



**BİYOKÜTLE ESASLI KARBON
MALZEMELERİN YALITIM
PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

Yüksek Lisans

Çiğdem ÇAĞDAŞ

Eskişehir 2024

**BİYOKÜTLE ESASLI KARBON MALZEMELERİN YALITIM
PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

Çiğdem ÇAĞDAŞ

Yüksek Lisans Tezi

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Kimyasal Teknoloji Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Esin APAYDIN VAROL

(İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Evren ARIÖZ)

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Kasım 2024

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Çiğdem ÇAĞDAŞ'nin BİYOKÜTLE ESASLI KARBON MALZEMELERİN YALITIM PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ başlıklı çalışması 05/11/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Kimya Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye

: Prof. Dr. Esin APAYDIN VAROL

Üye

: Prof. Dr. Hande ÇELEBİ

Üye

: Dr. Öğr. Üyesi Kadir KILINÇ

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

05/11/2024

DANIŞMAN ONAYI

DaniŐmanlıđını yurttuđum Yůksek Lisans ođrencisi iđdem ÇAĐDAŐ, BİYOKŪTLE ESASLI KARBON MALZEMELERİN YALITIM PERFORMANSININ DEĐERLENDİRİLMESİ baŐlıklı tez çalıŐmasını tamamlamıŐtır. HazırlamıŐ olduđu tez tarafımda incelenmiŐ ve ođrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun gůrŪlmüŐtŪr.

Tez DaniŐmanı

Prof. Dr. Esin APAYDIN VAROL

ÖZET

BİYOKÜTLE ESASLI KARBON MALZEMELERİN YALITIM PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Çiğdem ÇAĞDAŞ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Kimyasal Teknoloji Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kasım 2024

Danışman: Prof. Dr. Esin APAYDIN VAROL

(İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Evren ARIÖZ)

Bu çalışmada, farklı yöntemlerle üretilen biyokarbonların belirli oranlarda harç çamuruna eklenerek, kürlenme sonucunda betonun yalıtım özelliklerindeki değişimler gözlemlenmiştir. Piroliz yöntemi ile üretilen biyokömür daha sonra fiziksel ve kimyasal olarak iki farklı şekilde aktive edilmiştir. Biyokömür üretimi için piroliz deneyleri 550°C’de statik ortamda 10°C/dakika ısıtma hızıyla gerçekleştirilmiştir. Fiziksel ve kimyasal aktivasyon ise N₂ ortamında 10°C/dakika ısıtma hızıyla 700°C’de gerçekleştirilmiş olup, 1 saat bu sıcaklıkta bekletilerek süreç tamamlanmıştır. Elde edilen üç farklı biyokarbonun ısıl dayanımını belirlemek için termogravimetrik analizleri yapılmıştır. Ardından, XRD, BET yüzey alanı, SEM, Raman Spektroskopisi analizleri ile biyokarbon örnekleri karakterize edilmiştir. Harç içerisinde biyokarbon malzemelerin yalıtım performansının belirlenmesi amacıyla belirli oranlarda (%0,5; 1 ve 2) biyokarbon çimento harcına eklenerek 28 günlük kürlenme süresi sonrası basınç ve eğilme dayanım testleri uygulanmıştır. Ses ve ısı yalıtım özellikleri belirlenmesi için ses dağılım hızı ve ısıl iletkenlik katsayısı testleri yapılarak karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak beton içerisinde biyokarbon malzemelerin %1 oranında eklenmesi ile betonun yalıtım performansının iyileştirilebileceği belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Biyokarbon, Piroliz, Aktivasyon, Beton, Dayanım, Eğilme, Yalıtım.

ABSTRACT

EVALUATION OF THE INSULATION PERFORMANCE OF BIOMASS-BASED CARBON MATERIALS

Çiğdem ÇAĞDAŞ

Department of Chemical Engineering

Programme in Chemical Technology

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, November 2024

Supervisor: Prof. Dr. Esin APAYDIN VAROL

(Co-Supervisor: Asst. Prof. Dr. Evren ARIÖZ)

In this study, biocarbons produced by different methods were added to the mortar mud at certain ratios and the changes in the insulation properties of concrete were observed as a result of curing. The biochar produced by the pyrolysis method was then activated in two different ways, physically and chemically. Pyrolysis experiments for biochar production were carried out at 550°C in a static environment with a heating rate of 10°C/min. Physical and chemical activation was carried out at 700°C in a N₂ environment with a heating rate of 10°C/min and the process was completed by waiting at this temperature for 1 hour. Thermogravimetric analyses were carried out to determine the thermal stability of the three different biocarbons obtained. Then, biocarbon samples were characterized by XRD, BET surface area, SEM, Raman Spectroscopy analyses. In order to determine the insulation performance of biocarbon materials in the mortar, biocarbon was added to the cement mortar at certain ratios (0.5%; 1 and 2) and after a 28-day curing period, compression and flexural tests were applied. In order to determine the sound and thermal insulation properties, sound dispersion speed and thermal conductivity coefficient tests were performed and compared. As a result, it was determined that the insulation performance of the concrete could be improved by adding 1% of biocarbon material into the concrete.

Keywords: Biocarbons, Pyrolysis, Activation, Concrete, Strength, Flexural, Insulation.

TEŞEKKÜR

Öncelikle bu çalışmanın hazırlanmasında, beni yönlendiren, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, eğitim hayatımda olduğu kadar özel ilişkilerde de desteğini eksik etmeyen danışman hocam Prof. Dr. Esin APAYDIN VAROL'a,

Tüm araştırma ve deneysel sürecim boyunca tecrübeleri ve bilgi birikimleriyle yardım ve desteklerini esirgemeyen ikinci danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Evren ARIÖZ'e ve Laboratuvar'da çalışan tüm hocalarıma ve arkadaşlarıma,

Isıl iletkenlik analizlerinin tamamlanmasında destek olan Seramik Araştırma Merkezine,

Ses yalıtım testleri için yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Derya ÖVER'e,

Hayatım boyunca tüm eğitim ve öğretim sürecimde arkamda olan, güvenini hep hissettiren, maddi manevi desteğini esirgemeyen babam Nafiz ÇAĞDAŞ, annem Mükerrer ÇAĞDAŞ ve biricik ablam Ece Söğüt'e ile canım eniştem Oğuz SÖĞÜT'e,

Her ihtiyacım olduğunda desteğini yanımda hissettiğim müdürüm Ayşen Aylin ÖZLER ve patronum Vural BULUT'a,

Her zor durumda yardıma koşan, yanımda olduklarını hep hissettiren değerli arkadaşlarım Özgecan ÇAĞLAYAN ve Özlem KARATAŞ'a,

Sonsuz Teşekkürlerimi sunarım.

Çiğdem ÇAĞDAŞ

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Çiğdem ÇAĞDAŞ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLolar DİZİNİ	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
GÖRSELLER DİZİNİ	XIII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XIV
1. GİRİŞ	1
2. BİYOKÜTLE	1
3. BİYOKÖMÜR	2
3.1. Biyokömür Üretim Yöntemleri.....	2
3.1.1. Piroliz.....	3
3.1.2. Gazlaştırma	4
3.1.3. Hidrotermal karbonizasyon (HTC)	5
3.1.4. İyonotermal karbonizasyon (ITC)	6
3.1.5. Torrefikasyon.....	6
3.2. Biyokömür Uygulama Alanları.....	6
3.2.1. Toprak iyileştiricisi ve organik gübre olarak kullanılması	7
3.2.2. Adsorbent olarak kullanılması.....	8
3.2.3. Katalizör	8
3.2.3.1. Sentez gazı temizlemede katalizör	9

3.2.3.2. <i>Biyodizel üretimi için katı asit katalizörü</i>	9
3.2.4. Biyokömür bazlı süper kapasitör	10
3.2.5. Yapı malzemesinde kullanımı	10
4. BETON	12
4.1. Çimento	12
4.2. Agrega	13
4.3. Su	13
4.4. Katkılar	13
4.4.1. Su azaltıcılar	14
4.4.2. Hızlandırıcı katkı maddeleri	14
4.4.3. Hava tutucular	14
4.4.4. Korozyon önleyiciler	14
4.4.5. Süperakışkanlaştırıcılar	15
4.4.6. Biyokömür	15
5. DENEYSEL ÇALIŞMA	16
5.1. Kayın Ağacı Talaşına Uygulanan Analizler	17
5.2. Kayın Ağacı Talaşına Uygulanan Piroliz Deneyleri	17
5.3. Biyokömüre Uygulanan Analizler	18
5.3.1. Biyokömür aktivasyonu	18
5.3.1.1. <i>Fiziksel aktivasyon</i>	18
5.3.1.2. <i>Kimyasal aktivasyon</i>	19
5.3.2. Helyum piknometresi ve yığın yoğunluk analizi	19
5.3.3. Termogravimetrik analiz (TGA)	19
5.3.4. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR)	19
5.3.5. Yüzey alanının belirlenmesi	20
5.3.6. SEM analizleri	20
5.3.7. XRD analizi	20
5.3.8. Raman analizi	20
5.4. Harç Örneklerinin Hazırlaması	20
5.5. Harç Örneklerine Uygulanan Analizler	22
5.5.1. Basınç ve eğilme dayanım testleri	23
5.5.2. Ses dağılma süresi ve hızı testi	23

5.5.3. Isıl iletkenlik katsayısı testi.....	23
6. DENEYSEL VERİLERDEN ELDE EDİLEN SONUÇLAR.....	24
6.1. Helyum Piknometresi ve Yığın Yoğunluk Analizleri.....	24
6.2. Termogravimetrik Analiz Sonuçları	24
6.3. Fourier Transform Infrared Spektrofotometre (FTIR) Sonuçları	29
6.4. BET Yüzey Alan Tayini Sonuçları	31
6.5. X-Işını Difraktometresi (XRD) Analiz Sonuçları.....	31
6.6. Raman Spektroskopisi Analiz Sonuçları	32
6.7. SEM Görüntü Analiz Sonucu	33
6.8. Basınç ve Eğilme Testi Sonuçları.....	34
6.9. Ses Dalga Dağılma Süresi ve Hızı Analizi.....	37
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	40
KAYNAKÇA.....	42
ÖZGEÇMİŞ	

TABLULAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 5.1. Harç numuneleri için kullanılan su miktarı ve yayılmaları	21
Tablo 5.2. TS-EN 197-1 beton dayanım sınıfları.....	23
Tablo 6.1. Biyokarbon örneklerinin gerçek ve yığın yoğunluğu	24
Tablo 6.2. Ham madde ve biyokarbonların termogravimetrik analiz sonuçları	29
Tablo 6.3. Biyokarbon örneklerinin FT–IR fonksiyonel grupları ve karşılık gelen dalga sayıları	31
Tablo 6.4. Biyokarbon örneklerine ait BET yüzey alanı sonuçları.....	31
Tablo 6.5. Farklı parçacık boyutlarında BK içeren harç örneklerinin basınç ve eğilme dayanımı test sonuçları (7 günlük kürlenme).....	35
Tablo 6.6. 28 gün kürlenme sonrasında harç örneğinin basınç-eğilme dayanım test sonucu	35
Tablo 6.7. Farklı oranlarda BK içeren harç örneklerinin basınç ve eğilme dayanımı test sonuçları (28 günlük kürlenme).....	36
Tablo 6.8. Farklı oranlarda AKF içeren harç örneklerinin basınç ve eğilme dayanımı test sonuçları (28 günlük kürlenme).....	36
Tablo 6.9. Farklı oranlarda AKK içeren harç örneklerinin basınç ve eğilme dayanımı test sonuçları (28 günlük kürlenme).....	36
Tablo 6.10. Referans harç örneğinin ses dalga dağılma süresi ve hızı	37
Tablo 6.11. Farklı oranlarda biyokömür içeren harç örneklerinin ses dalga dağılma süresi ve hızı.....	37
Tablo 6.12. Farklı oranlarda AKF içeren harç örneklerinin ses dalga dağılma süresi ve hızı	38
Tablo 6.13. Farklı oranlarda AKK içeren harç örneklerinin ses dalga dağılma süresi ve hızı	38
Tablo 6.14. Isıl iletkenlik katsayısı analizi sonuçları.....	39

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 6.1. Kayın ağacı talaşı (KAT) TG/dTG eğrisi	25
Şekil 6.2. Biyokömür (BK) TG/dTG eğrisi	26
Şekil 6.3. Fiziksel aktivasyon ile hazırlanan biyokarbon (AKF) TG/dTG eğrisi	27
Şekil 6.4. Kimyasal aktivasyon ile hazırlanan biyokarbon (AKK) TG/dTG eğrisi	27
Şekil 6.5. Biyokömür (BK), fiziksel aktivasyon ile hazırlanan biyokarbon (AKF) ve kimyasal aktivasyon ile hazırlanan biyokarbon (AKK) TG/dTG eğrileri	28
Şekil 6.6. Biyokömür (BK) FT-IR spektrumu	30
Şekil 6.7. Fiziksel aktivasyon ile elde edilen biyokarbon (AKF) FT-IR spektrumu	30
Şekil 6.8. Kimyasal aktivasyon ile elde edilen biyokarbon (AKK) FT-IR spektrumu	30
Şekil 6.9. Biyokarbon örneklerinin (BK, AKF ve AKK) XRD profilleri.....	32
Şekil 6.10. Biyokarbonların (BK, AKF ve AKK) raman spektrumları	33
Şekil 6.11. a) kayın ağacı talaşı (KAT), b) biyokömür (BK) c) fiziksel aktif karbon (AKF) ve d) kimyasal aktif karbon (AKK) örneklerinin SEM görüntüsü (1000X büyütme)	34

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 2.1. Biyokütle Dönüşüm Süreçleri (Kapluhan, 2014)	1
Görsel 3.1. Piroliz yöntemi ile biyokömür üretim prosesi (Uçar, 2023).....	3
Görsel 3.2. Gazlaştırma prosesi (Mutlu, N. Tolay, M., Karaca, C., Öztürk, H., 2019)	5
Görsel 5.1. Piroliz deney düzeneği	17
Görsel 5.2. Laboratuvar ortamında üretilen biyokömür.....	18
Görsel 5.3. %0,5; 1 ve 2 oranlarında BK eklenmiş harç örnekleri	22
Görsel 5.4. %0,5; 1 ve 2 oranlarında AKF eklenmiş harç örnekleri.....	22
Görsel 5.5. %0,5; 1 ve 2 oranlarında AKK eklenmiş harç örnekleri	22

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AKF	: Fiziksel yöntem ile elde edilen biyokarbon
AKK	: Kimyasal yöntem ile elde edilen biyokarbon
BET	: Brunauer, Emmett ve Teller
BİBAM	: Bitki, İlaç ve Bilimsel Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi
BK	: Biyokömür
FT-IR	: Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
KAT	: Kayın ağacı talaşı
SAM	: Seramik Araştırma Merkezi
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
TGA	: Termogravimetrik analiz
XRD	: X-ışını kırınımı

1. GİRİŞ

Biyokütle, en genel tanımı ile yenilenebilir enerji üretimi için kullanılan organik içeriği yüksek hammaddeyi ifade etmektedir. Biyokütle, yeryüzü üzerinde bitki atıkları ve biyolojik endüstriyel atıklar halinde bulunabilmektedir. Biyokütle, karmaşık bileşime sahip olsa da genel olarak karbonca zengin ve uçucu madde içeriği yüksektir. Biyokütle temel olarak %45-50 selüloz, %25-30 hemiselüloz ve %20-25 lignin içermektedir. Biyokütle kaynakları, tarım ve orman atıkları, hayvansal atıklar, kentsel katı atıklar ve endüstriyel atıklardır.

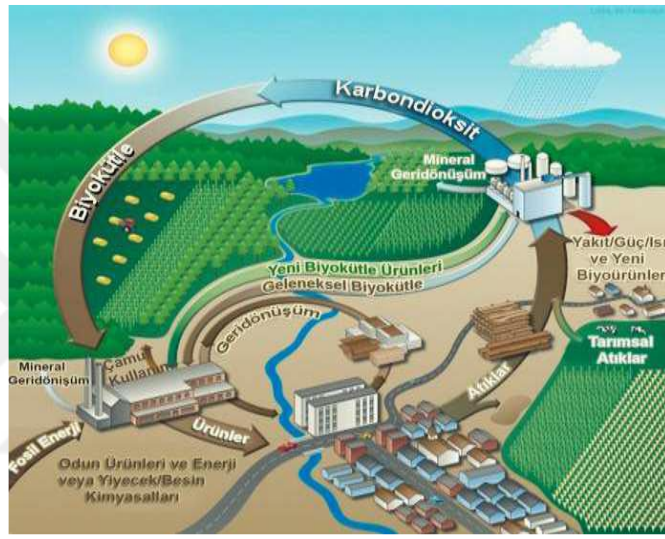
Son yıllarda, biyokütleden termokimyasal dönüşüm yöntemleri ile yüksek karbon içeriğine sahip biyokarbon üretimi dikkat çekmektedir. En yaygın olarak kullanılan termokimyasal yöntem piroliz yöntemidir. Piroliz, organik bazlı maddelerin oksijensiz ortamda yüksek sıcaklıkta bozundurulması işlemidir ve bu işlem sonrasında katı, sıvı ve gaz ürün elde edilmektedir. Elde edilen katı ürün biyokarbon olarak adlandırılmaktadır ve hammaddeye kıyasla yüksek karbon içeriğine sahiptir. Biyokarbon üretilmesinde ana amaç, karbon atomlarını yakalayarak depolama sonucunda sera gazı emisyonlarını azaltmaktır. Özellikle toprak verimliliğini artırmak için kullanılan piroliz katı ürünü (biyokömür) son zamanlarda biyokompozit malzeme üretimi için de kullanılmaktadır.

Binalarda enerji tasarrufu ve böylelikle karbondioksit emisyonlarının azaltılmasını sağlamak için farklı yalıtım malzemelerinin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Yenilenebilir ve çevre dostu kaynaklardan elde edilen biyokarbon, sahip olduğu gözenekli yapısı ve hafif olması nedeniyle beton katkısı olarak son yıllarda dikkat çekmektedir. Karbonlu malzemelerin ısı ve ses yalıtımları uygulamalarında kullanıldığı bilinmektedir.

Bu çalışmada, biyokütle olarak seçilen kayın ağacı talaşından farklı termokimyasal yöntemler ile elde edilen biyokarbonların karakterizasyonu ve beton katkı malzemesi olarak kullanılması durumunda ısı ve ses yalıtımının araştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, piroliz, kimyasal ve fiziksel aktivasyon süreçleri sonucunda üretilen üç farklı özellikte biyokarbon, farklı oranlarda harç ile karıştırılarak yalıtım performansını iyileştirecek çalışma koşullarının belirlenmesi için deneysel çalışmalar yürütülmüştür.

2. BİYOKÜTLE

Biyokütle yeryüzünde bulunan bitkiler, hayvanlar veya mikroorganizmaların kütlelerini ve biyokimyasal açıdan selüloz, lignin, şeker, yağ ve protein gibi organik bileşenleri ifade eder (Salih, 2021). Biyokütle dönüşüm süreçleri Görsel 2.1.'de verilmiştir. Biyokütlenin yararlı ürünlere dönüştürülmesi süreçleri sırasında açığa çıkan karbondioksitin fotosentez sırasında bitkiler tarafından alınarak yeni biyokütlelerin oluşumunda kullanılması ile karbon nötr bir çevrim sağlanmaktadır (Houghton, 2008) (Salih, 2021).



Görsel 2.1. Biyokütle Dönüşüm Süreçleri (Kaplukan, 2014)

Biyokütle kaynakları arasında orman, tarım, endüstriyel atıklar dikkat çekmektedir. Küresel biyokütle miktarını saptamak çok mümkün olmasa da, karasal biyokütlenin yaklaşık %70-90'ını ormanlar oluşturmaktadır. Kereste ve kağıt hamuru üretimi için önemli bir ham madde kaynağı olan odun, sahip olduğu lignoselülozik yapısı nedeniyle termokimyasal dönüşümler için uygun biyokütleler arasında sayılmaktadır. (Hall, D.O. ve House, J. I., 1994) (Houghton, 2008) Bulunma oranları biyokütle kaynağına göre farklılık göstermekle birlikte, yaklaşık %40-60 selüloz, %15-30 hemiselüloz, %10-25 lignin ve %5-10 ekstraktifler biyokütlenin dört ana bileşenini oluşturmaktadır (Shen, X., Shamshina, J. L., Berton, P., Gabriela, G., Rogers, R. R., 2016). Yaklaşık %50 elementel karbon içeren biyokütle kaynakları uygun yöntemlerle değerlendirildiğinde enerji üretiminde ya da katma değeri yüksek ürünlerin eldesinde kullanılmaktadır (Ishak, M. A. M., Ani, A. Y., Ismail, S. N. A. S., Ali, M. L. M., Ahmad, R., 2022) (Ramana, A., K. M. M. S. Begum, Pereira, A. O. ve Cohen, C., 2022) (Üçgül, 2010).

3. BİYOKÖMÜR

Biyokömür, biyokütlenin eser miktarda oksijen veya oksijensiz ortamda yüksek sıcaklıkta ısıl bozundurulması sonucunda oluşan, yüksek karbon içeriğine ve yüksek gözenekliliğe sahip katı üründür. Biyokömür kristal yapısında hegzagonal ve amorf yapıya sahiptir. Kimyasal olarak ise asidik karboksil ve fenolik yapı içerir (Sachan, R., Nautiyal, A. ve Kumar, K., 2022).

Biyokömür, biyoçar olarak da adlandırılan karbonca zengin, doğada bozunması uzun zaman alan, dayanıklı organik bileşiklerdir. Günümüzde biyokömür özellikle verimsiz topraklarda toprak düzenleyicisi olarak kullanılmaktadır. Biyokömür, toprak verimliliğini arttırarak ve sera etkisini azaltarak iklim değişikliği ile mücadelede rol oynamaktadır (Gönen, 2019).

Biyokömür üretimi için, genel olarak ticari boyutta ve araştırma tesislerinde kullanılan ham maddeler odun yongası ve odun peletleri, ağaç talaşları, ağaç kabuğu, mahsul artıkları (saman, fındık kabukları ve pirinç kabukları), şalgam otu, organik atıklar, şeker kamışı endüstrisinden küspe yer almaktadır (Sohi, S., Lopez-Capel, E., Krull, E., Bol R., 2010).

Biyokömür üretimi için en uygun üretim yöntemi pirolizdir. Piroliz yöntemi eski çağlara dayanan bir yöntemdir ve oksijensiz ortamda ısıl bozunma işlemi olarak bilinir. Bu süreçte biyokütle, kapalı ortamda inert gaz eşliğinde yavaş ısıtma hızı ile bozundurma işlemine tabi tutulur (Sohi, S., Lopez-Capel, E., Krull, E., Bol R., 2010).

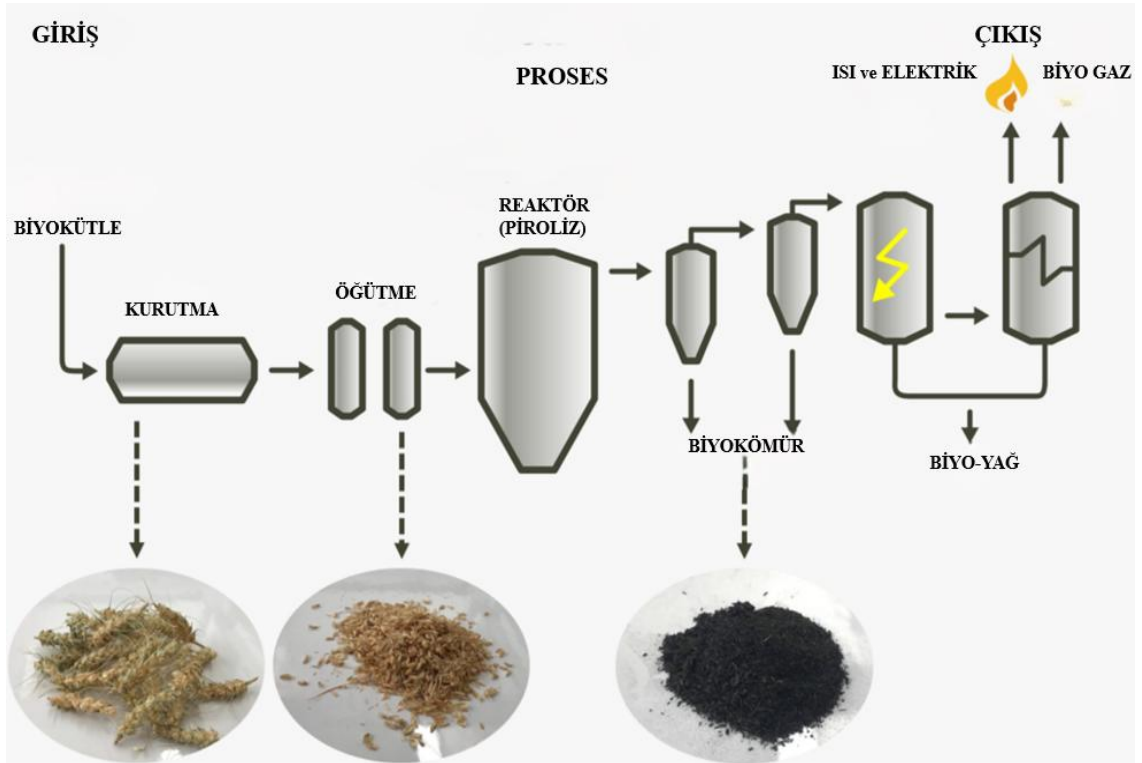
3.1. Biyokömür Üretim Yöntemleri

Biyokömür termokimyasal dönüşüm teknoloji arasında yer alan piroliz, ıslak ve kuru torrefikasyon, gazlaştırma ve hidrotermal karbonizasyon yöntemleri ile üretilebilir. Biyokömür üretimini son sıcaklık, bekleme süresi, ısıtma hızı ve reaktör tipi gibi çalışma koşulları etkilemektedir. Biyokömür üretiminde en çok kullanılan yöntem pirolizdir. Bunun sebebi hem daha stabil ürün elde edilebilmesi hem de daha ekonomik olmasıdır. Torrefikasyon işlemi sonucunda üretilen biyokömür içerisinde uçucu organikler bulunabilmektedir. Bu işlem yaklaşık olarak 200-300°C'de gerçekleşir. Gazlaştırma prosesinde ise işlem 600-1200°C civarlarında gerçekleşmekte ve 10-20 s süre içinde ürün oluşmaktadır (Mohan, D., Sarswat, A., Ok, S. Y., Jr, C. U. P., 2014).

Biyokütlenin termokimyasal ayrışması sırasında üretilen biyokömür, atmosfere salınan karbon miktarını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda aktif karbon ve diğer karbon malzemelerinin çevre dostu bir alternatifi olarak değerlendirilmektedir. Biyokömür farklı termokimyasal yöntemlerle üretilmektedir (Kwapinski, W., Byrne, C. M. P., Kryachko, E., Wolfram, P., Adley, C., Leahy, J. J., Novotny, E. H., Hayes, M. H. B., 2010).

3.1.1. Piroliz

Biyokömür üretiminde en çok kullanılan yöntem olan piroliz, biyokütle ve atıklardan enerji üretimi sağlamak ve yararlı ürünler elde etmek amacıyla tercih edilmektedir. Piroliz sürecinde biyoyağ, sentez gazları ve biyokömür ürün olarak alınmaktadır. Görsel 3.1.'de biyokütle pirolizi akım şeması verilmiştir. Piroliz reaktörüne gelmeden önce kurutma ve parçacık boyutu küçültme ön işlemlerinden geçirilen biyokütle, oksijensiz ortamda bozundurulur ve katı, sıvı ve gaz ürün üretilmektedir. Biyokarbon, karbonca zengin, enerji içeriği biyokütleyle göre daha fazla olan karbonlu malzeme olarak değerlendirilebilecek piroliz katı ürünüdür (Kwapinski, W., Byrne, C. M. P., Kryachko, E., Wolfram, P., Adley, C., Leahy, J. J., Novotny, E. H., Hayes, M. H. B., 2010).



Görsel 3.1. Piroliz yöntemi ile biyokömür üretim prosesi (Uçar, 2023)

Ham maddenin bileşimi, piroliz sıcaklığı ve ısıtma hızı gibi farklı çalışma koşullarında, ürün verim dağılımı ve ürün özellikleri değişkenlik göstermektedir. Piroliz sırasında açığa çıkan uçucu bileşenler, yoğunlaştırılarak sıvı halde, yoğunlaşamayacaklar ise gaz ürün olarak alınır ve sentetik yakıt ya da kimyasal hammadde kaynağı olarak kullanılabilir (Lehmann, 2007).

Reaksiyon süresine ve sıcaklığa bağlı olarak, pirolizin iki alt sınıfı vardır. Bunlar geleneksel yavaş piroliz ve hızlı pirolizdir. Sıvı ürün verimi yüksek ısıtma hızlarında artarken, düşük ısıtma hızı ve düşük sıcaklıklarda katı ürün (biyokömür) oluşum verimi yüksektir (Demirbaş, 2004).

Hızlı piroliz yaklaşık olarak 400-600°C'de ve 300°C/dk ısıtma hızı ile gerçekleşir. Kalma süresi ise yaklaşık olarak 0,5-10 s arasındadır. Proses sonucunda katı kütle miktarı eldesi % 15-30 arasındadır (Babu, 2008).

Yavaş piroliz hızlı pirolize kıyasla daha çok tercih edilmektedir. Proses yaklaşık olarak 300-800°C ve ısıtma hızı 5-10°C/dk'da gerçekleşmektedir. Sonuç olarak kütlece %35-50 dönüşüm sağlanmaktadır (Babu, 2008).

Büyük parçacık boyutlarına sahip ıslak hammaddeler piroliz için daha fazla enerji gerektireceğinden, ham maddenin parçacık boyutu ve bunun yanında nem içeriği önem arz etmektedir. Piroliz sırasında kurutma işlemi için gerekli enerjiyi sağlamada ham maddedeki karbonun bir kısmının yakılması gerekir ve böylece daha az hammadde biyokömüre ve diğer ürünlere dönüştürülebilir (Sohi, S., Lopez-Capel, E., Krull, E., Bol R., 2010).

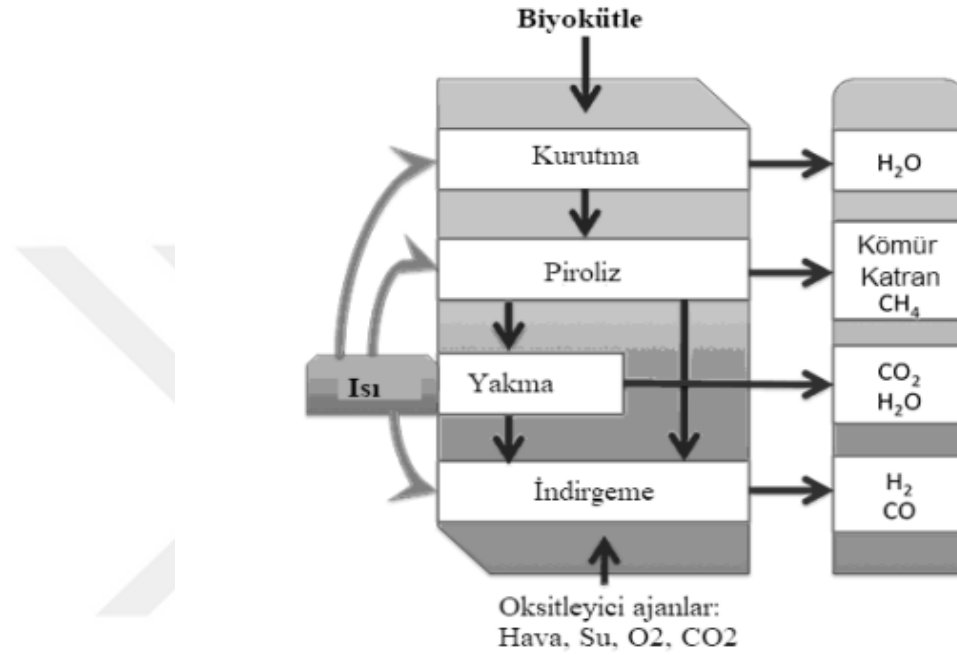
3.1.2. Gazlaştırma

Gazlaştırma, biyokütle, kömür ve plastik malzemeler gibi karbonlu malzemeleri oksidatif ortamda hava, buhar, oksijen, karbondioksit ve gaz karışımı gibi maddeleri kullanarak gaz ürünlere dönüştüren oksidasyon işlemidir. Gazlaştırma işleminde üç farklı faz oluşmaktadır. Bunlar gaz olarak H₂, CO, CO₂ ve N₂; sıvı olarak katran ve yağ; ve katı olarak kömür ve küldür (Zarei-Jelyani, F., Salahi, F. ve Zarei-Jelyani, M., 2024).

Gazlaştırma prosesi gaz ürünler üretmeyi amaçladığı için, biyokömür ürün verimi kullanılan biyokütlenin yaklaşık %5-10'u kadardır, bu nedenle gazlaştırma proses verimi hızlı pirolizden düşüktür. Gazlaştırma prosesi Görsel 3.2.'de gösterilen adımlardan oluşmaktadır. Kısaca özetlenirse, hammaddenin neminin uzaklaştırıldığı ilk adım olan

kurutmadan sonra piroliz tepkimeleri başlamakta ve sıcaklık artırılır. Kısmi oksidasyonun gerçekleştiği basamaktan sonra yüksek sıcaklıkta gerçekleşen gazlaştırma tepkimeleri sonucunda CH₄, H₂ ve CO gibi sentetik yakıt olarak kullanılabilen gaz ürünler oluşmaktadır. Proses basamakları (Mutlu, N. Tolay, M., Karaca, C., Öztürk, H., 2019);

Kurutma → Piroliz → Oksidasyon/Yanma → Gazlaştırma şeklindedir.



Görsel 3.2. Gazlaştırma prosesi (Mutlu, N. Tolay, M., Karaca, C., Öztürk, H., 2019)

3.1.3. Hidrotermal karbonizasyon (HTC)

Biyokömür üretim proseslerinde piroliz ve gazlaştırma gibi kuru işlemlerle biyokütlenin nem içeriği %10'nun altında olduğu durumlarda az enerji kaybıyla yüksek verim ürün elde edilebilmektedir. Fakat, ham madde olarak çoğu biyokütle yüksek nem içeriğine sahiptir. Bu durumda yüksek ürün verimi elde etmek ve gerekli enerji miktarını azaltmak için biyokütleden nemin uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu nedenle, kurutma ön işlemi gerektirmeyen, sulu ortamda da uygulanabilen, düşük sıcaklık ve yüksek basınçta çalışılan hidrotermal karbonizasyon prosesine uygulamalarda sıklıkla rastlanmaktadır. Yüksek nem oranına sahip biyoküteller için hidrotermal prosesler, piroliz ve gazlaştırmaya oranla daha yüksek verim elde etmeyi sağlamaktadır. Hidrotermal yöntem ile üretilen katı ürün, hidrokömür olarak adlandırılmaktadır (Masoumi, S., Borugadda, V. B., Nanda, S., Dalai, A. K., 2021) (Reza, M. T., Andert, J., Herklotz, B., Busch, D., 2014).

3.1.4. İyonotermal karbonizasyon (ITC)

İyonotermal karbonizasyon yöntemi ile yüksek gözenekliliğe sahip biyokömür üretimi tek aşamada gerçekleşmektedir. HTC yöntemine kıyasla ITC daha yüksek spesifik gözeneğe sahip karbon malzemeler üretmek mümkündür. HTC ile çözücü olarak su kullanılırken ITC prosesinde iyonik sıvılar kullanılmaktadır. İyonik sıvılar suya kıyasla biyokütleyi daha iyi çözmekte ve termal olarak daha kararlı yapıya sahip olmaktadır (Sınağ, 2023).

3.1.5. Torrefikasyon

Biyokütlerin yakıt olarak kullanımı için çeşitli yöntemlerle dönüştürülmesi sürecindeki dezavantajların giderilmesinde torrefaksiyon ve peletleme gibi bir takım ön işlemler uygulanmaktadır. Torrefaksiyon, inert ortamda ve düşük ısıtma hızında öncelikle katı ürün elde etmek için uygulanan ve biyokütlenin fiziksel ve kimyasal yapısında pek çok pozitif değişimleri sağlayan ön işlemdir. Örneğin; torrefaksiyon işlemi boyunca biyokütlerdeki hemiselülozun ve selülozun belirli bir kısmı parçalanmakta ve biyokütlerde dehidratasyon, dehidrojenasyon ve deoksijenasyon reaksiyonları meydana gelmektedir. Bu değişimler sayesinde biyokütlenin reaktivitesinde artış gerçekleşirken, H/C ve O/C oranının azalmasından dolayı enerji yoğunluğu artmakta ve biyokütle daha az hidrofobik özellik göstermektedir. Torrefaksiyon ile biyokütle yapısında uçucu madde miktarı azaldığından yanma esnasında daha az uçucu bileşen açığa çıkar ve nem içeriği azaldığından daha kolay tutuşabilir hale gelir (Aydemir, 2022).

3.2. Biyokömür Uygulama Alanları

Biyokömüre talebin son yıllarda gittikçe artmasının en büyük nedeni, kapsamlı uygulama alanlarına sahip olmasıdır. Bunun yanında biyokömür üretiminin düşük maliyete sahip olması ve üretim aşamasında kullanılan enerjinin az olması da, talebi arttırmaktadır. Ucuz olmasının yanında sürdürülebilir ve üretimi kolaydır. Biyokömürün en yaygın uygulama alanları olarak toprak iyileştirme, adsorbent, katalizör, süper kapasitör ve yapı malzemeleri için katkı olarak kullanımıdır (Glaser, B., Wiedner, K., Seelig, S., Schmidt, H., 2014).

En yaygın kullanım alanı ise su arıtmadır. Su içerisindeki su canlılarına zarar veren ağır metalleri ve organik kirleticileri tutmaktadır. Biyokömürün gözenekli yapısı ve yapısında bulunan yüzey fonksiyonel grupları ağır metal ve fenolik bileşenleri uzaklaştırmak için adsorbent olarak kullanılmaktadır. Bu bağlamda aktif karbondan daha

ekonomiktir (Aziz, K. H. H., Kareem, R., 2023) (Yapıcıoğlu, P. ve Yeşilnacar, M. İ., 2022).

Biyokömürün çeşitli uygulama alanlarında kullanılması özelliklerine bağlıdır. Buna verilebilecek en iyi örnek yüksek su tutma kapasitesine sahip olan biyokömürün, toprak ıslahında kullanılmasıdır. Diğer bir örnek ise, sahip olduğu elektrik iletkenliği ve gözenekli yapısı sayesinde yakıt hücrelerinde elektrot olarak kullanılmasıdır (Glaser, B., Wiedner, K., Seelig, S., Schmidt, H., 2014).

3.2.1. Toprak iyileştiricisi ve organik gübre olarak kullanılması

Biyokömürün toprak içerisinde su tutma özelliği sayesinde, bitki topraktan fosfor azot gibi önemli elementleri bünyesine daha kolay alabilmektedir. Fosfor ve azotun yanı sıra bitkiler kalsiyum, potasyum ve magnezyumu daha kolay yakalar ve bu sayede toprak verimliliği artmış olur. Biyokömürün bir diğer özelliği ise bazik karakterli olması ve böylelikle asit değeri yüksek topraklarda dengeyi sağlamasıdır. Biyokömürün bu özellikleri en çok tarıma elverişsiz, kumlu topraklarda yapılan tarım için avantaj sağlamaktadır (Ippilito, J. A., Ducey, T. F., Cantrell, K. B., Novak, J. M., Lentz, R. D., 2016).

Biyokömürün yüksek su tutma kapasitesine sahip olması, yapısının gözenekli olmasından kaynaklanmaktadır. Biyokömürün gözenekli yapısı ayrıca toprağın toplam gözeneklilik miktarını arttırmaktadır. Toprağın gözenekliliğinin artması nedeniyle de toprağın su tutma kapasitesinde artış gözlemlenmektedir. Biyokömür, ayrıca su tutma kapasitesi dışında mikrobiyal hareketlilik için de ortam hazırlamaktadır ve böylelikle toprakta canlı organizmalar için yaşam alanı oluştururken, bitkilere yararlı organizmaların toprakta kalmasını sağlamaktadır (Günel, E. A., Birol, M. ve Surucu, A., 2022)

Biyokömürün diğer bir özelliği ise karbon elementlerinin yüzeyindeki elektiriksel özellikleridir. Buna katyon değişimi adı verilmektedir ve bu özelliği sayesinde bitki köklerinin besin değeri yüksek elementlere ulaşmasını sağlamaktadır (Akgül, 2017).

Üretilen ve toprağa eklenen biyokömür karbonun toprağa tutunmasını sağlayarak karbon emisyonu azaltmaktadır. Bu sayede sera etkisi de azaltılarak küresel ısınmaya karşı etki yaratılmaktadır. Özetle, biyokömür yüksek gözenekli yapıya sahiptir ve bu özelliği sayesinde toprakta bulunan bitki köklerinin hava almasına yardımcı olur. Köklere

diğer bir faydası serbest kalan bitki köklerinin toprak altında daha rahat hareketini sağlamaktadır. Bu durum toprak kalitesini arttırarak daha verimli topraklara sahip olmamıza yardımcı olur. Biyokömür ayrıca su tutma özelliğini arttırarak toprağın asit dengesini düzenlemektedir (Yadav, 2023).

3.2.2. Adsorbent olarak kullanılması

Biyokömür, sıvı veya gaz molekülleri bağlama özelliği ile adsorbent görevi görmektedir. Adsorbent, sıvı ve katıları yüzeyinde tutan katılar olarak adlandırılmaktadır (Biswal, B. K., Balasubramanian, R., 2023).

Su içerisinde bulunan ağır metal ve organik kirleticiler, çerve kirliliğine neden olarak hem insan sağlığına hem de suda yaşayan canlılara zarar vermektedir. Artan dünya nüfusu, enerji kaynaklarının bilinçsiz kullanımları sonucunda orta çıkan kirlilikler biyokömür kullanımı ile giderilebilmektedir. Biyokömürün aktif hale getirilmesi sonucunda yüksek spesifik yüzey alanı, gözenekli yapısı ve yüzeyinde bulunan oksijen bağlı fonksiyonel grupları ile aromatik bileşenler içermektedir. Bu özelliklere sahip olması nedeniyle çeşitli kirleticileri adsorbe etmek için kullanılmaktadır (Biswal, B. K., Balasubramanian, R., 2023) (Xu, X., Cao, X., Zhao, L., Wang, H., 2012).

Biyokömürün gözenekli yapısı ve yüzey fonksiyonel gruplarının olması dışında, aktif karbona göre daha ekonomik üretilmesi de olması avantaj sağlamaktadır. Ayrıca bahsedilen özelliklerinden dolayı toprak ve su içerisindeki kirleticilerin uzaklaştırılması için uygun bir adsorbent olarak kabul edilmektedir (Ahmed, M. B., Zhou, J. L., Ngo, H. H., Guo, W., 2016).

3.2.3. Katalizör

Biyokömürün diğer bir kullanım alanı ise katalizör ya da katalizör altlığı olarak kullanımınıdır. Karbon esaslı malzemelerin, yüksek spesifik yüzey alanı, gözenekli yapısı ve fonksiyonel grupları bünyesinde barındırması gibi fizikokimyasal özellikleri sayesinde heterojen katalizörleri olarak kullanımı dikkat çekmektedir. Biyokömür diğer kimyasal prosesler sonucunda üretilen karbonlu malzemelere kıyasla daha ekonomiktir. Biyokömür modifikasyon sonrasında son katalizör veya katalizör yardımcı maddesi olarak kullanılmaktadır (Cha, J. S., Park, S. H., Jung, S., Ryu, C., Joen, J., 2016). Öte yandan biyokütleden piroliz yöntemiyle doğrudan üretilen biyokömürün aktif karbona kıyasla daha düşük yüzey alanına ve sınırlı yüzey fonksiyonel grubu ile düşük

gözenekliliğe sahip olması katalizör olarak kullanımını kısıtlamaktadır. Ancak uygun aktivasyon yöntemleri ile bu özellikleri iyileştirilebilmektedir (Cao, X., Sun, S. ve Sun, R., 2017).

3.2.3.1. Sentez gazı temizlemede katalizör

Biyokömürün katalizör olarak kullanıldığı alanlardan biri gazlaştırma ile üretilen sentez gazında bulunan katranı temizlemesidir. Gazlaştırma prosesi ile üretilen sentez gazı önemli miktarda katran içermektedir ve dört çeşit katran grubu bulunmaktadır. Bu katran grupları prosesin bazı aşamalarına engel olmaktadır (Mert, M. S., Sert, M., Özkara, G., Yüksel, F., 2017).

En sık kullanılan sentez gazından katran ayırma yöntemleri, su veya yağ ile temizleme, termal veya katalitik parçalamadır. Termal parçalama yönteminde yüksek sıcaklık kullanılmaktadır ve termal proseslerde zararlı hidrokarbonlar oluşmaktadır. Katalitik parçalama ise diğer yöntemlere kıyasla daha etkili bir yöntemdir ve daha düşük sıcaklığa sahip prostedir. Son zamanlarda katran giderimi için biyokömür doğrudan ya da aktif metallere destek malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Katran giderme için biyokömürün katalitik aktivitesi, gözenek boyutu, yüzey alanı ve mineral içeriği önem taşımaktadır (Mert, M. S., Sert, M., Özkara, G., Yüksel, F., 2017).

3.2.3.2. Biyodizel üretimi için katı asit katalizörü

Biyodizel, bitkisel veya hayvansal yağların baz ve alkol ile reaksiyonu sonucu oluşan üründür. Biyodizel üretimi homojen veya heterojen katalizör kullanımı yardımıyla üretilmektedir (Konwar, L. J., Boro, J. ve Deka, D., 2014).

KOH, NaOH gibi kuvvetli ve yüksek reaksiyon verimliliği sağlayan bazik homojen katalizörler biyodizel üretiminde en yaygın kullanılanlardır. Fakat homojen katalizörlerin dezavantajı tekrar kullanılmaması ve maliyetli olmasıdır. Bu nedenle, CaO, MgO, TiO₂/ZrO₂ ve Al₂O₃/ZrO₂, WO₃/ZrO₂ ve çeşitli karbon bazlı asitler veya bazlar gibi birçok heterojen katalizör, biyodizel üretimi için kullanılmaya başlamıştır. Bu katalizörler üründen çok daha kolay ayrıştırılabilmektedir ve tekrar kullanılabilir (Cha, J. S., Park, S. H., Jung, S., Ryu, C., Joen, J., 2016).

Biyokömür, üretim maliyetinin düşük olması, yüksek yüzey alanı ve yüzey fonksiyonel gruplarına sahip olması nedeniyle biyodizel üretiminde katalizör veya katalizör destek elemanı olarak kullanılabilir. Genel olarak biyokömürün

aktifleştirilmesi ve modifikasyonu sonrasında biyodizel üretiminde asit veya baz katalizörü olarak kullanılmaktadır (Kastner, R. J., Miller, J., Geller, D. P., Locklin, J., Keith, L. H., Johnson, T., 2012).

3.2.4. Biyokömür bazlı süper kapasitör

Enerji depolamada kullanılan süperkapasitör, yüksek güç yoğunluğu, uzun çevrim ömrü ve hızlı şarj/deşarj olması nedeniyle günümüzün en çok ilgi çeken konusu olmuştur. Süper kapasitör elektrikli araçlarda, dijital iletişim sistemlerinde kesintisiz güç kaynağı olarak kullanılabilir hale gelmiştir (Altınışik, M., Hansu, T. A. ve Akdemir, M., 2023) (Zhou, W., Liu, X., Zhou, K., Jia, J., 2016).

Süper kapasitör elektrotlarının mikro yapısının süper kapasitör performansı üzerinde büyük etkisi vardır. Yüksek yüzey alanına ve zengin gözenekli yapıya sahip karbon malzeme, geniş kullanılabilirliği ve düşük çevresel etkileri nedeniyle süper kapasitör yapımında kullanılmaktadır (Altınışik, M., Hansu, T. A. ve Akdemir, M., 2023) (Zhou, W., Liu, X., Zhou, K., Jia, J., 2016).

Düşük maliyete sahip, yüksek kaliteli karbon malzeme üretmek, süper kapasitör üretiminde önemli hale gelmiştir. Bu durumda karbonun özelliklerini taşıyan ve karbondan daha az maliyetli biyokömürler kullanılmaya başlanmıştır. Son zamanlarda ise süper kapasitör üretiminde farklı biyokütlelerden üretilmiş biyokömürler kullanılmıştır. Bazı denemeler sonucunda biyokömürün bu alanda elektrot olarak kullanımını yaygın hale gelmiştir (Altınışik, M., Hansu, T. A. ve Akdemir, M., 2023) (Zhou, W., Liu, X., Zhou, K., Jia, J., 2016).

3.2.5. Yapı malzemesinde kullanımı

Düşük ısı iletkenlik ve ağırlığının altı katına kadar su emme kapasitesi biyokömürün önemli özelliklerindedir. Bu özellikler, biyokömürün binaları yalıtım ve nemi düzenlemek için doğru malzeme olduğu anlamına gelir. Kil, kireç ve çimento harcı ile birlikte, kuma %50'ye varan oranlarda biyokömür eklenebilir. Böylelikle, mükemmel yalıtım ve nefes alma özelliklerine sahip hem yaz hem de kış aylarında bir odadaki nem seviyesini %45-70 arasında tutabilen iç mekan sıvaları oluşturabilir. Bu da sadece solunum bozukluklarına ve alerjilere yol açabilen kuru havayı değil, aynı zamanda dış duvarlarda hava yoğunlaşması yoluyla oluşan rutubeti de önler. Bu tür biyokömür ilaveli çimento harcı, koku ve toksinleri emmektedir. Bu nedenle, konutlarda kullanımının yanı

sıra özellikle depolar, fabrika ve tarım binaları ile okullarda ve kalabalık insan gruplarının bulunduğu yapılarda kullanılabilir. Biyokömür, bir binanın dış duvarlarına, kireçle karıştırılarak jet-sprey tekniği ile de uygulanabilir ve normalde kullanılan yalıtım malzemesi olan 20 cm kalınlığa kadar uygulanan strafor yerine geçebileceği düşünülmektedir (Schmidt, 2013).

Piroliz ürünü olan biyokömürün ısı dayanımı oldukça iyidir. Biyokütleye göre tutuşma sıcaklığı yüksektir ve bu nedenle yalıtım malzemesi olarak kullanılan biyokütlelere göre daha yüksek sıcaklıklarda alev almaktadır. Alev geciktirici özelliği sayesinde beton yapılarda kullanımı tercih edilebilir (Das, O., Sarmah, A. K. ve Bhattacharyya, D., 2016).

Biyokömürün bir diğer önemli özelliği de elektromanyetik radyasyonun etkili bir şekilde adsorbe edebilmesidir. Bir diğer deyişle, biyokömür ilaveli çimento harcı elektrosisi önlemede oldukça iyidir ve binalarda bu amaçla kullanımı araştırılmaktadır (Summa, D., Ruscica, G., Savi, P., Pelosato, R., Sora, I. N., 2021).

Biyokömürün betona eklenmesi, ısı yalıtım özelliklerinin iyileştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Biyokarbonun düşük ısı iletkenliği ve gözenekli yapısı sayesinde yapılarda oluşacak sıcaklık dalgalanmalarına engel olmaktadır (Aziz, M. A., Zubair, M. ve Saleem, M., 2021).

Biyokömür katkı olarak beton yapılara eklenmesi ile CO₂ emisyonlarını azaltmaya ve doğal kaynak tüketimini azaltmaya yardımcı olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca ve sürdürülebilir ve çevre dostu inşaat uygulamaları için yeni projelerde yer alabileceği düşünülmektedir (Pauzi, N. I. M., Musa, A. S. ve Radhi, M. S. M., 2020).

4. BETON

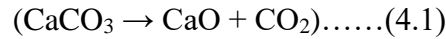
Beton en yaygın olarak kullanılan yapı malzemesi olarak bilinmektedir. Beton harcı içerisinde çimento, agrega, kum ve su bulunmaktadır. Ayrıca kullanım alanı ve istenilen özelliklere göre katkılar da eklenmektedir. Bu nedenle, beton harcı kompozit malzeme olarak da kabul edilmektedir. Beton harcı çimento, su, kum, agrega ve katkılarla sıvı formdan zamanla sertleşerek oluşmaktadır. Beton harcının en avantajlı tarafı ise istenilen son ürünün şeklini alabilmesidir (Scrivener, K. L., Juilland, P., ve Monteiro, P. J. M., 2015) (Ramachandran, 2001).

4.1. Çimento

En önemli yapı malzemesi olan çimento bir bağlayıcı maddedir. Ayrıca çimento, taş, tuğla, fayans gibi yapı malzemelerini yapıştırıcı olarak kullanılır. Çimentonun su ile karışmasıyla oluşan kimyasal reaksiyon sonucunda, yapı malzemeleri kullanılan kalıbın şeklini alarak sertleşmektedir. Çimentonun fiziksel özelliği katı toz formda ince taneli olmasıdır. Bu katı toz, kalsiyum olan kireç taşı, kil, boksit ve demir cevherinden oluşmaktadır (Erdoğan, 2021).

Çimento sertleşme türüne göre ikiye ayrılmaktadır. Bunlardan birincisi, su eklenmesiyle sertleşen hidrolik çimentodur. Diğeri ise karbonatlaşma ile sertleşen hidrolik olmayan çimentodur. Hidrolik olmayan çimento, havada bulunan karbonla sertleşir, bu nedenle su altında kullanılamaz. Hidrolik olmayan çimentoya kireç döngüsü denilmektedir ve aşağıdaki adımlarla üretilmektedir (Gani, 1997).

- Kalsinasyon: Kireç ürünü, yaklaşık on saat boyunca 800°C'nin üzerinde kireçtaşından dönüşümünden oluşur. Reaksiyon aşağıda gösterilmiştir;



- Söndürme: Sönmüş formda kireç yapmak için suyla kalsiyum oksit eklenmektedir ve aşağıdaki reaksiyon gerçekleşmektedir.



- Sertleşme: Sertleşme aşamasında su uzaklaşmaktadır.

- Yukarıdaki aşamalardan sonra çimento kuru hava ile muamele edilir.



Hidrolik çimento ise silikatlardan ve oksitlerden oluşmaktadır. Bu bileşenler çimento fabrikalarındaki fırınlarda işlenmektedir. Oluşan çoğu reaksiyon hala araştırma konusudur (Gani, 1997). Silikat ve oksitler;

- Belit ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$),
- Alit ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$),
- Trikalsiyum alüminat/ Selit ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) ve
- Kahverengi milleritten ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) oluşmaktadır (Gani, 1997).

4.2. Agrega

Agrega, katı toz olarak elde edilen metalik bileşen içermeyen minerallerin bir araya getirilmesiyle üretilmektedir. İnce ve kaba olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Agregalar için en önemli özellik yoğunluktur (Wu, H., Lin, X., ve Zhou, A., 2020).

4.3. Su

Suyun beton harcında görevi büyüktür ve bu görev beton harcı için kullanılan kimyasalların çimento ile reaksiyonunun gerçekleşmesini sağlamaktır. Bu reaksiyona hidrasyon denilmektedir ve betona işlenebilirlik sağlamaktadır. Fakat su miktarı betonu olumlu olduğu kadar olumsuz da etkilemektedir. Su oranı ne kadar düşük olursa daha yüksek mukavemet ve daha az geçirgenlik elde edilir (Azunna, S. U., Bakar, N. A. ve Nasir, N. A. M., 2022).

4.4. Katkılar

Katkı maddeleri genellikle beton harcının mekanik ve fiziksel özelliklerin geliştirilmesi için kullanılmaktadır. Kullanılan katkıların miktarları çok azdır. Beton harcının özelliklerini geliştirmek için birçok katkı türü vardır. Katkı maddeleri sıvı veya katı formdan oluşmaktadır (Gani, 1997).

Genel olarak katkı maddesi dayanıklılığı artırmak, beton özelliklerini geliştirmek ve betonun sertleşme sürecini kontrol etmek için kullanılmaktadır. İstenilen son ürüne bağlı olarak birçok işleve sahip olan katkıları, kimyasal ve mineral bazlıdır. Kimyasal katkı maddeleri ile inşaat maliyeti azaltabilirken mineral katkı maddeleri beton karışımında geçirgenliği azaltarak mukavemeti artırır ve diğer beton özelliklerini etkiler. Mineral katkı maddesi, hidrolik ve puzolanik aktivite ile sertleştirilmiş betonun doğasını etkiler. Puzolanlar çimento esaslı malzemelerdir. Mineral katkı maddeleri arasında doğal

puzolanlar, uçucu kül ve silika dumanı bulunur. Mineral katkı maddeleri, Portland çimentosu, harmanlanmış çimento ile tek tek veya kombinasyon halinde karıştırılır. Genel olarak, katkı maddeleri her birinin gerçekleştirdiği işleve göre sınıflandırılmaktadır (Jin, H., Cheng, L., Liu, J., Zhong, S., 2019).

4.4.1. Su azaltıcılar

Bu tür katkı maddeleri, karıştırma suyunun miktarını azaltmak için kullanılır. Belirli bir çökmeye sahip beton üretmek, su-çimento oranını düşürmek, çimento içeriğini azaltmak veya çökmeyi artırmak için gereklidir. Su azaltıcılar, takviye çeliğinin yüksek işlenebilirlik gerektirdiği daha büyük projelerde yaygın olarak kullanılır. Ayrıca, büyük miktarda su azaltımının yüksek mukavemet ve gelişmiş dayanıklılık sağladığı prekast ve şantiyede de kullanılır. Genellikle bir beton karışımı için gereken su içeriğini yaklaşık %5-10 oranında azaltmaktadır (Mardani-aghabaglou, A. ve İlhan, M., 2018).

4.4.2. Hızlandırıcı katkı maddeleri

Bu tür katkı maddeleri, çimento harcında hidrasyon hızını artırmak için kullanılır. Özellikle, hızlandırıcı katkı maddeleri, soğuk havalarda betonun mekanik özelliklerini değiştirmek için faydalıdır. Kalsiyum klorür (CaCl_2) kimyasalı, özellikle ek madde eklenmeyen beton için olan hızlandırıcı katkı maddelerinde yaygın olarak kullanılır (Polat, H. ve Özel, C., 2023).

4.4.3. Hava tutucular

Hava tutan katkı maddeleri, betona içerisine mikroskobik hava kabarcıklarının girmesi ve sabitlemesi için kullanılır. Bu tür katkı maddeleri özel yüzey aktif maddelere dayanmaktadır. Bu katkı maddelerinin çimento harcına eklenmesi, çapı $< 0,3$ mm olan küçük hava kabarcıklarının sabitlenmesini sağlamaktadır. Sabitlenmiş olan hava, betonun donmadan kaynaklı çatlamları engeller. Hava, bulamaçtaki kohezyonu artırır. Ayrıca, bu katkı maddeleri su içeriğini azaltmaktadır (Cheung, J., Roberts, L. ve Liu, J., 2018).

4.4.4. Korozyon önleyiciler

Korozyon önleyici katkı maddeleri, yapı malzemesi olarak köprüler, otopark yapıları ve deniz yapıları için kullanılır. Bu tür katkı maddelerinin bir diğer kullanım amacı, sudaki klor tuzlarına karşı direnç sağlamaktır. Klor beton yapısı içerisinde bulunan ve iskelet için kullanılan demir ve çelik malzemelerinin korozyonuna neden olmaktadır.

Bu katkı maddeleri, beton sertleştikten sonra uzun yıllar boyunca demir ve çeliğin paslanma riskini azaltmak azaltmaktadır (Aitcin, 2016).

4.4.5. Süperakışkanlaştırıcılar

Süperplastikleştiriciler, sülfonatlı naftalin, melamin formaldehit, vinil polimerleri ve polikarboksilat bazlı malzemeler gibi katkılardır. Bu katkı tür katkıları, çimento harcına eklenerek kürlenme sonrasında betona yüksek performans olarak değerlendirdiğimiz yüksek mukabemet, akışkanlık, esneklik gibi özellikler sağlamaktadır. Betona plastiklik özelliği vermesinin yanı sıra, %15-30 oranında su azaltması ile su azaltıcı görevi de üstlenmektedir (Chen Z., Qiao, J., Yang, X., Sun, Y., Sun, D., 2023).

4.4.6. Biyokömür

Son zamanlarda biyokömürün yapı malzemelerinde dolgu maddesi olarak kullanımı da mevcuttur. Dolgu maddesi olarak kullanılan biyokömürün amacı binalarda elektromanyetik radyasyon emilimidir. Bunun dışında dayanım ve mukavemet için de kullanılmaktadır. Bazı araştırmalarda ve yapılan uygulamalarda biyokömür içerikli betonun normal betona kıyasla dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir. Yapı malzemelerinde kireç olarak kullanımı da mevcuttur ve kullanılan biyokömürün yüksek pH ve su tutma özelliği sayesinde bina içerisindeki nemi stabilize edebileceği öngörülmektedir. Bunun yanı sıra gazları emdiği için koku ve dumanı hapsedme özelliğine sahiptir (Mensah, R. A., Wang, D., Shanmugam, V., Sas, G., Försth, M., Das, O., 2024).

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında, hammadde olarak kayın ağacı talaşı, Portland Çimento TS-EN 197-1 CEM1 42.5 R ve CEN Standard Kum kullanılmıştır. Yürütülen deneysel çalışmalar bu başlık altında özetlenmiş, detaylı bilgiler alt başlıklar halinde sunulmuştur.

Biyokarbon üretimi için ilk aşamada, biyokütle olarak kullanılan kayın ağacı talaşına, sabit yataklı MSE PYROLYSIS 850 reaktörü kullanılarak 550°C'de statik ortamda piroliz işlemi uygulanmıştır. Ardından ürün olarak alınan biyokömürü aktive etmek için fiziksel ve kimyasal aktivasyon olmak üzere iki farklı yöntem uygulanmıştır. Üretimi yapılan tüm biyokarbonların karakterizasyonundan sonra, beton döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Son olarak dökülen betonların analizleri yapılmıştır.

Piroliz işleminin ardından elde edilen biyokömüre elek analizi yapılarak 4 farklı parçacık boyutu seçilmiştir ($D_p < 112 \mu\text{m}$, $112 < D_p < 224 \mu\text{m}$, $425 < D_p < 625 \mu\text{m}$ ve $D_p > 1,8 \text{ mm}$). Bu partikül boyutlarına sahip biyokömür, çimentoya kütlece %1, 2 ve 5 olarak eklenerek 40 mm×40 mm×160 mm boyutuna sahip beton kalıplara dökülmüştür. Basınç ve eğilme testleri sonucunda uygun partikül boyutu ve uygun kütlece oran belirlenmiştir. Ayrıca referans numune olması için biyokömürsüz döküm yapılmıştır. 7 gün sonunda eğilme ve basınç testleri yapılmıştır.

Öğütme ve betona uygulanan testlerin ardından biyokömüre ($D_p < 112 \mu\text{m}$) fiziksel ve kimyasal aktivasyon yapılarak üç farklı biyokarbon elde edilmiştir. Yaklaşık 300 cm³/dk N₂ akış hızı ve 10°C/dk ısıtma hızıyla 700°C'de su buharı eşliğinde 60 dakika bekletilerek fiziksel aktivasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Biyokömürün kimyasal aktivasyonu için, ilk olarak 0,5/1 oranında potasyum hidroksit katısı saf su ortamında çözdürülerek biyokömürün üzerine eklenerek karıştırılmalı ısıtıcı yardımıyla emdirme işlemi yapılmıştır. Bu işlemin ardından 1 gün boyunca bekletilerek yaşlandırma işlemi yapılmıştır. Son olarak 300 cm³/dk N₂ akış hızı ve 10°C/dk ısıtma hızıyla 700°C'ye getirilerek 60 dakika bu sıcaklıkta bekletilmiştir.

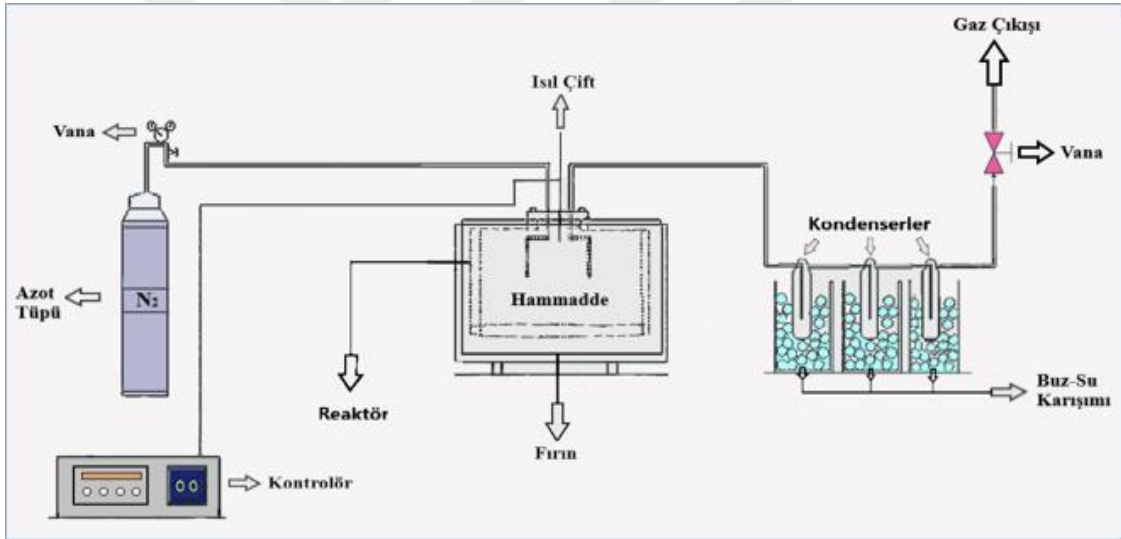
Üretilen biyokarbonlar farklı oranlarda (%0,5, %1 ve %1,5) çimento karışımına eklenerek 28 gün kürlenme süresine bırakılmıştır. Kürlenme süresi sonunda eğilme ve basma testlerine tabî tutulmuştur. Bu tez çalışmasında son olarak farklı biyokarbon içeriğine sahip betonların ses dağılım hızı ve ısı iletkenlik katsayı analizleri yapılmıştır.

5.1. Kayın Ağacı Talaşına Uygulanan Analizler

Bu çalışma kapsamında Eskişehir bölgesinde bulunan bir mobilya fabrikasından kayın ağacı talaşı temin edilmiştir. Ham madde olarak kullanılan kayın ağacı talaşının ısıl bozunma davranışı termogravimetrik analiz Setaram, Labsys Evo ile incelenmiştir. Ayrıca, yüzey yapısını incelemek amacıyla elektron taramalı mikroskobu (SEM) görüntüleri FEI QUANTA FEG 250 ile alınmıştır.

5.2. Kayın Ağacı Talaşına Uygulanan Piroliz Deneyleri

Biyokömür üretiminde kullanılan piroliz deney düzeneği Görsel 5.1.'de verilmiştir. MSE PYROLYSIS 850 reaktör setinde, kontrol paneli kullanılarak ısıtma hızı ve son sıcaklık ayarlanabilmektedir. Reaktör haznesi yüksek sıcaklığa dayanıklı paslanmaz çelikten üretilmiştir. Piroliz sırasında oluşan uçucular, yoğuşma ünitesi sayesinde trap adı verilen haznelerde toplanmaktadır ve katı ürün piroliz reaktöründen alınmaktadır.



Görsel 5.1. Piroliz deney düzeneği

Piroliz deneylerinde reaktöre yaklaşık 80 ± 2 gram kayınağacı beslemesi yapılarak ortalama %23-25 verim ile biyokömür üretilmiştir. Tüm piroliz deneylerinde statik ortamda sıcaklık 550°C ısıtma hızı $10^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ 'ya ayarlanmıştır. Termokimyasal piroliz deneyleri sonucunda elde edilen katı biyokömür partikül boyutlarına göre ayrıştırılmıştır. Görsel 5.2.'de laboratuvar ortamında üretilen biyokömür görseli verilmiştir.



Görsel 5.2. *Laboratuvar ortamında üretilen biyokömür*

5.3. Biyokömüre Uygulanan Analizler

Kayın ağacı talaşının pirolizi sonucunda elde edilen biyokömüre termogravimetrik analiz (TGA), BET yüzey alanı, yığın yoğunluk analizi, FT-IR, XRD, SEM ve Raman Spektroskopisi analizleri yapılmıştır.

5.3.1. Biyokömür aktivasyonu

Kayın ağacı talaşına uygulanan piroliz deneyleri sonrasında üretilen $D_p < 112 \mu\text{m}$ parçacık boyutunda biyokömüre iki farklı aktifleştirme yöntemi uygulanmıştır. İlk olarak su buharı altında fiziksel aktivasyon ve sonrasında KOH muamele edilerek kimyasal aktivasyon yapılmıştır.

Biyokömür aktivasyonu sonun elde edilen biyokarbonlara TGA, BET yüzey alanı, FT-IR, XRD, SEM ve Raman Spektroskopisi analizi yapılmıştır.

5.3.1.1. Fiziksel aktivasyon

Fiziksel aktifleştirme için biyokömür, 700°C sıcaklıkta $10^\circ\text{C}/\text{dk}$ ısıtma hızı uygulanarak 60 dk su buharı altında tutulmuştur.

5.3.1.2. Kimyasal aktivasyon

Kimyasal aktivasyon işleminde inert gaz olarak kullanılan azot gazı akış hızı 300 cm³/dk olarak ayarlanmıştır.

Kimyasal aktifleştirme için ilk olarak 1:0,5 oranında biyokömür potasyum hidroksit numunesi hazırlanmıştır. 24 saat bekleme süresi sonunda numune saf su ile pH 7 olana kadar yıkanmıştır ve sonrasında 24 saat kuruması için 110°C etüvde bekletilmiştir. Son olarak 700°C sıcaklıkta 10°C/dk ısıtma hızı uygulanarak 60 dk bekletilmiştir.

5.3.2. Helyum piknometresi ve yığın yoğunluk analizi

Biyokarbonların gerçek yoğunluklarını ölçmek için Quantachrome Ultrapyc 1200E gaz piknometresi kullanılmıştır. Yığın yoğunluk, toz veya partikül halde bulunan malzemelerin boşluk hacim de dahil olmak üzere hacmin kütlesi olarak tanımlanabilir. Biyokarbonların yığın yoğunluğunu hesaplayabilmek için hacmi bilinen kap içerisine alınarak kütle ve hacim değerleri kaydedilmiştir. Yoğunluk formülü (kütle/hacim) kullanılarak yığın yoğunluklar hesaplanmıştır. En az beş tekrarla yapılan deneylerde standart sapma belirlenmiştir.

5.3.3. Termogravimetrik analiz (TGA)

Biyokarbonların ısıl dayanımı ve yüksek sıcaklıklarda bozunma davranışının belirlenmesi için termogravimetrik analiz gerçekleştirilmiştir.

TGA'nın amacı, artan sıcaklık ile kütle kaybındaki değişimlerin sıcaklık ve zaman fonksiyonu olarak değerlendirmektir. Analiz sonucunda elde edilen kütle-sıcaklık eğrilerine termogram denilmektedir. Termogram eğrileri bileşen kütlesinin sıcaklığa bağlı ısıl bozunmasını göstermektedir. (Menczel, 2009)

Biyokarbonlara uygulanan termogravimetrik analizde 10 ± 0,1 mg tartılan örnek 25°C'den 1000°C'ye 10°C/dk ısıtma hızıyla N₂ ortamında ısıtılmıştır.

5.3.4. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR)

Biyokarbon örneklerinin fonksiyonel gruplarını belirlemek amacıyla FT-IR analizi yapılmıştır. Üretilen biyokarbonların FTIR spektrumları Thermo Fisher Scientific-Nicolet™ iS™ 10 marka ve model FTIR cihazı ile 4000-500 cm⁻¹ alınmıştır. Analiz için biyokarbon %1 ve KBr %99 oranlarında karıştırılarak peletler hazırlanmıştır.

5.3.5. Yüzey alanının belirlenmesi

Elde edilen biyokarbonlara BET yüzey alanı analizi yapılmıştır. Analiz için Anadolu Üniversitesi BİBAM laboratuvarlarında bulunan, gaz adsorpsiyonu analizine dayanan sisteme sahip Micromeritics marka TriStar II 3020 model cihazı kullanılmıştır.

77 K'de gerçekleştirilen N₂ adsorpsiyonunda önce örnekler 150°C'de degaz işlemine tabi tutularak gözeneklerin açılması sağlanmıştır. Analiz verileri ile Brunauer Emmett Teller (BET) eşitliği kullanılarak yüzey alanı (m²/g) hesaplanmıştır.

5.3.6. SEM analizleri

Biyokarbonların yüzey yapısındaki değişimler ve bu değişimlerin farklılıklarının kıyaslanması için taramalı elektron mikroskopu görüntüleri alınmıştır. Biyokarbon örnekleri analizi için FEI QUANTA FEG 250 cihazı kullanılmış olup, yüzey morfolojisi analiz edilmiştir.

5.3.7. XRD analizi

Biyokarbonların XRD analizleri Rigaku X-Ray Diffractometer XRD cihazı kullanılarak tamamlanmıştır. 2θ=5 ile 60° arasındaki 2°/dk tarama hızıyla biyokarbon örneklerinin XRD profilleri alınmıştır.

5.3.8. Raman analizi

Biyokarbonların yapısı ve özelliklerini analiz etmek için Raman analizi uygulanmıştır. Analiz için Thermo Scientific DXR Raman Microscope 532 cihazı kullanılmıştır.

5.4. Harç Örneklerinin Hazırlaması

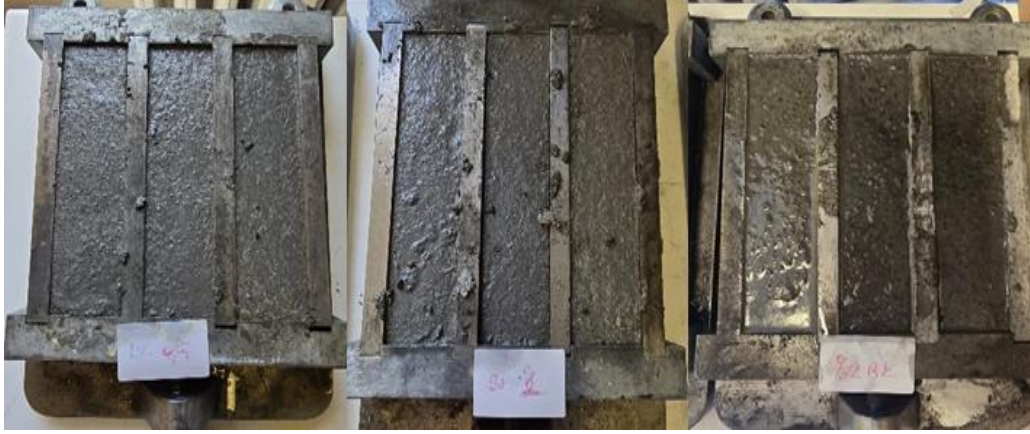
Harç örnekleri hazırlanırken her bir örneğin aynı koşullarda dökülmesi için yayılma tablası kullanılmıştır. Her bir harç için 140x140x160 mm kalıplara, 450 g TS-EN 197-1 CEM1 çimento ve 1300 ± 5 g CEN Standart Kum kullanılmıştır. Referans ve biyokarbon içeren betonların akışkanlıkları sabit tutulmuştur. Tablo 5.1.'de gösterildiği üzere harç örneklerinin yayılma tablası üzerindeki ölçümleri 15-16 cm aralığında tutulmuş olup, her bir çimento harcının yayılmasının aynı olması için kullanılan su miktarları verilmiştir.

Tablo 5.1. Harç numuneleri için kullanılan su miktarı ve yayılmaları

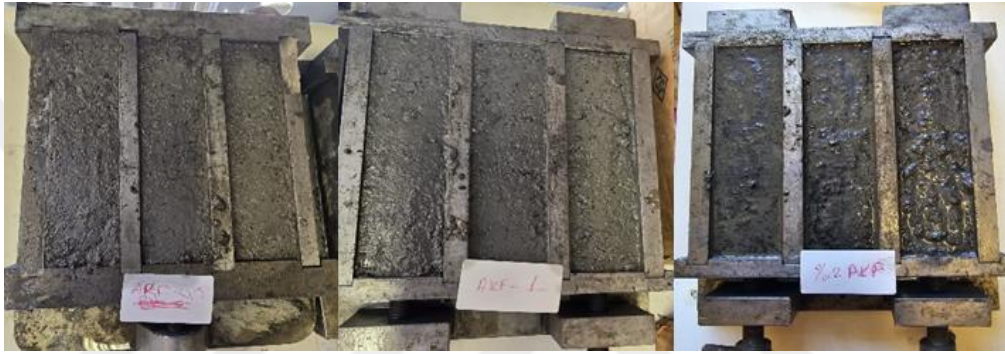
Örnek	Tüketilen Su Miktarı (mL)	Ortalama Yayılma (cm)
Referans	225	15,5
% 0,5 BK	245	15,8
% 1 BK	250	15,2
% 2 BK	250	15,3
% 0,5 AKF	255	15,4
% 1 AKF	260	15,6
% 2 AKF	265	15,5
% 0,5 AKK	245	15,4
% 1 AKK	255	15,7
% 2 AKK	270	15,6

Bu aşamada ilk olarak, üretilen biyokömürlerin farklı parçacık boyutlarında çimento harcına eklenmesinin ardından 7 gün kürlenme süresinden sonra basınç ve eğilme testleri yapılmıştır. Yapılan testler referans numune ile karşılaştırılmıştır.

Belirlenen farklı oranlarda (%0,5; 1 ve 2) ve seçilen $D_p < 112 \mu\text{m}$ parçacık boyutunda biyokarbon örnekleri çimento harcına eklenmiştir. Görsel 5.3./4. ve 5.'de kütlece %0,5; 1 ve 2 olarak sırasıyla biyokömür (BK), fiziksel aktivasyon ile elde edilen biyokarbon (AKF) ve kimyasal aktivasyon ile elde edilen biyokarbon (AKK) çimento harçları gösterilmiştir.



Görsel 5.3. %0,5; 1 ve 2 oranlarında BK eklenmiş harç örnekleri



Görsel 5.4. %0,5; 1 ve 2 oranlarında AKF eklenmiş harç örnekleri



Görsel 5.5. %0,5; 1 ve 2 oranlarında AKK eklenmiş harç örnekleri

5.5. Harç Örneklerine Uygulanan Analizler

Farklı parçacık boyutuna sahip ($D_p < 112 \mu\text{m}$, $112 < D_p < 224 \mu\text{m}$, $425 < D_p < 625 \mu\text{m}$ ve $D_p > 1,8 \text{ mm}$) biyokömür örneği kütlece %2 oranında çimento harcına eklenmiştir. 7 günlük kürlenme sonrasında harç örneklerine eğilme ve basınç testleri yapılmıştır.

$D_p < 112 \mu\text{m}$ parçacık boyutuna sahip biyokömür örneğinin karakterizasyonunun ardından, biyokarbon katkı oranının çimento özelliklerine etkisini belirlemek amacıyla kütlece %0,5, 1 ve 2 oranlarında biyokarbon harca eklenerek, kürlenmesinin tamamlanması için 28 gün oda koşullarında su banyosunda bekletilmiştir. Kürlenme

sonunda harç örneklerine eğilme-basınç, ses yayılma hızı ve ısı iletkenlik katsayı analizleri yapılmıştır.

5.5.1. Basınç ve eğilme dayanım testleri

Biyokarbon içeren harç örnekleri için Çimento Eğilme Basma Dayanım Test Cihazı (Baz Makine) düzeneğinde testler basınç için 200 kN (20 ton) ve eğilme için 20 kN (2 ton) olarak uygulanmıştır. Bu testler sonucunda elde edilen veriler TS-EN 197-1 CEM3 42.5R standardı ile kıyaslanmıştır. Standard dayanım verileri Tablo 5.2.'de verilmiştir.

Tablo 5.2. TS-EN 197-1 beton dayanım sınıfları

Dayanım Sınıfı	Basınç Dayanımı (N/mm ²)		
	2G	7G	28G
32.5	-	≥ 16	≥ 32.5, ≤ 52.5
32.5R	≥ 10	-	≥ 32.5, ≤ 52.5
42.5	≥ 10	-	≥ 42.5, ≤ 62.5
42.5R	≥ 20	-	≥ 42.5, ≤ 62.5
52.5	≥ 20	-	≥ 52.5
52.5R	≥ 30	-	≥ 52.5

5.5.2. Ses dağılma süresi ve hızı testi

Biyokarbon içeren harç örneklerine ses yalıtım performanslarının belirlenmesi için ses iletim hızı analizi uygulanmıştır. Ses dalgaları bir yapının içerisinde bulunan katı taneciklerin titreşimi ile yayılmaktadır. Eğer bir yapı içerisinde boşluk ve gözeneklilik var ise ses dalgasının yayılma süresi artmakta ve buna bağlı olarak ses dalga hızı azalmaktadır. Böylelikle malzemenin yalıtım performansı artmaktadır. Analiz için 54 kHz'lik iki transdüserle sahip Proceq Ultrasonik Test Cihazı kullanılmıştır.

140x140x160 mm boyutlarında hazırlanan harç örneklerine iki kenarından uygulanan alıcı ve verici sensör yardımıyla ses dalgasının ortam içinde yayılma hızı ve süresi ölçülmüştür.

5.5.3. Isıl iletkenlik katsayısı testi

Biyokarbon içeren harç örneklerinin ısı yalıtım performanslarının belirlenmesi için Seramik Araştırma Merkezi'nde (SAM) bulunan C-THERM cihazı kullanılmış olup, ısı iletkenlik katsayısı belirlenmiştir.

6. DENEYSSEL VERİLERDEN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Bu kısımda, deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlara başlıklar halinde yer verilmiştir. İlk olarak hazırlanan biyokarbonların gerçek ve yığın yoğunluklar karşılaştırılmıştır. Sonraki aşamada, ısıl bozunma davranışlarını karşılaştırmak için TGA ve fonksiyonel grupları belirlemek için FT-IR analizleri yapılmıştır. Elde edilen üç farklı biyokarbonun karakteristik özelliklerini belirlemek için XRD, SEM, Raman Spektroskopisi, BET yüzey analiz tayini yapılmıştır.

Son aşama olarak belirlenen oran ve partikül boyutunun çimento harcına ilavesi ile basınç, eğilme, ses yayılma ve ısıl iletkenlik analizleri yapılmıştır.

6.1. Helyum Piknometresi ve Yığın Yoğunluk Analizleri

Yapılan helyum piknometresi deneyi sonucunda biyokarbonlar için elde edilen değerler Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1. *Biyokarbon örneklerinin gerçek ve yığın yoğunluğu*

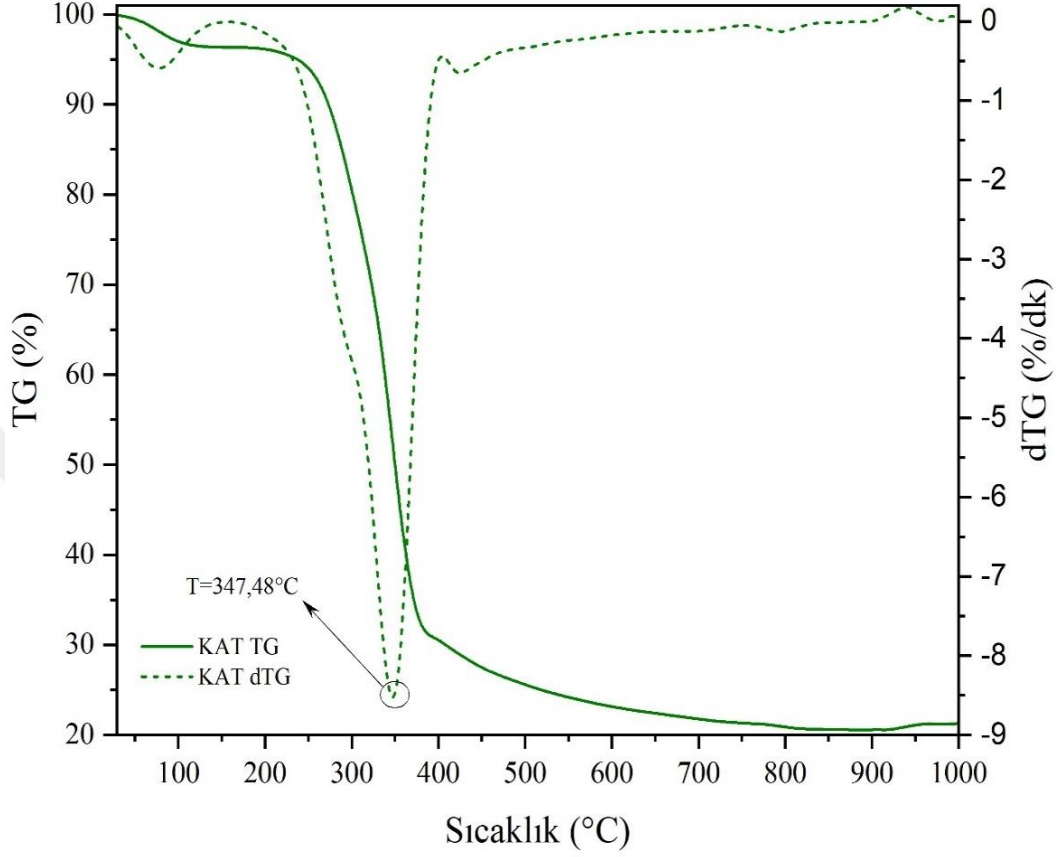
Örnek	Gerçek Yoğunluk (g/cm ³)	Yığın Yoğunluk (g/cm ³)
BK	1,4623 ± 0,0003	0,3893 ± 0,0249
AKF	1,8024 ± 0,0014	0,3214 ± 0,0101
AKK	2,2403 ± 0,0078	0,3184 ± 0,0129

Biyokömüre uygulanan aktivasyon işlemleri sonucunda gerçek yoğunlukların arttığı, yığın yoğunluğun azaldığı gözlemlenmiştir. Fiziksel ve kimyasal aktifleştirme işlemi sonrasında biyokarbon örneklerinin biyokömüre kıyasla gerçek yoğunluğunun artmasının sebebi, gözenek yapısının artışına bağlı olarak birim hacme düşen kütle artmasıdır.

6.2. Termogravimetrik Analiz Sonuçları

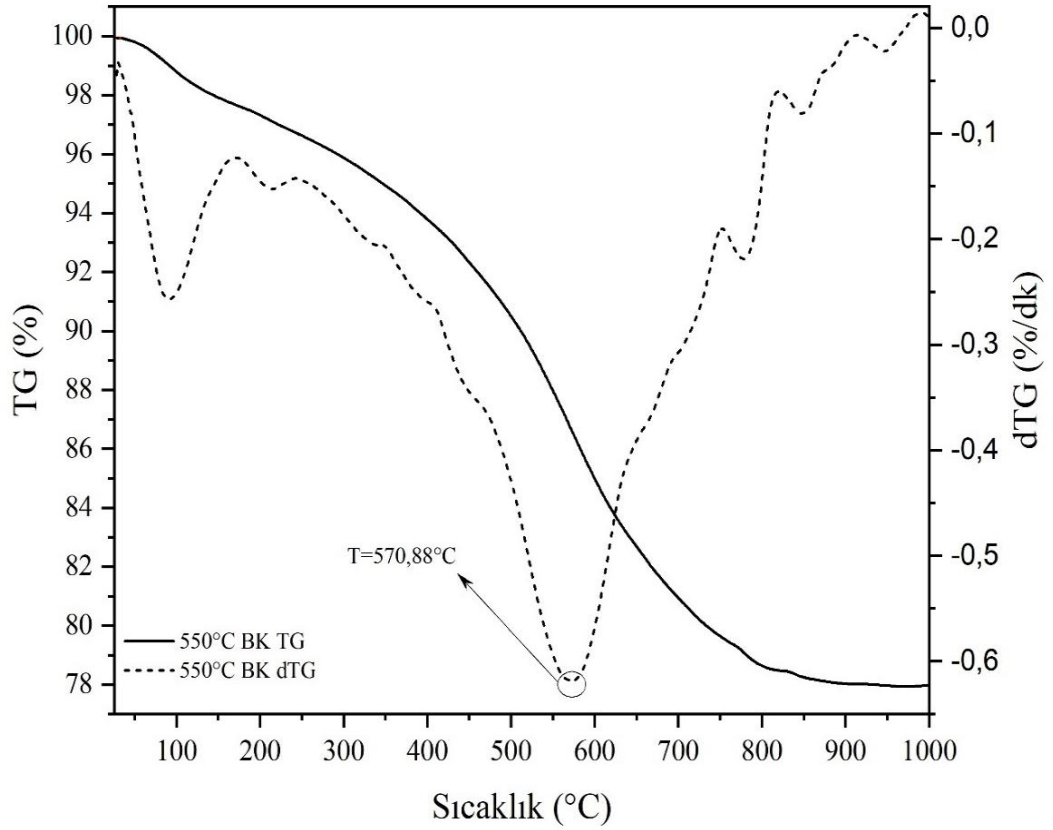
İlk aşamada hammaddenin ısıl bozulma eğrisinin oluşturulması için termogravimetrik analiz (TGA) gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.1’de kayın ağacı talaşı (KAT) hammaddesine ait sıcaklığın fonksiyonu olarak kütle kaybı gösterilmiştir. Isıl bozunma eğrisinde ilk kütle kaybının hammadde bünyesinde bulunan nemden kaynaklandığı görülmektedir ve hammaddenin sahip olduğu nem yaklaşık 145°C’de tamamen uzaklaşmıştır. KAT için en yüksek bozunma hızının gerçekleştiği sıcaklık dTG

eğrisinden 347°C olarak okunmuştur. Isıl bozunma 530°C’de tamamlanmış olup, 1000°C’de toplam kütle kaybı %79,30 olarak belirlenmiştir.



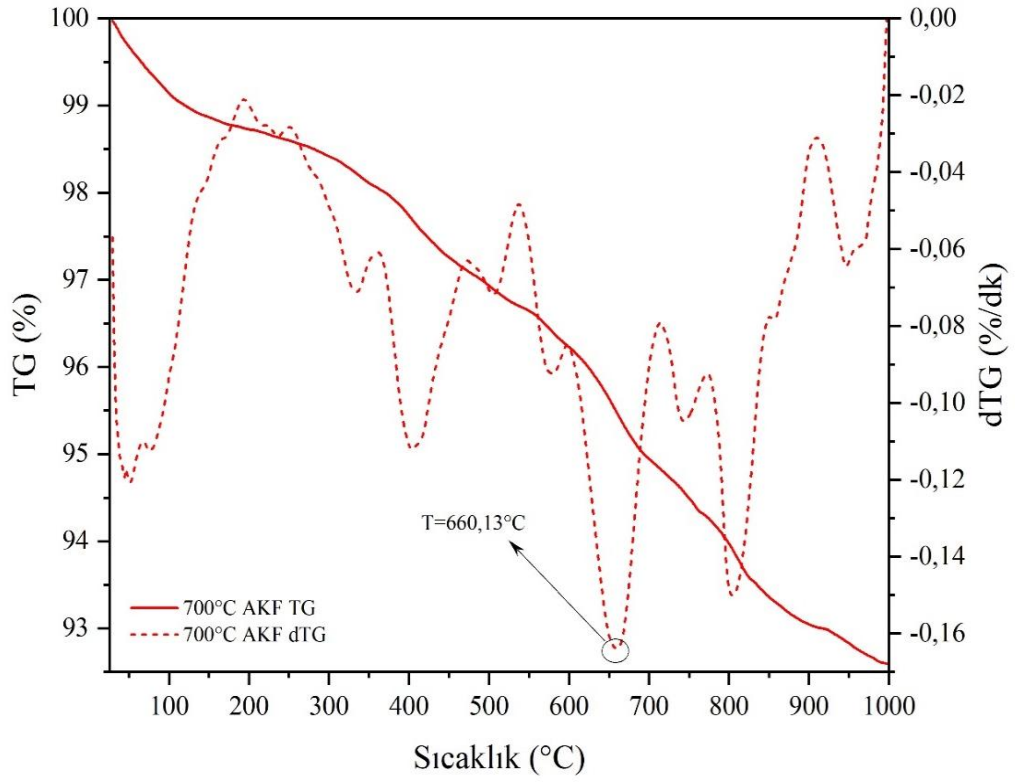
Şekil 6.1. Kayın ağacı talaşı (KAT) TG/dTG eğrisi

Şekil 6.2’de hammaddenin pirolizi sonucunda üretilen biyokömüre aynı koşullarda koşulda uygulanan TGA eğrisi verilmiştir. İlk kütle kaybı olan nemin tamamen uzaklaşması yaklaşık olarak 165°C’de gerçekleşmiştir. Maksimum kütle kaybının ise 570°C’de olduğu dTG eğrisinde gözlemlenmiştir. Toplam kütle kaybı %21,85 olarak hesaplanmıştır. Piroliz işlemi sırasında uçucuların uzaklaştırılması nedeniyle geriye kalan kalıntı, biyokömür, daha stabil hal almıştır. Bu nedenle en fazla kütle kaybı 300-800°C’ye arasında gerçekleşmiştir. Kütle kaybının tamamlanması ise hammaddede 470°C civarında gerçekleşirken, biyokömürde 800°C’ye kadar devam etmiştir. Uzaklaşan nem dışında, toplam kütle kaybı yaklaşık %17’dir ve biyokömürde hala uçucu bileşenlerin yer aldığı görülmektedir.

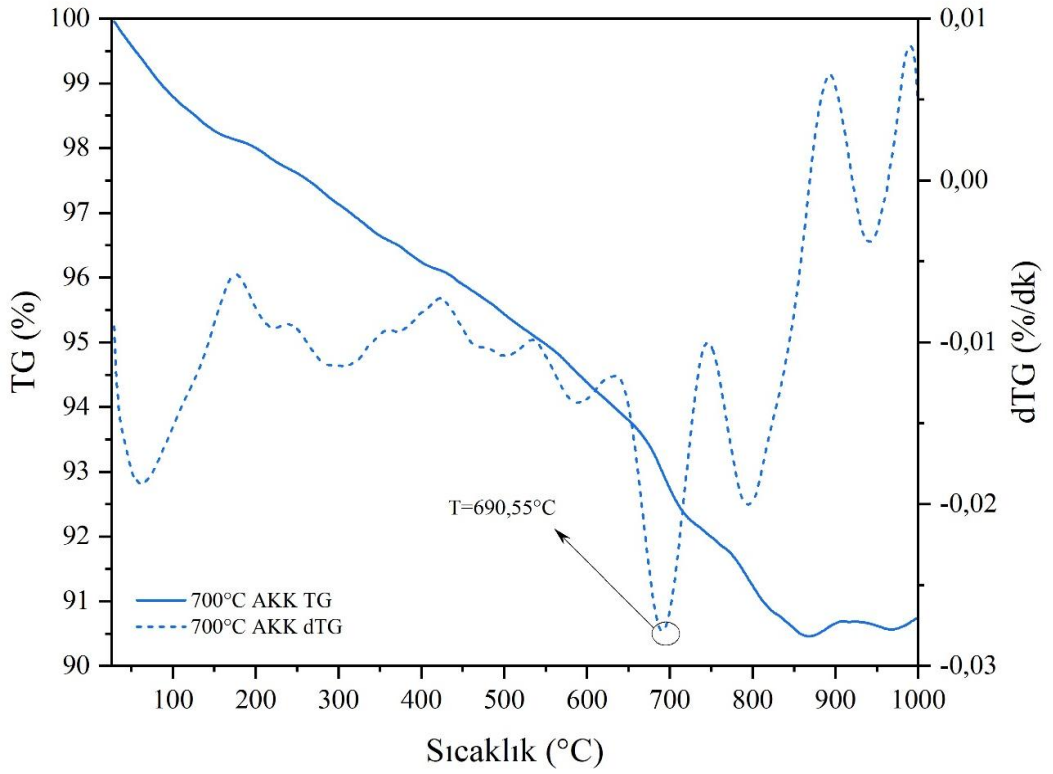


Şekil 6.2. *Biyokömür (BK) TG/dTG eğrisi*

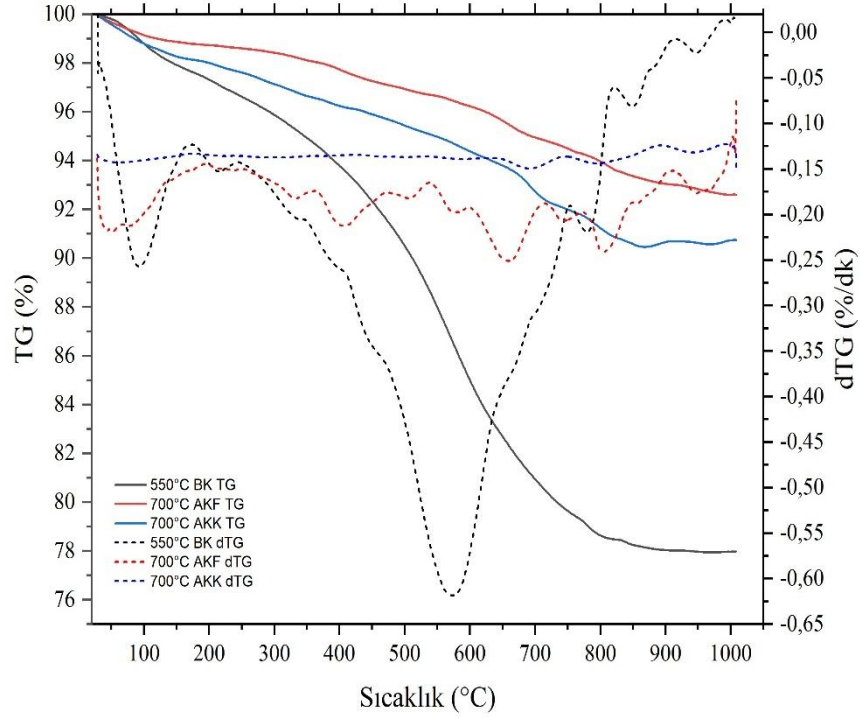
Biyokömürün fiziksel ve kimyasal aktivasyonu sonucunda üretilen biyokarbonlara uygulanan termogravimetrik analiz işlemi sonrası oluşturulan ısıl bozunma eğrileri sırasıyla Şekil 6.3. ve Şekil 6.4.'te verilmiştir. Fiziksel aktivasyon yöntemi ile hazırlanan biyokarbon (AKF) eğrisinde ilk kütle kaybı olan nemin tamamı 153°C'de uzaklaşmıştır. Maksimum kütle kaybına ulaşılan sıcaklık ise 660°C'dir. 910°C'ye kadar süren kütle kaybında toplamda yaklaşık olarak %7,4'lük bir azalma gerçekleşmiştir. Kimyasal aktivasyon yöntemi ile hazırlanan biyokarbon (AKK) eğrisinde ise nemin tamamı 177°C uzaklaştırılmış olup, maksimum kütle kaybının gözlemlendiği sıcaklık yaklaşık 691°C'dir. Burada da toplam kütle kaybı %9,5 olarak gerçekleşmiştir. Elde edilen biyokarbon örneklerinin TG/dTG eğrileri karşılaştırmalı olarak Şekil 6.5.'de gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Fiziksel aktivasyon ile hazırlanan biyokarbon (AKF) TG/dTG eğrisi



Şekil 6.4. Kimyasal aktivasyon ile hazırlanan biyokarbon (AKK) TG/dTG eğrisi



Şekil 6.5. *Biyokömür (BK), fiziksel aktivasyon ile hazırlanan biyokarbon (AKF) ve kimyasal aktivasyon ile hazırlanan biyokarbon (AKK) TG/dTG eğrileri*

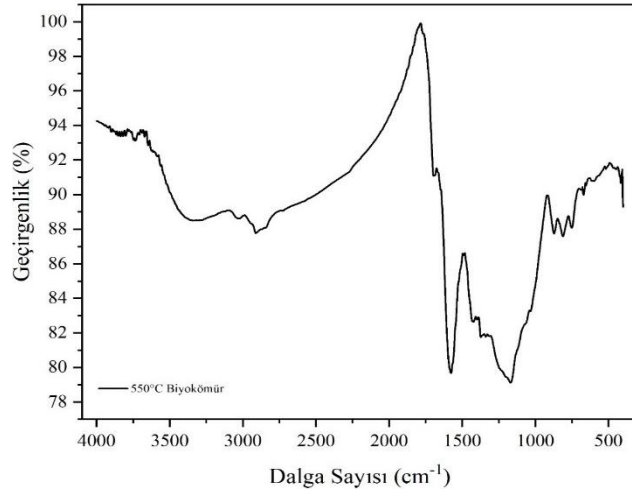
Son olarak, hammadde ve üretilen biyokarbonların TG eğrilerinden yararlanılarak Tablo 6.2.'de kütle kayıpları ve sıcaklık aralıkları verilmiştir. Piroliz süresince ham maddenin sahip olduğu uçucu bileşenlerin uzaklaştırılarak ısıl dayanımı yüksek biyokömür elde edildiği gerek kütle kayıplarından gerekse bu kayıpların gerçekleştiği sıcaklık aralıklarının ötelenmesinden anlaşılmaktadır. Aktivasyon işlemi sırasında uygulanan ikinci ısıtma işlemi sonrasında elde edilen biyokarbonların (AKF ve AKK) toplam kütle kayıplarının %7-10 aralığında olması ısıl dayanımlarının biyokömüre göre daha iyi olduğunu göstermektedir.

Tablo 6.2. Ham madde ve biyokarbonların termogravimetrik analiz sonuçları

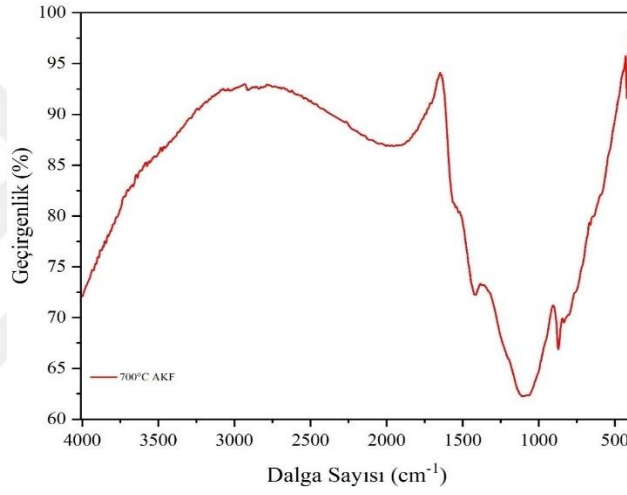
Örnek	1. Basamak		2. Basamak		Toplam
	Sıcaklık Aralığı (°C)	Kütle Kaybı (%)	Sıcaklık Aralığı (°C)	Kütle Kaybı (%)	Kütle Kaybı (%)
KAT	28-145	3,05	175-530	76,25	79,3
BK	28-165	2,50	165-880	19,47	21,85
AKF	28-153	1,12	153-910	6,27	7,39
AKK	28-174	1,87	174-870	7,67	9,54

6.3. Fourier Transform Infrared Spektrofotometre (FTIR) Sonuçları

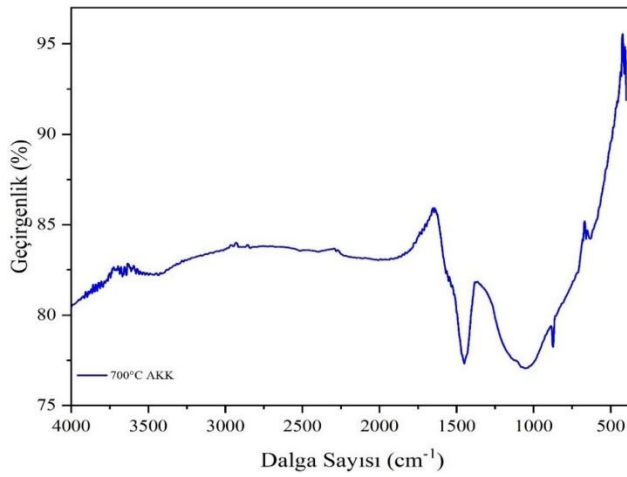
Biyokömür (BK), fiziksel yöntem ile aktive edilen biyokarbon (AKF) ve kimyasal yöntem ile aktive edilen biyokarbon (AKK) fonksiyonel gruplarını belirlemek için FT-IR kullanılmıştır ve sırasıyla Şekil 6.6, Şekil 6.7. ve Şekil 6.8.'de FT-IR spektrumları verilmiştir. Ayrıca Tablo 6.3.'de biyokarbonlara ait fonksiyonel gruplar verilmiştir. BK örneğinde, 3000-2800 cm^{-1} aralığında görülen C-H titreşimler alifatik ve olafinik fonksiyonel grupların varlığını göstermektedir. 1750-1600 cm^{-1} dalga sayısı aralığında görülen pikler olefinik C=C ve C=O titreşimleri aldehit ve keton gibi fonksiyonel gruplara işaret etmektedir. Biyokömürden elde edilen biyokarbon örneklerinden fonksiyonel grupların ayrıldığı ve karbon yapıya sahip oldukları gözlemlenmiştir.



Şekil 6.6. *Biyokömür (BK) FT-IR spektrumu*



Şekil 6.7. *Fiziksel aktivasyon ile elde edilen biyokarbon (AKF) FT-IR spektrumu*



Şekil 6.8. *Kimyasal aktivasyon ile elde edilen biyokarbon (AKK) FT-IR spektrumu*

Tablo 6.3. *Biyokarbon örneklerinin FT-IR fonksiyonel grupları ve karşılık gelen dalga sayıları*

FONKSİYONEL GRUP	DALGA SAYISI (cm ⁻¹)	ÖRNEKLER		
		BK	AKF	AKK
O-H gerilim titreşimleri	3450-3250	3400	-	-
C-H titreşimleri, CH ₃ ve CH ₂ gruplarının simetrik C-H titreşimleri	3000-2800	2950	-	-
Ketonun karbonil titreşim bandı	1730-1680	1685	-	-
Alken gerilim titreşim bandı (C=C)	1700-1400	1577	1450	1490
Alifatik CH ₂ gruplarının makaslama titreşim bandı	1485-1460	1473	-	-
Alifatik CH ₃ gruplarının simetrik C-H bükülme titreşim bandı	1390-1370	1377	-	-
C-O gerilim titreşim bandı	1270-1240	1200	-	-
Karbonil gruplarının bükülme titreşim bandı	1170-1100	-	1150	1110

6.4. BET Yüzey Alan Tayini Sonuçları

Tablo 6.4.'de biyokarbonlara ait BET yüzey alanları verilmiştir. Kaynağacı talaşının 550°C piroliz sonucunda üretilen biyokömürün yüzey alanı 4,2 m²/g olarak ölçülmüştür. Biyokömürün 700°C'de fiziksel ve kimyasal aktivasyonu sonucunda üretilen biyokarbonların yüzey alanları sırasıyla 97,8 ve 490,9 m²/g olarak ölçülmüştür. Ticari aktif karbonların yüzey alanı 400-1000 m²/g aralığındadır (Küçükgül, 2004). Kimyasal aktivasyon yöntemi ile üretilen biyokarbon (AKK) BET yüzey alanının ticari aktif karbonların yüzey alanına yaklaştığı gözlemlenmiştir.

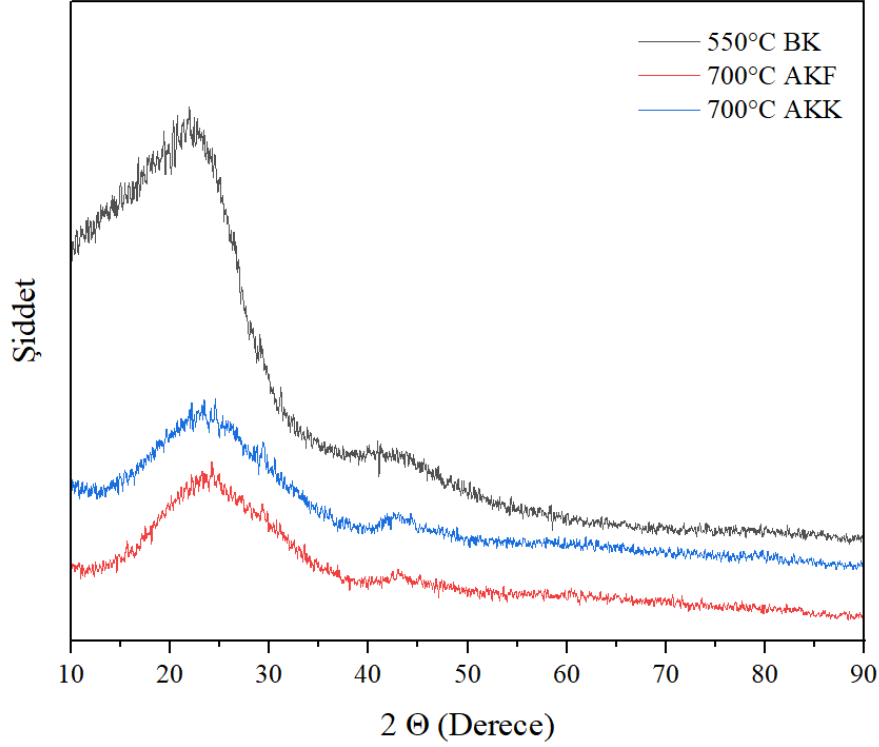
Tablo 6.4. *Biyokarbon örneklerine ait BET yüzey alanı sonuçları*

Örnek	Yüzey Alanı (m ² /g)
BK	4,2
AKF	97,8
AKK	490,9

6.5. X-Işını Difraktometresi (XRD) Analiz Sonuçları

Şekil 6.9.'da, üç biyokarbon örneğine (BK, AKF ve AKK) ait XRD profilleri verilmiştir. Biyokarbonların difraksiyon modellerine bakıldığında yüksek şiddete sahip pik yaklaşık olarak 24°'de görülmüştür ve bu derecede karbonun amorf yapısının varlığı kanıtlanmıştır. Kayın ağacı talaşından 550°C'de elde edilen biyokömürün ve elde edilen

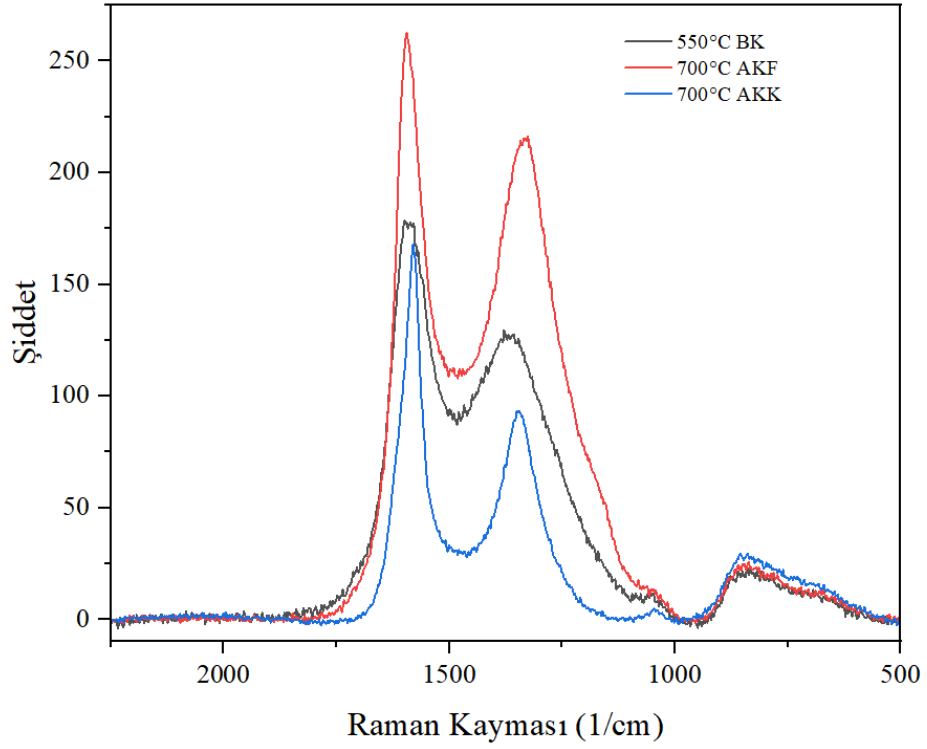
biyokömürün aktifleştirilmesi sonucunda elde edilen biyokarbonların XRD piklerine bakıldığında zayıf kristalin yapı ve karbon bakımından zengin bir faza sahip amorf yapı olduğu görülmektedir.



Şekil 6.9. Biyokarbon örneklerinin (BK, AKF ve AKK) XRD profilleri

6.6. Raman Spektroskopisi Analiz Sonuçları

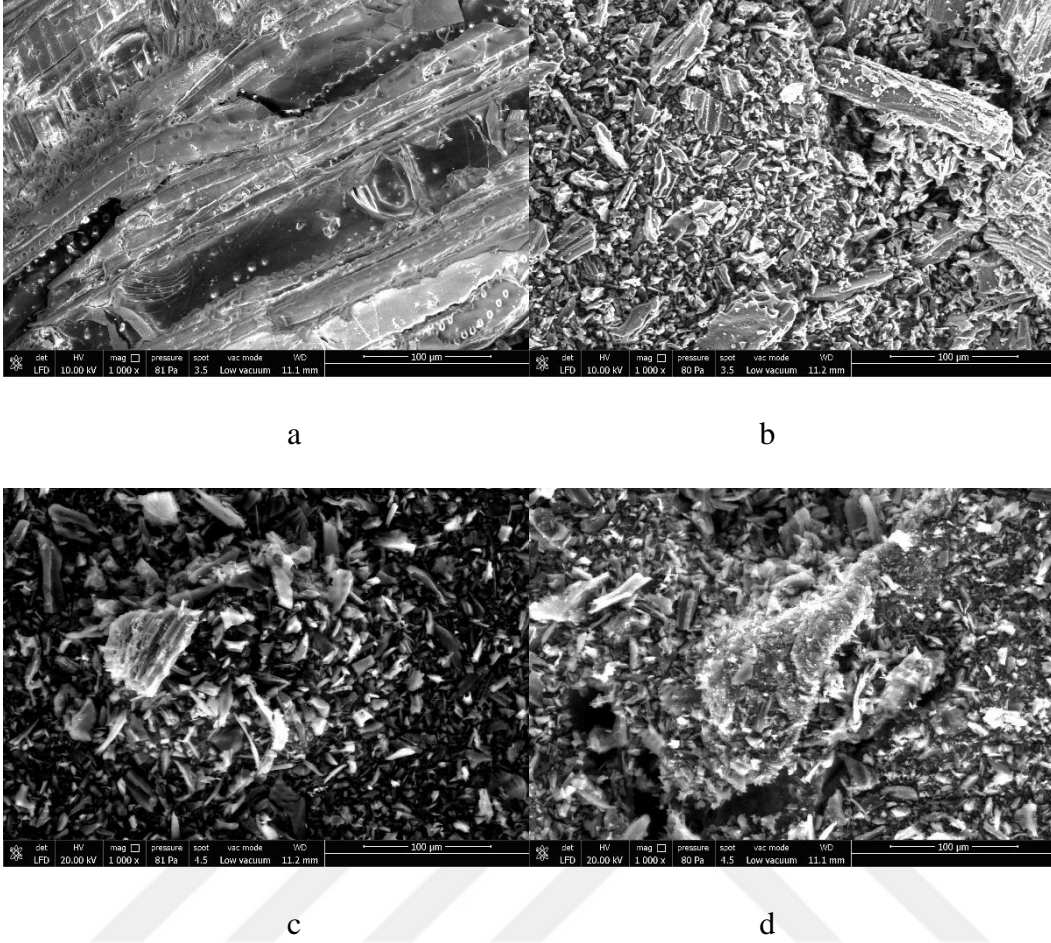
Biyokarbon örneklerine uygulanan Raman Spektroskopisi analizi sonucunda üç biyokarbonun da yaklaşık olarak raman kayma değerlerinin birbirine yakın olduğu saptanmıştır (Şekil 6.10.). Analiz sonucunda D ve G bantları belirgin olarak gözlemlenmiştir. Üç biyokarbon için karbon atomunun sp^2 çiftlerinin bağ hareketi G bandında yaklaşık olarak 1590 cm^{-1} 'de gözlemlenmiş olup (grafitik sp^2 karbonun titreşimlerinden $1580\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$), amorf yapıdaki düzensiz karbon titreşimlerinin bulunduğu D bandı 1330 cm^{-1} 'de gözlemlenmiştir.



Şekil 6.10. Biyokarbonların (BK, AKF ve AKK) raman spektrumları

6.7. SEM Görüntü Analiz Sonucu

Kayın ağacı talaşı ve hazırlanan biyokarbonların SEM görüntüleri Şekil 6.11.'de verilmiştir. Görüntüler analiz edildiğinde kimyasal yöntem ile aktive edilmiş biyokarbonun daha gözenekli yüzeye sahip olduğu görülmektedir. Bu da BET yüzey alanı analizi ile uyumlu bir sonuçtur.



Şekil 6.11. a) kayın ağacı talaşı (KAT), b) biyokömür (BK) c) fiziksel aktif karbon (AKF) ve d) kimyasal aktif karbon (AKK) örneklerinin SEM görüntüsü (1000X büyütme)

6.8. Basınç ve Eğilme Testi Sonuçları

Kayın ağacı talaşının pirolizinden elde edilen biyokömür parçacık boyutlarına göre gruplandırılmıştır. İlk olarak beton harcına %2 oranında farklı parçacık boyutlarında biyokömür ilave edilerek 7 günlük kürlenme sonunda her bir örnek için üç tekrar ile eğilme dayanım testi ve altı tekrar ile basınç dayanım testi yapılmış olup, Tablo 6.5.'de basınç ve eğilme dayanım test sonuçları verilmiştir. 7 gün kürlenme değerleri TS-EN 191 42,5R standard değerleri ile karşılaştırdığında, 1,8 mm parçacık boyutunda biyokömür içeren harç örneği dışında basınç dayanımları uygunluk göstermektedir. Tablo 6.5.'de de görüldüğü üzere, biyokömür parçacık boyutu arttıkça basınç ve eğilme dayanım test sonuçları referans örneğe göre azalmaktadır. Biyokömür eklenen harç örneklerinden, $224 \mu\text{m} > D_p > 112 \mu\text{m}$ ve $D_p < 112 \mu\text{m}$ parçacık boyutunun basınç dayanımları sırasıyla $29,6 \pm 0,6 \text{ MPa}$ ve $30,0 \pm 0,7 \text{ MPa}$; eğilme dayanımları ise $5,1 \pm 0,4 \text{ MPa}$ ve $5,1 \pm 0,5 \text{ MPa}$ olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak, iki farklı parçacık boyutunun basınç ve eğilme dayanımlarında kayda değer değişim olmadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle deneylerin

diğer aşamalarında $D_p < 112 \mu\text{m}$ parçacık boyutuna sahip biyokarbon örnekleriyle devam edilmiştir.

Tablo 6.5. Farklı parçacık boyutlarında BK içeren harç örneklerinin basınç ve eğilme dayanımı test sonuçları (7 günlük kürlenme)

Örnek	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)
REFERANS	$34,7 \pm 2$	$6,4 \pm 0,7$
%2 1,8 mm	$14,9 \pm 1$	$2,1 \pm 0,5$
%2 425 μm	$28,8 \pm 0,7$	$4,7 \pm 0,1$
%2 112 μm	$29,6 \pm 0,6$	$5,1 \pm 0,4$
%2 $D_p < 112 \mu\text{m}$	$30,0 \pm 0,7$	$5,1 \pm 0,5$

Aynı koşullarda biyokarbon eklenmeksizin hazırlanan referans harç örneği 28 gün kürlenme süresi için dökülmüş olup, Tablo 6.6.'da basınç ve eğilme dayanımlı test sonuçları verilmiştir. Tablo 6.7, Tablo 6.8. ve Tablo 6.9.'da %0,5; 1 ve 2 oranında biyokarbon içeren harç örneklerinin 28 günlük kürlenme sonunda basınç ve eğilme dayanım test sonuçları sırasıyla verilmiştir. TS-EN 197-1 dayanım sınıflarına göre 42,5R çimento 28 günlük basınç dayanım değeri 42,5-62,5 MPa aralığında olmalıdır. Tablo 6.7.'de harç örnekleri karşılaştırıldığında, kütlece %0,5 ve %1'lik biyokarbon içeren örneklerin ortalama basınç dayanımları sırasıyla 44,6 ve 44,5 MPa olup, eğilme dayanımları 5,3 MPa olarak bulunmuştur. Bu değerlerin TS-EN 197-1 standardına uygun olduğu belirlenmiş ve kayda değer bir farklılık gözlemlenmemiştir. %2 oranında biyokömür içeren harç örneğinin basınç dayanımı 41,2 MPa değeri ile standart dışında kalmıştır. Bunun sebebi, kırılğan yapıya sahip karbonlu malzemenin harç içerisindeki oranı arttıkça harç dayanımının olumsuz etki etmesi olarak açıklanabilir.

Tablo 6.6. 28 gün kürlenme sonrasında harç örneğinin basınç-eğilme dayanım test sonucu

Örnek	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)
Referans	$42,6 \pm 2,5$	$5,8 \pm 0,2$

Tablo 6.7. Farklı oranlarda BK içeren harç örneklerinin basınç ve eğilme dayanımı test sonuçları (28 günlük kürlenme)

Örnek	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)
%0,5 BK	44,6 ± 2,0	5,3 ± 0,6
%1 BK	44,5 ± 1,0	5,3 ± 1,0
%2 BK	41,2 ± 0,7	4,5 ± 0,1

Tablo 6.8.'de bulunan değerler incelendiğinde, fiziksel yöntem ile aktifleştirilmiş biyokarbon harç katkısı olarak kullanıldığında hazırlanan örneklerinin basınç dayanımlarının standart değer aralığının altında kaldığı görülmektedir.

Tablo 6.8. Farklı oranlarda AKF içeren harç örneklerinin basınç ve eğilme dayanımı test sonuçları (28 günlük kürlenme)

Örnek	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)
%0,5 AKF	40,0 ± 2,0	5,3 ± 0,9
%1 AKF	38,8 ± 2,0	4,6 ± 1,0
%2 AKF	38,6 ± 0,8	4,4 ± 0,1

Kimyasal yöntem ile aktifleştirilmiş biyokarbon içeren (%0,5) harç örneklerinin basınç ve eğilme dayanımları sırası ile 43,2 MPa ve 4,8 MPa olarak ölçülmüştür (Tablo 6.9.). Referans örnek ile karşılaştırıldığında bu değerlerin standart aralıkta olduğu saptanmıştır.

Tablo 6.9. Farklı oranlarda AKK içeren harç örneklerinin basınç ve eğilme dayanımı test sonuçları (28 günlük kürlenme)

Örnek	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)
%0,5 AKK	43,2 ± 1,0	4,8 ± 0,2
%1 AKK	41,8 ± 0,9	4,8 ± 1,0
%2 AKK	40,1 ± 0,4	4,8 ± 0,1

Biyokömür ve kimyasal aktivasyon yöntemi ile elde edilen biyokarbon örnekleri karşılaştırdığında, biyokömür içeren harç örneklerinin basınç ve eğilme dayanımlarının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni kimyasal aktivasyon yöntemi ile elde edilen biyokarbon örneklerinin daha gözenekli yapıya sahip olması şeklinde açıklanabilir.

6.9. Ses Dalga Dağılma Süresi ve Hızı Analizi

Belirlenen oranlarda biyokarbon içeren harç örneklerine ses iletim hızı analizi uygulanmıştır. Ses dalgaları bir yapının içerisinde bulunan katı taneciklerin titreşimi ile yayılmaktadır. Eğer yapı içerisinde boşluk ve gözeneklilik var ise ses dalgasının yayılma süresi artmakta ve buna bağlı olarak ses dalga hızı azalmaktadır. Referans için hazırlanan beton numunesine ait ortalama yayılma süresi ve hızı Tablo 6.10.'da verilmiştir. Referans örnekler için ses dalgasının ortalama dağılma süresi 40,6 μ s ve dağılma hızı 3945 m/s olarak belirlenmiştir.

Tablo 6.10. Referans harç örneğinin ses dalga dağılma süresi ve hızı

Örnek	Ses Dağılma Süresi (μ s)	Ses Dağılma Hızı (m/s)
Referans	40,6 \pm 0,1	3945 \pm 15

Referans örnek analizlerinden sonra belirlenen oranlarda biyokarbon içeren harç örneklerinin ses dağılma hızları analiz edilmiştir. Tablo 6.11.'de %0,5; 1 ve 2 oranlarında biyokömür eklenen harç örneklerine ait dağılma süreleri ve dağılma hızları verilmiştir. %0,5 biyokömür ilaveli beton için ses dağılma süresi ve hızı değerleri sırasıyla 40,7 μ s ve 3932 m/s ölçülmüş olup, referans örnek ile kayda değer değişim saptanmamıştır. %1 ve 2 ilaveli beton örneklerinde ise, dağılma süresinin arttığı ve buna bağlı olarak ses dağılma hızının düştüğü gözlemlenmiştir.

Tablo 6.11. Farklı oranlarda biyokömür içeren harç örneklerinin ses dalga dağılma süresi ve hızı

Örnek	Ses Dağılma Süresi (μ s)	Ses Dağılma Hızı (m/s)
% 0,5 BK	40,7 \pm 0,7	3932 \pm 35
% 1 BK	41,9 \pm 0,6	3822 \pm 32
% 2 BK	41,1 \pm 0,8	3897 \pm 35

Tablo 6.12. ve Tablo 6.13.'de çimento harcına %0,5; 1 ve 2 oranlarında biyokarbon eklenerek hazırlanan harç örneklerine ait ses dağılma süreleri ve hızları verilmiştir. Hem fiziksel yöntem ile hem de kimyasal yöntem ile aktive edilmiş biyokarbonların, %0,5 oranında eklenmesi ile elde edilen harç örnekleri için ses dağılma süresi ve hızı değerleri referans örnek ile karşılaştırıldığında kayda değer değişim olmadığı görülmüştür. Bu durumun aksine, %1 ve 2 ilaveli beton örneklerinde ise referans örnek sonucuna göre ses dağılma süresinin arttığı ve buna bağlı olarak ses dağılma hızının düştüğü gözlemlenmiştir.

Tablo 6.12. Farklı oranlarda AKF içeren harç örneklerinin ses dalga dağılma süresi ve hızı

Örnek	Ses Dağılma Süresi (μ s)	Ses Dağılma Hızı (m/s)
% 0,5 AKF	40,7 \pm 0,3	3923 \pm 32
% 1 AKF	40,9 \pm 0,2	3922 \pm 23
% 2 AKF	41,0 \pm 0,3	3882 \pm 26

Tablo 6.13. Farklı oranlarda AKK içeren harç örneklerinin ses dalga dağılma süresi ve hızı

Örnek	Ses Dağılma Süresi (μ s)	Ses Dağılma Hızı (m/s)
% 0,5 AKK	40,9 \pm 0,3	3908 \pm 33
% 1 AKK	41,0 \pm 0,2	3899 \pm 28
% 2 AKK	42,9 \pm 0,3	3874 \pm 20

6.10. Isıl İletkenlik Katsayısı Belirlenmesi

Biyokarbon katkılı betonların ısı yalıtım performansının değerlendirilebilmesi amacıyla hem referans hem de katkılı beton örneklerinin ısıl iletkenlik katsayıları belirlenmiş olup, sonuçlar Tablo 6.14.'de verilmiştir.

Tablo 6.14. *Isıl iletkenlik katsayısı analizi sonuçları*

Örnek	Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)
REFERANS	0,89 ± 0,0062
% 1 BK	0,19 ± 0,0006
% 1 AKF	1,88 ± 0,0032
% 1 AKK	1,78 ± 0,0110

Parçacık boyutu 112 µm'nin altında olan biyokarbon örneklerinin %1 oranında çimento harcına eklenmesi ile elde edilen betonların basınç ve eğilme dayanımları 40-45 MPa aralığında olduğu için standart gereği binalarda kullanıma uygundur. Bu nedenle, ısıl iletkenlik katsayıları bu örnekler için belirlenmiştir. Referans beton örneğinin ısıl iletkenlik katsayısı 0,89 W/mK olarak ölçülürken, biyokömür katkısı ile bu değerin 0,195 W/mK'e kadar düşürüldüğü görülmektedir. Biyokömür örneklerinin gözenekli yapısı beton içerisinde ısı iletimini yavaşlatarak boşluklar oluşturmaktadır. Böylelikle biyokarbon katkılı betonlarda ısı yalıtım performansı iyileştirilmektedir.

Son zamanlarda yapılan çalışmalarda, betona ait fiziksel özelliklerin iyileştirilmesi için katkı olarak biyokömür kullanılmaktadır. Örneğin Cuthbertson ve arkadaşlarının yayınladığı çalışmada %2 biyokömür içeren beton örneklerinin ısıl iletkenlik katsayısı 0,19 W/mK olarak bildirilmiştir. Aynı çalışmada, standart çimentoya ait ısıl iletkenlik katsayısı 0,62 ile 3,3 W/mK olarak ölçülmüştür (Cuthbertson, D., Berardi, U., Briens, C., Berruti, F., 2019). Literatürde bulunan bu değerler ile tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında elde edilen genel sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- ✓ Kayın ağacı talaşının piroliz ile karbonca zengin katı ürünlere dönüştürülmesinde uygun bir hammadde olacağı değerlendirilmiştir.
- ✓ Yavaş piroliz uygulandığında kayın ağacı talaşının yaklaşık %25 verim ile katı ürüne dönüştürülebileceği saptanmıştır.
- ✓ Hazırlanmış olan biyokarbonların TGA analiz sonucunda kimyasal yöntem ile üretilen karbonlu malzemelerin ısıl bozunmada daha kararlı olduğu ve kütle kaybının daha az olduğu gözlemlenmiştir.
- ✓ BET yüzey alan tayininde, BK'ye uygulanan kimyasal aktivasyon sonucunda AKK'nin yüzey alanının 4,2 g/m²'den 490,9 g/m²'ye arttığı gözlemlenmiştir.
- ✓ Biyokarbon parçacık boyutunun beton dayanımına etkisinin incelenmesi sonucunda; 112 µm ve altında parçacık boyutunda biyokarbonların beton basınç ve eğilme testlerinde dayanımın arttığı, parçacık boyutu 1,8 mm ve üzeri olan biyokarbonların ise dayanımı azalttığı belirlenmiştir. Sonuç olarak kırılğan yapıya sahip biyokarbon malzemelerin parçacık boyutu büyük olduğunda beton dayanımını olumsuz etkilediği görülmüştür. 112 µm ve altında parçacık boyutunda biyokarbon kullanılması durumunda beton basınç ve eğilme dayanımlarının olumsuz etkilenmediği saptanmıştır.
- ✓ Elek altı parçacık boyutuna sahip BK, AKF ve AKK içeren harç örneklerinin 28 günlük kürlenme sonucunda ölçülen basınç ve eğilme dayanımları arasında farklılık gözlenmemiştir. Bu nedenle, BK'ye aktivasyon işlemi uygulanmaksızın doğrudan çimento katkısı olarak kullanımının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.
- ✓ Biyokarbon malzemelerinin çimento katkısı olarak kullanımının ses yalıtım performansına etkisi araştırılmıştır. %2 oranında kimyasal aktivasyon yöntemi ile elde edilen biyokarbon katkılı harç örnekleri için ses dağılma süresi ve hızı sırası ile 42,9 µs ve 3874 m/s olarak ölçülmüştür.

Aynı değerler biyokarbon içermeyen referans örnek için 40,6 μ s ve 3945 m/s olarak belirlenmiş olup, yüksek gözenekli biyokarbon katkısının ses yalıtım özelliğine sahip beton üretiminde kullanılabileceği görülmüştür.

- ✓ Biyokarbon malzemelerinin çimento katkısı olarak kullanımının ısı yalıtım performansına etkisi araştırılmıştır. Biyokarbon katkısı olmaksızın hazırlanan referans beton örneğinin ısı iletkenlik katsayısı 0,89 W/mK olarak ölçülürken, biyokömür katkısı ile bu değerin 0,195 W/mK'e kadar düşürüldüğü belirlenmiştir. Çimento harcına eklenen, görece yüksek yüzey alanına sahip biyokarbon örneklerinin gözenekli yapısı nedeniyle beton içerisinde oluşan boşluklar ısı yalıtımını arttırmıştır. Sonuç olarak, biyokarbon katkılı betonlarda ısı yalıtım performansının iyileştirilebileceği saptanmıştır.
- ✓ Tüm analizler bir arada değerlendirildiğinde çimento harcı katkısı olarak kullanılabilecek en uygun biyokarbonun $D_p < 112 \mu$ m parçacık boyutuna sahip biyokömür olduğu görülmüştür. Biyokömür katkılı harç için basınç ve eğilme dayanımı sırasıyla $44,5 \pm 1,0$ MPa ve $5,3 \pm 1,0$; ısı iletkenlik katsayısı $0,19 \pm 0,0006$ W/mK ve ses dağılım süresi ve hızı sırasıyla $41,9 \pm 0,6 \mu$ s ile 3822 m/s olarak saptanmıştır.
- ✓ Büyük parçacık boyutunda ($D_p > 1,8$ mm) ve yüksek oranlarda ($> \%2$) biyokarbon eklenerek hazırlanan harç örneklerinin basınç ve eğilme dayanımlarının olumsuz etkilediği belirlenmiştir.
- ✓ Biyokarbon içeren harç örneklerinin basınç ve eğilme dayanımlarının standart aralıkta kaldığı koşullarda, biyokarbon katkısının betonun ısı ve ses yalıtım performanslarını iyileştireceği sonucuna varılmıştır.
- ✓ Elde edilen biyokarbonun beton katkısı olarak kullanılabilmesi ve basınç ile eğilme dayanımı değerlerini standart değer aralığında tutabilmek için harç örneklerine agrega ilave edilebileceği ön görülmektedir.

Sonuç olarak, yenilenebilir kaynak olan biyokütlenin termokimyasal yöntemlerle gözenekli karbonlu malzemelere dönüştürülerek, bu biyokarbonların binalarda ısı ve ses yalıtımını sağlamak için çimento katkı malzemesi olarak kullanımının gelecek vadettiği ön görülmektedir.

KAYNAKÇA

- Ahmed, M. B., Zhou, J. L., Ngo, H. H., Guo, W. (2016). Biomass and Bioenergy Insight into Biochar Properties and Its Cost Analysis. *Biomass and Bioenergy*, 84, 76-86. doi:10.1016/j.biombioe.2015.11.002
- Aitcin, P. C. (2016). Corrosion inhibition. *Science and Technology of Concrete Admixtures*, 471-479.
- Akgül, G. (2017). Biyokömür: Üretim ve Kullanım Alanları. *Selcuk Univ. J. Eng. Sci. Tech.*, 5(4), 485-499. doi:10.15317Scitech.2017.107
- Altınışık, M., Hansu, T. A. ve Akdemir, M. (2023). Süper Kapasitör Uygulamaları için Mikrodalga Destekli Biyokütle Tabanlı Elektrot Malzemesi Üretimi. *Mühendislikte Yakıtlar, Yangın ve Yanma*, 11(1), 67-76. doi:10.52702/fce.1245394
- Aydemir, B. (2022). Fındık Kabuğunun Torrefaksiyon ve Yanma Davranışının İncelenmesi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 51-65. doi:10.31466/kfbd.974829
- Aziz, K. H. H., Kareem, R. (2023). Recent Advances in Water Remediation from Toxic Heavy Metals Using Biochar as A Green and Efficient Adsorbent. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8, 1-12. doi:10.1016/j.csce.2023.100495
- Aziz, M. A., Zubair, M. ve Saleem, M. (2021). Development and Testing of Cellulose Nanocrystal-Based Concrete. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15, 1-21. doi:10.1016/j.cscm.2021.e00761
- Azunna, S. U., Bakar, N. A. ve Nasir, N. A. M. (2022). Mechanical Properties of Concrete with Coconut Shell as Partial Replacement of Aggregates. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 431(3). doi:10.1088/1757-899X/431/3/032001
- Babu, B. V. (2008). Biomass Pyrolysis. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2, 393-414. doi:10.1002/bbb.92
- Biswal, B. K., Balasubramanian, R. (2023). Use of Biochar as A Low-Cost Adsorbent for Removal of Heavy Metals from Water and Wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5). doi:10.1016/j.jece.2023.110986
- Cao, X., Sun, S. ve Sun, R. (2017). Application of Biochar-Based Catalysts in Biomass Upgrading. *RSC Advances*, 7(77), 48793–48805. doi:10.1039/C7RA09307A
- Cha, J. S., Park, S. H., Jung, S., Ryu, C., Joen, J. (2016). Production and Utilization of Biochar. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 40, 1-15. doi:10.1016/j.jiec.2016.06.002
- Chen, Z., Qiao, J., Yang, X., Sun, Y., Sun, D. (2023). A Review of Grouting Materials for Pouring Semi-flexible Pavement: Materials, Design and Performance. *Construction and Building Materials*, 379, 131235. doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.131235

- Cheung, J., Roberts, L. ve Liu, J. (2018). Admixtures and sustainability. *Cement and Concrete Research*, 114, 79-89. doi:10.1016/j.cemconres.2017.04.011
- Cuthbertson, D., Berardi, U., Briens, C., Berruti, F. (2019). Biochar from Residual Biomass as A Concrete Filler for Improved Thermal and Acoustic Properties. *Biomass and Bioenergy*, 120, 77-83. doi:10.1016/j.biombioe.2018.11.007
- Das, O., Sarmah, A. K. ve Bhattacharyya, D. (2016). Nanoindentation Assisted Analysis of Biochar Added Biocomposites. *Composites*, 91, 219-227. doi:10.1016/j.compositesb.2016.01.057
- Demirbaş, A. (2004). Producing Bio-oil from Olive Cake by Fast Pyrolysis. *Energy Sources*, 30(1), 38-44. doi:10.1080/00908310600626747
- Erdoğan, Y. T. (2021). *Beton* (5 b.). Ankara: Geliştirme Vakfı Yayıncılık.
- Gani, M. S. (1997). *Cement and Concrete* (1 b.). London: Taylor & Francis Group.
- Glaser, B., Wiedner, K., Seelig, S., Schmidt, H. (2014). Biochar Organic Fertilizers from Natural Resources as Substitute for Mineral Fertilizers. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2). doi:10.1007/s13593-014-0251-4
- Gönen, Ç. (2019). Kırsal Bölgelerde Tarımsal Atıkların Kontrolü ve Yenilenebilir Biyokütle Enerji Teknolojileri İle Sera Gazı Emisyonlarının Azaltım Potansiyelinin İncelenmesi. *Türk Tarım ve Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi*(7), 143-147. doi:10.24925/turjaf.v7i1.142-147.2330
- Günel, E. A., Birol, M. ve Surucu, A. (2022). Biyokömür Uygulamalarında Toprak Kalitesine Etkisi. *Toprak Kalitesi ve Değerlendirilmesi*, 128-156.
- Hall, D.O. ve House, J. I. (1994). Biomass Energy and The Global Carbon Balance. *Renewable Energy*, 5(1-4), 58-66. doi:10.1016/0960-1481(94)90354-9
- Houghton, R. A. (2008). Biomass. *Encyclopedia of Ecology* , 2, 253-257. doi:10.1016/B978-0-444-63768-0.00462-5
- Ippilito, J. A., Ducey, T. F., Cantrell, K. B., Novak, J. M., Lentz, R. D. (2016). Designer, Acidic Biochar Influences Calcareous Soil Characteristics. *Chemosphere*, 142, 184-191. doi:10.1016/j.chemosphere.2015.05.092
- Ishak, M. A. M., Ani, A. Y., Ismail, S. N. A. S., Ali, M. L. M., Ahmad, R. (2022). Conversion of Biomass to Biofuels. N. A. Suzana Yusup (Dü.), *Value-Chain of Biofuels Fundamentals, Technology, and Standardization* içinde (1 b., s. 49-67). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-824388-6.00005-1
- Jin, H., Cheng, L., Liu, J., Zhong, S. (2019). Investigation of Natural Diffusion Behavior in Concrete Using Iodide Replacing Chloride Ions: The Impact of Mineral Admixtures Types and Dosages. *Journal of Materials Research and Technology*, 29, 1834-1861.
- Kapluhan, E. (2014). Biyokütle Enerjisinin Dünyadaki ve Türkiye'deki Kullanım Durumu. *Marmara Coğrafya Dergisi* (30), 97-125. doi:10.14781/MCD.2014308146
- Kastner, R. J., Miller, J., Geller, D. P., Locklin, J., Keith, L. H., Johnson, T. (2012). Catalytic Esterification of Fatty Acids Using Solid Acid Catalysts Generated from

- Biochar and Activated Carbon. *Catalysis Today*, 190(1), 122-132. doi:10.1016/j.cattod.2012.02.006
- Konwar, L. J., Boro, J. ve Deka, D. (2014). Review on Latest Developments in Biodiesel Production Using Carbon-Based Catalysts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 546-564. doi:10.1016/j.rser.2013.09.003
- Küçükgül, E. Y. (2004). Ticari Aktif Karbon Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6(3), 41-56.
- Kwapinski, W., C. M. P. Byrne, E. Kryachko, Wolfram, P., Adley, C., Leahy, J. J., Novotny, E. H., Hayes, M. H. B. . (2010). Biochar from Biomass and Waste. *Waste and Biomass Valorization*, 1, 177-189. doi:10.1007/s12649-010-9024-8
- Lehmann, J. (2007). Bio-Energy in The Black. *Frontiers in Ecology and The Environment*, 5(7), 381-387. doi:10.1890/1540-9295(2007)5[381:BITB]2.0.CO;2
- Mardani-aghabaglou, A. ve İlhan, M. (2018). Büzülme Engelleyici Katkıların Su Azaltıcı Katkı Varlığında Harç Karışımlarının Basınç Dayanımına, Su Emmesine ve Kuruma-Büzülmesine Etkisi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2), 417-426. doi:10.16984/saufenbilder.342519
- Masoumi, S., Borugadda, V. B., Nanda, S., Dalai, A. K. (2021). Hydrochar. *Catalysts*, 11(8), 1-19. doi:10.3390/catal11080939
- Menczel, J. D. (2009). *THERMAL ANALYSIS OF POLYMERS*. (J. D. Menczel, & B. R. Prime, Dü) Canada: WILEY.
- Mensah, R. A., Wang, D., Shanmugam, V., Sas, G., Försth, M., Das, O. (2024). Fire Behaviour of Biochar-Based Cementitious Composites. *Composites*, 14, 1-11. doi:10.1016/j.jcomc.2024.100471
- Mert, M. S., Sert, M., Özkara, G., Yüksel, F. (2017). Biyokütleden Sentez Gazı Eldesinde Kullanılan Gaz Filtrelerinin ve Filtreleme Yöntemlerinin Değerlendirilmesi. *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(2), 23-38.
- Mohan, D., Sarswat, A., Ok, S. Y., Jr, C. U. P. (2014). Organic and Inorganic Contaminants Removal from Water with Biochar, A Renewable, Low Cost and Sustainable Adsorbent. *Bioresource Technology*(160), 191-202. doi:10.1016/j.biortech.2014.01.120
- Mutlu, N. Tolay, M., Karaca, C., Öztürk, H. (2019). Biyokütle Gazlaştırma Teknolojisindeki Gelişmeler. *Tarım Makinaları Bilim Dergisi*, 15, 53-59.
- Pauzi, N. I. M., Musa, A. S. ve Radhi, M. S. M. (2020). Biochar Usage for Improving Concrete Mix as Cement Replacement. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, 11(8), 594-601. doi:10.34218/IJARET.11.8.2020.058
- Polat, H. ve Özel, C. (2023). Farklı Priz Hızlandırıcı Katkıların Püskürtme Beton Performansına Etkisinin Karşılaştırmalı Analizi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 15(3), 134-142. doi:10.29137/umagd.1297157

- Ramachandran, V. S. (2001, May). Concrete Science. V. S. Ramachandran, & J. J. V.S. Ramachandran (Dü.), *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology* içinde (s. 1-62). William Andrew. doi:10.1016/B978-081551437-4.50004-7
- Ramana, A., K. M. M. S. Begum, Pereira, A. O. ve Cohen, C. (2022). Energy Recovery from Biomass through Gasification Technology. *A Thermo-Economic Approach to Energy From Waste*, 107-132. doi:10.1016/B978-0-12-824357-2.00007-3
- Reza, M. T., Andert, J., Herklotz, B., Busch, D. (2014). Hydrothermal Carbonization of Biomass for Energy and Crop Production. *Applied Bioenergy*, 1(1), 11-29. doi:10.2478/apbi-2014-0001
- Sachan, R., Nautiyal, A. ve Kumar, K. (2022). Biochar. *Recent Advances in Agricultural Science and Technology for Sustainable India*, 261-265.
- Salih, T. W. (2021). Biomass Energy. 1-8.
- Schmidt, H. P. (2013). Biochar as Building Material for an Optimal Indoor Climate. *Ithaka Journal*, 450-454.
- Scrivener, K. L., Juilland, P. ve Monteiro, P. J. M. (2015). Advances in understanding hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 78(Part A), 38-56. doi:10.1016/j.cemconres.2015.05.025
- Shen, X., Shamshina, J. L., Berton, P., Gabriela, G., Rogers, R. R. (2016). Hydrogels based on Cellulose and Chitin: Fabrication, Properties, and Applications. *Green Chemistry*, 18(1), 53-75. doi:10.1039/C5GC02396C
- Smağ, A. (2023). Döğüsel Ekonomi ve Termal Biyokütle Dönüşümleri.
- Sohi, S., Lopez-Capel, E., Krull, E., Bol, R. (2010). Biochar, Climate Change and Soil. *CSIRO Land and Water Science Report 05/09* , 1-56.
- Summa, D., Ruscica, G., Savi, P., Pelosato, R., Sora, I. N. (2021). Biochar-Containing Construction Materials for Electromagnetic Shielding in The Microwave Frequency Region. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 25, 1099-1108. doi:10.1007/s10098-021-02182-0
- Uçar, F. (2023). *Hello Tomorrow Türkiye*. 2024 tarihinde <https://www.hello-tomorrow.org.tr/biyokomur-negatif-emisyonlu-tarima-ulasmak-icin-nasil-katkisaglayabilir/> adresinden alındı
- Üçğül, İ. (2010). Biyokütle Teknolojisi. *Yekarum Dergisi*, 3-11.
- Wu, H., Lin. X. ve Zhou, A. (2020). A Review of Mechanical Properties of Fibre Reinforced Concrete at Elevated Temperatures. *Cement and Concrete Research*, 135. doi:10.1016/j.cemconres.2020.106117
- Xu, X., Cao, X., Zhao, L., Wang, H. (2012). Removal of Cu, Zn, and Cd from Aqueous Solutions by The Dairy Manure-Derived Biochar. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(1), 1-248. doi:10.1007/s11356-012-0873-5
- Yadav, S. P. (2023). Biochar Application: A Sustainable Approach to Improve Soil Health. *Journal of Agriculture and Food Research*, 11, 1-13. doi:10.1016/j.jafr.2023.100498

- Yapıcıoğlu, P. ve Yeşilnacar, M. İ. (2022). Grey Water Footprint Assessment of Groundwater Resources in Southeastern Turkey: Effect of Recharge. *Water Supply*, 22(1), 615-627. doi:10.2166/ws.2021.247
- Zarei-Jelyani, F., Salahi, F. ve Zarei-Jelyani, M. (2024). Various Industrial Wastes to Energy Technologies. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, 4, 17-28. doi:10.1016/B978-0-323-93940-9.00212-7
- Zhou, W., Liu, X., Zhou, K., Jia, J. (2016). Carbon Materials for Supercapacitors. *Nanomaterials in Advanced Batteries and Supercapacitors*, 271-315. doi:10.1007/978-3-319-26082-2_8



ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0009-0008-8779-5489

Ad Soyad : Çiğdem ÇAĞDAŞ

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2020, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik, Kimya Mühendisliği
- 2021, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği
- 2020-2023, Kimya Mühendisi, Şeker Fabrikası, Alkol Üretim
- 2023-devam, Kimya Mühendisi, Bulut Metal, Kataforez Kaplama ve Elektrostatik Toz Boya Kaplama Uzmanı