



**İNSAN SAÇINDAN ÜRETİLMİŞ
AKTİF KARBONUN KULLANIMI**

Oğuzhan KOTAN

**Yüksek Lisans Tezi
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı
Temel İşlemler ve Termodinamik Bilim Dalı
Dr. Öğr. Üyesi Hatice BAYRAKÇEKEN
2019**

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNSAN SAÇINDAN ÜRETİLMİŞ AKTİF KARBONUN KULLANIMI

Oğuzhan KOTAN

**KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Temel İşlemler ve Termodinamik Bilim Dalı**

**ERZURUM
2019**

Her Hakkı Saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü



TEZ ONAY FORMU

İNSAN SAÇINDAN ÜRETİLMİŞ AKTİF KARBONUN KULLANIMI

Dr. Öğretim Üyesi Hatice BAYRAKÇEKEN danışmanlığında, Oğuzhan KOTAN tarafından hazırlanan bu çalışma, 16/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı Temel İşlemler ve Termodinamik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Songül DUMAN

İmza:

Üye : Prof. Dr. A. Vildan BEŞE

İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Hatice BAYRAKÇEKEN

İmza:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun 01.08/2019 tarih ve ...31.../...56.... nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İNSAN SAÇINDAN ÜRETİLMİŞ AKTİF KARBONUN KULLANIMI

Oğuzhan KOTAN

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı
Temel İşlemler ve Termodinamik Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hatice BAYRAKÇEKEN

Aktif karbon, karbon siyahları, nükleer grafitler, karbon elyafları ve bileşikleri, elektrot grafit ailesi ve daha birçok ailesinin bir üyesidir. Hepsi farklı kömürleşme ve üretim süreçleriyle birlikte organik ana kaynaklardan gelmektedir. Yapısal açıdan bakıldığında, karbon malzemeler toplu olarak karbon ailesini oluşturur. Bununla birlikte, her bir karbonun belirli özellikleri vardır. Her karbonun kendine özgü bir kimliği vardır. Bu tez çalışmasında, farklı yaş aralıklarında olan insan saçından aktif karbon üretilmiştir. Aktif karbonlar nitrojen adsorpsiyon / desorpsiyon izotermi (BET), termal gravimetrik analiz (TGA), X ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM), Fourier Transform Infrared Spektroskopisi (FTIR), Raman Spektroskopisi ve Elemental analiz teknikleriyle tanımlanmıştır. Sentezlenen malzemelerin kapasitansı, çevrimsel voltametri (CV) kullanılarak belirlenmiştir. Karakterizasyon sonuçları, aktif karbonun çok büyük bir yüzey alanına sahip olduğunu ve farklı yaşlarda elde edilen aktif karbonlara göre kapasitans değerlerinin değiştiğini göstermiştir.

2019, 62 sayfa

Anahtar Kelimeler: Aktif karbon, İnsan saçı, Süper kapasitör

ABSTRACT

Master Thesis

USE OF HUMAN HAIR PRODUCED ACTIVE CARBON

Oğuzhan KOTAN

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Chemical Engineering
Basic Operations and Thermodynamics Science

Supervisor: Dr. Hatice BAYRAKÇEKEN

Activated carbon is a member of the family of carbon blacks, nuclear graphites, carbon fibers and compounds, electrodes graphite, and many more. They all come from organic main sources with different carbonization and production processes. From a structural point of view, carbon materials collectively form carbon family. However, each individual carbon has certain characteristics. Each carbon has a unique identity. This study, activated carbon was produced from human hair which were at different age ranges. Activated carbons were characterized by nitrogen adsorption/desorption isotherms (BET), thermal gravimetric analysis (TGA), X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Raman Spectroscopy, Elemental analysis techniques. Capacitance of the synthesized materials was determined by using cyclic voltammetry (CV). Characterization results showed that activated carbon had very high surface area and capacitance values are changed according to the activated carbons obtained at different ages.

2019, 62 pages

Keywords: Activated carbon, Human hair, Supercapacitor

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitim sürecinin başından sonuna kadar; en büyük desteğim, rehberim, yol göstericim, çözüm ortağım, azim ve gayretim sebebi, başarımın anahtarı, çok kıymetli danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hatice BAYRAKÇEKEN'e tüm emek ve katkılarından dolayı sonsuz teşekkür ederim.

Aynı zamanda çalışmamın tamamlanmasında büyük katkıları olan; Sayın Prof. Dr. A.Vildan BEŞE'ye, Sayın Doç. Dr. Ayşe BAYRAKÇEKEN YURTCAN'a ve Sayın Arş. Gör. Ayşenur ÖZTÜRK'e çok teşekkür ederim.

Son olarak sevgi, ilgi ve destekleriyle daima yanımda olan, ailemin bütün üyelerine, çalışmalarım boyunca manevi desteğini hissettiğim değerli arkadaşım Ahmet Melik YILMAZ'a teşekkür ederim.

Oğuzhan KOTAN

Temmuz, 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Aktif Karbon Kullanım Alanları ve Uygulamaları.....	3
2. KURAMSAL TEMELLER.....	5
2.1. Aktif Karbon.....	5
2.2. Süper Kapasitörler	11
2.3. Tarihsel Arka Plan.....	14
2.4. Geleneksel Kondansatörler ve Süper Kapasitörler Prensibi.....	15
2.4.1. Geleneksel kondansatörlerin prensibi	15
2.4.2. Süper kapasitörlerin prensibi	17
2.5. Süper Kapasitör Tipleri	18
2.5.1. Elektrikli çift katmanlı kondansatörler.....	19
2.5.1.a. Aktif karbon bazlı süper kapasitörler	20
2.5.1.b. Karbon aerogelleri ve xerogel bazlı süper kapasitörler.....	23
2.5.1.c. Karbon nanotüp bazlı süper kapasitörler	25
2.5.1.d. Grafen veya grafen oksit esaslı süper kapasitörler	26
2.5.2. Pseudo kapasitörler.....	26
2.5.2.a. Metal oksit bazlı süper kapasitörler.....	27
2.5.2.b. İletken polimer bazlı süper kapasitörler	27
2.5.3. Hibrit süper kapasitörler	28
2.5.4. Farklı malzemelere dayalı süper kapasitörlerin performansının karşılaştırılması	30
2.6. Esnek Süper Kapasitörler	31
2.7. Tipik Uygulamalar	32

2.7.1. Tüketici elektroniği ürünleri.....	32
2.7.1.a. Yedek güç kaynakları	32
2.7.1.b. Ana güç kaynakları.....	32
2.7.1.c. Alternatif güç kaynakları	33
2.7.2. Araç uygulamaları	33
2.7.3. Endüstriyel süreç	33
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	34
3.1. Deneysel Yöntem	34
3.1.1. Kullanılan kimyasallar	35
3.2. Yapılan Analizler	38
3.2.1 FTIR analizleri	38
3.2.2. BET analizleri.....	38
3.2.3. SEM görüntüleri.....	39
3.2.4. XRD çalışmaları	39
3.2.5. TGA analizleri	39
3.2.6. CV analizleri.....	39
3.2.7. Raman analizleri.....	42
3.2.8. Elemental analiz	42
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	43
4.1. FTIR Sonuçları	43
4.2. BET Sonuçları	43
4.3. SEM Sonuçları	45
4.4. XRD Sonuçları	46
4.5. TG Sonuçları	47
4.6. CV Sonuçları	51
4.7. Raman Sonuçları	53
4.8. Elemental Analiz sonuçları	54
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	55
KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	62

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A	Glassy Karbon Üzerine Damlatılan Madde Miktarı
A	Yüzey Alanı
AC	Aktif karbon
B	Farad Olarak Değer
BET	Brunauer Emmett Teller Yöntemi
C	Kapasitans
CNT	Karbon Nanotüpleri
D	İki elektrot arasındaki mesafe
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetri Analizi
DTG	Diferansiyel Termal Gravimetrik Analiz
E	Bir Kapasitörün Enerjisi
EDLC	Elektrokimyasal çift katmanlı kapasitörler
ESR	Eşdeğer seri direnç
ϵ_0	Boş Alanın Dielektrik Sabiti
ϵ_R	İki Elektrot Arasındaki Yalıtım Malzemesini Dielektrik Sabiti
FTIR	Fourier Transform Infrared Spektroskopisi
MWNT	Çok Duvarlı Nanotüpler
P	Güç
P_{max}	Maksimum Güç
Q	Depolanmış yük
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TG	Termal Gravimetrik Analiz
V	Uygulanan voltaj
XRD	X Işını Kırınımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Şematik olarak aktif karbon modeli.....	3
Şekil 2.1. Çeşitli enerji depolama ve dönüştürme cihazları için Ragone grafiği	13
Şekil 2.2. Geleneksel bir kondansatörün şeması.....	16
Şekil 2.3. Elektrokimyasal çift katmanlı kondansatörün şeması	18
Şekil 2.4. Süper kapasitör tipleri.....	19
Şekil 2.5. Tipik yüklü bir EDLC'nin şematik diyagramı	20
Şekil 2.6. KOH aktivasyonu ile ısıtılma işlemiyle sentezlenen AC'nin SEM'i.....	21
Şekil 2.7. AC ((o) 1 mol / L H ₂ SO ₄ ; (▲) 6 mol / L KOH) için BET yüzey alanının bir fonksiyonu olarak asidik ve alkalın elektrolitlerdeki spesifik kapasitans	22
Şekil 2.8. Karbon aerogelinin (a) SEM (b) CO ₂ aktivasyonu ile aktif karbon aerogeli	24
Şekil 2.9. (a) SWNT'lerin üç tipik yapısının şematik gösterimleri; (b) Eşmerkezli olarak yuvalanmış dokuz SWNT dizisi içeren bir MWNT'nin transmisyon elektron mikroskobu (TEM) görüntüsü	25
Şekil 2.10. Kimyasal olarak sentezlenmiş grafenin şematik gösterimi.	26
Şekil 2.11. (a) Çift katmanlı kapasitör (karbon) ve (b) Sahte kapasitör (iletken polimer) şarjının karşılaştırılması.....	28
Şekil 2.12. Karbon ve pseudo kapasitör elektrotlarının performansı.....	31
Şekil 3.1. Deney düzeneği	35
Şekil 3.2. 2-propanol ile yıkanan saçlar.....	36
Şekil 3.3. 80°C'de etüvde kurutulan yıkanmış saçlar.....	36
Şekil 3.4. Argon atmosferi altında 300°C'de bir buçuk saat boyunca piroliz edilen insan saçı	35
Şekil 3.5. Argon atmosferi altında 800°C'de iki saat süreyle karbonize edilen insan saçı	37
Şekil 3.6. İnsan saçı kaynaklı aktif karbon	37
Şekil 3.7. Çevrimsel voltametri üç elektrot konfigürasyonu	40

Şekil 3.8. Döngüsel voltammetri için tipik uyarma sinyali — SCE'ye karşı 0,8 ve -0,2 V'de anahtarlama potansiyeli olan üçgen bir potansiyel dalga formu	41
Şekil 4.1. Sentezlenmiş aktif karbon malzemelerin Fourier Transform Infrared Spektroskopisi (FTIR) sonuçları	43
Şekil 4.2. Sentezlenmiş 0-18 yaş grubu aktif karbon malzemelerin adsorpsiyon desorpsiyon izotermi	44
Şekil 4.3. Sentezlenmiş 18-40 yaş grubu aktif karbon malzemelerin adsorpsiyon desorpsiyon izotermi	44
Şekil 4.4. SEM yüzey alanları.....	45
Şekil 4.5. Sentezlenmiş aktif karbon malzemelerin X-Işını Kırınımı (XRD) analizi	46
Şekil 4.6. Ham malzemelerin Termal Gravimetrik analizi	47
Şekil 4.7. Sentezlenmiş aktif karbon malzemelerin Termal Gravimetrik Analizi (TG)	48
Şekil 4.8. Ham malzemelerin Diferansiyel Termal Gravimetrik Analizi	49
Şekil 4.9. Sentezlenmiş aktif karbon malzemelerin Diferansiyel Termal Gravimetrik Analizi	49
Şekil 4.10. Ham malzemelerin Diferansiyel Taramalı Kalorimetri Analizi	50
Şekil 4.11. Sentezlenmiş aktif karbon malzemelerin Diferansiyel Taramalı Kalorimetri Analizi	50
Şekil 4.12. Sentezlenmiş aktif karbon malzemelerin çevrimsel voltametri grafiği	51
Şekil 4.13. Sentezlenmiş aktif karbon malzemelerin Raman Spektroskopisi grafiği	53

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Farklı materyal ve metotlarla üretilen aktif karbonlar	8
Çizelge 3.1. Kullanılan kimyasallar ve özellikleri	35
Çizelge 4.1. Farklı yaş aralığındaki insan saçından elde edilmiş aktif karbonların BET yüzey alanları	44
Çizelge 4.2. Ham ve aktif karbon malzemelerin TG Kütle Kayıp Oran Çizelgesi	48
Çizelge 4.3. Ham malzemelerin ve sentezlenmiş aktif karbon malzemelerin elemental analizi	54

1. GİRİŞ

Karbon, doğadaki en bol bulunan malzemelerden biridir ve uzun yıllardır çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Karbon, çeşitli uygulamalarda kullanılmasını sağlayan çok farklı fizikokimyasal özelliklere sahip birçok allotropa sahiptir (De Jong and Geus 2000; Baughman *et al.* 2002; Wang *et al.* 2005; Elrouby 2013). Özel uygulamaya bağlı olarak, aşağıdaki allotroplardan biri seçilebilir: elmas, grafit, kok, amorf karbon, karbon nanotüpleri (CNT'ler) ve camsı karbon. İnsan saçı oldukça ilginç bir atık maddedir. Atık saçların endüstride ve akademik araştırmalarda birçok uygulaması vardır. Eşsiz bir kimyasal bileşime sahiptir ve çok yavaş bozunma, yüksek çekme dayanımı, yüksek ısı yalıtımı, yüksek elastik geri kazanım ve gözenekli bir yüzeye sahiptir. Bu listelenen özellikler çeşitli uygulama alanlarında kullanımını sağlar. İnsan saçı, %50'den fazla karbon içeren yaklaşık %91 polipeptitlerden oluşur ve geri kalanı oksijen, hidrojen, azot ve kükürt gibi elementlerdir (Gupta 2014). Atık saçlar tarımda gübre olarak kullanılmıştır. Çünkü doğadaki organik azot içeren atıklardan biridir (Zheljaskov 2008). Yüksek çekme dayanımı ve yüksek sürtünme katsayısı nedeniyle kil bazlı yapıları güçlendirmek için saç kullanılmıştır (Ahmad 2014). Ayrıca geleneksel kültürde ve geleneksel Çin tıbbında karbonize edilmiş insan saçı kullanılmıştır (Brand and Wiseman 2008). Son zamanlarda, süper kapasitörler için kullanılan karbon pullarını (taneciklerini) hazırlamak için insan saçı kullanılmıştır (Qian *et al.* 2014).

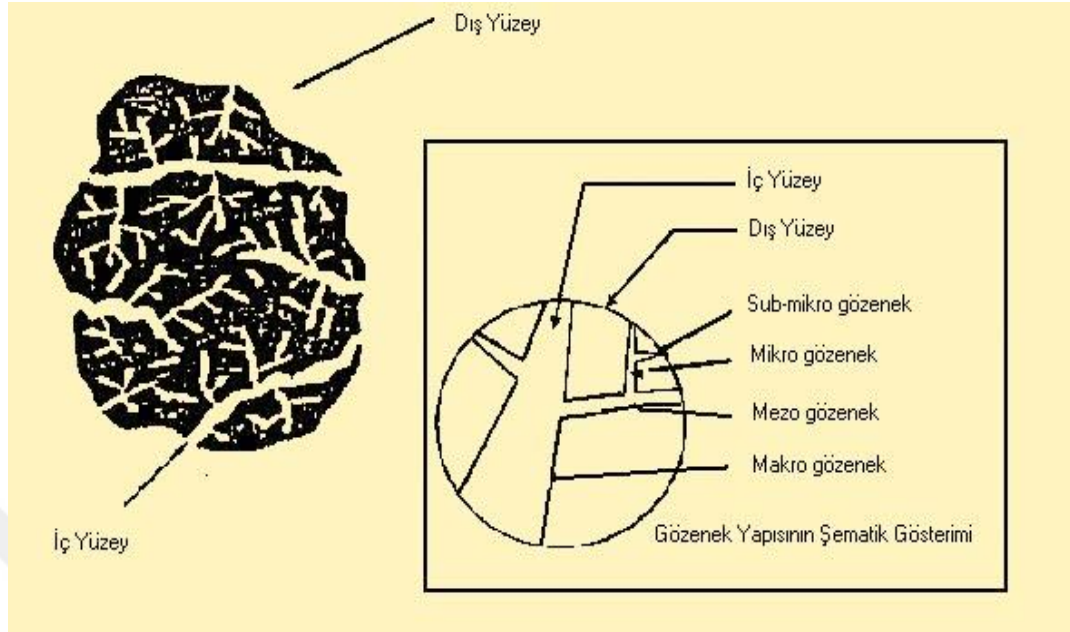
İnsan saçı üç ana bileşenden oluşur: kütikül, korteks ve varsa medulla. En dıştaki kısım olan kütikül, iç saç yapılarını koruyan ve sabitleyen sıkıca düzenlenmiş kompakt hücrelerden yapılmıştır. Korteks, kıl shaftının kütlesini oluşturur ve uzun lifler oluşturan keratinize hücrelerden oluşur. Pigment granülleri, özellikle melanin, bu bölümde bulunur. Varsa medulla, insan saçı içindeki sadece küçük bir kütle yüzdesini içerir. Medulla hücreleri gevşek bir şekilde paketlenir, ancak dehidrasyon sırasında fiber eksenini boyunca bir dizi boşluk bırakarak büzülürler (Yousof 1996). Medulla ya tamamen olmayabilir, ya fiber eksenini boyunca sürekli olabilir ya da süreksiz olabilir ve

bazı durumlarda bir çift medulla da bulunabilir. Medulla insan saç mekanik ve kimyasal özelliklerine önemsiz bir katkısı vardır (Robbins 2013).

Aktif karbon, karbon siyahlarından nükleer grafitlere, karbon elyaflarından ve bileşiklerden elektrot grafitlerine ve daha pek çok karbondan oluşan ailenin bir üyesidir. Bunların hepsi farklı karbonizasyon ve üretim süreçleri ile organik ana kaynaklardan gelmektedir. Yapısal bir bakış açısından karbon malzemeleri topluca bir karbon ailesi oluştururlar. Bununla birlikte her bireysel karbon belirli özelliklere sahiptir. Her karbonun benzersiz bir kimliği vardır. Aktifleştirilmiş karbonlar bu karbon ailesinin önemli bir parçasıdır. Aktif kömür olarak da bilinen aktif karbon, son derece gözenekli hale getirmek için işlenmiş bir karbon şeklidir ve bu nedenle adsorpsiyon veya kimyasal reaksiyonlar için çok geniş bir yüzey alanına sahip olurlar. Aktif kelimesi bazen aktifleştirilmiş olarak kullanılır. Yüksek derecede mikro gözeneklilik sayesinde, sadece bir gram aktif karbon 500 m²'yi (Amerikan futbol sahasının yaklaşık onda biri) aşan bir yüzey alanına sahiptir, bu tipik olarak azot gazı emilimi ile belirlenir. Yararlı uygulamalar için yeterli aktivasyon sadece yüksek yüzey alanından gelebilir. Ancak daha ileri kimyasal arıtma genellikle malzemenin emici özelliklerini artırır. Aktifleştirilmiş karbon çoğunlukla kömürden elde edilir. Aktif karbon, fıstık kabuğu, hindistancevizi kabuğu, turba, odun, ceviz, linyit, kömür ve petrol zifti gibi karbonlu kaynaklardan üretilen karbondur (Marsh *et al.* 2006).

The International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) adsorbanlar için gözenek büyüklüğünü yarıçaplarına göre dörde ayırmıştır (Reinoso 1985);

1. Makro gözenekler($r > 25$ nm)
2. Mezo gözenekler ($1 < r < 25$ nm)
3. Mikro gözenekler($0,4 < r < 1$ nm)
4. Submikro gözenekler($r < 0,4$ nm) olarak sınıflandırılabilirler.



Şekil 1.1. Şematik olarak aktif karbon modeli (Reinoso 1985)

1.1. Aktif Karbon Kullanım Alanları ve Uygulamaları

Aktif karbon; gaz arıtma, altın arıtma, metal ekstraksiyonu, su arıtma, ilaç, kanalizasyon arıtımı, gaz maskeleri ve solunum aygıtlarındaki hava filtreleri, sıkıştırılmış havadaki filtreler ve diğer pek çok uygulamada kullanılır. Elektrolitik kaplama çözeltilerinin saflaştırılması için çok yaygın şekilde kullanılır. Örneğin, parlak nikel kaplama çözeltilerinden organik saf olmayan maddeleri uzaklaştırmak için kullanılan bir ana arındırma tekniğidir. Kaplama çözeltileri, dolgu özelliklerini geliştirmek ve parlaklık, pürüzsüzlük, süneklik vb. özelliklerini arttırmak için çeşitli organik kimyasallar eklenir. Doğrudan akımın geçmesi ve anodik oksidasyonun elektrolitik reaksiyonları ve katodik indirgeme nedeniyle, organik katkı maddeleri çözeltide istenmeyen ürünlerin parçalanmasını sağlar. Aşırı birikmeler, çöken metalin kaplama kalitesini ve fiziksel özelliklerini olumsuz bir şekilde etkileyebilir. Aktif karbon işlemi, bu tür yabancı maddeleri uzaklaştırır ve kaplama performansını arzulanan seviyeye getirir. Çevre alanında, aktif karbon adsorpsiyonu hem havadaki hem de sudaki atıkların temizlenmesi, yeraltı suyu ıslahı, içme suyu filtrasyonu, hava temizleme, boya, kuru temizleme, benzin dağıtım işlemleri için kullanılmaktadır. Tıbbi uygulamalarda aktif

karbon, zehirlenmeleri ve aşırı dozları tedavi etmek için kullanılır. Aktif karbonun zehire bağlandığı ve gastrointestinal sistem tarafından absorbe edilmesini önlediği düşünülmektedir. Şüpheli zehirlenme vakalarında aktif kömür kullanır. Dozajlama genellikle vücut kütlesi kg başına bir gram (ergen veya yetişkinler için, 50-100 g), genellikle sadece bir kez verilir, ancak alınan ilaca bağlı olarak birden fazla verilebilir. Nadir durumlarda aktif kömür yoğun bakımda zehirli hastaların kan dolaşımından gelen zararlı ilaçları filtrelemek için kullanılır (Link 2014).



2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Aktif Karbon

Aktif karbon, çok yüksek gözenekliliğe ve yüzey alanına sahip olan bir mikro kristal formdaki karbondur. Rijit bir granül veya nispeten küçük hacimli bir parçacık yapısı içinde geniş bir yüzeye sahip köpük katı olarak görüntülenebilir. Kimyasal yapısı, organik maddeleri ve diğer polar olmayan bileşikleri gaz veya sıvı akışlarından tercihen adsorbe etmesine izin verir (Balcı 1994; Lumadede 2002). Aktif karbon, yüksek adsorpsiyon kapasitesi nedeniyle teknik olarak en önemli ve en yaygın kullanılan adsorbanlardan biri haline gelmiştir. Mevcut teknoloji, her bir özel uygulama için uygun özelliklere sahip çok büyük miktarda aktive edilmiş karbon üretimi gerektirmektedir. Genel olarak, en yaygın uygulamaların herhangi birinde kullanılan aktif bir karbon, yeterli adsorptif kapasiteye, kimyasal saflığa, mekanik mukavemete, vb. sahip olmalıdır. Ayrıca, tüm bu özellikler düşük üretim maliyetiyle bir arada bulunmalıdır. Aktif karbon, dikkatli bir şekilde kontrol edilen dehidratasyon, karbonizasyon ve organik maddelerin oksidasyonu işlemlerinden elde edilir. Laboratuvarında çok sayıda malzemeden araştırma yapmak için hazırlanabilir. Bununla birlikte, ticari uygulamada en yaygın kullanılanlar turba, kömür, linyit, odun ve hindistan cevizi kabuğu, badem kabuğu, pirinç kabuğu vb. gibi yan ürünlerdir (Balcı 1992). Başlangıç malzemesinin havasız ve kimyasal madde ilavesi olmadan pirolizi, genellikle birkaç m^2/g derecesinde belirli bir yüzey alanına ve düşük adsorpsiyon kapasitesine sahip aktif olmayan bir malzemeyle sonuçlanır. Karbonize edilmiş ürünleri reaktif bir gazla aktive ederek, büyük bir adsorpsiyon kapasitesine sahip bir karbon hazırlayabilir. Dünyada kullanılan aktif karbonun çoğunluğu buhar aktivasyonu (fiziksel aktivasyon) ile üretilir. Bu işlemde, kömürleşmiş ürün $900^{\circ}C$ üzerinde buharla reaksiyona girer. Aktif karbon üretiminde kullanılan diğer bir prosedür, karbonizasyon adımıdan önce kimyasal aktifleştirici ajanların kullanılmasını içerir. En yaygın kullanılan aktifleştirici ajanlar fosforik asit, çinko klorür ve sodyum ve magnezyum tuzlarıdır. Kimyasal maddeler dehidrasyon ajanları olarak görev yapar ve karbonizasyon sırasında katran oluşumunu kısıtlayabilirler.

Kimyasal aktivasyon genellikle basit pirolizden daha düşük sıcaklıklarda ve buhar veya karbon dioksit ile aktivasyon prosesinde gerçekleştirilir. Düşük sıcaklıklarda üretim, gözenekli bir yapının gelişmesini teşvik eder, çünkü bu koşullar altında daha küçük boyutlarda temel kristalitler oluşur (Smíšek and Černý 1970).

Aktif karbonların çoğu, farklı boyutlarda gözenekler içerir; mikroporlar, geçişli mezoporlar ve makroporlar. Bu nedenle çok çeşitli uygulamalara sahip adsorbanlar olarak kabul edilirler. Aktif karbon, adsorbanın gözenek boyutu dağılımına ve ayrıca adsorbat molekülünün geometrisi ve boyutuna bağlı olarak hem sıvı hem de gaz fazlarından molekülleri adsorbe eder. Gaz fazından adsorpsiyonda esas olarak mikro gözenekli karbon kullanılırken, gözenekli karbon sıvı faz işlemlerinde uygulanır. Gözenekli aktif karbonların uygulamaları arasında; içme suyu arıtma, atık su arıtma, tatlandırıcı renk değişikliği, gıda ve kimyasal işleme yer alır. Diğer taraftan, çözücü madde geri kazanımı, benzin emisyon kontrolü, sigara filtreleri ve endüstriyel emisyon gazı arıtımı için mikro gözenekli karbonlar kullanılır (Benaddi *et al.* 2000). Karbon adsorbanların kullanımı, yüzey alanlarına, gözenek büyüklüğü dağılımına ve kimyasal yüzey özelliklerine bağlıdır. Aktif karbonların kalitesi (yüzey alanı, gözenek büyüklük dağılımı ve dolayısıyla adsorptif özellikler) doğrudan başlangıç malzemesinin doğası, üretim yönteminin türü ve üretim sıcaklığı ile doğrudan ilgilidir. Aktif karbon saf karbon olabilir, ancak başlangıç malzemesinin tipine bağlı olarak bazı safsızlıklar da içerebilir. Belirli kullanımlar için aktif karbonun adsorpsiyon özelliklerinin (elektrolitlerin ve elektrolitlerin solüsyonlardan adsorpsiyonu gibi), küçük miktarlarda küllerden bile önemli ölçüde etkilendiği belirtilmiştir. Ayrıca, gazların adsorpsiyonu kül içeriğinden de etkilenir. Bu nedenle, hammadde mümkün olduğu kadar kül içermelidir. Öte yandan, hammaddenin nispeten düşük bir maliyeti olması gerekir (Balcı 1992). Aktif karbonların X-ışını analizi, grafitten çok daha düzensiz, kristalitleri sadece birkaç kat kalınlığında ve genişliği 10 nm'den az olan bir yapı göstermektedir (Smíšek and Černý 1970). Aktif karbon kristalitleri arasındaki boşluklar, 250 m²/g – 2500 m²/g büyük iç yüzey alanına sahip mikro gözenekli yapıyı oluşturur. Aktif karbonun kimyasal yapısı nedeniyle, organik malzemeleri ve diğer kutupsal olmayan bileşikleri gaz veya sıvı akışlardan seçimli olarak adsorbe edebilir. Bu özelliklerden dolayı,

gazların arıtılması, gaz karışımlarının ayrılması, dışarı atılan havanın arıtılması, özellikle çözücülerin geri kazanılması, ağır metallerin ayrılması ve çözeltilerin renklendirilmesi ve su arıtılması için kullanılmıştır. Karbonlu adsorbanlar, suyun arıtılması ve hava kirleticilerin uzaklaştırılmasıyla ilgili çevresel problemlerin çözümünde daha fazla kullanım bulmuşlardır (Smíšek and Černý 1970; Hassler 1974). Aktif karbon, fıstık kabuğu, turba, odun, ceviz, linyit, kömür ve petrol gibi karbonlu kaynaklardan üretilen maddedir. Aktif karbon insan saçı kullanılarak elde edilebilir.

İnsan saçı dünyanın birçok yerinde bir atık madde olarak kabul edilir ve atık akımlarındaki birikimi birçok çevresel soruna neden olur. Ancak, birçok alanda değerlendirilmesi söz konusudur. Bu tür bir malzemenin israfının önlenmesi hem mevcut kullanımdaki sorunların ele alınmasını hem de eksik olduğu yerlerde kullanım sistemlerinin geliştirilmesini gerektirmektedir. İnsan saçı çoğu toplumda yararsız olarak kabul edilen bir maddedir ve bu nedenle dünyanın hemen hemen tüm şehir ve kasabalarındaki belediye atık akımlarında bulunur (Kumar *et al.* 2009). Kırsal alanlarda veya düşük nüfus yoğunluğuna sahip bölgelerde, saçlar, birkaç yıl içinde yavaş yavaş ayrışacakları için doğaya atılırlar ve sonunda bileşen elementleri, yani karbon, azot, kükürt doğal döngüye dönüştürülür. Kentsel alanlarda veya yoğun nüfus yoğunluğu olan bölgelerde, katı atık akımlarında büyük miktarlarda birikir ve drenaj sistemlerini tıkar ve çok yönlü bir problem oluşturur. Yavaş degradasyon nedeniyle, uzun süreli büyük hacimler için çöplüklerde/atık akımlarında kalır. Zamanla, bu çöplüklerden sızan su kütlesindeki azot konsantrasyonunu artırır ve ötrofikasyon sorunlarına neden olur. İnsan saçlarının ya da onları içeren atık yığınlarının yakılması (dünyanın birçok yerinde gözlemlenen bir uygulamadır) amonyak, karbonil sülfürler, hidrojen sülfürler, kükürt dioksit, fenoller, nitriller, piroller ve piridinler gibi kötü koku ve zehirli gazlar üretir (Brebü *et al.* 2011). İnsan saçının özgün kimyasal bileşimi, yavaş degradasyon hızı, yüksek çekme mukavemeti, ısı yalıtımı, elastik toparlanma, pullu yüzey, su ve yağlarla benzersiz etkileşim gibi eşsiz özellikleri çok çeşitli kullanımlara yol açmıştır. Bu kullanımlar, aynı zamanda uzunluk, renk, düzlük veya kıvrıkcılık, saç hasarı ve kirlenme gibi beş parametreye göre değişen saç çeşitliliğine de bağlıdır. Bu varyasyon bölgedeki kültür, etnisite, saç stilleri ve saç bakım uygulamalarına bağlıdır. Örneğin,

beslenme bozukluğu olan bölgelerde veya sürekli sallama, boyama ve kimyasal şampuanlar gibi saç bakımlarının yaygın olduğu alanlarda, saç daha fazla zarar görür. Saçlardaki kimyasal kirlilik, saç bakımında toksik boyalar ve kimyasalların kullanılmasından dolayı veya bölgenin atmosferinde veya gıda zincirinde toksik kimyasalların bulunması nedeniyle gözlenir. Örneğin, elektronik atık geri dönüşümünün gerçekleştirildiği dünyanın birçok yerinde, bromlu alev geciktiricilerle saçlar kirlenmiş olarak bulunur (Muto *et al.* 2012).

Farklı materyal ve farklı metotlarla üretilen aktif karbonlar, aktivasyon metodu, kullanılan ajanları ve S_{BET} (m^2/g) yüzey alanları ile birlikte aşağıdaki Çizelge 2.1’de gösterilmiştir:

Çizelge 2.1. Farklı materyal ve metotlarla üretilen aktif karbonlar

Malzeme	Aktivasyon Yöntemi ve Piroliz Malzemesi	Sıcaklık ve Süre	S_{BET} (m^2/g)	Referanslar
Paulownia çiçeği	KOH, N_2 a-PFC: Activated PF carbons	600°C, 2h 800°C, 1h	a-PFC2 : 1006 a-PFC3 : 1159 a-PFC4 : 1471	Chang <i>et al.</i> 2015
Hindistan cevizi kabuğu	KOH, N_2	700°C, 2h	1940	Tan <i>et al.</i> 2008
Palmiye çekirdeği yağı	KOH, Buhar	500°C, 4h	AC-C : 462.1 AC-P : 727.3	Misnon <i>et al.</i> 2015
Muz lifleri	KOH/ $ZnCl_2$, N_2	800°C, 1h	686 1097	Subramanian <i>et al.</i> 2007
Bira	KOH, N_2 BL : Beer Lees	800°C, 1h	BL-1/2 : 2113 BL-1/3 : 3257 BL-1/4 : 3557	Lee <i>et al.</i> 2011
Kahve kabukları	$ZnCl_2$, N_2	900°C, 1h	842.40	Jisha <i>et al.</i> 2009
Antep fıstığı kabuğu	KOH/ H_2O , N_2	780°C, 1h	842	Hu <i>et al.</i> 2007

Çizelge 2.1. (devam)

Pirinç kabuğu	NaOH, N ₂	N1 : 750°C,30 min N2 : 750°C,60 min N3 : 750°C,90 min K1 : 650°C,120 min K2 : 700°C,60 min K3 : 750°C,60 min	N1 : 1886 N2 : 1987 N3 : 2721 K1 : 1392 K2 : 1759 K3 : 1930	Guo <i>et al.</i> 2003
Atık çay yaprakları	KOH, Ar	800°C, 1h	B-AC : 2841 T-AC : 2540 P-AC : 2245 L-AC : 2607 M-AC : 2521	Peng <i>et al.</i> 2013
Kahve çekirdekleri	ZnCl ₂ , N ₂	900°C, 1h	1019 1840	Rufford <i>et al.</i> 2008
Argania Spinosa	KOH/melamine, N ₂	500°C, 3h	AP : 1279 CK : 1430 AK : 2132 AKO : 1654 AKN : 2062	Elmouwahidi <i>et al.</i> 2012
Hindistan cevizi kabuğu	KOH, N ₂	400°C, 1h	1775	Mi <i>et al.</i> 2012
Meyve çekirdekleri ve kabukları	ZnCl ₂ , N ₂ Activated carbon from apricot stone (ACAS) Activated carbon from almond shell (ACA) Hazel nut shell (ACH) Walnut shell (ACW)	750-800-850°C, 2h	ACA : 736 ACAS : 783 ACH : 793 ACW : 774	Aygun <i>et al.</i> 2003
Atık biyokütle	KOH/ZnCl ₂ , N ₂	300-950°C	2959	Abioye <i>et al.</i> 2015
Cassava kabuğu	KOH, CO ₂	750°C, 1h	1352	Ismanto <i>et al.</i> 2010
Şeker kamışı	ZnCl ₂ , N ₂ SCC : sugar cane carbons	900°C, 1h	SCC-1 : 1155 SCC-2 : 1373 SCC-3.5 : 1788 SCC-750-1 : 1452	Rufford <i>et al.</i> 2010
Hurma yağı	ZnCl ₂ , N ₂ ACM : activated carbon monoliths	800°C, 1h	ACM-U1 : 448 ACM-K1 : 723 ACM-K2 : 1100 ACM-K3 : 1704 ACM-K4 : 1219 ACM-K5 : 1279	Farma <i>et al.</i> 2013
Camellia Oleifera	ZnCl ₂ , N ₂	500-600-700°C, 1 h	2080	Zhang <i>et al.</i> 2012

Çizelge 2.1. (devam)

Kayısı kabukları	NaOH, N ₂	700°C, 1 h	AC400 : 2335 AC500 : 2074 AC600 : 1992 AC700 : 1605 AC800 : 1342	Xu <i>et al.</i> 2012
Guadua Angustifolia and Bambusa Vulgaris Striata	KOH/C, Ar BV : Bambusa Vulgaris CS : Castanea Sativa GA : Guadua Angustifolia JR : Juglans Regia	400°C	CACBV : 1700 CACCS : 1652 CACGA : 2555 CACJR : 1703	González-García <i>et al.</i> 2013
Ayçiçeği çekirdeği	KOH, N ₂	600-800°C	AC-800-15 : 1235 NC-700-4 : 2585	Xiao Li <i>et al.</i> 2011
Ananas kabukları	KOH, N ₂	700°C	1006	Foo <i>et al.</i> 2012
Antep fıstığı kabuğu	KOH		700.53	Foo <i>et al.</i> 2011
Tütün kökleri	K ₂ CO ₃ , N ₂	450°C, 2h	2557	Li <i>et al.</i> 2009
Mısır taneleri	KOH		K-30 : 2936 K-60 : 3199 K-180 : 3270 K-240 : 3420	Balathanigaimani <i>et al.</i> 2008
Atık çay	H ₃ PO ₄ /K ₂ CO ₃		AC-H : 1327 AC-K : 1125	Inal <i>et al.</i> 2015
İnsan saçı	NaOH, Ar	750°C, 3h	1116	Satish <i>et al.</i> 2015
Hindistan cevizi lifleri	KOH, N ₂ HPAC : hierarchical porous activated carbon	700°C, 1h	HPAC-1 : 1734 HPAC-2 : 1966 HPAC-3 : 2495 HPAC-4 : 2898 HPAC-5 : 2589	Yin <i>et al.</i> 2016

Çizelge 2.1. (devam)

İnsan saçı	KOH, N ₂	700°C, 3h	Pure ACs : 1318.4 MnO ₂ /ACs(1:2) : 106.8 MnO ₂ /ACs(1:1) : 636.0 MnO ₂ /ACs(1:2) : 600.2 MnO ₂ /ACs(1:4) : 1355.7 MnO ₂ /ACs(1:8) : 1519.3 MnO ₂ /ACs(1:10) : 1560.9 MnO ₂ /ACs(1:12) : 1597.4 MnO ₂ /ACs(1:14) : 1705.3 MnO ₂ /ACs(1:16) : 1641.4	Deng <i>et al.</i> 2015
İnsan saçı	ZnCl ₂ , N ₂	600-900°C, 2h	535.2	Liu <i>et al.</i> 2015

2.2. Süper Kapasitörler

Aktif karbonlar, uzun süre elektrolit ortamından bağımsız olarak süper kapasitör uygulamaları için tercih edilen malzeme olmuştur (Simon and Gogotsi 2012). Bu, son derece yüksek spesifik yüzey alanına, ayarlanabilir gözenek boyutuna ve çevre dostu olmasına bağlanabilir. Aktif karbon, fosil yakıtlardan yenilenebilir ve geri dönüşümlü kaynaklara kadar çeşitli kaynaklardan elde edilir. Geri dönüşümlü kaynaklar, kullanımı daha ucuz ve elde edilmeleri daha kolay olduğu için özel ilgi konusudur (Karthikeyan *et al.* 2014 ; Bandosz and Kante 2015).

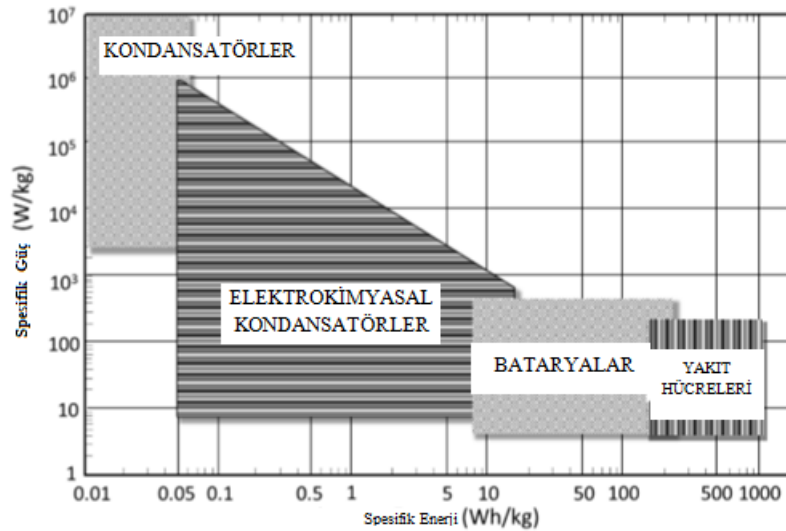
Süper kapasitörler, yüksek güç yoğunluğu, uzun ömür ve yüksek verimlilik nedeniyle büyük ilgi görmüştür. Genel olarak iki türe ayrılırlar: elektrikli çift katmanlı kondansatörler (EDLC'ler) ve pseudo kapasitörler. (trical double-layer capacitors (EDLCs) and pseudocapacitors). Pseudo kapasitörler ile karşılaştırıldığında, EDLC'ler çok hızlı bir şarj/deşarj hızına, daha yüksek güç yoğunluğuna, daha yüksek coulombic (sütunsal) verime ve daha uzun çevrim ömrüne sahiptir. Son yıllarda, taşınabilir ve giyilebilir elektroniklerin gereksinimlerini karşılamak için, süper kapasitör geliştirme esnek ve gerilebilir çözümlere doğru ilerliyor (Zhang and Ruirong 2016).

Mevcut enerji arzının çoğu fosil yakıt kaynaklarına dayanmaktadır. Bununla birlikte, rezervleri sınırlıdır ve yakın bir gelecekte tükenecektir. Bu arada, fosil yakıtların tüketiminden kaynaklanan çevre kirliliği, fosil yakıtların tüketimi ile birlikte daha da kötüleşmektedir. Sürdürülebilir kalkınmayı sağlamak için enerjiyi etkin kullanmak ve yenilenebilir ve temiz enerji kaynakları geliştirmek için yüksek bir gereksinim vardır. Hızla büyüyen taşınabilir elektronik ve elektrikli taşıt pazarı, piller ve süper kapasitörler gibi yüksek enerji ve güç yoğunluğuna sahip çevre dostu enerji depolama cihazlarının geliştirilmesini teşvik eder.

Elektrokimyasal kapasitörler ve ultrakapasitörler olarak da adlandırılan süper kapasitörler, yüksek güç kapasitesine sahip enerji depolama cihazları, mükemmel tersinirlik (%90–95 veya daha yüksek) ve uzun bir çevrim ömrü (>105 döngü) üzerinde çalışılmıştır (Kötz and Carlen 2000). Çalışma mekanizması tarafından sınıflandırılan süper kapasitörler genellikle iki tipte sınıflandırılabilir: (1) kapasitansın, karbon bazlı süper kapasitörler ve elektrot/elektrolit ara yüzündeki yük ayrılmasından kaynaklandığı elektriksel çift katmanlı kapasitörler (2) kapasitansın, geçiş metali oksit esaslı süper kapasitörler gibi, elektrot yüzeyinde meydana gelen tersinir faradik reaksiyonlardan kaynaklandığı yalancı kapasitörler.

Şekil 2.1 kendi enerji ve spesifik güçlerinin sunulduğu tipik enerji depolama ve dönüştürme cihazlarının Ragone grafiğini göstermektedir (Kötz and Carlen 2000). Pillerin ve yakıt hücrelerinin düşük bir güç yoğunluğuna sahip olduğu, geleneksel kondansatörlerin düşük bir enerji yoğunluğu ile yüksek bir güç yoğunluğuna (106 W / kg'dan daha fazla) sahip olduğu bulunmuştur. Süper kapasitörler ayrıca geleneksel kondansatörlerden daha büyük bir enerji yoğunluğuna sahiptir. Bunun nedeni, geleneksel süper kapasitörler düşük yüzey alanlı plakalarda şarjı depolar, ancak süper kapasitörler, yüksek yüzey alanlı bir karbon elektrot ve bir elektrolit arasındaki arayüzde iyonlar tarafından oluşturulan elektriksel bir çift katmanlı şarj depolarlar (Kötz and Carlen, 2000; Miller and Simon 2008). Akülerle karşılaştırıldığında, süper kapasitörler benzer büyüklükteki bir pilin gücünden yüzlerce veya binlerce kat daha fazlasını verebilirler (Miller and Simon 2008). Ek olarak, şarj EDLC'lerde çok hızlı ve

oldukça geri dönüşümlü olan elektrostatik bir şekilde depolanır. Şarj, elektrikli çift katmanlı depolamaya ek olarak yüksek geri dönüşümlü redoks reaksiyonları ile yalancı kapasitörlerde depolanır ve bu süper kapasitörlere akülerden çok daha uzun çevrim ömrü sağlar. Bununla birlikte şarj, aktif kütlelerin redoks reaksiyonları ile şarj edilmesi / boşaltılması için daha uzun zamana ihtiyaç duyulan ve aynı zamanda pillerin kullanım ömrünü sınırlayan depolarda saklanır. Bir deyişle, süper kapasitörler, enerji yoğunluğu ile güç yoğunluğu açısından önemli bir yere sahiptir ve Şekil 2.1'de gösterildiği gibi piller ile geleneksel kapasitörler arasındaki boşluğu doldurabilir (Kötz and Carlen 2000).



Şekil 2.1. Çeşitli enerji depolama ve dönüştürme cihazları için Ragone grafiği.(Kötz and Carlen 2000)

Tipik özelliklere dayanarak, süper kapasitörler aşağıdaki şekillerde yaygın olarak kullanılır:

- Ticari süper kapasitörlerin en büyük kısmı, çoğunlukla hafızalar, sistem kartları, saatler ve mikrobilgisayarlar için yedek kaynak olarak kullandıkları tüketici elektroniğinde kullanılır.

- b) Süper kapasitörler, oyuncaklar için güç kaynağı, arıza emniyetli konumlandırma cihazları ve başlangıç uygulamaları gibi ana güç kaynağı olarak kullanılır.
- c) Süper kapasitörler, güneş saati ve güneş fenerleri, yol işaretleme fenerleri ve trafik uyarı sinyalleri için bir uygulama gibi alternatif güç kaynakları olarak kullanılır. Süper kapasitörler ayrıca elektrikli taşıtlarda, hibrit elektrikli taşıtlarda, yakıt hücresi taşıtlarında ve hastanelerde veya fabrikalarda acil durum güç kaynakları, havaalanı otobüsleri, demiryolu sistemleri ve deniz limanının lastik tekerlekli portal vinçleri gibi endüstriyel ekipmanlarda kısa süreli bir enerji depolama cihazı olarak kullanılır (Kötz and Carlen 2000; Miller and Simon 2008).

2.3. Tarihsel Arka Plan

Elektrokimyasal kapasitörler ve ultrakapasitörler olarak da adlandırılan süper kapasitörler, son 20-30 yıldır incelenmektedir (Kötz and Carlen 2000). Yüksek güç yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve yüksek geri dönüşüm kabiliyeti olan bir enerji depolama teknolojisi sunarlar. 1853 yılında, çift katmanlı kapasitans kavramı ilk olarak Hermann von Helmholtz tarafından tarif edildi. Bununla birlikte, 1957 yılına kadar, çift katmanlı kapasitans yapısı üzerine ilk patentin General Electric Corporation'daki Becker'e verilmiş olup, içinde yüksek spesifik yüzey alanına sahip gözenekli karbon ilk kez bir elektrokimyasal kapasitör olarak elektrot malzemesi olarak kullanılmıştır (Becker 1957). 1962 yılında, elektrot malzemesi olarak gözenekli karbon kullanan bir enerji depolama cihazı, Standard Oil Company, Cleveland, Ohio (SOHIO) tarafından patentlendi. "Ara yüzdeki çift katmanın göreceli olarak yüksek kapasiteye sahip bir kapasitör gibi davrandığı" kabul edildi (Rightmire 1966). SOHIO ayrıca 1970 yılında elektrolitle ıslatılmış bir karbon macunu ile disk şeklindeki başka bir kapasitörün patentini aldı (Boos 1970). 1971'de bu çift katmanlı kapasitör teknolojisi, Nippon Electric Company'ye (NEC) SOHIO tarafından lisans verilmiş ve NEC ticari olarak ilk "süper kapasitör" adıyla ilk çift katmanlı kapasitörünü üretmiştir (Tripathi and Kumar 2018). O zamandan itibaren, süper kapasitörün sanayileşme süreci kilit teknolojilerin gelişmesiyle başlamıştır. Bunlar, elektrot malzemelerinin, elektrolitin ve üretim sürecinin geliştirilmesini içerir. Hafıza yedekleme uygulamaları için kullanılan "Altın

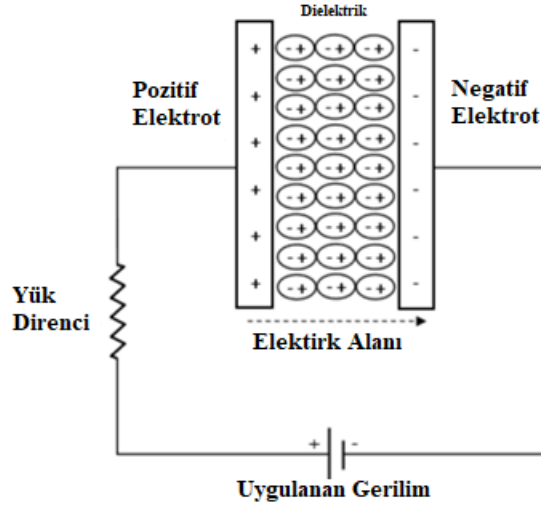
kapasitör" adı verilen bir çeşit süper kapasitör, 1978 yılında Panasonic tarafından geliştirilmiştir. Pinnacle Araştırma Enstitüsü (PRI), metal oksidi içine "PRI Ultracapacitors" adı verilen ilk yüksek güçlü çift katmanlı kapasitörleri geliştirmiştir. 1982'deki elektrot 70'lerin ve 80'lerin sonlarında Conway *et al.* yüksek kapasitans ve düşük iç direnç gösteren elektrot malzemesi olarak RuO₂ kullanılarak süper kapasitör araştırmalarına büyük katkı sağladı (Conway 1991). ABD Enerji Bakanlığı, 1992 yılında Maxwell Laboratuvarları tarafından Ultracapacitor Development Program'ın geliştirildiği hibrit elektrikli araçlarda bir çalışma geliştirdi. Son zamanlarda, süper kapasitörler dünyadaki birçok şirket tarafından üretilmekte ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Japonya ve Amerika'da, Panasonic, NEC, Epcos, ELNA, Cooper ve AVX, çeşitli elektrikli çift katmanlı kapasitör (EDLC) bileşenleri geliştirdi. Rusya'daki ESMA, güç kalitesinin iyileştirilmesi ve elektrikli araçlardaki uygulamalar için farklı EDLC modülleri sunar. Günümüzde ticari süper kapasitörler, iletişim cihazları, dijital kameralar, cep telefonları, elektrikli hibrit araçlar, elektrikli aletler, nabız lazer teknikleri, bilgisayarlar için kesintisiz güç kaynakları, rastgele erişim bellek cihazları için bekleme gücü ve üretilen enerjinin depolanması için güç kaynakları olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Schneuwly and Gallay 2000; Sharma and Bhatti 2010).

2.4. Geleneksel Kondansatörler ve Süper Kapasitörler Prensibi

Bilindiği gibi, süper kapasitör geleneksel kondansatörden daha büyük bir kapasiteye sahiptir. Geleneksel kapasitörler ve süper kapasitörler için çalışma mekanizmalarının açıklaması aşağıdaki gibidir.

2.4.1. Geleneksel kondansatörlerin prensibi

Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, kondansatörün iki iletken elektrotu vardır ve aralarındaki elektriksel teması önlemek için, ayırıcı olarak adlandırılan yalıtkan bir dielektrik malzeme yerleştirilir. İki elektrot arasına bir voltaj uygulandığında, her elektrotun yüzeyinde karşıt yükler birikir. Şarjlar dielektrik tarafından ayrı tutulabilir. Bir kapasitörün enerji depoladığı yol budur (Halper *et al.* 2006).



Şekil 2.2. Geleneksel bir kondansatörün şeması (Halper *et al.* 2006)

Kapasitans C (F), depolanmış yük Q (C)'nin uygulanan voltaj V (V)'ye oranı olarak tanımlanır:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.1)$$

Geleneksel bir kondansatör için, C , denklem 2.2 ile hesaplanabilir:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{D} \quad (2.2)$$

A , her elektrotun yüzey alanı (m^2), D iki elektrot (m) arasındaki mesafedir, ϵ_0 , boş alanın dielektrik sabitidir ($F \cdot m^{-1}$) ve ϵ_r , iki elektrot arasındaki yalıtım malzemesi dielektrik sabitidir. Enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu, bir kapasitörün iki temel özelliğidir. Bir kapasitörün E enerjisi aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2.3)$$

P gücü, birim zaman başına harcanan enerjidir. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, kondansatörler genel olarak, bir kondansatör için P'nin belirlenmesi amacıyla harici bir R direnci ile seri halde bir devre olarak tanımlanmaktadır.

Eşdeğer seri direnç (ESR) olarak adlandırılan iç direnç, genellikle toplam olarak ölçülür. Böylece, elektrotlar, akım toplayıcılar ve dielektrik malzemeler gibi kapasitörün iç bileşenlerinin tümü ESR'ye katkıda bulunur. Boşalma akımı bu dirençlerle belirlenir. Eşleşen empedans ($R = ESR$) ölçüldüğünde, bir kondansatör için maksimum güç P_{max} aşağıdaki şekilde hesaplanabilir (Burke 2000; Chu and Braatz 2002; Conway 2013):

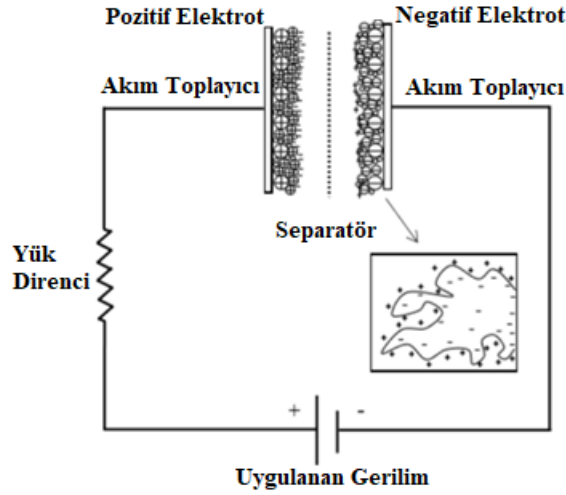
$$P_{max} = \frac{V^2}{4 \times ESR} \quad (2.4)$$

Bu denklem ESR'nin bir kapasitörün maksimum gücünü nasıl etkileyebileceğini gösterir. Bir kondansatör için, enerji veya güç yoğunluğu, birim kütle başına veya birim hacim başına bir miktar olarak hesaplanabilir. Geleneksel kapasitörler göreceli olarak yüksek güç yoğunluklarına sahiptir, ancak elektrokimyasal pillere ve Şekil 2.2'de gösterildiği gibi yakıt hücrelerine kıyasla nispeten düşük enerji yoğunluklarına sahiptir. Başka bir deyişle, bir pil bir kondansatörden daha fazla enerji depolayabilir, ancak çok hızlı bir şekilde veremez, bu nedenle güç yoğunluğu düşüktür. Diğer taraftan, kapasitörler birim kütle veya hacim başına nispeten daha az enerji depolar, ancak depolanan elektrik enerjisi büyük bir güç üretmek için hızla boşaltılabilir, bu nedenle güç yoğunluğu genellikle yüksektir.

2.4.2. Süper kapasitörlerin prensibi

Genel olarak, kondansatörler için temel prensip süper kapasitörler için de geçerlidir. Şekil 2.1 ve Şekil 2.3'de gösterildiği gibi, süper kapasitörlerin ve konvansiyonel kapasitörlerin şemaları benzerdir. Süper kapasitörler, yalıtkan bir dielektrik malzeme ile ayrılmış iki iletken elektrottan oluşur. Aralarındaki fark, süper kapasitörler için elektrotların normalde kondansatörler için olduğundan çok daha yüksek yüzey

alanlarına ve aralarındaki bir ayırıcıdaki bir elektrolit çözeltisine sahip olmasıdır. Bu nedenle, Denklemler (2.2) ve (2.3)'den hesaplanan kapasitans ve enerji, çok daha yüksek yüzey alanı A ve iki elektrot arasındaki daha küçük D mesafesi nedeniyle konvansiyonel kapasitörlerin üzerinde çarpıcı bir şekilde artmaktadır.

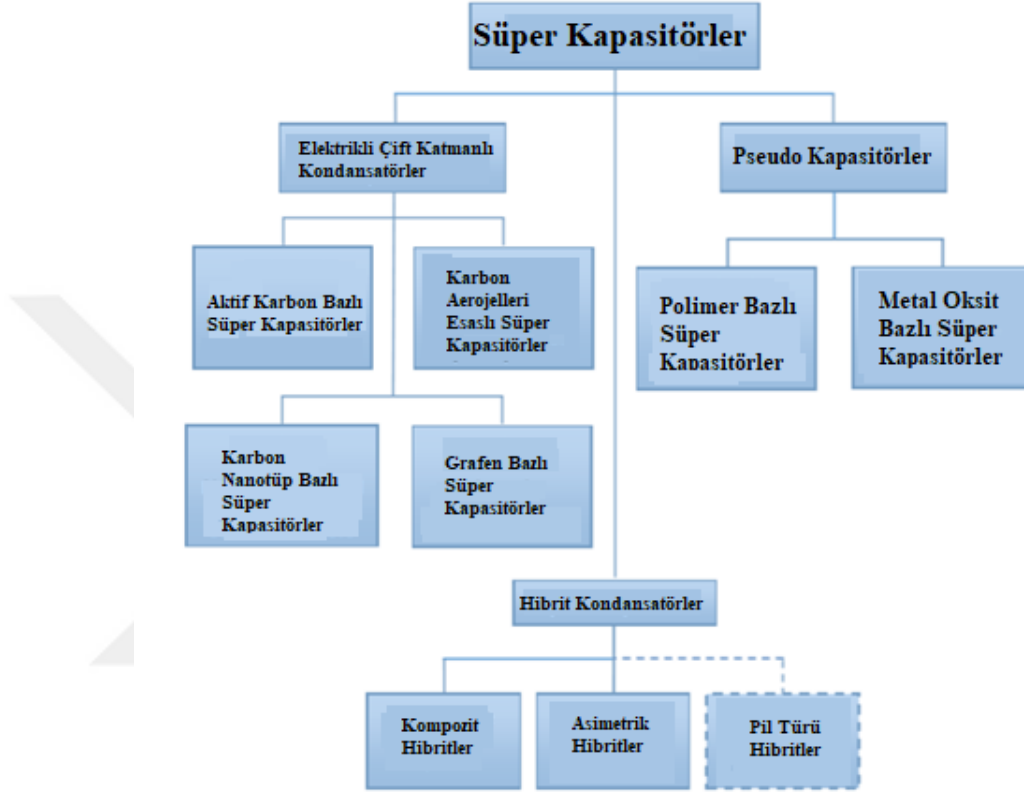


Şekil 2.3. Elektrokimyasal çift katmanlı kondansatörün şeması (Zhang and Ruirong 2016)

2.5. Süper Kapasitör Tipleri

Çalışma mekanizmasına bağlı olarak, süper kapasitörler üç ana sınıfa ayrılabilir: elektrokimyasal çift katmanlı kapasitörler (EDLC'ler), pseudo kapasitörler ve hibrid kapasitörler (Şekil 2.4). Tüm süper kapasitörler, elektrostatik depolama, ters çevrilebilir Faradaik redoks ve ikisinin bir kombinasyonu olan şarjı depolamak için benzersiz mekanizmalar ile karakterize edilebilir. Pseudo kapasitörler için, oksidasyon-indirgeme reaksiyonlarından oluşan Faradaik işlemler vardır (Zhang and Ruirong 2016). Enerji, sahte metal oksit bazlı süper kapasitörler gibi kimyasal bir mekanizma ile yalancı kapasitörlerde depolanır. Buna karşılık, EDLC'lerde Faradaik olmayan bir mekanizma meydana gelir, burada yükler, kimyasal bağların yapım veya kırılma işlemini içermeyen fiziksel işlemler ile elektrot / elektrolit arayüzünde ayrı olarak tutulur. Bunların örnekleri karbon bazlı süper kapasitörlerdir. Üçüncü tip, hibrit kapasitördür, enerji

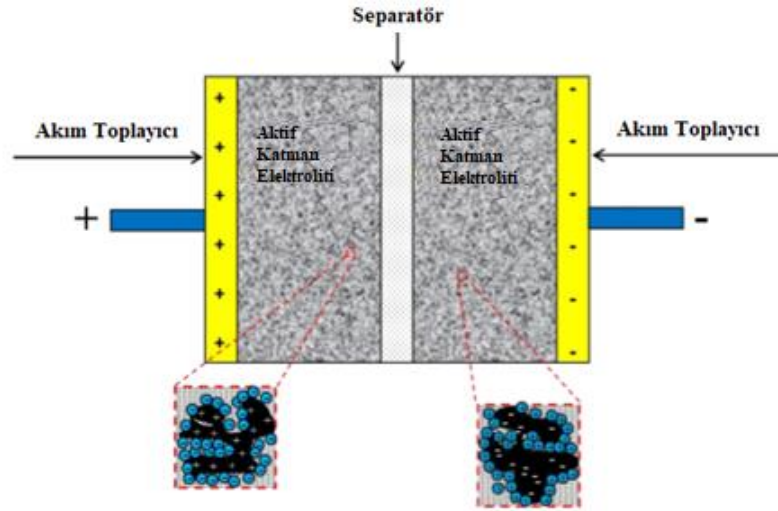
depolama işlemi, karbonat ve geçiş metali oksit malzemeleri kompozit süper kapasitörler gibi Faradaik ve Faradik olmayanların bir kombinasyonudur.



Şekil 2.4. Süper kapasitör tipleri (Zhang and Ruirong 2016)

2.5.1. Elektrikli çift katmanlı kondansatörler

Tipik yüklü EDLC'lerin şeması, Şekil 2.5'te gösterilmektedir. EDLC'ler iki elektrot, bir elektrolit ve bir ayırıcıdan oluşur. EDLC'ler için, depolamanın şarj edilmesi ve boşaltılması oldukça geri dönüşümlüdür. Bu, çok yüksek döngüsel stabilite sağlar.



Şekil 2.5. Tipik yüklü bir EDLC'nin şematik diyagramı (Zhang and Ruihong 2016)

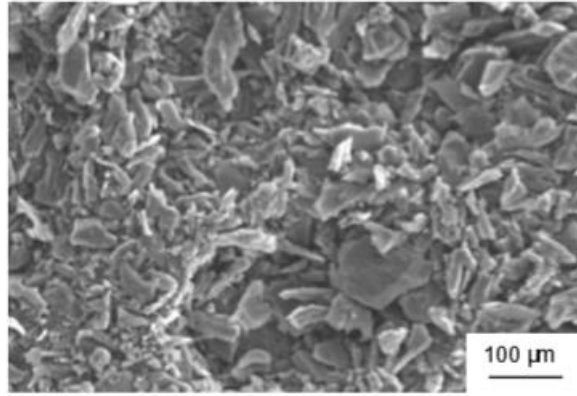
EDLC'ler, elektrokimyasal çift kat şarj kullanarak enerji depolar. Elektrot yüzeyleri üzerindeki yükler, kimyasal reaksiyona neden olacak voltajdan daha düşük bir voltaj uygulandığında birikir. Elektrolit çözeltisinin iyonları ayırıcı boyunca yayılır ve elektrotun gözeneklerine girer. Aksi yükler, uygulanan potansiyel nedeniyle elektrot ve elektrolit arasındaki arayüzde birikir. Bununla birlikte, elektrotların dikkatlice mühendisliği ile iyonların rekombinasyonu önlenir. Bu nedenle, iki elektrot iki kat şarj oluşturur.

Elektrokimyasal kapasitörün geliştirilmesinin başlamasından bu yana, büyük yüzey alanına sahip gözenekli karbon, düşük maliyetli ve yüksek stabilite elektrot malzemesi olarak kullanılmıştır. Son zamanlarda, aktif karbonlar (AC'ler), karbon aerogeller, karbon nanotüpler ve grafen gibi EDLC elektrotlarında yükü depolamak için farklı türlerde karbon malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.5.1.a. Aktif karbon bazlı süper kapasitörler

Farklı karbon malzemeler arasında, Aktif Karbonlar (AC'ler) yüksek yüzey alanı, iyi adsorpsiyon özelliği ve düşük maliyeti nedeniyle kapasitörler için elektrotlar olarak özellikle çekicidir. AC, belirli yüzey alanını ve gözenek hacmini arttırmak için CO₂, su

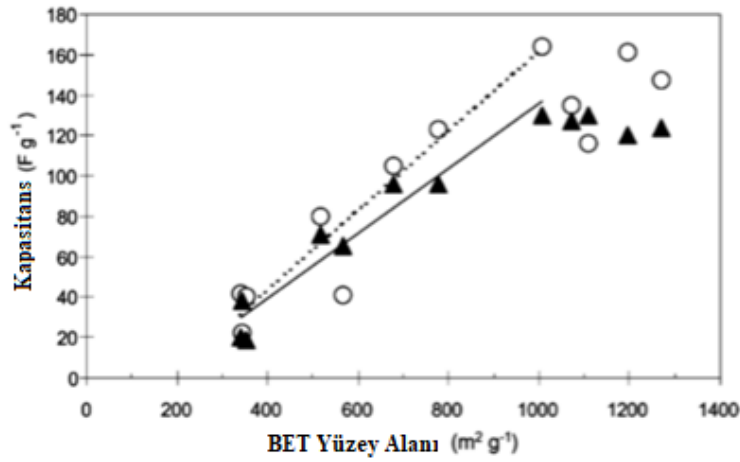
buharı veya KOH'de seçici oksidasyon ile inert bir atmosferde karbonizasyon ve aktivasyon yoluyla karbonca zengin öncüllerden türetilir (Şekil 2.6) (Simon and Gogotsi 2010; Yang *et al.* 2014). Bu yüzey alanı esas olarak birbirine bağlı karmaşık bir iç gözenek ağına katkıda bulunur. Gözenekli karbon malzemenin yüzey alanı, Brunauer, Emmett ve Teller (BET) yöntemi adı verilen önemli bir analitik teknikle ölçülebilir. Burada bir malzemenin spesifik yüzey alanı katı yüzeyindeki gazın fiziksel adsorpsiyonu ile belirlenir ve yüzeydeki monomoleküler bir tabakaya tekabül eden adsorbat gazı miktarı hesaplanır. Teorik olarak, bir AC'nin spesifik yüzey alanı ne kadar yüksek olursa, karbon yüzeyi çift katmanlı kapasitansın oluşumu için geniş bir ara yüz sağlar, çünkü spesifik kapasitans beklenmelidir. Örneğin, Lota *et al.* 2008 ticari bir AC'yi yeniden etkinleştirmek için 850°C'de KOH ile basit bir yöntem geliştirdi. Yeniden aktive edilmiş malzemelerin etkili alanları, ticari AC'lere kıyasla çarpıcı şekilde arttırılmıştır. Bu şekilde, yeniden aktive edilmiş karbonun karşılık gelen spesifik kapasitansı, ham AC'den üç kat daha yükseğe çıkmıştır.



Şekil 2.6. KOH aktivasyonu ile ısıtılma ile sentezlenen AC'nin SEM'i (Yang *et al.* 2014)

Spesifik yüzey alanının yanı sıra, gözenek boyutları dağılımı da çok önemlidir. Elektrolit iyonlarının difüzyonunu etkiler. Gryglewicz *et al.* (2005) kömür bazlı AC'nin gözenek büyüklüğü dağılımının çift katmanlı kapasitans üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Şekil 2.7'de gösterildiği gibi, 1000 m² g⁻¹'e kadar BET yüzey alanına ve %46,3-86,9'luk mezopore muhtevasına sahip olan AC'ler, BET yüzey alanı arttığında daha yüksek spesifik kapasitans elde edildi (Gryglewicz *et al.* 2005). Yüzölçümü 1000

m^2g^{-1} 'in üzerinde olan AC'ler için doğrusal bir ilişki bulunamadı. Çünkü AC'lerin yüksek gelişmiş yüzey alanı daha düşük bir mezopore fraksiyonu ile birlikte idi. Çift katmanlı kapasitans sadece yüzey alanına değil, aynı zamanda gözenek ebadı dağılımına da bağlıdır. EDLC'lerde aktif yüzey elektrot materyali için yüksek yüzey alanına sahip AC'lerin ve %20 ile %50 arasındaki mezoporum daha uygun olduğu bulundu. Büyük sülfat iyon büyüklüğü nedeniyle, daha büyük mikroporlar ve küçük mezoporlar (2-5 nm) bu asidik elektrolit ile en uygun olanlardır.



Şekil 2.7. AC ((o) 1 mol / L H_2SO_4 ; ($\blacktriangle$) 6 mol / L KOH) için BET yüzey alanının bir fonksiyonu olarak asidik ve alkalın elektrolitlerdeki spesifik kapasitans (Gryglewicz *et al.* 2005)

Spesifik yüzey alanı ve gözenek büyüklüğü dağılımının yanı sıra, yüzey işlevselliği EDLC'lerin performansını da etkiler. Teng *et al.* yüzey sulu asit içinde işlevselleştirildiğinde kapasitansın arttığını kanıtladı (Hsieh *et al.* 2002; Nian *et al.* 2002). Qu (2002), AC yapısının ve yüzey gruplarının bir süper kapasitörün performansı üzerindeki etkilerini inceledi. Kenar oryantasyonunun daha yüksek yüzdesinin, yüzey fonksiyonel gruplarının daha güçlü bağlanmasını desteklediği bulunmuştur. Bu yüzey fonksiyonel grupları, elektrotların ıslanabilirliğini etkiler ve süper kapasitörlerin kapasitansına katkıda bulunur (Qu and Deyang 2002).

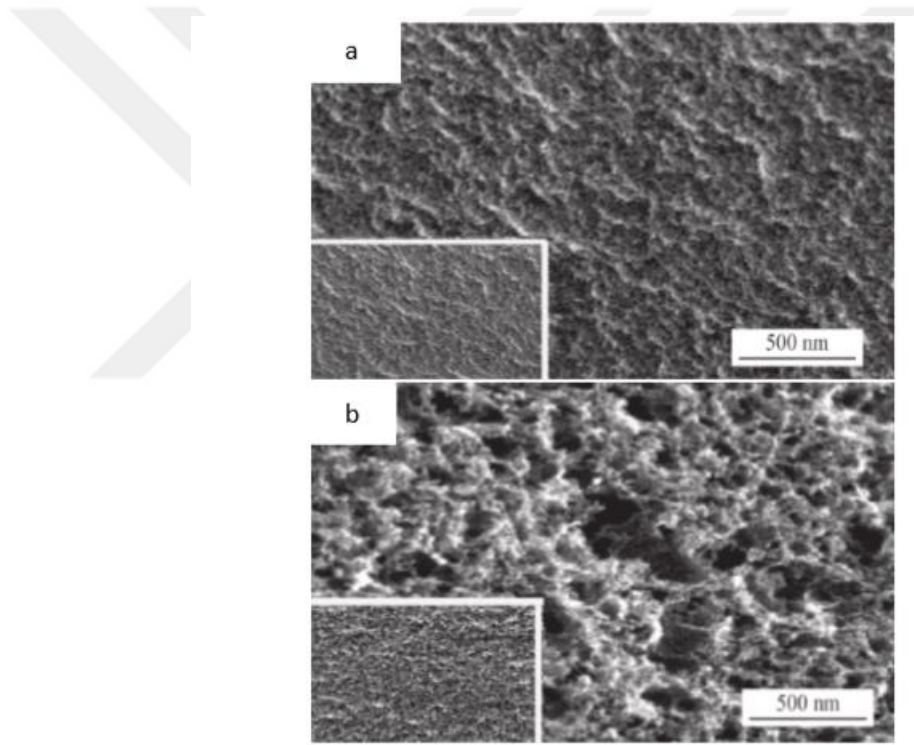
Genel olarak, süper kapasitörlerde iyi performans gösteren AC'ler aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır: (a) yüksek bir spesifik yüzey alanı, (b) elektrotun iç yüzeyine iyi

elektrolit erişimine izin vermek için iyi adapte edilmiş bir mikro-yapı, (c) düşük bir direnç ve (d) uygun bir yüzey işlevselliği (Gamby *et al.* 2001; Gryglewicz *et al.* 2005).

2.5.1.b. Karbon aerogelleri ve xerogel bazlı süper kapasitörler

Karbon aerogel, yüksek yüzey alanı ($400-1000 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$), ince gözenek büyüklüğü, yüksek gözeneklilik ve üstün elektriksel iletkenlik gibi çok yönlü özellikleri nedeniyle süper kapasitörler için umut verici bir malzeme olarak kabul edilir (Zhang and Ruirong 2016). Karbon aerogellerinin mükemmel özellikleri, üç boyutlu mesoporous karbon nanopartiküller ağı nedeniyledir. Genel olarak, karbon aerogeller, bir sol-jel işlemi ile resorsinol ve formaldehit (RF) bazlı organik aerogellerin pirolizi ile üretilir (Pekala *et al.* 1998). Aerogellerin, özellikle partikül büyüklüğünün ve gözenek dağılımının mikro-karışımı, reaksiyon koşullarının seçimi, aktivasyon prosedürü, piroliz sıcaklığı ve seçilen dopantların varlığı gibi farklı sentez parametreleri ile belirlenebilir (Pekala *et al.* 1998; Frackowiak *et al.* 2001; Yang *et al.* 2013). Mayer *et al.* (1993) bir sol-jel yolu ile RF reçinenin karbonizasyonu yoluyla bir karbon aerogeli geliştirmiştir. Süper kapasitörler için karbon aerogeli elektrot malzemesi olarak ilk kez kullanıyordu. Bu karbon aerogeri, birim yoğunluk başına yüksek yüzey alanları (BET analiziyle ölçüldüğü şekilde $100-700 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$), 0.3 ila 1.0 g cm^{-3} 'lük kütle yoğunluklarıyla göstermiştir. Tipik morfoloji, depolanan enerjinin hızla serbest bırakılmasını sağladı. Bu, yüksek güç yoğunluğu ile sonuçlandı. Bu karbon aerogelinin gözenekliliği ve yüzey alanı sol-jel işlemi ile kontrol edilebilir. Lin *et al.* (1997) ayrıca kontrollü gözenek yapısına sahip yüksek yüzey alanlı karbon xerogeller üretmek için karbon aerogel sol-jel sentez prosedürünü geliştirdiler. pH sentezinin yüzey alanı, gözenek büyüklüğü dağılımı, nanoyapı ve karbon kserojellerin gözenek hacmi üzerindeki etkisini incelediler ve daha düşük bir pH'ta hazırlanan karbon kserojellerin daha yüksek bir yüzey alanına ve gözenek hacmine ve daha büyük bir gözeneğe sahip olduğunu buldular. Bunun nedeni, asit katalizörlü yoğunlaşma reaksiyon hızının düşük pH'da arttırılabilesidir. Süperkritik kurutma basamağı olmadan değiştirilmiş bir RF yönteminden türetilen karbon aerogel, CO_2 akışı altında aktive edildi ve ayrıca (Fang *et al.* 2005). Karbon aerogelin spesifik yüzey alanının aktivasyondan sonra çarpıcı şekilde arttığı, dolayısıyla spesifik

kapasitansın önemli ölçüde arttığı bulundu. Kapasitörlerin iç direnci azaldı ve spesifik kapasitans arttı. Chang *et al.* (2014), CO₂ aktivasyon süresinin, yüzey ve karbon aerjel gözenekli yapısı üzerindeki etkisini de incelediler. Şekil 2.8'de gösterildiği gibi, aktivasyondan sonra üç boyutlu birbirine bağlı bir ağ yapısı muhafaza edildi ve karbon iskeletinin yüzeyi büyük ölçüde CO₂ ile kazındı. Çok miktarda mikropor ve mezopor, CO₂ aktivasyonu ile karbon aerjelleri içerisine girdi, bu da spesifik bir yüzey alanı artışı ile sonuçlandı. Daha uzun aktivasyon süresiyle daha yüksek spesifik yüzey alanı elde edilebilir. Bu nedenle, karşılık gelen spesifik kapasitans önemli ölçüde arttı.

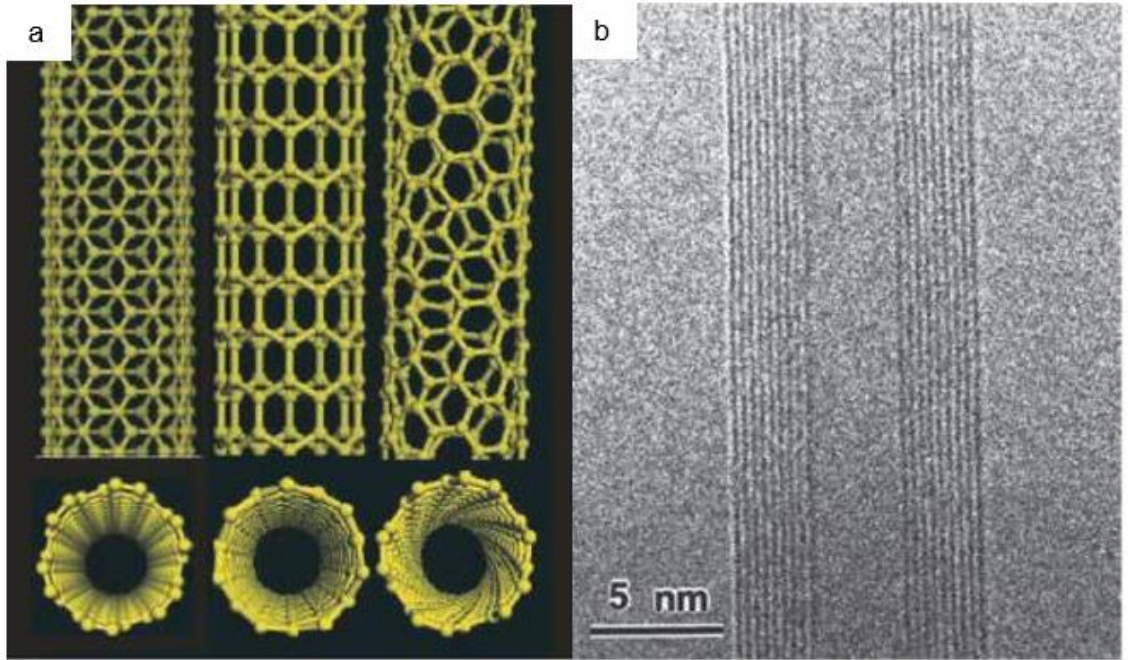


Şekil 2.8. Karbon aerjelinin (a) SEM (b) CO₂ aktivasyonu ile aktif karbon aerjeni (Chang *et al.* 2014)

Mikro gözenekli karbon xerjelleri, Zubizarreta and Leire (2008) ayrıca, başlangıç pH'sının kurutma yönteminin ve bir sentez işleminde metanolün karbon jeli dokusal özellikleri üzerindeki bir çözücü olarak kullanılmasının etkisini de incelemişlerdir. İlk pH=7 ve çok modlu mikrodalga kurutma yönteminin homojen mikro gözenekli karbon jelleri üretmek için kolay bir yol olduğu bulmuşlardır.

2.5.1.c. Karbon nanotüp bazlı süper kapasitörler

Karbon nanotüpler (CNT'ler), yüksek elektrik iletkenliği, büyük gözenek boyutu, kimyasal stabilite ve ayrıca makul bir spesifik yüzey alanı gibi benzersiz özelliklerinden dolayı bir EDLC elektrot malzemesi olarak kullanılmıştır. İki ana tip karbon nanotüp vardır: (1) sorunsuz bir şekilde silindirik bir tüpe (Şekil 2.9a) sarılmış tek bir grafit tabakadan oluşan tek cidarlı nanotüpler (Şekil 2.9a) ve bu tür nanotüplerden oluşan bir dizi içeren çok duvarlı nanotüpler (MWNT'ler), konsantrik olarak bir ağaç gövdesinin halkaları gibi iç içe geçmiş olan (Şekil 2.9b) (Baughman *et al.* 2002). SWNT'ler ve MWNT'ler genellikle karbon ark deşarjı, karbonun lazerle ablasyonu veya kimyasal buhar biriktirme yoluyla üretilir (Ding *et al.* 2001).

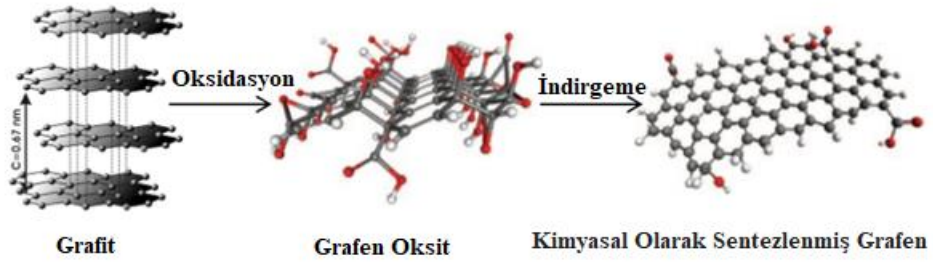


Şekil 2.9. (a) SWNT'lerin üç tipik yapısının şematik gösterimleri; (b) Eşmerkezli olarak yuvalanmış dokuz SWNT dizisi içeren bir MWNT'nin transmisyon elektron mikroskobu (TEM) görüntüsü (Baughman *et al.* 2002)

2.5.1.d. Grafen veya grafen oksit esaslı süper kapasitörler

Grafen, iki boyutlu ve atomik ölçekli altıgen bir kafes şeklinde bir karbon allotropudur. Fullerenler, CNT'ler ve grafit gibi tüm grafit karbonlarının temel yapı birimidir (Ban 2011).

Grafen 2004 yılında keşfedildiğinden beri, hızla büyüyen bir ilgi görmüştür. Eşsiz yapısı nedeniyle, grafen, yüksek yüzey alanı, yüksek elektrik iletkenliği, mükemmel esneklik ve mükemmel mekanik özellikler gibi dikkat çekici özelliklere sahiptir. Bu benzersiz özellikler, grafeni süper kapasitörlerdeki enerji depolaması için iyi bir malzeme yapar (Zhang *et al.* 2010; Choi and Hyun-Jung 2012).



Şekil 2.10. Kimyasal olarak sentezlenmiş grafenin şematik gösterimi (Tung and Vincent 2009).

Bunlar dışında süper kapasitörleri şu şekilde sınıflandırmaya devam edebiliriz:

2.5.2. Pseudo kapasitörler

EDLC'ler elektrostatik olarak yük depolarken, pseudo kapasitörler aktif maddelerin yüzeyindeki geri dönüşümlü redoks reaksiyonları tarafından yükü depolar. Metal oksitler ve iletken polimerler, pseudo kapasitörlerdeki yükleri depolamak için çoğunlukla elektrot malzemeleri olarak kullanılmıştır (Rudge *et al.* 1994; Jayalakshmi and Balasubramanian 2008). EDLC'lere kıyasla redoks-aktif maddelerde bu Faradaik

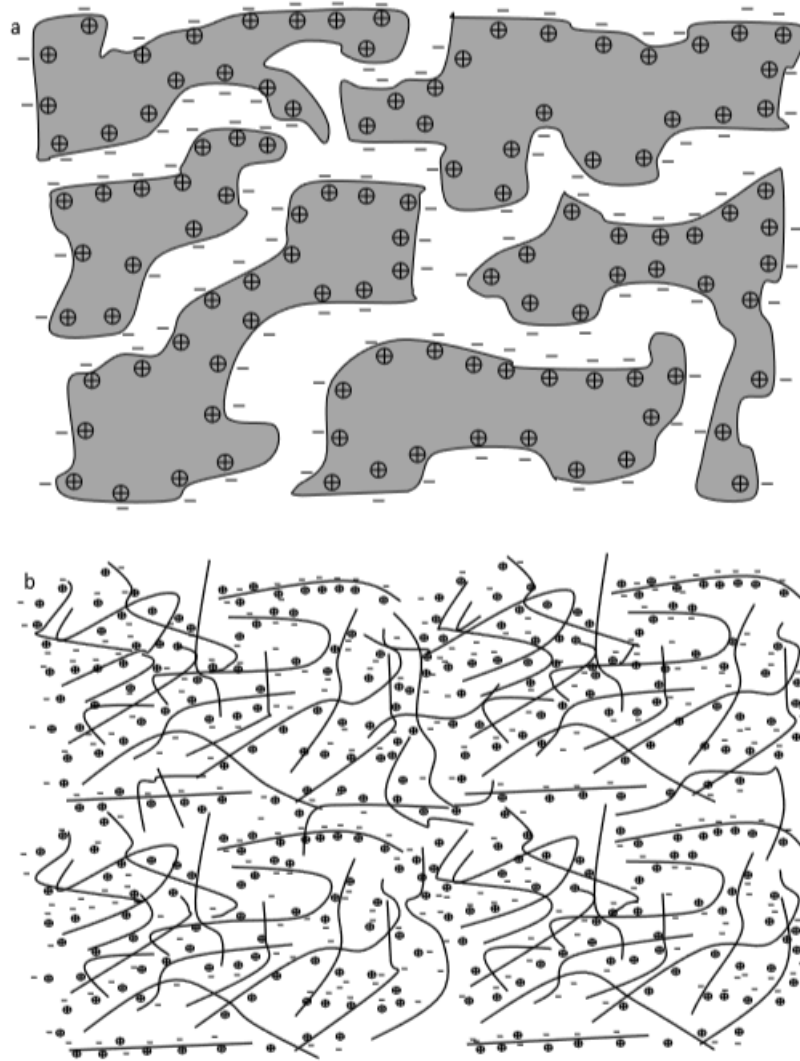
prosesler nedeniyle sahte kapasitörlerde daha yüksek bir spesifik kapasitans ve enerji yoğunluğu sağlanabilir.

2.5.2.a. Metal oksit bazlı süper kapasitörler

RuO_2 , TiO_2 , CuO ve MnO_2 gibi metal oksitler, yüksek iletkenliklerinden dolayı psokokapasitörler için elektrot malzemeleri olarak kullanılmıştır (Zheng and Jow 1995; Burke 2000; Kötz and Carlen 2000; Kim and Kim 2001). Bir elektrot malzemesi olarak, dikkate değer yüksek özgül kapasitans, iyi elektriksel iletkenlik ve yüksek termal stabilite nedeniyle rutenyum oksit (RuO_2) yaygın olarak çalışılmıştır.

2.5.2.b. İletken polimer bazlı süper kapasitörler

Diğer bir ortak elektrot malzemesi, karbon bazlı elektrot malzemelerine kıyasla nispeten yüksek bir kapasitans, yüksek iletkenlik ve nispeten düşük bir ESR'ye sahip iletken bir polimerdir; ayrıca maliyet, metal oksitlerden daha ucuzdur. İletken polimerlerin iletkenliği, polimer omurgası boyunca konjuge bir bağ sistemi ile sağlanır (Snook *et al.* 2011).



Şekil 2.11. (a) Çift katmanlı kapasitör (karbon) ve (b) Sahte kapasitör (iletken polimer) şarjının karşılaştırılması (Snook *et al.* 2011)

2.5.3. Hibrit süper kapasitörler

Çift katmanlı bir karbon materyali ve bir pseudo kapasitör materyali içeren hibrid elektrokimyasal kapasitörler, dikkat çekmektedir (Zhang *et al.* 2009). Hibrit süper kapasitörlerin kapasitansı, gözenekli karbon malzemeler tarafından depolanan çift katmanlı kapasitanstan ve metal oksit veya iletken polimer tarafından depolanan pseudo kapasitörlerden oluşur (Halper and Ellenbogen 2006). Hibrit süper kapasitörler,

EDLC'lerin avantajını ve pseudo kapasitörleri birleştirirken, dezavantajlarının çoğunun üstesinden gelir.

Hibrit süper kapasitörler elektrot yapılandırması ile üç farklı tipte sınıflandırılır: asimetrik hibritler, kompozit hibritler ve pil tipi hibritler. Asimetrik hibritler bir EDLC elektrotundan ve pseudo kapasitör elektrotundan oluşur (Arbizzani *et al.* 2001; Mastragostino *et al.* 2002; Laforgue *et al.* 2003). Örneğin 2001 yılında, Arbizzani ve iş arkadaşları, pozitif elektrot olarak p katkılı bir polimer ve negatif elektrot olarak AC kullanarak yeni bir hibrit süper kapasitör geliştirdiler. Bu hibrit süper kapasitör, enerji depolamak için hem faradaik hem de faradaik olmayan işlemlerden faydalanarak iyi spesifik güç ve belirgin olarak daha yüksek spesifik enerji göstermiştir. Asimetrik hibrit süper kapasitörler, karşılaştırılabilir yalancı kapasitörlerden daha iyi bir döngüsel kararlılığa sahiptir. Karşılaştırılabilir EDLC'lerden daha yüksek enerji ve güç yoğunlukları elde edebilirler.

Kompozit hibrit süper kapasitörler asimetrik hibritlerden farklıdır ve karbon malzemeleri metal oksitlerle bütünleştirmek için kompozit malzemeleri kullanmak veya elektrot malzemeleri olarak iletken polimer malzemeleri iletmek için kullanılır (Peng *et al.* 2008). Gözenekli karbon malzemeler, metal oksitler veya iletken polimer malzemeler ile elektrolit arasındaki teması arttırmak için yüksek bir yüzey alanı omurgası sağlayabilir. Metal oksitler veya iletken polimer malzemeler faradaik reaksiyonlarla kapasitansı daha da artırabilir.

Üçüncü tip, iki farklı elektrotu olan batarya tipi hibritlerdir; biri süper kapasitörlü bir elektrot, diğeri ise batarya elektrotudur (Pell and Conway 2004; Wang and Zheng 2004; Li *et al.* 2005). Şekil 2.1'de gösterildiği gibi, piller süper kapasitörlerden daha yüksek enerji yoğunluğu gösterirken, süper kapasitörlerin güç yoğunlukları pillerinkinden daha yüksektir. Pil tipi hibritler, normal süper kapasitörler ve piller arasındaki boşluğu doldurma konusunda büyük bir potansiyele sahiptirler, eğer yüksek pil yoğunluğu ve spesifik güç, kısa şarj süresi, kullanım ömrü ve süper kapasitörlerin tersine çevrilebilirliğini birleştirebilirler.

2.5.4. Farklı malzemelere dayalı süper kapasitörlerin performansının karşılaştırılması

Şekil 2.12 karbon ve pseudo kapasitör malzemeleri için kapasitif performansı göstermektedir (Naoi and Simon 2008). Metal oksitlerin veya iletken polimerlerin karbon malzemelerle karşılaştırıldığında daha yüksek spesifik kapasitanslar gösterdiği bulunmuştur. Metal oksitler ya da iletken polimerler karbon malzemelerin elektrostatik enerji depolama işlemi oldukça farklıdır yüksek tersinir bir yüzey redoks reaksiyonlarını kullanarak elektrokimyasal şarj saklamak için, bu hızlı ve geri dönüşlü yüzey işlemleri büyük ölçüde yük depolama performansını artırmıştır. Bununla birlikte, pseudo kapasitörler genellikle şarj / deşarj sürecinde istenmeyen redoks reaksiyonları nedeniyle döngü sırasında kararlılıktan yoksundur. Örneğin, sol-gel yöntemleriyle hazırlanan şekilsiz sulu RuO_2 , 720 F g^{-1} lik yüksek bir spesifik kapasitans sergilemiştir (Zheng and Cygan 1995). Sulu yüzey katmanları elektronların ve protonların kolay taşınmasını sağladığı için yüksek kapasitans elde edilmiştir. Şarj-deşarj döngüsü işlemi sırasında elektrolitte proton tükenmesi ve aşırı doygunluğa bağlı olarak kapasitansın daha yüksek oranda düştüğü bulunmuştur (McKeown *et al.* 1999). Hız performansını artırmak için birçok çalışma, sulu RuO_2 parçacıklarını AC'ler ve karbon siyahı gibi karbon malzemelerle birleştirmeye çalışmıştır (Kim and Popov 2002; Park *et al.* 2003; Hu *et al.* 2004). Bu gibi sulu RuO_2 kompozitlerinin hız özelliği kesinlikle gelişmiştir. Bununla birlikte, RuO_2 'nin yüksek maliyeti hala uygulamasını sınırlamaktadır.

2.7. Tipik Uygulamalar

Süper kapasitörler, pillerden daha yüksek güç sağlayabilir ve geleneksel kondansatörlerden daha fazla enerji depolayabilir. Hızlı şarj / deşarj oranı ve uzun çevrim ömrü gibi diğer özelliklerin yanı sıra, aşağıdaki tipik uygulamalar için süper kapasitörler kullanılabilir.

2.7.1. Tüketici elektroniği ürünleri

2.7.1.a. Yedek güç kaynakları

Tüketici süper kapasitörlerinin çoğu hafıza kartları, mikrobilgisayarlar, saatler ve sistem kartları için yedek kaynak olarak kullanılır (Kötz and Carlen 2000; Schneuwly and Gallay 2006). Bu uygulamalarda, birincil güç kaynağı normal olarak yükü besleyecektir. Süper kapasitörler, primer güç kaynağının bağlantısının kesilmesi veya kapatılması, diğer ağır yüklerin devreye girmesinden kaynaklanan bir sistem voltaj düşmesi veya şok veya titreşimden kaynaklanan temas sorunları nedeniyle yük için güç sağlayabilir. Örneğin, süper kapasitörler TV kanalı ayarı, saat ve kayıt süresi için yedek güç kaynağı olarak görev yapmaktadır. Araç ses sisteminde ve taksimetrede, araç aküsünün bağlantısı kesildiğinde radyo istasyonu hafızası veya taksi ücreti programlarının yedeği olarak süper kapasitörler kullanılmıştır.

2.7.1.b. Ana güç kaynakları

Süper kapasitörler, kısa süreli (ms~s) bir veya birkaç büyük akım darbesi verir. Bazı tipik uygulamalar için ana güç kaynakları olarak kullanılabilirler. Örneğin, araba oyuncaklarında, “şarj edilebilir motorlarda” bir aküden veya elektrikle çalışan şarj cihazından şarj edilebilen bir süper kapasitör vardır (Kötz and Carlen 2000). Bu süper kapasitör hızlı bir şekilde şarj edilebilir ve ardından oyuncağın hızlanması için güç sağlayabilir. Bir ana güç kaynağı olarak bir süper kapasitör kullanıldığında, düşük güç derecesine sahip bir güç kaynağı ile şarj edilebilir.

2.7.1.c. Alternatif güç kaynakları

Farklı koşullara bağlı olarak, aşağıdaki uygulamalarda alternatif güç kaynakları olarak süper kapasitörler de kullanılmıştır. Günümüzde elektrik yükü güneş pilleri tarafından beslenirken, bu arada süper kapasitör güneş pili tarafından da yüklenir. Gece boyunca güç süper kapasitör tarafından sağlanır. Güneş saati gibi, güneş pili tarafından şarj edilen süper kapasitör saatin birkaç gün çalışmasını sağlayabilir (Kötz and Carlen 2000). Bazı yol işaretleme fenerleri ve trafik uyarı sinyalleri, uzun ömürlü ve bakım gerektirmeyen güvenilir bir sistem olan solar hücre ve süper kapasitör sistemi ile de desteklenmektedir.

2.7.2. Araç uygulamaları

Elektrikli taşıtlarda ve hibrit elektrikli taşıtlarda süper kapasitörler, yüksek güç kapasitesine sahip kısa süreli bir enerji depolama aygıtı olarak görev yapabilir ve rejeneratif frenlemeden elde edilen enerjiyi depolar. Bu durumda süper kapasitörlerin kullanılması, bataryalar veya içten yanmalı motorlar gibi birincil güç kaynağının boyutunu azaltabilir (Kötz and Carlen 2000). Otobüsler, kamyonet ve vagonlar gibi kara tabanlı araçlar için bir akü ve bir süper kapasitör kombinasyonu, motor çalıştırma, elektrikli hidrolik direksiyon, katalizörlerin ön ısıtılması, aktüatörler ve dağıtılmış güç sistemi için güvenilir bir enerji tedarik sistemi sağlayabilir. Süper kapasitörler ayrıca, hastanelerdeki ve fabrikalardaki taşıyıcılar, fuarlarda ve tekerlekli sandalyelerde çalışan kişiler gibi ulaşım araçlarında da kullanılabilir.

2.7.3. Endüstriyel süreç

Kimyasal işlem, tekstil endüstrisi işlemi ve farmasötik işlem gibi bazı endüstriyel işlemler, şebeke gerilimindeki kesintilere ve rahatsızlıklara karşı çok hassastır. Güç kaynağının kesilmesi gerçekleştiğinde, pahalı üretim kaybına neden olur. Süper kapasitörler, bu uygulamalar için daha iyi bir enerji ve güvenilir sistem oranı sağlayabilir

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deneyisel Yöntem

Çalışma, süper kapasitör endüstrisi için aktif karbon kaynağı olarak insan saçı kullanımını amaçlamaktadır. Aktif karbon elde etmek için yüksek performanslı elektrot olarak ucuz ve kolay temin edilebilir insan saçı kullanılmıştır. Genellikle erkek saçları boyasız ve işlem görmemiş olduğundan deneylerimizde tercih edilmiştir. Kullandığımız saçlar erkek kuaförlerinden temin edilmiştir. Yaşları 0-18 ve 18-40 yaşları arasında iki gruba ayrılmıştır. Saçlar, izopropanol ile yıkanmış ve 80°C'de kurutulmuştur. Temizlenmiş saçlar ~5 mm uzunluğunda kesilmiştir. Daha sonra argon atmosferi altında 300°C'de bir buçuk saat boyunca karbonize edilmiştir. Kömürleşmiş malzemeler daha sonra KOH ile karıştırılmış ve argon atmosferi altında 800°C'de iki saat süreyle karbonize edilmiştir. Elde edilen koyu renkli malzeme 1M HCl çözeltisi ile karıştırılmıştır ve sonra saf suyla (yıkama suyu pH'sı 7 oluncaya kadar) yıkanmıştır. Kalıntı toplanmış ve 80°C'de kurutulmuştur. Daha sonra insan saçı kaynaklı aktif karbon üretilmiştir. Karakterizasyon için Azot Adsorpsiyon / Desorpsiyon İzotermi (BET), Termal Gravimetrik Analiz (TG), X Işını Kırınımı (XRD) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Fourier Transform Infrared Spektroskopisi (FTIR), Raman Spektroskopisi ve Elemental Analiz yöntemleri kullanılmıştır. Malzemelerin kapasitansları, Döngüsel Voltammetri (CV) kullanılarak belirlenmiştir.

3.1.1. Kullanılan kimyasallar

Çizelge 3.1. Kullanılan Kimyasallar ve Özellikleri

Kimyasal Adı	Kimyasal Formülü	Molekül Ağırlığı (g/mol)	Markası
2-Propanol	C_3H_8O	60.1	Sigma Aldrich 2-propanol
Hidroklorik Asit	HCl	36,46	EMSURE® ACS, ISO, Reag. PhEur Hydrochloric Acid Fuming 37%
Potasyum Hidroksit	KOH	56,11	LACHEMA a.s. Potassium Hyrdoxide G.R.
Argon	Ar	39,95	Koyuncu Ticaret A.Ş. Argon %99,999



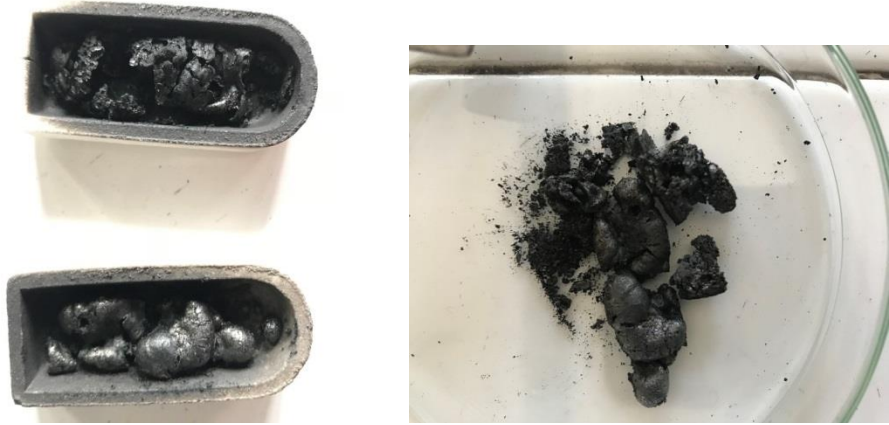
Şekil 3.1. Deney düzeneği



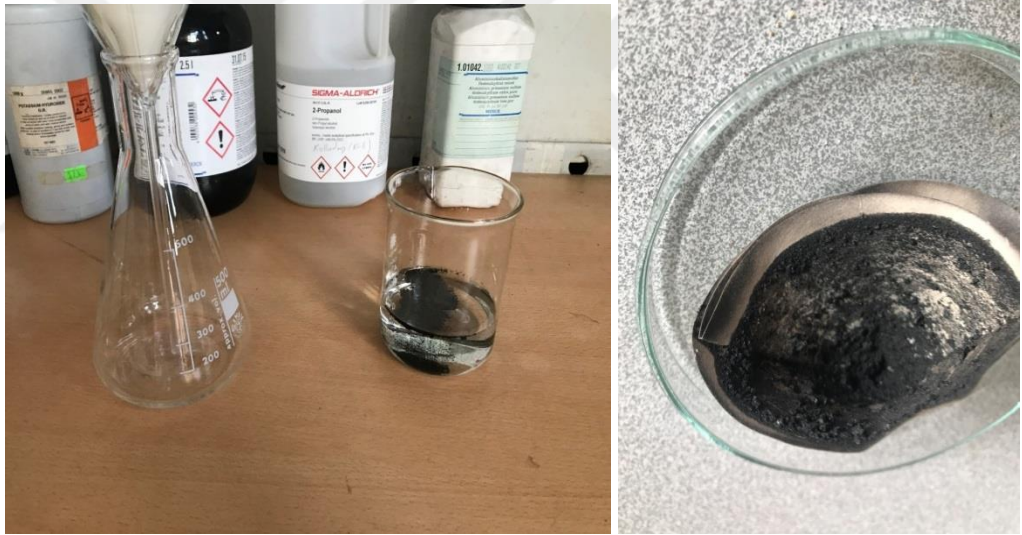
Şekil 3.2. 2-propanol ile yıkanan saçlar



Şekil 3.3. 80°C'de etüvde kurutulan yıkanmış saçlar



Şekil 3.4. Argon atmosferi altında 300°C'de bir buçuk saat boyunca piroliz edilen insan saçı



Şekil 3.5. Argon atmosferi altında 800°C'de iki saat süreyle karbonize edilen insan saçı



Şekil 3.6. İnsan saçı kaynaklı aktif karbon

3.2. Yapılan Analizler

3.2.1 FTIR analizleri

Kızıl ötesi adsorbsiyon spektroskopisi bir tür titreşim spektroskopisidir. IR ışınları molekülün titreşim hareketleri tarafından soğrulmaktadır. Her dalga boyunu ayrı ayrı tarama gerekmeksizin hızlı ve yüksek çözünürlükte spektrumlar elde edilir. Az miktarda örnekte bile kısa sürede sonuç vermektedir. Analizler Perkin Elmer marka cihaz kullanılarak yapılmıştır.

3.2.2. BET analizleri

BET analizleriyle BET yüzey alanı, mikro gözenek boyut dağılımı, mezo gözenek boyut dağılımı, toplam gözenek hacmi, ortalama gözenek boyutu gibi parametreleri hesaplayabilmektedir. BET analizleri, Quantachrome Carporotion Autosob-6 cihazı ile yapılmıştır.

3.2.3. SEM görüntüleri

Farklı yaş gruplarına ait aktif karbon malzemelerin SEM analizleri ZEISS SİGMA 300 cihazı ile yapılmıştır.

3.2.4. XRD çalışmaları

Hazırlanan aktif karbon malzemelerinin yapı analizleri için Rigaku Miniflex X-ray diffractometer Cu-K(alfa) kullanılmıştır.

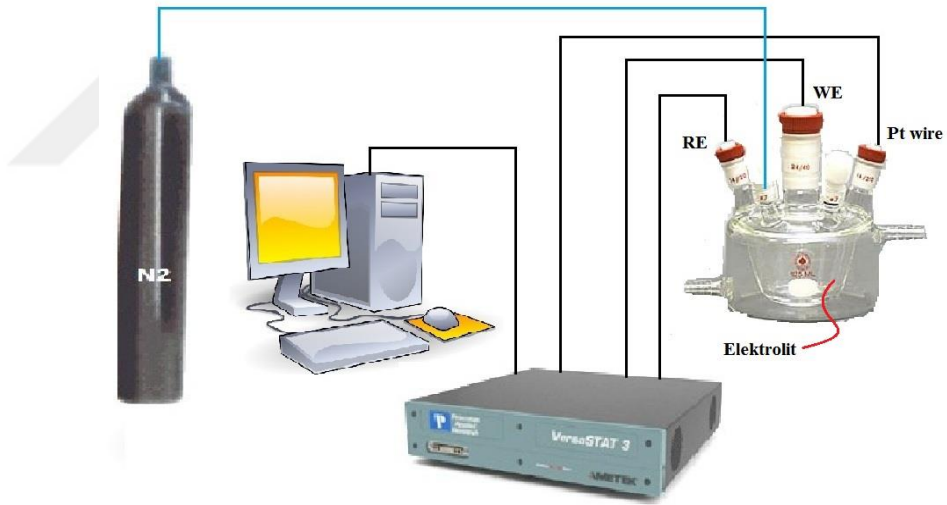
3.2.5. TGA analizleri

Termal analiz, hazırlanan aktif karbon malzemelerin termal davranışlarının incelenmesi amacıyla TG (Termal Gravimetri) yöntemini kullanılarak analiz edilmiştir. Analizlerde Netzsch marka STA 409 PC Luxx marka cihaz kullanılmıştır. Deneyler oda sıcaklığından 900°C'ye kadar olan sıcaklık aralığında da, 10°C/dak ısıtma hızında, 60 mL/dak akış hızında hava ortamında, alumina pan kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen malzemelerin ağırlık kayıpları TG analizlerinden, camsı geçiş sıcaklıkları ise DSC analizlerinden belirlenmiştir.

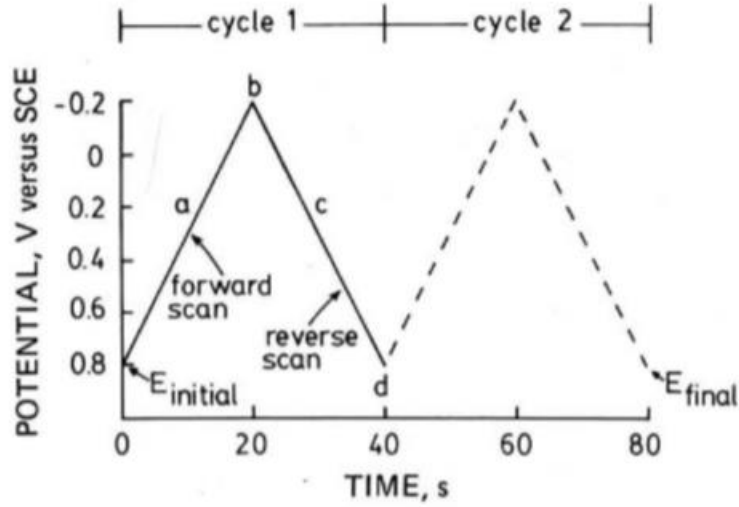
3.2.6. CV analizleri

Döngüsel voltammetri (CV), belki de elektroaktif türlerin incelenmesi için en çok yönlü elektro-analitik tekniktir. Ölçüm kolaylığı ile birlikte çok yönlülüğü, elektrokimya, inorganik kimya, organik kimya ve biyokimya alanlarında kapsamlı olarak CV kullanılır. Döngüsel voltammetri, genellikle bir bileşiğin, biyolojik bir malzemenin veya bir elektrot yüzeyinin elektrokimyasal incelemesinde yapılan ilk deneydir. CV'nin etkinliği, redoks davranışını geniş bir potansiyel aralığında hızlıca gözlemleme yeteneğinden kaynaklanmaktadır. Elde edilen voltammogram, enerji taramasının bir fonksiyonu olarak bilgi ilettiği için geleneksel bir spektruma benzer. CV,

karıştırılmamış bir çözelti içine batırılmış bir elektrot potansiyelinin çevrimi ve elde edilen akımı ölçmekten oluşur. Bu çalışma elektrodunun potansiyeli, doymuş bir kalomel elektrotu (SCE) veya bir gümüş/gümüş klorür elektrotu (Ag/AgCl) gibi bir referans elektrota karşı kontrol edilir. Bu iki elektrot boyunca uygulanan kontrol potansiyeli, bir uyarma sinyali olarak kabul edilebilir. CV için uyarma sinyali, Şekil 3.8'de gösterildiği gibi üçgen dalga formuna sahip doğrusal bir potansiyel taramadır. Şekil 3.8'deki uyarma sinyali ilk önce SCE'ye göre +0.80 ile -0.20 V arasında negatif tarama yapabilme potansiyeline sahiptir, bu noktada tarama yönü tersine çevrilir ve +0.80 V'luk orijinal potansiyeline geri pozitif bir tarama yapılır. Eğim tarafından yansıtılan tarama hızı, 50 mV/s'dir. İkinci döngü kesikli çizgi ile gösterilir. Tek veya çoklu döngü kullanılabilir.



Şekil 3.7. Çevrimsel voltametri üç elektrot konfigürasyonu



Şekil 3.8. Döngüsel voltammetri için tipik uyarma sinyali — SCE'ye karşı 0,8 ve -0,2 V'de anahtarlama potansiyeli olan üçgen bir potansiyel dalga formu

Potansiyel tarama sırasında çalışma elektrotundaki akımı ölçerek bir devirli (cyclic) voltammogram elde edilir. Voltammogram potansiyeli (yatay eksen) karşı akım (dikey eksen) bir göstergesidir. Potansiyel zamanla doğrusal olarak değiştiğinden, yatay eksen bir zaman eksenini olarak da düşünülebilir. Bu, tekniğin temellerini anlamada yardımcı olur.

CV, redoks durumlarını incelemek için tüm kimya alanlarında giderek daha popüler hale gelmiştir. Yöntem, geniş bir yelpazedeki aralığın hızla indirgenebilir veya oksitlenebilir türlerin taranmasını sağlar. Değişken zaman ölçeği ve iyi hassasiyeti ile birlikte bu yetenek, bunu şimdiye kadar geliştirilen en çok yönlü elektro-analitik teknik haline getirmektedir. Kantitatif ölçümler (oranlar veya konsantrasyonlar) en iyi şekilde başka yollarla elde edilir (örneğin, “adım” veya “darbe” teknikleri). CV'nin belki de en faydalı yönü, homojen kimyasal reaksiyonlarla birleştirilmiş elektrot reaksiyonlarının kalitatif tanısına uygulanmasıdır.

3.2.7. Raman analizleri

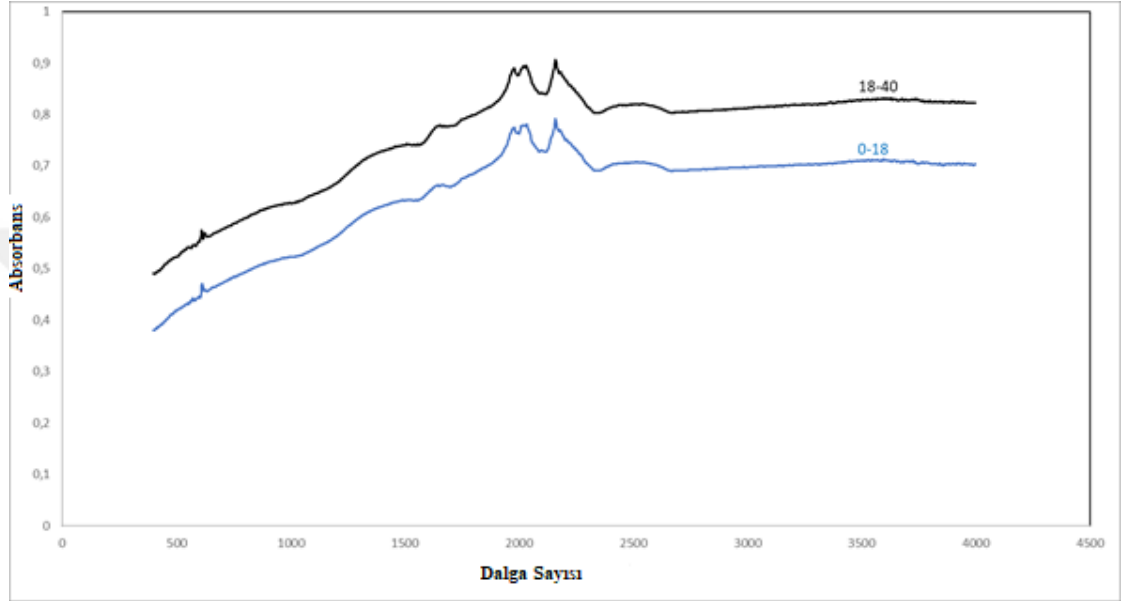
Raman Spektroskopisi akademik alanda geniş uygulama alanına sahip olan titreşim spektroskopisidir. Bu yöntem ile atom veya moleküllerden ışık kaynağından gönderilen fotonların esnek olmayan saçılmaları incelenerek maddeyi oluşturan atom veya moleküllerin yapmış olduğu bağlar hakkında bilgi edinilebilir. Temelde Raman saçılması gönderilen fotonla, saçılan foton arasındaki enerji farkının spektroskopik incelenmesiyle gerçekleştirilir. Bu tez çalışmasında WITec alpha300 Series marka cihaz kullanılmıştır.

3.2.8. Elemental analiz

Elemental analiz cihazları yakma tekniği üzerine çalışır. Kendilerine ağırlığı bilinen bir örnek verildiğinde bunu yakar ve açığa çıkan gazları karbon, azot ve hidrojen, bazen de kükürt ve oksijen içeren kolonlarda tutar ve ilk verilen maddenin kütlesi ile kolonlarda tutulan elementlerin kütleleri arasındaki oranı yüzde olarak verir. Elemental analiz cihazı ile homojen ve az miktarda (~ 2 mg) örnek kullanılarak karbon, hidrojen, azot ve kükürt elementleri eş zamanlı analiz edilir. Homojen katı ve sıvılardan en az 10 mg örnek gereklidir. Uygulama alanları; ilaç ve kimyasal madde endüstrileri, plastikler, reçineler, lastikler, organik bileşik ve homojen matrislerdir. Analizlerde LECO CHNS-932 marka cihaz kullanılmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. FTIR Sonuçları



Şekil 4.1. Sentezlenmiş aktif karbon malzemelerin Fourier Transform Infrared Spektroskopisi (FTIR) sonuçları

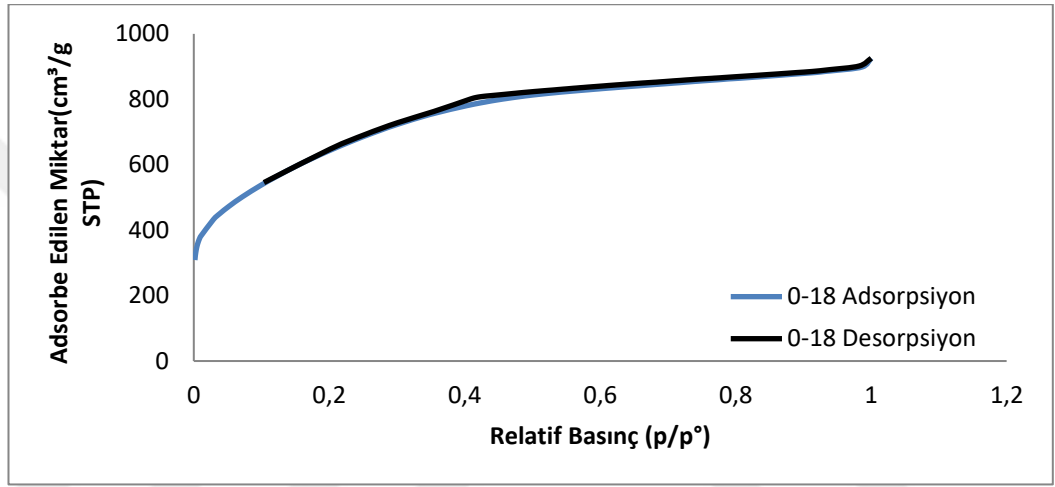
Fonksiyonel gruplar FTIR kullanılarak belirlenmiştir. Analiz 400 - 4000 cm^{-1} dalga boyu aralığında yapılmıştır. FTIR spekturumları ile yüzey fonksiyonel grupları belirlenmiştir. 1540,84 ve 1984,53 noktalarında C=C gerilmesi, 1850,97 ve 2095,89 noktalarında C≡C ve C≡N üçlü bağ gerilme absorsiyonlarına ait oldukları düşünülmektedir.

4.2. BET Sonuçları

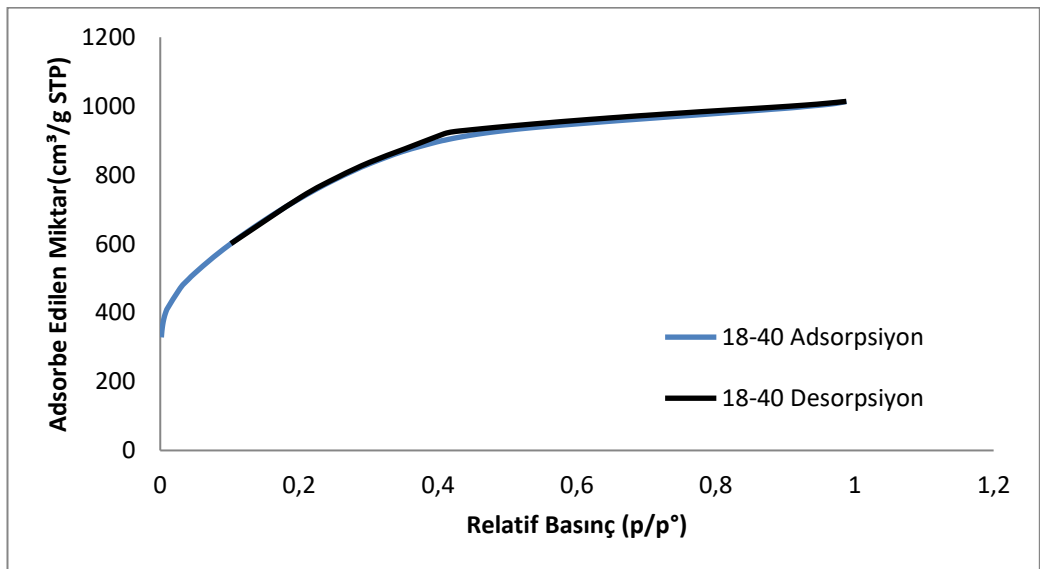
İnsan saçından elde edilen aktif karbonların yüzey alanları Çizelge 4.1'de verilmiştir. Bu tablodan görüldüğü gibi, 18-40 yaş grubunun yüzey alanının 0-18 yaş grubundan elde edilen aktif karbondan daha yüksek bir yüzey alanına sahip olduğu bulunmuştur.

Çizelge 4.1. Farklı yaş aralığındaki insan saçından elde edilmiş aktif karbonların BET yüzey alanları

Madde	Yüzey Alanı (m ² /g)
0-18 Yaş Aralığı	2302,82
18-40 Yaş Aralığı	2673,90

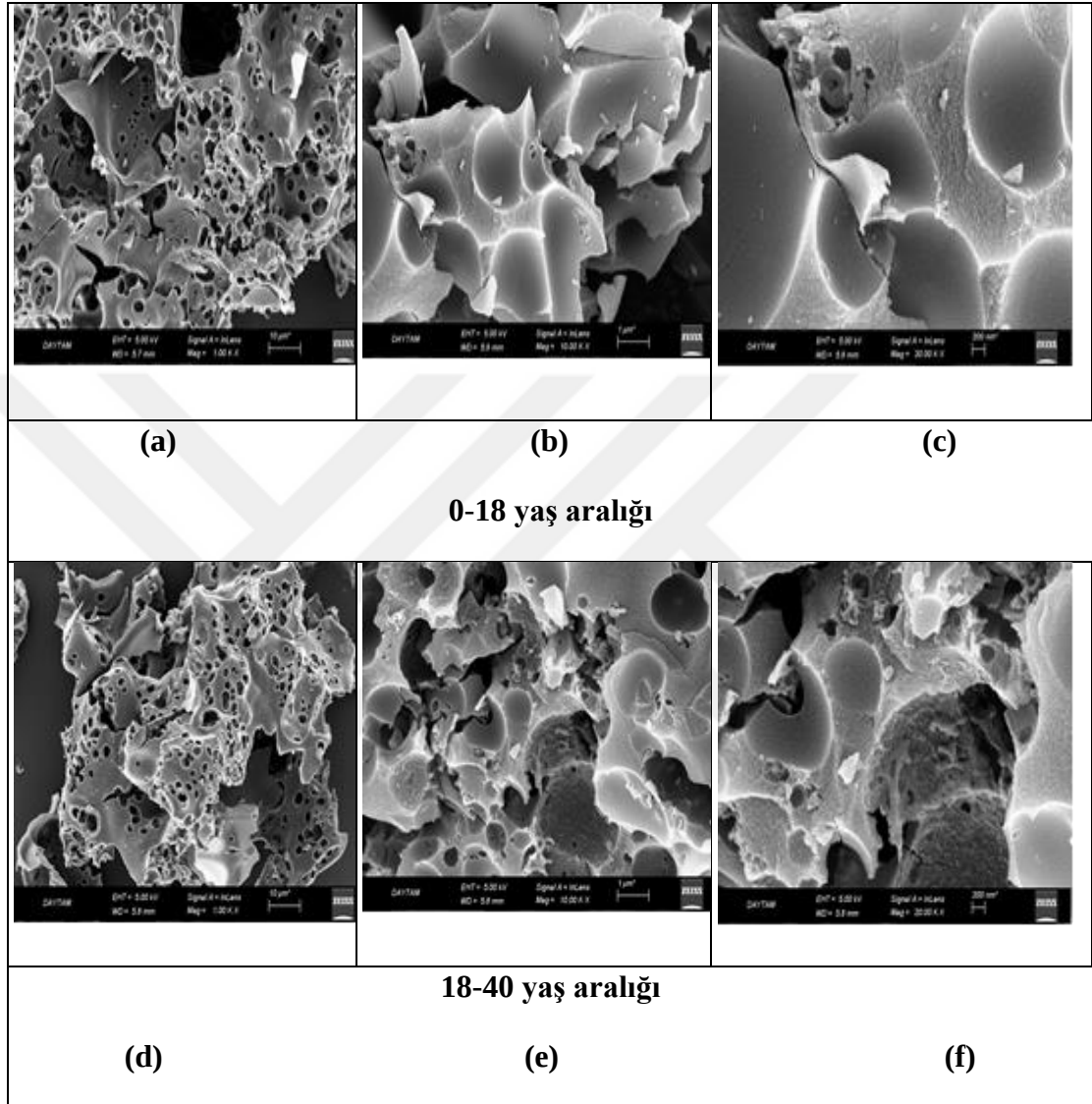


Şekil 4.2. Sentezlenmiş 0-18 yaş grubu aktif karbon malzemelerin adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi



Şekil 4.3. Sentezlenmiş 18-40 yaş grubu aktif karbon malzemelerin adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi

4.3. SEM Sonuçları



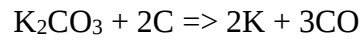
Şekil 4.4. SEM yüzey alanları

Sentezlenmiş aktif karbonlar için SEM görüntüleri Şekil 4.4'te verilmiştir. Her iki aktif karbon malzemesi için yoğun gözenekli yapılar elde edilmiştir. Bu malzemelerin yüksek yüzey alanına katkıda bulunan 18-40 yaş grubu saçından sentezlenen aktif karbon için çok daha fazla gözenekli yapıya sahip olduğu görülmektedir, BET analiz sonuçlarıyla da doğrulanmıştır. Bu görünür malzemeler aktif karbon malzemelerin sentezi sırasında KOH'in eklenmesine bağlanabilir. KOH'in varlığı, kimyasal aktivasyon sırasında uçucu

elementleri ortadan kaldırarak gözenek oluşumunu önemli yönde etkilemektedir (Ahmed, M. J. *et al.* 2017). Bu aşağıda verilen tepkime ile açıklanabilir;

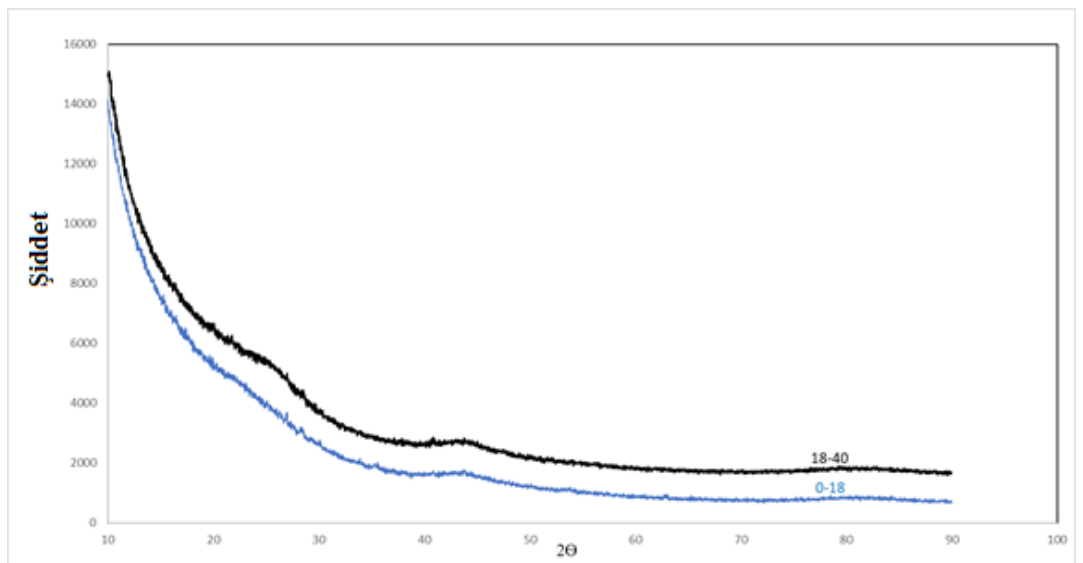


K_2CO_3 ürünü K_2O_3 inert atmosferde



Yukarıdaki reaksiyona göre K_2CO_3 C ile reaksiyona girer. Fazladan gözenekler oluşturmak için K_2O ve CO_2 ayrışır. SEM görüntüleri gaz halindeki ürünlerin yayılmasından dolayı oluşan aktif karbon malzeme yüzeyinde boşlukların varlığını göstermiştir (Deng *et al.* 2010). Bu boşluklar adsorbant moleküllerinin iç yüzeylerini erişim noktalarıdır (Ahmed *et al.* 2017).

4.4. XRD Sonuçları

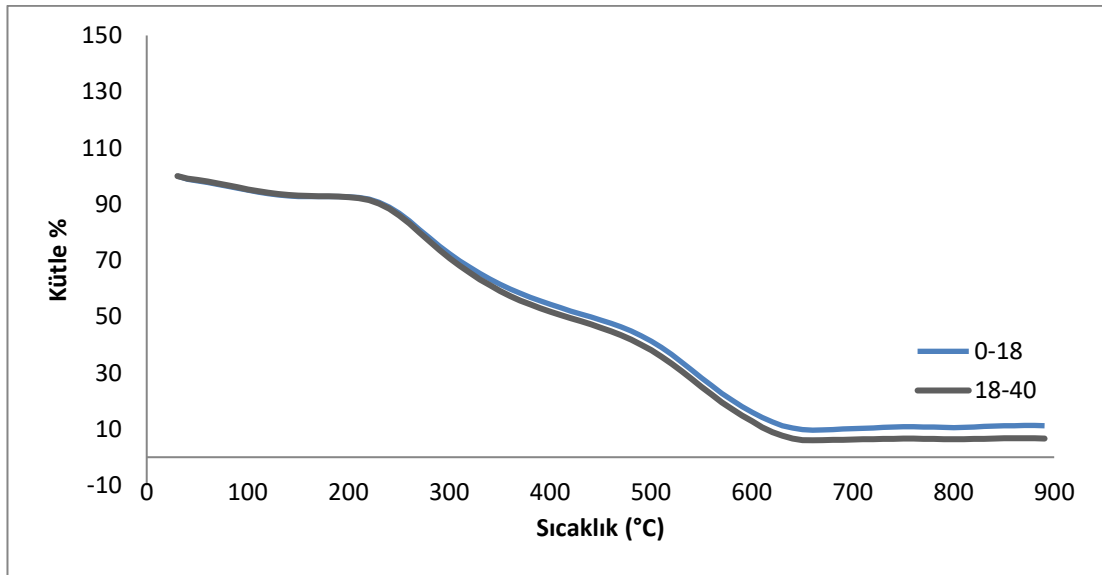


Şekil 4.5. Sentezlenmiş aktif karbon malzemelerin X-Işını Kırınımı (XRD) analizi

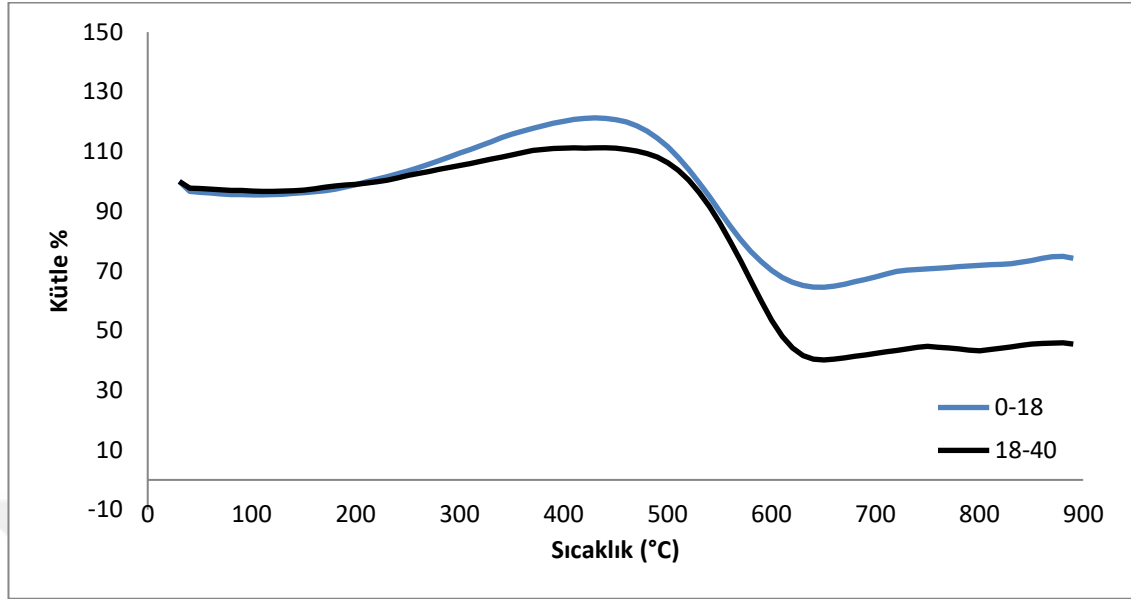
Şekil 4.5'te farklı yaş grupları için elde edilen aktif karbon malzemeler için XRD grafikleri verilmiştir. XRD grafiklerinden görüleceği gibi, sentezlenen malzemeler için amorf yapılar elde edilmiştir. Ek olarak yaklaşık 23° 'de bulunan grafit yoğunlaşması, 18-40 yaş grubu için açıkça görülmektedir. Benzer şekilde 0-18 ve 18-40 yaş grupları için 43.8° 'de bulunan bir pikte açıkça görülmektedir. 23° ve 43.8° 'de bulunan pikler, altıgen grafitin (002 ve 101) düzlemlerine atfedilebilir. Düşük açılı saçılma pikleri yoğunluğunun artması malzemede bulunan yüksek mikro por yoğunluğunu doğrulamaktadır (Qian *et al.* 2014)

4.5. TG Sonuçları

İnert atmosferde termogravimetrik analiz (TG) (Netzsch STA 409 PC Luxx), 90 mL min^{-1} akış hızında ve $10^\circ\text{C min}^{-1}$ ısıtma hızında yapılmıştır. Bu analiz oda sıcaklığından 900°C 'ye kadar yapılmıştır. TG grafiklerinde DTG grafikleri elde edilmiştir. İki farklı yaş grubundan elde edilen aktif karbonların ısı davranışı, Şekil 4.6'da verilenle yaklaşık olarak aynıdır. Termogramlarda 0-18 ve 18-40 yaş grupları için ağırlık kaybı sırasıyla %88,74 ve %93,36 olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 4.6. Ham malzemelerin Termal Gravimetrik analizi (TG)

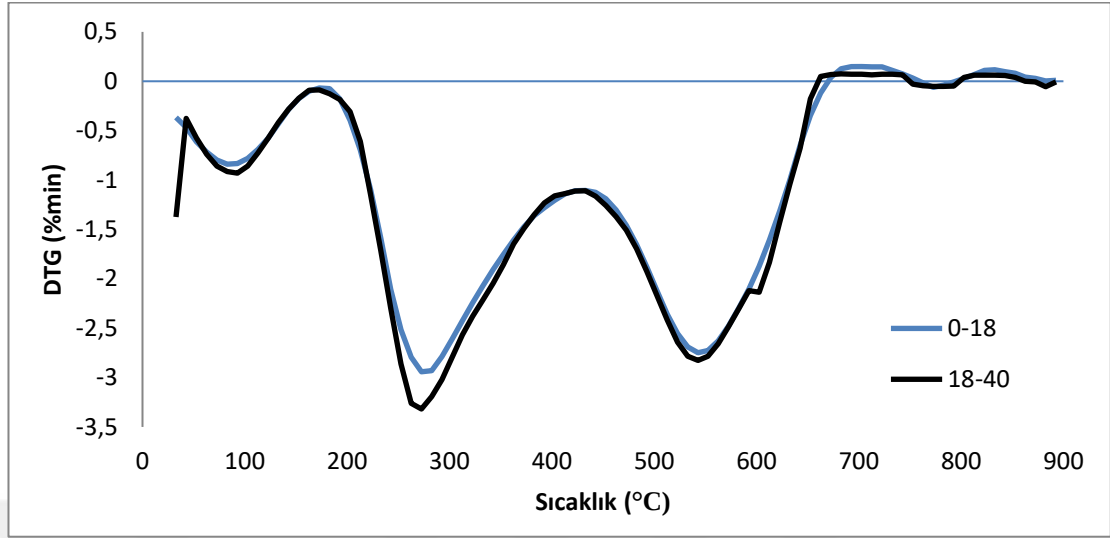


Şekil 4.7. Sentezlenmiş aktif karbon malzemelerin Termal Gravimetrik Analizi (TG)

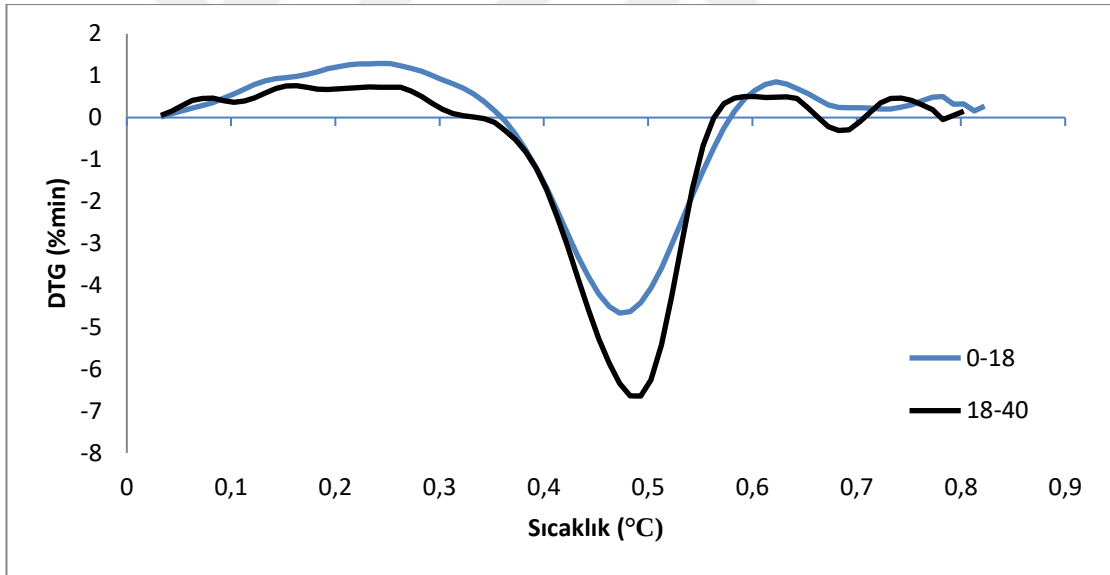
Ham malzemelerin TG Şekil 4.6. ve DSC Şekil 4.10'deki 0-18 yaş 18-40 yaş grubundan alınan saçların üç basamakta bozunduğu görülmektedir. Bozunma yaklaşık 650°C'de bitmektedir. Bu basamakların başlangıç ve bitiş sıcaklıkları Şekil 4.8'de verilen DTG'lerinde çok net bir şekilde görülmektedir. Aynı şekilde sentezlenmiş aktif karbon malzemelerin de tek basamakta bozunduğunu Şekil 4.7 ve Şekil 4.9'da görülmektedir.

Çizelge 4.2. Ham ve aktif karbon malzemelerin TG Kütle Kayıp Oran Çizelgesi

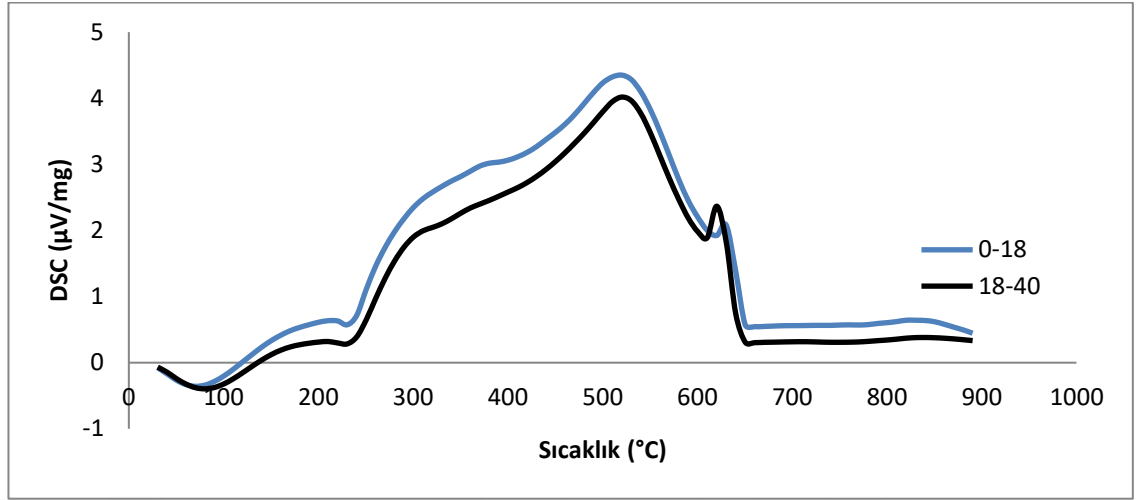
Örnekler	Kütle/mg	Kütle Kaybı Olayları							
		1.basamak		2.basamak		3.basamak		TOPLAM	
		T/°C	Kütle kaybı%	T/°C	Kütle kaybı%	T/°C	Kütle kaybı%	T/°C	Kütle kaybı%
018H	5,098	170	-6,48	430	-41,83	672	-41,12	890,45	-88,74
1840H	10,238	170	-6,67	440	-44,29	678	-42,52	890,45	-93,36
018AC	0,842	450	20,80	650	-56,24	890,45	10,50	890,45	-24,94
1840AC	1,418	478	9,55	650	-69,35	890,45	5,78	890,45	-54,02



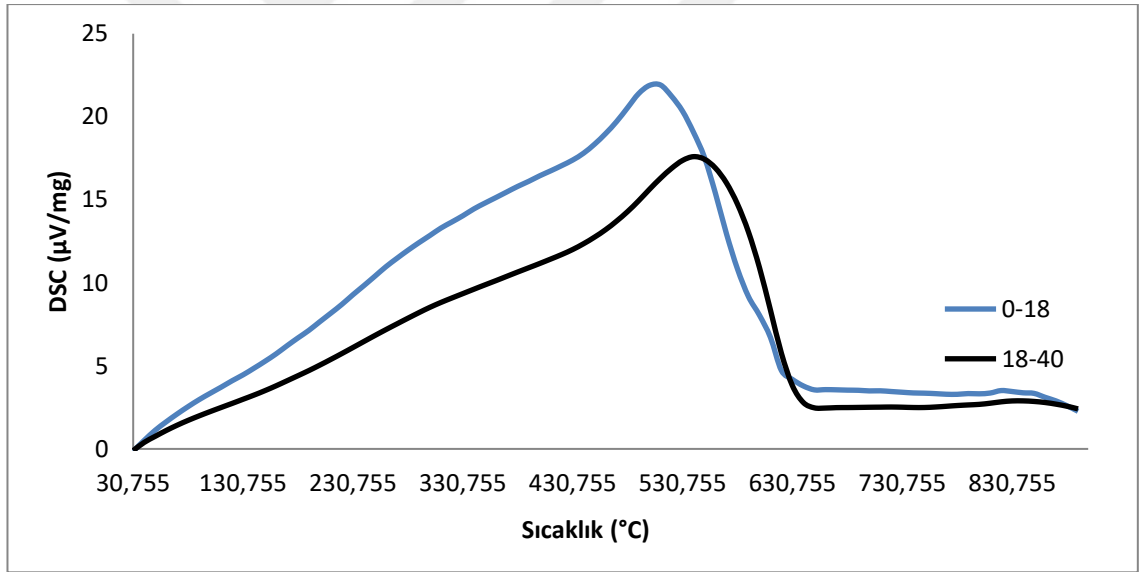
Şekil 4.8. Ham malzemelerin Diferansiyel Termal Gravimetrik Analizi (DTG)



Şekil 4.9. Sentezlenmiş aktif karbon malzemelerin Diferansiyel Termal Gravimetrik Analizi (DTG)



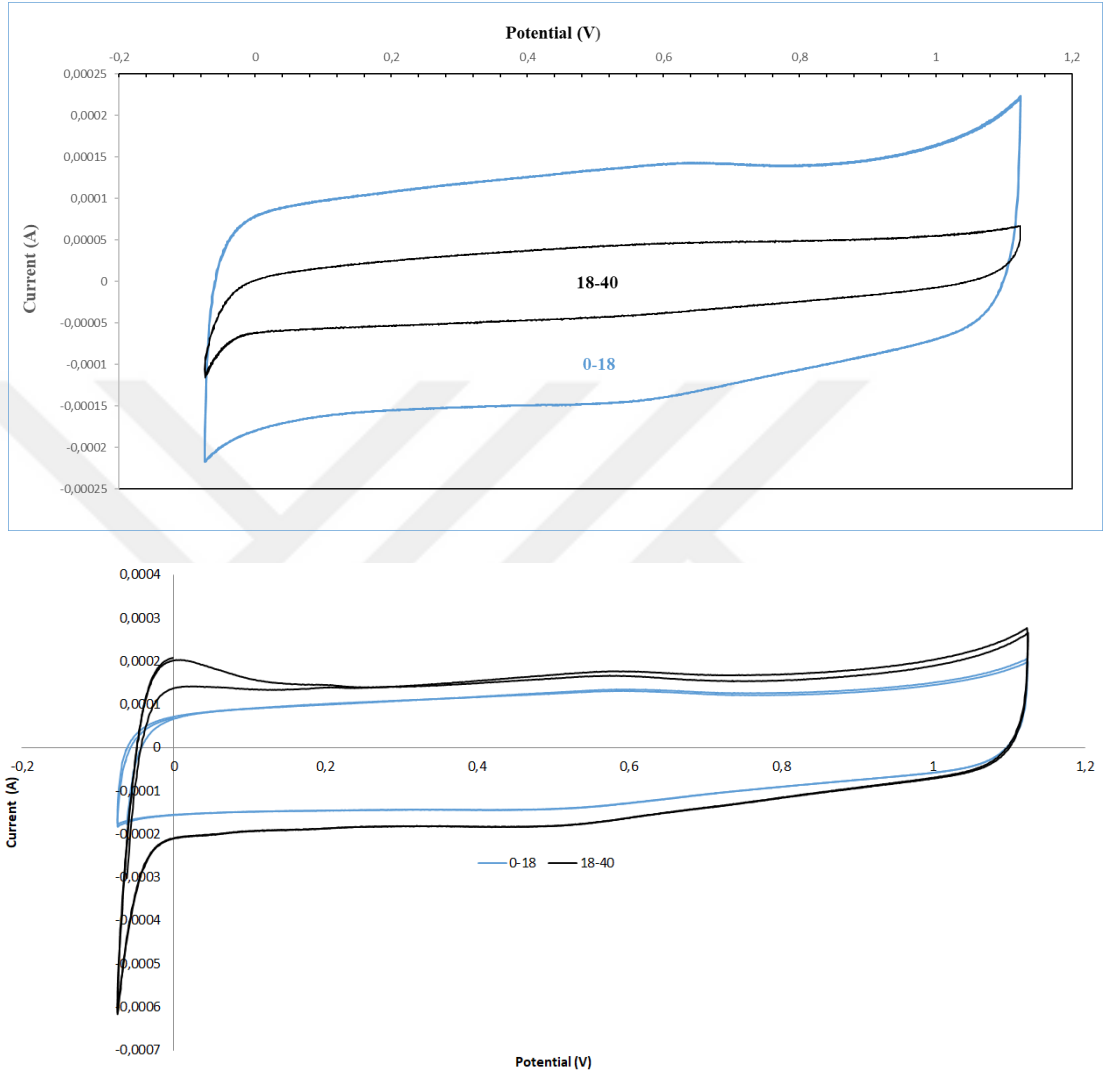
Şekil 4.10. Ham malzemelerin Diferansiyel Taramalı Kalorimetri Analizi (DSC)



Şekil 4.11. Sentezlenmiş aktif karbon malzemelerin Diferansiyel Taramalı Kalorimetri Analizi (DSC)

Şekil 4.10 ve 4.11 ham ve sentezlenmiş aktif karbon malzemelerin DSC'lerini göstermektedir. Şekil 4.10'da ham malzelerin 0-18 yaş grubu için eğrinin altında kalan alan $7055 \mu\text{Vs mg}^{-1}$, 18-40 yaş grubu içinde $6379 \mu\text{Vs mg}^{-1}$ olarak DSC grafiğinden termal analiz cihazında hesaplanmıştır. Aynı şekilde Şekil 4.11'de verilen sentezlenmiş aktif karbon malzemelerin 0-18 yaş grubu için bozulma entalpileri $34621 \mu\text{Vs mg}^{-1}$ ve 18-40 yaş grubu için $26839 \mu\text{Vs mg}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır.

4.6. CV Sonuçları



Şekil 4.12. Sentezlenmiş aktif karbon malzemelerin çevrimsel voltametri grafiği

Spesifik Kapasitans Hesabı;

Grafiklerin alanları Origin'den hesaplanmıştır. 0-18 için alan; 6.26×10^{-4} ve 18-40 için alan; 1.81×10^{-4} olarak hesaplanmıştır.

Farad olarak değer;

$$B = \frac{\text{Alan} \times 1000}{\text{Tarama Hızı} \times \text{Voltaj Farkı}}$$

Formülü ile hesaplanır. Formülde alan yazan yere alanların yarısı alınarak hesaplanır.

Tarama Hızı : 50 mV/s

Voltaj Farkı : -0,28V ve 0,92V

Spesifik Kapasitans (C);

$$C = \frac{B \times 10^6}{A \times 0,1963}$$

0,1963 : Glassy Karbon Elektrodun Aktif Alanı (cm²)

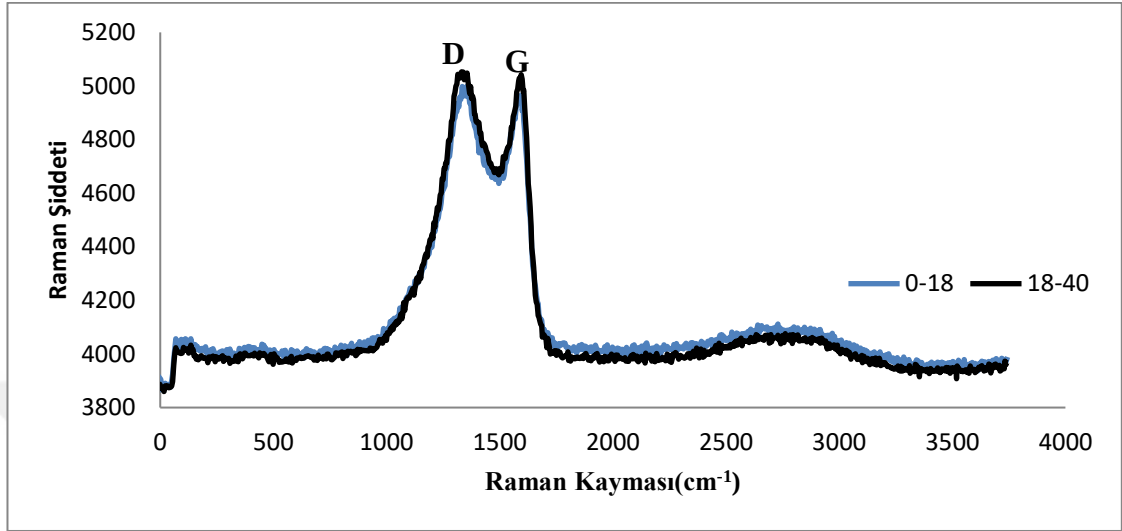
A : Glassy Karbon Üzerine Damlatılan Madde Miktarı (μg/ cm²)

10⁶ : Düzeltme faktörü (Spesifik Kapasitansın birimi Farad/gram olduğu için)

0-18 için C = 948,984 F/g ve 18-40 için C = 274,361 F/g elde edilir.

Elde edilen sonuçlara göre iyi bir kapasite tutma, yüksek enerji ve güç yoğunluklarını göstermektedir.

4.7. Raman Sonuçları



Şekil 4.13. Sentezlenmiş aktif karbon malzemelerin Raman Spektroskopisi grafiği

Pirolizden sonraki saçların Raman spektrumları Şekil 4.13'te gösterilmektedir. Pirolizden sonra, sırasıyla D ve G bantlarına karşılık gelen 0-18 yaş grubu için yaklaşık 1363 cm^{-1} 18-40 yaş grubu için 1319 cm^{-1} ve 0-18 yaş grubu için 1571 cm^{-1} 18-40 yaş grubu için 1583 cm^{-1} 'de sadece iki geniş tepe noktası bulunmuştur. D-bandı kusurlara bağlanırken, G-bandı grafitin karakteristiğidir. D bandının G bandına (ID/IG) yoğunluk oranı, mükemmel bir grafit yapıya göre yapısal düzen derecesini gösterir. Saçtan türetilmiş içi boş karbon fiberlerin ID / IG değeri, 0.99 idi ve bu yapının çoğunlukla camsı karbon olduğunu gösterir (Maslova 2012). Bu değer, önceki araştırmada insan saçından türetilmiş karbon taneciğinin süper kapasitörlerin üretilmesinde kullanıldığındaki değere (ID/ IG = 1.1) benzerdir (Pramanick 2016).

4.8. Elemental Analiz sonuçları

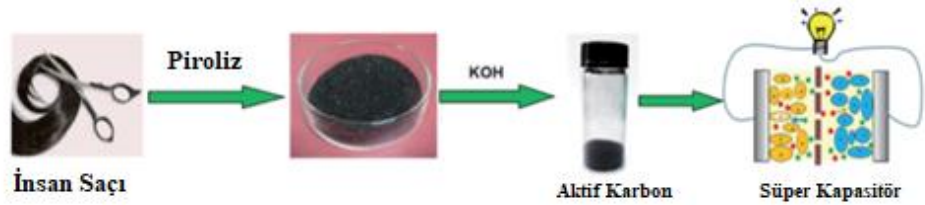
Çizelge 4.3. Ham malzemelerin ve sentezlenmiş aktif karbon malzemelerin elemental analizi

	C	H	N	S
H018	45,25	6,532	14,89	4,53
H1840	46,04	6,582	15,24	4,663
018AC	68,79	1,37	3,826	1,071
1840AC	72,02	1,222	4,556	0,756

Ham malzemelerin ve sentezlenmiş aktif karbon malzemelerin Çizelge 4.3'te elemental analiz sonuçları verilmiştir. Her iki yaş grubu örneklerinde de karbon miktarının bariz şekilde arttığı hidrojen, azot ve kükürt miktarlarının da çok çarpıcı bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bu da piroliz işleminin sonucunda beklenen bir sonuçtur.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada belli yaş aralıklarından alınan erkek saçları kullanılarak aktif karbon (AC) sentezlenmiştir. Sentezlenen aktif karbonlar azot adsorpsiyon/desorpsiyon izotermi (BET), termal gravimetrik analiz (TGA), X ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM), Fourier Transform Infrared Spektroskopisi (FTIR), Raman Spektroskopisi ve Elemental analiz teknikleriyle karakterize edilmiştir. Sentezlenen malzemelerin kapasitansı, çevrimsel voltametri (CV) kullanılarak belirlenmiştir. 0-18 yaş aralığı için kapasitans sonuçları 948,984 F/g iken 18-40 yaş aralığı için kapasitans sonuçları 274,361 F/g şeklinde elde edilmiştir. Bu yüksek süper kapasitör performansı, yüksek etkili yüzey alanı yapılan analizlerle doğrulanmıştır. Sentezlenmiş aktif karbonlar için SEM görüntüleri sonucunda 0-18 ve 18-40 yaş aralıklarına ait üretilen aktif karbon malzemesi için yoğun gözenekli yapılar elde edilmiştir. Raman analizi sonucunda elde edilen değerler, önceki araştırmalarda insan saçından türetilmiş karbon taneciğinin süper kapasitörlerin üretilmesinde kullanılan değerlere benzer olduğu grafiklerde görülmüştür.



Aktif karbon kaynağı olarak insan saçının kullanıldığı diğer çalışmalarda S_{BET} (m^2/g); Weijiang Si *et al.* 1104 m^2/g , Rohit Satish *et al.* 1116 m^2/g , Xiaojun Liu *et al.* 617.8 m^2/g , Dian Deng *et al.* 1641.4 m^2/g , Junke Ou *et al.* 1250 m^2/g yüzey alanı elde edilmiştir. Bizim yaptığımız çalışmalarda BET sonuçlarına göre 2302,82 m^2/g ve 2673,90 m^2/g yüzey alanı elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Abioye, A. M., *et al.* (2015). "Recent development in the production of activated carbon electrodes from agricultural waste biomass for supercapacitors: a review." **52**: 1282-1293.
- Ahmad, S. (2014). "Preparation of eco-friendly natural hair fiber reinforced polymeric composite (FRPC) material by using of polypropylene and fly ash: a review." **5**(11): 969-972.
- Ahmed, M., *et al.* (2017). "Human hair-derived high surface area porous carbon material for the adsorption isotherm and kinetics of tetracycline antibiotics." **243**: 778-784.
- Arbizzani, C., *et al.* (2001). "New trends in electrochemical supercapacitors." **100**(1-2): 164-170.
- Aygün, A., *et al.* (2003). "Production of granular activated carbon from fruit stones and nutshells and evaluation of their physical, chemical and adsorption properties." **66**(2-3): 189-195.
- Balathanigaimani, M., *et al.* (2008). "Highly porous electrodes from novel corn grains-based activated carbons for electrical double layer capacitors." **10**(6): 868-871.
- Balci, S., *et al.* (1994). "Characterization of activated carbon produced from almond shell and hazelnut shell." **60**(4): 419-426.
- Ban, S., *et al.* (2011). "A molecular model for carbon black primary particles with internal nanoporosity." **49**(10): 3362-3370.
- Bandosz, T. J. and K. Kante (2015). Spent Coffee-Based Activated Carbons: Production, Properties, and Environmental Applications. Coffee in Health and Disease Prevention, Elsevier: 311-317.
- Baughman, R. H., *et al.* (2002). "Carbon nanotubes--the route toward applications." **297**(5582): 787-792.
- Becker, H. I. (1957). Low voltage electrolytic capacitor, Google Patents.
- Benaddi, H., *et al.* (2000). "Surface functionality and porosity of activated carbons obtained from chemical activation of wood." **38**(5): 669-674.
- Brand, E. and N. Wiseman (2008). Concise Chinese Materia Medica, Paradigm Publications.
- Brebu, M., *et al.* (2011). "Thermal degradation of keratin waste." **91**(2): 288-295.
- Burke, A. J. J. o. p. s. (2000). "Ultracapacitors: why, how, and where is the technology." **91**(1): 37-50.
- Chang, J., *et al.* (2015). "Activated porous carbon prepared from paulownia flower for high performance supercapacitor electrodes." **157**: 290-298.
- Chang, L., *et al.* (2014). "Optimal electrochemical performances of CO₂ activated carbon aerogels for supercapacitors." **29**(2): 213-218.
- Choi, H.-J., *et al.* (2012). "Graphene for energy conversion and storage in fuel cells and supercapacitors." **1**(4): 534-551.
- Chu, A. and Braatz P. (2002). "Comparison of commercial supercapacitors and high-power lithium-ion batteries for power-assist applications in hybrid electric vehicles: I. Initial characterization." **112**(1): 236-246.

- Conway, B. E. (1991). "Transition from "supercapacitor" to "battery" behavior in electrochemical energy storage." **138**(6): 1539-1548.
- Conway, B. E. (2013). *Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications*, Springer Science & Business Media.
- De Jong, K. P. and J. W. J. C. R. Geus (2000). "Carbon nanofibers: catalytic synthesis and applications." **42**(4): 481-510.
- Deng, D., *et al.* (2015). "Needle-like MnO₂/activated carbon nanocomposites derived from human hair as versatile electrode materials for supercapacitors." **5**(99): 81492-81498.
- Deng, H., *et al.* (2010). "Preparation of activated carbons from cotton stalk by microwave assisted KOH and K₂CO₃ activation." **163**(3): 373-381.
- Ding, R., *et al.* (2001). "Recent advances in the preparation and utilization of carbon nanotubes for hydrogen storage." **1**(1): 7-29.
- Elmouwahidi, A., *et al.* (2012). "Activated carbons from KOH-activation of argan (*Argania spinosa*) seed shells as supercapacitor electrodes." **111**: 185-190.
- Elrouby, M. J. J. N. A. M. (2013). "Electrochemical applications of carbon nanotube." **1**: 23-38.
- Fang, B., *et al.* (2005). "High capacity supercapacitors based on modified activated carbon aerogel." **35**(3): 229-233.
- Farma, R., *et al.* (2013). "Physical and electrochemical properties of supercapacitor electrodes derived from carbon nanotube and biomass carbon." **8**(1): 257-273.
- Foo, K., *et al.* (2011). "Preparation and characterization of activated carbon from pistachio nut shells via microwave-induced chemical activation." **35**(7): 3257-3261.
- Foo, K., *et al.* (2012). "Porous structure and adsorptive properties of pineapple peel based activated carbons prepared via microwave assisted KOH and K₂CO₃ activation." **148**(1): 191-195.
- Frackowiak, E. and F. J. C. Beguin (2001). "Carbon materials for the electrochemical storage of energy in capacitors." **39**(6): 937-950.
- Gamby, J., *et al.* (2001). "Studies and characterisations of various activated carbons used for carbon/carbon supercapacitors." **101**(1): 109-116.
- Ghamande, M., *et al.* (2017). "Developing Water Purity Indicator and Controller."
- González-García, P., *et al.* (2013). "Microstructure and surface properties of lignocellulosic-based activated carbons." **265**: 731-737.
- Gryglewicz, G., *et al.* (2005). "Effect of pore size distribution of coal-based activated carbons on double layer capacitance." **50**(5): 1197-1206.
- Guo, Y., *et al.* (2003). "Adsorption of malachite green on micro-and mesoporous rice husk-based active carbon." **56**(3): 219-229.
- Gupta, A. (2014). "Human hair "waste" and its utilization: gaps and possibilities." **2014**.
- Halper, M. S. and Ellenbogen, J. C., Virginia, USA (2006). "Supercapacitors: A brief overview." 1-34.
- Hassler, J. W. (1974). "Purification with activated carbon; industrial, commercial, environmental."
- Hsieh, C.-T. and H. J. C. Teng (2002). "Influence of oxygen treatment on electric double-layer capacitance of activated carbon fabrics." **40**(5): 667-674.
- Hu, C.-C., *et al.* (2004). "How to achieve maximum utilization of hydrous ruthenium oxide for supercapacitors." **151**(2): A281-A290.

- Hu, C.-C., *et al.* (2007). "Characterization of pistachio shell-derived carbons activated by a combination of KOH and CO₂ for electric double-layer capacitors." **52**(7): 2498-2505.
- Inal, I. I. G., *et al.* (2015). "The performance of supercapacitor electrodes developed from chemically activated carbon produced from waste tea." **357**: 696-703.
- Ismanto, A. E., *et al.* (2010). "Preparation of capacitor's electrode from cassava peel waste." **101**(10): 3534-3540.
- Jayalakshmi, M. and Balasubramanian, K. (2008). "Simple capacitors to supercapacitors-an overview." **3**(11): 1196-1217.
- Jisha, M., *et al.* (2009). "Electrochemical characterization of supercapacitors based on carbons derived from coffee shells." **115**(1): 33-39.
- Karthikeyan, K., *et al.* (2014). "Construction of high-energy-density supercapacitors from pine-cone-derived high-surface-area carbons." **7**(5): 1435-1442.
- Kim, H. and Popov, B. N. (2002). "Characterization of hydrous ruthenium oxide/carbon nanocomposite supercapacitors prepared by a colloidal method." **104**(1): 52-61.
- Kim, I.-H., *et al.* (2001). "Ruthenium oxide thin film electrodes for supercapacitors." **4**(5): A62-A64.
- Kötz, R. and M. J. E. a. Carlen (2000). "Principles and applications of electrochemical capacitors." **45**(15-16): 2483-2498.
- Kumar, S., *et al.* (2009). "Assessment of the status of municipal solid waste management in metro cities, state capitals, class I cities, and class II towns in India: An insight." **29**(2): 883-895.
- Laforge, A., *et al.* (2003). "Activated carbon/conducting polymer hybrid supercapacitors." **150**(5): A645-A651.
- Lee, S. G., *et al.* (2011). "Performance of electrochemical double layer capacitors using highly porous activated carbons prepared from beer lees." **17**(3): 450-454.
- Li, H., *et al.* (2005). "A hybrid electrochemical supercapacitor based on a 5 V Li-ion battery cathode and active carbon." **8**(9): A433-A436.
- Li, W., *et al.* (2008). "Preparation of high surface area activated carbons from tobacco stems with K₂CO₃ activation using microwave radiation." **27**(3): 341-347.
- Li, X., *et al.* (2011). "Preparation of capacitor's electrode from sunflower seed shell." **102**(2): 1118-1123.
- Lin, C. and J. J. C. Ritter (1997). "Effect of synthesis pH on the structure of carbon xerogels." **35**(9): 1271-1278.
- Link, C. C., United Kingdom (2014). "Properties of activated carbon."
- Liu, X., *et al.* (2015). "Nitrogen and sulfur co-doped porous carbon derived from human hair as highly efficient metal-free electrocatalysts for hydrogen evolution reactions." **3**(16): 8840-8846.
- Lota, G., *et al.* (2008). "Improvement of the structural and chemical properties of a commercial activated carbon for its application in electrochemical capacitors." **53**(5): 2210-2216.
- Marsh, H. and F. R. Reinoso (2006). Activated carbon, Elsevier.
- Mastragostino, M., *et al.* (2002). "Conducting polymers as electrode materials in supercapacitors." **148**(3-4): 493-498.
- Mayer, S., *et al.* (1993). "The Aerocapacitor: An Electrochemical Double-Layer Energy-Storage Device." **140**(2): 446-451.

- McKeown, D. A., *et al.* (1999). "Structure of hydrous ruthenium oxides: implications for charge storage." **103**(23): 4825-4832.
- Mi, J., *et al.* (2012). "Coconut-shell-based porous carbons with a tunable micro/mesopore ratio for high-performance supercapacitors." **26**(8): 5321-5329.
- Miller, J. R. and P. J. S. Simon (2008). "Electrochemical capacitors for energy management." **321**(5889): 651-652.
- Misnon, I. I., *et al.* (2015). "Electrochemical properties of carbon from oil palm kernel shell for high performance supercapacitors." **174**: 78-86.
- Moustafa, M., *et al.* (2015). "Removal of Zn (II), Fe (II) and Mn (II) from Industrial Wastewater by using Active Carbon Prepared from mango seed as Adsorbent." **2**: 1-8.
- Muto, M., *et al.* (2012). "Contamination of Brominated Flame Retardants (BFRs) in human hair from e-waste recycling site in Vietnam." 229-237.
- Naoui, K. and Simon, P. (2008). "New materials and new configurations for advanced electrochemical capacitors." **17**(1): 34-37.
- Nian, Y.-R. and Teng, H. (2002). "Nitric acid modification of activated carbon electrodes for improvement of electrochemical capacitance." **149**(8): A1008-A1014.
- Nyholm, L., *et al.* (2011). "Toward flexible polymer and paper-based energy storage devices." **23**(33): 3751-3769.
- Park, J. H., *et al.* (2003). "Carbon nanotube/RuO₂ nanocomposite electrodes for supercapacitors." **150**(7): A864-A867.
- Pekala, R., *et al.* (1998). "Carbon aerogels for electrochemical applications." **225**: 74-80.
- Pell, W. G. and Conway, B. E. (2004). "Peculiarities and requirements of asymmetric capacitor devices based on combination of capacitor and battery-type electrodes." **136**(2): 334-345.
- Peng, C., *et al.* (2008). "Carbon nanotube and conducting polymer composites for supercapacitors." **18**(7): 777-788.
- Peng, C., *et al.* (2013). "Promising activated carbons derived from waste tea-leaves and their application in high performance supercapacitors electrodes." **87**: 401-408.
- Pramanick, B., *et al.* (2016). "Human hair-derived hollow carbon microfibers for electrochemical sensing." **107**: 872-877.
- Pushparaj, V. L., *et al.* (2007). "Flexible energy storage devices based on nanocomposite paper." **104**(34): 13574-13577.
- Qian, W., *et al.* (2014). "Human hair-derived carbon flakes for electrochemical supercapacitors." **7**(1): 379-386.
- Qu, D. J. (2002). "Studies of the activated carbons used in double-layer supercapacitors." **109**(2): 403-411.
- Rightmire, R. A. (1966). Electrical energy storage apparatus, Google Patents.
- Robbins, C. R. and C. R. Robbins (2002). Chemical and physical behavior of human hair, Springer.
- Rodriguez-Reinoso, F., *et al.* (1985). "A comparison of the porous texture of two CO₂ activated botanic materials." **23**(1): 19-24.
- Rudge, A., *et al.* (1994). "Conducting polymers as active materials in electrochemical capacitors." **47**(1-2): 89-107.

- Rufford, T. E., *et al.* (2008). "Nanoporous carbon electrode from waste coffee beans for high performance supercapacitors." **10**(10): 1594-1597.
- Rufford, T. E., *et al.* (2010). "Microstructure and electrochemical double-layer capacitance of carbon electrodes prepared by zinc chloride activation of sugar cane bagasse." **195**(3): 912-918.
- Satish, R., *et al.* (2015). "Macroporous carbon from human hair: A journey towards the fabrication of high energy Li-ion capacitors." **182**: 474-481.
- Schneuwly, A. and R. Gallay (2000). Properties and applications of supercapacitors from the state-of-the-art to future trends. Proceeding PCIM.
- Sharma, P., *et al.* (2010). "A review on electrochemical double-layer capacitors." **51**(12): 2901-2912.
- Simon, P. and Gogotsi, Y. (2012). "Capacitive energy storage in nanostructured carbon-electrolyte systems." **46**(5): 1094-1103.
- Simon, P. and Y. Gogotsi (2010). Materials for electrochemical capacitors. Nanoscience And Technology: A Collection of Reviews from Nature Journals, World Scientific: 320-329.
- Smišek, M. and S. Černý (1970). Active carbon: manufacture, properties and applications, Elsevier Publishing Company.
- Snook, G. A., *et al.* (2011). "Conducting-polymer-based supercapacitor devices and electrodes." **196**(1): 1-12.
- Subramanian, V., *et al.* (2007). "Supercapacitors from activated carbon derived from banana fibers." **111**(20): 7527-7531.
- Tan, I., *et al.* (2008). "Adsorption of basic dye on high-surface-area activated carbon prepared from coconut husk: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies." **154**(1-3): 337-346.
- Tripathi, M. and Kumar, A. (2018). "Electrochemical studies of EDLC Cells fabricated using drum stick (DS) activated charcoal." **5**(7): 15458-15465.
- Tung and Vincent (2009). "High-throughput solution processing of large-scale graphene." **4**(1): 25.
- Wang, C., *et al.* (2005). "A novel method for the fabrication of high-aspect ratio C-MEMS structures." **14**(2): 348-358.
- Wang, L., *et al.* (2007). "Asymmetric electric double layer capacitors using carbon electrodes with different pore size distributions." **53**(2): 882-886.
- Wang, X. and Zheng, J. (2004). "The optimal energy density of electrochemical capacitors using two different electrodes." **151**(10): A1683-A1689.
- Wei, D., *et al.* (2009). "Transparent, flexible and solid-state supercapacitors based on room temperature ionic liquid gel." **11**(12): 2285-2287.
- Xu, B., *et al.* (2010). "Activated carbon with high capacitance prepared by NaOH activation for supercapacitors." **124**(1): 504-509.
- Yang, C.-S., *et al.* (2014). "Bamboo-based activated carbon for supercapacitor applications." **14**(12): 1616-1620.
- Yang, X., *et al.* (2013). "Liquid-mediated dense integration of graphene materials for compact capacitive energy storage." **341**(6145): 534-537.
- Yin, L., *et al.* (2016). "3-Dimensional hierarchical porous activated carbon derived from coconut fibers with high-rate performance for symmetric supercapacitors." **111**: 44-50.

- Yousof, J. M. (1996). Analysis of Hair Segments for Drugs by Electrospray High Performance Liquid Chromatography/mass Spectrometry, American University.
- Zhang, J., *et al.* (2012). "Preparation of activated carbon from waste *Camellia oleifera* shell for supercapacitor application." **16**(6): 2179-2186.
- Zhang, L. L., *et al.* (2010). "Graphene-based materials as supercapacitor electrodes." **20**(29): 5983-5992.
- Zhang, R. (2016). A study of flexible supercapacitors: design, manufacture and testing, Brunel University London.
- Zhang, Y., *et al.* (2009). "Progress of electrochemical capacitor electrode materials: A review." **34**(11): 4889-4899.
- Zheljazkov, V. D., *et al.* (2008). "Human hair as a nutrient source for horticultural crops." **18**(4): 592-596.
- Zheng, J. and Jow, T. (1995). "A new charge storage mechanism for electrochemical capacitors." **142**(1): L6-L8.
- Zheng, J., *et al.* (1995). "Hydrous ruthenium oxide as an electrode material for electrochemical capacitors." **142**(8): 2699-2703.
- Zubizarreta, L., *et al.* (2008). "Development of microporous carbon xerogels by controlling synthesis conditions." **354**(10-11): 817-825.

ÖZGEÇMİŞ

1992 yılında Erzurum’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini aynı ilde tamamladı. Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi’nden, 2015 yılında, Kimya Mühendisi ünvanıyla mezun oldu. 2016 yılında, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Temel İşlemler ve Termodinamik Bilim Dalı’nda Yüksek Lisansa başladı.

