



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ODUN ATIKLARDAN ÜRETİLEN AKTİF
KARBONUN KAÇUK MATRİSLİ
BİLEŞİKLERDE KULLANIMI VE
KARAKTERİZASYONU**

Tuba ZEYBEK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

EKİM-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Tuba ZEYBEK tarafından hazırlanan “Odun Atıklarından Üretilen Aktif Karbonun Kauçuk Matrisli Bileşiklerde Kullanımı ve Karakterizasyonu” adlı tez çalışması 02/10/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof.Dr.Hakan GÖKMEŞE

.....

Danışman

Doç.Dr.Şaban BÜLBÜL

.....

Üye

Doç.Dr.İlker Örs

.....

Üye

Unvanı Adı SOYADI

.....

Üye

Unvanı Adı SOYADI

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Tuba ZEYBEK

Tarih:22.10.2025

ÖZET**YÜKSEK LİSANS TEZİ****ODUN ATIKLARDAN ÜRETİLEN AKTİF KARBONUN KAÜÇUK MATRİSLİ
BİLEŞİKLERDE KULLANIMI VE KARAKTERİZASYONU****Tuba ZEYBEK****NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI****Danışman: Doç.Dr.Şaban BÜLBÜL****2025, 97 Sayfa****Jüri
Doç.Dr.Şaban BÜLBÜL
Prof.Dr.Hakan GÖKMEŞE
Doç.Dr.İlker Örs**

Bu çalışmada, Nitril Bütadien Kauçuk (NBR) bileşiklerinin mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek amacıyla odun atıklarından iki farklı kimyasal aktivasyon yöntemi kullanılarak aktif karbon sentezlenmiştir. Fosforik asit (H_3PO_4) ve çinko klorür ($ZnCl_2$) aktivasyon ajanlarıyla üretilen aktif karbonların yapısal karakterizasyonu için Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) ile fonksiyonel grup analizleri, Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) ile morfolojik incelemeler ve Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS) ile elementel analizler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada, kontrol grubu olarak standart karbon siyahı içeren numuneler hazırlanmış ve bunlara ek olarak H_3PO_4 ile aktive edilen aktif karbon %5, %10, %15 ve %20, $ZnCl_2$ ile aktive edilen aktif karbon ise %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ilave edilerek toplam dokuz farklı bileşik formülasyonu geliştirilmiştir. Hazırlanan tüm numunelerin yoğunluk, sertlik, kopma dayanımı ve uzama değerleri ölçülmüş, ayrıca FE-SEM ve X-ışını haritalama teknikleri ile mikroyapısal karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar hem kendi aralarında hem de endüstriyel standartlarla karşılaştırılarak detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu sonuçlara göre optimum performansın %5 aktif karbon içeren bileşiklerde elde edildiği tespit edilmiştir. Fosforik asit ile aktive edilen OAA5 numunesi, mekanik mukavemet ve esneklik açısından en üstün özellikleri sergilerken; çinko klorür ile üretilen OAT numuneleri ise yüksek yüzey alanı gerektiren uygulamalar için daha uygun bulunmuştur. Bu kapsamlı araştırma, odun atıklarından üretilen aktif karbonun kauçuk bileşiklerde dolgu maddesi olarak kullanım potansiyelini ortaya koyarken, aynı zamanda farklı aktivasyon yöntemlerinin bileşik özellikleri üzerindeki etkilerini sistematik olarak incelemektedir. Çalışma sonuçları, sürdürülebilir malzeme geliştirme alanına önemli katkılar sunarken, endüstriyel uygulamalar için de yol gösterici niteliktedir.

Anahtar Kelimeler: Aktif Karbon, Kauçuk Bileşikler, Kimyasal Aktivasyon, Mekanik Özellikler, Odun Atığı

ABSTRACT**MS THESIS****UTILIZATION AND CHARACTERIZATION OF ACTIVATED CARBON
PRODUCED FROM WOOD WASTES IN RUBBER MATRIX COMPOSITES****Tuba ZEYBEK****THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING****Advisor: Assoc.Prof.Dr.Şaban BÜLBÜL****2025, 97 Pages****Jury****Assoc.Prof.Dr.Şaban BÜLBÜL****Prof.Dr.Hakan GÖKMEŞE****Assoc.Prof.Dr.İlker ÖRS**

In this study, activated carbon was synthesized from wood waste using two different chemical activation methods to improve the mechanical and physical properties of Nitrile Butadiene Rubber (NBR) compounds. Functional group analyses of the activated carbons produced with phosphoric acid (H_3PO_4) and zinc chloride ($ZnCl_2$) were performed using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR), morphological examinations were conducted with Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM), and elemental analyses were carried out using Energy Dispersive Spectroscopy (EDS). In the experimental study, a control group containing standard carbon black was prepared, and in addition, activated carbon produced with H_3PO_4 was incorporated at 5%, 10%, 15%, and 20%, while $ZnCl_2$ -activated carbon was added at 5%, 10%, 15%, and 20%, resulting in a total of nine different compound formulations. The density, hardness, tensile strength, and elongation of all prepared samples were measured, and microstructural characterization studies were performed using FE-SEM and X-ray mapping techniques. The obtained results were evaluated in detail both among themselves and in comparison with industrial standards. According to these results, optimum performance was observed in compounds containing 5% activated carbon. The OAA5 sample activated with phosphoric acid exhibited superior mechanical strength and elasticity, whereas the OAT samples produced with zinc chloride were found to be more suitable for applications requiring a high surface area. This comprehensive study not only highlights the potential use of wood waste-derived activated carbon as a filler in rubber compounds but also systematically investigates the effects of different activation methods on compound properties. The findings contribute significantly to the field of sustainable material development and provide guidance for industrial applications.

Keywords: Activated Carbon, Chemical Activation, Mechanical Properties, Rubber Composites, Wood Waste

ÖNSÖZ

Bu bilimsel çalışmanın her safhasında, araştırma konusunun belirlenmesinden metodolojinin oluşturulmasına, deneysel süreçlerin yürütülmesinden elde edilen bulguların değerlendirilmesine kadar, akademik birikimi ve kıymetli rehberliği ile katkı sağlayan saygıdeğer danışmanım Doç. Dr. Şaban BÜLBÜL 'e içtenlikle teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Çalışmam sırasında maddi manevi desteğini esirgemeyen değerli eşim Enes Batuhan ZEYBEK 'e, sevgili anneme ve babama teşekkür ederim.

Tuba ZEYBEK
KONYA-2025



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
3. POLİMERLER	16
3.1. Termosetler	16
3.2. Termoplastikler	17
3.3. Elastomerler	17
3.3.1. Kauçuk	17
3.3.2. Kauçuklarda kullanılan dolgu malzemeleri	21
4. AKTİF KARBON	26
4.1. Aktif Karbonun Tarihsel Gelişimi ve Modern Kullanım Alanları	26
4.2. Aktif Karbonun Tanımı	26
4.3. Aktif Karbon Karakterizasyonunda Temel Parametreler	27
4.4. Aktif Karbon Üretim Süreci	30
4.4.1. Kül giderimi	31
4.4.2. Karbonizasyon	32
4.4.3. Fiziksel aktivasyon	32
4.4.4. Kimyasal aktivasyon	33
4.5. Aktif Karbonun Sınıflandırılması	34
4.5.1. Toz aktif karbon	34
4.5.2. Granül aktif karbon	34
4.5.3. Pelet aktif karbon	35
4.6. Aktif Karbon Üretiminde Tarımsal Kökenli Hammaddelerin Kullanımı	36
4.7. Aktif Karbon Kullanım Alanları ve Endüstriyel Uygulamaları	36
5. MATERYAL VE METOD	38
5.1. Fosforik Asit ile Aktif Karbon Üretimi	38
5.2. Çinko Klorür ile Aktif Karbon Üretimi	39
5.3. Kauçuk Hamurunun Hazırlanması	39
6. DENEYSEL YÖNTEMLER	42

6.1. Odun Atıklarından Üretilen Aktif Karbonların Karakterizasyonu	42
6.1.1. BET analizi	42
6.1.2. Odun atıklarından üretilen aktif karbonların FT-IR analizi.....	42
6.1.3. Odun atığından üretilen aktif karbonların mikroyapı karakterizasyonu.....	43
6.1.4. Odun atığından üretilen aktif karbonların yoğunluk ölçümleri	44
6.2. DSC Analizi ile Kurlenme Süresi Hesaplaması	44
6.3. Mekanik Testler	44
7. ARAŞTIRMA SONUÇLAR VE TARTIŞMA	47
7.1. Odun Atığından Üretilen Aktif Karbonların BET Analizleri	47
7.2. Odun Atığından Üretilen Aktif Karbonların FT-IR Analizi	48
7.3. Üretilen Aktif Karbonların Mikroyapı Karakterizasyonu	49
7.4. Aktif Karbonların Yoğunluk Deney Sonuçları	54
7.5. Çapraz Bağlanma ve Kurlenme Sürelerinin Tayini	55
7.6. OA İlaveli Bileşiklerin Sertlik ve Yoğunluk Test Sonuçları	57
7.7. OA İlaveli Bileşiklerin Kopma Dayanımı ve % Birim Uzama Test Sonuçları ...	58
7.8. OA İlaveli Bileşiklerin Aşınma Test Sonuçları	60
7.9. OA İlaveli Bileşiklerin Kopma Yüzlerinin FE-SEM ve EDS Analizleri	61
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	67
8.1 Sonuçlar	67
8.2 Öneriler	69
9. KAYNAKLAR	70

SİMGELER VE KISALTMALAR

SİMGELER

Å	Angström
C	Karbon
Ca	Kalsiyum
CaCO₃	Kalsit
Cl	Klor
CO₂	Karbondioksit
H₂	Hidrojen
H₂SO₄	Sülfürik asit
H₃PO₄	Fosforik asit
HCl	Hidroklorik asit
Ir	İridyum
K	Kelvin
K₂CO₃	Potasyum karbonat
KOH	Potasyum hidroksit
µm	Mikrometre
N	Nevton
N₂	Azot
NaOH	Sodyum hidroksit
NH₃	Amonyak
O	Oksijen
P	Fosfor
Pb	Kurşun
Pbr	100 kısım kauçuk başına ilave edilen katkı miktarı
Rpm	Dakikadaki devir sayısı
S	Kükürt
SiO₂	Silika
SO₂	Kükürtdioksit
V_{micro}	Mikro gözenek sayısı (cm ³ /g)
V_{mezo}	Mezo gözenek sayısı (cm ³ /g)
V_{total}	Toplam gözenek sayısı (cm ³ /g)
Zn	Çinko
ZnCl₂	Çinko klorür
ZnO	Çinko oksit

KISALTMALAR

AC	Aktif karbon
BET	Brunauer-emmett-teller
BR	Bütadien kauçuk
CMS	Clusia multiflora ağacından elde edilen talaş atığı
CR	Kloropren kauçuğu
CS	Pamuk sapı
DLAC	Ölü yaprak aktif karbonu
EDS	Enerji dağılım spektroskopisi
EPM	Etilen-propilen kauçuk
FE-SEM	Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu
FT-IR	Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
G	Genel kompozisyon
IIR	Butil kauçuk
IR	İsopren kauçuğu
IUPAC	Uluslararası temel ve uygulamalı kimya birliği
NBR	Nitril butadien kauçuk
NR	Doğal kauçuk
OA	Ticari aktif karbon
OA0	Odun atığından üretilmiş aktif karbon eklenmemiş numune
OAA	Odun atığı asit
OAA5	Kütlece %5 fosforik asit ile aktive edilmiş aktif karbon içeren numune
OAA10	Kütlece %10 fosforik asit ile aktive edilmiş aktif karbon içeren numune
OAA15	Kütlece %15 fosforik asit ile aktive edilmiş aktif karbon içeren numune
OAA20	Kütlece %20 fosforik asit ile aktive edilmiş aktif karbon içeren numune
OAT	Odun atığı tuz
OAT5	Kütlece %5 çinko klorür ile aktive edilmiş aktif karbon içeren numune
OAT10	Kütlece %10 çinko klorür ile aktive edilmiş aktif karbon içeren numune
OAT15	Kütlece %15 çinko klorür ile aktive edilmiş aktif karbon içeren numune
OAT20	Kütlece %20 çinko klorür ile aktive edilmiş aktif karbon içeren numune
PTR	Polisülfid kauçukları
RHA	Pirinç kabuğu külü
RS	Pirinç nişastası
SBR	Stiren-bütadien kauçuk
SEM	Taramalı elektron mikroskobu

1. GİRİŞ

Kauçuk malzemeler, endüstriyel uygulamalarda vazgeçilmez bir yere sahiptir. Özellikle elastik yapısı ve mekanik dayanımı sayesinde otomotiv lastiklerinden tıbbi malzemelere kadar geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Günümüzde kauçuk teknolojisindeki gelişmeler, bu malzemenin performansını daha da artırmıştır (Webb ve Orr, 1997).

Polimer kimyasındaki ilerlemeler, Stiren Bütadien Kauçuk (SBR) ve Nitril Bütadien Kauçuk (NBR) gibi özel kauçuk türlerinin geliştirilmesini sağlamıştır. SBR, stiren ve bütadien monomerlerinin kopolimerizasyonu sonucu elde edilen sentetik bir kauçuk türüdür. Bu malzeme, özellikle otomotiv lastiklerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. NBR ise akrilonitril içeriği sayesinde yağlara ve kimyasallara karşı üstün direnç gösterir (Gañán-Gómez vd., 2006; Wang vd., 2011).

Kauçuk bileşiklerin performansını artırmak için dolgu maddeleri kullanılmaktadır (Erkek, 2007). Uygulama sahasında çeşitli deformasyon hataları zamanla ortaya çıkmaktadır. Katkı ve dolgu malzemelerinin kullanılması bu tür hataların en aza indirip daha kaliteli bir ürün üretme çalışmalarıdır. İnce parçacıkların eklenmesi, kauçuk malzemelerin mukavemetini ve elastikiyetini etkili bir şekilde geliştirmek için en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Bu maddeler, kauçuk matrisine eklenerek malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirir. Dolgu maddelerinin seçimi, bileşikin nihai performansını doğrudan etkileyen kritik bir faktördür (Méndez vd., 2005).

Karbon siyahı, kauçuk endüstrisinde en yaygın kullanılan dolgu maddesidir. Bu malzeme, kauçuk bileşiklerin mukavemetini ve aşınma direncini önemli ölçüde artırır. Ancak üretim sürecinde yüksek enerji gereksinimi ve çevresel etkileri nedeniyle araştırmacılar alternatif dolgu maddeleri arayışına yönelmiştir (F.-S. Zhang vd., 2005). Silika, karbon siyahına alternatif olarak geliştirilen önemli bir dolgu maddesidir. Ancak hidrofilik yapısı nedeniyle kauçuk matrisiyle uyum sorunları yaşayabilmektedir. Bu sorunun çözümü için silan bağlayıcı ajanlar kullanılmaktadır (Hsu ve Teng, 2000; Saka, 2012).

Son yıllarda sürdürülebilir malzeme araştırmaları, doğal kaynaklı dolgu maddelerine olan ilgiyi artırmıştır. Lignin, nanoselüloz ve bitkisel reçineler gibi biyobazlı malzemeler hem çevre dostu hem de ekonomik alternatifler sunmaktadır. Özellikle aktif karbon, yüksek yüzey alanı sayesinde kauçuk bileşiklerde etkili bir dolgu maddesi olarak

kullanılabilmektedir (Anisuzzaman vd., 2016; Bülbül ve Büyük, 2022; Deng vd., 2009; Nasir vd., 1988).

Aktif karbon, günümüzde en yaygın kullanılan adsorpsiyon malzemelerinden biridir ve yüksek verimliliği ile bilinmektedir (Chen vd., 2003; Daifullah vd., 2007; Gupta ve Ali, 2000; Namasivayam ve Sangeetha, 2006; Rand vd., 2012; Vickers, 2017). Bununla birlikte, üretim maliyetlerinin yüksek olması, kullanım tercihini sınırlandıran önemli bir faktördür. Araştırmalar, tarım sektöründe ortaya çıkan atık ürünlerin ekonomik bir alternatif olarak aktif karbon üretiminde değerlendirilebileceğini ortaya koymuştur (Cimino vd., 2005; Ioannidou ve Zabaniotou, 2007). Özellikle su ve atık su arıtımında organik mikro kirleticilerin giderilmesinde aktif karbonun etkinliği pek çok çalışmada kanıtlanmıştır. Günümüzde bu malzeme, sahip olduğu benzersiz özellikler sayesinde endüstrinin birçok alanında vazgeçilmez bir konuma sahiptir. Gıda, ilaç, kimya, madencilik, enerji ve otomotiv gibi çeşitli sektörlerde aktif karbondan yararlanılmaktadır (El-Hendawy vd., 2001). Aktif karbonun performansını belirleyen en önemli faktörlerden biri, gözenek yapısı ve yüzey özellikleridir. Malzemenin gözeneklilik derecesi hem hammadde seçimine hem de uygulanan aktivasyon yöntemine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Genellikle yüksek karbon içeriğine sahip organik materyaller (odun kömürü, linyit vb.) aktif karbon üretiminde tercih edilmektedir. Hammadde seçiminde bulunabilirlik, maliyet ve saflık gibi faktörlerin yanı sıra, üretim süreci ve nihai ürünün kullanım amacı da belirleyici rol oynamaktadır. Bu bağlamda, tarımsal atıklar hem yenilenebilir olmaları hem de düşük maliyetli olmaları nedeniyle önemli bir avantaj sunmaktadır (Gergova ve Eser, 1996).

Endüstriyel uygulamalarda aktif karbon, başlıca üç temel alanda kullanılmaktadır: saflaştırma ve ayırma işlemlerinde adsorban olarak, katalitik süreçlerde katalizör desteği olarak ve elektrokimyasal sistemlerde elektrot malzemesi olarak. Bu geniş kullanım yelpazesinin temelinde, malzemenin sahip olduğu yüksek yüzey alanı, kontrollü gözenek yapısı, çeşitli yüzey kimyasal grupları ve iyi mekanik dayanım gibi özellikler yatmaktadır (Walker ve Weatherley, 2000). Ancak, artan talep karşısında yüksek üretim maliyetleri, aktif karbonun yaygınlaşmasını engelleyen temel sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durum, düşük maliyetli üretim yöntemlerine olan ilgiyi artırmıştır. Aktif karbon üretiminde kullanılan geleneksel hammaddelerin maliyetli olması, araştırmacıları alternatif kaynaklar aramaya yöneltmiştir. Bu kapsamda, tarım sektöründeki yan ürünler ve atık malzemeler ekonomik ve sürdürülebilir çözümler sunmaktadır. Bu tür hammaddelerin kolay ulaşılabilir olması, düşük maliyetli olması ve yüksek adsorpsiyon

kapasitesi göstermesi, aktif karbon üretimi için ideal özellikler olarak değerlendirilmektedir (Savova vd., 2001). Literatürde, aktif karbon üretimi için çok çeşitli tarımsal kaynakların kullanıldığı görülmektedir. Bunlar arasında bambu (Q.-S. Liu vd., 2010), şeker kamışı posası (Tsai vd., 2001), çeşitli meyve çekirdekleri (Angin, 2014; Lua ve Guo, 2001; Martinez vd., 2006), kabuklu yemiş atıkları (Hayashi vd., 2002), kozalaklar (Momčilović vd., 2011), kahve ve çay atıkları (Oliveira vd., 2009; Saka, 2012) gibi malzemeler sayılabilir.

Aktif karbon üretiminde temel olarak iki farklı aktivasyon yöntemi bulunmaktadır: fiziksel ve kimyasal aktivasyon. Fiziksel aktivasyon süreci, genellikle iki aşamada gerçekleştirilir. İlk aşamada hammadde inert atmosfer altında karbonize edilir, ardından yüksek sıcaklıkta buhar veya karbondioksit ile aktivasyon işlemi uygulanır. Kimyasal aktivasyonda ise hammadde öncelikle uygun bir kimyasal ajanla muamele edilir ve daha sonra inert ortamda ısıtma işlemine tabi tutulur. Bu yöntemde yaygın olarak alkaliler, asitler ve metal tuzları gibi çeşitli kimyasallar kullanılmaktadır. Özellikle potasyum hidroksit ve çinko klorür gibi kimyasalların, karbonizasyon sürecini kontrol etmede ve istenen gözenek yapısını oluşturmada etkili olduğu bilinmektedir (Aravindhana vd., 2009; Mohan vd., 2011). Son yıllarda yapılan çalışmalar, tarımsal atıkların kimyasal aktivasyonu konusunda önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Bu kapsamda Deiana ve arkadaşları (Deiana vd., 2009), üzüm saplarından fosforik asit aktivasyonu ile aktif karbon üretimi üzerine detaylı bir araştırma yürütmüşlerdir.

Bu çalışma, odun atıklarının değerli birer hammaddeye dönüştürülmesi ve kauçuk endüstrisinde sürdürülebilir üretim tekniklerinin geliştirilmesi amacıyla tasarlanmıştır. Araştırmada, $ZnCl_2$ ve H_3PO_4 kimyasalları kullanılarak odun atıklarından aktif karbon üretilmiş ve bu malzemenin NBR kauçuk bileşiklerde dolgu maddesi olarak kullanılabilirliği detaylı şekilde incelenmiştir. Çalışmanın birincil amacı, farklı aktivasyon yöntemleriyle üretilen aktif karbonların fizikokimyasal özelliklerini karakterize ederek, kauçuk matrisine farklı oranlarda (%0-20 aralığında) ilave edildiğinde mekanik özellikler üzerindeki etkisini sistematik olarak değerlendirmektir. İkinci önemli hedef ise, odun kaynaklı aktif karbon takviyeli bileşiklerin performansını geleneksel karbon siyahı içeren referans numunelerle karşılaştırarak endüstriyel uygulanabilirlik potansiyelini ortaya koymaktır.

Çalışmanın metodolojik yaklaşımı hem malzeme karakterizasyon teknikleri hem de mekanik test yöntemleri kullanılarak kapsamlı bir veri seti oluşturmayı hedeflemektedir. Özellikle odun atıklarından aktif karbon üretimine yönelik literatürde

sınırlı sayıda çalışma bulunması nedeniyle, bu araştırma hem yöntemsel hem de sonuçlar açısından alana önemli katkılar sağlayacaktır. Elde edilen bulgular, atık yönetimi ve malzeme mühendisliği disiplinlerinin kesişiminde yenilikçi bir perspektif sunarken, aynı zamanda kauçuk endüstrisi için çevre dostu alternatiflerin geliştirilmesine ışık tutacaktır. Bu kapsamda çalışma, döngüsel ekonomi prensipleri doğrultusunda atıkların katma değerli ürünlere dönüştürülmesine yönelik uygulanabilir bir model önermektedir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Polimer bileşiklerde dolgu malzemesi olarak çeşitli materyallerin kullanıldığı literatürde sıklıkla rapor edilmektedir. Geleneksel olarak silika ve karbon siyahı bu uygulamalarda öne çıkan malzemelerdir. Özellikle karbon siyahı, kauçuk esaslı bileşiklerde mekanik dayanımı artırmak ve kimyasal direnci iyileştirmek amacıyla yaygın şekilde tercih edilen bir dolgu maddesidir (Payne, 1962; Suzuki vd., 2005). Son dönemlerde petrol türevli dolgu malzemelerindeki fiyat dalgalanmaları, araştırmacıları alternatif kaynaklara yönlendirmiştir. Bu bağlamda, mineral kökenli ve geri dönüştürülebilir malzemelerin kullanımına ilişkin çalışmalar artış göstermektedir (Akçakale vd., 2010; Sadeghi Ghari ve Jalali-Arani, 2016). Kauçuk endüstrisinde tarımsal atıkların ve mineral bazlı malzemelerin dolgu maddesi olarak değerlendirilmesi yeni bir yaklaşım olmamakla birlikte, bu alandaki araştırmalar giderek çeşitlenmektedir (De vd., 2013; Gui vd., 2016).

Bir çalışmada araştırmacılar, selüloz bazlı aktif karbon üretimi ve kauçuk bileşiklerdeki uygulamalarını incelemişlerdir. Çinko klorür ve fosforik asit aktivasyon ajanları kullanılarak sentezlenen aktif karbonlar, BET, FE-SEM, EDS haritalama ve FTIR teknikleriyle karakterize edilmiştir. Üretilen iki farklı aktif karbon tipi, %0-20 aralığında değişen oranlarda NBR/NR kauçuk karışımlarına ilave edilmiş ve geleneksel karbon siyahı ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, aktif karbon katkısının bileşiklerin sertlik, çekme dayanımı ve uzama özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, aktif karbonun çevre dostu bir alternatif dolgu maddesi olarak endüstriyel uygulamalarda kullanım potansiyelini kanıtlamıştır. Çalışma, sürdürülebilir malzeme geliştirme alanında önemli katkılar sağlamaktadır (Bülbül ve Ergün, 2024).

Ayhan ve ark. SBR 1502 matrisinde kömür külü kullanımını araştırmışlardır. Kömür külü oranı arttıkça çapraz bağlanma yoğunluğunun arttığını ve çatlak yüzeylerde homojen dağılım gösteren küçük gruplar oluştuğunu tespit etmişlerdir. Çekme testlerinde dolgu malzemesinin matristen ayrılma noktalarını gözlemlemişlerdir. Kömür külünün yüksek yoğunluğu nedeniyle yoğunlukta beklenen azalmanın gerçekleşmediğini, ancak bu atık malzemenin SBR bileşiklerinde etkili bir dolgu maddesi olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir (Ayhan, 2022).

Araştırmacılar, stiren bütadien kauçuk (SBR) esaslı referans bileşiğe %0, %5, %10 ve %15 oranlarında karbonize çam kozalağı külü ilave ederek dört farklı bileşik hazırlamışlardır. Vulkanizasyon sonrasında bileşiklerin sertlik, yoğunluk, çekme

dayanımı, uzama yüzdesi, yırtılma dayanımı ve çapraz bağ yoğunluğu ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Çapraz bağ yoğunluğunun mekanik özellikler üzerindeki etkilerini detaylı olarak incelemişlerdir. Yaptıkları karşılaştırmalı analizlerde, karbonize çam kozalağı külü ilavesinin sertlik ve çapraz bağ yoğunluğunu artırdığını, aynı zamanda yoğunluk, çekme dayanımı, yırtılma dayanımı ve uzama yüzdesi özelliklerinde de iyileşme sağladığını tespit etmişlerdir. Mekanik özelliklerdeki değişimleri açıklamak amacıyla, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılım spektroskopisi (EDS) ile bileşiklerin kırık yüzeylerini karakterize etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar, karbonize çam kozalağı külünün SBR esaslı kauçuk bileşiklerde performans artırıcı bir dolgu maddesi olarak kullanılabileceğini göstermiştir (Bülbül ve Büyük, 2022).

Bülbül ve ark., stiren-butadien kauçuğuna farklı oranlarda (%0-5-10-20) mika tozu ilave ederek dört farklı bileşik üretmişlerdir. Vulkanizasyon işlemi sonrasında, üretilen bileşiklerin çapraz bağ yoğunluğu, sertlik, yoğunluk, çekme dayanımı, uzama yüzdesi ve yırtılma direnci gibi temel mekanik özelliklerini ölçmüşlerdir. Çapraz bağ yoğunluğunun mekanik özellikler üzerindeki etkilerini detaylı olarak tartışmışlardır. Yaptıkları kapsamlı analizler sonucunda, mika tozu ilavesinin çapraz bağ yoğunluğunu önemli ölçüde artırdığını tespit etmişlerdir. Artan çapraz bağ yoğunluğunun bileşiklerin sertlik değerlerini yükselttiğini, aynı zamanda çekme dayanımı, yırtılma direnci ve uzama yüzdesi gibi kritik mekanik özelliklerde belirgin iyileşmeler sağladığını gözlemlemişlerdir. Elde ettikleri deneysel sonuçlar doğrultusunda, mika tozu kullanımının karbon siyahı miktarını azaltma potansiyeli taşıdığını belirlemişlerdir. Bu önemli bulgular, mika tozunun kauçuk endüstrisinde ekonomik ve performansı yüksek bir alternatif dolgu maddesi olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur (Bülbül ve Ergün, 2022).

Araştırmacılar, farklı dolgu malzemelerinin kauçuk bileşiklerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Delgado ve arkadaşları, Clusia multiflora ağacından elde edilen talaş atığını (CMS) SBR 1502 matrisinde %40 phr oranında kullanmış ve maleatlı polietilen (MAPE) ile uyumlulaştırmışlardır. Yaptıkları karşılaştırmalarda, CMS'nin silikaya göre mekanik performansı düşürdüğünü, ancak kalsiyum karbonat ve kaolin ile benzer sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir. MAPE ilavesinin çekme dayanımı, yırtılma direnci ve aşınma direncinde hafif iyileşmeler sağladığını tespit etmişlerdir (Delgado vd., 2020).

Bülbül, NBR esaslı referans kauçuk bileşiğine (FKK0) karbürize edilmiş fındık kabuğu külü (FKK) ilave edilerek dört farklı bileşik (%0, %10, %15 ve %20)

hazırlanmıştır. Vulkanizasyon sonrasında bileşiklerin mekanik ve fiziksel özellikleri detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan analizlerde, FKK ilavesinin bileşiklerin çapraz bağ yoğunluğunu artırdığı tespit edilmiştir. Çapraz bağ yoğunluğundaki artışın sertlik değerlerini yükselttiği, aynı zamanda kopma dayanımı ve kopma uzaması üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu gözlemlenmiştir. Yoğunluk ölçümleri sonucunda, FKK miktarı arttıkça bileşiklerin yoğunluğunun da arttığı belirlenmiştir. SEM analizleri ile dolgu miktarının artmasına bağlı olarak kauçuk matris içindeki dağılım homojenliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Maliyet analizleri, FKK kullanımının üretim maliyetlerini önemli ölçüde düşürdüğünü göstermiştir. Elde edilen bulgular, karbürize fındık kabuğu külünün kauçuk endüstrisinde ekonomik ve fonksiyonel bir dolgu maddesi olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur (Bülbül, 2019).

Diğer bir çalışmada araştırmacılar, meşe ağacı odun külünün NR/SBR tipi elastomer malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Genel kompozisyona (G) %16, %32, %48 ve %64 oranlarında odun külü ilave ederek beş farklı bileşik hazırlamışlardır. Mekanik test sonuçlarını ve üretim maliyetlerini hem kendi aralarında hem de G bileşiği ile karşılaştırmışlardır. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile bileşiklerin kırık yüzeylerini ve dolgu malzemelerinin kauçuk matristeki dağılımını analiz etmişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda, odun külü ilaveli bileşiklerin çekme ve yırtılma dayanımı, aşınma miktarı, bükülme kabiliyeti, birim uzama miktarı ve yoğunluk değerlerinde G bileşiğine göre artış gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, sertlik değerlerinde ve malzeme maliyetlerinde (üretim maliyeti) azalma tespit etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarla, odun külünün kauçuk bileşiklerde hem performans iyileştirici hem de maliyet düşürücü bir dolgu maddesi olarak kullanılabileceğini göstermişlerdir (Bülbül vd., 2019).

Sadeghi ve ark. doğal kauçuk (NR) bileşiklerinde nano- CaCO_3 ve nano-kil kullanımını incelemişlerdir. Nano- CaCO_3 oranı arttıkça birim uzama ve çekme kuvvetinin arttığını, nano-kil oranı arttıkça ise çekme kuvvetinin arttığını ancak birim uzamanın azaldığını belirlemişlerdir. Her iki dolgu malzemesinin de sertliği artırdığını gözlemlenmiştir (Sadeghi Ghari ve Jalali-Arani, 2016).

Bu çalışmada, NR-SBR elastomer esaslı kauçuk malzemelerde alternatif dolgu malzemelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Araştırmacılar, geleneksel dolgu malzemeleri olan silika (SiO_2) ve kalsit (CaCO_3) yerine odun külü, yüksek fırın baca tozu, pirinç kabuğu ve rejenere kauçuk kullanarak farklı karışım oranlarında (%10-40) deneyler gerçekleştirmiştir. Mekanik test verileri, bu

oranlardaki dolgu malzemelerinin sertlik, çekme dayanımı, uzama ve boyut stabilitesi gibi özellikleri iyileştirdiğini göstermiştir. Ancak %30-40 oranlarındaki yüksek dolgu miktarlarında aşınma direncinin düştüğü gözlemlenmiştir. Ekonomik analizlerde, atık kökenli dolgu malzemelerinin üretim maliyetlerini önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir. Özellikle odun külü ve pirinç kabuğu gibi doğal atıkların hem çevresel hem de ekonomik avantajlar sağladığı kanıtlanmıştır. Bu sonuçlar, sürdürülebilir kauçuk üretimi için alternatif dolgu malzemelerinin uygulanabilirliğini ortaya koymuştur (Bülbül, 2014).

Louis ve ark. farklı sıcaklıklarda (420°C, 520°C ve 900°C) yakılan pirinç kabuğu küllerinin (RHA) SBR-1502 kauçuğuna etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, 520°C'de yakılan RHA'nın Si-OH grupları sayesinde en iyi mekanik performansı gösterdiğini, diğer sıcaklıklarda üretilen küllerin ise orta düzeyde performans sergilediğini belirlemişlerdir. Bu bulgular ışığında RHA 520'nin ekonomik ve etkili bir yarı-takviye dolgu malzemesi olabileceği sonucuna varmışlardır (Louis vd., 2012).

Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda, yer fıstığı kabuğundan elde edilen dolgu maddesinin karbonizasyon parametrelerinin doğal kauçuk esaslı bileşiklerin performans karakteristikleri üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Deneysel bulgulara, dolgu maddesi miktarındaki artışa paralel olarak bileşik malzemelerin çekme direnci, sertlik değerleri ve aşınma dayanımında önemli ölçüde artışlar gözlemlendiğini ortaya koymuşlardır. Ancak, bu iyileşmelere karşın, malzemelerin basma dayanımı, yorulma ömrü ve deformasyon kapasitesini gösteren uzama yüzdelerinde belirgin düşüşler kaydetmişlerdir (Ayo vd., 2011).

Ichazo ve ekibi, doğal kauçuk bileşiklerinde ahşap unu kullanımının vulkanizasyon süreçleri ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, ahşap unu ilavesinin kavrulma ve kürlenme sürelerini uzattığını ve mekanik özelliklerde genel bir iyileşme sağladığını gözlemlemişlerdir. Ancak, çekme dayanımında bir miktar azalma tespit etmişlerdir. Kontrol grubu olarak kullandıkları karbon siyahı içeren bileşiklerin ise dolgu-elastomer etkileşimlerinin güçlü olması nedeniyle daha kısa kavrulma süresi gösterdiğini ve mekanik özelliklerde belirgin artışlar sağladığını belirlemişlerdir. Bu sonuçlarla, farklı dolgu malzemelerinin kauçuk bileşiklerin performansını nasıl etkilediğini anlamak açısından önemli veriler sunmuşlardır (Ichazo vd., 2006).

Literatür taramalarında görüldüğü üzere, organik malzemelerin dolgu malzemesi olarak kullanılması yeni bir yöntem değildir. Organik maddelerin dolgu olarak kullanılması, çevre kirliliğini azaltma potansiyeli ve ekonomik açıdan sağladığı faydalar

nedeniyle son yıllarda giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Organik dolgu malzemeleri, sadece çevresel sürdürülebilirlik açısından değil, aynı zamanda endüstriyel üretim süreçlerinde maliyetlerin düşürülmesi açısından da dikkate değer avantajlar sunmaktadır. Bu tür dolgu malzemelerinin kullanımı, geri dönüşüm ve atık yönetimi konularında da önemli katkılar sağlayarak, endüstriyel uygulamalarda çevre dostu yaklaşımların benimsenmesini teşvik etmektedir.

Aktif karbon üretiminde malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kullanılan hammadde türü, aktivasyon ajanları ve uygulanan yöntemler tarafından doğrudan etkilenmektedir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, bu malzemelerin üretiminde genellikle iki temel yaklaşımın öne çıktığı görülmektedir: kimyasal aktivasyon ve fiziksel aktivasyon. Kimyasal aktivasyonda fosforik asit, çinko klorür veya potasyum hidroksit gibi kimyasallar kullanılırken, fiziksel aktivasyon ise genellikle iki aşamalı bir süreç şeklinde gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada karbonizasyon işlemi uygulanmakta, ardından su buharı veya karbondioksit gibi oksitleyici gazlarla gözenek yapısı geliştirilmektedir (Hamid, 2022; Mourão vd., 2011). Li ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, gözenekli yapıdaki kenevir bitkisinden aktif karbon üretimi için fiziksel ve kimyasal aktivasyon yöntemleri karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar, çinko klorür ($ZnCl_2$) ile kimyasal aktivasyon ve karbondioksit (CO_2) ile fiziksel aktivasyon tekniklerini kullanarak elde edilen aktif karbonların yapısal özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan analizler sonucunda, kimyasal aktivasyon yöntemiyle üretilen aktif karbonların daha yüksek yüzey alanı, gelişmiş gözenek yapısı ve üstün gaz adsorpsiyon kapasitesi sergilediği tespit edilmiştir. Bu bulgular, $ZnCl_2$ ile yapılan kimyasal aktivasyonun, CO_2 ile gerçekleştirilen fiziksel aktivasyona kıyasla daha etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır (D.-C. Li ve Jiang, 2017).

Bir yüksek lisans tez çalışmasında araştırmacı, hatmi çiçeği ve karaçam kozalağı gibi doğal bitkisel materyallerden kimyasal aktivasyon yöntemiyle aktif karbon üretmiştir. NaOH ile muamele edilen bu biyokütleler, farklı sıcaklıklarda ($600^{\circ}C$ ve $700^{\circ}C$) işleme tabi tutularak karakterize edilmiştir. Üretilen aktif karbonların yapısal özellikleri SEM, BET, EDX, FTIR ve ATR analiz teknikleri kullanılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, hatmi çiçeğinden üretilen aktif karbonun $600^{\circ}C$ 'de $21,33 \text{ m}^2/g$, $700^{\circ}C$ 'de ise $18,62 \text{ m}^2/g$ yüzey alanına sahip olduğu belirlenmiştir. Karaçam kozalağından elde edilen aktif karbon ise $600^{\circ}C$ 'de $79,48 \text{ m}^2/g$, $700^{\circ}C$ 'de $14,64 \text{ m}^2/g$ yüzey alanı değerleri göstermiştir. Bu sonuçlar, aktivasyon

sıcaklığının aktif karbonların yüzey özellikleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur (Sandaloğlu, 2025).

İnce, bal kabağı kabuklarını çinko klorür ile aktif karbona (PPAC) dönüştürmüş, ardından manyetik özellik kazandırarak (PPMAC) siprofloksasin (CIP) gideriminde kullanmıştır. Karakterizasyon analizleri yüksek yüzey alanı ve element yüklemesini doğrulamış, adsorpsiyon çalışmalarında pH, süre, derişim ve doz etkilerini incelemiştir. Nötr-bazik koşullarda ve uzun karıştırmada en yüksek verimi elde etmiş, kinetik sonuçların sahte ikinci derece modele, izoterm sonuçlarının ise Langmuir modele uyduğunu göstermiştir. Maksimum kapasiteyi 69,9 mg/g olarak hesaplamış ve bal kabağı kabuklarından üretilen manyetik aktif karbonun atık sulardan CIP gideriminde etkili olduğunu ortaya koymuştur (İnce, 2025).

Tokgöz, organik atık olan kayısı çekirdeği kabuğundan hidrotermal karbonizasyon yöntemiyle aktif karbon üretimi gerçekleştirilmiştir. Ön işlem olarak öğütülen kabuklar, 240-300°C aralığında, 10 bar basınç altında ve 24 saat süreyle hidrotermal işleme tabi tutulmuştur. Elde edilen hidrokömürler KOH ile aktive edilerek 700°C'de inert atmosferde ısıl işlem uygulanmıştır. Karakterizasyon çalışmaları BET, SEM-EDS, XRD ve FTIR analiz teknikleriyle yürütülmüştür. Analiz sonuçları, başlangıçta 6,752 m²/g olan yüzey alanının aktivasyon sonrası 658,5564 m²/g'a ulaştığını göstermiştir. SEM görüntüleri, mikro ve mezo gözenek oluşumunu doğrularken, EDS verileri karbon içeriğinin %59,83'ten %85'in üzerine çıktığını ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, hidrotermal karbonizasyon ve KOH aktivasyonunun kayısı çekirdeği kabuğundan yüksek yüzey alanlı aktif karbon üretimi için etkili bir yöntem olduğunu kanıtlamıştır (Tokgöz, 2025).

Araştırmacı, meyve kabuklarından aktif karbon sentezi için KOH, H₃PO₄ ve H₃BO₃ kimyasallarını kullanarak detaylı bir inceleme gerçekleştirmiştir. SEM-EDX, XPS, Raman ve N₂ adsorpsiyon analizleri sonucunda, KOH ile aktive edilen örneklerin 1465 m²/g gibi yüksek bir yüzey alanı sergilediğini belirlemiştir. Bu kapsamlı çalışmada, meyve kabuklarının aktif karbon üretimi için oldukça uygun bir hammadde kaynağı olduğunu ortaya koymuştur (Kaya Çelebi, 2024).

Araştırmacılar, doğal kauçuk (NR) ve pirinç nişastası (RS) temelli biyobileşik köpük levhalarını Dunlop yöntemiyle üretmiş ve aktif karbon (AC) ile takviye etmişlerdir. 0-20 phr aralığında AC içeren numunelerde yaptıkları analizlerde, artan AC oranının köpük yoğunluğu, mekanik dayanım ve termal özellikleri iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir. Özellikle 15 phr AC içeren numunelerin, muz depolama testlerinde

etilen emilim kapasitesiyle meyve raf ömrünü uzattığını tespit etmişlerdir. Yaptıkları karşılaştırmalı çalışmalarda, geliştirilen biyobileşiğin ağırlık kaybı, posa sertliği ve renk stabilitesi gibi parametrelerde ticari köpüklere göre üstün performans sergilediğini belirlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarla, bu malzemenin özellikle muz gibi klimakterik meyvelerin ambalajlanmasında etkili bir çözüm sunabileceğini göstermişlerdir (Nooun vd., 2023).

Batmaz, çörek otu pres kekinden aktif karbon üretimi için farklı kimyasallar ($ZnCl_2$, K_2CO_3 , H_3PO_4 , H_3BO_3) ve iki emdirme oranı (2:1 ve 1:1) kullanarak bir çalışma yürütmüştür. Yaptığı analizlerde, $ZnCl_2$ ile 2:1 oranında üretilen aktif karbonun $755 \text{ m}^2/\text{g}$ yüzey alanına sahip olduğu ve bu değerin en yüksek performansı gösterdiği belirlemiştir. H_3BO_3 ile aktive edilen örneklerde ise $58,1 \text{ Å}$ ortalama gözenek çapı ölçülmüş olup, bu sonuç en geniş gözenek yapısına işaret etmiştir. Araştırmada, üretilen aktif karbonların tekstil boyası (Deep Red) adsorpsiyon kapasitelerini de değerlendirmiştir. $ZnCl_2$ ile 2:1 oranında üretilen aktif karbonun $85,5 \text{ mg/g'lık}$ adsorpsiyon kapasitesiyle en yüksek performansı sergilediğini gözlemlemiştir. Bulduğu bulgularla, çörek otu pres kekinin aktif karbon üretimi için uygun bir hammadde olduğunu ve özellikle $ZnCl_2$ ile aktive edildiğinde yüksek verim sağladığını ortaya koymaktadır (Batmaz, 2022).

Bülbül ve ark. kara kavak odun atıklarını çinko klorür ve fosforik asit kullanarak kimyasal aktivasyon yöntemiyle aktif karbona dönüştürmüşlerdir. Üretilen aktif karbonun fiziksel ve kimyasal özelliklerini piknometre yoğunluk ölçümleri, FESEM, FTIR ve EDS analizleriyle karakterize etmişlerdir. Yaptıkları karşılaştırmalı çalışmalarda, odun atığı kaynaklı aktif karbonun ticari olanlara kıyasla daha düşük yoğunluk ve daha gözenekli bir yapı sergilediğini tespit etmişlerdir. EDS analiz sonuçları, üretilen aktif karbonun daha saf bir bileşime sahip olduğunu ortaya koymuştur. Elde ettikleri bulgularla, odun atıklarının aktif karbon üretimi için uygun bir hammadde olduğunu ve bu yöntemle üretilen aktif karbonların ticari ürünlerle rekabet edebilecek nitelikte olduğunu göstermişlerdir (Bülbül ve Ergün, 2022).

Araştırmacılar, farklı atık kaynaklı dolgu malzemelerinin kauçuk bileşiklerdeki performanslarını karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Greenough ve ekibi, tavuk tüyü unu ve kanola proteininden üretilen biyokömürün karbon siyahı alternatifi olarak kullanım potansiyelini değerlendirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, biyokömür dolgulu bileşiklerin mekanik ve fizikokimyasal özellikler açısından karbon siyahına kıyasla daha düşük performans sergilediğini tespit etmişlerdir. Bu sonuçlar doğrultusunda, biyokömür

yüzey modifikasyonlarının araştırılması gerektiğini öne sürmüşlerdir (Greenough vd., 2022).

Hamid, zeytin çekirdeği atıklarından aktif karbon sentezi için H_2SO_4 konsantrasyonu, karıştırma süresi ve piroliz sıcaklığının optimizasyonunu sistematik olarak incelemiştir. Çalışmada, %10-40 H_2SO_4 konsantrasyon aralığında, 4-16 saat karıştırma süresiyle ve 550-650°C piroliz sıcaklıklarında aktif karbon üretimi gerçekleştirmiştir. Üretilen adsorbanı iletkenlik, FTIR, SEM ve BET analizleriyle karakterize etmiştir. Optimizasyon çalışmaları sonucunda en yüksek verimin %40 H_2SO_4 , 16 saat karıştırma ve 650°C piroliz koşullarında elde edildiğini tespit etmiştir. Bu optimum koşullarda sentezlenen aktif karbonu, pH 5'te 60 dakika karıştırma süresiyle doğal su örneklerindeki kurşun (Pb) tayini için kullanmıştır. Elde ettiği sonuçlarla, optimize edilmiş koşullarda üretilen zeytin çekirdeği kaynaklı aktif karbonun çevresel örneklerdeki ağır metal analizleri için etkili bir adsorban olduğunu göstermiştir (Hamid, 2022).

Araştırmacı, atık kamyon lastikleri ve siyah çay yaprakları karışımlarından aktif karbon üretmiştir. 800°C'de $ZnCl_2$ ve KOH kullanarak yaptığı çalışmada, en yüksek yüzey alanının (527 m²/g) 1:3 oranında $ZnCl_2$ ile elde edildiğini gözlemlemiştir. Çay yaprağı oranı arttıkça karbon içeriğinin arttığını, $ZnCl_2$ 'nin daha yüksek saflık sağladığını saptamıştır. Sonuçlarla, bu atıkların etkili aktif karbon üretiminde kullanılabileceğini ortaya koymuştur (Güçlü Aksakal, 2021).

Bir diğer çalışmada, araştırmacılar pamuk sapından (CS) süperkapasitör elektrot malzemesi olarak kullanılmak üzere aktif karbon (AC) üretimi için tek ve iki adımlı aktivasyon proseslerini karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri bulgular, 600°C'de tek adımlı prosesle üretilen AC'nin 1342,93 m²/g yüzey alanı ve %97 mezo gözenek oranıyla üstün özellikler sergilediğini ortaya koymuşlardır Bu örneklerin 338 F/g gibi yüksek bir özgül kapasitans değeri gösterdiğini gözlemlemiştir (Cheng vd., 2021).

Lay ve ark. DLAC'ları (ölü yaprak aktif karbonu) farklı sıcaklıklarda (550-1000°C) piroliz yöntemiyle sentezlemiş ve CO_2 ile aktive etmişlerdir. 1000°C'de üretilen DLAC'ın 28,86 µm partikül boyutu, %82,58 karbon saflığı ve 1,588 g/cm³ yoğunluğa sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Kauçuk bileşiklere %5-15 oranlarında DLAC ekleyerek yaptıkları testlerde, özellikle %15 DLAC içeren numunelerde çekme dayanımında %8, M100 ve M300 değerlerinde %40 iyileşme gözlemlemiştir. Elde ettikleri sonuçlarla, DLAC'ın karbon siyahına ekonomik ve çevre dostu bir alternatif olabileceğini göstermişlerdir (Lay vd., 2020).

Taşçı, yaptığı çalışmada Van yöresinden temin ettiği vişne çekirdeği atıklarını adsorban madde olarak kullanmıştır. KOH kimyasal aktivasyon yöntemiyle hazırladığı aktif karbonun karakterizasyon analizlerini gerçekleştirmiştir. Yaptığı ölçümler sonucunda, ürettiği aktif karbonun $1883,5788 \text{ m}^2/\text{g}$ gibi oldukça yüksek bir BET yüzey alanına sahip olduğunu belirlemiştir. Elde ettiği bu sonuçlarla, vişne çekirdeği atıklarının yüksek performanslı aktif karbon üretimi için son derece uygun bir hammadde kaynağı olduğunu ortaya koymuştur (Taşçı, 2020)

Patil ve ark. otomotiv sektöründe yakıt hortumu ve boru parçaları üretmek için kullanılan PVC/NBR karışımlarında aktif karbon dolgu malzemesinin etkilerini incelemişlerdir. Farklı lignoselülozik kaynaklardan (areka cevizi kabuğu, hindistan cevizi kabuğu ve yaprakları) H_3PO_4 ile 1:1 oranında aktif karbon üretmişlerdir. Yaptıkları testlerde, üretilen aktif karbonların petrol şişme testi (ASTM D-471-98) sonuçlarına göre ticari karbon siyahı ile karşılaştırılabilir performans gösterdiğini tespit etmişlerdir. Hindistan cevizi kabuğu bazlı aktif karbonla güçlendirilmiş NBR bileşiklerin sertlik değişiminde en az sapmayı, areka cevizi kabuğu bazlı olanların ise yoğunluk değişiminde en iyi sonuçları verdiğini gözlemlemişlerdir. 20-PHR esaslı hazırlanan bileşiklerin performansını yakın analiz sonuçlarıyla ilişkilendirmeye çalışmışlardır. Elde ettikleri bulgularla, aktif karbon yüzeyindeki modifikasyonların kauçukla uyumluluğu artırdığını ve bu malzemelerin endüstriyel uygulamalar için potansiyel taşıdığını göstermişlerdir (Patil vd., 2018).

Araştırmacılar, karides kabuğu atığından fosforik asit (H_3PO_4) aktivasyonu yoluyla ağ benzeri gözenekli aktif karbon (PS-Ac) sentezlemişlerdir. N_2 adsorpsiyonu, Raman, HR-TEM ve SEM-EDS analizleriyle karakterize edilen PS-Ac'nin $4,5 \text{ nm}$ ortalama gözenek boyutu ve $560,6 \text{ m}^2/\text{g}$ BET yüzey alanına sahip mezogözenekli bir yapı sergilediğini tespit etmişlerdir. Malzemenin adsorpsiyon performansını değerlendirmek için metilen mavisi (MB) üzerinde yaptıkları çalışmalarda, pH, başlangıç konsantrasyonu, temas süresi ve sıcaklık parametrelerinin etkilerini incelemişlerdir. Elde ettikleri deneysel verilerin Langmuir izotermi ve psödo-ikinci derece kinetik modele uyum gösterdiğini, 826 mg/g 'lık yüksek adsorpsiyon kapasitesiyle literatürdeki birçok aktif karbondan üstün performans sergilediğini belirlemişlerdir (X. Liu vd., 2018).

Munirah ve ark. bambu bazlı aktif karbon (AC) ile takviye edilmiş SBR kauçuk bileşiklerin performansını incelemişlerdir. 10-50 phr AC içeren numunelerde yapılan testler, 20 phr dolgu oranının optimum kürlenme ve mekanik özellikler sağladığını göstermiştir. AC ilavesinin çekme mukavemetini ve modül değerlerini artırdığı,

morfolojik analizlerin ise iyi matris-dolgu etkileşimini doğruladığı belirlenmiştir. Çalışma, bambu AC'nin SBR bileşikler için etkili bir takviye malzemesi olduğunu ortaya koymuştur (Munirah vd., 2016).

Timur yaptığı araştırmada, meşe palamudu kabuğundan fosforik asit ve çinko klorür kullanarak aktif karbon üretmiştir. En yüksek yüzey alanlarını sırasıyla 1000 m²/g (H₃PO₄) ve 1152 m²/g (ZnCl₂) olarak elde etmiştir. Çinko klorürün daha yüksek mikrogözenek hacmi sağladığını belirlemiştir. Yaptığı adsorpsiyon testlerinde, yüzey kimyasının boya tutulumunda kritik rol oynadığını gözlemlemiştir. Çalışma, bu atık malzemenin ekonomik bir aktif karbon kaynağı olduğunu kanıtlamıştır (Timur vd., 2010).

Bir diğer çalışmada, araştırmacılar indistan cevizi kabuğundan farklı sıcaklıklarda (400-1000°C) karbonize edilmiş örneklerin 900°C'de buhar aktivasyonu (30-120 dakika) aktif karbona dönüştürülmesini incelemişlerdir. Sonuçlar, yüksek karbonizasyon sıcaklığı ve uzun aktivasyon süresinin (1000°C, 120 dakika) 1926 m²/g yüzey alanı ve 1,26 cm³/g gözenek hacmi gibi üstün özellikler sağladığını göstermiştir. Çalışmada, optimal proses parametrelerinin yüksek performanslı aktif karbon üretimindeki kritik rolünü kanıtlamışlardır (W. Li vd., 2008).

Çizelge 2.1. Bazı biyokütle atıklarından üretilen aktif karbonların üretim parametreleri ve özellikleri (Helvacı ve Korkmaz, 2024).

Hammadde	Aktivasyon Kimyasalı	Aktivasyon Sıcaklığı (°C)	Yüzey Alanı (BET; m ² /g)
Zeytin çekirdeği	H ₃ PO ₄	500	1133
Muz kabuğu atıkları	H ₃ PO ₄	845	1173,16
Nişasta	Na ₂ CO ₃ /KOH	300/400	160,6
Üzüm küspesi	H ₃ PO ₄	400	1455
Pamuk sapı	H ₃ PO ₄	500-800	1720
Kiraz çekirdeği	K ₂ CO ₃	850	-
Çay atıkları	H ₃ PO ₄	450	701,8
Elma kabuğu	ZnCl ₂	-	794
Mısır koçanı	H ₂ O ₂	450	500-1500
Kenevir sapı	KOH	800	337,5

Çizelge 2.1.(devam) Bazı biyokütle atıklarından üretilen aktif karbonların üretim parametreleri ve özellikleri (Helvacı ve Korkmaz, 2024).

Hammadde	Aktivasyon Kimyasalı	Aktivasyon Sıcaklığı (°C)	Yüzey Alanı (BET; m²/g)
Vişne çekirdeği	ZnCl ₂	700	1704
Kenevir kamışı	H ₃ PO ₄	400	1500
Tekstil atıkları (Co/PE)	Hidrotermal/KOH	700	363
Tekstil atıkları	ZnCl ₂	500	1795
Tekstil atıkları	CO ₂ (inert)	850	788
Kimyon bitkisi atıkları	H ₃ PO ₄ (Mikrodalga, 1000W)	-	>1000
Nar kabuğu	KOH	600	900,12
Fındık kabuğu	%30 K ₂ CO ₃ + %5 borik asit	900	780,31
Fındık kabuğu	-	549	647
Fındık kabuğu	ZnCl ₂	-	780
Kakao kabuğu	ZnCl ₂	-	615
Kakao kabuğu	K ₂ CO ₃	-	490
Kakao kabuğu	KOH	-	-
Antep fıstığı kabuğu	CO ₂	900	778,1
Hindistan cevizi kabuğu	CO ₂	600	1700
Hindistan cevizi kabuğu	Buhar	1,000	1962
Zeytin çekirdeği	Buhar	850	813
Badem ağacı (budama)	Buhar	850	1080
Badem kabuğu	Buhar	850	601
Ceviz kabuğu	Buhar	850	792
Fıstık kabuğu	Buhar	600	253

3. POLİMERLER

Polimerler, tekrarlanan yapısal birimlerden oluşan büyük moleküllerdir. Bu yapısal birimlere "monomer" denir ve birbirleriyle kimyasal bağlarla birleşerek uzun ve zincir benzeri moleküler yapılar oluştururlar. Polimer malzemeler genel olarak ekonomiklik, hafiflik, elastikiyet ve mekanik özellikler açısından avantajlara sahiptir (Timur vd., 2010).

Çeşitli kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan yapıları nedeniyle çoğu zaman dayanıklılıkları düşüktür. Düşük sıcaklıklarda yumuşayabilir ve şekil alabilirler, termodinamik olarak stabildirler ve korozyona dayanıklıdır. Staudinger'in zamanından önce "polimer ağı" kavramı sınırlı sayılıyordu ancak makro moleküler hipotezle birlikte polimerin moleküler yapısının tüm gelişmelerde belirleyici olduğu anlaşıldı (Sabzekar vd., 2017). İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra savunma sanayinde polimerlerin kullanımı giderek çeşitlendi ve kurşun geçirmez yeleklerden gözlüklere kadar ürün yelpazesi giderek çeşitlendi. Otomotiv sektöründe plastik kullanımıyla aracın ağırlığının azaltılması ve metal kullanımının en aza indirilmesi amaçlanıyor. Diş hekimliği, moleküler biyoloji ve biyokimya gibi alanlarda da önemli bir malzeme grubu oluştururlar. Polimerler günlük hayattan endüstriyel alanlara kadar pek fazla alanda yaygın olarak kullanılmaya devam edecektir (Reynaud vd., 1999). Bu malzemeler, fiziksel şekillendirilebilirliklerine bağlı olarak termosetler, termoplastikler ve elastomerler olarak 3 gruba ayrılır (Karaağaç, 2014).

3.1. Termosetler

Termoset polimerler, kimyasal yapılarında bulunan yoğun çapraz bağlar sayesinde ağ benzeri bir yapı oluşturan ve şekillendirme işlemi sonrasında kalıcı olarak sertleşen polimer malzemelerdir. Bu polimerler bir kez biçimlendirildikten sonra tekrar ısıtıldıklarında yumuşamaz veya akışkan hale gelmezler. Bu özellik, polimer zincirleri arasında gerçekleşen kovalent çapraz bağların kalıcılığından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, çapraz bağlanma moleküler zincirlerin düzenli bir kristal yapı oluşturmalarını engellediğinden, termoset polimerler yalnızca amorf yapıdadır (Callister ve Rethwisch, 1999).

3.2. Termoplastikler

Termoplastik polimerler, ısı veya basınç uygulandığında fiziksel bağları zayıflayarak yumuşayan ve bu sayede şekillendirilebilen (Callister ve Rethwisch, 1999). Uygulanan dış etkenlerin ortadan kalkmasıyla birlikte bu polimerler yeniden katı hale geçer. Bu geçiş sırasında polimer zincirlerinin kimyasal yapısında herhangi bir değişiklik oluşmaz; süreç yalnızca fiziksel özellikler düzeyindedir (Fried, 2014).

Termoplastik polimerler, üretim süreçlerinde çapraz bağlanma reaksiyonlarına uğramamaları ve moleküller arası vulkanizasyonun gerçekleşmemesi nedeniyle elastomer ve termoset polimerlerden belirgin şekilde ayrılırlar (Young ve Lovell, 2011). Bu özellikleri, termoplastiklerin ısı ile tekrar tekrar işlenebilmesini ve şekillendirilebilmesini mümkün kılar (Allen, 1974).

3.3. Elastomerler

Elastomerler esnek ve elastik özellikleriyle bilinen polimer malzemelerdir. Bu malzemeler genleşme ve deformasyon sonrasında orijinal şekillerine dönme özelliğine sahiptir. Bu elastik özellikler, polimer zincirlerinin düzensiz dizilimi ve moleküler yapılarının elastik deformasyona uygunluğu ile ilgilidir. Elastomerler doğal kaynaklardan elde edilebileceği gibi sentetik olarak da üretilebilir (Mark, 2007). Doğal kauçuk bir elastomer örneğidir ve Hevea brasiliensis kauçuk ağacının özünden elde edilir. Sentetik elastomerler arasında stiren-butadien kauçuk (SBR), poliüretan, neopren, silikon kauçuk ve florokarbon elastomerler gibi birçok tür bulunmaktadır (George vd., 2016; Uluğ, 2011).

3.3.1. Kauçuk

Elastomerler, oda sıcaklığına yakın (22–23 °C) koşullarda, orijinal boyutlarının en az iki katı kadar uzayabilen ve bu kuvvet ortadan kalktığında eski şekline dönebilen polimerik malzemelerdir (“Elastomer Teknolojisi”, 2001). Bu üstün elastik davranış, elastomerlerin moleküler yapılarında yer alan düşük çapraz bağ yoğunluğundan kaynaklanır. Özellikle kauçuk esaslı malzemelerde gözlenen elastikiyet, hem zincirler arası düşük çapraz bağ seviyesine hem de polimer yapısının amorf karakterine bağlıdır. Gerilme altında uzayan polimer zincirleri, çapraz bağlar sayesinde kalıcı deformasyona uğramadan eski formlarına dönebilir. Ancak sıcaklık artışıyla birlikte bu malzemeler,

artan zincir hareketliliği sebebiyle termoplastik özellik göstermeye başlayabilir (Bülbül, 2014; Vahapoğlu, 2013)

Günümüzde kauçuk özellikli bileşik malzemelerin kullanım alanları, teknolojik ilerlemelerle birlikte genişlemektedir. Kauçuk malzemeler; otomotiv, beyaz eşya, inşaat, doğal gaz, tıp, havacılık, tekstil ve gıda gibi pek çok endüstriyel sektörde kritik rol oynamaktadır (Qu vd., 2012). Özellikle otomotiv sanayinde hem güvenlik hem de fonksiyonellik açısından önemli olan pek çok bileşen kauçuktan üretilmektedir. Bu alandaki örnekler arasında; lastikler, yakıt ve fren hortumları, silecek sistemleri, transmisyon kayışları, radyatör ve hava hortumları, contalar, titreşim sönümleyiciler, aks körükleri ve izolasyon malzemeleri yer almaktadır. Beyaz eşya sanayinde ise sıcak-soğuk su hortumları, körükler ve contalar gibi elemanlar, kauçuğun yoğun olarak kullanıldığı parçalardandır. Ayrıca elastomer yataklar, genleşme contaları ve özel amaçlı kauçuk parçalar; inşaat, uzay teknolojileri, tıp, elektronik ve ayakkabı sanayisi gibi alanlarda da önemli yer tutmaktadır (Boşnak, 2010; Vahapoğlu, 2013).

Kauçuk malzemeler genellikle dış ortam koşullarına maruz kaldıklarından, hava, UV ışınımı, kimyasal etkenler ve sıcaklık gibi çevresel faktörlerden olumsuz etkilenebilirler. Bu nedenle, kauçuk parçaların çevresel dayanımı ve hizmet ömrü, çeşitli test yöntemleriyle belirlenmektedir (Bohm vd., 2010). Son ürünün kullanım alanına uygun performans sergileyebilmesi için kauçuk reçetesine çok sayıda organik ve inorganik katkı maddesi eklenmektedir. Bu katkı ve dolgu malzemeleri sayesinde kauçuğa; yüksek elastikiyet, sertlik, yumuşaklık, farklı yoğunluk seçenekleri, aşınma ve kopma dayanımı, çekme mukavemeti ile yangın direnci gibi özellikler kazandırılmaktadır. Gelişen endüstriyel ihtiyaçlar doğrultusunda, bu özellikleri optimize edilmiş kauçuk malzemelere olan talep giderek artmaktadır (Mooibroek ve Cornish, 2000; Shit ve Shah, 2013; Vahapoğlu, 2013).

3.3.1.1. Doğal kauçuk

Doğal kauçuk, tropikal iklimlerde yetişen ve ticari anlamda en çok tercih edilen kauçuk türü olan *Hevea brasiliensis* ağacının sütlü özsuyu olan lateksten elde edilen biyolojik kökenli bir elastomerdir. Bu ağaç başta Güney Amerika olmak üzere Güneydoğu Asya ülkelerinde, özellikle Malezya, Endonezya ve Tayland gibi bölgelerde yaygın şekilde yetiştirilmektedir. Lateks üretimi, ağacın gövdesine V şeklinde açılan çiziklerden özel kaplara sızan sıvının toplanması ile gerçekleştirilir. Bu işlem sırasında

ağaca zarar verilmemesi ve lateksin kalitesinin korunması için özel teknikler uygulanmaktadır (Uluğ, 2011; Vahapoğlu, 2007). Toplanan lateks, çoğunlukla %30 oranında kauçuk içeren süt beyazı renkte, koloidal yapıda bir sıvıdır. Kauçuk üretimi için bu sıvı iki temel yöntemle işlenir. Birincisi konsantrasyon yöntemidir. Bu yöntemde, lateks içerisindeki kauçuk oranı santrifüjleme, buharlaştırma ya da mekanik kaymaklaştırma gibi fiziksel işlemlerle artırılarak yaklaşık %60 seviyelerine çıkarılır. Böylece hem daha yoğun kauçuk içeriği sağlanmış olur hem de yabancı maddelerden arındırılmış daha saf bir ürün elde edilir (Ahmed ve ElNashar, 2013). İkinci yöntem ise pıhtılaştırma esasına dayanır. Bu işlemde latekse asidik bir çözelti, genellikle formik asit, ilave edilerek koagülasyon sağlanır. Elde edilen pıhtı halindeki kauçuk, çeşitli kurutma yöntemleriyle işlenerek kullanılabilir forma getirilir. Kurutma işlemi açık havada doğal yollarla yapılabileceği gibi sıcak hava fırınları veya dumanlama yöntemiyle de gerçekleştirilebilir (Hosler vd., 1999; Öztürk, 2008). Kimyasal olarak doğal kauçuk, cis-1,4-poliizopren yapısındadır ve bu moleküler düzeni sayesinde mükemmel elastikiyet özellikleri gösterir. Ortalama moleküler ağırlığı 200.000 ile 400.000 arasında değişen doğal kauçuk, geniş molekül ağırlığı dağılımı sayesinde işlenebilirliği yüksek, mekanik performansı güçlü bir polimerdir. Camsı geçiş sıcaklığı oldukça düşük olan bu malzeme, soğuk ortamlarda bile elastikiyetini korur. Esneklik, çekme dayanımı, yırtılma direnci ve yorulma altında uzun ömürlü olma gibi mekanik üstünlükleri ile pek çok sanayi dalında tercih edilmektedir (Akçakale, 2008, 2017).

Doğal kauçuk, sentetik alternatiflerine kıyasla biyolojik olarak parçalanabilme ve yenilenebilir kaynak olması gibi çevresel avantajlara sahiptir. Bu yönüyle sürdürülebilir üretim hedefleyen sektörlerde ön plana çıkmaktadır. Sentetik kauçuklar çoğunlukla petrokimyasal kaynaklardan elde edildiği için fosil yakıtlara bağımlılık taşımakta ve çevresel etkileri daha fazladır. Buna karşılık doğal kauçuk, doğrudan tarımsal üretime dayalı bir malzeme olup ekolojik ayak izini azaltmada önemli bir rol oynar (Ayhan, 2022; Bülbül, 2014). Bu elastomerin kullanım alanları son derece geniştir. Otomotiv endüstrisinde lastik üretimi başta olmak üzere, süspansiyon sistemlerinde, conta ve hortum imalatında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Uçak lastikleri, ağır vasıta taşıtlarının lastikleri gibi yüksek yük taşıma kapasitesi gerektiren uygulamalarda da doğal kauçuk tercih edilmektedir (Jones ve Tinker, 1997; Nishi vd., 2022). Ayrıca elastikiyet ve biyouyumluluk özelliklerinden dolayı sağlık sektöründe de oldukça değerlidir. Cerrahi eldivenler, kateterler ve diğer steril medikal ürünlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun dışında konveyör bantlar, ayakkabı tabanları, kablolar, yer döşemeleri, süngerler,

yapıştırıcılar, balonlar, bebek emzikleri gibi günlük hayatla iç içe geçmiş birçok üründe de yer almaktadır. İnşaat sektöründe ise titreşim sönümleyici parçalar, deprem izolatörleri ve su yalıtım contaları gibi fonksiyonel uygulamalarda etkin rol oynamaktadır (Dayıoğlu, 2018; Ismail vd., 2011).

3.3.1.2. Sentetik kauçuk

20. yüzyılın başlarından itibaren yaşanan teknolojik gelişmeler, birçok sektörde malzeme taleplerini hızla artırmış, buna paralel olarak kauçuk kullanımında da büyük bir artış gözlemlenmiştir. Özellikle ulaşım, savunma sanayii, otomotiv ve elektronik gibi alanlarda teknolojinin ilerlemesi, bu sektörlerde kullanılan kauçuk temelli malzemelere yönelik ihtiyacın artmasına neden olmuştur (A Abdelsalam vd., 2024). Kauçuğun yüksek elastikiyet, dayanıklılık, sızdırmazlık ve titreşim sönümleme gibi fonksiyonel özellikleri, onu teknolojik uygulamalar için vazgeçilmez kılmıştır (Vahapoğlu, 2006). Doğal kauçuk üretiminin sadece belirli tropikal bölgelerde yapılabilmesi ve özellikle II. Dünya Savaşı döneminde bu kaynaklara erişimin kısıtlanması, bilim insanlarını doğal kauçuk yerine geçebilecek alternatif malzemeler aramaya yönlendirmiştir (Erkek, 2007; Zhao vd., 2020). Bu dönemde, laboratuvar ortamında elde edilebilen kauçuk benzeri polimerlerin geliştirilmesi, sentetik kauçukların ortaya çıkmasını sağlamıştır. Sentetik kauçuklar, petrokimya sanayisinin gelişimiyle birlikte çeşitlenmiş ve doğal kauçuğun sınırlı olduğu durumlarda stratejik bir alternatif olarak kabul edilmiştir (Bülbül, 2014; Vahapoğlu, 2006).

Sentetik kauçuklar, çeşitli monomerlerin kontrollü polimerizasyonu ile elde edilen, farklı fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip malzemelerdir. Bu kauçuk türleri, kullanım alanlarına göre özel olarak tasarlanabilmekte, belirli çevresel koşullara ya da mekanik yüklere karşı daha dayanıklı hale getirilebilmektedir (Tüzün, 2020). Doğal kauçuk, birçok alanda yeterli performans sergilese de bazı endüstriyel uygulamalar çok daha özel malzeme özellikleri gerektirdiğinden, bu talepler sentetik kauçukların geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Tek bir kauçuk türünün her alanda ideal performansı gösterememesi, çeşitli sentetik kauçuk formlarının araştırılmasını ve ticarileştirilmesini teşvik etmiştir (Vahapoğlu, 2006; Ward ve Khalaf, 2007).

Günümüzde, en yaygın şekilde tüketilen sentetik kauçuk türleri arasında Stiren-Bütadien Kauçuğu (SBR), Bütadien Kauçuğu (BR), Butil Kauçuğu (IIR), Etilen-Propilen Kauçuğu (EPM ve EPDM), İsopren Kauçuğu (IR), Kloropren Kauçuğu (CR),

Akrilonitril-Bütadien Kauçuğu (NBR) ve Polisülfid Kauçukları (PTR) yer almaktadır. Bu kauçuk türlerinin her biri, farklı endüstriyel ihtiyaçlara yönelik geliştirilmiş olup, belirli avantajlar sunar. Örneğin SBR, otomotiv lastiklerinde yaygın şekilde kullanılmakta olup aşınmaya karşı dayanıklılığı ile bilinirken, EPDM, ısıya ve ozona karşı gösterdiği yüksek direnç nedeniyle dış ortam uygulamalarında tercih edilmektedir. NBR, yağ ve kimyasal direncin önemli olduğu uygulamalarda kullanılmakta; IIR ise gaz geçirgenliği düşük olduğu için conta ve iç lastik gibi alanlarda tercih edilmektedir (Öztürk, 2008). Bu çeşitlilik, sentetik kauçukların teknolojik üretim süreçlerinde sağladığı esneklikten kaynaklanmaktadır. Farklı monomer kombinasyonları ve polimerizasyon yöntemleri sayesinde istenilen özelliklere sahip ürünlerin üretimi mümkün hale gelmiştir. Böylece hem ürün kalitesi artırılmış hem de üretim süreçlerinde maliyet etkinliği sağlanmıştır (Morton, 2013).

3.3.2. Kauçuklarda kullanılan dolgu malzemeleri

Kauçuk esaslı malzemelerde performansın artırılması, maliyetin düşürülmesi ve işleme özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla yaygın olarak çeşitli dolgu maddeleri kullanılmaktadır. Bu dolgu maddeleri genellikle kuru toz formunda olup, çok küçük tane boyutuna sahiptirler (Bülbül vd., 2019). Dolgular, yalnızca hacim artırıcı işlev görmekten ötesinde, kauçuk malzemenin mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini doğrudan etkileyebilen bileşenler olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, dolgu maddelerinin seçimi ve kullanım şekli, kauçuk bileşiklerin nihai performansını belirleyen temel faktörlerden biridir (Bülbül, 2014).

Kauçuk teknolojisinde kullanılan dolgu maddeleri genel olarak iki ana gruba ayrılmaktadır: siyah dolgular ve beyaz dolgular. Bu gruplandırma, dolgu maddesinin rengine dayalı olmakla birlikte, fonksiyonel farklılıkları da yansıtır. Siyah dolguların en yaygın örneği karbon siyahı iken, beyaz dolgular arasında silika başı çekmektedir. Bu maddeler sadece renklendirici değil, aynı zamanda yapısal olarak da kauçuk matrisine güç kazandıran bileşenlerdir (Bülbül, 2014; Dayıoğlu, 2018).

Dolgu maddelerinin etkinliği, birkaç temel parametreye bağlıdır. Bunlar arasında partikül boyutu, parçacıkların yüzey özellikleri, dolgu ile kauçuk arasındaki kimyasal etkileşimler ve işleme sırasında kullanılan teknikler yer almaktadır. Özellikle parçacık boyutunun küçülmesi, yüzey alanının artmasına ve böylece dolgu maddesinin kauçuk matrisi ile daha etkin bir şekilde etkileşmesine olanak sağlar. Bu da malzemenin sertlik,

çekme dayanımı, aşınma direnci gibi mekanik özelliklerini olumlu yönde etkiler (Akçakale, 2008; Büyük, 2019).

Dolgu maddeleri yalnızca fiziksel sınıflandırma açısından değil, fonksiyonel etkileri açısından da kategorize edilmektedir. Bu bağlamda dolgular üç gruba ayrılır:

- Aktif dolgu maddeleri (güçlendirici etkili): Karbon siyahı ve çökeltilmiş silika gibi maddeler bu gruba girer. Bu tür dolgular, kauçuğa üstün mekanik özellikler kazandırır.
- Yarı aktif dolgu maddeleri: Kalsiyum silikat, talk, sodyum alüminyum silikat ve kaolin bu sınıfa girer. Bu maddeler sınırlı düzeyde güçlendirme sağlar.
- Pasif (aktif olmayan) dolgu maddeleri: Kalsiyum karbonat gibi dolgular, yalnızca hacim artırmak ya da maliyeti düşürmek amacıyla kullanılır, mekanik katkıları sınırlıdır (Öztürk, 2008).

Bu dolgu türleri arasında özellikle karbon siyahı, kauçuk teknolojisinde tarihsel ve işlevsel açıdan büyük öneme sahiptir (Büyük, 2019). Karbon siyahının güçlendirici etkisi, ilk olarak 1904 yılında Mott ve Matthews tarafından İngiltere'de yapılan bir araştırmayla keşfedilmiştir. Bu çalışmada, karbon siyahı eklenen kauçuk bileşiklerinin, mekanik mukavemetinin anlamlı biçimde arttığı gözlemlenmiştir. Bu bulgunun pratik uygulamalara yansması ise oldukça hızlı olmuştur. 1910 yılında, otomobil lastiklerinin üretiminde karbon siyahı kullanılmaya başlanmış ve bu uygulama lastiklerin dayanıklılığını önemli ölçüde artırmıştır. Bu gelişme, yalnızca kauçuk endüstrisinde değil, modern ulaşım teknolojilerinin evriminde de dönüm noktası olmuştur (Akçakale, 2008; Bülbül, 2014).

3.3.2.1. Karbon Siyahı

Kauçuk endüstrisinde yaygın olarak kullanılan dolgu maddelerinin başında gelen karbon siyahı, yalnızca ekonomik avantajlarıyla değil, aynı zamanda kauçuk bileşiklerinin mekanik ve fiziksel performansını artırması bakımından da büyük önem taşımaktadır. İçeriğinde %95 oranında saf karbon bulunan bu madde, az miktarda da olsa oksijen, hidrojen ve azot gibi diğer elementleri de içermektedir. Bu oranlar, karbon siyahının kimyasal saflığını ve dolayısıyla performansını doğrudan etkiler. Dolgu

maddesi olarak seçilmesinde etkili olan başlıca özellikleri; partikül boyutu, yüzey alanı, safsızlık oranı ve yüzey aktivitesi gibi faktörlerdir (Ansarifard vd., 2005) Karbon siyahı, hidrokarbon içeren sıvı veya gaz fazdaki hammaddelerin termal ayrışması yoluyla elde edilir. Bu üretim süreci, kontrollü ortamlarda gerçekleştirilir ve karbonun yoğunlaşarak mikroskobik tanecikler oluşturmasını sağlar. Elde edilen bu parçacıklar küresel yapıya sahip olup genellikle elektron mikroskobu ile görüntülenebilecek kadar küçük boyuttadır (yaklaşık 10-500 nm). Karbon siyahı taneciklerinin birbirine bağlanarak oluşturduğu yapılar, agregalar ve aglomeralar şeklinde sınıflandırılır. Bu yapılar genellikle zincir benzeri bir dizilim sergiler ve morfolojik olarak üzüm salkımına benzetilebilir. Bu tür yapıların büyüklüğü ve dağılımı, kauçuğun elastikiyet, sertlik ve aşınma direnci gibi mekanik özelliklerini doğrudan etkiler (Park ve Cho, 2003).

Karbon siyahının yüzey kimyası da önemli bir faktördür. Özellikle yüzeyde bulunan oksijenli gruplar, karbon siyahının kauçuk matrisle etkileşim kapasitesini belirler. Örneğin, kanal siyahı olarak bilinen türler, yüksek oksijen içeriği sayesinde yüksek yüzey aktivitesine sahiptir. Buna karşın termal veya fırın tipi karbon siyahları daha düşük oksijen içeriğine sahip olduklarından yüzey aktiviteleri görece düşüktür. Bu farklılıklar, karbon siyahı ile kauçuk arasındaki bağlanma kapasitesini ve dolayısıyla nihai ürünün özelliklerini doğrudan belirler (Ayhan, 2022). Bir başka dikkat çekici nokta ise karbon siyahının üretim yöntemlerine göre gösterdiği farklılıkların, nihai kullanım alanlarını belirlemesidir. Örneğin; otomotiv lastikleri gibi yüksek aşınma direnci gerektiren uygulamalarda daha küçük partikül boyutuna sahip, yüksek yüzey alanlı karbon siyahları tercih edilirken, daha düşük performans gerektiren ürünlerde iri taneli ve düşük yapı yoğunluklu türler yeterli olmaktadır. Partikül boyutunun küçük olması, renk yoğunluğunu artırmakta fakat dağılımı zorlaştırmaktadır. Bu da karbon siyahının işlenebilirliğini düşürebilir. Öte yandan, daha büyük yapıları karbon siyahları kolayca karışıma entegre edilebilir, fakat renk verme kapasiteleri daha düşüktür (C. Jiang vd., 2020).

Dünya genelinde üretilen karbon siyahının yaklaşık %95'i kauçuk endüstrisinde kullanılmaktadır. Bu oran, karbon siyahının kauçuk sektörü için ne denli vazgeçilmez bir malzeme olduğunu göstermektedir. Geri kalan %5'lik kısım ise plastikler, boyalar, mürekkepler ve su arıtma sistemleri gibi çeşitli alanlarda değerlendirilmektedir. Özellikle pigment olarak kullanıldığında, renk tonu kuvveti büyük önem kazanır ve bu durum doğrudan partikül boyutu ile ilişkilidir (İsmail vd., 2011).

Karbon siyahının üretimi sırasında yan ürün olarak ortaya çıkan inorganik bileşenler kül olarak adlandırılır. Bu kül oranı genellikle %10 ile %20 arasında değişir ve karbon siyahının nihai performansına etki edebilir. Bu nedenle, kullanım alanına göre karbon siyahının içerdiği kül oranı da dikkatle değerlendirilmelidir (Lai vd., 2021).

3.3.2.2. Beyaz Dolgu Maddeleri

Silika: Kauçuk teknolojisinde, karbon siyahından sonra en çok tercih edilen dolgu maddelerinden biri silikadır. Bunun temel nedeni, silikanın karbon siyahına oldukça yakın fiziksel ve kimyasal özellikler göstermesidir. Özellikle beyaz veya açık renkli kauçuk ürünlerin üretiminde, renk açısından avantaj sağladığı için silika, vazgeçilmez bir takviye maddesi haline gelmiştir. Ek olarak, karbon siyahına alternatif olarak kullanıldığında, belirli mekanik ve fiziksel özelliklerde iyileşme sağladığı da bilinmektedir (Sarkawi, 2013; Sattayanurak, 2020). Silika, karbon siyahından sonra en çok tercih edilen dolgu maddesidir ve özellikle beyaz veya açık renkli ürünlerde kullanılır (Bülbül, 2014) Çöktürülmüş ve koloidal olmak üzere iki temel formu bulunan silika, 15.000 m²/g'ye varan yüksek yüzey alanı sayesinde üstün mekanik özellikler sağlar (Y. Li vd., 2014) Ancak yüksek polaritesi nedeniyle vulkanizasyon sürecini yavaşlatır ve işlenebilirliği zorlaştırır. Bu dezavantajların üstesinden gelmek için genellikle dietilen glikol gibi katkı maddeleri kullanılır (Sattayanurak vd., 2019).

Kalsiyum karbonat ise en ekonomik dolgu maddelerinden biridir. Doğal ve sentetik formları mevcuttur, ancak mekanik performans açısından sınırlıdır. Özellikle çöktürülmüş formu, daha ince taneli yapısı sayesinde daha iyi özellikler sunar. Maliyet avantajı nedeniyle genellikle performansın kritik olmadığı uygulamalarda tercih edilir ("Calcium Carbonate", 2025).

Kil (kaolin), kauçuk karışımlarına orta düzeyde sertlik ve aşınma direnci kazandırır. Lameller yapısı nedeniyle mekanik özelliklere katkısı sınırlı olsa da asit direnci sayesinde kimyasallara maruz kalacak ürünlerde yaygın olarak kullanılır. (Chakraborty vd., 2010; "Clay", 2025). Silika gibi kil de vulkanizasyonu geciktirici etki gösterir, bu nedenle uygun katkı maddeleriyle desteklenmesi gerekir (Arroyo vd., 2003).

Zeolitler, son yıllarda kauçuk teknolojisinde giderek daha fazla kullanılmaya başlanan dolgu maddeleridir. Mikroporöz yapıları sayesinde gaz geçirgenliğini azaltır ve termal stabiliteyi artırır (Gülen vd., 2012). Yüksek iyon değişim kapasiteleri nedeniyle fonksiyonel katkılar da sunarlar. Kalsiyum silikat ise ince taneli yapısı ve yüksek

kuvvetlendirici etkisiyle öne çıkar. Kontrollü üretim prosesi sayesinde tutarlı performans özellikleri sunar (Hamdan vd., 1994).

Talk, magnezyum alüminyum silikat yapısıyla tabakalı veya granül formda bulunabilir. Tabakalı talklar elektriksel özellikleri iyileştirirken, granül formlar daha çok inert dolgu maddesi olarak kullanılır. Mekanik özellikler açısından silikat katkılı ürünler kadar güçlü olmasa da, özellikle elektriksel uygulamalarda tercih edilir (Bülbül, 2014; Öztürk, 2008).

Sonuç olarak, kauçuk teknolojisinde dolgu maddesi seçimi yapılırken maliyet, performans ve işlenebilirlik faktörleri birlikte değerlendirilmelidir. Yüzey alanı ve partikül morfolojisi gibi parametreler, dolgu maddelerinin performansını doğrudan etkiler. Her bir dolgu maddesinin avantaj ve dezavantajları dikkatle analiz edilmeli, gerekirse uygun katkı maddeleriyle desteklenmelidir. Bu kapsamlı yaklaşım, istenen özelliklerde ve maliyet etkin ürünler geliştirilmesine olanak tanır (“Elastomer Teknolojisi”, 2001)

4. AKTİF KARBON

4.1. Aktif Karbonun Tarihsel Gelişimi ve Modern Kullanım Alanları

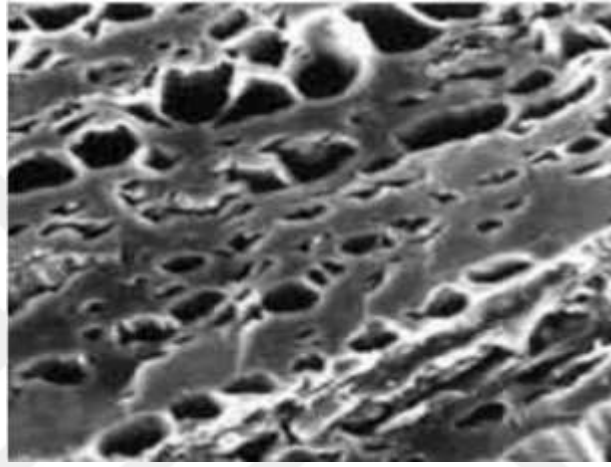
Aktif karbonun kullanım tarihi binlerce yıl öncesine dayanmaktadır. Antik Mısırlılar MÖ 1500'lerde kömürü tıbbi amaçlarla ve arındırıcı olarak kullanmışlardır. Hipokrat'ın MÖ 420'de yara tedavisinde kömür tozu kullandığı belgelenmiştir. Eski Hindistan'da ise su arıtımında kömür filtreleme yöntemleri uygulanmıştır (Yıldırım, 2016). 18. yüzyılda İsveçli bilim insanı Karl Wilhelm Scheele, kömürün adsorpsiyon özelliklerini bilimsel olarak inceleyen ilk araştırmacı olmuştur. 19. yüzyılda şeker endüstrisinde aktif karbon, şurupların rengini açmak için yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Endüstriyel üretim ise 20. yüzyıl başlarında Almanya'da şeker rafinasyonu için kurulan fabrikalarla başlamıştır (Çiftçi, 2013). Birinci Dünya Savaşı sırasında aktif karbon, gaz maskelerinde zehirli gazlara karşı korunmada hayati rol oynamıştır. Günümüzde aktif karbonun kullanım alanları oldukça genişlemiştir. Kimyasal saflaştırma işlemlerinden hava kirliliği kontrolüne, otomotiv emisyon filtrelerinden pil teknolojilerine kadar pek çok alanda kullanılmaktadır. İlaç ve gıda endüstrisinde renk giderici olarak, su arıtma sistemlerinde ise temizleyici olarak yaygın şekilde tercih edilmektedir (Eisay, 2019).

Güncel verilere göre dünya genelinde yıllık aktif karbon üretimi yaklaşık 500.000 ton civarındadır. Bu üretimin büyük bölümü (%80) su arıtımı ve kimya endüstrisi gibi sıvı faz uygulamalarında, daha küçük bir kısmı (%20) ise hava filtrasyonu gibi gaz fazı uygulamalarında kullanılmaktadır (Hamid, 2022). Son yıllarda aktif karbon üretiminde sürdürülebilir yöntemler öne çıkmaktadır. Tarımsal atıklar, odun talaşı ve diğer biyokütle kaynaklarından aktif karbon üretimi hem çevresel hem de ekonomik açıdan avantajlar sunmaktadır. Nanoteknoloji alanındaki gelişmeler sayesinde aktif karbonun gözenek yapısı ve adsorpsiyon kapasitesi daha da iyileştirilebilmektedir. Bu gelişmeler, aktif karbonun gelecekte daha geniş uygulama alanlarında kullanılmasının önünü açmaktadır (Bansal ve Goyal, 2005).

4.2. Aktif Karbonun Tanımı

Aktif karbon, grafitik olmayan mikrokristalin bir karbon formu olup oldukça düzensiz bir atomik düzene sahiptir. X-ışını analizleri, aktif karbonun grafitten farklı olarak yalnızca birkaç atom katmanlı kalınlığında ve 10 nm'den küçük kristalitler

içerdiğini göstermektedir. Bu yapı içerisinde oluşan mikro gözenekler, aktif karbona 250-2500 m²/g aralığında geniş bir iç yüzey alanı kazandırmaktadır. Aktif karbonun bu özel yapısı, gaz ve sıvı fazlardaki organik moleküller ile polar olmayan bileşikleri seçici olarak adsorplama yeteneği sağlar (Bal Altuntaş vd., 2020; Özdemir, 2023). Bu nedenle aktif karbon, gaz saflaştırma, solvent geri kazanımı, ağır metal giderimi, renk giderme ve su arıtımı gibi çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle son yıllarda çevresel uygulamalarda su ve hava arıtımı için giderek artan bir önem kazanmıştır (Boonpoke vd., 2011; Günaydın, 2024).



Şekil 4.1. Aktif karbonun gözenek yapısı (TEM) (Yağşi, 2004)

4.3. Aktif Karbon Karakterizasyonunda Temel Parametreler

Aktif karbonun performansını belirleyen en kritik özelliklerden biri yüzey alanıdır. Brunauer-Emmett-Teller (BET) yöntemiyle ölçülen bu parametre, genellikle m²/g birimiyle ifade edilir ve nitrojen adsorpsiyon tekniği kullanılarak belirlenir. Yüzey alanı ölçümleri, aktif karbonun adsorpsiyon kapasitesi hakkında önemli bilgiler sağlar. Kirlenici maddelerin aktif karbon yüzeyinde tutunma mekanizması göz önüne alındığında, yüzey alanının büyüklüğü arıtma verimliliğini doğrudan etkileyen bir faktördür. Genel olarak, yüzey alanı arttıkça adsorpsiyon için kullanılabilir aktif merkez sayısının da arttığı kabul edilmektedir (Balçık, 2018; Deiana vd., 2009)

Aktif karbonun diğer önemli bir karakteristik özelliği ise gözenek yapısı ve dağılımıdır. Gözenekler, aktif karbonun yüzey alanını belirleyen temel yapı taşlarıdır. Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği (IUPAC), gözenekleri boyutlarına göre üç ana kategoriye ayırmıştır (Isinkalar, 2020; Vázquez-Santos vd., 2012):

Çizelge 4.1. Aktif Karbon Gözenek Sınıflandırması

Gözenek Türü	Boyut Aralığı (yarıçap)	İşlevsel Özellikler
Mikrogözenekler	< 2 nm	Yüksek adsorpsiyon kapasitesi sağlayan temel yapılar
Mezogözenekler	2-50 nm	Moleküler hareketi kolaylaştıran geçiş bölgeleri
Makrogözenekler	>50 nm	Taşıyıcı görev üstlenen ve difüzyonu hızlandıran büyük boşluklar

Bu gözenek sınıflandırması, aktif karbonun farklı boyuttaki molekülleri adsorplama yeteneğini anlamak için temel oluşturur. Mikrogözenekler yüksek yüzey alanı sağlarken, mezogözenekler daha büyük moleküllerin adsorpsiyonu için uygun ortam yaratır. Modern aktif karbon üretim teknikleri, bu gözenek dağılımını kontrol ederek spesifik uygulamalar için optimize edilmiş ürünler geliştirmeyi mümkün kılmaktadır (Cin, 2023; Rosas vd., 2008).

Aktif karbonun gözenek yapısı ve kimyasal bileşimi, kullanılan hammadde türüne ve uygulanan aktivasyon yöntemine bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik gösterir. Bu durum farklı aktif karbon türleri arasında yüzey özellikleri ve gözenek dağılımı açısından belirgin farklılıklar oluşmasına neden olur. Örneğin hindistan cevizi kabuğu bazlı aktif karbonlar genellikle yüksek mikro gözenek içeriğine sahipken (Hanafi vd., 2024; Yalçın, 1996), kömür kaynaklı aktif karbonlar daha fazla mezogözenek içerir ve bu da farklı uygulama alanları için tercih edilmelerini sağlar. Aktif karbonun bu çeşitliliği, farklı endüstriyel ihtiyaçlara yönelik optimize edilmiş ürünlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Derici, 2021).

Aktif karbonun diğer önemli bir karakteristik özelliği ise adsorpsiyon mekanizmasıdır. Aktif karbonların adsorpsiyon mekanizması, yüzeylerindeki fiziksel ve kimyasal özelliklerin kompleks etkileşimi sonucu ortaya çıkan bir olgudur (Akalin, 2000). Temel olarak, moleküllerin karbon yüzeyindeki çekim kuvvetleri nedeniyle tutunması prensibine dayanan bu süreç, aktif karbonun mikro, mezo ve makro gözeneklerinden oluşan üç boyutlu yapısı ve geniş yüzey alanı sayesinde yüksek verimlilikte gerçekleşir (Dąbrowski vd., 2005; Türkyilmaz, 2011). Aktif karbon üretiminde kullanılan hammaddeler arasında odun, kömür ve hindistan cevizi kabuğu gibi karbonca zengin kaynaklar öne çıkar. Bu malzemelerin düşük maliyetli ve yaygın

bulunabilir olması, aktif karbonun endüstriyel ölçekte üretimini ekonomik kılar (Egwaikhide vd., 2005)

Aktif karbonun adsorpsiyon kapasitesi yalnızca fiziksel yapı özellikleriyle değil, aynı zamanda yüzey kimyasıyla da yakından ilişkilidir. Yüzeyde bulunan fonksiyonel gruplar, özellikle azot içerenler, malzemenin elektriksel iletkenliğini artırarak moleküller arası etkileşimleri kolaylaştırır (Alaya vd., 2000; Seyidoğlu, 2009). Bitkisel kaynaklı aktif karbonlarda yaygın olarak rastlanan bu gruplar, ortam pH'ına bağlı olarak malzemenin asidik veya bazik karakter kazanmasını sağlar. pH değeri, aktif karbon yüzeyindeki bileşenlerin iyonizasyon derecesini belirleyerek adsorpsiyon verimliliğini doğrudan etkiler (Açıl, 2024; Yunus vd., 2022). Adsorpsiyon sürecinin verimliliği, gözenek boyutu dağılımı ile adsorplanacak maddenin moleküler boyutu arasındaki uyuma bağlıdır. İdeal koşullarda, aktif karbon gözeneklerinin çapı hedef molekül boyutundan belirli bir oranda büyük olmalıdır. Bu durum hem yüksek adsorpsiyon kapasitesi sağlar hem de moleküllerin gözenekler içindeki hareketini kolaylaştırır (Özbaş, 2023). Son yıllarda geliştirilen yüzey modifikasyon teknikleri sayesinde aktif karbonların performansı daha da artırılmakta ve geleneksel uygulama alanlarının yanı sıra yeni teknolojilerde kullanım imkânı doğmaktadır. Bu gelişmeler, aktif karbonların çevresel uygulamalardan endüstriyel süreçlere kadar geniş bir yelpazede vazgeçilmez bir malzeme olarak konumunu güçlendirmektedir (Helvacı ve Korkmaz, 2024; Hussain, 2018).

Çizelge 4.2. Aktif Karbon Üretiminde Kullanılan Atık Maddeler ve Adsorpsiyon Kapasiteleri (Helvacı ve Korkmaz, 2024)

Atık Madde Kaynağı	Adsorpsiyon Kapasitesi (mg/g)
Bambu tozu	143,20
Yer fıstığı kabuğu	164,90
Kauçuk ağacı tohumu	227,27
Bezelye kabukları	246,91
Zeytin çekirdeği	263,00
Hindistan cevizi kabuğu	277,90
Yağ palmyesi lifi	277,90

Çizelge 4.2.(devam) Aktif Karbon Üretiminde Kullanılan Atık Maddeler ve Adsorpsiyon Kapasiteleri (Helvacı ve Korkmaz, 2024)

Atık Madde Kaynağı	Adsorpsiyon Kapasitesi (mg/g)
İğde çekirdeği (Metilen mavisi)	288,18
Hint kamışı talaşı	294,12
Çeltik kavuzu	343,50
Hurma çekirdeği	398,19
Palmiye ağacı elyafı	400,00
Şeftali çekirdeği	412,00
İğde çekirdeği (Malakit yeşili)	432,90
Hindistan cevizi kavuzu	434,78
Bambu	454,20
Saman	472,10

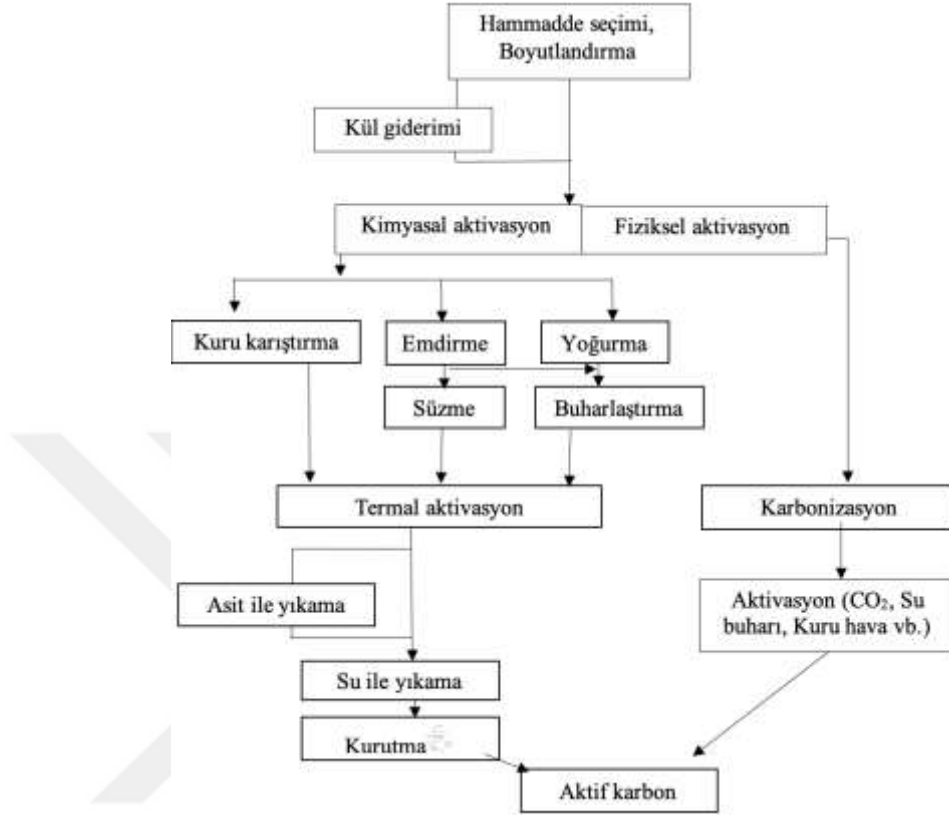
4.4. Aktif Karbon Üretim Süreci

Aktif karbon üretimi temelde iki farklı yöntemle yapılmaktadır: fiziksel aktivasyon ve kimyasal aktivasyon. Üretim süreci genellikle üç ana aşamadan oluşur:

- Dehidrasyon: Ham maddenin içerisindeki nemin uzaklaştırılmasıdır. Bu aşama, sonraki ısıtma işlemlerin daha verimli gerçekleşmesi için ön koşuldur.
- Karbonizasyon: Organik yapıların kontrollü ısıtma işlemi altında parçalanarak elemental karbona dönüşmesi ve uçucu maddelerin ortamdan uzaklaştırılmasıdır. Bu basamakta karbon iskeleti oluşur.
- Aktivasyon: Karbonizasyon sonrası elde edilen gözeneksiz veya az gözenekli yapının işlevsel hale gelmesi için uygulanır. Fiziksel aktivasyonda genellikle CO₂ veya su buharı kullanılarak gözenekler açılırken, kimyasal aktivasyonda ZnCl₂ veya H₃PO₄ gibi ajanlarla katranlı yapılar parçalanarak gözenek gelişimi sağlanır (Özdemir, 2023; Yalman, 2025).

Kullanılan yöntemle göre ürünün gözenek boyutu dağılımı, yüzey özellikleri ve uygulama alanları farklılık gösterebilir. Örneğin, fiziksel aktivasyon genellikle yüksek sıcaklık (800–1000 °C) gerektirirken, kimyasal aktivasyon daha düşük sıcaklıklarda

(400–700 °C) gerçekleşir ve daha gelişmiş mikrogözenek yapısı oluşturabilir (Aygün, 2002).



Şekil 4.2. Aktif karbonun üretim şeması (Yalman, 2025).

4.4.1. Kül giderimi

Karbonlu malzemelerde, özellikle kömürden aktif karbon üretiminde, gözenek oluşumu ve inorganik bileşenlerin uzaklaştırılması için karbonizasyon öncesinde asit işlemi uygulanır. Bu amaçla genellikle HCl, HF ve HNO₃ gibi asitler kullanılmaktadır (Hacıfazlıoğlu ve Uçkan, t.y.). Asit muamelesi kül oranını azaltmakla birlikte, alifatik ve aromatik karbon yapılarının, hidroksil gruplarının azalması ve karboksil grupların artması gibi bazı olumsuz etkiler de gösterebilir (Lu vd., 2013). Fiziksel aktivasyon yöntemi ile üretimde kül gideriminin önceden yapılması önemlidir. Ancak kimyasal aktivasyon sürecinde asit yıkamasına gerek kalmaz; çünkü kül uzaklaştırma işlemi genellikle aktivasyon sonrasında gerçekleştirilen asit yıkamasıyla büyük ölçüde sağlanır (Yalman, 2025).

4.4.2. Karbonizasyon

Karbonizasyon veya piroliz işlemi, ham maddenin inert atmosfer (genellikle N_2 gazı) altında kontrollü ısı bozunuma uğratılmasıyla gerçekleşir. Bu süreçte, oksijen, hidrojen ve azot gibi uçucu bileşenler uzaklaştırılarak sabit karbon içeriği zenginleştirilir ve biyokömür oluşumu sağlanır (Örkün, 2011). Isıl bozunma ilerledikçe ham maddede küçük gözenekler belirmeye başlar ve sıcaklık arttıkça katran bileşiklerinin birikimi gözlenir (Sandaloğlu, 2025). Bu birikim, bazı durumlarda gözenek duvarlarının çökmesine ve karbon çökmesine yol açabilen hidrokraking reaksiyonlarını tetikleyebilir (Korkut, 2018).

Karbonizasyon işlemi dört temel aşamada gerçekleşir: kurutma ($100^{\circ}C$ altı), ön piroliz ($100-300^{\circ}C$), ana piroliz ($300-600^{\circ}C$) ve karbonizasyon ($>600^{\circ}C$) (Sabaz, 2018). Bu süreçte sıcaklık, inert gaz akış hızı, ısıtma hızı ve reaksiyon süresi gibi parametrelerin dikkatli seçimi, nihai ürün kalitesini doğrudan etkiler (Abdul Rahim, 2024). Özellikle karbonizasyon sıcaklığı kritik bir rol oynar; sıcaklık arttıkça uçucu bileşenlerin miktarı artarken, karbon ve kül içeriği de yükselir. Ancak bu durum biyokömür veriminde düşüşe neden olur (Hendekçi, 2023). Verimdeki azalma, hem yüksek sıcaklıklarda biyokütlenin birincil bozunumu (devolatilizasyon), hem de biyokömür atıklarının ikincil bozunumu (kraking) ile ilişkilidir. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıklar daha kaliteli biyokömür üretimini sağlar (Baytar, 2015). Yapılan araştırmalar, karbonizasyon sıcaklığının ve süresinin aktif karbonun performansı ve güvenilirliği üzerinde belirgin etkileri olduğunu ortaya koymuştur (Korkut, 2018).

Optimal karbonizasyon koşulları, hammadde türüne ve hedeflenen uygulamaya göre değişiklik gösterir. Genellikle $400-900^{\circ}C$ aralığında gerçekleştirilen bu işlemde, inert gaz akış hızı $100-200$ mL/dakika ve ısıtma hızı $5-20^{\circ}C$ /dakika aralığında tutularak homojen bir ürün elde edilir. Proses parametrelerinin optimize edilmesi, istenmeyen yan ürün oluşumunu minimize eder ve yüksek kaliteli biyokömür üretimini sağlar (Aydın Şamdan, 2013).

4.4.3. Fiziksel aktivasyon

Fiziksel aktivasyon, tek veya iki aşamalı olarak uygulanabilen bir aktif karbon üretim yöntemidir. İki aşamalı yöntemde önce $400-700^{\circ}C$ 'de karbonizasyon işlemiyle biyokömür elde edilir, ardından $800-1100^{\circ}C$ 'de buhar, karbondioksit veya hava gibi oksitleyici gazlarla aktivasyon gerçekleştirilir (Myrzageldi, 2024). Tek aşamalı yöntemde

ise karbonizasyon ve aktivasyon işlemleri 600-800°C'de eş zamanlı olarak yürütülür. Bu yöntem, soğutma aşamasını ortadan kaldırarak enerji verimliliği ve maliyet avantajı sağlar (Hamid, 2022). Fiziksel aktivasyon sırasında dar gözenekler genişler ve yeni gözenekler oluşur, böylece malzemenin yüzey alanı ve gözenek hacmi artar. Ancak kimyasal aktivasyona kıyasla daha yüksek sıcaklık ve uzun işlem süresi gerektirdiğinden verim ve ürün kalitesi daha düşüktür. Özellikle oksijen içeren hava kullanımı, kontrolsüz yanma reaksiyonlarına yol açabileceğinden daha az tercih edilir (Önal vd., 2010). Buhar ve CO_2 aktivasyonu karşılaştırıldığında, buhar daha küçük molekül boyutu sayesinde gözeneklere daha hızlı nüfuz eder ve CO_2 'den dört kat daha hızlı reaksiyona girer. Bu nedenle kısa sürede yüksek yüzey alanı elde edilebilir. CO_2 aktivasyonu ise daha yavaş ve kontrollü bir süreç sunar, özellikle 800°C'ye kadar stabil kalabilmesi nedeniyle bazı uygulamalarda avantaj sağlar (Ayhan, 2022; Serafin ve Cruz, 2022). Buhar aktivasyonu mikro gözenekleri genişleterek mezo ve makrogözenek oluşumunu teşvik ederken, CO_2 aktivasyonu daha çok yeni gözenek oluşumuna odaklanır. Bu farklılıklar, aktif karbonun gözenek dağılımını ve dolayısıyla uygulama alanını belirler (Uralçin, 2024).

4.4.4. Kimyasal aktivasyon

Kimyasal aktivasyon, aktif karbon üretiminde yaygın olarak kullanılan ve tek veya iki aşamalı olarak uygulanabilen bir yöntemdir. Tek aşamalı proses, kurutulmuş hammaddenin doğrudan NaOH, KOH, $ZnCl_2$ veya H_3PO_4 gibi kimyasallarla muamele edilmesini içerirken, iki aşamalı yöntemde önce 400-600°C aralığında biyokömür oluşturulduktan sonra kimyasal aktivasyon gerçekleştirilir (Yapıcı, 2022). Bu süreçte kullanılan aktivatörler, bazik (KOH, NaOH), asidik (H_3PO_4) veya nötr ($ZnCl_2$) karakterde olabilir ve her biri farklı yüzey özelliklerine sahip aktif karbonlar üretir. Alkali hidroksitler özellikle 2000 m²/g'ye varan yüksek yüzey alanları elde edilmesini sağlarken, fosforik asit daha ekonomik bir alternatif olarak öne çıkar. Yapılan karşılaştırmalı çalışmalar, fosforik asit aktivasyonunun çinko klorür aktivasyonuna göre daha üstün tekstürel özellikler sağladığını ortaya koymuştur (Kaya Çelebi, 2024). Bununla birlikte, bu kimyasalların toksik ve koroziv özellikleri çevresel riskler oluşturduğundan, son yıllarda K_2CO_3 gibi daha güvenli aktivatörlerin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Kimyasal aktivasyonun en önemli avantajı, fiziksel aktivasyona kıyasla daha düşük sıcaklıklarda ve kısa sürede yüksek verimli üretim yapılabilmesidir. Ancak bu yöntemin dezavantajı, üründe kimyasal kalıntı riski nedeniyle ek yıkama basamağı gerektirmesi veya fiziksel

aktivasyonla kombine edilerek kullanılma zorunluluğudur. Bu nedenle, son dönemde daha çevre dostu aktivatörlerin geliştirilmesi ve proses optimizasyonu üzerine yoğunlaşmaktadır (Erkuş, 2021; Hamid, 2022; Heidarinejad vd., 2020).

4.5. Aktif Karbonun Sınıflandırılması

Aktif karbonlar, fiziksel formlarına göre üç temel kategoriye ayrılmaktadır: toz aktif karbon, granül aktif karbon ve pelet aktif karbon. Her bir formun kendine özgü özellikleri ve uygulama alanları bulunmaktadır (Beşe, 2019).

4.5.1. Toz aktif karbon

Toz aktif karbon, partikül boyutu 0,177-0,297 mm aralığında olan ince öğütülmüş malzemedir. Özellikle su arıtma uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Sıvı fazdaki arıtma işlemlerinde aktif çamur sistemlerine doğrudan ilave edilebilir veya ayrı bir karıştırma ünitesinde kullanılabilir. Koloidal maddelerin pıhtılaştırılmasında etkili olmasına rağmen, rejenerasyon işleminin zorluğu önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. Toz formun bu sınırlaması, kullanım sonrası ayrıştırma gerekliliğinden kaynaklanmaktadır (Hirunpraditkoon vd., 2011; Oktar, 2024).



Şekil 4.3. Toz aktif karbon (Tokgöz, 2025)

4.5.2. Granül aktif karbon

Granül aktif karbon, 0,2-5 mm partikül boyutuna sahip olup genellikle kömür veya kabuk bazlı hammaddelerden üretilmektedir. Üretim sürecinde bağlayıcı maddeler kullanılarak toz halindeki karbon granül formuna dönüştürülür. Bu form, partikül içi difüzyon mekanizmasıyla çalıştığı için toz formdan farklılık gösterir. İçme suyu arıtımı,

yeraltı suyu temizliği ve endüstriyel atık su arıtımı gibi alanlarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Granül formun en dikkat çekici özelliklerinden biri, yüzeyinde biyolojik film oluşumuna uygun ortam sağlamasıdır. Bu biyofilm, kirleticilerin biyolojik olarak parçalanmasına yardımcı olarak arıtma verimliliğini artırmaktadır (Deshmukh vd., 2022; Özkiliç, 2019).



Şekil 4.4. Granül aktif karbon (Tokgöz, 2025)

4.5.3. Pelet aktif karbon

Pelet aktif karbon ise 0,8-5 mm çapında silindirik yapıda üretilen bir formdur. Ekstrüzyon yöntemiyle şekillendirilen bu karbon türü, özellikle gaz fazı uygulamalarında tercih edilmektedir. Silindirik yapısı sayesinde düşük basınç kaybı sağlaması, buhar ve gaz arıtım sistemlerinde önemli bir avantaj oluşturmaktadır. Yüksek yüzey alanı ve aktivitesiyle öne çıkan pelet form, çözücü geri kazanımı, VOC kontrolü ve katalizör desteği gibi uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Termal rejenerasyona uygun olması, pelet aktif karbonun ekonomik ömrünü uzatan bir diğer önemli özelliğidir (Akçakale, 2017; Kamińska vd., 2021).



Şekil 4.5. Pelet aktif karbon (Tokgöz, 2025)

4.6. Aktif Karbon Üretiminde Tarımsal Kökenli Hammaddelerin Kullanımı

Atıklardan, aktif karbon üretimi için giderek daha fazla tercih edilen hammaddeler haline gelmiştir. Bu atıkların yüksek adsorpsiyon kapasitesi, iyi mekanik mukavemeti ve düşük kül içeriği gibi avantajları, onları ekonomik açıdan cazip kılmaktadır. Yapılan araştırmalar, çok çeşitli tarımsal atıkların başarılı şekilde aktif karbona dönüştürülebileceğini göstermiştir (Apaydın, 2021). Özellikle lignin içeriği yüksek olan tarımsal atıklar, tipik olarak %35-40 karbon ve %58-60 uçucu madde oranına sahiptir. Bu tür hammaddelerden elde edilen aktif karbonlar genellikle yumuşak yapılı olup büyük gözenek hacimleri sayesinde sıvı faz uygulamalarında oldukça etkilidir (Can, 2024). Buna karşılık, fındık kabuğu gibi daha sert yapıdaki tarımsal atıklar ise %40-45 karbon içeriğiyle daha kompakt bir yapı sergiler ve geniş mikro gözenek hacimleri nedeniyle buhar fazı uygulamalarına daha uygundur (Demir Özyılmaz, 2023).

Aktif karbon üretiminde hammadde seçiminde dikkat edilmesi gereken en kritik faktörlerden biri mineral içeriğidir. İdeal koşullarda, hammaddenin mineral içeriğinin %3'ü geçmemesi gerekmektedir. Özellikle odun ve kömür bazlı hammaddeler için bu oran %2'nin, turba için ise %1-2 aralığının altında olmalıdır. Yüksek mineral içeriği, aktif karbonun gözenek yapısını bozarak performansını düşürmektedir (Al-Bayati, 2024; Özdemir, 2023).

Hammadde seçiminde ayrıca depolama dayanıklılığı, kolay temin edilebilirlik, işlenebilirlik özellikleri ve çevresel sürdürülebilirlik gibi faktörler de dikkate alınmalıdır. Tarımsal atıkların aktif karbon üretiminde kullanımı, hem çevresel açıdan sürdürülebilir bir yaklaşım sunmakta, hem de düşük maliyetli yüksek performanslı adsorbanların üretilmesine olanak tanımaktadır. Bu nedenle, farklı tarımsal atıkların karakterizasyonu ve optimize üretim parametrelerinin belirlenmesine yönelik araştırmalar büyük önem taşımaktadır (Guo ve Rockstraw, 2007; Hanoğlu, 2019).

4.7. Aktif Karbon Kullanım Alanları ve Endüstriyel Uygulamaları

Aktif karbon, geniş yüzey alanı ve gözenekli yapısı sayesinde çeşitli endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılan önemli bir adsorban malzemedir. Su arıtma sistemlerinde, organik kirleticilerin, ağır metallerin ve klor bileşiklerinin giderilmesinde etkin şekilde kullanılmaktadır (Isinkaralar, 2020). İçme suyu arıtımında tat ve koku veren

bileşenlerin uzaklaştırılması, atık su arıtma tesislerinde ise endüstriyel atıklardaki toksik maddelerin adsorpsiyonu aktif karbonun temel uygulama alanlarından birini oluşturmaktadır. Yapılan araştırmalar, aktif karbon filtrelerinin farmasötik kalıntıları ve mikrokirleticileri %90'a varan oranlarda giderdiğini göstermektedir (Bozacı, 2016; Hamid, 2022).

Hava ve gaz arıtma sistemlerinde aktif karbon, uçucu organik bileşiklerin (VOC'ler) ve zararlı gazların tutulmasında kritik rol oynar. Endüstriyel emisyon kontrolünde, boya ve kozmetik sektöründe solvent geri kazanımında, ayrıca klima ve havalandırma sistemlerinde hava kalitesinin iyileştirilmesinde yaygın şekilde kullanılmaktadır (Malik vd., 2007; Taşçı, 2020). Özellikle granül ve pelet formdaki aktif karbonlar, gaz fazı uygulamalarında yüksek verimlilik sağlamaktadır. Metalürji endüstrisinde altın geri kazanımı, otomotiv sektöründe yakıt buharı kontrol sistemleri ve nükleer santrallerde radyoaktif iyot tutulumu gibi özel uygulamalarda da aktif karbonun etkinliği kanıtlanmıştır (Bhadusha ve Ananthabaskaran, 2011; Önyılmaz, 2024).

Gıda ve içecek endüstrisinde aktif karbon, şeker rafinasyonunda renk giderme, bitkisel yağların rafinasyonu, alkollü içeceklerin saflaştırılması ve gıda katkı maddelerinin üretimi gibi proseslerde kullanılmaktadır. Tıp alanında ise zehirlenme vakalarında antidot olarak, diyaliz sistemlerinde ve yara tedavilerinde uygulanmaktadır (Elbinsoy, 2016). Son yıllarda aktif karbonun enerji depolama sistemlerinde (süperkapasitörler ve lityum-iyon piller), katalizör taşıyıcı olarak ve sensör teknolojilerinde kullanımına yönelik araştırmalar yoğunluk kazanmıştır. Bu çeşitli uygulama alanları, aktif karbonun yüzey kimyası ve gözenek yapısının farklı amaçlar için optimize edilebilmesinden kaynaklanmaktadır (Akbulut, 2024; Yahya vd., 2015).

5. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada kullanılan kara kavak odun atığı (*Populus nigra*) toz halinde (talaş) Konya Seydişehir Marangozlar Sanayinde bulunan bir işletmeden ücretsiz olarak temin edilmiştir. Aktivasyon işleminde çinko klorür ($ZnCl_2$) ve fosforik asit (H_3PO_4) kullanılmış; ayrıca üretilen aktif karbonun yıkanması sırasında hidroklorik asit (HCl) ve potasyum hidroksit (KOH) uygulanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan tüm kimyasallar analitik saflıkta olup Merk (Darmstadt, Germany), ya da Fluka (Buch, Switzerland) firmalarından temin edilmiştir. Bu çalışmada asit (fosforik asit) ve tuz (çinko klorür) aktivasyon ajanları yardımıyla kara kavak atıklarından (*Populus nigra*) aktif karbon üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 1).



5.1. Fosforik Asit ile Aktif Karbon Üretimi

3 kilogram toz haline getirilmiş kara kavak odun atığı, 3 litre %50 oranında fosforik asit ve 3 litre saf su ile karıştırılmıştır. Bu karışım, fosforik asit ile atığın kimyasal etkileşimini sağlamak amacıyla 110 °C sıcaklıkta 2 saat boyunca işleme tabi tutulmuştur. Ardından karışım, 80 °C sıcaklıktaki bir etüvde 24 saat boyunca kurutulmuştur. Kuruma işlemi tamamlanan numune, aktivasyon amacıyla argon gazı ortamında (50 mL/dakika akış hızıyla) 600 °C'ye kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 1,5 saat bekletilmiştir. İşlem sonrası malzeme oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Elde edilen ürün, 0.5 M KOH çözeltisi ile muamele edilmiş, ardından pH değeri 6–6,5 seviyelerine ulaşana dek sıcak deiyonize suyla yıkanmıştır. Son olarak aktif karbon, 100 °C'de 6 saat kurutulmuş ve öğütülerek kullanıma uygun hale getirilmiştir (Fernandez vd., 2014).

5.2. Çinko Klorür ile Aktif Karbon Üretimi

3 kg kara kavak odun atığı, 1,5 kg çinko klorür ($ZnCl_2$) ve 3,75 litre saf su ile karıştırılarak homojen bir hamur elde edilmiştir. Bu karışım, çinko klorürün hammaddelerle reaksiyona girmesini sağlamak amacıyla oda sıcaklığında 24 saat bekletilmiştir. Ardından, hamur 80°C'de bir etüvde 24 saat kurutulmuştur. Kurutulan malzeme, aktivasyon işlemi için argon atmosferi altında (50 mL/dakika akış hızında) 600°C'de 1,5 saat ısıtılma işlemi tabi tutulmuş ve ardından oda sıcaklığına soğutulmuştur. Aktifleştirilen ürün, önce 0,5 M HCl ile yıkanmış, daha sonra pH değeri 6-6,5 aralığına ulaşana kadar sıcak deiyonize su ile durulanmıştır. Son olarak, temizlenen aktif karbon 100°C'de 6 saat kurutulup öğütülerek kullanıma hazır hale getirilmiştir. (Ramutshatsha-Makhwedzha vd., 2022).



Şekil 5.2. a) Etüv b) Tav fırını c) Öğütülmemiş aktif karbon d) Öğütücü makine e) Toz aktif karbon

5.3. Kauçuk Hamurunun Hazırlanması

Bu çalışmada, odun atıklarından aktif karbon üretmek için iki farklı kimyasal aktivasyon yöntemi kullanılmıştır. Asit ve tuz ortamlarında gerçekleştirilen bu işlemler sonucunda dokuz farklı aktif karbon numunesi elde edilmiştir. Üretilen aktif karbonlar daha sonra NBR kauçuk ile birleştirilerek bileşik malzemeler hazırlanmıştır.

Deneyler sırasında kauçuk ve dolgu malzemeleri önce laboratuvar tipi bir Banbury karıştırıcıda işlenmiştir. Bu karıştırma işlemi 80°C sıcaklıkta, 60 rpm hızla ve 10 dakika

süreyle yapılmıştır. Elde edilen hamur karışımı, 24 saat boyunca dinlendirilmiştir. Dinlenme sonrasında malzeme, 80°C'de ve 40 rpm hızla çalışan iki silindirli açık karıştırıcıda 5 dakika daha karıştırılmıştır. Aktif karbon ilavesi aşamasında, NBR kauçuğa ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında aktif karbon eklenmiş ve 5 dakika daha karıştırma işlemi uygulanmıştır. Son olarak, yumuşatıcılar, aktivatörler, vulkanizasyon hızlandırıcıları ve kükürt gibi katkı maddeleri ilave edilmiş kauçuk matrisi içinde hazırlanan farklı formülasyonlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Bu yöntem, aktif karbon takviyeli kauçuk bileşiklerin üretim sürecini detaylı bir şekilde ortaya koymayı ve malzeme özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik veriler sağlamayı amaçlamıştır.



Şekil 5.3. Laboratuvar tipi iki silindirli karıştırıcı

Çizelge 5.1. Bileşikte kullanılan dolgu ve katkı maddelerinin kütlece % oranları

Dolgu ve Katkılar	OA0	OAA5	OAA10	OAA15	OAA 20	OAT5	OAT10	OAT15	OAT 20
NBR	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Sitrik asit	2	2	2	2	2	2	2	2	2
ZnO	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
MBT	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Pek 4000	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
DPG	1	1	1	1	1	1	1	1	1
DM	2	2	2	2	2	2	2	2	2
CZ	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Kükürt	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Karbon Siyahı	30	25	20	15	10	25	20	15	10

Çizelge 5.1.(devam) Bileşikte kullanılan dolgu ve katkı maddelerinin kütlece % oranları

OAA (H_3PO_4)	-	5	10	15	20	-	-	-	-
OAT ($ZnCl_2$)	-	-	-	-	-	5	10	15	20

6. DENEYSEL YÖNTEMLER

6.1. Odun Atıklarından Üretilen Aktif Karbonların Karakterizasyonu

Ölçüm işlemleri öncesi 120°C’de 3 saat degasing işlemi uygulanarak numunelerde oluşabilecek kirlilikler uzaklaştırılmış ve tıkanmış hücrelerin açılması sağlanmıştır.

6.1.1. BET analizi

Üretilen aktif karbonların BET yüzey alanı ve mikro gözenek hacmi gibi yapısal özelliklerinin belirlenmesi için N₂ adsorpsiyon / desorpsiyon izotermi test ölçümleri yapılmıştır. Deney numunelerinin ölçüm çalışmaları Quantachrome marka, autosorb IQ model BET cihazı kullanılarak yerine getirilmiştir.

Aktif karbon numunelerinin yüzey özellikleri, 77 K sıcaklıkta gerçekleştirilen azot gazı adsorpsiyon-desorpsiyon deneyleriyle belirlenmiştir. Ölçümler sonucunda, BET yüzey alanı, Mikro gözenek hacmi (V_{micro}), Mezo gözenek hacmi (V_{mezo}), Toplam gözenek hacmi (V_{total}), Ortalama gözenek çapı (D_p) gibi kritik parametreler hesaplanmıştır. Mezo gözenek hacmi, toplam gözenek hacminden mikro gözenek hacminin çıkarılması yöntemiyle tespit edilmiştir. Tüm bu analizler, gelişmiş yüzey karakterizasyon cihazı ve bu cihazın BET, t-plot, DR ve DFT yöntemlerini içeren entegre yazılımı kullanılarak otomatik olarak gerçekleştirilmiştir.

6.1.2. Odun atıklarından üretilen aktif karbonların FT-IR analizi

Üretilen aktif karbonların bağ yapılarının tespiti amacıyla FTIR (Thermo Scientific – Nicolet iS20) analizleri ile 400 – 4000 cm⁻¹ dalga boyu aralığında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Aktif karbon örneklerinin yüzey kimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, Şekil 6.1’de belirtilen spektrofotometre cihazı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 6.1. Thermo Scientific/Nicolet IS 20 FT-IR cihazı

6.1.3. Odun atığından üretilen aktif karbonların mikroyapı karakterizasyonu

Numunelerin iletkenlik özelliklerini artırmak amacıyla LEICA EM ACE600 model kaplama cihazı kullanılarak ince film kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.2). Bu işlem sırasında numune yüzeylerine 5 nm kalınlığında iridyum (Ir) tabakası biriktirilmiştir.



Şekil 6.2. LEICA EM ACE600 model kaplama cihazı

Mikroyapısal karakterizasyon çalışmaları, Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Merkezi'nde (BİTAM) bulunan ZEISS GeminiSEM 500 model Field Emission Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) ile yürütülmüştür. Bu yüksek çözünürlüklü cihaz, 0,6 nm'ye kadar görüntüleme kapasitesi sağlayarak bileşik malzemelerin detaylı yüzey analizine olanak tanımıştır.

Bileşik numunelerin elementel dağılım analizleri, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile entegre Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) sistemi kullanılarak

gerçekleştirilmiştir. Bu analizler kapsamında X-ışını haritalama tekniği uygulanarak, aktif karbon ve diğer katkı maddelerinin kauçuk matrisi içindeki homojen dağılımı detaylı şekilde incelenmiştir.

6.1.4. Odun atığından üretilen aktif karbonların yoğunluk ölçümleri

Bu çalışmada, odun atığından üretilen aktif karbonlar ile bunların kauçuk bileşiklerinin yoğunluk değerleri, Micromeritics Accupyc II 1340 model helyum piknometresi kullanılarak hassas bir şekilde ölçülmüştür.

6.2. DSC Analizi ile Kurlenme Süresi Hesaplaması

Elde edilen bileşiklerin farkı sıcaklıklardaki ısı kapasitelerinden faydalanarak çapraz bağlanma yoğunluğunu hesaplamak ve optimum kurlenme süresini bulmak için 0, 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 dakika 150 °C vulkanize edilmiş kauçuk matrisli bileşiklerin ısı kapasitesi DSC (Hitachi, Model: DSC7020) ile ASTM E698-18 standardına göre ölçülmüştür. Elde edilen ısı kapasiteler ile aşağıdaki eşitliğe göre çapraz bağlanma yoğunlukları hesaplanmıştır (Eşitlik 1) (Wang vd., 2011).

$$\alpha (\%) = \frac{\Delta h_i - \Delta h_l}{\Delta h_i} * 100$$

(1)

α : % Çapraz bağ yoğunluğunu

Δh_i : Çapraz bağlanmamış örneğin (0. dakika) ısı kapasitesi

Δh_l : Belirli bir çapraz bağlanma yoğunluğuna sahip örneğin ısı kapasitesi

6.3. Mekanik Testler

Bileşik numunelerin standardizasyonu için uluslararası test protokolleri titizlikle uygulanmıştır. Mekanik karakterizasyon öncesinde, aktif karbon takviyeli kauçuk numuneler kontrollü bir ortamda şartlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Bu süreçte:

1. Numuneler TS EN ISO 291 standardına uygun olarak
2. 25±2°C sabit sıcaklıkta
3. %50±5 bağıl nem koşullarında
4. 24±1 saat süreyle stabilizasyona bırakılmıştır

Bu şartlandırma işlemi, malzemenin; Nem dengesinin sağlanması, iç gerilimlerin giderilmesi, test sonuçlarının tekrarlanabilirliğinin garanti altına alınması amaçlarıyla gerçekleştirilmiştir

6.3.1. OA ilaveli bileşiklerin sertlik ve yoğunluk ölçümleri

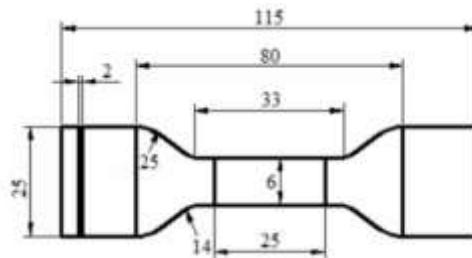
Bileşik malzemelerin mekanik karakterizasyonu kapsamında sertlik ölçümleri, ISO 868 standardına uygun şekilde kalibre edilmiş AFFRI 3001 model Shore A durometre ile gerçekleştirilmiştir. Bileşiklerin yoğunluklarının belirlenmesinde ise helyum piknometresi (Micromeritics– Accupyc2 1340) kullanılmıştır.



Şekil 6.3. a) AFFRI 3001 model Shore A b) Helyum piknometresi Micromeritics– Accupyc2 1340

5.3.2. OA ilaveli bileşiklerin kopma dayanımı ve % birim uzama ölçümleri

Kauçuk bileşiklerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla ISO 37 standardına uygun çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Testler, Shimadzu AGS-X Floor model universal test cihazı kullanılarak 10 mm/sn sabit çekme hızında yapılmıştır. Deneyler sırasında $23 \pm 2^\circ\text{C}$ oda sıcaklığı ve $\%50 \pm 5$ bağıl nem koşulları sağlanmıştır.



Şekil 6.4. ISO 37 normuna uygun çekme numunesi

5.3.3. OA ilaveli bileşiklerin aşınma ölçümleri

Aşınma testleri, tambur üzerine yerleştirilen test numunesi 10 N'luk dik bir kuvvet altında 40 metre kayma mesafesi 84 devirde tamamlanmıştır. Standarda göre aşındırılan 5 numunenin kütle kaybı ortalaması alınarak aşınma miktarı belirlenmiştir. Aşınma miktarı Eşitlik 2'de verilen bağlantı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\%Kayıp = \frac{\Delta m}{m_{ilk}} \times 100$$

(2)

Δm : Maddenin işlem öncesi kütlesi-maddenin sonrası kütlesi

m_{ilk} : Maddenin işlem öncesi kütlesi



Şekil 6.5. Devotrans kauçuk aşındırma test cihazı

7. ARAŞTIRMA SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu araştırmada, iki farklı atık malzemeden çeşitli kimyasal aktivasyon yöntemleriyle üretilen aktif karbonların, iki farklı kauçuk matris içindeki performansları detaylı olarak incelenmiştir. Çalışmada özellikle bu aktif karbonların kauçuk bileşiklerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Kauçuk bileşiklerde kullanılan dolgu maddelerinin özellikleri, dolgu oranı, kimyasal kompozisyonu, fiziksel karakteristikleri, üretim süreçleri ve çalışma sıcaklıkları gibi parametrelerin, kauçuk bileşiklerin hem kimyasal hem de fiziksel davranışlarını önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir.

7.1. Odun Atığından Üretilen Aktif Karbonların BET Analizleri

Çizelge 7.1'in analizine göre, karakavak odun atığından üretilen aktif karbonların yapısal özellikleri ve verim değerleri detaylı şekilde incelenmiştir. Piroliz işlemi sırasında organik uçucu bileşenlerin büyük ölçüde uzaklaştığı gözlemlenmiştir. Kimyasal aktivasyon yöntemlerinin karşılaştırılmasında, fosforik asit ile üretilen aktif karbonların çinko klorür ile üretilenlere kıyasla daha yüksek verim gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum, fosforik asidin karbonizasyon sürecinde katran oluşumunu engelleyerek katı ürün verimini artırmasıyla açıklanmaktadır (Gañán-Gómez vd., 2006).

Çizelge 7.1 Çinko klorür ve fosforik asit ile muamele edilen karakavak odun atığından üretilen aktif karbonların BET sonuçları

Üretilen Aktif Karbonlar	Yüzey Alanı m ² /g	V _{micro} (cm ³ /g)	V _{mezo} (cm ³ /g)	V _{total} (cm ³ /g)	D _p (nm)
OAA	957	0,415	0,186	0,601	0,592
OAT	996	0,431	0,081	0,512	0,496

Aktivasyon işlemi sırasında, yüksek sıcaklık etkisiyle polimerik yapıların parçalanarak hidrojen, oksijen ve nitrojen gibi elementlerin gaz ve sıvı fazda uzaklaştığı, geriye sağlam bir karbon iskeletinin kaldığı belirlenmiştir. Hem fosforik asit hem de çinko klorür, biyopolimerlerin depolimerizasyonunu, dehidrasyonunu ve yeniden dağılımını teşvik ederek, alifatik bileşiklerin aromatik yapılara dönüşümünü kolaylaştırmakta ve böylece aktif karbon verimini artırmaktadır (Méndez vd., 2005; F.-S. Zhang vd., 2005).

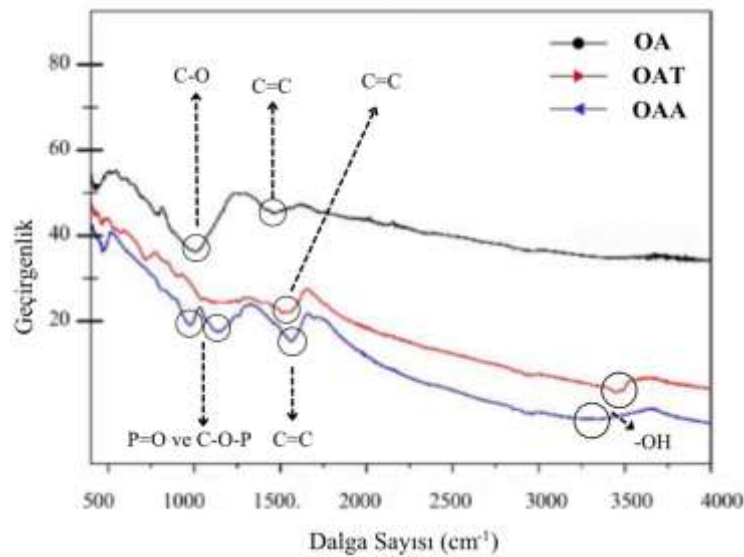
BET analiz sonuçları, çinko klorür ile aktive edilen aktif karbonların fosforik asit ile aktive edilenlere göre daha yüksek yüzey alanına sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Mikro gözenek hacimlerinin çinko klorür aktivasyonunda daha fazla olduğu gözlemlenirken, fosforik asit aktivasyonunun daha geniş mezo gözenek yapısı oluşturduğu tespit edilmiştir (Hsu ve Teng, 2000). Bu farklılık, fosforik asidin hammadde yapısında oluşturduğu fosfat ve polifosfat türlerinin çapraz bağlı yapısından kaynaklanmaktadır.

Çinko klorür aktivasyonunun selüloz moleküllerinde elektrolitik etki oluşturarak moleküler parçalanmaya yol açtığı ve bu sayede iç boşlukların artarak yüksek yüzey alanı oluşumuna katkı sağladığı anlaşılmıştır (Saka, 2012). Aktivasyon sırasında lignoselülozik malzemelerin karbona dönüşümü sırasında çeşitli gazların (hidrojen, oksijen, karbon monoksit, karbondioksit vb.) açığa çıktığı belirlenmiştir (Anisuzzaman vd., 2016). Çinko klorürün karbon monoksit yüzeyini bloke ederek uçucu maddelerin hareketini kontrol ettiği ve bu sayede aktif karbonun gözenek yapısını optimize ettiği gözlemlenmiştir (Deng vd., 2009).

7.2. Odun Atığından Üretilen Aktif Karbonların FT-IR Analizi

Şekil 7.1'de sunulan FTIR analiz sonuçları, farklı aktivasyon yöntemleriyle üretilen aktif karbonların yüzey kimyasal özelliklerini karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktadır. Ticari aktif karbon (O) spektrumunda 1460 cm^{-1} 'de gözlenen bant, C-H gerilme titreşimlerine işaret etmektedir. Çinko klorür ile aktive edilen numunelerde (OAT) 3480 cm^{-1} 'de belirgin -OH gerilme bantları ve 1543 cm^{-1} 'de karboksilik asit/lakton gruplarının karakteristik pikleri tespit edilmiştir.



Şekil 7.1. Ticari ve üretilen aktif karbonların FT-IR sonuçları

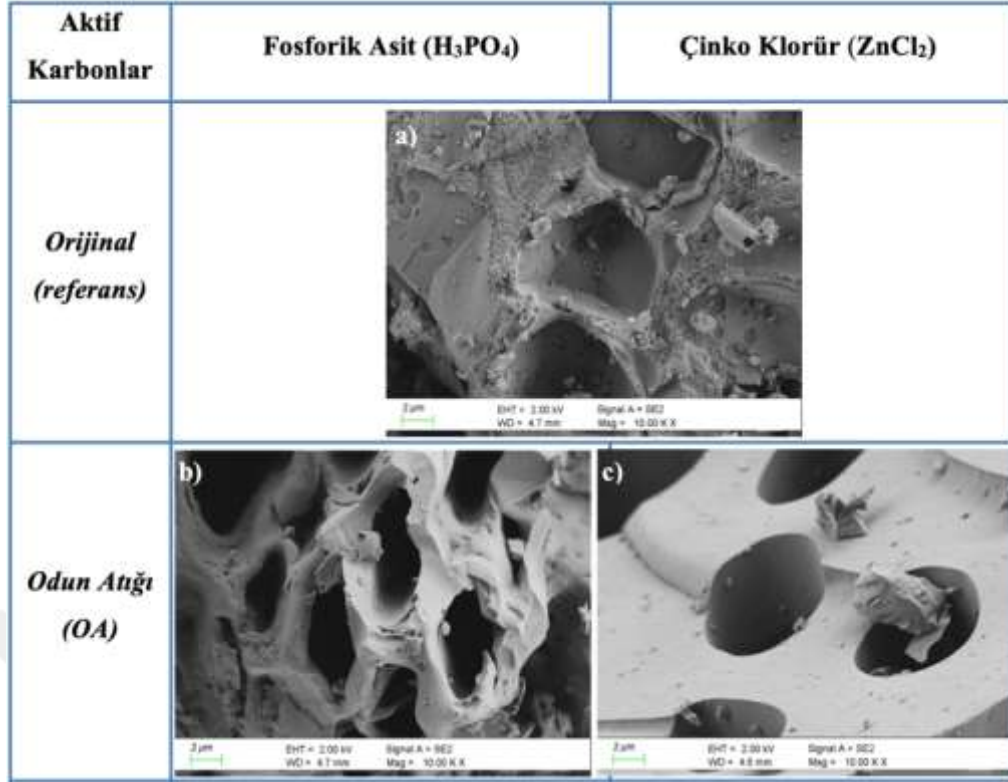
Fosforik asit aktivasyonu (OAA) üretilen numunelerde ise 3340 cm^{-1} 'de hidroksil gruplarının yoğun varlığı dikkat çekmektedir. Her iki aktivasyon yönteminde de $2855\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ aralığında alifatik yapıların, $1550\text{--}1800\text{ cm}^{-1}$ aralığında ise karbonil gruplarının (keton, aldehit, ester) karakteristik bantları gözlenmiştir. Özellikle 1600 cm^{-1} 'deki aromatik C=C bağları ve $950\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$ aralığındaki fosfor içeren fonksiyonel gruplar (P=O, C-O-P), aktif karbon yüzey kimyasının kompleks yapısını yansıtmaktadır.

Bu bulgular, aktivasyon yöntemlerinin aktif karbon yüzey kimyası üzerindeki belirgin etkisini ortaya koymaktadır. Fosforik asit aktivasyonunun özellikle fosfor içeren yüzey gruplarının oluşumunu teşvik ettiği, çinko klorür aktivasyonunun ise oksijenli fonksiyonel grupların oluşumunda daha etkili olduğu anlaşılmaktadır. Bu yüzey kimyasal farklılıkların, aktif karbonların adsorpsiyon kapasiteleri ve kauçuk matrisle etkileşimleri üzerinde önemli etkileri olabileceği değerlendirilmektedir.

7.3. Üretilen Aktif Karbonların Mikroyapı Karakterizasyonu

Şekil 7.2 b'de gösterilen H_3PO_4 ile aktive edilen OAA kodlu aktif karbonun FE-SEM görüntüleri incelendiğinde, ticari aktif karbona kıyasla belirgin şekilde farklılıklar gözlemlenmiştir. Görüntülerde, daha gelişmiş bir gözenek yapısı ve homojen dağılım gösteren içi boş küresel gözenekler açıkça görülmektedir. Şekil 7.2 b'de sunulan veriler, bu numunede pürüzsüz duvar yapıları ve keskin kenar tanımlarının yanı sıra değişken gözenekler arası mesafelerin varlığını ortaya koymaktadır (Valizadeh vd., 2018).

Şekil 7.2 c'de gösterilen ZnCl_2 ile üretilen OAT kodlu aktif karbonun FE-SEM analizleri ise farklı bir morfolojik yapı sergilemektedir. Görüntülerde, yoğun elipsoidal gözenek yapıları net bir şekilde görülmektedir. Şekil 7.2 c'de sunulan yüksek büyütme oranlı görüntüler, bu numunede gözenek yoğunluğunun belirgin şekilde arttığını göstermektedir. Her iki şekilde de (Şekil 7.2 b ve 7.2 c) görüldüğü üzere, farklı aktivasyon yöntemlerinin aktif karbon yüzey morfolojisi üzerinde karakteristik etkiler oluşturduğu anlaşılmaktadır. Şekil 7.2 b'de görülen H_3PO_4 aktivasyonunun daha homojen gözenek yapıları oluşturduğu, buna karşın Şekil 7.2 c'de görülen ZnCl_2 aktivasyonunun ise daha yoğun ve farklı geometride gözenekler meydana getirdiği gözlemlenmiştir (Shrestha vd., 2019).

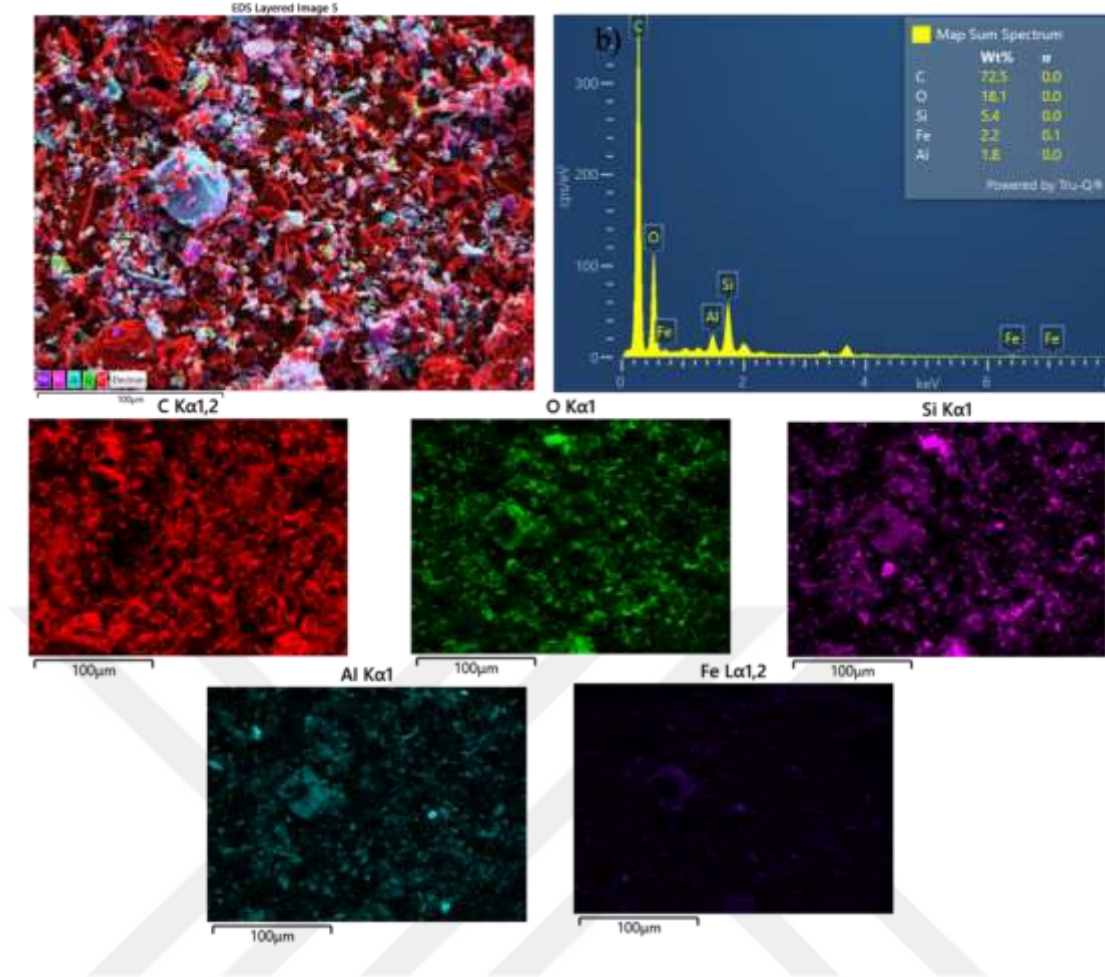


Şekil 7.2 Aktif karbonların FE-SEM görüntüleri a) Ticari aktif karbon b) OAA c) OAT

Aktif karbonların gözenek karakteristikleri incelendiğinde, makro ve mezo gözenek boyutları ile dağılımlarının her numunede farklılık gösterdiği anlaşılmaktadır. Kimyasal emdirme yönteminin, selülozik malzemelerin ayrışmasını sağlayarak karbon iskeletinin aromatisasyonunu ve gözenek oluşumunu teşvik ettiği belirlenmiştir. Aktivasyon sürecinde çinko klorür ve fosforik asidin buharlaşmasının da gözenek oluşumunda kritik rol oynadığı gözlemlenmiştir (Dąbrowski vd., 2005).

Yapılan karşılaştırmalı çalışmalar, farklı aktivasyon ajanları kullanılarak üretilen aktif karbonların karakteristik gözenek boyutları ve şekilleri açısından önemli farklılıklar sergilediğini göstermiştir (Liang vd., 2013).

Bu çalışma kapsamında, iki farklı kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonların elementel kompozisyonları ve dağılımları detaylı şekilde analiz edilerek karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, aktivasyon yöntemlerinin aktif karbonların yapısal özellikleri üzerindeki belirgin etkisini ortaya koymaktadır.



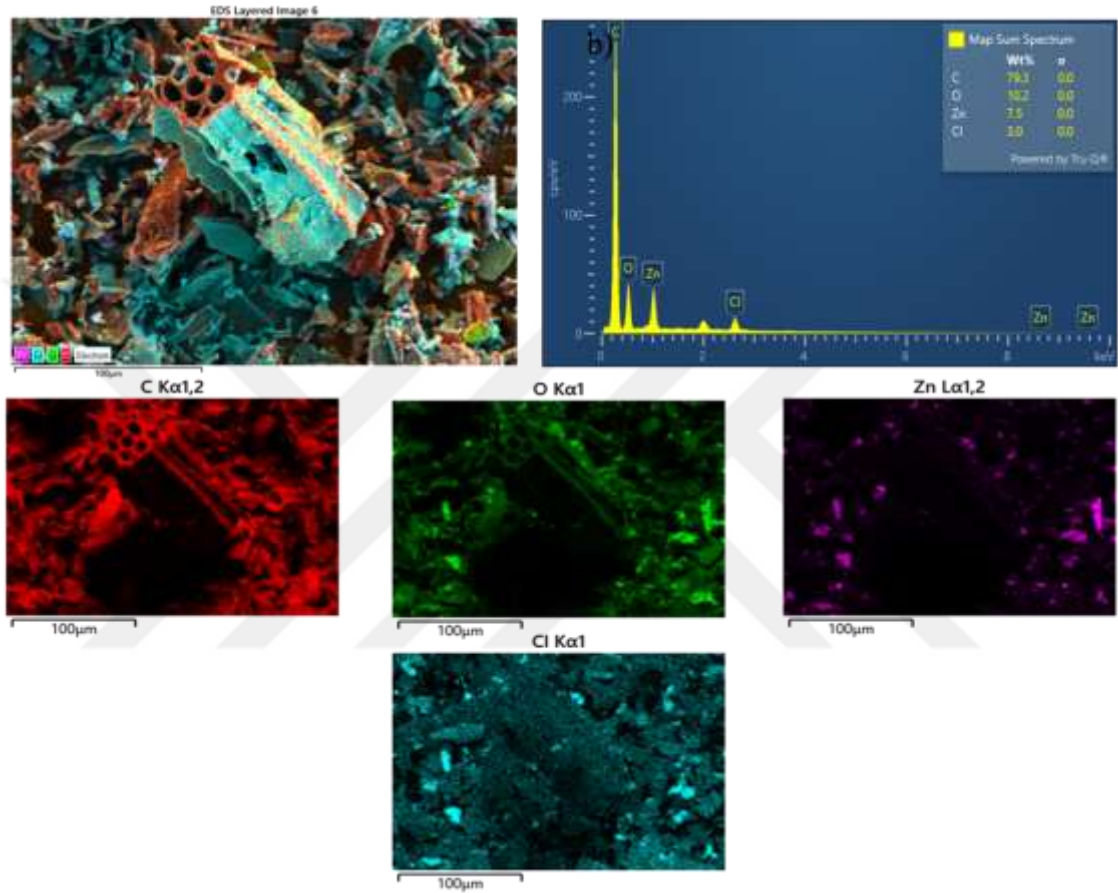
Şekil 7.3. Ticari aktif karbonun FE-SEM haritalaması ve EDS analizleri

Ticari aktif karbonun elementel bileşimi, EDS analizi (Şekil 7.3 b) ve element haritalama (Şekil 7.3 a) ile incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, C, O, Si ve Al elementleri homojen bir dağılım sergilerken, Fe elementi bu düzenli yapıdan farklılık göstermiştir. Aktif karbonun organik kaynaklı hammaddelerden üretilmesi nedeniyle, yüksek oranda karbon (C) ve oksijen (O) içermesi beklenen bir durumdur. Bu durum, hem EDS verilerinde (Şekil 7.3 b) hem de haritalama sonuçlarında (Şekil 7.3 c ve Şekil 7.3 d) açıkça gözlemlenmiştir (González-García, 2018). Benzer şekilde, Park ve arkadaşlarının hindistan cevizi lifinden üretilen aktif karbon üzerine yaptığı çalışmada da yüksek C ve O içeriği tespit edilmiştir (Park ve Cho, 2003).

Çalışmada kullanılan ticari aktif karbon örneğinde, Al ve Si elementlerinin homojen dağılımı Şekil 7.3 e ve Şekil 7.3 f'de görülmektedir. Bu bulgu, Monteiro ve arkadaşlarının hindistan cevizi liflerinde Al ve Si varlığını EDS ile doğrulayan çalışmasıyla uyumludur (Monteiro vd., 2005). Öte yandan, Fe elementi aktif karbon içerisinde %2,2 oranında tespit edilmiş ve dağılımı Şekil 7.3 g'de gösterilmiştir. Fe

varlığının, üretim sürecinde veya ortamdan kaynaklanan bir safsızlık olduğu düşünülmektedir.

Ayrıca, çinko klorür aktivasyon yöntemiyle kara kavak odun atığından üretilen aktif karbonun EDS ve haritalama analizleri Şekil 7.4'te sunulmuştur. Bu sonuçlar, aktif karbonun kimyasal bileşimi ve element dağılımı hakkında detaylı bilgi sağlamaktadır.



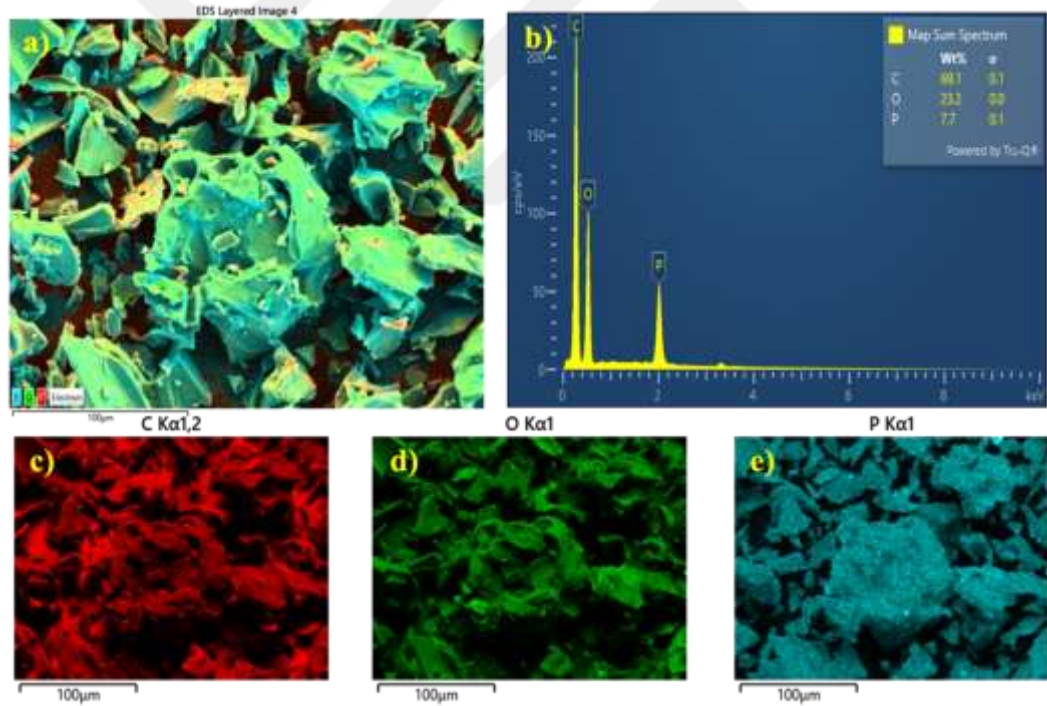
Şekil 7.4. ZnCl₂ aktivasyon ajanı kullanılarak kara kavaktan elde edilen aktif karbonunun Mapping haritalaması ve EDS analiz sonuçları

Şekil 7.4 a ve Şekil 7.4 b'de gösterildiği üzere, kara kavak odun atığından üretilen aktif karbon örneklerinde karbon (C), oksijen (O), çinko (Zn) ve klor (Cl) elementleri tespit edilmiştir. Haritalama analizleri, bu elementlerin homojen bir dağılıma sahip olduğunu ortaya koymuştur. Kara kavak odununun yapısında yaklaşık %49 C ve %42 O bulunması (Jasinskas vd., 2017), piroliz sonrasında bu elementlerin yoğun olarak kalmasını beklenen bir durum haline getirmektedir. Bu durum, hem EDS verilerinde (Şekil 7.4 b) hem de element dağılım haritalarında (Şekil 7.4 c ve Şekil 7.4 d) açıkça gözlemlenmiştir.

Aktivasyon işlemi sırasında yüksek sıcaklığın etkisiyle, aktif karbondaki karbon oranı artarken oksijen miktarında azalma meydana gelmiştir. Benzer bir eğilim, Fernandez ve arkadaşlarının çalışmasında da rapor edilmiştir. Bu çalışmada, ham maddede %43 C ve %50,2 O bulunurken, aktif karbon üretimi sonrasında C oranı %82,5'e yükselmiş ve O oranı %14,1'e düşmüştür (Fernandez vd., 2014).

Ayrıca, kullanılan çinko klorür ($ZnCl_2$) aktivasyon ajanı nedeniyle, aktif karbon yapısında Zn ve Cl elementlerinin varlığı Şekil 7.4 e ve Şekil 7.4 f'de görülmektedir. Bu bulgular, $ZnCl_2$ ile farklı ham maddelerden üretilen aktif karbonlarda elde edilen sonuçlarla uyumludur (Bal Altuntaş vd., 2020; El Nemr vd., 2022).

Fosforik asit aktivasyon yöntemiyle kara kavak odun atığından üretilen aktif karbonun EDS ve haritalama analizleri ise Şekil 7.5'te sunulmuştur. Bu kısımda, farklı kimyasal aktivasyon yöntemlerinin element dağılımı üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.



Şekil 7.5. H_3PO_4 aktivasyon ajanı kullanılarak siyah kavaktan elde edilen aktif karbonunun Mapping haritalaması ve EDS analiz sonuçları

Şekil 7.5 a ve 7.5 b'de sunulan verilere göre, fosforik asit aktivasyonu ile kara kavak odun atığından üretilen aktif karbon numunelerinde karbon (C), oksijen (O) ve fosfor (P) elementlerinin varlığı belirlenmiştir. Analiz sonuçları, bu aktif karbon

örneğin %69,1 C ve %23,2 O içerdiğini göstermektedir. C ve O elementlerinin malzeme matrisi içinde homojen dağılım gösterdiği Şekil 7.5 c ve 7.5 d'de açıkça görülmektedir.

Bu bulgular, Danish ve arkadaşlarının Acacia mangium odunundan fosforik asit aktivasyonu ile üretilen aktif karbon üzerine yaptıkları çalışmanın (%76,22 C, %17,8 O ve %5,98 P) sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir (Danish vd., 2013). Özellikle, aktif karbon yapısındaki fosfor elementinin homojen dağılımı ve PO_4^{3-} iyonlarının karbon yüzeyine başarılı bir şekilde bağlandığı Şekil 7.5 e'de gözlemlenmiştir (X. Liu vd., 2018).

Fosforik asit kullanılarak üretilen aktif karbonlarda P elementinin varlığı, bu kimyasal aktivasyon yönteminin karakteristik bir özelliğidir. Nitekim 2012 yılında yapılan bir başka çalışmada da fosforik asit ile aktive edilmiş aktif karbonlarda benzer P içeriği tespit edilmiş olup, bu durum mevcut çalışmanın sonuçlarıyla uyum göstermektedir (Vázquez-Santos vd., 2012). Bu paralellik, fosforik asit aktivasyonunun aktif karbonun elementel kompozisyonu üzerindeki tipik etkisini ortaya koymaktadır.

7.4. Aktif Karbonların Yoğunluk Deney Sonuçları

Çizelge 7.2'de sunulan verilere göre, kara kavak odun atığından üretilen aktif karbonlar ile ticari aktif karbonun yoğunluk değerleri karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları, ticari aktif karbonun 2,14 g/cm³ yoğunluğa sahip olduğunu, buna karşılık tuz ortamında (OAT) ve asit ortamında (OAA) üretilen aktif karbonların sırasıyla 2,08 g/cm³ ve 1,37 g/cm³ yoğunluk değerleri gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 7.2. Aktif karbonların yoğunlukları

Aktif Karbonlar	Yoğunluk (g/cm ³)
OA	2,14
OAA	1,37
OAT	2,08

OAA aktif karbonundaki düşük yoğunluk, malzemenin oksijen içeriğinin yüksek olması (%23,2 O) ve mikro gözenek oluşumuyla ilişkilendirilebilir (C. Zhang vd., 2018). Bu durum, EDS analiz sonuçlarıyla da desteklenmektedir- OAT aktif karbonunda oksijen oranı %10,2 olarak ölçülmüştür. Yoğunluk değerleri incelendiğinde, OAA örneği en düşük, OAT örneği ise en yüksek değere sahiptir.

Aktif karbonların gözenekli yapısı ile yoğunlukları arasında ters bir orantı bulunmaktadır. Genellikle, iyi gelişmiş gözenekli yapıya sahip malzemelerde düşük yoğunluk gözlemlenir (Y. Jiang vd., 2021). FE-SEM görüntülerinin analizi, homojen

olmayan dağılım gösteren gevşek karbon öncüleri nedeniyle oluşan büyük gözeneklerin, bu düşük yoğunluk değerlerine katkıda bulunduğunu göstermektedir. Bu yapısal özellikler, aktif karbonların fizikokimyasal davranışını önemli ölçüde etkilemektedir.

7.5. Çapraz Bağlanma ve Kürleme Sürelerinin Tayini

Bu çalışmada, fosforik asit aktivasyonu ile odun atıklarından sentezlenen aktif karbonların, NBR kauçuklarının kürlenme kinetiği ve çapraz bağlanma yoğunluğu üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir. Deneysel bulgular Çizelge 7.3'te detaylı şekilde sunulmuştur.

Çizelge 7.3. H₃PO₄ aktivasyon ajanı ile üretilen aktif karbon takviyesiyle üretilen NBR bileşiklerinin optimum kürleme süresi

150°C'de Kürleme süresi (dakika)	Pik alanı, Δh, (j/g)					Çapraz bağ yoğunluğu, α (%)				
	OA 0	OAA 5	OAA 10	OAA 15	OAA 20	OA0	OAA5	OAA 10	OAA15	OAA20
0	4,78	3,76	3,63	3,34	2,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	3,43	2,45	2,36	2,34	2,25	28,24	34,84	34,99	29,94	24,75
2	2,56	2,06	1,93	1,73	1,68	46,44	45,21	46,83	48,20	43,81
3	1,06	1,06	0,68	0,75	0,58	77,82	71,81	81,27	77,54	80,60
4	0,36	0,24	0,14	0,20	0,16	92,47	93,62	96,14	94,01	94,65
5	0,08	0,04	0,06	0,05	0,03	98,33	98,94	98,35	98,50	99,02
6	0,06	0,03	0,02	0,01	0,01	98,74	99,20	99,45	99,66	99,77

Çizelge 7.3'te sunulan veriler, fosforik asit aktivasyonu ile üretilen OA aktif karbonlarının konsantrasyon artışıyla kürleme süresinde belirgin bir azalma olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, aktif karbonun (AC) NBR vulkanizasyon sürecinde katalitik etki gösterdiğini ortaya koymaktadır. EDS ve haritalama analizlerinde tespit edilen fosfor ve oksijen içeren fonksiyonel grupların, bu hızlandırıcı etkiye katkıda bulunduğu ve çapraz bağ yoğunluğunu artırdığı değerlendirilmektedir. Dikkat çekici bir şekilde, Δh pik alanındaki azalma, AC konsantrasyonu ile ters orantılı bir eğilim sergilemektedir.

Çinko klorür aktivasyon yöntemiyle odun atığından üretilen aktif karbonun, NBR matrisli bileşiklerde dolgu maddesi olarak etkinliği Çizelge 7.4'te detaylandırılmıştır. Çalışmada, %0-20 aralığında değişen AC konsantrasyonlarının; 150°C vulkanizasyon sıcaklığındaki kürleme süresi, Δh tepe alanı (entalpi değişimi) ve çapraz bağ yoğunluğu üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir. Bu kapsamlı değerlendirme, aktif

karbonun kauçuk vulkanizasyon kinetiği ve ağ oluşum verimliliği üzerindeki optimize edici rolünü ortaya koymaktadır.

Çizelge 7.4. Çinko klorür aktivasyon ajanı ile üretilen aktif karbonun ilavesiyle üretilen NBR kauçuğunun optimum kürlleme süresi

150°C'd e Kürleme süresi (dakika)	Pik alanı, Δh (j/g)						Çapraz bağ yoğunluğu, α (%)			
	OA 0	OAT 5	OAT1 0	OAT1 5	OAT2 0	OA0	OAT 5	OAT1 0	OAT1 5	OAT2 0
0	4,78	3,82	3,76	3,61	3,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	3,43	2,63	2,48	2,42	2,35	28,24	31,15	34,04	32,96	24,68
2	2,56	2,23	1,95	1,81	2,01	46,44	41,62	48,14	49,86	35,58
3	1,06	1,41	1,30	1,26	1,22	77,82	63,09	65,43	65,10	60,90
4	0,36	0,23	0,31	0,19	0,14	92,47	93,98	91,76	94,74	95,51
5	0,08	0,05	0,04	0,04	0,04	98,33	98,65	98,84	98,79	98,72
6	0,06	0,04	0,04	0,02	0,01	98,74	98,95	98,92	99,49	99,68

Çinko klorür ile aktive edilmiş aktif karbonların kauçuk vulkanizasyonu üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çizelge 7.4'teki veriler, aktif karbon konsantrasyonu arttıkça NBR bileşiklerinin kürlleme sürelerinde belirgin bir düşüş olduğunu ortaya koymaktadır. Bu gözlem, aktif karbon partiküllerinin vulkanizasyon reaksiyonlarını hızlandırıcı bir rol üstlendiğini göstermektedir.

Deneysel sonuçlar, vulkanize edilmemiş numunelerde en yüksek Δh entalpi değerlerinin ölçüldüğünü göstermiştir. Kürlleme süresinin uzamasıyla birlikte Δh değerlerinde azalma ve çapraz bağ yoğunluğunda artış gözlenmiştir. Kontrol numuneleriyle karşılaştırıldığında, aktif karbon ilavesinin hem kürlleme süresini kısalttığı hem de çapraz bağ yoğunluğunu artırdığı tespit edilmiştir.

Bu etkinin temel mekanizması, kauçuk zincirlerindeki -CN grupları ile çinko iyonları (Zn^{2+}) arasındaki polar etkileşimlere bağlanmaktadır (Mou vd., 2012). Literatürdeki benzer çalışmalar da bu bulguları desteklemektedir. Özellikle Palaty ve Joseph'in yaptığı araştırmada, çinko tuzları ilavesinin kauçuklarda çapraz bağ yoğunluğunu artırdığı bildirilmiştir (Palaty ve Joseph, 2000).

Aktif karbonun bu katalitik etkisi, birkaç faktörle açıklanabilir:

1. Yüksek yüzey alanı sayesinde reaksiyon bölgelerinin artması
2. Yüzey fonksiyonel gruplarının reaksiyonları kolaylaştırması
3. Gözenekli yapının reaktif difüzyonunu iyileştirmesi

Bu özellikler, aktif karbonun kauçuk endüstrisinde çift fonksiyonlu (dolgu maddesi ve proses hızlandırıcı) bir katkı maddesi olarak kullanım potansiyelini

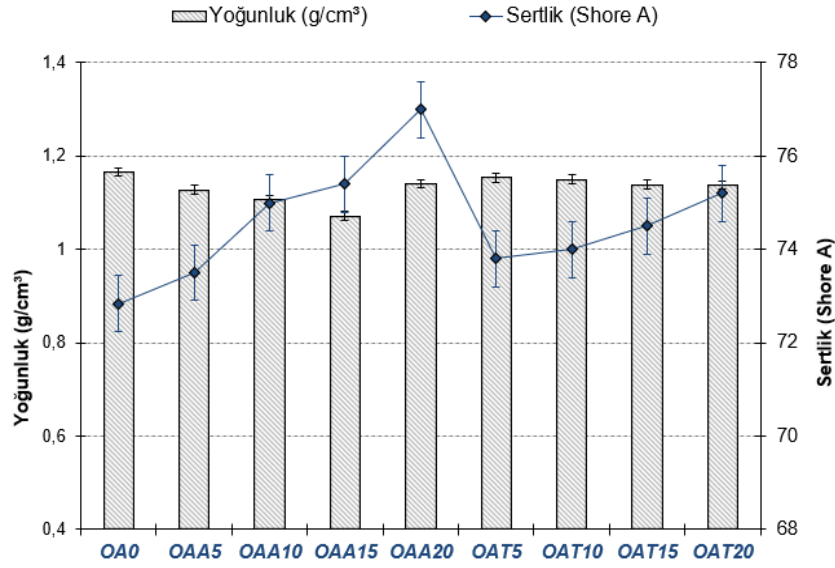
göstermektedir (Z. Li vd., 2023; Zheng vd., 2023). Çalışma sonuçları, aktif karbon modifikasyonunun kauçuk vulkanizasyon parametreleri üzerinde önemli bir kontrol sağladığını ortaya koymaktadır.

7.6. OA İlaveli Bileşiklerin Sertlik ve Yoğunluk Test Sonuçları

Karakavak odun atığından üretilen aktif karbon takviyeli kauçuk bileşiklerin yoğunluk ve sertlik özellikleri incelendiğinde ilginç sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Şekil 7.6 'da sunulan veriler, iki farklı kimyasal aktivasyon yöntemiyle üretilen OAA ve OAT kodlu aktif karbonların, bileşiklerin fiziksel özellikleri üzerinde belirgin etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Aktif karbon ilave oranı arttıkça, tüm bileşiklerde yoğunluk değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Kontrol grubu olarak kullanılan ve karbon siyahı içeren OA0 bileşiğinin yoğunluğu $1,83 \text{ g/cm}^3$ olarak ölçülürken, OAA ve OAT aktif karbonlarının yoğunlukları sırasıyla $1,73 \text{ g/cm}^3$ ve $2,08 \text{ g/cm}^3$ olarak belirlenmiştir.

Yoğunluk değerlerindeki bu değişimler, malzemelerin yapısal özellikleriyle yakından ilişkilidir. Özellikle OAA katkılı bileşiklerde görülen yoğunluk azalması, aktif karbonun düşük yoğunluklu yapısından kaynaklanmaktadır. OAT katkılı bileşiklerde ise yoğunluk düşüşünün temel nedeni, bu aktif karbonun $996 \text{ m}^2/\text{g}$ gibi oldukça yüksek bir yüzey alanına sahip olmasıdır. Karşılaştırma amacıyla kullanılan karbon siyahının yüzey alanının yalnızca $137 \text{ m}^2/\text{g}$ olduğu düşünüldüğünde, bu farkın bileşik özelliklerine nasıl yansıdığı daha iyi anlaşılmaktadır.

Yüksek yüzey alanına sahip aktif karbonların dolgu maddesi olarak kullanılması, kauçuk hamurunun hacmini artırmakta ve vulkanizasyon kalıbına konan hamur miktarını azaltmaktadır. Bu durum, kütlece daha az kauçuk kullanımına olanak sağlayarak üretim maliyetlerinin düşürülmesine yardımcı olmaktadır. FE-SEM görüntüleme çalışmaları, hem aktif karbonların kendisinin gözenekli yapısını hem de aktif karbon katkılı kauçuk bileşiklerin süngerimsi morfolojisini açıkça ortaya koymaktadır. Bu mikro yapısal özellikler, bileşiklerde gözlenen yoğunluk azalmasının temel nedenini oluşturmakta ve malzemelerin fiziksel davranışlarını doğrudan etkilemektedir.



Şekil 7.6. OAA ve OAT ilave edilmiş bileşiklerin sertlik ve yoğunluk grafiği

Aktif karbon katkısının kauçuk bileşiklerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri Şekil 7.6'da detaylı olarak incelenmiştir. Deneysel bulgular, aktif karbon ilavesinin bileşik sertliğinde önemli artışlara yol açtığını göstermektedir. İki farklı kimyasal aktivasyon yöntemiyle (OAA ve OAT) üretilen aktif karbonların her ikisi de benzer sertleştirme eğilimi sergilemiş olup, en yüksek sertlik değeri %20 OAA aktif karbon içeren OAA20 bileşiğinde 89,67 Shore A olarak ölçülmüştür. Bu değer, aktif karbon içermeyen kontrol numunesi OAA0'ın 79,76 Shore A'lık sertlik değerine kıyasla belirgin bir artışı ifade etmektedir.

Karşılaştırmalı analizler, OAA aktif karbonunun OAT'ye göre bileşikler daha fazla sertleştirme eğiliminde olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgular, literatürdeki benzer çalışmalarla uyumluluk göstermektedir. Özellikle NBR kauçuk matrisine aktif karbon ilavesiyle yapılan bir araştırmada, artan aktif karbon oranının bileşik sertliğini doğrusal olarak artırdığı rapor edilmiştir (Nooun vd., 2023). Sertlikteki bu artış, aktif karbon partiküllerinin kauçuk matris içindeki dolgu etkisi ve partikül-matris arayüzey etkileşimlerinin güçlendirici rolüyle açıklanabilir. Aktif karbonun yüksek yüzey alanı ve gözenekli yapısı, kauçuk zincirleriyle daha etkin bir etkileşim sağlayarak malzemenin genel sertlik karakteristiğini iyileştirmektedir.

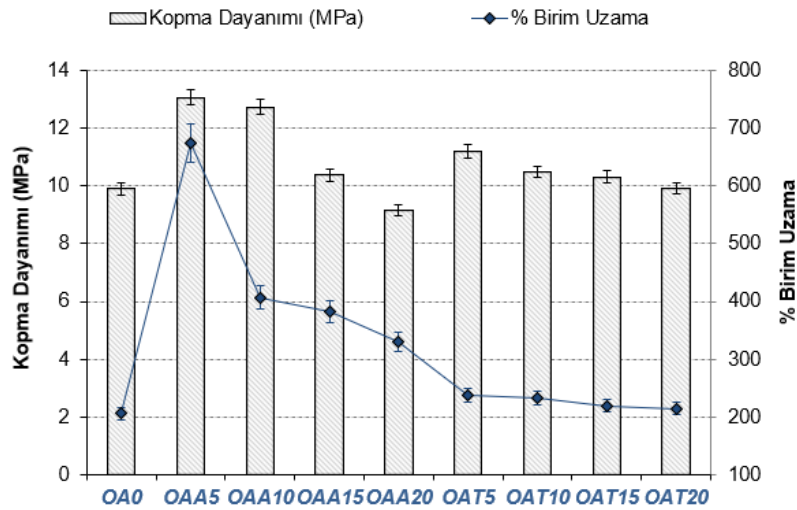
7.7. OA İlaveli Bileşiklerin Kopma Dayanımı ve % Birim Uzama Test Sonuçları

Odun atığı kaynaklı aktif karbonların NBR kauçuk bileşiklerinde dolgu maddesi olarak kullanımının mekanik özelliklere etkisi çekme testleriyle değerlendirilmiştir. Şekil

7.7'de sunulan test verileri, dolgu miktarı arttıkça (OAA20 ve OAT20 hariç) bileşiklerin kopma dayanımı ve birim uzama değerlerinde artış olduğunu ortaya koymaktadır. En yüksek mekanik performans, asit ortamında üretilen aktif karbonlu OAA5 bileşiğinde gözlenirken, bunu tuz ortamında üretilen OAT5 bileşiği takip etmiştir.

Karşılaştırmalı analizler, aktif karbon ilavesinin mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Kontrol numunesi OA0'a kıyasla, OAA5 bileşiğinde %31'lik, OAT5 bileşiğinde ise %21'lik kopma dayanımı artışı kaydedilmiştir. Mekanik dayanımdaki bu artışa paralel olarak, birim uzama değerlerinde de önemli iyileşmeler gözlemlenmiştir. Referans numunesinin %205,56 olan birim uzama değeri, OAA5'te %674'e, OAT5'te ise %238'e yükselmiştir. Bu sonuçlar, odun atığından üretilen aktif karbonların kauçuk matrisle uyumlu etkileşimler kurarak hem dayanımı hem de esnekliği aynı anda artırabildiğini göstermektedir.

Özellikle orta düzeydeki (%5) aktif karbon ilavesinin, yüksek oranlı (%20) ilavelere kıyasla daha iyi mekanik performans sergilemesi dikkat çekicidir. Bu durum, optimal dolgu oranının belirlenmesinin önemini vurgulamakta ve aktif karbon partiküllerinin kauçuk matris içindeki dağılımının mekanik özellikler üzerinde belirleyici rol oynadığını ortaya koymaktadır.



Şekil 7.7. OA takviye edilmiş bileşiklerin gerilim-gerinim grafiği

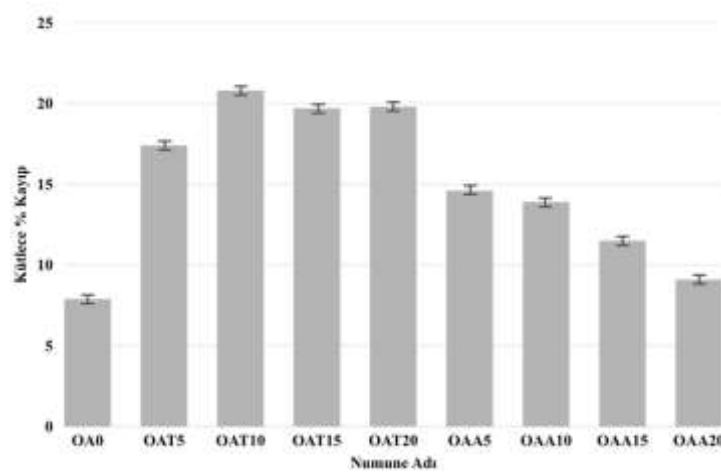
OAA20 ve OAT20 bileşiklerinde gözlenen mekanik özelliklerdeki düşüşün altında yatan mekanizmalar detaylı olarak analiz edilmiştir. Birincil neden olarak, aktif karbon partiküllerinin gözenekli yapısı ve keskin kenarlarının, çekme kuvvetinin bileşik içindeki transferini olumsuz etkilediği değerlendirilmektedir. Karbon siyahının küresel

morfolojisiyle karşılaştırıldığında, aktif karbonun düzensiz yüzey yapısının stres yoğunlaşmasına yol açarak malzemenin daha düşük gerilme değerlerinde kopmasına neden olduğu düşünülmektedir (Rattanasom vd., 2009).

İkinci etken ise heterojen dolgu sisteminin matrisle etkileşimlerindeki uyumsuzluktur. Farklı yüzey alanlarına ve partikül boyutlarına sahip dolgu maddelerinin (karbon siyahı ve aktif karbon) birlikte kullanımı, kauçuk zincirleriyle kurulan bağlantıların verimliliğini azaltmaktadır. Van der Waals ve kovalent bağlar gibi temel etkileşim mekanizmalarının zayıflaması sonucu, kauçuk zincirlerinin hareket kabiliyeti kısıtlanmakta ve malzeme daha katı bir davranış sergilemektedir. Bu durum, bileşiklerin hem birim uzama kapasitesinde hem de kopma dayanımında önemli kayıplara yol açmaktadır (Al-Ghamdi vd., 2018; Bhattacharyya vd., 2008).

7.8. OA İlaveli Bileşiklerin Aşınma Test Sonuçları

Aşınma testi sonuçları, OAT serisi numunelerin aşınma direnci üzerinde aktif karbon ilavesinin belirgin etkilerini ortaya koymaktadır. Kontrol numunesi OA0'ın %7,9 kütle kaybına karşılık, OAT5 numunesinde bu değer %17,4'e yükselerek aşınma kaybında önemli bir artış gözlenmiştir. Bu eğilim, OAT10 numunesinde %20,8 ile maksimum seviyeye ulaşmış, ancak daha yüksek aktif karbon içerikli OAT15 (%19,7) ve OAT20 (%19,8) numunelerinde hafif bir düşüş göstermiştir. Bu davranış, aktif karbon partiküllerinin belirli bir orana kadar aşınmayı artırıcı etki gösterdiğini, ancak yüksek konsantrasyonlarda bu etkinin stabilize olduğunu düşündürmektedir. Muhtemelen aktif karbonun sert yapısı ve matrisle etkileşimi, aşınma mekanizmasını doğrudan etkilemektedir.



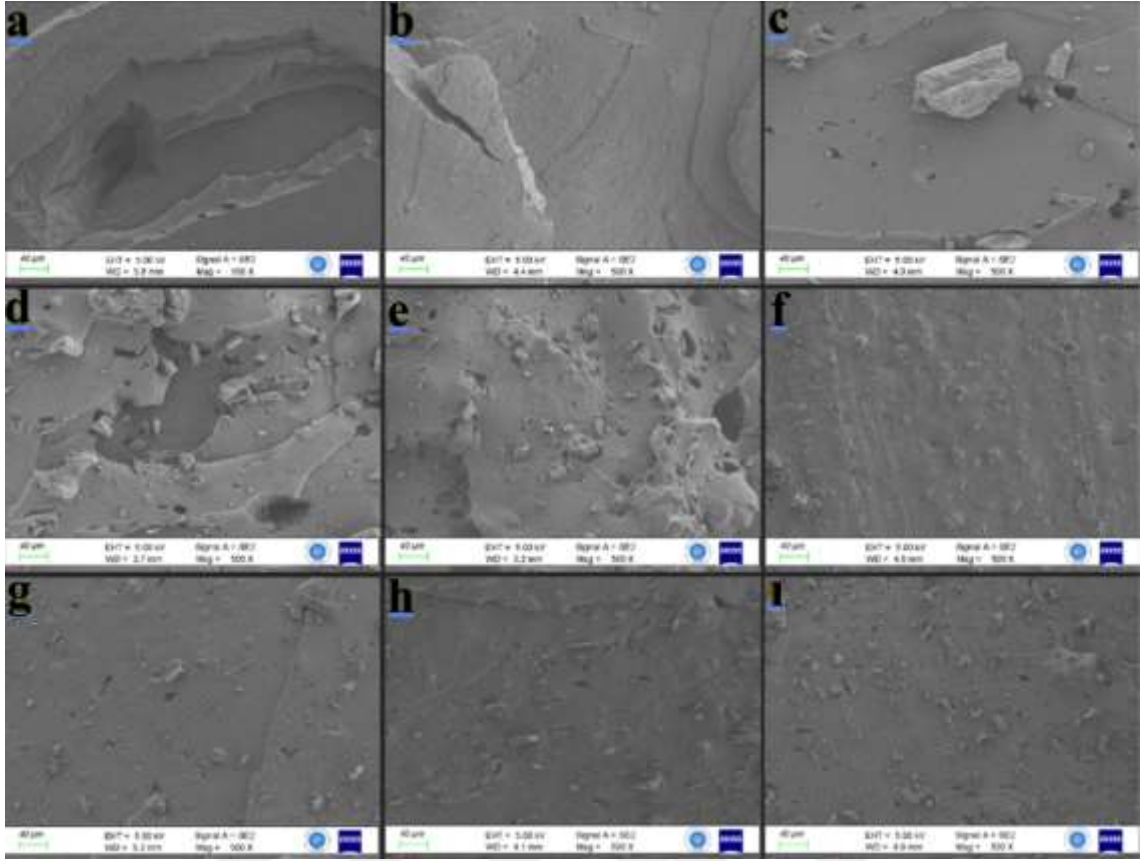
Şekil 7.8. OA takviye edilmiş bileşiklerin kütlece yüzde kayıp grafiği

OAA serisi numunelerde ise ilginç bir şekilde ters yönde bir eğilim gözlemlenmiştir. OAA5 numunesinde %14,6 olan kütle kaybı, aktif karbon oranı arttıkça istikrarlı bir şekilde azalarak OAA10'da %13,9'a, OAA15'te %11,5'e ve OAA20'de %9,1'e düşmüştür. Bu sonuçlar, OAA serisindeki aktif karbonun aşınma direncini iyileştirici bir rol oynadığını göstermektedir. Aktif karbon partiküllerinin yapısal özelliklerinin, malzeme yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşturarak veya matrisin mekanik dayanımını artırarak aşınma kaybını azalttığı değerlendirilmektedir. Özellikle OAA20 numunesinin OA0 kontrol numunesine yakın kayıp değeri göstermesi dikkat çekicidir.

İki seri arasındaki bu zıt aşınma davranışları, kullanılan aktif karbon türlerinin farklı yapısal özelliklerinden kaynaklanmaktadır. OAT serisindeki aktif karbonun daha iri ve keskin kenarlı partikül yapısı, aşınma sırasında malzeme kaybını artırıcı etki göstermiştir. Buna karşın OAA serisindeki aktif karbonun daha homojen dağılım gösteren ve matrisle daha uyumlu etkileşime giren yapısı, aşınma direncini iyileştirmiştir. Aşınma testi sonuçları, aktif karbonun bileşik malzemelerin aşınma performansı üzerindeki etkisinin sadece miktara değil, aynı zamanda partikül morfolojisi ve matrisle etkileşimine de bağlı olduğunu açıkça göstermektedir. Bu bulgular, endüstriyel uygulamalarda aktif karbon seçiminin aşınma performansı üzerinde belirleyici rol oynayacağını ortaya koymaktadır.

7.9. OA İlaveli Bileşiklerin Kopma Yüzlerinin FE-SEM ve EDS Analizleri

Karakavak odun atığından çinko klorür ve fosforik asit aktivasyon yöntemleriyle üretilen aktif karbonların NBR kauçuk matrisine ilave edilmesiyle hazırlanan bileşiklerin mekanik test sonrası kırık yüzey morfolojileri FE-SEM tekniği ile incelenmiştir. Şekil 7.9'da sunulan elektron mikroskobu görüntüleri, farklı kimyasal aktivasyon yöntemleriyle üretilen aktif karbonların kauçuk matris içindeki dağılımını ve kırık yüzey karakteristiklerini karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktadır. Bu görüntüler, aktif karbon partiküllerinin matrisle olan arayüzey etkileşimlerini ve kopma mekanizmalarını anlamak açısından önemli veriler sağlamaktadır.

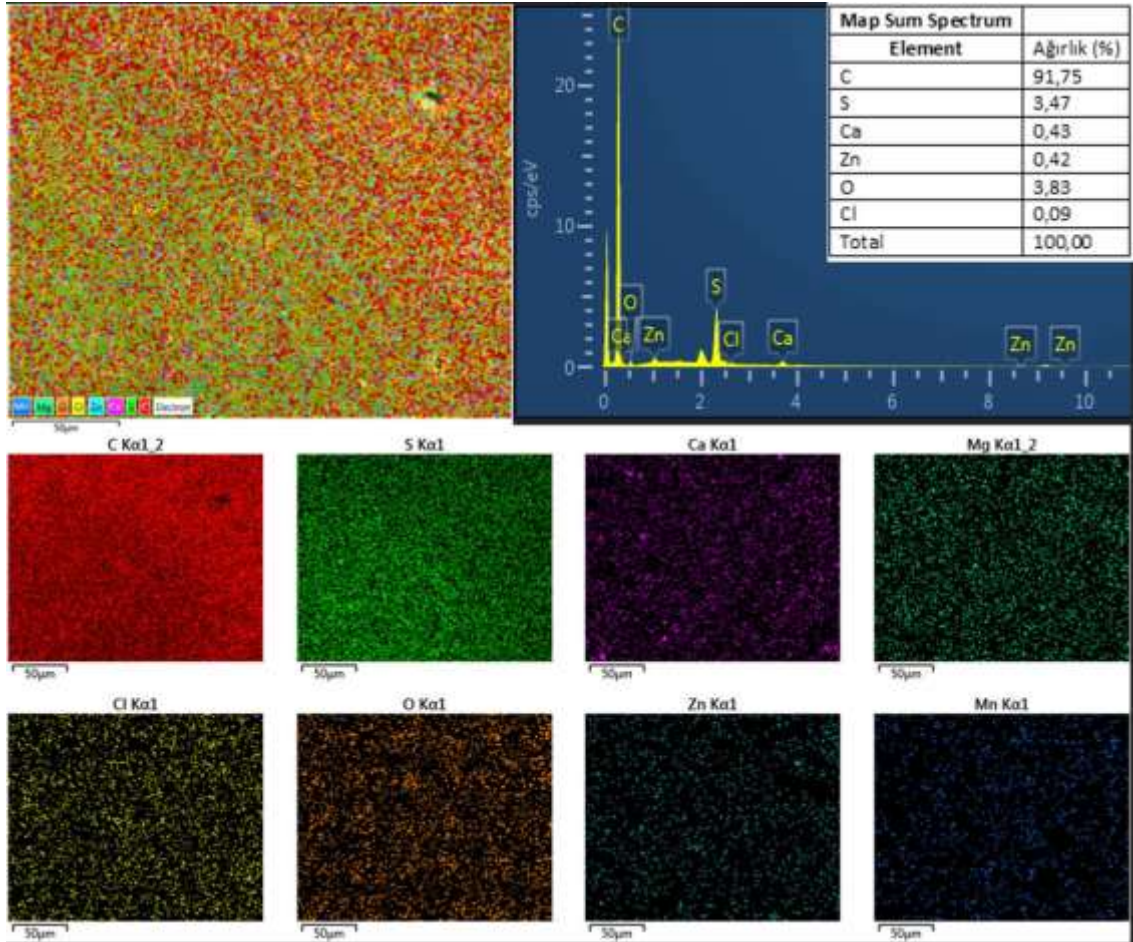


Şekil 7.9. OA ilaveli bileşiklerin FE-SEM görüntüleri; **a)** OA0, **b)** OAA5, **c)** OAA10, **d)** OAA15, **e)** OAA20, **f)** OAT5, **g)** OAT10, **h)** OAT15 ve **i)** OAT20

FE-SEM analizleri, aktif karbon konsantrasyonu arttıkça kopma yüzeylerinde belirgin morfolojik değişimler olduğunu ortaya koymaktadır. Artan aktif karbon miktarıyla birlikte partiküllerin yüzeyde daha belirgin hale geldiği, tane boyut dağılımının değiştiği ve arayüzeyde heterojen dağılım bölgeleri olduğu gözlemlenmiştir. Mikroskobik incelemelerde, yüzeyde küresel mikro gözenekler ve partikül topaklanmalarının arttığı, buna karşılık bazı bölgelerde yivli çizgi yoğunluğunun azaldığı tespit edilmiştir. Bu morfolojik değişimler, aktif karbonun kauçuk matrisle etkileşiminden ve artan çapraz bağ yoğunluğundan kaynaklanan mekanik özellik değişimleriyle doğrudan ilişkilidir.

Mekanik performans iyileşmeleri, aktif karbonun oluşturduğu gözenekli yapı sayesinde açıklanabilmektedir. Bu iç yapı, çekme gerilmeleri altında moleküler zincirlerin hareketine izin vererek malzemeye esneklik kazandırmaktadır. Ancak optimizasyon çalışmaları, aktif karbon miktarı ile esneklik arasında kritik bir denge olduğunu göstermektedir. Aşırı yükleme durumlarında yüzey alanı iyileşmesi ile esneklik kazanımları arasındaki dengenin bozulabileceği dikkate alınmalıdır (Nasir vd., 1988).

Aktif karbonsuz referans bileşiklerin (OA0) karşılaştırmalı elementel haritalama analizleri Şekil 7.10’de sunulmuştur. NBR esaslı, aktif karbon içermeyen ve aktif karbon eklenmiş bileşiklerin net biçimde karşılaştırılabilmesi ile kopma yüzeylerinin morfolojik özelliklerinin ayrıntılı incelenmesi amacıyla elementel haritalama yöntemi kullanılmıştır. Yüzey analizi ve dolgu dağılımının daha açık şekilde görülebilmesi için, aktif karbon içeriğinin en yüksek olduğu OAA20 ve OAT20 numuneleri seçilerek detaylı incelemeler yapılmıştır.

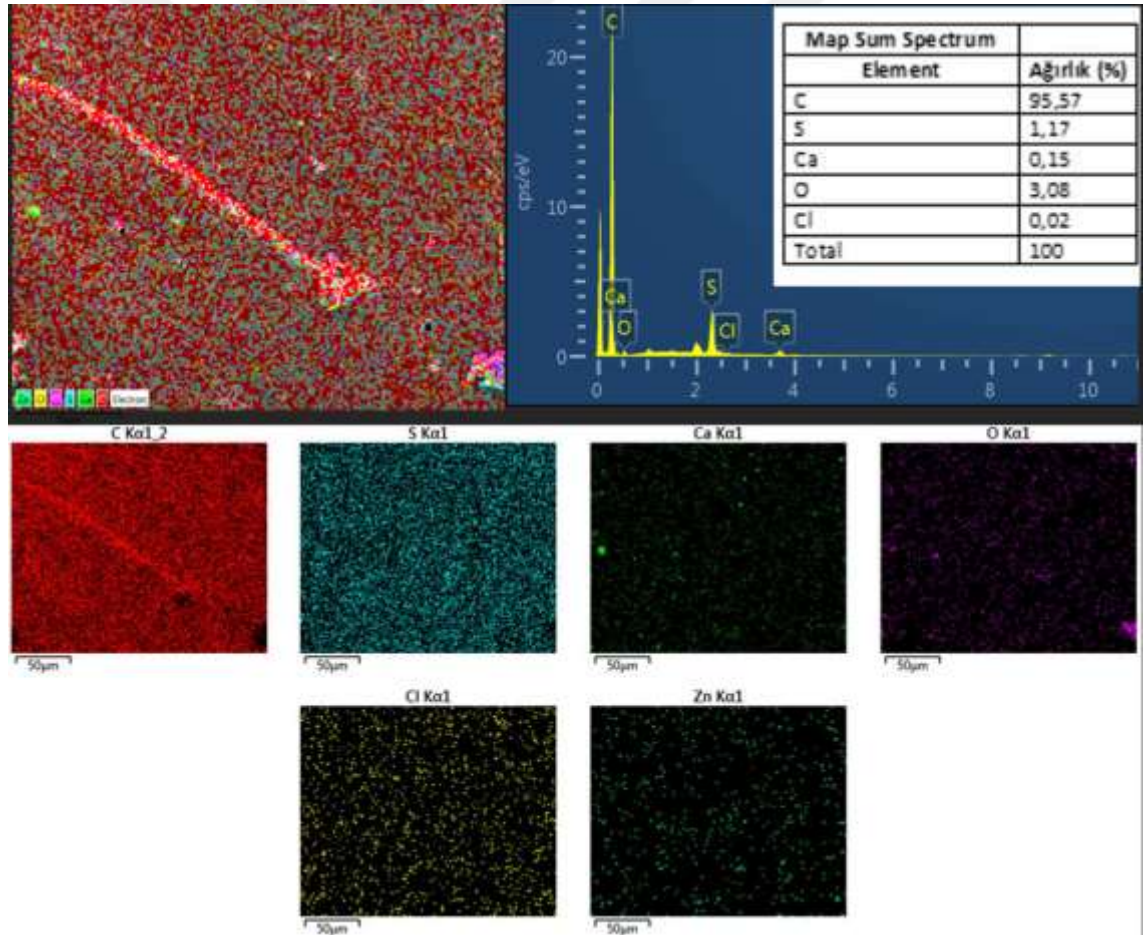


Şekil 7.10. Aktif karbon içermeyen NBR bileşiğinin EDS ve element haritalama analizi

Çekme testi numunelerinin kırılma yüzeylerinde gerçekleştirilen EDS analizleri, bölgesel heterojenliklerin varlığını ortaya koymuştur. Özellikle yükselti gösteren alanlarda yapılan incelemeler, elementel kompozisyonun yanı sıra dolgu maddesi dispersiyonunun morfolojik özellikleri hakkında da önemli veriler sağlamaktadır. Haritalama sonuçları, aktif karbon içermeyen kontrol grubu bileşiklerde (OA0) katkı maddelerinin homojen dağılım sergilediğini göstermektedir.

Elementel kompozisyon analizleri, kontrol grubu numunelerde %91,25 karbon (C), %3,47 kükürt (S), %3,83 oksijen (O), %0,43 kalsiyum (Ca), %0,42 çinko (Zn) ve %0,09 klor (Cl) içeriği olduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, kauçuk matrisin temel bileşenlerini ve vulkanizasyon sürecinde kullanılan katkı maddelerinin kalıntılarını yansıtmaktadır.

Fosforik asit aktivasyonu ile karakavak odun atığından üretilen ve %20 oranında aktif karbon içeren OAA20 bileşiklerinin elementel haritalama ve EDS analiz sonuçları Şekil 7.11'de detaylı olarak sunulmuştur. Bu analizler, aktif karbon partiküllerinin matris içindeki dağılımını ve yüzey morfolojisiyle olan ilişkisini ortaya koyarak, bileşiklerin mekanik özelliklerini etkileyen mikro yapısal faktörleri aydınlatmaktadır. Fosforik asit aktivasyonunun karakteristik elementel imzası, özellikle fosfor (P) dağılımı üzerinden takip edilebilmektedir.



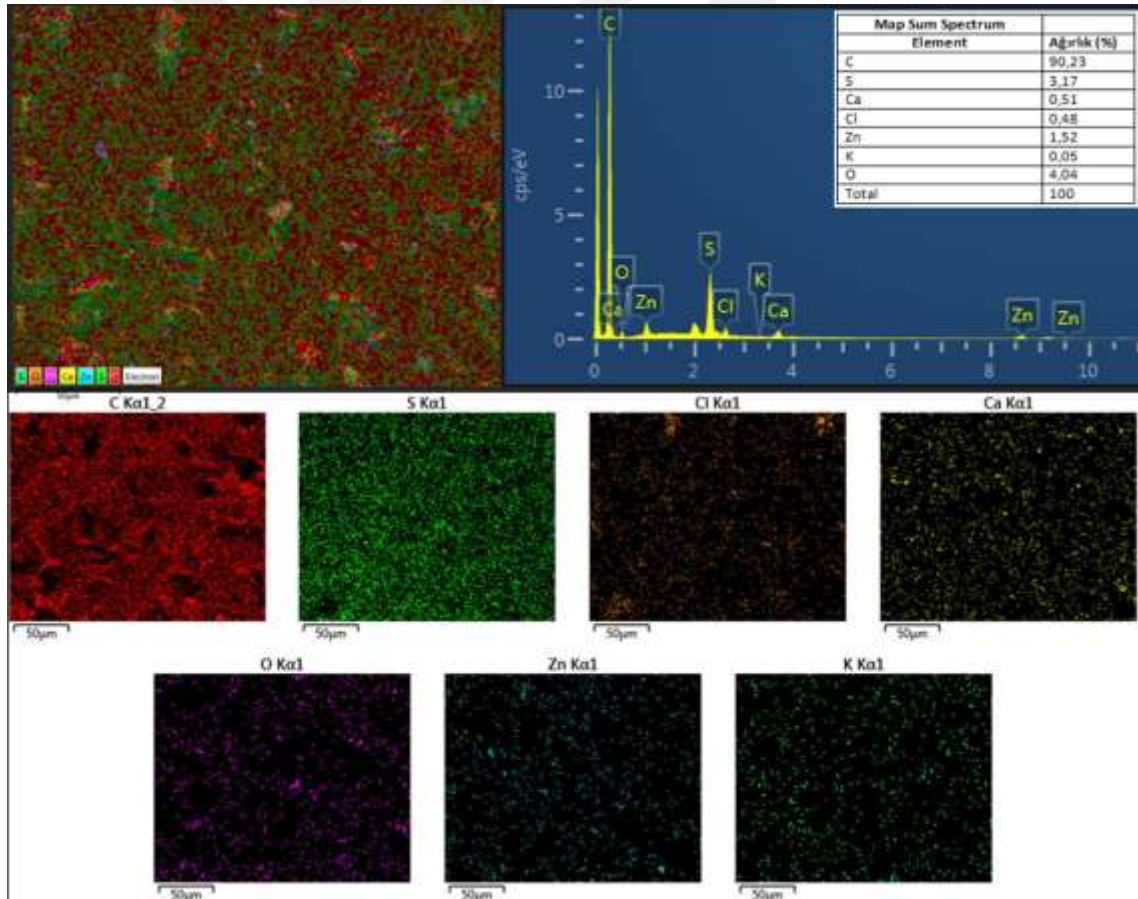
Şekil 7.11. OAA20 bileşiğinin Mapping ve EDS analizleri

Bileşiklerin iç yapısal özelliklerinin ve kimyasal kompozisyonunun belirlenmesi amacıyla kapsamlı element analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Haritalama tekniği ile

karbon (C), kükürt (S), oksijen (O), kalsiyum (Ca) ve klor (Cl) elementlerinin uzaysal dağılımı görselleştirilmiştir. En yüksek dolgu oranına sahip OTA20 numunesinin kırılma yüzeyinde yapılan EDS analizi, elementel kompozisyonun %95,57 C, %3,08 O, %1,17 S, %0,15 Ca ve %0,02 Cl şeklinde olduğunu ortaya koymuştur (Şekil 7.11).

Analiz sonuçları, vulkanizasyon sürecinde kritik rol oynayan çinko (Zn) ve kükürt (S) elementlerinin matris boyunca homojen dağılım gösterdiğini kanıtlamaktadır. Diğer temel elementler olan C, O ve Ca'nın da enine kesit boyunca sürekli ve düzgün bir dağılım sergilediği gözlemlenmiştir. Bu homojen element dağılımının, bileşiklerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileşmesinde önemli bir etken olduğu değerlendirilmektedir.

Çinko klorür aktivasyonu ile üretilen ve %20 aktif karbon içeren OAT20 bileşiklerinin elementel haritalama ve EDS analiz sonuçları ise Şekil 7.12'te detaylı olarak sunulmuştur. Bu analizler, farklı aktivasyon yöntemlerinin bileşiklerin mikro yapısal özellikleri üzerindeki etkilerinin karşılaştırılmasına olanak tanımaktadır.



Şekil 7.12. OAT20 bileşiğinin Mapping ve EDS analizleri

Bileşiklerin iç yapısal özelliklerinin ve kimyasal kompozisyonunun detaylı analizi için element haritalama (Mapping) ve Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDS) çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Haritalama analizleri, karbon (C), kükürt (S), klor (Cl), oksijen (O), kalsiyum (Ca), çinko (Zn) ve potasyum (K) elementlerinin uzaysal dağılımını görselleştirmiştir. En yüksek dolgu maddesi içeriğine sahip OTT20 numunesinin kırılma yüzeyinde yapılan EDS analizi, bileşiğin elementel kompozisyonunu %90,23 C, %4,04 O, %3,17 S, %1,51 Zn, %0,51 Ca, %0,48 Cl ve %0,05 K olarak ortaya koymuştur (Şekil 7.13).

Analiz bulguları, vulkanizasyon sürecinde kritik öneme sahip olan kükürt (S) ve çinko (Zn) elementlerinin kauçuk matrisi boyunca homojen bir dağılım sergilediğini göstermektedir. Diğer temel elementler olan karbon (C), oksijen (O) ve kalsiyum (Ca) da matris içerisinde düzgün ve sürekli bir dağılım paterni oluşturmuştur. Bu homojen element dağılımının, bileşiklerin fizikomekanik özelliklerinin iyileşmesinde belirleyici rol oynadığı değerlendirilmektedir.

Özellikle aktif karbon yapısında bulunan çinko (Zn) ve oksijen (O) elementlerinin bir araya gelerek çinko oksit (ZnO) etkisi oluşturduğu ve bu durumun çapraz bağ yoğunluğunu artırarak malzeme performansını iyileştirdiği düşünülmektedir. Bu sinerjik etki, bileşiklerin mekanik dayanımını ve termal stabilitesini önemli ölçüde artıran bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Elementel haritalama sonuçları, farklı kimyasal grupların matris içindeki optimal dağılımının, bileşik malzemenin genel performansı üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1 Sonuçlar

- Bu araştırmada NBR kauçuk matrislerinin mekanik performansını artırmak amacıyla biyokütle kaynaklı aktif karbonlar kullanılmıştır. Odun atığı gibi yenilenebilir kaynaklardan, çinko klorür ($ZnCl_2$) ve fosforik asit (H_3PO_4) aktivasyon yöntemleriyle üretilen aktif karbonların bileşik özellikleri üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir.
- BET analiz sonucunda, fosforik asit ile aktive edilen aktif karbonların daha yüksek verim sağladığı, buna karşın çinko klorür ile aktive edilenlerin daha geniş yüzey alanı ve mikro gözenek hacmine sahip olduğu belirlenmiştir.
- FTIR analizi, aktivasyon yöntemlerinin aktif karbonların yüzey kimyasını belirgin biçimde farklılaştırdığını göstermiştir. Fosforik asit aktivasyonu fosfor içeren yüzey gruplarının oluşumunu artırırken, çinko klorür aktivasyonu oksijenli fonksiyonel grupların gelişimini teşvik etmiştir.
- FE-SEM ve EDS analizleri, aktivasyon yöntemlerinin aktif karbonların yüzey morfolojisi ve elementel bileşimi üzerinde belirgin etkiler yarattığını göstermiştir. Fosforik asit aktivasyonu daha homojen ve küresel gözenekler ile fosfor içeren yüzeyler oluştururken, çinko klorür aktivasyonu yoğun ve elipsoidal gözenek yapılarıyla yüksek yüzey alanı sağlamıştır. Bu fark, aktif karbonun yapısal özelliklerini ve performansını doğrudan belirleyen en dikkat çekici sonuçtur.
- Yoğunluk analizleri, aktivasyon yönteminin aktif karbonların yapısal özelliklerini belirgin biçimde etkilediğini göstermiştir. Fosforik asit ile aktive edilen OAA örneği, yüksek oksijen içeriği ve gelişmiş gözenek yapısı nedeniyle en düşük yoğunluğa ($1,37 \text{ g/cm}^3$) sahip olmuştur.
- Çapraz bağlanma ve kürlenme süresi sonuçları, fosforik asit ve çinko klorürle aktive edilen aktif karbonların NBR kauçuklarının kürlenme süresini belirgin şekilde kısalttığını ve çapraz bağ yoğunluğunu artırdığını göstermiştir.
- Sertlik ve yoğunluk testi sonuçları, aktif karbon ilavesinin NBR kauçuk bileşiklerinin sertlik ve yoğunluk özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Fosforik asitle aktive edilen OAA aktif karbonu, en yüksek sertlik artışını (%20 katkıda 89,67 Shore A) sağlamış ve bu etkisiyle OAT'ye göre daha güçlü bir sertleştirici rol oynamıştır.

- Çekme testi sonuçları, odun atığı kaynaklı aktif karbonların NBR kauçuklarının mekanik özelliklerini belirgin şekilde iyileştirdiğini göstermiştir. En yüksek performans, fosforik asitle aktive edilen %5 OAA katkılı bileşikte gözlenmiş; kopma dayanımı %31, birim uzama ise %674'e ulaşmıştır. En dikkat çekici sonuç, düşük orandaki aktif karbon ilavesinin yüksek orandaki dolgulardan daha iyi mekanik dayanım sağlamasıdır; bu
- Aşınma testleri, aktif karbon türünün ve miktarının aşınma direncini belirleyici biçimde etkilediğini göstermiştir. OAT serisinde aktif karbon oranı arttıkça aşınma kaybı artarken, OAA serisinde tam tersi bir eğilim gözlenmiş ve aşınma kaybı azalmıştır. Özellikle OAA20 numunesi, en düşük kütle kaybıyla en yüksek aşınma direncini göstermiştir.
- FE-SEM ve EDS analizleri özelinde değerlendirildiğinde, en iyi özellikler %20 aktif karbon içeren OAA20 ve OAT20 bileşiklerinde elde edilmiştir. FE-SEM görüntüleri, bu numunelerde partiküllerin matris içinde homojen dağıldığını, gözenekli yapı ve partikül topaklanmalarının optimal seviyede olduğunu göstermiştir. EDS analizleri ise C, O, Zn, S ve diğer kritik elementlerin matris boyunca düzgün ve sürekli dağıldığını ortaya koymuş; özellikle OAA20'de Zn ve O elementlerinin sinerjik etkisiyle oluşan ZnO, çapraz bağ yoğunluğunu artırarak mekanik dayanımı iyileştirmiştir.
- Optimum performansın %5 aktif karbon içeren bileşiklerde elde edildiği, daha yüksek oranlarda ise performansın kısmen azalmasına rağmen referans numunelere göre üstün özellikler sergilediği tespit edilmiştir. Yoğunluk ölçümleri, aktif karbon takviyeli bileşiklerin karbon siyahı içerenlere göre daha düşük yoğunluk değerlerine sahip olduğunu göstermiştir. Çinko klorür ile aktive edilen numuneler (OAT) daha çok yüksek yüzey alanı ve mikroporozite gerektiren uygulamalar (örneğin adsorpsiyon) için idealdir. Fosforik asit ile aktive edilen numuneler (OAA) ise mekanik mukavemet, esneklik, sertlik ve aşınma direnci gibi kombin bir performans istenen uygulamalarda, özellikle %5 ila %10 gibi orta seviyelerde kullanıldığında, en başarılı sonuçları vermiştir. OAA5 bileşiği, genel anlamda en dengeli ve en üstün mekanik özellikleri sergileyen numunedir.

8.2 Öneriler

- Yüzey Modifikasyon Çalışmaları: Aktif karbonun hidrofobik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla yüzey modifikasyon teknikleri (kimyasal fonksiyonlandırma, plazma tedavisi vb.) uygulanarak matrisle uyumluluğu artırılabilir.
- Uygulama Alanları: Hafifliği ve iyi mekanik özellikleri nedeniyle otomotiv yalıtım malzemeleri, spor ekipmanları veya enerji depolama uygulamaları gibi özel alanlarda kullanım potansiyeli araştırılmalıdır.



9. KAYNAKLAR

- A Abdelsalam, A., Demiral, M., Selim, M. M., & El-Sabbagh, S. H. (2024). Effect of filler surface treatment on the physico-mechanical properties of filler/styrene-butadiene rubber nanocomposites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 08927057241244708. <https://doi.org/10.1177/08927057241244708>
- Abdul Rahim, A. A. (2024). *Hurma çekirdeği temelli aktif karbon/polianilin kompozitlerinin üretimi ve değerlendirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Eskişehir Teknik Üniversitesi.
- Açıl, H. (2024). *Bittum ve menengiç bitkilerinden elde edilen aktif karbon ile sulu çözeltilerden karbofuran giderimi* [Yüksek Lisans Tezi]. Mardin Artuklu Üniversitesi.
- Aguele, F. O., & Madufor, C. I. (2012). Effects of carbonised coir on physical properties of natural rubber composites. *American journal of polymer science*, 2(3), 28-34.
- Ahmed, N. M., & ElNashar, D. E. (2013). The effect of zinc oxide–phosphate core–shell pigments on the properties of blend rubber composites. *Materials & Design*, 44, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.016>
- Akalın, R. (2000). *Bazı atık gaz bileşenlerinin tutulmasına yönelik filtre malzemesi olarak klinoptilolit kullanılabiliirliğinin incelenmesi* [Master's Thesis, Anadolu University (Turkey)]. <https://search.proquest.com/openview/0b0e4cae4683b6b34c0c40915ecb00c7/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- Akbulut, D. (2024). *Zeytin çekirdek atıklarının aktif karbona dönüşümü amaçlı sistem tasarımı* [Doktora Tezi]. Sakarya Üniversitesi.
- Akçakale, N. (2008). *NR/SBR tipi elastomer esaslı ayakkabı taban malzemelerinin mekaniksel özelliklerine bazı dolgu maddelerinin etkilerinin incelenmesi* [Ph.D.]. <https://www.proquest.com/docview/2700373644/abstract/1ECA61A70F314E75PQ/1>
- Akçakale, N. (2017). Effects of carburized rice husk powders on physical properties of elastomer based materials. *KGK-Kautschuk Gummi Kunststoffe*. <http://acikerisim.ibu.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12491/9134>
- Akçakale, N., Demirer, A., Nart, E., & Ozsert, I. (2010). Effects of glass spheres on the mechanical characteristics of NR-SBR type elastomers. *Scientific Research and Essays*, 5(8), 758-762.
- Alaya, M. N., Hourieh, M. A., Youssef, A. M., & El-Sejarah, F. (2000). Adsorption properties of activated carbons prepared from olive stones by chemical and physical activation. *Adsorption Science & Technology*, 18(1), 27-42. <https://doi.org/10.1260/0263617001493251>

- Al-Bayati, H. A. D. (2024). *Production of activated carbon fibers from date palm for industrial wastewater treatment* [Master's Thesis]. Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi.
- Al-Ghamdi, A. A., Al-Hartomy, O. A., Al-Solamy, F. R., Dishovsky, N., Nickolov, R., Mihaylov, M., Malinova, P., & Ruskova, K. (2018). Preparation and characterisation of natural rubber composites comprising hybrid fillers of activated carbon / in situ synthesised magnetite. *Journal of Rubber Research*, 21(2), 94-118. <https://doi.org/10.1007/BF03449164>
- Allen, G. (1974). Rubber elasticity—Manchester's contribution over 170 years. *Journal of Polymer Science: Polymer Symposia*, 48(1), 197-209. <https://doi.org/10.1002/polc.5070480115>
- Angin, D. (2014). Production and characterization of activated carbon from sour cherry stones by zinc chloride. *Fuel*, 115, 804-811.
- Anisuzzaman, S. M., Joseph, C. G., Krishnaiah, D., Bono, A., Suali, E., Abang, S., & Fai, L. M. (2016). Removal of chlorinated phenol from aqueous media by guava seed (*Psidium guajava*) tailored activated carbon. *Water resources and industry*, 16, 29-36.
- Ansarifar, A., Azhar, A., Ibrahim, N., Shiah, S. F., & Lawton, J. M. D. (2005). The use of a silanised silica filler to reinforce and crosslink natural rubber. *International journal of adhesion and adhesives*, 25(1), 77-86.
- Apaydın, A. (2021). *Okaliptüs kök odunundan hidrotermal ve piroliz karbonizasyon yöntemleriyle aktif karbon üretimi* [Yüksek Lisans Tezi]. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi.
- Aravindhan, R., Rao, J. R., & Nair, B. U. (2009). Preparation and characterization of activated carbon from marine macro-algal biomass. *Journal of Hazardous Materials*, 162(2-3), 688-694.
- Arroyo, M., Lopez-Manchado, M. A., & Herrero, B. (2003). Organo-montmorillonite as substitute of carbon black in natural rubber compounds. *Polymer*, 44(8), 2447-2453.
- Aydin Şamdan, C. (2013). *Kabak çekirdeği kabuğundan kimyasal aktivasyonla aktif karbon üretimi. Boya ve ağır metal gideriminde değerlendirilmesi* [Master's Thesis]. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Aygün, A. (2002). *Yerli doğal hammaddelerden aktif karbon üretimi ve adsorpsiyon özelliklerinin incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi].. <https://polen.itu.edu.tr/handle/11527/11666>
- Ayhan, E. (2022). *Kauçuk matris içerisine kömür külü takviyesinin mekanik özelliklere ve çapraz bağ yoğunluğuna etkisi* [M.Sc.]. <https://www.proquest.com/pqdtglobal/docview/2802491756/abstract/842567E2F/BF24427PQ/3>

- Ayo, M. D., Madufor, I. C., Ekebafé, L. O., & Chukwu, M. N. (2011). Effect of filler carbonizing temperature on the mechanical properties of natural rubber composites. *Researcher*, 3(11), 7-10.
- Bal Altuntaş, D., Nevruzoğlu, V., Dokumacı, M., & Cam, Ş. (2020). Synthesis and characterization of activated carbon produced from waste human hair mass using chemical activation. *Carbon Letters*, 30(3), 307-313. <https://doi.org/10.1007/s42823-019-00099-9>
- Balçık, B. (2018). *Atık lastiklerden aktif karbon eldesi ve boyar madde gideriminde kullanılması* [Master's Thesis, İstanbul Üniversitesi]. <https://nek.istanbul.edu.tr/ekos/TEZ/58004.pdf>
- Bansal, R. C., & Goyal, M. (2005). *Activated carbon adsorption*. CRC press. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781420028812/activated-carbon-adsorption-roop-chand-bansal-meenakshi-goyal>
- Batmaz, H. (2022). *Bitkisel atıklardan kimyasal aktivasyon ile aktif karbon üretimi* [Yüksek Lisans Tezi]. Osmangazi Üniversitesi.
- Baytar, O. (2015). *İğde çekirdeği ve kayın ağacından üretilen aktif karbonun ağır metal ve boyarmadde gideriminde kullanılması* [Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. <https://acikerisim.selcuk.edu.tr/items/bbc27f48-985c-48ab-a23b-e44021f946bf>
- Beşe, A. V. (2019). *Misvaktan aktif karbon üretiminin optimizasyonu ve karakterizasyonu* [Yüksek Lisans Tezi]. Atatürk Üniversitesi.
- Bhadusha, N., & Ananthabaskaran, T. (2011). Adsorptive removal of methylene blue onto ZnCl₂ activated carbon from wood apple outer shell: Kinetics and equilibrium studies. *Journal of Chemistry*, 8(4), 1696-1707. <https://doi.org/10.1155/2011/429831>
- Bhattacharyya, S., Sinturel, C., Bahloul, O., Saboungi, M.-L., Thomas, S., & Salvétat, J.-P. (2008). Improving reinforcement of natural rubber by networking of activated carbon nanotubes. *Carbon*, 46(7), 1037-1045.
- Bohm, G. A., Tomaszewski, W., Cole, W., & Hogan, T. (2010). Furthering the understanding of the non linear response of filler reinforced elastomers. *Polymer*, 51(9), 2057-2068.
- Boonpoke, A., Chiarakorn, S., Laosiripojana, N., Towprayoon, S., & Chidthaisong, A. (2011). Synthesis of activated carbon and MCM-41 from bagasse and rice husk and their carbon dioxide adsorption capacity. *Journal of Sustainable Energy & Environment*, 2(2), 77-81.
- Boşnak, B. (2010). *Kauçuktan yarı mamül üretim teknolojileri*. <http://dspace.yildiz.edu.tr/xmlui/handle/1/5147>

- Bozacı, G. (2016). *Sıvı faz uygulamalarında kullanılmak üzere kahveden aktif karbon üretimi ve optimizasyonu* [Master's Thesis]. Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Bülbül, Ş. (2014). *Farklı inorganik ve organik dolguların nr/sbr tipi elastomer malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi*. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/98951>
- Bülbül, Ş. (2019). Doğal Atık Malzemelerle Yeni NBR Bazlı Bileşiklerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6, 42-49.
- Bülbül, Ş., Akçakale, N., Yaşar, M., & Gökmeşe, H. (2019). The effect of wood ash on the mechanical properties of rubber compounds. *Materiali in Tehnologije*, 53(3), 333-339. <https://doi.org/10.17222/mit.2018.126>
- Bülbül, Ş., & Büyük, S. S. (2022). The crosslinking and mechanical properties of SBR compounds with the addition of carburized pine nut cone ash. *Journal of Elastomers & Plastics*, 54(6), 906-921. <https://doi.org/10.1177/00952443221102585>
- Bülbül, Ş., & Ergün, H. (2024). Investigation of the usability of activated carbon as a filling material in nitrile butadiene rubber/natural rubber components and modeling by regression analysis. *Journal of Elastomers & Plastics*, 56(1), 53-73. <https://doi.org/10.1177/00952443231215469>
- Bülbül, Ş., & Ergün, M. E. (2022). *Effect of mica powder-filled styrene-butadiene rubber compounds on crosslink density and mechanical properties*. <http://acikerisim.alanya.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12868/1523>
- Büyük, S. S. (2019). *SBR tipi kauçuklu bileşiklerin çapraz bağlarına ceviz kabuğu külü ve kozalak külünün etkisi* [M.Sc.]. <https://www.proquest.com/docview/2606863723/abstract/A01B8A3B052945BEPQ/1>
- Calcium carbonate. (2025). İçinde Wikipedia. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Calcium_carbonate&oldid=1291913576
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (1999). *Materials science and engineering: An introduction*. Wiley New York. http://sutlib2.sut.ac.th/sut_contents/H100191.pdf
- Can, M. (2024). *Paulownia ağacından elde edilen aktif karbonun sulu çözeltiden boyar madde gideriminde değerlendirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Osmangazi Üniversitesi.
- Chakraborty, S., Kar, S., Dasgupta, S., Mukhopadhyay, R., Bandyopadhyay, S., Joshi, M., & Ameta, S. C. (2010). Study of the properties of in-situ sodium activated and organomodified bentonite clay – SBR rubber nanocomposites – Part I: Characterization and rheometric properties. *Polymer Testing*, 29(2), 181-187. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2009.10.008>

- Chen, J. P., Yoon, J.-T., & Yiacoumi, S. (2003). Effects of chemical and physical properties of influent on copper sorption onto activated carbon fixed-bed columns. *Carbon*, 41(8), 1635-1644.
- Cheng, J., Hu, S.-C., Sun, G.-T., Kang, K., Zhu, M.-Q., & Geng, Z.-C. (2021). Comparison of activated carbons prepared by one-step and two-step chemical activation process based on cotton stalk for supercapacitors application. *Energy*, 215, 119144.
- Cimino, G., Cappello, R. M., Caristi, C., & Toscano, G. (2005). Characterization of carbons from olive cake by sorption of wastewater pollutants. *Chemosphere*, 61(7), 947-955.
- Cin, H. H. (2023). *Ayçiçeği kabuğundan aktif karbon üretimi ve karakterizasyonu* [Yüksek Lisans Tezi]. Osmangazi Üniversitesi.
- Clay. (2025). İçinde Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Clay&oldid=1292141666>
- Çiftçi, H. (2013). *Aktif karbonla topraktan tuz adsorpsiyonu yolu ile tuzlanmış tarım arazilerinin ıslah edilebileceğinin araştırılması/The study of improving the fields including salt with a higher quantity via the salt adsorption from the soil with activated carbon* [PhD Thesis]. <http://acikerisim.harran.edu.tr:8080/jspui/handle/11513/1230>
- Dąbrowski, A., Podkościelny, P., Hubicki, Z., & Barczak, M. (2005). Adsorption of phenolic compounds by activated carbon—A critical review. *Chemosphere*, 58(8), 1049-1070.
- Daifullah, A. A. M., Yakout, S. M., & Elreefy, S. A. (2007). Adsorption of fluoride in aqueous solutions using KMnO₄-modified activated carbon derived from steam pyrolysis of rice straw. *Journal of hazardous materials*, 147(1-2), 633-643.
- Danish, M., Hashim, R., Ibrahim, M. M., & Sulaiman, O. (2013). Effect of acidic activating agents on surface area and surface functional groups of activated carbons produced from Acacia mangium wood. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 104, 418-425.
- Dayıoğlu, A. K. (2018). *Vulkanizasyon parametrelerinin doğal kauçukların çapraz bağ yoğunluğu ve malzeme ömrü üzerindeki etkisinin incelenmesi* [masterThesis, Bursa Teknik Üniversitesi]. <http://acikerisim.btu.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12885/106>
- De, D., Panda, P. K., Roy, M., & Bhunia, S. (2013). Reinforcing effect of reclaim rubber on natural rubber/polybutadiene rubber blends. *Materials & Design (1980-2015)*, 46, 142-150.
- Deiana, A. C., Sardella, M. F., Silva, H., Amaya, A., & Tancredi, N. (2009). Use of grape stalk, a waste of the viticulture industry, to obtain activated carbon. *Journal of hazardous materials*, 172(1), 13-19.

- Delgado, E., Espitia, A., & Aperador, W. (2020). Comparative evaluation of *Clusia multiflora* wood flour, against mineral fillers, as reinforcement in SBR rubber composites. *Iranian Polymer Journal*, 29(1), 13-23. <https://doi.org/10.1007/s13726-019-00768-6>
- Demir Özyılmaz, G. (2023). *Portakal posasından (citrus sinensis l.) kimyasal aktivasyon ile aktif karbon üretiminde proses parametrelerinin etkisinin incelenmesi= Investigation by the effects of process parameters on the production of activated carbon by chemical activation from orange pulp (citrus sinensis l.)* [Master's Thesis]. Sakarya Üniversitesi.
- Deng, H., Yang, L., Tao, G., & Dai, J. (2009). Preparation and characterization of activated carbon from cotton stalk by microwave assisted chemical activation—Application in methylene blue adsorption from aqueous solution. *Journal of hazardous materials*, 166(2-3), 1514-1521.
- Derici, C. (2021). *Barbunya kabuklarından aktif karbon üretimi ve boyarmadde gideriminde kullanılması* [Yüksek Lisans Tezi]. Osmangazi Üniversitesi.
- Deshmukh, S., Topare, N. S., Raut-Jadhav, S., Thorat, P. V., Bokil, S. A., & Khan, A. (2022). Orange peel activated carbon produced from waste orange peels for adsorption of methyl red. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 71(12), 1351-1363.
- Egwaikhide, A. P., Okieimen, F. E., & Ohikhena, S. O. (2005). Comparative studies of the rheological, physico-mechanical properties of natural rubber compounds, reinforced with carbon black (N330) and blends of raw coconut fibre and carbon black. *Editorial Advisory Board e*, 17(2), 207-214.
- Eisay, A. M. S. (2019). *Alüminyum/biyokütle kaynaklı aktif karbon kompozitlerinin üretimi ve karakterizasyonu* [Master's Thesis]. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- El Nemr, A., Aboughaly, R. M., El Sikaily, A., Ragab, S., Masoud, M. S., & Ramadan, M. S. (2022). Microporous nano-activated carbon type I derived from orange peel and its application for Cr(VI) removal from aquatic environment. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(11), 5125-5143. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00995-5>
- Elastomer Teknolojisi. (2001, Ekim). *Kauçuk Derneği Yayınları*, 14.
- Elbinsoy, S. (2016). *Yüksek kükürt içeren Kütahya–Gediz yöresi kömürlerinden aktif karbon üretilmesi ve özelliklerinin belirlenmesi* [Master's Thesis]. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- El-Hendawy, A.-N. A., Samra, S. E., & Girgis, B. S. (2001). Adsorption characteristics of activated carbons obtained from corncobs. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 180(3), 209-221.
- Erkek, S. (2007). Karbon siyahı/yağ ve karbon siyahı/dolgu maddesi oranının farklı vulkanizasyon sistemlerinde EPDM, NBR ve SBR elastomerlerinin fiziko-mekaniksel özellikleri üzerine etkisi. *Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.

- Erkuş, H. (2021). *Mikroalga destekli piroliz yöntemi ile mandalina kabuğu ve atık çay posasından aktif karbon üretimi* [PhD Thesis].
- Fernandez, M. E., Nunell, G. V., Bonelli, P. R., & Cukierman, A. L. (2014). Activated carbon developed from orange peels: Batch and dynamic competitive adsorption of basic dyes. *Industrial crops and products*, 62, 437-445.
- Fried, J. R. (2014). *Polymer science and technology*. Pearson Education. <https://scholar.google.com/scholar?cluster=12584036532386886057&hl=en&oi=scholar>
- Gañán-Gómez, J., Macías-García, A., Díaz-Díez, M. A., González-García, C., & Sabio-Rey, E. (2006). Preparation and characterization of activated carbons from impregnation pitch by ZnCl₂. *Applied surface science*, 252(17), 5976-5979.
- George, S. C., Rajan, R., Aprem, A. S., Thomas, S., & Kim, S. S. (2016). The fabrication and properties of natural rubber-clay nanocomposites. *Polymer Testing*, 51, 165-173. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.03.010>
- Gergova, K., & Eser, S. (1996). Effects of activation method on the pore structure of activated carbons from apricot stones. *Carbon*, 34(7), 879-888.
- González-García, P. (2018). Activated carbon from lignocellulosics precursors: A review of the synthesis methods, characterization techniques and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1393-1414. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.117>
- Greenough, S., Kurian, J. K., Gariépy, Y., Prasher, S., Khripin, C. Y., Mehlem, J. J., & Dumont, M.-J. (2022). Protein-based biochars as potential renewable fillers in styrene-butadiene rubber composites. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 167, 105697.
- Gui, Y., Zheng, J., Ye, X., Han, D., Xi, M., & Zhang, L. (2016). Preparation and performance of silica/SBR masterbatches with high silica loading by latex compounding method. *Composites Part B: Engineering*, 85, 130-139. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.07.001>
- Guo, Y., & Rockstraw, D. A. (2007). Activated carbons prepared from rice hull by one-step phosphoric acid activation. *Microporous and Mesoporous Materials*, 100(1-3), 12-19.
- Gupta, V. K., & Ali, I. (2000). Utilisation of bagasse fly ash (a sugar industry waste) for the removal of copper and zinc from wastewater. *Separation and purification technology*, 18(2), 131-140.
- Güçlü Aksakal, C. (2021). *Atık lastik ve biyokütleden aktif karbon hazırlanması ve karakterizasyonu* [Yüksek Lisans Tezi]. Karabük Üniversitesi.

- Gülen, J., Zorbay, F., & Arslan, S. (2012). Zeolitler ve kullanım alanları. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2(1), 63-68.
- Gündoğdu, A. (2011). *Bazı bitkisel atıklardan aktif karbon eldesi ve yüzey özellikleri* [Doktora Tezi]. Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- Günaydın, A. (2024). *Atık kağıt bardaklardan mikrodalga destekli piroliz yöntemi ile aktif karbon üretimi*. Karabük Üniversitesi.
- Hacıfazlıoğlu, H., & Uçkan, D. (t.y.). *Borik asit liçi ile Tosya linyit kömüründen kül ve kükürt giderimi*. Geliş tarihi 10 Eylül 2025, gönderen https://api.maden.org.tr/uploads/portal/resimler/ekler/b45bfd24fa3d01f_ek.pdf
- Hamdan, H., Mohd Muhid, M. N., & Yahya, A. (1994). Zeolite-Rubber Blend: A composite with improved mechanical and conducting properties. İçinde J. Weitkamp, H. G. Karge, H. Pfeifer, & W. Hölderich (Ed.), *Studies in Surface Science and Catalysis* (C. 84, ss. 1091-1098). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(08\)63646-0](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(08)63646-0)
- Hamid, D. A. (2022). *Zeytin çekirdeklerinden aktif karbonun sentezi ve karakterizasyonu*. Fırat Üniversitesi.
- Hanafi, N. A. M., Abdulhameed, A. S., Jawad, A. H., ALothman, Z. A., Yousef, T. A., Al Duaij, O. K., & Alsaiani, N. S. (2024). Optimized removal process and tailored adsorption mechanism of crystal violet and methylene blue dyes by activated carbon derived from mixed orange peel and watermelon rind using microwave-induced ZnCl₂ activation. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(22), 28415-28427. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03646-z>
- Hanoğlu, A. (2019). *Production of biocoal and activated carbon from textile wastes* [Master's Thesis]. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hayashi, J., Horikawa, T., Takeda, I., Muroyama, K., & Ani, F. N. (2002). Preparing activated carbon from various nutshells by chemical activation with K₂CO₃. *Carbon*, 40(13), 2381-2386.
- Heidarinejad, Z., Dehghani, M. H., Heidari, M., Javedan, G., Ali, I., & Sillanpää, M. (2020). Methods for preparation and activation of activated carbon: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(2), 393-415. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00955-0>
- Helvacı, N. O., & Korkmaz, Y. (2024). Çevre dostu hammaddeelerden üretilen aktif karbonlar ve uygulama alanları. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(4), 1514-1528.
- Hendekçi, M. C. (2023). *Investigating the adsorption properties of olive stone derived active carbon*. Ege Üniversitesi.

- Hirunpraditkoon, S., Tunthong, N., Ruangchai, A., & Nuithitikul, K. (2011). Adsorption capacities of activated carbons prepared from bamboo by KOH activation. *World Acad Sci Eng Technol*, 78, 711-715.
- Hosler, D., Burkett, S. L., & Tarkanian, M. J. (1999). Prehistoric Polymers: Rubber Processing in Ancient Mesoamerica. *Science*, 284(5422), 1988-1991. <https://doi.org/10.1126/science.284.5422.1988>
- Hsu, L.-Y., & Teng, H. (2000). Influence of different chemical reagents on the preparation of activated carbons from bituminous coal. *Fuel Processing Technology*, 64(1-3), 155-166.
- Hussain, A. M. (2018). *Çam kabuğundan üstün nitelikli aktif karbon üretilmesinin optimum şartlarının belirlenmesi* [Master's Thesis]. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ichazo, M. N., Hernández, M., Albano, C., & González, J. (2006). Curing and Physical Properties of Natural Rubber/Wood Flour Composites. *Macromolecular Symposia*, 239(1), 192-200. <https://doi.org/10.1002/masy.200690096>
- Ioannidou, O., & Zabaniotou, A. (2007). Agricultural residues as precursors for activated carbon production—A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 11(9), 1966-2005.
- Isinkaralar, K. (2020). *Removal of formaldehyde and BTEX in indoor air using activated carbon produced from horse chestnut (Aesculus Hippocastanum L.) Shell* [PhD Thesis]. Ph. D. Thesis Hacettepe University Institute of Science Department of
- Ismail, H., Shaari, S. M., & Othman, N. (2011). The effect of chitosan loading on the curing characteristics, mechanical and morphological properties of chitosan-filled natural rubber (NR), epoxidised natural rubber (ENR) and styrene-butadiene rubber (SBR) compounds. *Polymer Testing*, 30(7), 784-790.
- İnce, S. (2025). *Bal kabağı kabuğundan çinko klorür kullanılarak aktif karbon hazırlanması, karakterizasyonu ve siprofloksasinin sulu çözeltilerden uzaklaştırılmasındaki etkinliğinin incelenmesi*. Sakarya Üniversitesi.
- Jasinskas, A., Šiaudinis, G., Martinkus, M., Karčauskienė, D., Repšienė, R., Pedišius, N., & Vonžodas, T. (2017). Evaluation of common osier (*Salix viminalis* L.) and black poplar (*Populus nigra* L.) biomass productivity and determination of chemical and energetic properties of chopped plants produced for biofuel. *Balt. For*, 23, 666-672.
- Jiang, C., Bo, J., Xiao, X., Zhang, S., Wang, Z., Yan, G., Wu, Y., Wong, C., & He, H. (2020). Converting waste lignin into nano-biochar as a renewable substitute of carbon black for reinforcing styrene-butadiene rubber. *Waste management*, 102, 732-742.
- Jiang, Y., Li, J., Jiang, Z., Shi, M., Sheng, R., Liu, Z., Zhang, S., Cao, Y., Wei, T., & Fan, Z. (2021). Large-surface-area activated carbon with high density by electrostatic densification for supercapacitor electrodes. *Carbon*, 175, 281-288.

- Jones, K. C., & Tinker, A. (1997). *Blends of Natural Rubber: Novel Techniques for Blending with Specialty Polymers*. Springer Science & Business Media.
- Kamińska, A., Miądlicki, P., Kiełbasa, K., Kujbida, M., Sreńscek-Nazzal, J., Wróbel, R. J., & Wróblewska, A. (2021). Activated carbons obtained from orange peels, coffee grounds, and sunflower husks—Comparison of physicochemical properties and activity in the alpha-pinene isomerization process. *Materials*, 14(23), 7448.
- Karaağaç, B. (2014). Use of ground pistachio shell as alternative filler in natural rubber/styrene–butadiene rubber-based rubber compounds. *Polymer Composites*, 35(2), 245-252. <https://doi.org/10.1002/pc.22656>
- Kaya Çelebi, N. (2024). *Meyve atıklarından elde edilen aktif karbonların elektrokimyasal enerji depolama özelliklerinin belirlenmesi*. Sinop Üniversitesi.
- Korkut, İ. (2018). *İğde çekirdeğinden aktif karbon üretimi ve boyar madde adsorpsiyonu*. Yüzüncü Yıl Üniversitesi.
- Lai, S.-M., Chu, Y.-L., Chiu, Y. T., Chang, M.-C., Hsieh, T.-Y., & Hsieh, M.-H. (2021). Effect of pyrolysis carbon black from waste tires on the properties of styrene–butadiene rubber compounds. *Polymers and Polymer Composites*, 29(2), 75-86. <https://doi.org/10.1177/0967391120902882>
- Lay, M., Rusli, A., Abdullah, M. K., Hamid, Z. A. A., & Shuib, R. K. (2020). Converting dead leaf biomass into activated carbon as a potential replacement for carbon black filler in rubber composites. *Composites Part B: Engineering*, 201, 108366.
- Li, D.-C., & Jiang, H. (2017). The thermochemical conversion of non-lignocellulosic biomass to form biochar: A review on characterizations and mechanism elucidation. *Bioresource technology*, 246, 57-68.
- Li, W., Yang, K., Peng, J., Zhang, L., Guo, S., & Xia, H. (2008). Effects of carbonization temperatures on characteristics of porosity in coconut shell chars and activated carbons derived from carbonized coconut shell chars. *Industrial crops and products*, 28(2), 190-198.
- Li, Y., Han, B., Wen, S., Lu, Y., Yang, H., Zhang, L., & Liu, L. (2014). Effect of the temperature on surface modification of silica and properties of modified silica filled rubber composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 62, 52-59.
- Li, Z., An, D., He, R., Sun, Z., Li, J., Zhang, Z., Liu, Y., & Wong, C. (2023). The design of crosslinks in different vulcanized systems to improve crack growth resistance for carbon black/graphene oxide/natural rubber composites. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 6(2), 82. <https://doi.org/10.1007/s42114-023-00662-z>
- Liang, Y., Liu, H., Li, Z., Fu, R., & Wu, D. (2013). In situ polydopamine coating-directed synthesis of nitrogen-doped ordered nanoporous carbons with superior performance in supercapacitors. *Journal of materials chemistry a*, 1(48), 15207-15211.

- Liu, Q.-S., Zheng, T., Wang, P., & Guo, L. (2010). Preparation and characterization of activated carbon from bamboo by microwave-induced phosphoric acid activation. *Industrial crops and products*, 31(2), 233-238.
- Liu, X., He, C., Yu, X., Bai, Y., Ye, L., Wang, B., & Zhang, L. (2018). Net-like porous activated carbon materials from shrimp shell by solution-processed carbonization and H₃PO₄ activation for methylene blue adsorption. *Powder Technology*, 326, 181-189.
- Louis, N. S. M., Shibu, N. V., & Thomas, S. (2012). Effect of rice husk ash on mechanical properties of styrene-butadiene rubber. *IUP Journal of Mechanical Engineering*, 5(2), 21-27.
- Lu, L., Devasahayam, S., & Sahajwalla, V. (2013). Evaluation of coal for metallurgical applications. *The coal handbook: towards cleaner production*, 352-386.
- Lua, A. C., & Guo, J. (2001). Preparation and characterization of activated carbons from oil-palm stones for gas-phase adsorption. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 179(2-3), 151-162.
- Malik, R., Ramteke, D. S., & Wate, S. R. (2007). Adsorption of malachite green on groundnut shell waste based powdered activated carbon. *Waste management*, 27(9), 1129-1138.
- Mark, J. E. (Ed.). (2007). *Physical properties of polymers handbook*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-69002-5>
- Martinez, M. L., Torres, M. M., Guzman, C. A., & Maestri, D. M. (2006). Preparation and characteristics of activated carbon from olive stones and walnut shells. *Industrial crops and products*, 23(1), 23-28.
- Méndez, A., Gascó, G., Freitas, M. M. A., Siebielec, G., Stuczynski, T., & Figueiredo, J. L. (2005). Preparation of carbon-based adsorbents from pyrolysis and air activation of sewage sludges. *Chemical Engineering Journal*, 108(1-2), 169-177.
- Mohan, T. P., Kuriakose, J., & Kanny, K. (2011). Effect of nanoclay reinforcement on structure, thermal and mechanical properties of natural rubber–styrene butadiene rubber (NR–SBR). *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 17(2), 264-270.
- Momčilović, M., Purenović, M., Bojić, A., Zarubica, A., & Ranđelović, M. (2011). Removal of lead (II) ions from aqueous solutions by adsorption onto pine cone activated carbon. *Desalination*, 276(1-3), 53-59.
- Monteiro, S. N., Terrones, L. A. H., Lopes, F. P., & d'Almeida, J. R. M. (2005). Mechanical strength of polyester matrix composites reinforced with coconut fiber wastes. *Revista Matéria*, 10(4), 571-576.

- Mooibroek, H., & Cornish, K. (2000). Alternative sources of natural rubber. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 53(4), 355-365. <https://doi.org/10.1007/s002530051627>
- Morton, M. (2013). *Rubber technology*. Springer Science & Business Media. <https://books.google.com/books?hl=tr&lr=&id=uETsCAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=rubber&ots=I3NfOug55i&sig=xU0phOSCRS14SuryR8u71Zkzb0g>
- Mou, H., Shen, F., Shi, Q., Liu, Y., Wu, C., & Guo, W. (2012). A novel nitrile butadiene rubber/zinc chloride composite: Coordination reaction and miscibility. *European polymer journal*, 48(4), 857-865.
- Mourão, P. A. M., Laginhas, C., Custódio, F., Nabais, J. V., Carrott, P. J. M., & Carrott, M. R. (2011). Influence of oxidation process on the adsorption capacity of activated carbons from lignocellulosic precursors. *Fuel Processing Technology*, 92(2), 241-246.
- Munirah, N. R., Noriman, N. Z., Zakaria, M. S., Kamarudin, H., Fatin, M. H., Ting, S. S., Mustafa Al Bakri, A. M., & Rosniza, H. (2016). The effects on cure characteristics, physico-mechanical properties and morphology of bamboo activated carbon filled styrene butadiene rubber (SBR) vulcanizates. *Key Engineering Materials*, 673, 131-140.
- Myrzageldi, A. (2024). *Kahve zarı atıklarından üretilcek aktif karbonun atık sularından ağır metal gideriminde kullanılması*. Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Namasivayam, C., & Sangeetha, D. (2006). Removal of molybdate from water by adsorption onto ZnCl₂ activated coir pith carbon. *Bioresource technology*, 97(10), 1194-1200.
- Nasir, M., Poh, B. T., & Ng, P. S. (1988). Effect of γ -mercaptopropyltrimethoxysilane coupling agent on t₉₀, tensile strength and tear strength of silica-filled NR, NBR and SBR vulcanizates. *European polymer journal*, 24(10), 961-965.
- Nishi, T., Yamaguchi, T., & Hokkirigawa, K. (2022). Development of high slip-resistant footwear outsole using rubber surface filled with activated carbon/sodium chloride. *Scientific reports*, 12(1), 267.
- Nooun, P., Chueangchayaphan, N., Ummarat, N., & Chueangchayaphan, W. (2023). Fabrication and properties of natural rubber/rice starch/activated carbon biocomposite-based packing foam sheets and their application to shelf life extension of 'Hom Thong' banana. *Industrial Crops and Products*, 195, 116409.
- Oktar, Y. (2024). *Nar kabuğundan üretilen aktif karbonun armut suyunun renk özellikleri üzerine etkisi*. NEVŞEHİR Hacı Bektaş Veli Üniversitesi.
- Oliveira, L. C., Pereira, E., Guimaraes, I. R., Vallone, A., Pereira, M., Mesquita, J. P., & Sapag, K. (2009). Preparation of activated carbons from coffee husks utilizing FeCl₃ and ZnCl₂ as activating agents. *Journal of hazardous materials*, 165(1-3), 87-94.

- Önal, Y., Akmil-Başar, C., & Sarıcı-Özdemir, Ç. (2010). *Karbonize edilmiş kayısı çekirdeğinden kimyasal aktivasyon yöntemi ile aktif karbon eldesi*.
- Önyılmaz, E. (2024). *Yağı alınmış kayısı iç çekirdeği atıklarından elde edilmiş aktif karbonun süper kapasitör olarak kullanımı*. İnönü Üniversitesi.
- Örkün, Y. (2011). *Fındık kabuğundan fiziksel ve kimyasal aktivasyonla aktif karbon üretimi ve karakterizasyonu*. <https://polen.itu.edu.tr/bitstreams/d2c4ed44-9e22-46e9-9888-6b5853b5e088/download>
- Özbaş, F. (2023). *Boyarmaddelerin aktif karbon ve aktif karbondan elde edilen manyetik aktif karbon üzerinde adsorpsiyonu*.
- Özdemir, D. (2023). *Atık kâğıttan üretilen aktif karbonun kauçuk matrisli bileşiklerde kullanımı ve karakterizasyonu* [Master's Thesis, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. <https://acikerisim-old.erbakan.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12452/10128>
- Özkiliç, M. A. (2019). *Nohuttan elde edilen aktif karbon üzerine basic yellow 28 adsorpsiyonu* [Master's Thesis]. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Öztürk, E. (2008). *Farklı kauçuk karışımlarının vulkanizasyonuna hızlandırıcıların etkisi* [Master's]. <https://www.proquest.com/docview/2689292766/abstract/77DB372621104BE5PQ/1>
- Palaty, S., & Joseph, R. (2000). Xanthate accelerators for low temperature curing of natural rubber. *Journal of Applied Polymer Science*, 78(10), 1769-1775. [https://doi.org/10.1002/1097-4628\(20001205\)78:10<1769::AID-APP80>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/1097-4628(20001205)78:10<1769::AID-APP80>3.0.CO;2-H)
- Park, S.-J., & Cho, K.-S. (2003). Filler–elastomer interactions: Influence of silane coupling agent on crosslink density and thermal stability of silica/rubber composites. *Journal of colloid and interface science*, 267(1), 86-91.
- Patil, Y., Kadu, J., & Jadhav, A. (2018). *Activated carbon from lignocellulose waste as filler in industrial rubber*. EasyChair. <https://www.academia.edu/download/79797252/twFB.pdf>
- Payne, A. R. (1962). The dynamic properties of carbon black-loaded natural rubber vulcanizates. Part I. *Journal of Applied Polymer Science*, 6(19), 57-63. <https://doi.org/10.1002/app.1962.070061906>
- Qu, L., Yu, G., Wang, L., Li, C., Zhao, Q., & Li, J. (2012). Effect of filler–elastomer interactions on the mechanical and nonlinear viscoelastic behaviors of chemically modified silica-reinforced solution-polymerized styrene butadiene rubber. *Journal of Applied Polymer Science*, 126(1), 116-126. <https://doi.org/10.1002/app.36677>

- Ramutshatsha-Makhwedzha, D., Mavhungu, A., Moropeng, M. L., & Mbaya, R. (2022). Activated carbon derived from waste orange and lemon peels for the adsorption of methyl orange and methylene blue dyes from wastewater. *Heliyon*, 8(8). [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(22\)01218-X](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(22)01218-X)
- Rand, B., Appleyard, S. P., & Yardim, M. F. (2012). *Design and control of structure of advanced carbon materials for enhanced performance* (C. 374). Springer Science & Business Media. <https://books.google.com/books?hl=tr&lr=&id=1APwCAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=Design+and+control+of+structure+of+advanced+carbon+materials+for+enhanced+performance&ots=8JHBxDwCo4&sig=HuRaSlXRaRq6lR4sx8r5gN3X8gE>
- Rattanasom, N., Prasertsri, S., & Ruangritnumchai, T. (2009). Comparison of the mechanical properties at similar hardness level of natural rubber filled with various reinforcing-fillers. *Polymer testing*, 28(1), 8-12.
- Reynaud, E., Gauthier, C., & Perez, J. (1999). Nanophases in polymers. *Revue de Métallurgie*, 96(2), Article 2. <https://doi.org/10.1051/metal/199996020169>
- Rosas, J. M., Bedia, J., Rodríguez-Mirasol, J., & Cordero, T. (2008). Preparation of Hemp-Derived Activated Carbon Monoliths. Adsorption of Water Vapor. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47(4), 1288-1296. <https://doi.org/10.1021/ie070924w>
- Sabaz, P. (2018). *Hidrojen depolama için mandalina kabuğundan aktif karbon üretimi* [Master's Thesis]. Balıkesir University (Turkey).
- Sabzekar, M., Chenar, M. P., Zohuri, G., & Mortazavi, S. M. (2017). Investigation of mechanical, thermal, and morphological properties of EPDM compounds containing reclaimed rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 90(4), 765-776. <https://doi.org/10.5254/rct.18.81651>
- Sadeghi Ghari, H., & Jalali-Arani, A. (2016). Nanocomposites based on natural rubber, organoclay and nano-calcium carbonate: Study on the structure, cure behavior, static and dynamic-mechanical properties. *Applied Clay Science*, 119, 348-357. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.11.001>
- Saka, C. (2012). BET, TG–DTG, FT-IR, SEM, iodine number analysis and preparation of activated carbon from acorn shell by chemical activation with ZnCl₂. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 95, 21-24.
- Sandaloğlu, M. E. (2025). *Hatmi çiçeği ve karaçam kozalağından elde edilen aktif karbonlar ile sulu çözeltilerden hümkik asit giderimi*. Kastamonu Üniversitesi.
- Sarkawi, S. S. (2013). *Nano-reinforcement of tire rubbers: Silica technology for natural rubber : exploring the influence of non-rubber constituent on the natural rubber - silica system* [PhD, University of Twente]. <https://doi.org/10.3990/1.9789036500715>

- Sattayanurak, S. (2020). *Silica reinforced natural rubber: Shifting tire performance by hybridization with secondary fillers and polymers* [PhD, University of Twente]. <https://doi.org/10.3990/1.9789036549271>
- Sattayanurak, S., Noordermeer, J. W. M., Sahakaro, K., Kaewsakul, W., Dierkes, W. K., & Blume, A. (2019). Silica-reinforced natural rubber: Synergistic effects by addition of small amounts of secondary fillers to silica-reinforced natural rubber tire tread compounds. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, e5891051. <https://doi.org/10.1155/2019/5891051>
- Savova, D., Apak, E., Ekinci, E., Yardim, F., Petrov, N., Budinova, T., Razvigorova, M., & Minkova, V. (2001). Biomass conversion to carbon adsorbents and gas. *Biomass and Bioenergy*, 21(2), 133-142.
- Serafin, J., & Cruz, O. F. (2022). Yaygın meşe yapraklarından elde edilen umut verici aktif karbonlar ve CO₂ depolamada uygulamaları. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107642. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107642>
- Seyidoğlu, G. (2009). *Bitkisel atıkların granül aktif karbon üretiminde değerlendirilmesi* [Anadolu University (Turkey)]. <https://www.proquest.com/openview/497ef6ca7a0a750a62885fa5001d569d/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- Shit, S. C., & Shah, P. (2013). A Review on Silicone Rubber. *National Academy Science Letters*, 36(4), 355-365. <https://doi.org/10.1007/s40009-013-0150-2>
- Shrestha, L. K., Thapa, M., Shrestha, R. G., Maji, S., Pradhananga, R. R., & Ariga, K. (2019). Rice husk-derived high surface area nanoporous carbon materials with excellent iodine and methylene blue adsorption properties. *C*, 5(1), 10.
- Suzuki, N., Ito, M., & Yatsuyanagi, F. (2005). Effects of rubber/filler interactions on deformation behavior of silica filled SBR systems. *Polymer*, 46(1), 193-201.
- Taşçı, S. (2020). *Vişne çekirdeğinden elde edilen aktif karbonun karakterizasyonu ve boyar madde adsorpsiyonu* [Master's Thesis]. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi.
- Timur, S., Kantarli, I. C., Onenc, S., & Yanik, J. (2010). Characterization and application of activated carbon produced from oak cups pulp. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 89(1), 129-136.
- Tokgöz, G. (2025). *Organik atıktan hidrotermal yöntem ile aktif karbon sentezi ve karakterizasyonu*. Fırat Üniversitesi.
- Tsai, W. T., Chang, C. Y., Lin, M. C., Chien, S. F., Sun, H. F., & Hsieh, M. F. (2001). Adsorption of acid dye onto activated carbons prepared from agricultural waste bagasse by ZnCl₂ activation. *Chemosphere*, 45(1), 51-58.
- Türkyılmaz, A. (2011). *Bazı bitkisel atıklardan aktif karbon eldesi ve yüzey özellikleri* [Doktora Tezi].

- Tüzün, D. (2020). *Effects of ath and silica fillers upon electrical and thermal performances of htv silicone rubber composites* [PhD Thesis, Institute of Science And Technology]. <https://polen.itu.edu.tr/bitstreams/c20fc42b-4530-425e-a674-e68fd027f09a/download>
- Uluğ, E. (2011). *Sebs/ps, sis/ps ve sbr/ps polimer karışımlarının ayakkabı taban malzemesi olarak üretilmesi ve özelliklerinin incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. <https://www.proquest.com/docview/2566005114/abstract/B9FBB634EDB4529PQ/1>
- Uralçin, N. (2024). *Kavilca (triticum dicoccum schrank) kabuğundan üretilen aktif karbonun kişisel koruyucu donanım kapasitesinin değerlendirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Kafkas Üniversitesi.
- Vahapoğlu, V. (2006). *Kauçuk türü malzemeler II. Sentetik kauçuk*.
- Vahapoğlu, V. (2007). Kauçuk türü malzemeler I. Doğal kauçuk. *Celal Bayar University Journal of Science*, 3(1), 57-70.
- Vahapoğlu, V. (2013). Kauçuk türü malzemeler: Sınıflandırma. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4(1), 25-34.
- Valizadeh, S., Younesi, H., & Bahramifar, N. (2018). Preparation and characterization of activated carbon from the cones of Iranian pine trees (pinus eldarica) by chemical activation with H₃PO₄ and its application for removal of sodium dodecylbenzene sulfonate from aqueous solution. *Water Conservation Science and Engineering*, 3(4), 253-265. <https://doi.org/10.1007/s41101-018-0055-5>
- Vázquez-Santos, M. B., Suárez-García, F., Martínez-Alonso, A., & Tascón, J. M. D. (2012). Activated carbon fibers with a high heteroatom content by chemical activation of PBO with phosphoric acid. *Langmuir*, 28(13), 5850-5860. <https://doi.org/10.1021/la300189v>
- Vickers, N. J. (2017). Animal communication: When i'm calling you, will you answer too? *Current biology*, 27(14), R713-R715.
- Walker, G. M., & Weatherley, L. R. (2000). Prediction of bisolute dye adsorption isotherms on activated carbon. *Process Safety and Environmental Protection*, 78(3), 219-223.
- Wang, X., Liang, X., Wang, Y., Wang, X., Liu, M., Yin, D., Xia, S., Zhao, J., & Zhang, Y. (2011). Adsorption of Copper (II) onto activated carbons from sewage sludge by microwave-induced phosphoric acid and zinc chloride activation. *Desalination*, 278(1-3), 231-237.
- Ward, A., & Khalaf, A. (2007). Electrical and Mechanical Properties of SBR Filled with Carbon Black-Silica Blends. *KGK rubberpoint*, 60, 623-630.
- Webb, P. A., & Orr, C. (1997). *Analytical methods in fine particle technology*. Micromeritics Instrument Corporation.

- Yağşı, N. U. (2004). *Production and characterization of activated carbon from apricot stones* [Master's Thesis, Middle East Technical University (Turkey)]. <https://search.proquest.com/openview/d93f2354e8109bc1fdb5e8a9d8c79014/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- Yahya, M. A., Al-Qodah, Z., & Ngah, C. Z. (2015). Agricultural bio-waste materials as potential sustainable precursors used for activated carbon production: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 46, 218-235.
- Yalçın, M. (1996). *Use of activated carbons produced from indigenous raw materials in gold metallurgy as an alternative to coconut shell carbons* [PhD Thesis, Middle East Technical University (Turkey)]. <https://search.proquest.com/openview/8e2c708e5a7c6d9c233adcc24501df09/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- Yalman, Ü. (2025). *Kimyasal aktivasyon yöntemi ile üretilmiş olan çeşitli aktif karbonların adsorpsiyon kapasitelerinin karşılaştırılması* [Yüksek Lisans Tezi]. Necmettin Erbakan Üniversitesi.
- Yapıcı, M. (2022). *Koyun gübresinden aktif karbon üretimi ve naproksen sodyum mikrokirleticisinin adsorpsiyonu* [Yüksek Lisans Tezi]. Harran Üniversitesi.
- Yıldırım, H. (2016). *Activated carbon production from pretreated and fermented agricultural residues* [Master's Thesis]. Kocaeli Üniversitesi.
- Young, R. J., & Lovell, P. A. (2011). *Introduction to Polymers* (3. bs). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781439894156>
- Yunus, Z. M., G., Y., Al-Gheethi, A., Othman, N., Hamdan, R., & Ruslan, N. N. (2022). Advanced methods for activated carbon from agriculture wastes; a comprehensive review. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(1), 134-158. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1717477>
- Zhang, C., Tang, Z., Guo, B., & Zhang, L. (2018). Significantly improved rubber-silica interface via subtly controlling surface chemistry of silica. *Composites Science and Technology*, 156, 70-77.
- Zhang, F.-S., Nriagu, J. O., & Itoh, H. (2005). Mercury removal from water using activated carbons derived from organic sewage sludge. *Water research*, 39(2-3), 389-395.
- Zhao, J., Yu, L., Ma, H., Zhou, F., Yang, K., & Wu, G. (2020). Corn stalk-based activated carbon synthesized by a novel activation method for high-performance adsorption of hexavalent chromium in aqueous solutions. *Journal of colloid and interface science*, 578, 650-659.
- Zheng, W., Zhao, L., Xu, W., Li, H., Long, H., Zhang, H., Cheng, Z., Liu, Z., & Zhang, G. (2023). Utilization of shield powder as a novel reinforcing and compatibilizing filler in styrene-butadiene rubber (SBR) composites. *Journal of Material Cycles*

and Waste Management, 25(4), 2113-2122. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01666-z>

