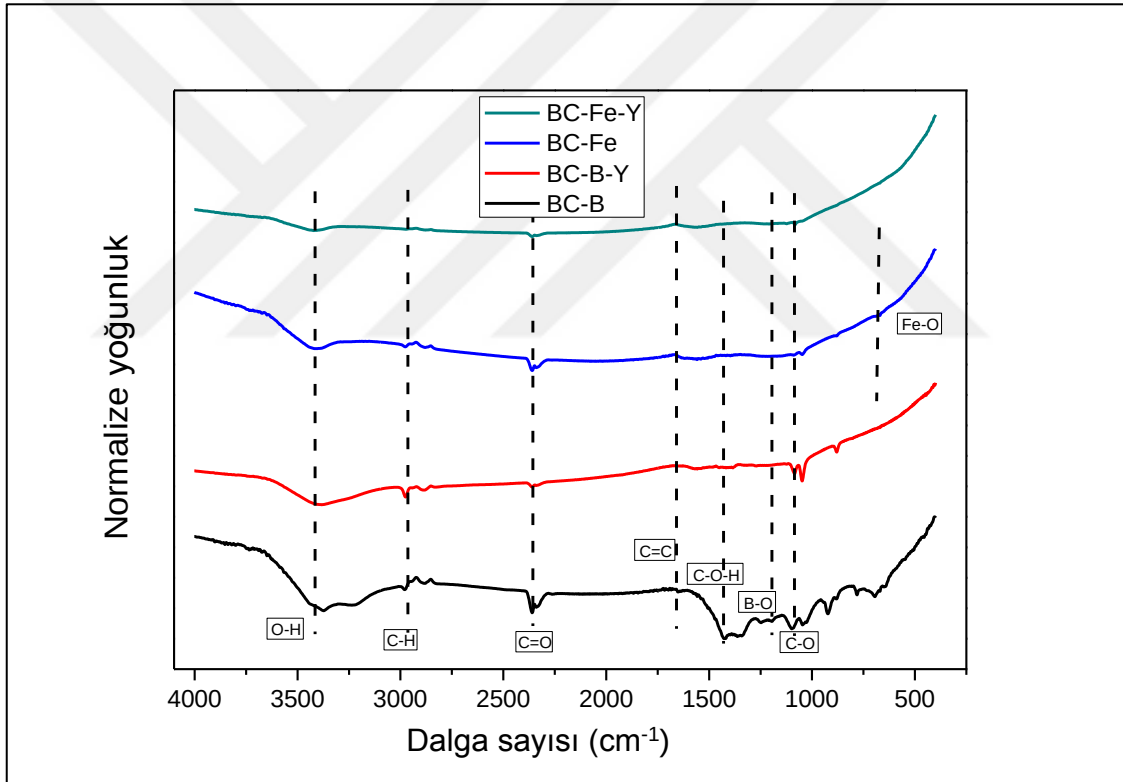
BC-HNO₃ numunesinin TGA grafiği Şekil 21’de verilmiştir. BC-HNO₃ numunesinin mineral içeriği %5 civarındadır. Su kaybından sonra hızlı bir kütle kaybına uğramış ve 500°C’den sonra bozunmaya başlamıştır.



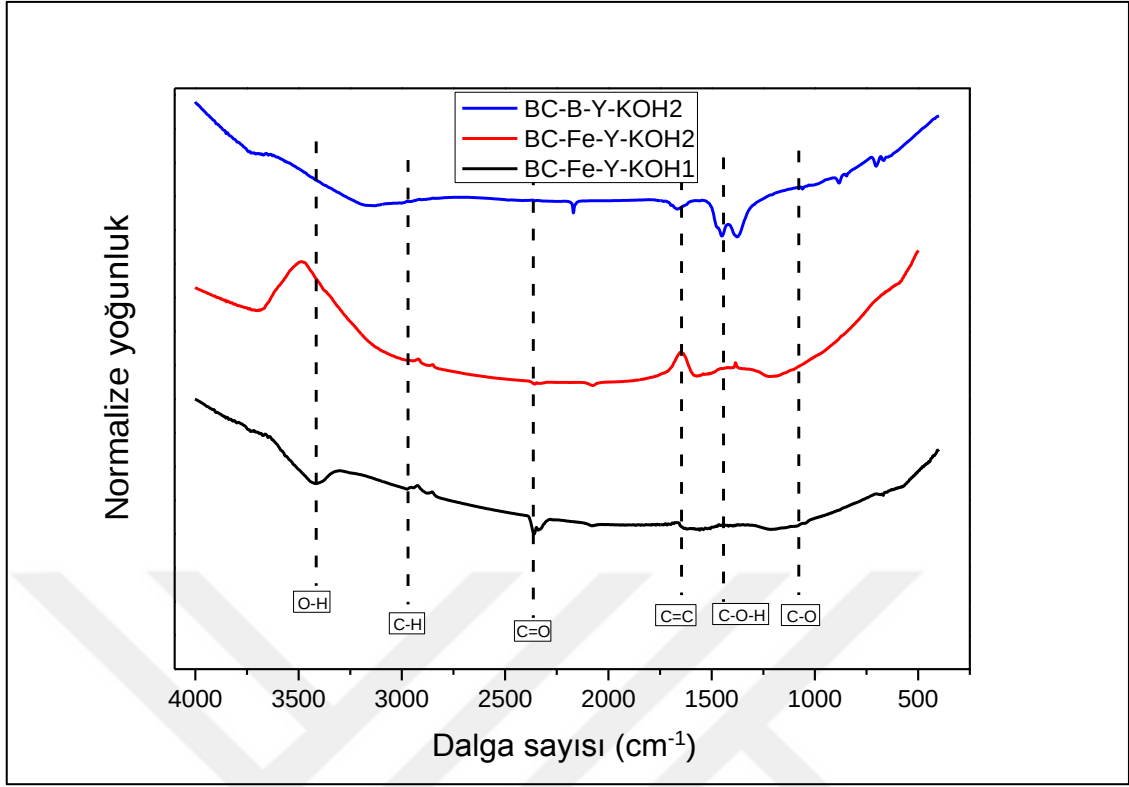
Şekil 21. BC-HNO₃ numunesinin TGA grafiği

3.1.4. FTIR Analizleri

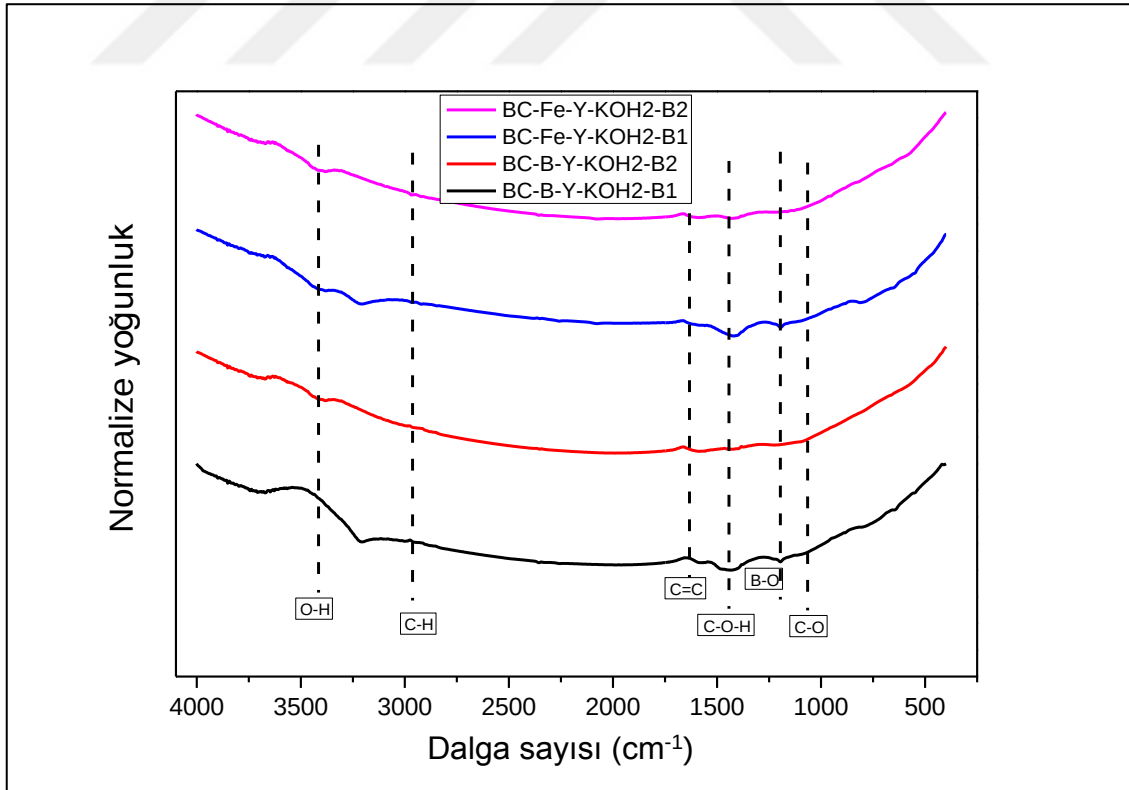
Şekil 22’de görüldüğü gibi metal katkılı numuneler 3400 cm^{-1} civarında geniş bir band göstermiştir. Numunelerde genel olarak oksijen içeren grupların gerilimleri görülmektedir; C-O, O-H gibi. Yıkama işlemi sonrasında B ve Fe numunelerinde gerilmelerinin kaybolduğu gözlemlenmiştir. 1500-1750 cm^{-1} bant bölgesi karboksilik asitlerini, C-C, C-O gerilmelerini göstermektedir (İnal vd., 2015). 2300 cm^{-1} civarındaki pik ise, oksijen içeren gruplardan kaynaklıdır. Tüm numunelerin yüzeyde oksijen gruplarınca zengin olduğu söylenebilir. KOH ve HNO_3 ile muamele oksijen gruplarını daha da zenginleştirmiş olabilir.



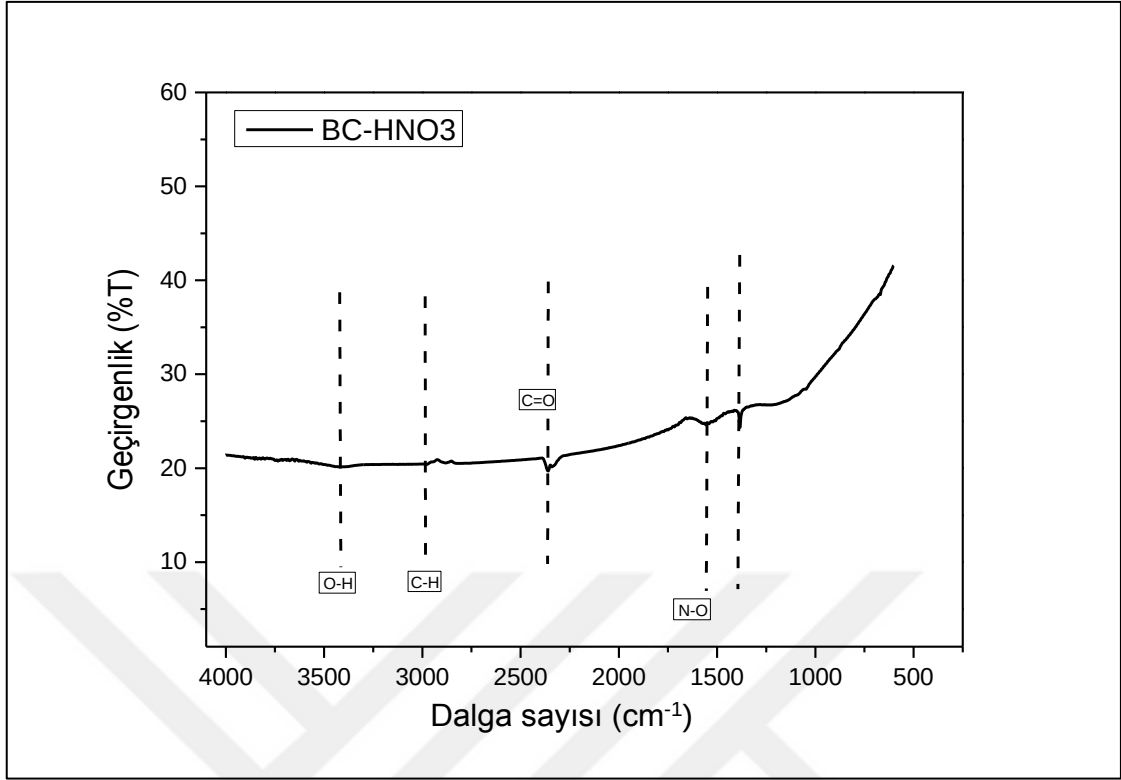
Şekil 22. Metal impregne edilmiş ve yıkanmış numunelerin FTIR verileri



Şekil 23. KOH ile yüzey alanı geliştirilmiş numunelerin FTIR verileri



Şekil 24. Bor katkılı numunelerin FTIR verileri



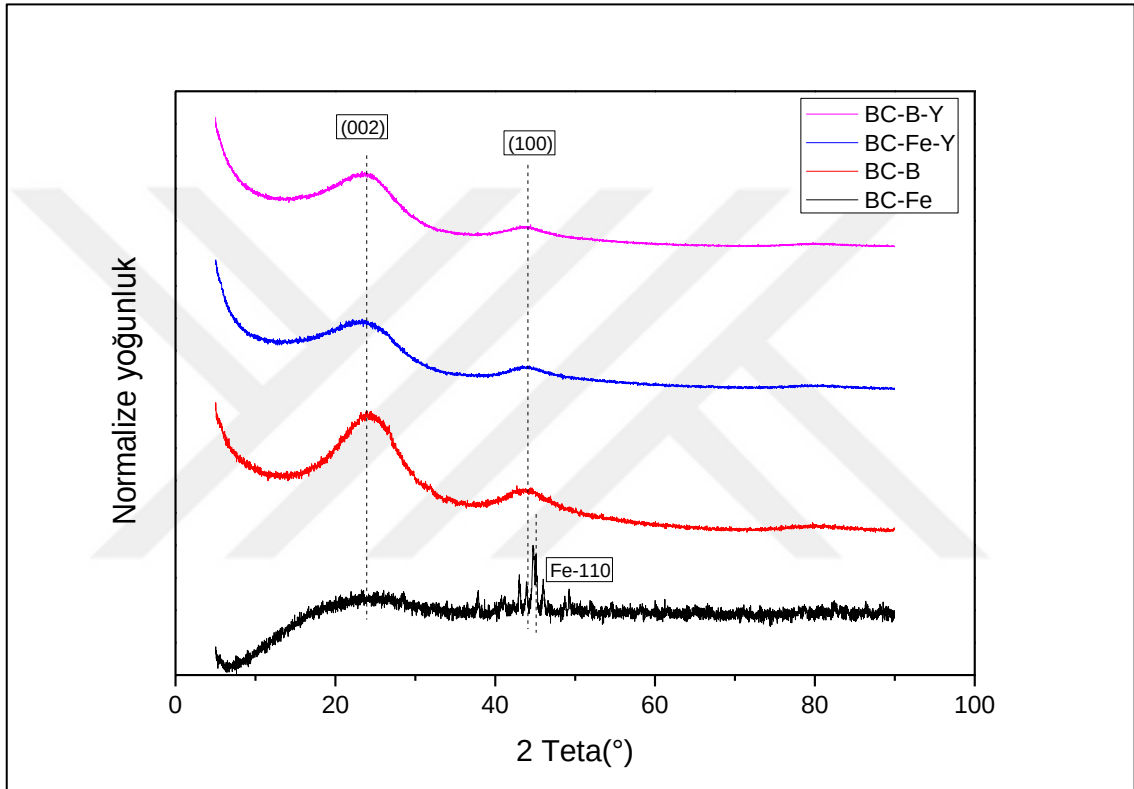
Şekil 25. BC-HNO₃ numunesinin FTIR grafiği

3.1.5. XRD Analizleri

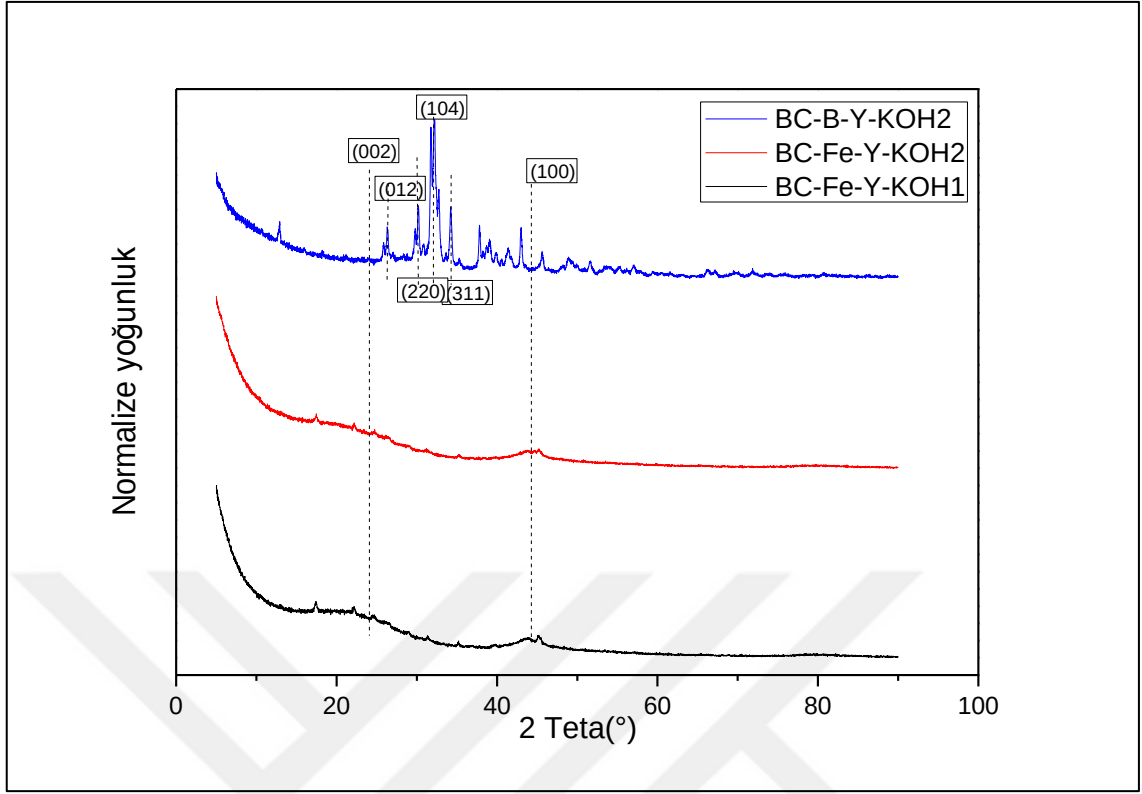
X-Işını Kırınım Yöntemi her bir kristal fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır. XRD analizi optik mikroskopik yöntemler ile kesin olarak tanımlanamayacak nitelikte olan doğal minerallerin tanımlanabilmeleri için uygulanmaktadır. Ölçümler PANalytical/Empreyan cihazıyla yapılmıştır.

Türetilen karbon numunelerin XRD ile kristal yapıları incelenmiştir. BC-B $2\theta=24^\circ$ (002) ve 44° (100) pikleri görülmektedir (Şekil 26). HCl ve HF ile yıkama işlemi sonrasında piklerin şiddetlerinde azalmalar meydana geldiği gözlemlenmiştir. BC-Fe'de demir oksit bileşiklerinden kaynaklanan birçok pik görülmüştür. Ancak yıkama işlemi sonucu bu pikler kaybolmuş ve karbon pikleri belirgin hale gelmiştir. KOH ile aktifleşme sonucu BC-B-Y-KOH2 numunesinde kristalleşme daha fazla gerçekleşmiş ve farklı tür karbon yapıları ortaya çıkmıştır (Şekil 27). Bu numunedeki yapı düzenlenmesi diğerlerinden farklı olarak gelişmiştir. KOH'un BC-B-Y-KOH2 numunesinin kristal yapısının düzenlenmesine etkisi olduğunu bellidir ancak yapı düzenlenmesinde bunun sadece bor ile grafitize edilen karbondaki gerçekleştiği

görülmüştür. Diğer yandan bu etki BC-B-Y numunesinde bariz olarak görülmemektedir. Bor ile grafitizasyon ve sonrasında aktivasyon ile gerçekleşen bu farklılık daha sonra bor katkılanması ile yine amorf yapı baskın olmuştur. BC-B-Y-KOH2 yapısında grafitik düzenlemeler olduğu öngörülmektedir (Drewniak, 2016). Amorf yapılarda gözlenen 24 ° (002) ve 44 ° (100) karbon piklerinden farklı olarak ve 30-45 ° sırasıyla (220), (104), (311), (100) baskın pikleri ortaya çıkmıştır (Gonen, 2016).

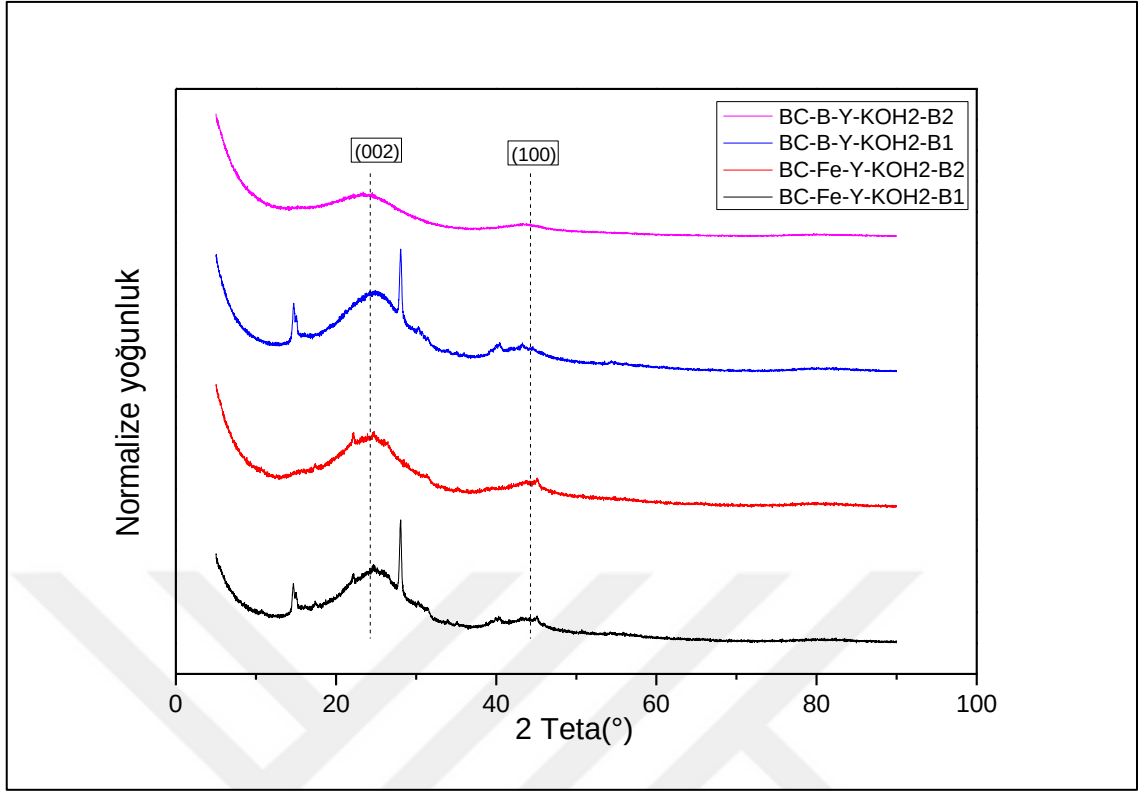


Şekil 26. Metal impregne edilmiş ve yıkanmış numunelerin XRD verileri

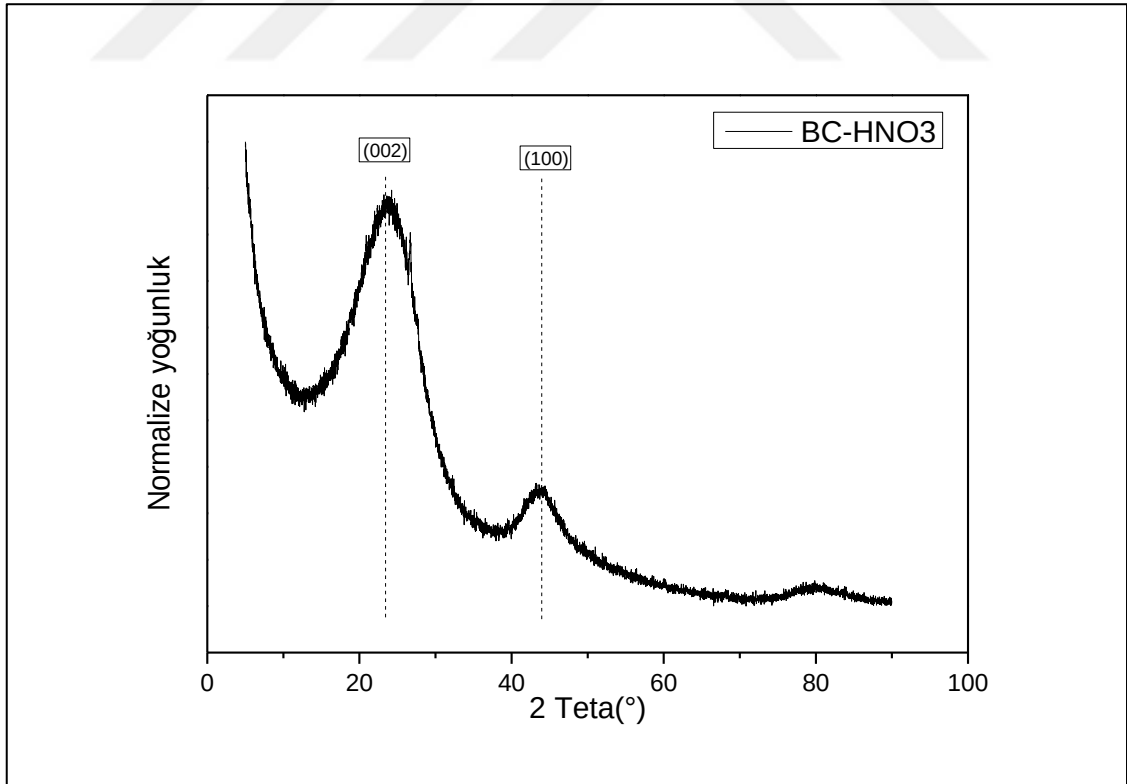


Şekil 27. KOH ile yüzey alanı geliştirilmiş numunelerin XRD verileri

BC-M-Y-KOH2-B1 ve B2 numunelerinin XRD grafikleri Şekil 28’de verilmiştir. Genel olarak amorf yapılar baskın olmakla birlikte 15° ve 30° ’de grafitik pikler de görülmektedir $2\theta = 30^\circ$ (002) ve 15° borik asidin karakteristik tepe noktasını temsil etmektedir (Gonen, 2016). BC-HNO₃ numunesi de amorf yapı göstermektedir (Şekil 29).



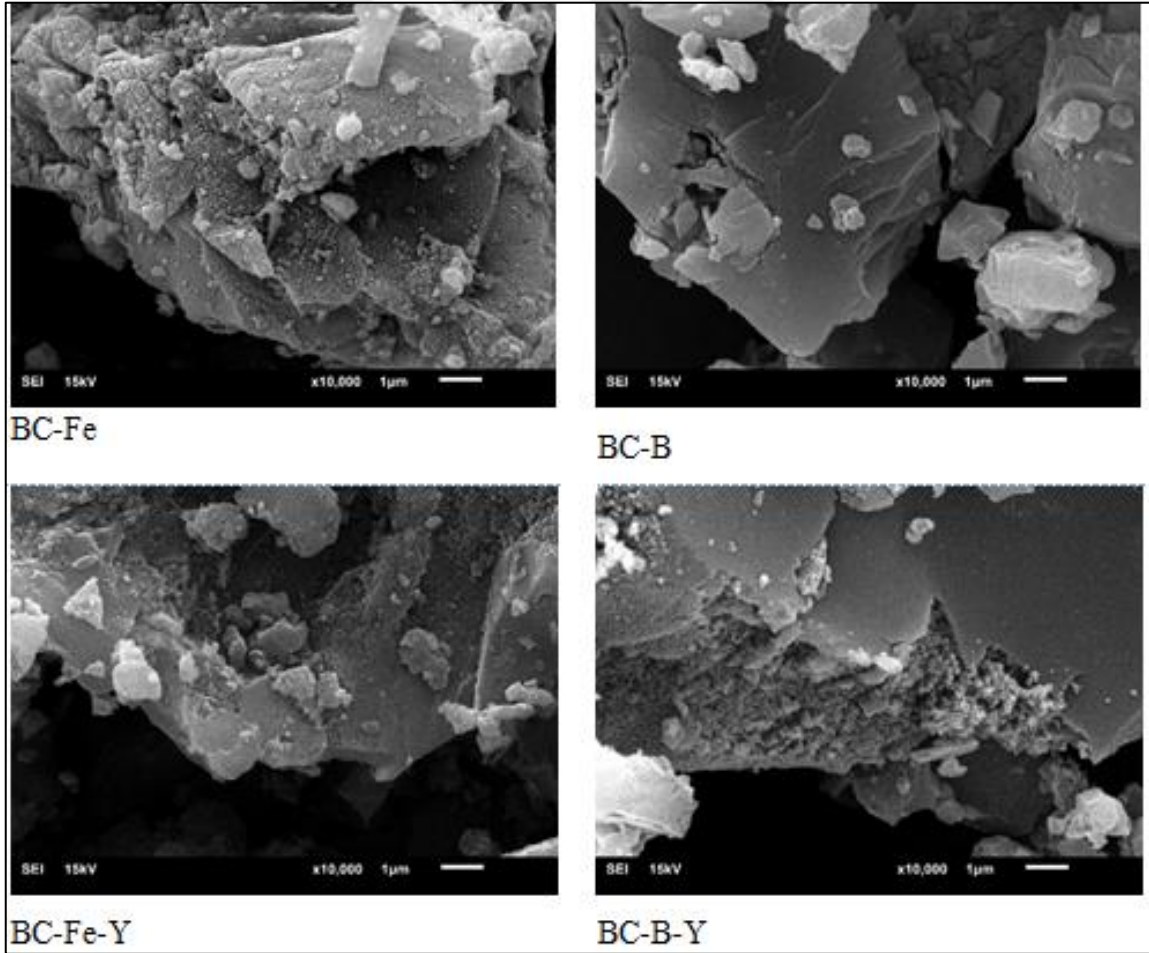
Şekil 28. Bor katkılı numunelerin XRD verileri



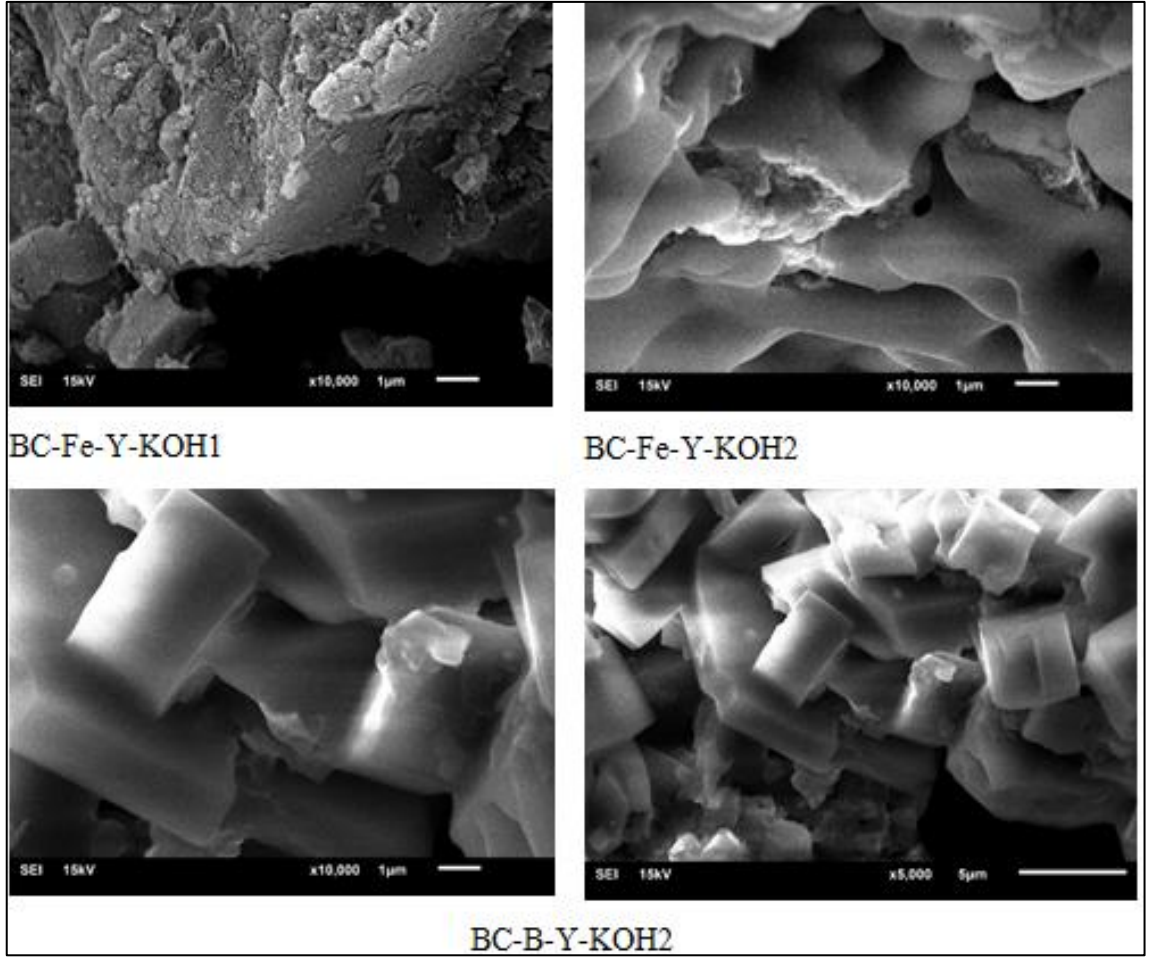
Şekil 29. BC-HNO₃ numunesinin XRD grafiği

3.1.6. SEM Analizleri

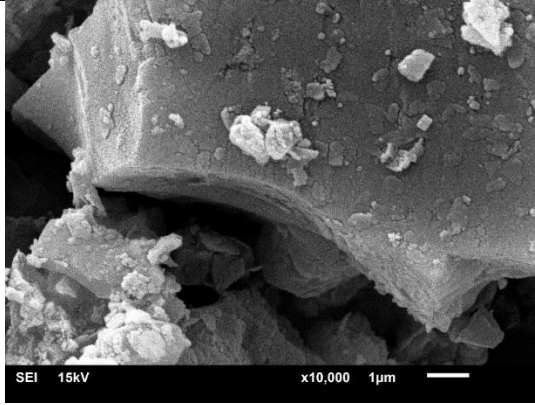
Numunelerin morfolojik görüntüleri (SEM), Şekil 30’da verilmektedir. Demir katkılı BC-Fe, BC-B ve bunların yıkanmış halleri BC-Fe-Y ve BC-B-Y numunelerinin düzensiz bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. BC-Fe-Y numunesinin farklı oranlarda KOH ile aktivasyon işlemi sonrası özellikle KOH2 muamelesinde yapısal çökmeler bariz şekilde gözlenmiştir (Şekil 31). Bu etki, BC-B-Y-KOH2 numunesinde grafitik düzenlenmeyi ortaya çıkarmıştır. Bor katkılanması ile düzensiz yapı tekrar baskın olmuştur (Şekil 32). EDS grafiklerinde bor bileşiklerinin yüzeyde dağılımı da görülmektedir. Genel olarak grafitizasyon işleminden itibaren Fe ve B ajanlarının yüzeyde işlem yaptığı söylenebilir. BC-HNO₃ numunesinde de düzensiz yapı gözlenmektedir (Şekil 33).



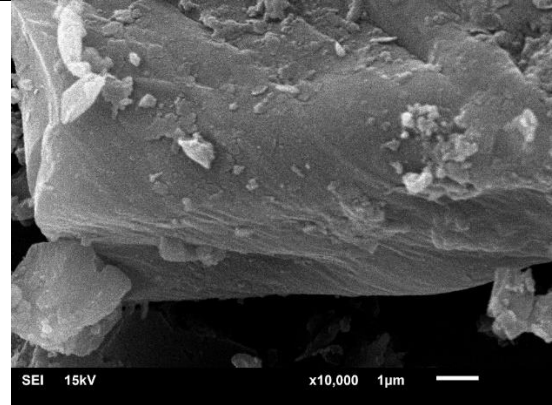
Şekil 30. Metal impregne edilmiş ve yıkanmış numunelerin SEM görüntüleri



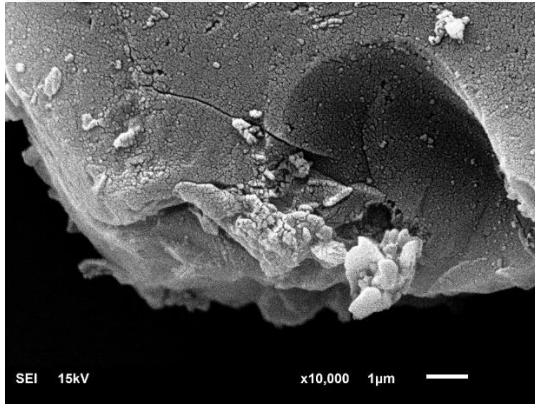
Şekil 31. KOH ile yüzey alanı geliştirilmiş numunelerin SEM görüntüleri



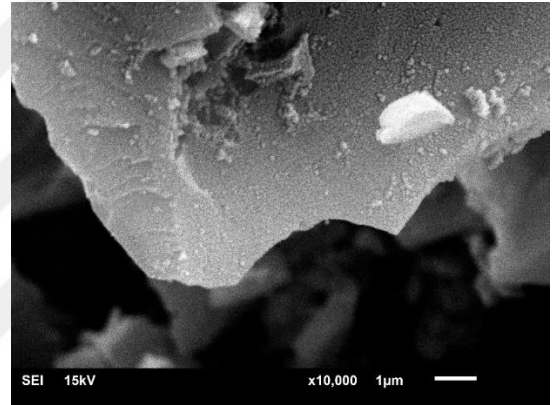
BC-Fe-Y-KOH2-B1



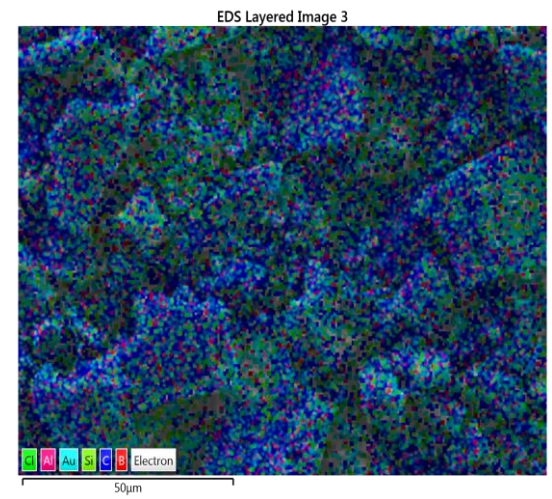
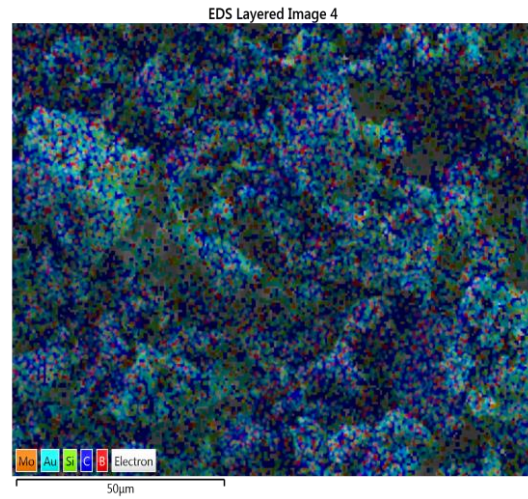
BC-Fe-Y-KOH2-B2



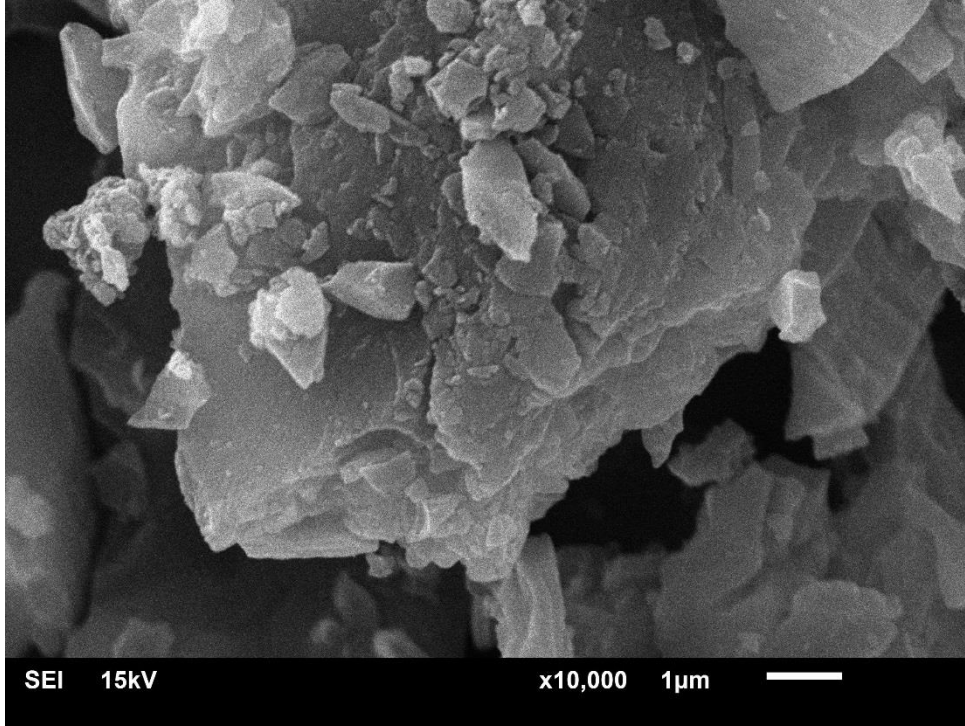
BC-B-Y-KOH2-B1



BC-B-Y-KOH2-B2



Şekil 32. Bor katkılı numunelerin SEM görüntüleri



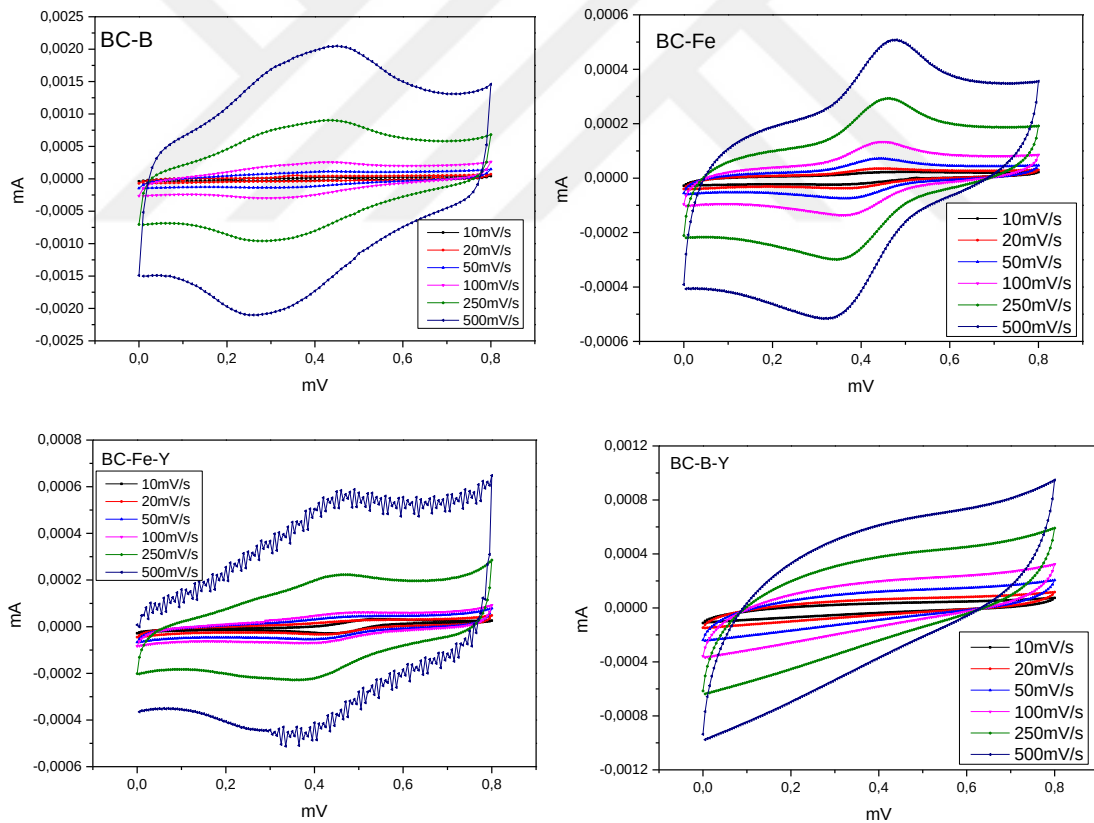
Şekil 33. BC-HNO₃ numunesinin SEM görüntüsü

3.2. Elektrokimyasal Karakterizasyonlar

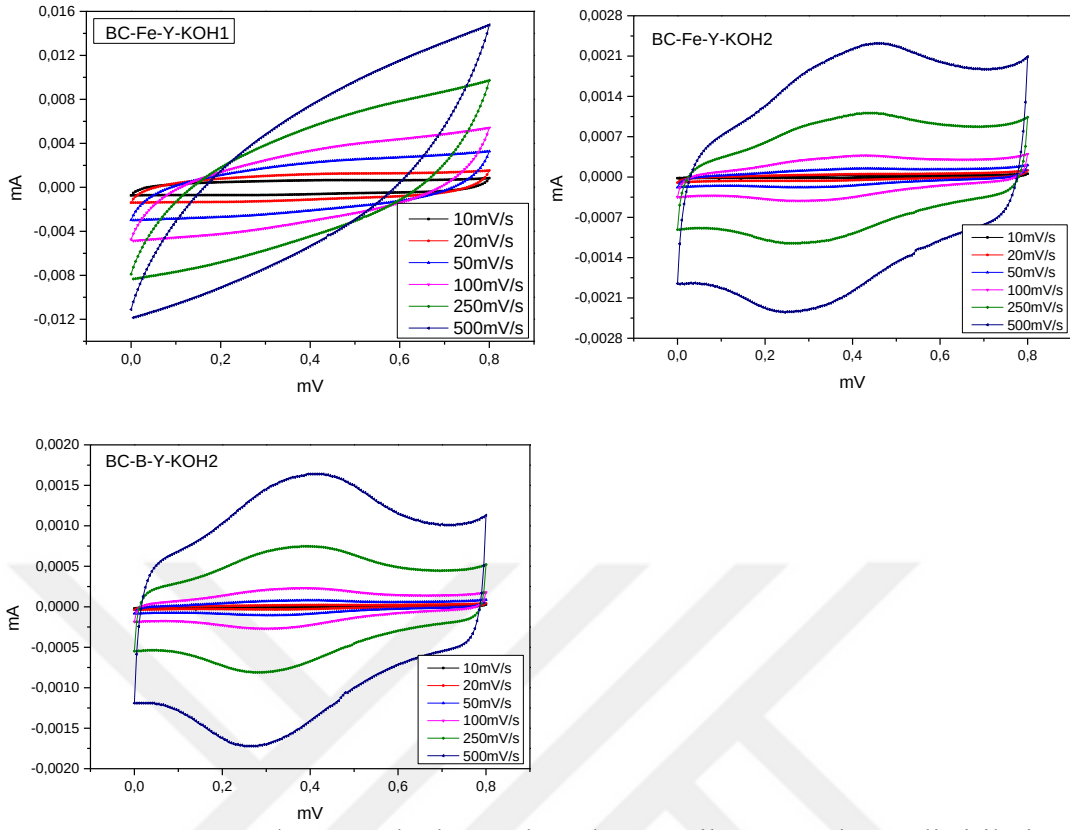
CV, üç elektrotlu bir sistemdeki çalışma ve referans elektrotu arasında doğrusal olarak değişen bir potansiyelin uygulanmasıdır. Uygulanan potansiyeldeki değişiklikler tarama hızı olarak adlandırılmaktadır. 3 elektrotlu sistemde CV ölçümü çift katmanlı ve kapasitif olmayan ancak kapasitif davranışı sergileyen malzemeyi ayırt etmek ve süperkapasitörlerde depolanan yük hakkında bilgi edinmek için kullanılan bir analiz çeşididir. Elektrokimyasal ölçümler için (IVIUM galvanostat/potansiyostat) 3 elektrotlu sistem kullanılmıştır. 3 elektrotlu sisteminde çalışma elektrotu (aktif elektrot malzemesi), referans elektrot (Ag/AgCl) ve yardımcı elektrot (platin tel) kullanılmıştır. Ölçüm sırasında her bir numune için 2 adet çalışma elektrotu kullanılmıştır. Çalışma elektrotu hazırlamak için aktif elektrot malzemesi PTFE ile birleştirilip elektrot yüzeyine tutturulmuştur. Elektrotlar ölçüm başlamadan önce elektrolit (1M H₂SO₄) içerisine daldırılmıştır. CV çalışmaları 0 V ile 0,8 V potansiyel aralığında çeşitli tarama hızlarında (10, 20, 50, 100, 250, 500 mV/s) yapılmıştır.

Numunelerin CV ölçümleri Şekil 34-38’ de verilmiştir. İdeal bir kapasitör dikdörtgen şeklinde bir çevrim sergilemektedir. Çevrimde sapmalar meydana gelmesi

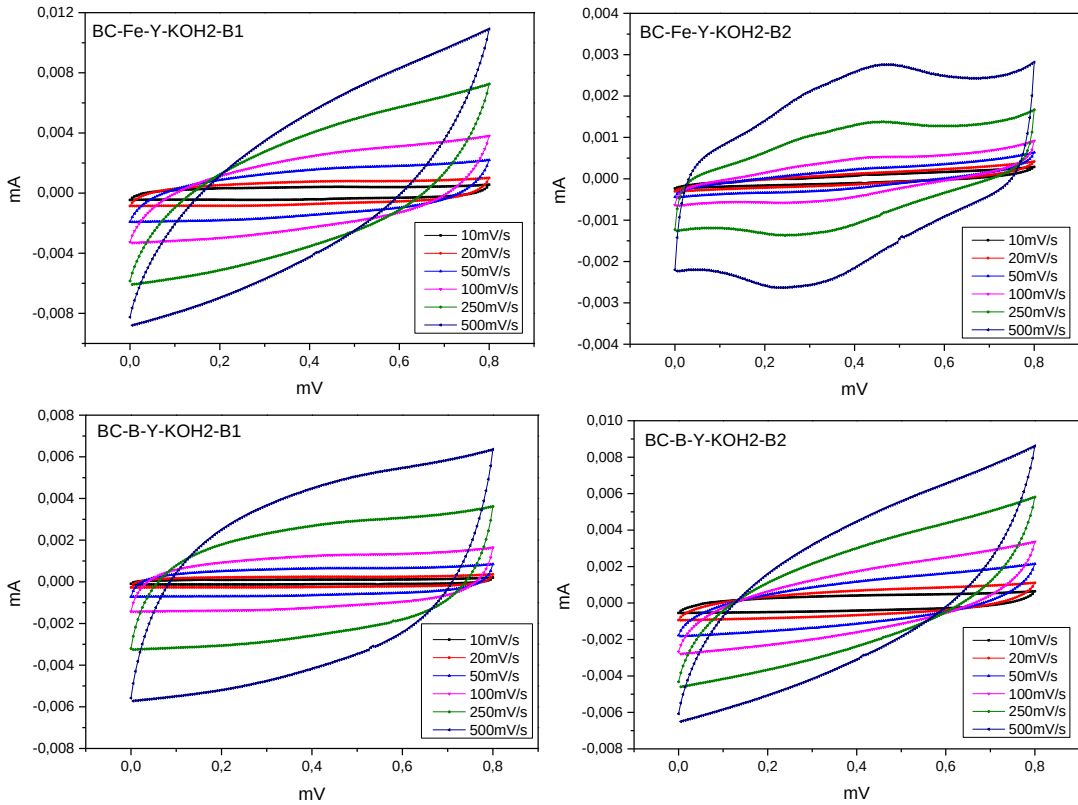
elektrot malzemesinin iç yapısındaki aksaklıklardan kaynaklanabilir. Çevrim sonrası oluşan voltamogramların alanları hesaplanarak Eşitlik 3'e göre kapasitansları Coulomb/Volt yani Farad (F) olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada her bir numunenin ağırlığına oranı ile kapasitanslar F/g olarak hesaplanmıştır. CV ölçümleri sonucu hesaplanan kapasitans değerleri Tablo 4 ve 5'de verilmiştir. CV'ler 10-500 mV/s tarama hızlarında ölçülmüştür. Malzemelerin genel olarak düşük tarama hızlarında daha iyi kapasitif performans sergiledikleri gözlemlenmiştir. Aktivasyonda KOH oranının azaltılması ile genel olarak kapasitansta azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bor katkılanması ile kapasitansta tekrar artma meydana gelmiştir. BC-B ve BC-B-Y numuneleri tıpkı Fe katkılı numunelerde olduğu gibi düşük tarama hızlarında yüksek kapasitans göstermiştir. Bor katkılanması sonucu BC-B-Y-KOH2-B2 10 mV/s tarama hızında 69,3 F/g'lık kapasitans göstermiştir.



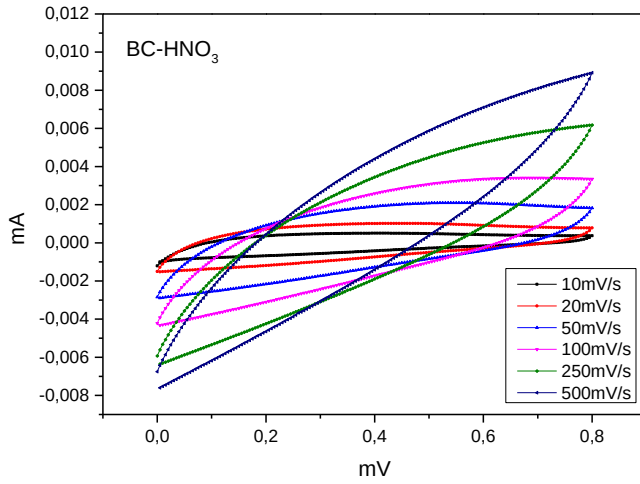
Şekil 34. 10-500 mV/s tarama hızları aralığında metal impregne edilmiş ve yıkanmış numunelerin CV eğrileri



Şekil 35. 10-500 mV/s tarama hızları aralığında KOH ile yüzey alanı geliştirilmiş numunelerin CV eğrileri



Şekil 36. 10-500 mV/s tarama hızları bor katkılı numunelerin CV eğrileri



Şekil 37. 10-500 mV/s tarama hızları BC-HNO₃ CV eğrileri

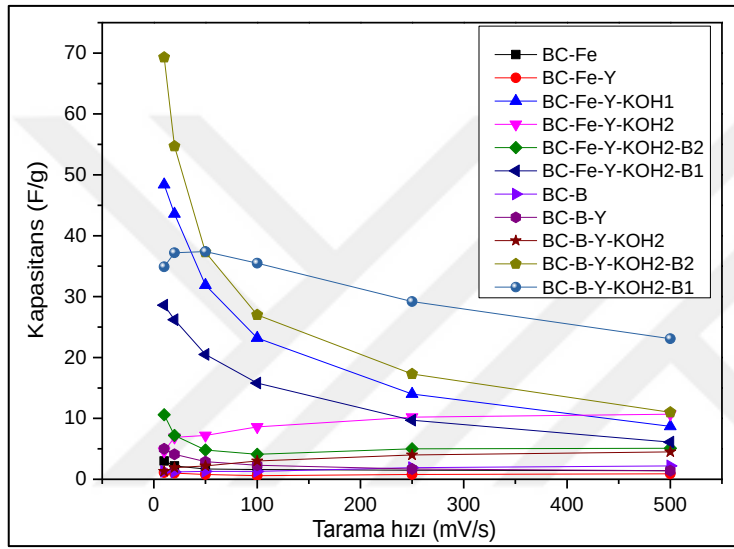
Tablo 4. Fe muamele edilmiş numunelerin 10-500 mV/s tarama hızları aralığında kapasitans değerleri

Tarama hızı (mV/s)	Kapasitans (F/g)					
	BC-Fe	BC-Fe-Y	BC-Fe-Y-KOH1	BC-Fe-Y-KOH2	BC-Fe-Y-KOH2-B2	BC-Fe-Y-KOH2-B1
10	3,0	1,1	48,4	4,6	10,6	28,6
20	2,2	1,0	43,6	6,9	7,2	26,2
50	1,7	0,8	31,9	7,2	4,8	20,5
100	1,6	0,6	23,2	8,6	4,1	15,8
250	1,5	0,8	14,0	10,2	5,0	9,7
500	1,4	0,9	8,7	10,7	5,1	6,1

Tablo 5. B muamele edilmiş numunelerin farklı tarama hızlarında kapasitans değerleri

Tarama hızı (mV/s)	Kapasitans (F/g)				
	BC-B	BC-B-Y	BC-B-Y-KOH2	BC-B-Y-KOH2-B2	BC-B-Y-KOH2-B1
10	1,3	5,0	1,3	69,3	34,9
20	1,2	4,1	1,9	54,7	37,2
50	1,3	2,9	2,2	37,3	37,4
100	1,3	2,3	3,0	27,0	35,5
250	1,9	1,7	4,0	17,3	29,2
500	2,2	1,4	4,5	11,0	23,1

Bor katkılanmış numunelerin kapasitif özelliklerinin geliştiği görülmektedir. Kapasitansların gelişiminde bor katkılanmanın etkisinin yüzey alanlarının gelişiminden daha baskın bir özellik kazandırdığı görülmektedir. Ayrıca bor ile grafitizasyonun, demir ile grafitizasyonda daha etkili olduğu ve buna bağlı olarak malzeme gelişiminde grafitizasyon, aktivasyon ve bor doplamanın birlikte etkileri ile BC-B-Y-KOH2-B2 en yüksek kapasitif özellik gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 38. Numunelerin farklı tarama hızlarında kapasitans eğrileri

4. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

Bu çalışmada çay atıkları biyokütlesi piroliz yöntemi ile karbonize edilerek biyokömüre dönüştürülmüştür. Çay atıklarından elde edilen biyokömür amorf yapıdadır ve fonksiyonel gruplar bakımından zengin bir yapıya sahiptir. Amorf karbon Fe ve B ile grafitize edilip KOH ile aktive edilmiştir. Son aşamada tekrar B ile katkılanarak yüzey alanı yüksek ve elektrokimyasal özellikleri iyileştirilmiş karbon malzemeler elde edilmiştir. Bunun yanı sıra çay atığından elde edilen biyokömür HNO_3 ile muamele edilerek sadece yüzey alanı gelişiminin kapasitif özelliğe katkısı incelenmiştir.

4.1. Biyokömürde Yapısal Gelişme

Yapılan deneyler sonucunda grafitizasyon, aktivasyon ve bor katkılama da dahi çay atığı biyokütlesinden yüzey alanı geliştirilmiş karbon malzeme türetilbileceği görülmüştür. KOH ile aktivasyon, yüzey alanlarının gelişmesinde en etkili yöntem olmuştur. Hatta aktivasyon, bor ile grafitizasyon sonucunda elde edilen BC-B-Y numunesindeki grafitik düzenlenmelerin belirgin hale gelmesine etki etmiş, kristal düzenlenmeyi ortaya çıkarmıştır.

Demir katkılı numuneler için yıkama ve KOH ile aktivasyon işlemlerinin ortalama yüzey alanını arttırdığı ($1093,5 \text{ m}^2/\text{g}$), bor katkılanması ile yüzey alanı ve mikro gözenek alanında ciddi azalmalar (B1: $31,6 \text{ m}^2/\text{g}$ ve B2: $240,2 \text{ m}^2/\text{g}$) olduğu gözlemlenmiştir. Aynı şekilde bor katkılı numunelerde yıkama ve KOH aktivasyon işleminin yüzey alanı ve mikro gözenek alanını arttırdığı ($1003,7 \text{ m}^2/\text{g}$) ancak borun tekrar katkılanması ile ortalama yüzey alanında ve mikro gözenek alanında azalma (B1: $54,4 \text{ m}^2/\text{g}$ ve B2: $87,6 \text{ m}^2/\text{g}$) olduğu görülmüştür. Burada bor katkısı ile yüzey ve gözenek alanlarında azalmalar meydana gelse de B1 ve B2 numuneler kendi aralarında kıyaslandığında B2 katkılı olanların daha yüksek mikro gözenek ve yüzey alanı gösterdikleri dikkat çekmektedir.

Bor, yapıda kusurlar meydana getirmektedir. Oluşan bu kusurlar yüzey alanında artmalara neden olmaktadır (Li vd., 2018). Borun yapıya katkılanması C-C bağlarını zayıflatmakta ve C-O bağlarını güçlendirmektedir. Bu nedenle bor katkılı malzemelerde oksijen gruplarının yüksek konsantrasyonda olması gözlemlenmektedir. Oksijen miktarının artması redox reaksiyonlarında artmalara neden olmaktadır. Düşük seviyede

bor katkısının oksijenin yüzeye tutunma reaksiyonunda hızlandırıcı bir etkiye yol açtığı söylenmiştir. Ancak bor miktarının artırılması yapıda bulunan mikrogözenek miktarının ve gözenek hacminin azalmasına, yapıda oluşan indirgeme reaksiyonların tamamlanamamasına neden olmaktadır. Buna bağlı olarak da spesifik yüzey alanında azalmalar görülmektedir (Wang vd., 2008 ; Guo ve Gao, 2009). Bu çalışmada da benzer durumlar gözlenmiştir.

Bor katkısının ayrıca gözenek yapısında büyümeye neden olduğu söylenmektedir (Gao vd., 2016). Tablo 3'e bakıldığı zaman bor katkısıyla gözenek yarıçapında artmalar görülmüştür. Karbon malzemelerin yapısına metal veya metal oksitlerin katkılanması yapının küçülmesini engelleyebilir (Zhao vd., 2010). Bor da bu etkiyi sergilemiş olabilir.

Çay atığından türetilmiş karbon malzemelerin hava atmosferinde termogravimetrik analizinde 500 °C'ye kadar dayanıklı olduğu görülmektedir. Bu sıcaklıktan sonra bozunma fonksiyonel grupların etkisi ile olmaktadır. Yüzey fonksiyonel gruplarının karbondan ayrılması yani daha fazla grafitizasyon, malzemeyi yüksek sıcaklıklarda daha kararlı kılmaktadır. BC-B-Y-KOH₂ için de bu durum gözlenmiştir. Metal oksit bileşiklerinin de bozunmaya katalitik etkileri olabilmektedir.

Metal katkılanmış numuneler FT-IR ölçümlerinde maksimum 3400 cm⁻¹ civarında geniş bir band göstermiştir (Şekil 22). Bandın genişlemesi, karbon içerikli numunelerin hidrofilik karakterini, elektrotların sulu elektrolitteki ıslanabilirliğinin göstergesidir. 1000-1300 cm⁻¹ bant aralığındaki pikler asit, alkol, fenol, eter gibi fonksiyonel grupların C-O gerilmeleri ifade etmektedir (İnal vd., 2015). Yıkama işlemi sonrasında B ve Fe numunelerinde bu gerilmelerin azaldığı gözlemlenmiştir. KOH ile yüzey fonksiyonel gruplarının geliştiği görülmektedir (Şekil 23). Şekil 24'de BC-B-Y-KOH₂ numunesinin bor katkılanması sonucunda O-H pikinde artma olduğu C-O-H pikinde ise azalma olduğu gözlemlenmiştir. Borun yapıya katılması ile C-C bağları zayıflayıp C-O bağlarını güçlendirebilir. Bu nedenle bor katkılanmış malzemelerde oksijen gruplarında artmalar gözlemlenebilmektedir (Wang vd., 2008). Bor oranının artması ile oksijen gruplarının arttığı açıkça görünmektedir. Fe katkılı numunelere bor katkılanması ile 1500-1750 cm⁻¹ bandında oluşan gerilmelerde azalmalar görülmüştür. Bor katkısının Fe katkılı numunelerde karboksil gruplarında azalmalar meydana getirdiği söylenebilir (Şekil 23-24). BC-HNO₃ 1300-1650 cm⁻¹ ve 2300 cm⁻¹ bant aralığında pikler göstermiştir. HNO₃ oluşan pikler sonucunda malzemenin oksijen bakımından zengin

olabileceği söylenebilir. BC-HNO₃ TGA grafiklerinde olduğu gibi KOH ile aktivasyon sonucu oluşan yapısal gelişmeyle benzerlik göstermiştir (Şekil 25).

Fe ve B katkılı malzemelerin kristal özellikleri XRD yöntemi ile incelenmiştir. Şekil 26'da BC-Fe-Y ve BC-B-Y malzemeleri karşılaştırılmıştır. Her iki malzeme de 24° (002) ve 44° (100) pikleri göstermiştir. HCl ve HF ile yıkama işlemi sonrasında piklerin şiddetlerinde azalmalar meydana geldiği gözlemlenmiştir. BC-Fe'de birçok pik görülmüştür. Ancak yıkama işlemi sonucu karbon pikleri baskın hale gelmiştir.

BC-B-Y-KOH2-B1,B2 için her iki bor oranına (C:B 1:1 ve 2:1) bakıldığında bor katkılanması ile kristal oluşumunda geriye gidildiği söylenebilir (Wang vd., 2008; Gao vd., 2016)). B oranının artırılması farklı piklerin (15° ve 28°) oluşmasına neden olmuştur. Fe katkılı numunelerde de B oranının artmasıyla benzer pikler meydana gelmiştir. Bu piklerin oluşması Fe ve B numunelerinde 24° ve 44°'de (Thirumal vd., 2016) aynı pik olduğu düşünüldüğü zaman artan bor oranıyla bor pikleri olduğu yorumu yapılabilir (Gonen, 2016) (Şekil 28). BC-HNO₃ tıpkı metal impregne edilmiş numunelerdeki gibi (Şekil 26) 24° ve 44° 'de pik göstermiştir. Malzemenin amorf yapıya daha yakın olduğu düşünülmektedir. Malzemelerin hepsinde 44° (100) piki görülmektedir. Bu pik amorf karakterli grafitik karbon yapısına denk gelmektedir (Peng vd., 2013). Grafitizasyon ve aktivasyon işlemleri ile genel olarak kristal yapının çok fazla değişmediği ve amorf yapının genelde baskın olduğu düşünülmektedir.

Fe ve B katkılı malzemelerin deneysel ilk aşamasından son aşamasına kadar SEM görüntüleri verilmiştir. Fe katkılı numune başlangıçta homojen olmayan düzensiz bir yapıya sahip olduğu görülmektedir (Şekil 30). Yıkama ve KOH ile aktivasyon sürecinden sonra yapıda az miktarda düzelmeler görülmüştür. Özellikle KOH2 oranında aktivasyonda diğer görüntülere göre gözenek yapısı büyük ve düzenli bir yapı sergilediği görülmektedir (Şekil 31). Yapılan yüzey alanı ölçümlerinde spesifik yüzey alanı en yüksek KOH2 çıkması yapının düzenli bir hale geldiği ve gözeneklerin küçüldüğünü gösterebilir. Fe numunelerine bor katkılanması oksijen gruplarını arttırarak yüzeyde farklı boyutlarda yapılar olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 32). B'li malzeme başlangıçta düzensiz bir yapıya sahip olduğu görülmüştür (Şekil 30). Ancak yıkama ve KOH ile aktivasyon sonrasında düzenli dikdörtgensel yapılar görülmektedir (Şekil 31). B katkısı düzenli yapıda bozulmalar meydana getirmiş ve yeni yapılar oluşturmuştur (Şekil 32). Bor katkısının yapıda kusurlar oluşturması sonucu yüzey fonksiyonel gruplarını arttırdığı söylenebilir (Wang vd., 2008). BC-HNO₃ SEM

görüntüleri amorf bir yapıya sahip olması ve yüzey fonksiyonel grupların varlığı sebebiyle düzensiz bir yapı sergilemiştir (Şekil 33).

4.2. Biyokömürde Kapasitans Gelişimi

Numunelerin hepsi düşük tarama hızlarında daha iyi spesifik kapasitans sergilemiştir. Elektrotların yüksek tarama hızlarında ideal dikdörtgen şeklini koruyamaması, süperkapasitör elektrot malzemesinin gözenek boyutu ve dağılımından kaynaklanabilmektedir. Gözeneklerden kaynaklı iyon erişiminde oluşan aksaklıklar ve ESR nedeniyle şarj/deşarj anahtarlama hızı olamaması spesifik kapasitansı etkileyebilmektedir (Jiang vd., 2013). Çalışmada elektrotların düşük tarama hızlarında iyi kapasitif performans sergilemesi ve tarama hızının artması ile sapmaların meydana gelmesi eşdeğer seri direnç nedeniyle meydana geldiği düşünülmektedir.

Tablo 4’de Fe muamele edilmiş numunelerin BC-Fe-Y-KOH2-B1 malzemesi 10mV/s tarama hızında en yüksek (28,6 F/g) spesifik kapasitansı göstermiştir. Şekil 36’da eğrilere bakıldığı zaman BC-Fe-Y-KOH2-B1 numunesi dikdörtgen şekle yakın bir şekil sergilemiştir. B katkılamanın elektrokimyasal özellikleri iyileştirdiğini ve spesifik kapasitansta artmaya neden olduğu görülmüştür.

B muamele edilmiş malzemelerin farklı tarama hızlarında kapasitans değerleri Tablo 5’de verilmiştir. B katkılı numunelerin de Fe katkılı numuneler gibi düşük tarama hızlarında daha yüksek spesifik kapasitans gösterdiği gözlemlenmiştir (Şekil-34-36).

B katkılı numunelerde BC-B-Y-KOH2-B2 malzemesi 10mV/s tarama hızında en yüksek (69,3 F/g) spesifik kapasitansı göstermiştir. BC-B-Y-KOH2-B2 numunesi BC-B-Y-KOH2-B1 numunesinden daha yüksek spesifik kapasitans elde etmiştir. Bor katkılması sonucu gelişen gözenek yapıları iyon difüzyonunu hızlandırarak iyonların madde içerisine iyice erişebilmesine yardımcı olabilir (Zhao vd., 2010). Bor katkısı oksijen gruplarını arttırmış psödokapasitif reaksiyonlarla elektrokimyasal iyileştirmeler göstermiş ve kapasitansın artmasına neden olmuş olabilir. Ancak fazla bor katkısının yüzey alanında azalmalar meydana getirmesinden kaynaklı spesifik kapasitansta azalma gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar literatür ile uyumludur (Wang vd., 2008; Gao vd., 2016).

BC-HNO₃, 10 mV/s tarama hızında 36,22 F/g’lık bir kapasitif performans göstermiştir. Bu sonuç HNO₃’ün biyokömür üzerinde gözenek yapısında

iyileştirmelerde etkili olduğunu göstermektedir. Ancak kapasitif özelliğin geliştirilmesinde sadece yüzey alanı veya gözenekliliğin geliştirilmesi amorf karbonun kapasitif etkisinin artırılmasında kendi başına en büyük etkiyi oluşturmaz.

Çay atıklarının KOH ile kimyasal olarak aktifleştirilmesi ile yüzey alanında artmalar meydana gelmiş ve gözenek yapısını iyileştirmiştir. Heteroatom katkılanması yüzey alanı ve gözenek yapısı geliştirilen malzemenin elektrot/elektrolit arasındaki arayüzün ıslanabilirliğini arttırmış ve mümkün olabilecek psödokapasitif reaksiyonlar ile de kapasitansın atmasına yardımcı olmuş olabilir. Yapılan ölçümlerde grafitizasyon, aktivasyon ve heteroatom olarak B katkılama ile daha yüksek spesifik kapasitans (69,3 F/g) elde ettiği görülmüştür. Borun atom numarasının karbona yakın olması iç yapıya daha kolay erişebilmesine yardımcı olmuş olabilir. Bor katkılı numunelerin gözenek yapısının daha gelişmesi ve buna bağlı olarak yük dağılımının iyi olmasının büyük etkisi olduğu düşünülmektedir.

Sonuç olarak atık olarak düşünülen endüstriyel çay atığı biyokütlesinin değerlendirilerek en büyük teknolojik ihtiyaçlarından biri olan enerji depolama alanında materyal olarak kullanılabileceği deneysel olarak gösterilmiştir. Çay atıklarının karbonize edilmesi ve heteroatom katkılanması ile süperkapasitör elektrot malzemesi geliştirilmiştir ve elde edilen malzeme kapasitif performans sergilemiştir.

5. ÖNERİLER

Teknolojinin gelişme oranı ile enerjiye olan ihtiyaç doğru orantılı olarak büyümektedir. Günümüzde enerji kaynağı olarak çoğunlukla fosil kaynaklar kullanılmaktadır. Fosil kaynakların giderek azalması ve olası yan etkileri göz önünde bulundurulduğu zaman alternatif enerjilere gereksinim duyulmaktadır. Bu aşamada yenilenebilir enerji kaynakları popüler olmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının devamlılığını sağlamak için depolama teknolojileri geliştirilmektedir.

Süperkapasitörler gelişmekte olan ve gelecek vaad eden bir enerji depolama teknolojisidir. Süperkapasitörlerin performansını etkileyen en önemli parça elektrotlarıdır. Elektrot materyali olarak metal oksitler, iletken polimerler ve karbon temelli malzemeler kullanılmaktadır. Karbon temelli malzemelerin doğada bol bulunması, maliyeti, gözenekli yapısı, iletkenliği gibi pozitif özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Özellikle biyo-atıkların karbon materyaline dönüştürülmesi günümüzde üzerine çalışılan popüler konulardandır. Bu şekilde hem çevre için geri dönüşümün sağlanması hem de biyokütle enerji kaynakların katma değeri yüksek ürünlere dönüşümü sağlanabilmektedir.

Süperkapasitör üretiminde malzeme türetilmesi çalışmamızın en önemli basamağı olmuştur. Çay atıklarının grafitizasyon, aktivasyon ve katkılama işlemlerinden geçirilerek katma değeri yüksek bir ürüne dönüştürülmesi ve bu ürünün süperkapasitör elektrot malzemesi olarak kullanılması bir başarı ölçütü olmuştur. Biyokütleden elde edilen karbon, piroliz, kimyasal veya fiziksel aktivasyon, heteroatom katkılama vb. birçok yöntem yardımıyla geliştirilebilir. Bu yöntemler kullanılan kimyasal, sıcaklık değeri veya deneysel koşullarla farklılık gösterebilir. Elde edilen malzemenin kusur miktarı da bu faktörlere bağlı olarak indirgenebilir. Karbonun yapısında olan kusurlar ve gözenek boyutu, dağılımı süperkapasitörün elektrokimyasal özelliklerini etkilemektedir.

Elektrot temel materyali olarak kullanılan çay atıklarının grafitizasyon sürecinde piroliz süresi daha yavaş ve daha uzun yapılabilir. İçerisine katkılanan heteroatomların çay atıklarının yapısına daha çok işlemesi (intercalation) için uzun süreli ısıtma işlemi uygulanabilir. Böylece karbonun yapısı daha grafitize edilebilir.

Süperkapasitör elektrot materyali çok geniş kapsamlı bir çalışma alanına sahiptir. Temel biyokütle malzemesi çeşitlenerek (findık kabuğu, kabak çekirdeği vb.) geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Abas, N., Kalair, A. ve Khan, N. (2015). Review of fossil fuels and future energy technologies. *Futures*, 69, 31–49. doi:10.1016/j.futures.2015.03.003
- Afif, A., Rahman, S. M., Tasfiah Azad, A., Zaini, J., Islan, M. A. ve Azad, A. K. (2019). Advanced materials and technologies for hybrid supercapacitors for energy storage. *Journal of Energy Storage*, 25(4), 100852. doi:10.1016/j.est.2019.100852
- Akgül, G., Maden, T. B., Diaz, E. ve Jiménez, E. M. (2018). Modification of tea biochar with Mg, Fe, Mn and Al salts for efficient sorption of PO_4^{3-} and Cd^{2+} from aqueous solutions. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 9, 57-66. doi:10.2166/wrd.2018.018
- Ayinla, R. T., Dennis, J. O., Zaid, H. M., Sanusi, Y. K., Usman, F. ve Adebayo, L. L. (2019). A review of technical advances of recent palm bio-waste conversion to activated carbon for energy storage. *Journal of Cleaner Production*, 229, 1427–1442. doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.116
- Balakrishnan, A. ve Subramanian, K.R.V. (2014). Nanostructured ceramic oxides for supercapacitor applications. CRC Press, Yayın no:1, 206, 1-153, ISBN:9781138072671,.
- Balathanigaimani, M.S., Shim, W.G., Lee, M.J., Kim, C., Lee, J.W. ve Moon, H. (2008). Highly porous electrodes from novel corn grains-based activated carbons for electrical double layer capacitors. *Electrochemistry Communications*, 10, 868–871. doi: 10.1016/j.elecom.2008.04.003.
- Berrueta, A. ve Ursúa, A. (2019). Supercapacitors : Electrical characteristics, modeling, applications and future trends. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Access*, 9, 50869-50896. doi:10.1109/ACCESS.2019.2908558
- Bogdan, E. A. (2020). How a deadly pandemic cleared the air: narratives and practices linking COVID-19 with air pollution and climate change. *Space and Culture*, 23(3), 293–300. doi:10.1177/1206331220938641
- Bullich-Massagué, E., Cifuentes-García, F. J., Glenney-Crende, I., Cheah-Mañé, M., Aragüés-Peñalba, M., Díaz-González, F. ve Gomis-Bellmunt, O. (2020). A review of energy storage technologies for large scale photovoltaic power plants. *Applied Energy*, 274(6), 115213. doi:10.1016/j.apenergy.2020.115213
- Biarent, D., Bingham, R., Eich, C., Herce, J.L., Maconochie, I., Rodriguez-Nunez, A.,

- Rajka, T. ve Zideman, D. (2010). European resuscitation council guidelines for resuscitation 2010 section 6. paediatric life support. *Resuscitation*, 81, 1364–1388.p
- Candelaria, S., Shao, Y., Zhou, W., Li, X., Xiao, J., Zhang, J., Wang, Y., Liu, J., Li, J. ve Cao, G. (2012). Nanostructured carbon for energy storage and conversion. *Nano Energy*, 1, 195–220. doi: 10.1016/j.nanoen.2011.11.006
- Chen, W., Zhang, H., Huang, Y., ve Wang, W. A. (2010). Fish scale based hierarchical lamellar porous carbon material obtained using a natural template for high performance electrochemical capacitors. *Journal of Materials Chemistry*, 20, 23, 4773.
- Chen, L., Ji, T., Brisbin, L. ve Zhu, J. (2015). Hierarchical porous and high surface area tubular carbon as dye adsorbent and capacitor electrode. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 7, 22, 12230-12237.
- Chen, L., Ji, T., Mu, L. ve Zhu, J. (2017). Cotton fabric derived hierarchically porous carbon and nitrogen doping for sustainable capacitor electrode. *Carbon*, 111, 839–848. doi:10.1016/j.carbon.2016.10.054
- Depolama, E., Depolama, E. E., Depolama, K. E. ve Depolama, M. E. (2012). Enerji depolama yöntemleri. *Süleyman Demirel Üniversitesi Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 4(2), 17–29.
- Drewniak, S., Muzyka, R., Stolarczyk, A., Pustelny, T., Moranska-Kotyczka, M. ve Setkiewicz, M. (2016). Studies of reduced graphene oxide and graphite oxide in the aspect of their possible application in gas sensors. *Sensors*, 16, 103. doi:10.3390/s16010103
- Edition, S. (2010). Renewable energy in Europe: Markets, trends and technologies. *European Renewable Energy Council*, Yayın no:2, ISBN 9781138985148.
- Gao, Z., Zhang, Y., Song, N. ve Li, X. (2017). Biomass-derived renewable carbon materials for electrochemical energy storage. *Materials Research Letters*, 5, 2, 69–88. doi: 10.1080/21663831.2016.1250834.
- Gao, J., Wang, X., Zhang, Y., Liu, J., Lu, Q. ve Liu, M. (2016). Boron-doped ordered mesoporous carbons for the application of supercapacitors. *Electrochim Acta*, 207, 266-274. doi: 10.1016/j.electacta.2016.05.013.
- Guo, D., Ding, B., Hu, X., Wang, Y., Han, F. ve Wu, X. (2018). Synthesis of boron and nitrogen codoped porous carbon foam for high performance supercapacitors. *ACS*

- Sustainable Chemistry and Engineering*, 6, 11441–11449. doi:10.1021/acssuschemeng.8b01435
- Guo, H. ve Gao, Q. (2009). Boron and nitrogen co-doped porous carbon and its enhanced properties as supercapacitor. *Journal of Power Sources*, 186, 551–556.
- Gonen, M., Nyankson, E. ve Gupta, R.B. (2016). Boric acid production from colemanite together with ex-situ CO₂ sequestration. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 55, 5116–5124
- Goldfarb, J., Dou, G., Salari, M. ve Grinstaff, M. (2017). Biomass-based fuels and activated carbon electrode materials nn integrated approach to green energy systems. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 5, 3046–3054. doi: 10.1021/acssuschemeng.6b02735
- Han, J., Zhang, L., Lee, S., Oh, J., Lee, K.S., Potts, J.R., Ji, J., Zhao, X., Ruoff, R.S. ve Park, S. (2013). Generation of b-doped graphene nanoplatelets using a solution process and their supercapacitor applications. *American Chemical Society*, 7, 19–26.
- Han, J., Ping, Y., Li, J., Liu, Z., Xiong, B. ve Fang, P. (2019). One-step nitrogen, boron codoping of porous carbons derived from pomelo peels for supercapacitor electrode materials. *Diamond and Related Materials*, 96, 176–181.
- Harmas, M., Thomberg, T., Romann, T., Janes, A. ve Lust, E. (2017). Carbon for energy storage derived from granulated white sugar by hydrothermal carbonization and subsequent zinc chloride activation. *Journal of The Electrochemical Society*, 164, 9, 1866–1872. doi: 10.1149/2.0681709jes
- Hou, R., Liu, B., Sun, Y., Liu, L., Meng, J., Levi, M. D. ve Yan, X. (2020). Recent advances in dual-carbon based electrochemical energy storage devices. *Nano Energy*, 72(2), 104728. doi:10.1016/j.nanoen.2020.104728
- Inal, G., Holmes, S., Banford, A. ve Aktas, Z. (2015). The performance of supercapacitor electrodes developed fromchemically activated carbon produced from waste tea. *Applied Surface Science*, 357, 696–703. doi: 10.1016/j.apsusc.2015.09.067
- Jacobson, M. Z. ve Delucchi, M. A. (2011). Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. *Energy Policy*, 39(3), 1154–1169. doi:10.1016/j.enpol.2010.11.040

- Jin, H., Wang, X., Shen, Y. ve Gu, Z. (2014). A high-performance carbon derived from corn stover via microwave and slow pyrolysis for supercapacitors. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 110, 18–23. doi: 10.1016/j.jaap.2014.07.010
- Jiang, H., Lee, P. S. ve Li, C. (2013). 3D carbon based nanostructures for advanced supercapacitors. *Energy and Environmental Science*, 6(1), 41–53. doi:10.1039/c2ee23284g
- Jiang, L., Yan, J., Hao, L., Xue, R., Sun, G. ve Yi, B. (2013). High rate performance activated carbons prepared from ginkgo shells for electrochemical supercapacitors. *Carbon*, 56, 146-154. doi: 10.1016/j.carbon.2012.12.085
- Jiang, J., Zhang, L., Wang, X., Holm, N., Rajagopalan, K., Chen, F. ve Ma, S. (2013). Highly ordered macroporous woody biochar with ultra-high carbon content as supercapacitor electrodes. *Electrochimica Acta*, 113, 481–489. doi: 10.1016/j.electacta.2013.09.121
- Kalpana, D., Cho, S.H., Lee, S.B., Lee, Y.S., Misra, R. ve Renganathan, N.G. (2009). Recycled waste paper—A new source of raw material for electric double-layer capacitors. *Journal of Power Sources*, 190,2, 587-591.
- Kåberger, T. (2018). Progress of renewable electricity replacing fossil fuels. *Global Energy Interconnection*, 1(1), 48–52. doi:10.14171/j.2096-5117.gei.2018.01.006
- Klupp, G., Margadonna, S. ve Prassides, K. (2016). Fullerenes. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, doi:10.1016/B978-0-12-803581-8.02299-2.
- Kocaman, B. (2013). Technologies of energy storage on smart grids and microgrids. *BEU Journal of Science*, 2(21), 119–127.
- Kozak, M. ve Kozak, Ş. (2012). Enerji depolama yöntemleri. *Mechanical Technology*, 4, 2, 17-29.
- Krane, J. (2017). Climate change and fossil fuel: An examination of risks for the energy industry and producer states. *MRS Energy & Sustainability*, 4, 1–12. doi:10.1557/mre.2017.3
- Li, X., Xing, W., Zhuo, J., Li, F., Qiao, S.Z., Lu. ve G. Q., (2011). Preparation of capacitors electrode from sunflower seed shell. *Bioresource Technology*, 102, 1118–1123. doi: 10.1016/j.biortech.2010.08.110
- Li, R., Zhou, Y., Li, W., Zhu, J. ve Huang, W. (2020). Structure engineering in biomass-derived carbon materials for electrochemical energy storage. *Research*,

- 2020, 1–27. doi:10.34133/2020/8685436
- Li, S., Li, F., Wang, J., Tian, L. ve Zhang, H. (2018). Preparation of hierarchically porous graphitic carbon spheres and their applications in supercapacitors and dye adsorption. *Nanomaterials*, 8,625. doi:10.3390/nano8080625
- Liu, C. F., Liu, Y. C., Yi, T. Y. ve Hu, C. C. (2019). Carbon materials for high-voltage supercapacitors. *Carbon*, 145, 529–548. doi:10.1016/j.carbon.2018.12.009
- Liu, D., Yu, S., Shen, Y., Chen, H., Shen, Z., Zhao, S. ve Bao, B. (2015). Polyaniline coated boron doped biomass derived porous carbon composites for supercapacitor electrode materials. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54, 50, 12570–12579. doi:10.1021/acs.iecr.5b02507
- Liu, N., Chen, R. ve Wan, Q. (2019). Recent advances in electric-double-layer transistors for bio-chemical sensing applications. *Sensors (Switzerland)*, 19(15). doi:10.3390/s19153425
- Liu, Z., Yuan, X., Zhang, S., Wang, J., Huang, Q., Yu, N. ve Wu, Y. (2019). Three-dimensional ordered porous electrode materials for electrochemical energy storage. *NPG Asia Materials*, 11(1). doi:10.1038/s41427-019-0112-3
- Lu, W., Baek, B.J. ve Dai, L. (2015). Carbon nanomaterials for advanced energy systems. Wiley, 317-359, ISBN: 978-1-118-58078-3.
- Moseley, P.T. ve Garche, J. (2015). Electrochemical energy storage for renewable sources and grid balancing. Elsevier, Yayın no:1, baskı no:1, ISBN: 978-0-444-62616-5, 345-436.
- Moussa, G., Hajjar-garreau, S., Taberna, P., Simon, P. ve Gihimbeu C. (2018). Mesoporous carbon for supercapacitor application. *Journal of Carbon Research*. 4(2), 20. doi:10.3390/c4020020
- Niu, L., Li, Z., Hong, W., Sun, J., Wang, Z., Ma, L., Wang, J. ve Yang, S. (2013). Pyrolytic synthesis of boron-doped graphene and its application as electrode material for supercapacitors. *Electrochimica Acta*, 108, 666– 673.
- Olivares.M., Fernández, J.A., Lázaro, M.J., Fernandez-Gonzalez, C., Macías-García, A., Gómez-Serrano, V., Stoeckli, F. ve Centeno, T.A. (2009), Cherry stones as precursor of activated carbons for supercapacitors. *Materials Chemistry and Physics*, 114, 323–327. doi: 10.1016/j.matchemphys.2008.09.010
- Pan, Y., Xu, K. ve Wu, C. (2019). Recent progress in supercapacitors based on the advanced carbon electrodes, *Nanotechnol Review*, 8, 299–314.

- Peng, C., Yan, X., Wang, R., Lang, J., Ou, Y. ve Xue, Q. (2013). Promising activated carbons derived from waste tea-leaves and their application in high performance supercapacitors electrodes. *Electrochim Acta*, 87, 401-408. doi: 10.1016/j.electacta.2012.09.082
- Qian, L., Guo, F., Jia, X., Zhan, Y., Zhou, H., Jiang, X. ve Tao, C. (2020). Recent development in the synthesis of agricultural and forestry biomass-derived porous carbons for supercapacitor applications. *Ionics*, 26, 4. doi:10.1007/s11581-020-03626-1
- Qiu, Z., Wang, Y., Bi, X., Zhou, T., Zhao, J., Miao, Z., Yi, W., Fu, P. ve Zhou, S. (2018). Biochar-based carbons with hierarchical micro-meso-macro porosity for high rate and long cycle life supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 376, 82-90. doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.11.077
- Samantara, K.A. ve Ratha, S. (2018). Materials development for active/passive components of a supercapacitor background, present status and future perspective. Springer Singapore. Yayın no:1, ISBN: 978-981-10-7263-5, 55, 11-55.
- Samantara, K.A. ve Ratha, S. (2018). Supercapacitor instrumentation, measurement and performance evaluation techniques, Springer Singapore. Yayın no:1, ISBN:978-981-13-3086-5, 64, 1-41.
- Sharma, P. and Bhatti, T.S. (2010). A review on electrochemical double-layer capacitors. *Energy Conversion and Management*, 51, 2901–2912. doi: 10.1016/j.enconman.2010.06.031.
- Sizmur, T., Fresno, T., Akgül, G., Frost, H. ve Moreno-Jiménez, E. (2017). Biochar modification to enhance sorption of inorganics from water. *Bioresource Technology*, 246. doi:10.1016/j.biortech.2017.07.082
- Subramanian, V., Luo, C., Stephan, A.M., Nahm, K.S., Thomas, S. ve Wei, B. (2007). Supercapacitors from activated carbon derived from banana fibers. *The Journal of Physical Chemistry C*, 111, 20, 7527-7531. doi: 10.1021/jp067009t
- Teo, E.Y.L., Muniandy, L., Ng, E.p., Adam, F., Mohamed, A.R., Jose, R. ve Chong, K.F. (2016). High surface area activated carbon from rice husk as a high performance supercapacitor electrode. *Electrochimica Acta*, 192, 110-119. doi: 10.1016/j.electacta.2016.01.140
- Thirumal, V., Panduragan, A., Jayavel, R. ve Ilangovan, R. (2016). Synthesis and characterization of boron doped graphene nanosheets for supercapacitor

- applications. *Synthetic Metals*, 220, 524–532. doi: 10.1016/j.synthmet.2016.07.011
- Tiwari, S. K., Kumar, V., Huczko, A., Oraon, R., Adhikari, A. De ve Nayak, G. C. (2016). Magical allotropes of carbon: prospects and applications. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 41(4), 257–317. doi:10.1080/10408436.2015.1127206
- URL-1, 2020. <http://www.robotistan.com/kondansator-nedir/>. (6 Ocak 2020).
- URL-2, 2020. <https://www.ceyrekmuhendis.com/grafen-nedir/> (2 Mayıs 2020).
- Vangari, M., Pryor, T. ve Jiang, L. (2013). Supercapacitors: Review of materials and fabrication methods. *Journal of energy engineering*, 139, 2, 72-79. doi: 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000102
- Wang, D.W., Li, F., Chen Z.G., Lu, G.Q. ve Cheng, H.M. (2008). Synthesis and electrochemical property of boron-doped mesoporous carbon in supercapacitor. *Chemistry of Materials*, 20, 22, 7195-7200. doi: 10.1021/cm801729y
- Wang, G., Zhang, L. ve Zhang, J. (2012). A review of electrode materials for electrochemical supercapacitors. *Chemical Society Reviews*, 41(2), 797–828. doi:10.1039/c1cs15060j
- Wang, J., Nie, P., Ding, B., Dong, S., Hao, X., Dou, H. ve Zhang, X. (2017). Biomass derived carbon for energy storage devices. *Journal of Materials Chemistry*, 5(6), 2411-2428. doi: 10.1039/c6ta08742f.
- Xin, W., Song, Y., Peng, J., Liu, R. ve Han, L. (2017). Synthesis of biomass-derived mesoporous carbon with super adsorption performance by an aqueous cooperative assemble route. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 5, 2312–2319.
- Xia, L., Yu, L., Hu, D. ve Chen, G. Z. (2017). Electrolytes for electrochemical energy storage. *Materials Chemistry Frontiers*, 1(4), 584–618. doi:10.1039/c6qm00169f
- Yang, H., Ye, S., Zhou, J. ve Liang, T. (2019). Biomass-derived porous carbon materials for supercapacitor. *Frontiers in Chemistry*, 7(4), 1–17. doi:10.3389/fchem.2019.00274
- Ye, T., Li, L. ve Zhang, Y. (2020). Recent progress in solid electrolytes for energy storage devices. *Advanced Functional Materials*, 30(29), 1–20. doi:10.1002/adfm.202000077
- Yan, J., Wang, Q., Wei, T. ve Fan, Z. (2014). Recent advances in design and fabrication of electrochemical supercapacitors with high energy densities. *Advanced Energy Materials*, 4, 1300816. doi: 10.1002/aenm.201300816

- Yilmazoğlu, M. Z. (2010). Isı enerjisi depolama yöntemleri ve binalarda uygulanması. *Politeknik Dergisi*, 13(1), 33–42.
- Zhao, X., Wang, A., Yan, J., Sun, G. ve Zhang, T. (2010). Synthesis and electrochemical performance of heteroatom-incorporated ordered mesoporous Carbons. *Chemistry. Materials*, 22, 5463–5473.
- Zhan, C., Zhang, P., Dai, S. ve Jiang, D. (2016). Boron supercapacitors. *ACS Energy Letters*, 1, 1241–1246.
- Zhang, L., Jiang, J., Holm, N. ve Chen, F. (2014). Mini-chunk biochar supercapacitors. *Journal of Applied Electrochem*, 44, 1145–1151. doi: 10.1007/s10800-014-0726-7.
- Zhang, Y., Dai, W., Liu, Y. ve Ma, B. (2017). Ordered mesoporous carbon by evaporation induced self-assembly under HCl conditions, *RSC Advances*, 8250–8257. doi:10.1039/c6ra26841b

ÖZGEÇMİŞ

Ayşenur KARAMUSTAFA 02/09/1995 tarihinde Rize ili Pazar ilçesinde doğdu. 2002 yılında İstanbul'da Uçanevler İlköğretim Okulu'nda başladı ve daha sonra eğitimini Ragıp Akın İlköğretim Okulu'nda tamamladı. 2010 yılında Bakırköy Lisesi ile eğitimine kaldığı yerden devam etti. 2013 yılında liseden mezun oldu ve yılında Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümüne başladı 2018 yılında sınıf derecesi ile mezun oldu. Aynı yıl güz döneminde Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladığı yüksek lisans öğretimine halen devam etmektedir. İyi seviyede İngilizce bilmektedir.