



T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**YENİLENEBİLİR ENERJİ UYGULAMALARINDA KULLANILMAK ÜZERE
HİBRİT MALZEME GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALİ ALAGÖZ

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. GAMZE GÜNDÜZ MERİÇ

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. ELİF YAMAN ÇAMLI

BİLECİK, 2026

10807162

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**YENİLENEBİLİR ENERJİ UYGULAMALARINDA KULLANILMAK ÜZERE
HİBRİT MALZEME GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALİ ALAGÖZ

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. GAMZE GÜNDÜZ MERİÇ

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. ELİF YAMAN ÇAMLI

BİLECİK, 2026

10807162

BEYAN

“Yenilenebilir Enerji Uygulamalarında Kullanılmak Üzere Hibrit Malzeme Geliştirilmesi” başlıklı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazım aşamasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehberine uygun olarak tezimi hazırladığımı, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel etik kurallarına uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, çalışmamın herhangi bir kısmının başka bir tez olarak sunulmadığını, aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışma Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından GAP-2025-646 no.lu proje ile desteklenmiştir.

Ali Alagöz

.../.../2026

İmza:

ÖN SÖZ

Tez süresi boyunca bana yardım eden ve beni yönlendiren kıymetli danışman hocalarım Doç. Dr. Gamze GÜNDÜZ MERİÇ ve Doç. Dr. Elif YAMAN ÇAMLI' ya teşekkürlerimi borç bilirim. Bana inanan ve beni hem maddi yönden hem de manevi yönden destekleyen babam Ruhi ALAGÖZ, babaannem Nuriye ALAGÖZ ve aile büyüğümüz Ayşe ALAGÖZ'e teşekkür ederim. İsmi sayamadığım arkadaşlarım, hocalarım ve yakınlarıma teşekkürlerimi en içten dileklerle sunarım.

Ayrıca GAP-2025-646 no.lu proje ile çalışmamızı destekleyen Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne teşekkür ederim.

ÖZET

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımına katkı sağlamak ve biyokütleden kaliteli biyoyağ üretimini geliştirmek amacıyla, lignoselülozik biyokütle olarak Gökmar ağacı talaşı ve algal biyokütle olarak *Chlorella* tozu türü kullanılarak katalitik piroliz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Piroliz sürecinde ürün dağılımını iyileştirmek, biyoyağın enerji potansiyelini artırmak ve yakıt özelliklerini geliştirmek amacıyla CeO₂/H-FER sol-jel ve H-FER@CeO₂ çekirdek-kabuk (core-shell) yöntemleriyle sentezlenen farklı oranlarda (kütlece %1, 3, 5) Ni yüklü hibrit katalizörler kullanılmıştır. Hibrit katalizörlerin özelliklerinin belirlenmesinde SEM, SEM-EDX, Çok noktalı BET, XRD, FT-IR ve TEM analizlerinden faydalanılmıştır. Farklı katalizör yapıları ve Ni yükleme oranlarının piroliz ürünleri üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiş; özellikle hidrokarbon oluşumu, oksijenli ve azotlu bileşiklerin dönüşümü ile yakıt kalitesini belirleyen bileşenlerin değişimi değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, geliştirilen katalizör sistemlerinin biyokütle kaynaklı yenilenebilir yakıt üretiminde kullanılabilirliği ortaya konulmuş ve sürdürülebilir enerji teknolojilerine katkı sağlayabilecek yeni katalitik yaklaşımlar geliştirilmiştir.

Sonuç olarak, katalizörlerin yapısal özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla temel karakterizasyon teknikleri kullanılmış ve sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu kanaatine varılmıştır. Katalizör sentez yönteminin ve Ni yükleme oranının gökmar ağacı talaşı ve *Chlorella* tozu piroliz ürünlerinin seçiciliğini belirleyen temel parametreler olduğu görülmüştür. Özellikle %5 Ni H-FER@CeO₂ katalizörü, hidrokarbon bakımından zengin ve oksijenli/azotlu bileşikler bakımından daha düşük içerikli ürün dağılımı sağlayarak en yüksek yakıt potansiyelini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir enerji, biyokütle, hibrit katalizör, nikel

ABSTRACT

In this study, catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass (fir sawdust) and algal biomass (*Chlorella sp.*) was conducted to contribute to the efficient utilization of renewable energy resources and to enhance the production of high-quality bio-oil from biomass. To enhance the product distribution, increase the energy potential of the bio-oil, and improve its fuel properties, Ni-loaded hybrid catalysts with different Ni loadings (1, 3, and 5 wt.%) were synthesized using two different preparation methods: the CeO₂/H-FER sol-gel method and the H-FER@CeO₂ core-shell method. The synthesized hybrid catalysts were comprehensively characterized by SEM, SEM-EDX, BET surface area analysis, XRD, FT-IR, and TEM. The effects of catalyst architecture and Ni loading on the pyrolysis product distribution were comparatively investigated, with a particular emphasis on hydrocarbon formation, the conversion of oxygenated and nitrogen-containing compounds, and changes in the chemical composition that govern the fuel quality of the resulting bio-oil. The obtained results demonstrated the applicability of the developed catalyst systems for the production of renewable fuels from biomass and provided new catalytic approaches that may contribute to sustainable energy technologies.

The characterization results confirmed the successful synthesis of the hybrid catalysts and showed good agreement among the applied analytical techniques. Furthermore, both the catalyst preparation method and the Ni loading were identified as key parameters governing the selectivity of pyrolysis products obtained from fir sawdust and *Chlorella* biomass. Among the investigated catalysts, the 5 wt.% Ni-loaded H-FER@CeO₂ core-shell catalyst exhibited the highest fuel potential by producing a product distribution enriched in hydrocarbon compounds while significantly reducing the formation of oxygenated and nitrogen-containing compounds. These findings suggest that the developed Ni-loaded hybrid catalysts are promising materials for catalytic biomass upgrading and the production of renewable biofuels.

Keywords: Renewable energy, biomass, hybrid catalyst, nickel

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	ix
1.GİRİŞ.....	1
2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI	4
2.1. Yenilenebilir Enerjinin Tarihçesi.....	5
2.2. Türkiye ve Dünyadaki Yenilenebilir Enerji Durumu	5
2.3. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Türleri	9
2.3.1. Güneş enerjisi.....	9
2.3.2. Rüzgâr enerjisi	10
2.3.3. Hidrolik enerji.....	11
2.3.4. Jeotermal enerji.....	11
2.3.5. Dalga enerjisi	12
3. BİYOKÜTLE ENERJİSİ	13
3.1. Biyokütlenin Önemi.....	14
3.2. Lignoselülozik Biyokütle	15
3.2.1. Selüloz	16
3.2.2. Hemiselüloz.....	16
3.2.3. Lignin	17
3.3. Algal Biyokütle.....	18
3.3.1. Proteinler	19
3.3.2. Yağlar	19
3.3.3. Karbonhidratlar	20

3.4. Biyokütlenin Termal Parçalanması	21
3.4.1. Karbonizasyon.....	21
3.4.2. Gazlaştırma	21
3.4.3. Yanma	22
3.4.4. Piroliz	22
4.LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	27
5.MATERYAL VE METOD	39
5.1. Karakterizasyon Teknikleri.....	39
5.1.1. Taramalı elektron mikroskobu enerji dağılımlı x-ışını spektroskopisi (SEM-EDX-Haritalama).....	39
5.1.2. Yüzey alanı ölçümü ve gözeneklilik dağılımı (Çok Noktalı BET) analizi.....	40
5.1.3. X-ışını difraktometresi (XRD) analizi.....	41
5.1.4. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) analizi.....	41
5.1.5. Geçirimli elektron mikroskobu (TEM) analizi	42
5.1.6. Elementel analiz (CHN).....	42
5.2. Biyokütle Örneklerine Uygulanan Ön-analizler.....	43
5.3. Katalizörlerin Sentezi.....	44
5.4.Py-GC/MS Analizleri	45
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	47
6.1. Biyokütlelerin Karakterizasyon Sonuçları.....	47
6.1.1. Biyokütle örneklerine uygulanan ön-analiz sonuçları.....	47
6.1.2. Biyokütle örneklerine uygulanan elementel analiz ve ısı değeri sonuçları	48
6.1.3. Biyokütle örneklerine uygulanan SEM-EDX Analizi Sonuçları	49
6.1.4. Biyokütle örneklerine uygulanan FT-IR Analizi Sonuçları.....	51
6.1.5. <i>Chlorella</i> tozu örneğine uygulanan XRD Analizi Sonucu	52
6.2. Katalizör Örneklerinin Karakterizasyon Sonuçları	53
6.3. Py-GC/MS Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar	68

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	78
KAYNAKÇA	81

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Türkiye'nin birincil ve nihai enerji yoğunluğu	6
Tablo 2.2. Güneş enerjisinin avantajları ve dezavantajları	10
Tablo 2.3. Rüzgâr enerjisinin avantajları ve dezavantajları	10
Tablo 2.4. Hidrolik enerjinin avantajları ve dezavantajları	11
Tablo 2.5. Jeotermal enerjinin avantajları ve dezavantajları	12
Tablo 2.6. Dalga enerjisinin avantajları ve dezavantajları	12
Tablo 3.1. Biyokütlenin avantajları ve dezavantajları	15
Tablo 3.2. Lignoselülozik materyalin içeriği.....	18
Tablo 3.3. Lignoselülozik biyokütle ve algal biyokütlenin karşılaştırılması.....	20
Tablo 3.4. Biyokütlenin termal parçalanması.....	22
Tablo 6.1. Göknar ağacı talaşı ve <i>Chlorella</i> tozunun ön-analiz sonuçları	48
Tablo 6.2. Göknar ağacı talaşı ve <i>Chlorella</i> tozunun elementel analiz sonuçları	49
Tablo 6.3. Katalizörlerin fiziksel özellikleri.....	60

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. 2024 yılı birincil enerji yoğunlukları karşılaştırılması.....	6
Şekil 2.2. Birincil enerji yoğunluğu endeksi	7
Şekil 2.3. Nihai enerji yoğunluğu endeksi	8
Şekil 3.1: Py-GC/MS ünitesi şematik gösterimi	24
Şekil 5.1. Py-GC/MS sisteminin şematik olarak gösterilmesi	45
Şekil 6.1. Gökmar ağacı talaşına ait (a) SEM görüntüsü (500x) (b) EDX spektrumu.....	50
Şekil 6.2. <i>Chlorella</i> tozuna ait (a) SEM görüntüsü (2,5kx) (b) EDX spektrumu	51
Şekil 6.3. Gökmar ağacı talaşına ait FT-IR grafiği	51
Şekil 6.4. <i>Chlorella</i> tozuna ait FT-IR grafiği.....	52
Şekil 6.5. <i>Chlorella</i> tozuna ait XRD spektrumu	53
Şekil 6.6. Boş katalizörlerin SEM görüntüleri	54
Şekil 6.7. Sol-jel metoduyla sentezlenen Ni içerikli katalizörlerin SEM görüntüleri.....	54
Şekil 6.8. Çekirdek-kabuk metoduyla sentezlenen Ni içerikli katalizörlerin SEM görüntüleri	55
Şekil 6.9. Sol-jel metoduyla sentezlenen katalizörlerin SEM-EDX görüntüleri	56
Şekil 6.10. Çekirdek-kabuk metoduyla sentezlenen katalizörlerin SEM-EDX görüntüleri	58
Şekil 6.11. Katalizörlerin N ₂ adsorpsiyon/desorpsiyon izotermi.....	61
Şekil 6.12. Katalizörlere ait FT-IR grafikleri.....	64
Şekil 6.13. Katalizörlere ait XRD grafikleri	66
Şekil 6.14. Katalizörlere ait TEM görüntüleri	68
Şekil 6.15. Gökmar ağacı talaşının pirolizinde destek malzemesinin etkisi	70
Şekil 6.16. Çekirdek-kabuk metoduyla sentezlenen %1, %3 ve %5 Ni içerikli katalizörlerin gökmar ağacı talaşının pirolizine olan etkisi	72
Şekil 6.17. Sol-jel metoduyla sentezlenen %1, %3 ve %5 Ni içerikli katalizörlerin gökmar ağacı talaşının pirolizine olan etkisi	73
Şekil 6.18. <i>Chlorella</i> tozunun pirolizinde destek malzemesinin etkisi.....	75
Şekil 6.19. Çekirdek-kabuk metoduyla sentezlenen %1, %3 ve %5 Ni içerikli katalizörlerin <i>Chlorella</i> tozunun pirolizine olan etkisi.....	76
Şekil 6.20. Sol-jel metoduyla sentezlenen %1, %3 ve %5 Ni içerikli katalizörlerin <i>Chlorella</i> tozunun pirolizine olan etkisi	77

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

- 3B2OL:** 3-büten-2-ol
2B1OL: 2-büten-1-ol
AH: Aromatik Hidrokarbonlar
ATP: Attapuljit
AHC: Alifatik Hidrokarbonlar
BTX: Benzen, Toluen, Ksilen
BTEX: Benzen, Toluen, Etilbenzen, Ksilen
BD: 1,3-bütadien
BET: Brunauer–Emmett–Teller
CB: Klorobenzen
Ce-LDH: Ce-çift Tabakalı Hidroksit
CeO₂: Seryum Dioksit
CH₄: Metan
CNF: Karbon Nanofiber
co-CFP: Birlikte Katalitik Hızlı Pirolyzi
CO₂: Karbondioksit
CO: Karbonmonoksit
CS: Pamuk Saplari
CVOC: Klor İçeren Uçucu Organik Bileşikler
DAEM: Dağıtılmış Aktivasyon Enerjisi Modeli
DCE: 1,2-dikloroetan
DCM: Diklorometan
DFT: Yoğunluk Fonksiyon Teorisi
DoE: Deney Tasarımı
FT-IR: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
FWO: Flynn-Wall-Ozawa
HCS: At Kestanesi Kabukları
MTO: Metanol-Olefin
MSR: Metanol Buhar Reformlama
MvK: Mars–van Krevelen
NH₃: Amonyak
OECD: Ekonomik İş Birliği ve Kalkınma Teşkilatı

PAH: Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar

PP: Polipropilen

Py-GC/MS: Piroliz-Gaz Kromatografisi/Kütle Spektrometrisi

SCPB: Şeker Kamışı Küşpesi

SCR: Seçici Katalitik İndirgeme

SEM-EDX: Taramalı Elektron Mikroskobu Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi

TCD: Isıl İletkenlik Dedektörü

TCE: Trikloroetilen

TEM: Geçirimli Elektron Mikroskobu

TGA: Termogravimetrik Analiz

TPO: Sıcaklık Programlı Oksidasyonu

VOC: Uçucu Organik Bileşikler

XRD: X-ışını Difraktometresi

ZrO₂: Zirkonyum Oksit

1.GİRİŞ

Ülkelerin temel hedeflerinden biri ekonomik büyümeyi sağlayarak toplumun refah düzeyini artırmaktır. Bu hedef doğrultusunda enerji kaynaklarının güvenilir, sürdürülebilir ve çevre dostu olması büyük önem taşımaktadır. Özellikle son yıllarda artan enerji talebi, fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olması ve çevresel etkilerinin giderek daha belirgin hale gelmesi, enerji politikalarında sürdürülebilirlik kavramını ön plana çıkarmıştır. Geçmişte enerji ihtiyacının büyük bir bölümü petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtlardan karşılanırken, bu kaynakların yoğun kullanımı küresel ısınma, sera gazı emisyonlarının artışı ve iklim değişikliği gibi önemli çevresel sorunlara neden olmuştur. Ayrıca fosil yakıtların yenilenemez nitelikte olması, uzun vadede enerji arz güvenliğini de tehdit etmektedir. Bu nedenle çevresel etkileri daha düşük, sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik çalışmalar hız kazanmıştır (Bilgiç vd., 2021). Günümüzde hem Türkiye’de hem de dünyada sanayi, ulaşım, tarım ve konut sektörlerinde enerjiye olan bağımlılık sürekli artmaktadır. Artan enerji ihtiyacının güvenli, ekonomik ve çevreye duyarlı yöntemlerle karşılanabilmesi amacıyla fosil yakıtların yerini giderek yenilenebilir enerji kaynakları almaya başlamış ve bu dönüşüm enerji politikalarının temel unsurlarından biri haline gelmiştir (Arı ve Yılmaz, 2023).

Yenilenebilir enerji kaynakları, sürdürülebilir enerji sistemlerinin temel bileşenlerinden biri olarak günümüzde büyük önem taşımaktadır. Bu kaynaklar, doğal süreçlerle sürekli yenilenebilmeleri ve çevresel etkilerinin fosil yakıtlara kıyasla daha düşük olması nedeniyle temiz enerji kaynakları olarak değerlendirilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, sera gazı emisyonlarının azaltılması, enerji arz güvenliğinin sağlanması ve sürdürülebilir kalkınmanın desteklenmesi açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bununla birlikte, yüksek ilk yatırım maliyetleri, enerji üretiminin hava koşullarına bağlı olarak değişkenlik göstermesi ve enerji depolama sistemlerine duyulan ihtiyaç gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Ancak teknolojik gelişmeler, üretim kapasitesinin artması ve yenilenebilir enerji sistemlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte yatırım maliyetlerinin zaman içerisinde azalması beklenmektedir. Bu durum, yenilenebilir enerji kaynaklarının ekonomik açıdan daha rekabetçi hale gelmesine ve kullanımının giderek yaygınlaşmasına katkı sağlamaktadır. Günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları; güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal, biyokütle ve dalga enerjisi gibi farklı alanlarda yaygın olarak kullanılmakta olup, küresel enerji dönüşümünün en önemli unsurlarından biri olarak kabul edilmektedir (Yakıncı ve Kök, 2017).

Biyokütle, sürdürülebilir enerji üretiminde önemli bir yere sahip olan yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Yenilenebilir enerji kaynakları, doğal süreçler sonucunda belirli bir zaman dilimi içerisinde kendini yeniden oluşturabilen kaynaklar olarak tanımlanmaktadır. Genel kabul gören yaklaşıma göre, yaklaşık 100 yıl veya daha kısa sürede kendini yenileyebilen enerji kaynakları yenilenebilir olarak değerlendirilmektedir. Bu kapsamda biyokütle, doğal döngüler aracılığıyla yeniden oluşabilmesi nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer almaktadır. Biyokütle, kökenine ve kimyasal bileşimine bağlı olarak başlıca lignoselülozik biyokütle ve algal biyokütle olmak üzere iki grupta incelenmektedir. Lignoselülozik biyokütle; selüloz, hemiselüloz ve lignin gibi temel yapısal bileşenlerden oluşmakta olup, çoğunlukla odunsu bitkiler, tarımsal atıklar ve orman artıkları gibi karasal biyokütle kaynaklarında bulunmaktadır. Alg biyokütlesi ise protein, karbonhidrat ve lipit bakımından zengin bir yapıya sahip olup, mikroalg ve makroalg gibi sucul organizmalardan elde edilmektedir. Bu biyokütle kaynaklarının enerjiye dönüştürülebilmesi amacıyla çeşitli termokimyasal, biyokimyasal ve fiziksel dönüşüm yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında katalitik piroliz, biyokütlenin yüksek katma değerli biyoyağ, gaz ve biyokömür gibi ürünlere dönüştürülmesini sağlayan etkili ve yaygın olarak araştırılan termokimyasal dönüşüm teknolojilerinden biri olarak öne çıkmaktadır (Yaman, 2018).

Katalitik piroliz, biyokütlenin oksijensiz veya çok düşük oksijen içeren bir ortamda ısıtılarak katı, sıvı ve gaz ürünlere dönüştürüldüğü termokimyasal bir dönüşüm yöntemidir. Geleneksel pirolizden temel farkı, reaksiyon sürecinde katalizör kullanılmasıdır. Katalizörlerin varlığı, reaksiyon mekanizmasını değiştirerek biyokütlenin daha kontrollü bir şekilde parçalanmasını sağlar ve ürün dağılımını istenilen yönde iyileştirir. Ayrıca katalitik piroliz, uygun katalizör seçimine bağlı olarak daha düşük reaksiyon sıcaklıklarında veya daha kısa reaksiyon sürelerinde yüksek dönüşüm verimlerinin elde edilmesine olanak tanımaktadır. Katalizör kullanımı, biyoyağın oksijen içeriğinin azaltılması, enerji yoğunluğunun artırılması ve yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Bunun yanı sıra katalizörler, istenmeyen katran ve kok oluşumunu azaltarak daha yüksek kalitede sıvı ürün elde edilmesine katkıda bulunmakta ve proses verimliliğini artırmaktadır (Genel, 2023).

Artan petrol fiyatları, enerji arz güvenliği konusundaki endişeler ve sera gazı emisyonlarının neden olduğu çevresel sorunlar, biyokütle temelli enerji dönüşüm teknolojilerine olan ilgiyi önemli ölçüde artırmıştır. Bu doğrultuda, biyokütlenin sürdürülebilir ve çevre dostu bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmesine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır.

Farklı biyokütle hammaddelerinin elektrik, ısı, biyoyakıt ve yüksek katma değerli kimyasallara dönüştürülmesi amacıyla laboratuvar ve pilot ölçeklerde çok sayıda araştırma gerçekleştirilmiştir. Biyokütleden enerji üretiminde kullanılan başlıca dönüşüm teknolojileri arasında yakma, gazlaştırma, piroliz, karbonizasyon ve biyokimyasal yöntemler yer almakta olup, bu süreçler biyokütlenin özelliklerine ve hedeflenen son ürüne bağlı olarak farklı avantajlar sunmaktadır. Özellikle termokimyasal dönüşüm yöntemleri, biyokütlenin enerji ve değerli kimyasallara etkin bir şekilde dönüştürülmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Aishwarya vd., 2022).

2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

Fosil yakıt rezervlerinin giderek azalması, enerji arz güvenliği konusundaki endişelerin artması ve fosil yakıt kullanımının çevresel etkilerinin daha iyi anlaşılması, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi önemli ölçüde artırmıştır. Özellikle sanayileşme ve artan enerji tüketimiyle birlikte fosil yakıt kullanımına bağlı olarak atmosfere salınan sera gazlarının miktarı hızla yükselmiş, bu durum küresel ısınma, iklim değişikliği, hava kirliliği, deniz seviyesinin yükselmesi ve buzulların erimesi gibi ciddi çevresel sorunların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bunun yanı sıra, fosil yakıtların neden olduğu çevresel kirlilik, insan sağlığını olumsuz etkileyerek solunum yolu hastalıkları ve çeşitli kronik sağlık problemlerinin görülme sıklığını artırmaktadır. Bu nedenlerle, çevresel etkileri daha düşük ve sürdürülebilir enerji sistemlerine yönelik araştırmalar son yıllarda hız kazanmıştır (Sayed vd., 2023).

Yenilenebilir enerji kaynakları, doğal süreçlerle sürekli olarak yenilenebilmeleri nedeniyle uzun vadeli ve sürdürülebilir enerji arzının sağlanmasında önemli bir role sahiptir. Bu kaynaklar, fosil yakıtlara kıyasla daha düşük karbon emisyonuna neden olmaları ve çevresel etkilerinin sınırlı olması nedeniyle birçok ülkenin enerji politikalarında öncelikli hale gelmiştir. Bu doğrultuda devletler tarafından yenilenebilir enerji yatırımlarını teşvik eden çeşitli politika ve destek mekanizmaları uygulanmaktadır. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, biyokütle ve dalga enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları, doğrudan veya dolaylı olarak Güneş'ten gelen enerjiye dayanmaktadır. Bu nedenle güneş enerjisi, yenilenebilir enerji sistemlerinin temel enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin yaygınlaştırılması, enerji arz güvenliğinin artırılmasının yanı sıra karbon emisyonlarının azaltılmasına ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılmasına da önemli katkılar sağlamaktadır (Matur ve Köse, 2024). Güneşte meydana gelen nükleer füzyon reaksiyonları sonucunda büyük miktarda enerji açığa çıkmakta ve bu enerji elektromanyetik ışıınım şeklinde fotonlar aracılığıyla dünyaya ulaşmaktadır. Dünya yüzeyine ulaşan güneş enerjisi, doğrudan güneş panelleri ve güneş kolektörleri aracılığıyla elektrik ve ısı enerjisine dönüştürülebilmektedir. Ayrıca rüzgâr enerjisi, hidroelektrik enerji ve biyokütle gibi birçok yenilenebilir enerji kaynağı da dolaylı olarak güneş enerjisinden beslenmektedir. Bu nedenle güneş, yenilenebilir enerji sistemlerinin temelini oluşturan birincil enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir (Hassan vd., 2024).

2.1. Yenilenebilir Enerjinin Tarihçesi

Yenilenebilir enerjinin tarihine baktığımızda MÖ. 2000'lere kadar uzanmaktadır. Antik Mısır ve Mezopotamya'da insanlar gemileri hareket ettirebilmek için rüzgâr enerjisinden faydalanmıştır. Aynı dönemde insanlar sulama yapabilmek için yel değirmenlerinden faydalanmıştır. Yenilenebilir enerjinin tarihi insanlığın erken dönemlerinde karşımıza çıkmaktadır. Yakın tarihte ise insanlar yenilenebilir enerjiyi daha geniş alanlarda kullanmışlardır. Bu durum Orta Çağ veya Avrupa'nın aydınlanmaya başladığı dönemlerde karşımıza çıkmaktadır. Bu dönemlerde, yani Rönesans döneminde, tahılı öğütmek, demir dövmek ve suyu kullanabilmek için rüzgâr enerjisinden faydalanılmıştır. Sanayi devrimiyle birlikte ilgi petrol ve kömür gibi alanlara yönelmiştir. Belli bir zaman sonra petrol ve kömürün çevre ve insan sağlığına zararları fark edilerek yeni bir enerji arayışına girilmiş, bunun sonucunda yenilenebilir enerjiye olan ilgi daha da artmıştır (Özsoy, 2024).

Gelişen teknoloji ve fosil kaynaklı enerji alanında yaşanan krizler devletleri yenilenebilir enerjiye yöneltmiştir. Fosil yakıt kaynaklı enerji alanında yaşanan bu kriz 1970'teki petrol krizidir. Bu dönemlerde rüzgâr ve güneş enerjisi alanlarında gelişmeler yaşanmaya başlamıştır (Özsoy, 2024).

2.2. Türkiye ve Dünyadaki Yenilenebilir Enerji Durumu

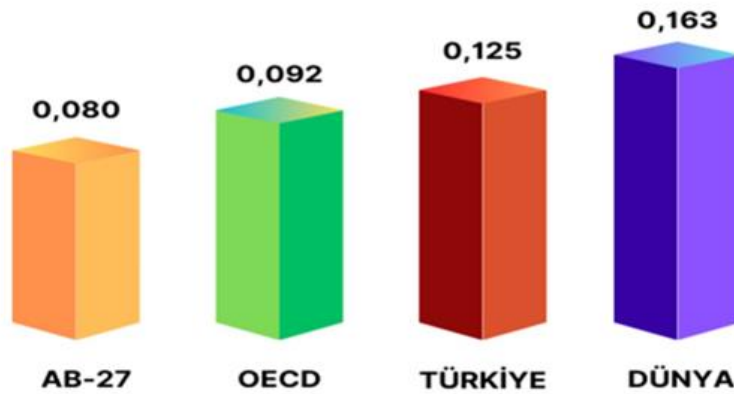
Sera etkisine neden olan gazların %60'ı enerji üretiminden kaynaklandığı için, iklim değişikliğine neden olan temel bileşenlerden biri enerji üretimi olarak görülmektedir. Elektrik üretiminde kullanılan kömür, petrol ve doğal gaz gibi karbon bazlı fosil yakıtlar, büyük miktarda sera gazı emisyonuna neden olur. Bugün, toplam küresel elektrik üretiminin %23,7'si yenilenebilir kaynaklardan sağlanmıştır. Türkiye'de, elektrik enerjisi üretim sürecinde kömür ve doğal gaz ilk sırayı alır. Sonrasında barajlar ve hidroelektrik santralleri aracılığıyla elektrik üretimi gelir. Güneş enerjisi, rüzgâr, jeotermal ve diğer enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimindeki payları %10'u aşmaz. Ancak son zamanlarda yenilenebilir enerji kaynakları alanında gelişmeler yaşanmıştır. Türkiye'de 2019 yılından bu yana toplam elektrik üretiminin yaklaşık %48'i yenilenebilir kaynaklardan temin edilmektedir. Hidrolik enerji bunun en büyük kısmını oluşturur. Eylül 2019 sonundan itibaren Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayımlanan rapora göre, elektrik üretiminde kullanılan kaynaklara göre elektriğin, %31,4'ü hidrolik enerji, %28,6'sı doğal gaz, %22,4'ü kömür, %8,1'i rüzgâr, %6,2'si güneş, %1,6'sı jeotermal ve %1,7'si diğer kaynaklardan sağlanmıştır (Önder, 2021). Dünyada ve Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş her geçen gün artmaktadır. 2000 yılında Türkiye'de

11.288 MW yenilenebilir enerji üretilmişken, 2020’de bu oran 49.368 MW’a yükselmiştir. Türkiye’nin Ulusal Yenilenebilir Enerji Eylem Planı’na göre, 2023 yılında 61.000 MW yenilenebilir enerjinin yaklaşık 159 terawatt-saat (TWh) elektrik üretmesi hedeflenmiştir. Türkiye’de yenilenebilir enerjiden toplam elektrik üretimi 2006 yılında 44.538 GWh olup, 2019’da 132.264 GWh’ye yükselmiştir. 2006 yılında Türkiye’deki toplam yenilenebilir enerji 13.185 MW kurulu güce sahipken, 2020’de 49.368 MW kurulu gücüne ulaşılmıştır. Bu potansiyel ve yetenek, fosil yakıtlar yerine yenilenebilir enerji üretimi ve tüketiminde hızlı bir artış sağlamıştır. 2021 yılına göre kullanım: baraj ve normal akarsuların toplam gücü 31.436,3 MW; rüzgâr enerjisi 9929,3 MW; güneş enerjisi 7324,1 MW; jeotermal 1650,2 MW; biyokütle 1415,4 MW’tır. Bu verilerle, Türkiye’deki kurulu kapasitenin yarısından fazlasının konvansiyonel enerjiden olduğu anlaşılmaktadır (Acaroğlu ve Güllü, 2022). Türkiye’nin birincil ve nihai enerji yoğunluğu verileri Tablo 2.1’de; 2024 yılı birincil enerji yoğunlukları karşılaştırılması ise Şekil 2.1’de verilmiştir (ETKB ENVER, 2026).

Tablo 2.1. Türkiye’nin birincil ve nihai enerji yoğunluğu

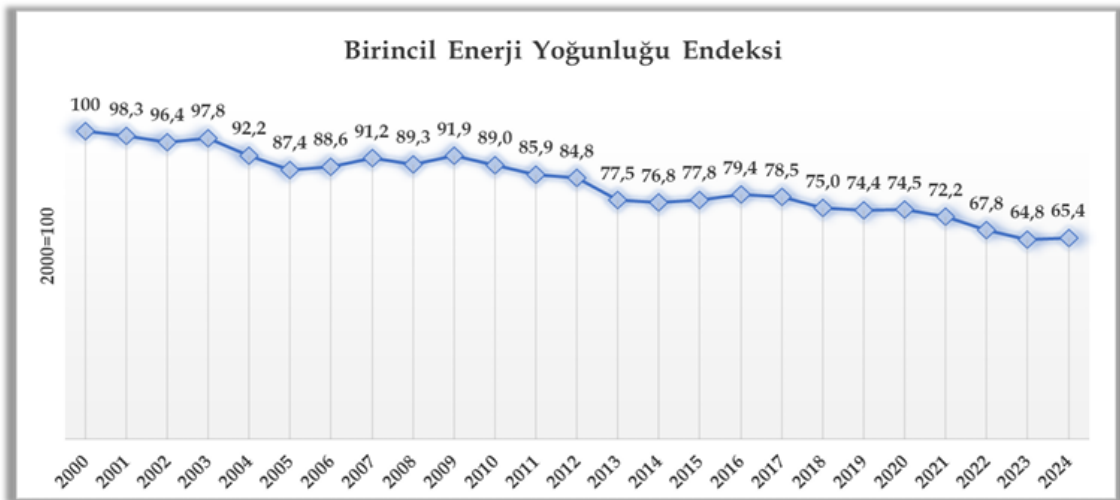
Göstergeler (tep/bin 2015\$)	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
Birincil Enerji Yoğunluğu	0,192	0,168	0,171	0,149	0,143	0,139	0,130	0,124	0,125
Nihai Enerji Yoğunluğu	0,149	0,133	0,129	0,115	0,111	0,108	0,099	0,095	0,098

2024 Yılı Birincil Enerji Yoğunluğu (tep/bin 2015\$)

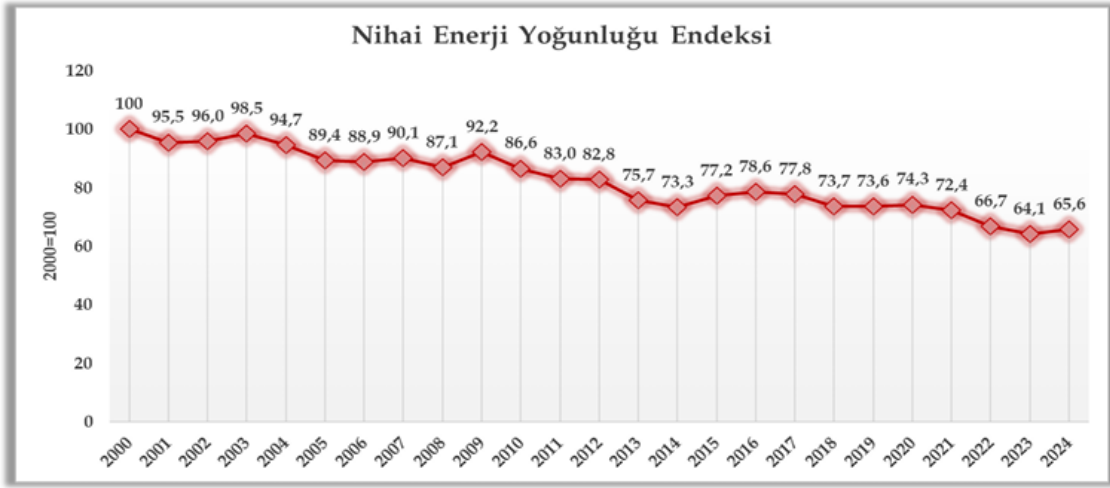


Şekil 2.1. 2024 yılı birincil enerji yoğunlukları karşılaştırılması

Yenilenebilir enerji kullanımının gerekliliği özellikle E7 ülkeleri için (Çin+Hindistan+Brezilya+Rusya+Endonezya+Meksika+Türkiye) hayati bir önem taşımaktadır. Özellikle, yenilenebilir enerjiye geçiş için talep ve arz oranı, enerji tüketiminin GSYİH oranı, enerji üretim esnekliği, enerji tüketimi esnekliği, enerji dönüşüm verimliliği ve yeşil finansman yoluyla Ar-Ge yatırımı çok önemlidir. Bulgular ayrıca yeşil fon yatırımının Çin’de %5, Hindistan’da %17, Türkiye’de %11, Rusya’da %7, Meksika’da %18,6 ve Endonezya’da %3,1 olduğunu göstermektedir (Wang vd., 2022). Afrika ülkeleri GSYİH performanslarının büyük kısmını hizmet sektöründen elde etmektedir. Ayrıca, yenilenebilir enerji, bu ekonomilerin artan karbon emisyonlarından kaynaklanabilecek çeşitli çevresel sorunları aşması için de önemlidir. Net sıfır emisyon yolunda %100 yenilenebilir enerjiye geçiş ihtiyacına paralel olarak, Afrika ülkelerinin çoğunluğu bol miktarda yenilenebilir enerji kaynağına sahiptir (İbrahim vd., 2022). Çin, Amerika Birleşik Devletleri, Brezilya, Hindistan, Almanya, Japonya, Kanada, İspanya, Fransa, İtalya, Türkiye, Rusya, Birleşik Krallık, Avustralya ve Vietnam gibi 15 ülke dünyanın toplam kurulu yenilenebilir enerji kapasitesinin %80’inden fazlasını (3.099.959 MW) oluşturmaktadır. Çin 1.453.701.25 MW ile lider konumda, ardından ABD 387.548.59 MW ile ve Brezilya 194.084.66 MW ile gelmektedir. Güneş enerjisi yenilenebilir enerji payına en büyük katkı sağlayan kaynak olup, küresel yenilenebilir enerji kapasitesinin %36,67’sini temsil ederken, onu %32,76 ile hidroenerji ve %26,29 ile rüzgâr enerjisi takip etmektedir. Biyoenerji, jeotermal ve deniz enerjisi sırasıyla %3,88, %0,38 ve %0,01 katkı sağlamaktadır (Saeed ve Siraj, 2024). Birincil enerji yoğunluğu endeksi verileri Şekil 2.2’de; nihai enerji yoğunluğu endeksi verileri de Şekil 2.3’te verilmektedir (ETKB ENVER, 2026).



Şekil 2.2. Birincil enerji yoğunluğu endeksi



Şekil 2.3. Nihai enerji yoğunluğu endeksi

Biyokütle bugün dünyada en yaygın kullanılan yenilenebilir enerji kaynağıdır. Farklı yöntemlerle dönüştürülerek katı, sıvı ve gaz halde kullanılabilir. Biyokütle enerjisi, elektrik, ısı, yakıt gibi çeşitli enerji ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılmaktadır. Biyokütle kaynakları arasında tarla, gıda endüstrisi, hayvan ve bitki atıkları bulunmaktadır. Türkiye'nin toplam biyokütle enerji potansiyeli yaklaşık 33 milyon ton petrol eşdeğeri (MTEP), kullanılabilir biyokütle potansiyeli ise yaklaşık 17 MTEP'tir. Kullanılabilir biyoenerji kaynaklarından elektrik üretim potansiyeli 2010 yılında 73 MW olup, kurumsal gelir ve 280.000'den fazla istihdamı temsil etmektedir (Toklu, 2017). Biyokütle atıkları dünya genelinde büyük miktarlarda üretilmektedir. Yıllık olarak en çok üretilenler pirinç samanı (yaklaşık 731,3 milyon ton), buğday samanı (354,34 milyon ton), şeker kamışı (180,73 milyon ton) ve mısır sapı (128,02 milyon ton)'dır. Buğday ve pirinç samanının en büyük üretimi Asya'da gerçekleşirken, mısır sapı ve şeker kamışının en büyük üreticisi Amerika Birleşik Devletleri'dir. İstatistiklere göre, Avrupa'da yılda yaklaşık 950 milyon ton biyokütle üretilmekte ve bu nedenle petrol yakıtına eşdeğer yaklaşık 300 milyon ton yakıt üretilmektedir. Bu veriler, biyokütle atıklarının Avrupa'nın toplam petrol tüketiminin yaklaşık %65'ini sağlayabileceğini göstermektedir (Kalak, 2023).

Yakıt ve kimya endüstrileri, hidrojen kullanan en önemli sektörlerdir. Her iki sektörde de fosil yakıt bazlı kaynakların kullanılması nedeniyle CO₂ emisyonu oldukça yüksektir. Enerji uygulamalarında kritik bir rol oynamanın yanı sıra, H₂ ayrıca kimya endüstrisinde, özellikle amonyak ve metanol üretiminde önemli bir rol oynamaktadır. Bu kaynakların üretiminde çeşitli termokimyasal yöntemlerde katalizörlerin kullanılması, katalizörlerin enerji verimliliğini ve üretim verimliliğini artırması açısından önemli bir rol oynamaktadır. Biyokütlenin

gazlaştırılması, karbon nötr biyokütle hammaddesi kullanarak yeşil hidrojen üreten termokimyasal yöntemlerden biridir. Katalizörler, biyokütlenin gazlaştırılması ve FT (Fischer-Tropsch) reaksiyonu gibi birçok süreçte kilit rol oynamaktadır. Biyokütlenin gazlaştırılmasında öncelik olarak, alkali ve toprak alkali metal katalizörler, Ni bazlı katalizörler, doğal mineral katalizörler ve atık yan ürünler katalizör öncüsü olarak kullanılabilir. Ancak, bu katalizörlerin her birinin, süreci ve sentez gaz verimini artırması için geliştirilmesi gereken yönleri vardır. STEEP (Sosyal+Teknolojik+Ekonomik+Çevresel+Politik analiz modeli) analizi sonucunda, katalizör geliştirme ve ticari uygulamaları üzerine akademik çalışmaların aynı anda ilerlemediği sonucuna varılmıştır. Buna karşılık, STEEP analizi, özellikle biyokütlenin gazlaştırılması için katalizör geliştirilmesinin gerekli olduğunu ve endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğinin gerekliliğini göstermektedir. Daha yeşil ve sürdürülebilir bir geleceğe ulaşmak için, şu anda kullanılan katalizörlerin daha kararlı, verimli, ekonomik ve yeniden kullanılabilir hale gelmesi ve enerji verimli süreçlere katkı sağlaması gerekmektedir (Alptekin ve Çeliksaş, 2022).

2.3. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Türleri

Yenilenebilir enerjinin birçok çeşidi vardır. Bunlar rüzgâr, güneş, dalga, hidrolik ve jeotermal gibi enerji çeşitleridir. Bu enerji türleri hakkında detaylı bilgi alt başlıklar halinde aşağıda özetlenmiştir.

2.3.1. Güneş enerjisi

Güneşte meydana gelen füzyon reaksiyonları sonucunda ısı enerjisi açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan bu ısıнын büyük bir kısmı uzaya yayılmaktadır. Çok küçük bir kısmı ise dünyaya ulaşmaktadır (Yolcan ve Köse, 2020). Güneş enerjisi kullanımı son yıllarda oldukça yaygındır. Güneş enerjisinden sağlanan ısı enerjisi günlük yaşamda kullanılırken, güneş enerjisi dönüştürülerek elde edilen elektrik ise aydınlatma, cihazların ve makinelerin çalışması gibi alanlarda kullanılmaktadır (Erdoğan, 2014). Güneş enerjisinin verimi hava karardığında ya da bulutlu olduğunda, ayrıca mevsimlere göre güneş ışınlarının geliş açısı değiştiğinde azalabilmektedir. Bu da güneş enerjisinin sürekliliğini engelleyen bir dezavantajdır. (Yolcan ve Köse, 2020)

Tablo 2.2. Güneş enerjisinin avantajları ve dezavantajları (Eldem, 2017)

Avantajları	Dezavantajları
Tükenmeyen enerjidir.	İlk yatırım maliyeti yüksektir.
Temiz olması nedeniyle çevreyi kirletmez.	Süreklilik yoktur. Bu yüzden depolanması gerekir.
Enerji ihtiyacını sağlamak bakımından hemen her yerdedir.	Kurulum için geniş alanlara ihtiyaç vardır.
Dışa bağımlılığa azaltır.	Kışları ve geceleri verim azalır.
İşletme gideri düşüktür.	

2.3.2. Rüzgâr enerjisi

Güneş ışınları dünyaya ulaşırken basınç farkı meydana gelir ve oluşan bu basınç hareketleri havada rüzgâr oluşmasına sebep olur. Bu rüzgâr hareketleri de rüzgâr enerjisinin oluşmasını sağlar. Rüzgârla oluşan bu enerji, rüzgâr türbinleri yardımıyla elektrik enerjisine çevrilerek kullanılabilir hale getirilir. Bu sayede fosil kaynaklı enerjiye bağımlılık azalır. Fosil enerji kaynaklarının kullanımının azalmasıyla rüzgâr enerjisi sürdürülebilir ve temiz bir enerji sunmaktadır (Roga vd., 2022). Rüzgâr enerjisi, enerji bakımından iki farklı şekilde kullanılabilir. Bunlar mekanik enerji ve elektrik enerjisidir. Mekanik enerji olarak kullanımı çok daha eskilere dayanmaktadır. Elektrik enerjisi olarak 20. YY'da yoğun olarak kullanılmaya başlanmıştır. Sanayi devrimi ile birlikte enerjiye olan ihtiyaç daha da artmıştır. (Singh vd., 2022).

Tablo 2.3. Rüzgâr enerjisinin avantajları ve dezavantajları (Roshchina, 2021)

Avantajları	Dezavantajları
Temiz enerji kaynağıdır.	Rüzgârın sürekli olmaması verim değişikliğine sebep olabilir.
Enerji çeşitliliği artacağı için fosil yakıtların kullanılabilirlik ömrünü artırır.	Türbinler gürültüye sebep olabilir.
Şehir merkezinden uzak yerlere elektrik sağlamak için imkân sağlar.	Belli bölgedeki haberleşmeyi olumsuz etkileyebilir.
Yatırım sonucu uzun vadeliidir.	Kuşların ölümüne neden olabilir.

2.3.3. Hidrolik enerji

Hidrolik enerji suyun potansiyel enerjisinin kinetik enerjiye dönüştürülmesiyle elde edilmektedir. Kinetik enerji, türbinler yardımıyla elektrik enerjisine çevrilmektedir. Bu su kaynağı barajlardan ve akarsulardan elde edilmektedir. İklim şartlarına göre enerji üretiminde değişiklikler meydana gelmektedir. Uzun ömürlü olması ve veriminin yüksek olması sebebiyle günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır (Oğuz ve Akkurt, 2017).

Tablo 2.4. Hidrolik enerjinin avantajları ve dezavantajları (Junior vd., 2013)

Avantajları	Dezavantajları
Dünyanın birçok yerinde su bulunur.	Uygulama maliyeti yüksektir.
Temiz enerji kaynağıdır.	Bölgenin yapısını değiştirebilir.
Sera gazı etkisi, kömür ve doğal gaza göre daha düşüktür.	Enerji potansiyeli her yerde yüksek değildir.
Sürekli elektrik üretebilir.	Ekosistemin yapısını değiştirebilir.
Güvenilirdir.	Devre dışında kalması durumunda ciddi maliyetlere sebep olur.

2.3.4. Jeotermal enerji

Yeraltındaki magma hareketliliği sonucu meydana gelen sıcak su, gaz ve buharın çeşitli yöntemlerle kullanılmasına jeotermal enerji denir. Çevreye zararlı gaz salmaması sebebiyle çevre dostu bir enerji kaynağıdır. Isınmada, elektrik üretiminde, ısı pompalarında ve endüstri gibi alanlarda kullanılmaktadır (Kamacı ve Akça, 2021). Dünyanın çekirdeğinde yüksek ısı olmasına rağmen günümüzdeki teknoloji bu ısıyı tam verimle kullanabilecek durumda değildir. Bu yüzden buhar, sıcak su gibi kullanılabilir olan imkanlardan yararlanılmaktadır (Kamacı ve Akça, 2021). Jeotermal enerji suyun ısısı kullanılarak elde edilen enerjidir. Soğuk su kuyuya pompalar yardımıyla pompalanır, kuyunun içerisinden geçerken pompalanan su ısınır, enerji dönüşüm yöntemleri ile suyun ısısı elektriğe dönüştürülür. (Erdoğan, 2014).

Tablo 2.5. Jeotermal enerjinin avantajları ve dezavantajları (Şenpınar ve Gençoğlu, 2006)

Avantajları	Dezavantajları
Temiz ve sürdürülebilirdir.	Mevcut teknoloji, jeotermal enerjinin en derin ve en güçlü kaynağı olan magmadan doğrudan ısı elde edilmesine de henüz olanak vermemektedir.
Doğrudan kullanılabilir.	Kurulumu için geniş alanlar ve borular gerekmektedir.
Düşük sera gazı nedeniyle ekolojiktir.	Yaygın bir enerji türü değildir.
Genellikle ısıtma için kullanılır.	Yer altından çıkarılan asitli suyun çevreye hidrojen sülfür yayma ihtimali vardır.

2.3.5. Dalga enerjisi

Güneş ışınlarının yeryüzüne ulaşmasıyla basınç farkı oluşur. Bu basınç farkı rüzgarları oluşturur. Rüzgarlar da dalganın oluşmasında önemli bir faktördür. Oluşan bu dalganın kinetik enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanılır. Dalga enerjisi göletlerden, denizlerden ve okyanuslardan elde edilebilir (Erdoğan, 2014). Dalgaların özellikleri, deniz yüzeyine, meteorolojik durumlara, kıyı oluşumuna ve dünyadaki konumuna bağlı olarak değişebilir. (Barua ve Rasel, 2024). Dalga enerjisinden elde edilen güç potansiyel enerji olarak depolanır ve sonrasında elektrik enerjisi üretimi sağlanmaktadır (Erdoğan, 2014).

Tablo 2.6. Dalga enerjisinin avantajları ve dezavantajları (Bagher vd., 2015)

Avantajları	Dezavantajları
Tükenmeyen bir enerji kaynağıdır.	Santral yapım maliyeti yüksektir.
Dalga enerjisi çevre dostu bir enerji olmasının yanı sıra iklim gazları yaymaz.	Dalgaların şiddeti tahmin edilememesi sonucu güç üretim üniteleri zarar görebilir.
Uzun ömürlü santralleri vardır.	Bu teknoloji ekonomik olarak verimli değildir.
Ayın ve güneşin çekim alanına bağlı olarak oluşan dalgalardır.	Yeni teknolojiler olduğu için pahalıdır. Ayrıca kıyılarda olduğu için iletimi zordur.

3. BİYOKÜTLE ENERJİSİ

Biyokütle, biyokimyasal veya termokimyasal süreçlerle sıvı biyoyakıtlar (metanol, etanol vb.), gazlar (hidrojen, sentez gazı vb.) ve elektrik gibi enerji türlerine dönüştürülmektedir (Kalak, 2023). Biyokütle enerjisi kaynak bakımından bitkisel ve hayvansal olarak ikiye ayrılmaktadır. Odun, ayçiçeği, mısır, pamuk gibi bitkisel atıklar, hayvansal atıklar, şehirlerde elde edilen atıklar biyokütle kaynaklarına örnek verilebilir. Biyokütle enerjisi diğer enerji kaynaklarına alternatif bir enerjidir. Doğada bol miktarda bulunabildiği gibi, atıkların yok edilmesini de sağladığı için çevre temizliği bakımından önemlidir (Ürün ve Soyu, 2016). Biyokütle enerjisi elektrik üretiminde, yakıt kullanımında ve ısıtmada kullanılan çok yönlü bir enerji kaynağıdır (Al, 2021).

Sanayi devriminden bu yana, geleneksel fosil yakıtların artan kullanımının neden olduğu enerji krizi küresel bir sorun olmuştur. Daha ciddi çevresel sorunlarla birlikte, biyokütle geleneksel fosil enerjinin kademeli olarak ikame edilmesinde giderek daha önemli bir rol oynamaktadır ve bu da karbon nötrlük hedeflerine katkıda bulunmaktadır. ABD Enerji Bilgi İdaresi'nin tahminine göre, her yıl küresel kullanım için yaklaşık 100 milyar ton karasal biyokütle kaynağı ve 50 milyar ton sucul biyokütle bulunmaktadır. Ayrıca, küresel iklimin daha da kötüleşmesini önlemek için Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) biyoenerjinin gelecekteki küresel enerji sisteminin vazgeçilmez bir bileşeni haline gelmesini önermiştir (Zhang vd., 2023).

Sürdürülebilir bir enerji sistemi, enerji güvenliğini sağlamalı, rekabetçi ve etkili olmalı, ekonomik büyüme dinamiklerini desteklemeli, insan sağlığını dikkate almalı ve çevreyi korumalıdır. Bu nedenle, enerji ve çevre politikasındaki hedefler göz önünde bulundurulduğunda, yenilenebilir enerji kaynakları biyokütleyi organik hayvansal veya bitkisel maddeler olarak kapsamaktadır. Özellikle tarım, orman, sanayi, insan kaynaklı atıkların biyobozunabilir kısmı ile bu tür biyokütle kaynaklarının işlenmesi sonucu elde edilen diğer maddelerdir. Tarımsal biyokütle, artan CO₂ seviyelerini absorplama avantajına sahiptir. Biyokütle atığı, yenilenebilir enerji kaynağı olarak çeşitli teknolojiler kullanılarak biyoenerjiye dönüştürülmektedir (Kalak, 2023).

Son yıllarda, iklim değişikliği ile ilgili yapılan çalışmalar dünya çapında yaygın bir ilgi görmüştür. Sera etkisinin sebep olduğu iklim değişikliği, buzulların erimesi ve deniz seviyesinin yükselmesi gibi bir dizi sorunu tetiklemektedir. Sera gazları dünya çapında endişe konusudur ve karbon emisyonunun azaltılması birçok ülkenin ulusal stratejik planlamasında

önemli bir hedef haline gelmiştir. Biyokütle kaynaklarının etkin kullanımının, küresel karbon emisyonu azaltımı hedefine katkıda bulunması beklenmektedir (Yu vd., 2023). Mevcut teknolojik ilerleme, yeni alternatif enerji kaynaklarının kullanılması için birçok fırsat yaratmaktadır. Biyokütle kaynaklarının kullanımı, birçok kentsel ve kırsal alanda günlük olarak büyük miktarda toplanan atıkların yönetimi için umut vadetmektedir. Biyoenerji, biyokütle arıtımı sonucu termokimyasal veya biyokimyasal süreçlerde ısı, elektrik veya biyoyakıtlar (gaz, sıvı, katı halde) şeklinde üretilmektedir. (Kalak, 2023).

3.1. Biyokütlenin Önemi

Biyokütlenin enerji eldesi ve kimyasal üretimi için kullanılmasının önemi giderek artmaktadır. Biyokütle bitki ve ağaçların büyümesi gibi doğal organik süreçlerle 100 yıldan daha kısa bir sürede yeniden üretilbildiğinden yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir. Bu özelliğiyle, sınırlı rezervlere sahip olan ve iklim değişikliği gibi çevresel sorunlara yol açan fosil yakıtlardan ayrılmaktadır. Ayrıca, biyokütle enerjisinin kullanımı net sıfır karbon ayak izi sağlamaktadır; çünkü biyokütlenin yakılması sırasında açığa çıkan CO₂ miktarı, biyokütlenin büyüme sürecinde atmosferden emilen CO₂ miktarıyla dengelenmektedir. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'na göre, 2030 yılına kadar yenilenebilir enerjinin toplam enerji içindeki payının iki katına çıkarılması, enerji kaynaklı küresel CO₂ emisyonlarında %12'lik bir azalma sağlayacaktır. Bu nedenle biyokütle, sera gazı emisyonlarının azaltılmasında etkili bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca biyokütle enerjisi, organik atıkları faydalı enerjiye dönüştürerek hem atıkların değerlendirilmesini sağlamaktadır hem de düzenli depolama alanlarından kaynaklanan kirlilik ve sera gazı emisyonlarını azaltmaktadır. Ayrıca biyoyakıtların üretimi ve kullanımı; biyokütlenin yetiştirilmesi, hasadı, işlenmesi ve dağıtımı gibi alanlarda istihdam oluşturarak kırsal ekonomilerin gelişmesine katkı sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, biyoyakıt sektörünün büyümesi araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) faaliyetlerine, teknolojik yeniliklere ve altyapı yatırımlarına yönelik finansmanı teşvik etmekte, böylece ekonomik büyümeyi daha da desteklemektedir. Biyoyakıtların yaygın olarak kullanılması, daha çeşitli ve sürdürülebilir bir enerji sektörünün oluşmasına yardımcı olabilir. Bu durum yerel ekonomilere katkı sağlar, istihdam olanaklarını artırır ve genel ekonomik dayanıklılığı güçlendirir (Ali vd., 2024). Biyokütle, enerji ithalatını azaltmak, iş yaratmak ve kirliliği önlemek gibi çevresel, ekonomik ve siyasi faydalarıyla fosil yakıtlara uygulanabilir bir alternatif olarak kabul edilebilir (Pata vd., 2023).

Tablo 3.1. Biyokütlenin avantajları ve dezavantajları (Torkashvand vd., 2022; Sing vd., 2024)

Avantajları	Dezavantajları
Benzin ve dizelden çok daha az kirlilik oluşturur.	Enerji yoğunluğu fosil yakıtlara göre daha düşüktür.
Bu yakıtların temini için yeni yakıt istasyonları inşa edilmesine gerek yoktur.	Biyoyakıtların daha yüksek enerji verimine ulaşması için işlenmesi gerekir.
Kullanmak için araç motorlarında değişiklik yapılmasına gerek yoktur.	Yakıt amaçlı ürün yetiştirmek için tarlaların kullanılması, gıda kıtlığına yol açabilir.
Piroliz katı ürünü olan biyokömür toprak düzenleyicisi olarak kullanılabilir.	Biyokütle yetiştirmek için bol miktarda suya ihtiyaç duyulmaktadır.
Motor içindeki vuruntu oluşumunun azaltılmasına katkı sağlar.	
Biyoyakıtların hammadde maliyeti fosil yakıtların hammadde maliyetinden daha düşüktür.	

3.2. Lignoselülozik Biyokütle

Lignoselülozik biyokütle genellikle selüloz, hemiselüloz ve ligninden oluşan karasal bitki biyokütlesini ifade etmektedir. Lignoselülozik biyokütle, yakıtlar ve kimyasallar gibi fosil kaynaklara alternatiftir ve değerli bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilebilir. Lignoselülozik biyokütle, fiziksel, kimyasal ve biyolojik dönüşüm süreçleri olarak sınıflandırılan çeşitli tekniklerle gaz veya sıvı yakıtlara dönüştürülebilir. Gazlaşma, piroliz ve hidrotermal karbonlaşma, termokimyasal dönüşüm süreçlerini temsil etmektedir. Uygulamaları hedef ürünün türü (gaz, sıvı veya katı), oksidasyon ortamının kapsamı (kısmi veya anaerobik) ve hammadde türüyle (ıslak veya kuru) ciddi şekilde ilişkilidir (Lee vd., 2023).

Geleneksel olarak, ziraat atıkları açık alanlarda yakma yöntemiyle bertaraf edilmektedir; bu da hava kirleticisi ve toprak bozulması gibi çeşitli çevresel sorunlara yol açar. Enerji üretimi için, talaş, pirinç kabuğu ve şeker kamışı kalıntıları katı yakıt peletlerine sıkıştırılabilir, ancak ham biyokütle fosil yakıtlara kıyasla daha düşük kalorifik değerlere sahiptir. Lignoselülozik biyokütle enerji yoğunluğunu artırmak için, biyoetanol, biyodizel ve sentez gazı gibi biyoyakıtlara dönüştürülebilir. Ayrıca, lignoselülozik biyokütleden 200'den

fazla katma değerli bileşik sentezlenebilir; bunlardan butanol, laktik asit, gliserol, sorbitol, propandiol, süksinik asit ve itakonik asit gibi bazı kimyasallar endüstriyel ölçekte üretilir (Deng vd., 2023).

Lignoselülozik biyokütle sert ağaç ve yumuşak ağaç olarak ikiye ayrılır. Sert ağaçların (ağırlıkça %64'e kadar) ve yumuşak ağaçların (ağırlıkça %60'a kadar) ağırlık kaybı, sırasıyla 240-300 °C ve 240-330 °C sıcaklıklarda ciddi bir değişiklik gösterir. Sıcaklık 300 °C'ye çıktıkça H/C ve O/C oranları azalır. Termogravimetrik analiz, işlenmiş sert ağaçların ve yumuşak ağaçların sırasıyla 270-300 °C ve 300-330 °C sıcaklıklarda ciddi değişiklikler sergilediğini göstermektedir. Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopi analizi, sert ağaçlardaki selüloz bileşeninin yumuşak ağaçlara göre daha kolay bozunduğunu göstermektedir. Geçiş bölgesi, düşük katı verimi nedeniyle ahşabın işlenmesi için uygun bir işlem değildir (Lin vd., 2022).

3.2.1. Selüloz

Selüloz, bitkilerin hücre duvarında yer alan, doğada bol miktarda bulunan homojen bir polisakkarittir. ($C_6H_{10}O_5$) formülüne sahip suda çözünemeyen bir yapısı vardır (Yaman, 2018). Selüloz, biyokütle açısından önemlidir. Kendi kendini yenileyebilme, mikroorganizmalar tarafından parçalanabilme, toksik olmayan ve ucuz olan çevre dostu doğal bir polimerdir. Selüloz ormanlardan, tarımsal atıklardan ve yan ürünlerden elde edilir (Bilek vd., 2019).

Selülozun odun kaynaklarına örnek olarak sert ağaç (örneğin meşe, akçaağaç ve huş ağacı) ve yumuşak ağaç (örneğin çam, ladin ve göknar) verilebilirken, selülozun odun dışı bitki kaynakları arasında pamuk, kenevir, keten ve kenafın yanı sıra birincil ürünü selüloz lifi olan diğer bitkiler bulunur. Diğer selüloz kaynakları arasında hindistan cevizi, buğday, mısır, pirinç samanı ve palmye ağaçlarından elde edilen boş meyve salkımları gibi tarımsal atıklar ve kalıntıların yanı sıra yiyecek ve içecek sektöründen elde edilen yan ürünler, bira fabrikasında kullanılmış tahıllar, preslenmiş şeker kamışı küspesi ve kâğıt yapım çamuru gibi belediye ve endüstriyel atıklar yer alır (Abolore vd., 2024).

3.2.2. Hemiselüloz

Hemiselüloz, hücre duvarında selülozla birlikte bulunan dallanmış bir yapıdır. ($C_5H_8O_4$) kimyasal yapısına sahip suda çözünen bir polisakkarittir (Yaman, 2018). Hemiselüloz, kısa zincirli heterojen polisakkarit yapısını içerir ve lignoselülozik biyokütlenin %10-35'ini

oluşturur. Selüloz ile karşılaştırıldığında, 220-315 °C sıcaklıkta gerçekleşen hemiselülozun termal ayrışması kolayca yapılır (Yogalakshmi vd., 2022).

Odunun ikinci temel kimyasal bileşeni, “polyose” olarak da adlandırılan hemiselülozdur. Hemiselüloz, temel olarak 1,4- β bağlarıyla birbirine bağlanmış şeker birimlerinden oluşan ve selüloz ile yakından ilişkili heteropolisakkarit yapısındadır. Kuru odun kütlelerinin genellikle %25-35’ini oluşturan hemiselülozun oranı, yumuşak odunlarda yaklaşık %28 iken sert odunlarda %35’e kadar ulaşabilmektedir. Morfolojik açıdan hemiselüloz, bitki hücre duvarındaki selüloz ile ve odunlaşmış hücre duvarlarındaki lignin ile güçlü bir ilişki içerisindedir. Hemiselüloz; glikoz, mannoz, galaktoz, ksiloz, arabinoz, 4-o-metil glukuronik asit ve galakturonik asit gibi çeşitli monosakkaritlerin polimerleşmesiyle oluşan bir polisakkarit karışımıdır. Ayrıca, ana polimer zincirine bağlı kısa yan zincirler içerdiğinden dallanmış bir yapıya sahiptir. Selüloza kıyasla daha düşük molekül ağırlığına ve daha düşük polimerleşme derecesine (100-200 birim) sahip olan hemiselüloz, bazik ortamlarda büyük ölçüde çözünmekte ve kolaylıkla hidrolize edilebilmektedir (Yargıç, 2017).

3.2.3. Lignin

Lignin, bitki hücre duvarında selüloz ve lignin ile birlikte bulunan bir polimerdir. Bitkilere sertlik ve su geçirmezlik kazandırır, alkol türevlerinin rastgele birleşmesiyle oluşur ve suda çözünmez (Yaman, 2018). İzole edilmiş ligninden elde edilebilecek yüksek katma değerli ürünler arasında düşük maliyetli karbon fiberler, mühendislik plastikleri ve termoplastik elastomerler, polimerik köpükler ve membranlar ile günümüzde büyük ölçüde petrolden üretilen çeşitli yakıtlar ve kimyasallar bulunmaktadır. Bu lignin türevi ürünlerin ekonomik açıdan rekabetçi olması ve petrol bazlı muadilleriyle benzer performans göstermesi gerekmektedir. Ancak her bir ürün grubunun kendine özgü teknik ve ekonomik zorlukları vardır. Yenilenebilir lignin bazlı polimerlerin geliştirilmesi, istenen kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip lignin içeren özel biyoenerji bitkilerinin geliştirilmesiyle birlikte, ileri işleme teknolojilerinin kullanılmasını gerektirir. Yakıt ve kimyasal üretimi açısından ise ligninin depolimerizasyonu ve yükseltilmesine yönelik; termokimyasal yöntemler ile homojen ve heterojen kataliz gibi çeşitli stratejiler geliştirilmiştir. Ligninin çok işlevli yapısı, geçmişte kapsamlı ayırma ve saflaştırma süreçlerini zorunlu kılmış ve bu durum birden fazla ürün akışının elde edilmesini karmaşık hale getirmiştir. Bununla birlikte, daha yüksek yapısal homojenlik ve hedefe yönelik işlevsellik sağlayacak şekilde biyokütle hammaddelerinin tasarlanması, bu zorlukların azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Ragauskas vd., 2014).

Tablo 3.2. Lignoselülozik materyalin içeriği (Bilek vd., 2019)

Materyal	Selüloz (%)	Hemiselüloz (%)	Lignin (%)
Sert odun	40-55	24-40	18-25
Yumuşak odun	45-50	25-35	25-35
Jüt	61-71,5	13,6-20,4	12-13
Keten	71	18,6-20,6	2,2
Kenevir	70,2-74,4	17,9-22,4	3,7-5,7
Rami bitkisi	68,6-76,2	13,1-16,7	0,6-0,7
Sisal bitkisi	67-78	10-14,2	8-11
Mısır koçanı	33,7-41,2	31,9-36	6,1-15,9
Şeker kamışı küspesi	40-41,3	27-37,5	10-20
Buğday samanı	32,9-50	24-35,5	8,9-17,3
Pirinç kabuğu	36,2-47	19-24,5	9,9-24
Mısır sapı	35-39,6	16,8-35	7-18,4
Arpa samanı	33,8-37,5	21,9-24,7	13,8-15,5
Pamuk sapı	38,4-42,6	20,9-34,4	21,45
Muz atığı	13	15	14
Kahve atığı	33,7-36,9	44,2-47,5	15,6-19,1
Fındık kabuğu	25-30	22-28	30-40
Sorgum samanı	32-35	24-27	15-21
Yulaf samanı	31-35	20-26	10-15

3.3. Algal Biyokütle

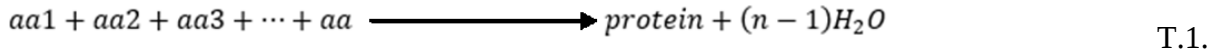
Algler, klorofil gibi pigmentler içeren ve fotosentez yapabilen, sucul ökaryot, hızlı büyüyen, bitki benzeri organizmalar grubudur (Bhushan vd., 2023). Algler son derece önemli bir ekolojik rol oynamaktadır. Trofik ağların temelini oluştururlar, su ortamlarındaki birçok organizmanın solunumunu sağlayan oksijen üretirler, CO₂'yu emerler ve binlerce tür için sığınma alanı ve yaşam alanı olarak hizmet verirler. Birçok tür deniz suyundaki organik kirleticileri de absorbe edebilir. Algler yüzyıllardır insanlar tarafından gıda, gübre, yem kaynağı olarak ve antifungal, antiviral, antikanser ve antibakteriyel özelliklere sahip bileşiklerin ekstraksiyonu için kullanılmıştır. Son yıllarda bazı türler biyoyakıt üretimi için kullanılmıştır. Küçük oranlarda alglerin sığır yemleriyle karıştırılmasının, sindirim aktivitelerinden

kaynaklanan metan emisyonlarını %95'ten fazla azaltabileceği gösterilmiştir (Fernandez vd., 2023).

Algal biyokütle mikroalg veya makroalg türlerinden elde edilen organik madde kütesidir. Algler fotosentezle karbondioksiti kullanarak yüksek hızlarda büyüme gösteren yenilenebilir enerji kaynağıdır. Algler içerik olarak yağ, protein, karbonhidrat, vitamin ve mineral pigmenti bakımından oldukça zengindir. Bu içeriği nedeniyle kozmetik, sağlık ürünleri, besin takviyeleri, eczacılık, kimya gibi birçok alanda kullanılır. Ayrıca enerji gibi alanlarda insanoğlunun karşılaşabileceği birçok problem için çözüm kaynağıdır (Hasar, 2021). Algler yapısında protein, karbonhidrat ve lipit gibi moleküller içerir.

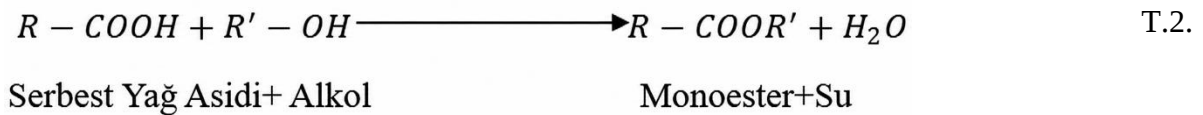
3.3.1. Proteinler

Proteinler amino asit adı verilen yapılardan oluşmuştur. Amino asidin yapısında hem amino grubu hem de karboksil grubu bulunur. Bu yapılar birbirine peptit bağlarıyla bağlanır. Yapılarında azot içermeleri sebebiyle azotlu yapılar da denir. Hücrede metabolik olaylarda görev aldığı gibi, yerine göre enerji verici de olabilir. Yapısında karbon, hidrojen, oksijen ve azot bulunur. Bazı durumlarda fosfor ve kükürt de bulunabilir (Watfort ve Wu, 2018).



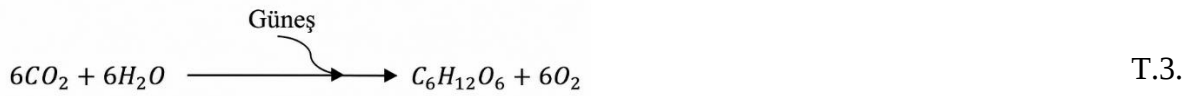
3.3.2. Yağlar

Yağlar karbon, hidrojen ve oksijen gibi atomlardan oluşan ve bu atomlarla organik bileşik oluşturan yapılardır. Yağlar lipidler olarak da ifade edilir. Doymuş yağ asitleri ve doymamış yağ asitleri olarak ikiye ayrılır. Vücut için önemli bir enerji kaynağıdır. Bu grupta bilinen en önemli bileşikler trigliseritlerdir. Yağlar gliserin ($C_3H_5(OH)_3$) ve yağ asitlerinin ($R-COOH$) esterleşmesi ile meydana gelir (Topuz ve Mert, 2022).



3.3.3. Karbonhidratlar

Karbonhidratlar hem enerji sağlayan hem de canlının yapısına katılan karbon, hidrojen ve oksijenden oluşan organik bileşiklerin genel adıdır. Karbon, hidrojen ve oksijen dışında başka atomlar da bulunabilir. Karbonhidratlar hayvansal ve bitkisel kökenlidir. Daha çok bitkisel kökenlidir. Fotosentez sonucu oluşurlar. Karbonhidratlar molekül sayısına göre monosakkarit, disakkarit ve polisakkarit olarak e ayrılır. Aşağıda su ve karbondioksit tepkimesi görülmektedir. Ayrıca bu tepkimede güneş ışığı da kullanılmaktadır. rn olarak glikoz ve oksijen oluşmaktadır (Kanber, 2025)



Tablo 3.3. Lignosellozk biyoktle ve algal biyoktlenin karşılaştırılması

Özellik	Lignosellozk biyoktle	Algal biyoktle
Kaynaklar	Tarımsal atıklar, odun, enerji bitkileridir.	Mikroalgler, makroalgler
Ana bileşenler	Selüloz, hemiselüloz, lignin	Lipitler, karbonhidratlar, proteinler
Enerji rnleri	Biyoetanol, biyogaz, piroliz yağı	Biyodizel, biyoetanol, biyogaz, hidrojen
Avantajları	çok bol bulunur, ucuz, tarımsal atıkların değerlendirilmesi	Yüksek biyoktle verimi, tarım arazisi gerektirmez, CO ₂ tutar.
Dezavantajları	Lignin içeriği nedeniyle işlenmesi zordur. n işlem gerekebilir.	Hasat, kurutma ve yağ çıkarma maliyetlidir.
Kullanım alanları	Enerji, biyoplastik, kompozit malzemeler, kimyasallar	Enerji, gıda takviyeleri (protein, omega-3), ilaç, kozmetik
Çevresel katkı	Atıkların geri dönüşümü	CO ₂ giderimi, atık su arıtımı

3.4. Biyokütlenin Termal Parçalanması

Biyokütle termal dönüşümü, ısı, elektrik ve ulaşım için yakıt üretiminde önemli bir kullanım potansiyeline sahiptir. Biyokütle termal dönüşümü, çok sayıda fosil yakıt kullanmak yerine, artan enerji yoğunluğundan dolayı enerji kullanımı için önemli olabilir. Bu nedenle teknoloji, sera gazı emisyonlarının azaltılması ve iklim değişikliğiyle ilgili sorunların hafifletilmesi hedeflerine önemli ölçüde katkıda bulunabilir. Ayrıca, biyokütlenin karbon yakalama ve depolama veya biyokömür üretimi ile termal dönüşümü, uygun karbon azaltmada yardımcı olabilir. Çünkü bitkiler gelişirken CO₂ kullanır, bu da atmosferdeki serbest CO₂'yi gidermenin bir yoludur. Biyokütleyi çeşitli enerji ürünlerine dönüştürmek için dört ana termal süreç (yanma, gazlaştırma, piroliz ve karbonizasyon) vardır (Luo ve Zhou, 2025).

3.4.1. Karbonizasyon

Karbonlaştırma, biyokütlenin oksijensiz veya çok sınırlı bir oksijen ortamında ısıtılarak, uçucu bileşiklerin ayrıştırılması ve geriye yüksek karbon içerikli kömür gibi katı atık elde edilmesidir. Katı ürün olarak biyokömür, sıvı ürün olarak katran, gaz ürün olarak CO, CO₂, CH₄, H₂ gibi yapılar açığa çıkar (Yolcu, 2019). Hidrotermal karbonlaşma, biyokütle atıklarının termal dönüşümünde en umut vadeden ve geleceğe odaklı yöntemlerden biridir; çünkü nispeten düşük sıcaklıklar ve ön kurutma gerektirmeyen nemli hammaddelerin işlenmesi olasılığı nedeniyle en az enerji tüketen yöntemdir. Ancak bu sürecin mekanizması çok karmaşıktır. Bu süreçten elde edilen biyokömür verimi kuru yükün %35-%65'i civarındadır ve kalorifik değeri yaklaşık 13-30 MJ/kg'dır (Lewandowski vd., 2020).

3.4.2. Gazlaştırma

Gazlaştırma işlemi sırasında 500 °C'ye kadar piroliz evresi devam eden biyokütle, 1000 °C'ye kadar sınırlı oksijen veya hava ile yüksek sıcaklıkta yanıcı gaz karışımına çevrilir. Elde edilen gazlar; H₂, CO, CH₄, CO₂'dir (Yolcu, 2019). Gazlaştırma, birleşik ısı ve enerji üretimi, sıvı yakıtların sentezi ve hidrojen üretimi için çeşitli, yüksek oranda dağılmış ve düşük değerli lignoselülozik biyokütleyi sentez gazına dönüştürmek için rekabetçi bir yol sağlar. Bir dizi gazlaştırıcı konfigürasyonu geliştirilmiştir. Siyah likör kullanan biyokütleye entegre gazlaştırma kombine çevrimleri halihazırda kullanılmaktadır (Luo ve Zhou, 2025).

3.4.3. Yanma

Biyokütlenin yanması, yapısında bulunan atomların oksijenle tepkimeye girerek ısı enerjisi açığa çıkarmasıdır. Yanmanın kullanılmaya başlaması çok eski zamanlara dayanmaktadır. Biyokütle enerjisi yanma yoluyla mekanik ve elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Yanma olayının gerçekleşmesi için biyokütlenin yüksek oranlarda kuru olması gerekir. Aksi durumda nem sebebiyle yanmada verim azalır (Tatman, 2023). Biyokütle dönüşümünün karmaşıklıkları ve zorlukları hakkında daha derin bir anlayış kazanmak için öncelikle biyokütle teknolojisi tanımlanmalıdır (Teh vd., 2021).

3.4.4. Piroliz

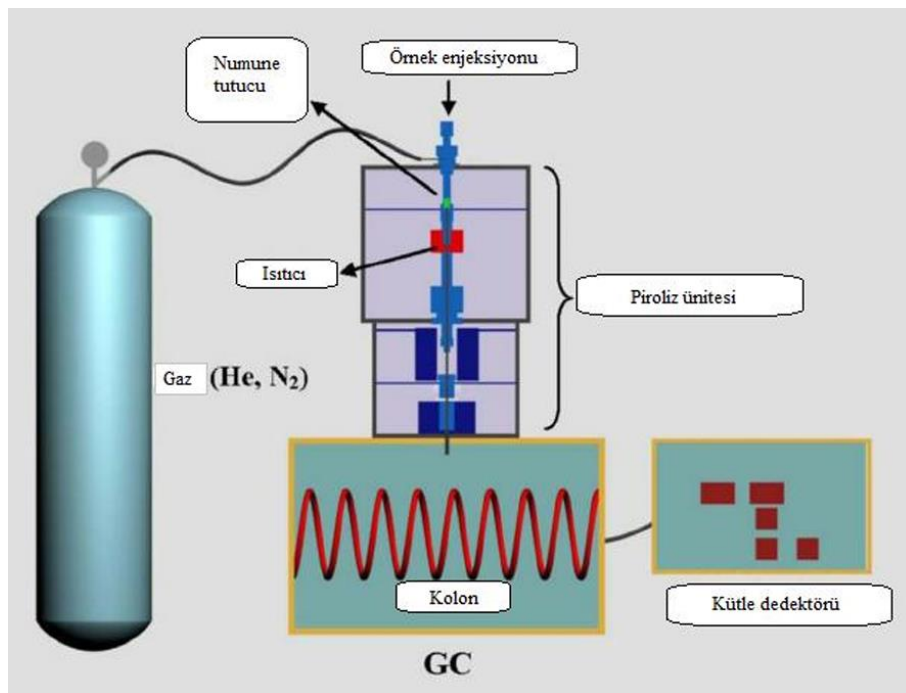
Piroliz, biyokütlenin veya herhangi bir organik maddenin oksijensiz ortamda veya çok az oksijenli ortamda ısı parçalanma işlemidir. Yanma yoktur, sadece ısıtma ile moleküler parçalanır. Bu süreç biyokütlenin katı, sıvı ve gaz olarak ayrışmasını sağlar. Katı ürün olarak karbonca zengin kömür benzeri malzeme, sıvı olarak katran, fenoller, asitler gibi malzemeler ve gaz olarak H_2 , CO , CH_4 , CO_2 ve hafif hidrokarbonlar açığa çıkar. Oksijensiz ortamda 500-600 °C'ye kadar çıkar (Yolcu, 2019). Bu işlem, biyokütleden bir dizi katı, sıvı ve gaz ürün üretme esnekliği nedeniyle günümüzde çok dikkat çekmiştir ve bu nedenle ısıtma hızı, sıcaklık ve katıların kalma süresi gibi işlem parametrelerine dayalı olarak yavaş piroliz, hızlı piroliz ve flaş piroliz olarak sınıflandırılmıştır. Yavaş piroliz, nispeten düşük sıcaklıkta (<500 °C) uzun kalma süresiyle meydana gelir ve genellikle karbonizasyon olarak adlandırılır ve biyokömür üretimi için yaygın olarak kullanılır. Hızlı piroliz, daha yüksek bir ısıtma hızında (10-200 °C/s) ve daha kısa kalma süresinde (<2s) yüksek biyo-yag verimi (%50-70) eldesi hedeflenerek gerçekleştirilir. Flaş piroliz daha da yüksek ısıtma hızlarında (10^3 - 10^4 °C/s) ve çok kısa kalma süresi (<0,5 sn) ile yüksek biyo-yag verimi (%75-80) eldesini sağlar (Yogalakshmi vd., 2022).

Tablo 3.4. Biyokütlenin termal parçalanması

Özellik	Karbonizasyon	Piroliz	Gazlaştırma	Yanma
Tanım	Oksijensiz ortamda ısıtılarak karbonca zengin katı ürün elde edilmesi	Oksijensiz ortamda termal bozunması	Sınırlı oksijen, ile yanıcı gazlara dönüştürülmesi	Yeterli oksijen varlığında oksitlenmesi
Oksijen Miktarı	Yok	Yok veya ihmal edilebilir düzeyde	Sınırlı	Fazla miktarda
Sıcaklık Aralığı (°C)	300-700	300-900	700-1200	800-1500
Ana Amaç	Biyokömür elde etmek	Katı, sıvı ve gaz ürün üretmek	Sentez gazı üretmek	Isı ve enerji üretmek
Başlıca Katı Ürün	Biyokömür, kömür	Biyokömür	Kül ve az miktarda biyokömür	Kül
Başlıca Sıvı Ürün	Az miktarda katran ve kondensat	Biyo-yag, katran	Çok az miktarda katran	Genellikle yok
Başlıca Gaz Ürünleri	CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂	CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ ve hafif hidrokarbonlar	CO, H ₂ , CH ₄ (sentez gazı)	CO ₂ ve H ₂ O
Enerji İçeriği	Katı ürün	Sıvı ve gaz ürünler	Gaz ürün	Isı enerjisi
Yüksek Ürün				
Kütle Kaybı	Orta düzeyde	Yüksek	Çok yüksek	En yüksek
Endüstriyel Kullanım Alanı	Biyokömür üretimi, aktif karbon üretimi, metalurji	Biyo-yakıt ve kimyasal üretimi	Elektrik üretimi, hidrojen ve sentetik yakıt üretimi	Kazanlar, termik santraller, atık bertarafı
Karbonun Son Durumu	Büyük kısmı katı üründe tutulur	Katı, sıvı ve gaz arasında dağılır	Büyük kısmı gaz fazına geçer	Büyük kısmı CO ₂ olarak atmosfere salınır

3.4.4.1. Piroliz-gaz kromatografisi/kütle spektroskopisi (Py-GC/MS) sistemi

Piroliz deneylerinde Py-GC/MS sistemi kullanılır. Piroliz, yüksek sıcaklıkta büyük moleküllerin oksijensiz ortamda termal olarak ayrıştırılması işlemidir. Piroliz karmaşık ve genellikle çözünmeyen organik maddelerin analiz edilmesini sağlayan temel adımdır ve büyük moleküller küçük parçalara ayrılarak bu sistemde tanımlanmasını sağlamaktadır. Katı numune piroliz ünitesine yerleştirilir. Numune hızlı bir şekilde yüksek sıcaklıklara kadar çıkarılır. Bu sıcaklıklar 400 °C ile 600°C arasındadır. Bu sıcaklık aralığında molekülün bağları kırılarak daha küçük parçalara ayrışır. Bu küçük parçalara piroliz ürünleri denir. Bu sistemin en önemli avantajı hız ve yüksek tekrarlanabilirliktir (Tatman, 2023).



Şekil 3.1: Py-GC/MS ünitesi şematik gösterimi (Yaman, 2018)

3.4.4.2. Katalitik piroliz

Organik maddelerin katalizör kullanılarak oksijensiz ortamda termal olarak parçalanması işlemidir. Normal pirolizden farkı katalizörün kimyasal dönüşümü yönlendirmesi, daha düşük sıcaklıkta daha kaliteli ürünler elde etmesidir. Katalitik piroliz, daha düşük sıcaklık aralığında gerçekleşir. Bunun sebebi bu süreçte kullanılan katalizörün atomlar arası bağların kırılmasını kolaylaştırmasıdır. Piroliz sırasında belirli ürün verimlerini etkilemek için çeşitli katalizör türleri eklenir. Py-GC/MS analizini kullanan araştırmalar, öncelikle farklı katalizörlerin kömür ve biyo-yağ verimlerinin yanı sıra hidrokarbonlar, fenoller, aromatikler ve

asitler dahil olmak üzere belirli bileşik grupları üzerindeki etkisini gözlemlemeye odaklanmaktadır. Kullanılan başlıca katalizörler: zeolitler, Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , CaO , MgO , Ni , Co , Fe destekli katalizörler (Yaman, 2018). Sadece katalizör tipi değil, aynı zamanda katalizörlerin özellikleri (örneğin parçacık boyutu, gözenek boyutu, bileşimi vb.) pirolizi olumlu veya olumsuz etkileyebilir. Ayrıca, birden fazla katalizör tipinin karışımları da kullanılabilir ve katalizör karışımının farklı oranları çok farklı sonuçlar sunar (Chen vd., 2024).

Lignoselülozik biyokütlenin katalitik pirolizi

Lignoselülozik biyokütle, düşük maliyetli, bol ve çevre dostu olması ve piroliz yoluyla biyogaz, biyo-yag ve biyokömüre dönüştürülebilmesi nedeniyle fosil kaynağına mükemmel bir alternatiftir; Böylece, üç tip pirolitik ürün, biyoyakıt, kimyasallar ve enerji malzemeleri standardını karşılamak üzere geliştirilebilir. Doğrudan pirolizden elde edilen biyo-yag bazı dezavantajlar gösterir: yüksek oksijenat, su ve asit içeriği, kolay yaşlanma vb., biyo-yagın büyük ölçekli uygulamasını ve ticarileştirilmesini kısıtlar. Katalitik piroliz, belirtilen reaksiyon bölgelerinde meydana gelebilecek deoksijenasyon, parçalama, dekarboksilasyon, dekarbonilasyon reaksiyonları vb. yoluyla biyo-yagın rafine edilmesini destekler. Bu nedenle, lignoselülozik biyokütlenin katalitik pirolizi, yüksek kaliteli ve yenilenebilir biyoyakıtların üretimi için umut verici bir yaklaşımdır (Wang vd., 2022).

Algal biyokütlenin katalitik pirolizi

Algler, çevreye zarar vermeyen, sürdürülebilir ve yenilenebilir biyokütle oldukları için son zamanlarda biyoyakıt üretimi için önemli bir hammadde haline gelmiştir. Biyoyakıtlar algal biyokütlesinden kimyasal, biyokimyasal ve termokimyasal yöntemlerle üretilir. Termokimyasal teknikler arasında piroliz, çok sayıda alg biyokütlesinden biyokömür ve biyo-yag üretmek için yüksek sıcaklık ve yüksek basınç içeren iyi bilinen bir yöntemdir (Sekar vd., 2021). Kolay işletme, düşük maliyet, düşük kirletici emisyonları, yönetilebilir operasyonel parametreler ve mevcut enerji altyapısıyla uyumluluk gibi belirgin avantajlar sunar; bu da katalitik pirolizi biyokütle enerjisi kullanımında diğer termokimyasal teknolojilerden ayırır. Biyo-yagın artırılması için zeolitlerle katalitik parçalanma, hidrodeoksijenasyon, buhar reformu, esterleştirme, süperkritik sıvı ekstraksiyonu, çözücü ekleme, emülsifikasyon ve bileşik ekstraksiyon gibi çeşitli biyo-yag geliştirme teknolojileri bulunmaktadır. Ancak, son zamanlarda katalitik piroliz baskın teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. Katalitik flaş piroliz giderek daha fazla dikkat çekmiştir; bu cihaz, geliştirilmiş fizikokimyasal özellikler ve katma

değer içeren kimyasal bileşiklere özgü biyo-yağ üretme kapasitesiyle öne çıkmıştır. Düşük viskozite, yüksek kalori değeri ve artırılmış kimyasal stabiliteye sahip biyo-yağı iyileştirmek için, piroliz işlemine katalizörlerin dahil edilmesi, karmaşık moleküllerin parçalanmasını ve uçucu ürünlerden oksijenli bileşiklerin eliminasyonunu hızlandırır. Bu iyileştirme süreci, biyo-yağın elektrik ve ısı üretimi için enerji kaynağı olarak depolanması, taşınması ve kullanılmasını kolaylaştırır (Junior vd., 2024).

4. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Lignoselülozik ve algal biyokütlenin katalitik pirolizi ile son yıllarda yapılan literatür çalışmaları bu başlık altında aşağıda özetlenmektedir. Buna göre;

Raj ve Ghotge (2025): Lignoselülozik biyokütle atıklarından elde edilen piroliz yağı, fosil yakıtlara uygulanabilir bir alternatif olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, organik asitler ve diğer oksijenli bileşenler onu doğrudan yakıt kullanımı için uygunsuz hale getirmektedir. Piroliz yağının değerlendirmek için uygulanabilir bir seçenek, mevcut altyapıdan yararlanarak yağın rafineri hammaddesi ile birlikte işlenmesidir. Piroliz yağının birlikte işlenmeye uygunluğu; asitliğin azaltılması, yağın C₈-C₁₈ karbon aralığında üretilmesi ve yüksek konsantrasyondaki fenol ve aromatiklerin azaltılmasıyla artırılabilir.

Katalitik piroliz, yüksek kaliteli biyoyağ üretimi için uygun bir yöntemdir. Şu anda katalizörler pahalıdır ve geri kazanımları önemli bir sorun teşkil ederek ek maliyetlere yol açmaktadır. Bu çalışma, in-situ (yerinde) ve ex-situ (ayrı kapta) konfigürasyonlar altında lignoselülozik biyokütle atığı pirolizini incelemek için çeşitli metal emdirilmiş yumurta kabuğu katalizörleri kullanmaktadır. Çalışma, her iki katalitik yöntemin de organik asit seviyeleri azalmış, aromatik ve fenol konsantrasyonları düşmüş C₈-C₁₈ karbon sayısı aralığında piroliz yağı ürettiğini göstermektedir. Piroliz ürünlerinin GC-MS, NMR ve GC analizleri, ex-situ katalizin C₈-C₁₈ ürünleri için geliştirilmiş seçicilik sergilediğini ve bu oranın %48,12'den %98,56'ya yükseldiğini ortaya koymuştur. Oksijenli bileşenlerde %93,1'den %72,3'e gerileyen önemli bir düşüş gözlemlenmiştir. Piroliz yağının asit içeriği %37,1'den ihmal edilebilir seviyelere düşmüştür. Test edilen çeşitli metal emdirilmiş katalizörler arasında, CaO-Cu ve CaO-Fe emdirilmiş katalizörler piroliz yağının kalitesinde önemli bir iyileşme göstermiştir. Reaksiyon mekanizmaları üzerine yapılan çalışma, katalizör varlığının piroliz mekanizmasını önemli ölçüde değiştirdiğini göstererek ürün dağılımındaki değişiklikleri doğrulamaktadır. Çalışma, biyokütleden oksijenden arındırılmış, asit içermeyen piroliz yağını verimli bir şekilde üreten ekonomik olarak uygulanabilir bir metal emdirilmiş katalizörün hazırlandığını kanıtlamaktadır. Ex-situ katalitik piroliz sürecindeki katalizör geri kazanılabilirliği ve yeniden kullanılabilirliği, sürdürülebilirliği ve maliyet etkinliğini artırmaktadır.

Cha vd. (2026): Hidrojen, karbonsuz bir yakıt olarak tanınmasına karşın, enerji yoğun prosesler nedeniyle karbondioksit emisyonu açısından çevresel zorluklarla karşı karşıyadır. Daha sürdürülebilir hidrojen üretimi için bu çalışma özellikle perilla samanı olmak üzere

lignoselülozik biyokütlenin karbondioksit katalizli pirolizini su-gaz değişimi reaksiyonu ile birleştirmektedir. Piroliz sürecine karbondioksit katılması, sürece bağlı karbondioksit reaksiyonlarını azaltırken perilla samanının birim kütlesi başına sentez gazı üretimini artırmaktadır. 460 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda karbondioksit, perilla sapından çıkan uçucu maddelerin kısmi oksidasyonuna katılarak karbon monoksit indirgenmesine yol açtı. Karbondioksit ile ilişkili bu gerçek tepkimeyi araştırmak için piroliz sistemi kobalt, demir veya nikel bazlı katalizörlerin varlığında ek ısı kaynağı ile modifiye edildi. Katalitik piroliz, uçucu maddelerin daha küçük moleküllere termal parçalanmasını kolaylaştırarak, kütle aktarımının artması sonucu karbondioksit reaktivitesini hızlandırdı. Bu mekanizmalar karbondioksit ile ilgili olarak karbon monoksit oluşumunu seçici olarak teşvik ediyordu. Ortaya çıkan karbon monoksit bakımından zengin sentez gazı daha sonra su-gaz reaksiyonuna sokuldu, burada karbon monoksit buharla tepkimeye girerek stokiometrik olarak hidrojen ve karbondioksit üretti. Bu nedenle, bu çalışma perilla sapının karbondioksit-katalizli pirolizinin hidrojen üretimini artırırken prosesle ilgili karbondioksit azaltımı için etkili bir yaklaşım olarak potansiyelini ortaya koymaktadır.

Wang vd. (2025): Lignoselülozik biyokütle, fosil enerjinin yerini alma potansiyeli yüksek, yenilenebilir bir kaynak olarak kabul edilir, ancak nispeten düşük etkili H/C oranına sahiptir. Sonuç olarak, termokimyasal dönüşüm ürünleri düşük ısıl değere ve kaliteye sahiptir. Polipropilen (PP) hidrojen açısından zengindir ve az miktarda oksijen içerir. Pamuk sapları (CS) ve PP'nin katalitik hızlı birlikte pirolizi (co-CFP) biyoyağ kalitesini önemli ölçüde artırmıştır. Bu yöntem, CS ve PP'nin verimli ve temiz kullanımını sağlarken biyoyağdaki BTEX (benzen, toluen, etilbenzen, ksilen) ve diğer sıvı hidrokarbonların konsantrasyonunu artırmaktadır. Bu çalışmada bimetalik katalizörler, sırasıyla Ni ve Mo yüklenmiş alkali ile modifiye edilmiş HZSM-5 ve zirkonyum dioksit (ZrO_2) ile hazırlanmıştır. Farklı oranların ürün üzerindeki etkisi araştırılarak co-CFP sürecindeki sinerjik etkileri ortaya çıkarılmıştır. XRD, XPS, TEM ve diğer yöntemler katalizörlerin morfolojisini ve fizikokimyasal özelliklerini karakterize etmektedir. CS ve PP'nin co-CFP'si, Py-GC/MS ve termogravimetrik deneylerle incelenmiştir. Deneysel koşullar şu şekildedir: 600 °C piroliz sıcaklığı, 1:1 hammadde karışım oranı ve 1:1 hammadde-katalizör oranı. Katalitik aşamada, Ni:Mo oranı 2:1 olarak ayarlandığında, Ni-Mo/ ZrO_2 katalizöründeki bağıl hidrokarbon içeriği maksimum değere (%75,2) ulaşmıştır. Bağıl hidrokarbon içeriği, azalan Ni/Mo oranıyla başlangıçta azalmış, ardından artmış ve 1:2 oranında minimum seviyeye ulaşmıştır. Ni-Mo/HZSM-5 katalizöründeki bağıl hidrokarbon içeriği, Ni:Mo = 2:1 oranında maksimum değere (%60,9)

ulaşmaktadır. Ni-Mo/HZSM-5 katalizörü, aromatik hidrokarbonlar için daha yüksek bir seçiciliğe sahiptir. Metaller arasındaki sinerjik etki, termogravimetrik deneylere dayalı reaksiyon kinetiği kullanılarak araştırılmıştır. Spesifik olarak bu durum, reaksiyonun aktivasyon enerjisinin etkili bir şekilde düşürülmesini ve böylece hidrokarbon oluşumunun teşvik edilmesini içerir. Ni-Mo/ZrO₂ katalizörü için aktivasyon enerjisi genellikle artan Mo içeriğiyle (38,51'den 29,47 kJ/mol'e) azalmaktadır. Buna karşılık destek malzemesi olarak HZSM-5 kullanıldığında, aktivasyon enerjisi artan Mo yüklemesi ve azalan Ni yüklemesiyle (12,31'den 8,43 kJ/mol'e) azalmaktadır. Doğru miktardaki metal yüklemesi katalizörün aktif merkezini oluşturmakta ve metaller arasındaki sinerji biyoyağ kalitesini daha da artırmaktadır. Aktivasyon enerjisi en düşük seviyesine Ni:Mo = 2:1 olduğunda ulaşmaktadır. Bu değişim eğilimi hidrokarbon içeriğiyle tutarlıdır.

Bianasari vd. (2026): Fenol ve fenolik bileşikler birçok endüstride önemli kimyasallardır. Lignoselülozik biyokütlenin katalitik pirolizi, fenolce zengin biyo-yağ elde etmek için sürdürülebilir bir yöntem sunar, ancak seçiciliği katalizörün özellikleri ve çalışma koşullarından önemli ölçüde etkilenir. Bu inceleme, Hindistan cevizi biyokütlenin piroliz sürecinde Y₂O₃/ZSM-5 (tekli metal oksit zeolit sistemi) ve MgO/Y₂O₃/ZSM-5 (Çiftli metal oksit zeolit sistemi) katalizörlerin etkinliğini, fenol seçiciliğini ve ürün dağılımına odaklanarak değerlendirmektedir. BET, XRD, FESEM, XRF, NH₃-TPD ve EDX gibi teknikler kullanılarak katalizörlerin fizikokimyasal özellikleri ayrıntılı olarak incelendi. Katalitik piroliz 400, 500 ve 600 °C sıcaklıklarda gerçekleştirildi. 500 °C'de Y₂O₃/ZSM-5, dengeli asitliği ve gözenek yapısı sayesinde çatlamayı etkili bir şekilde azalttığı için en yüksek fenol verimine (hammadenin %22,21'i) ulaştı. Bu arada, MgO/Y₂O₃/ZSM-5 kombinasyonu, asit-baz sinerjisinin iyileşmesi sonucunda hidrokarbon üretimini (%24,19) teşvik etti. Yüksek sıcaklıklarda, önemli çatlamalar fenol seviyelerinin azalmasına ve oksijenatların artmasına neden oldu. GC-MS ile yapılan analiz, metoksifenollerin düşük sıcaklıklarda yaygın olduğunu, artan termal enerjinin ise alkilfenollerin üretimini kolaylaştırdığını gösterdi. Lignin türevi fenoliklerin dönüşümü için mekanik bir yol ileri sürülmüştür. Bulgular, katalizör tasarımının ve termal koşulların yönetiminin biyokütle pirolizinde fenolik ürünlerin dağılımını şekillendirmede hayati bir rol oynadığını gösteriyor. Ayrıca, metal oksit-zeolit sistemlerinin biyo-yağın değerlendirilmesinde umut verici yeteneklerine de vurgu yapılmaktadır.

Lee vd. (2025) yapmış oldukları bu çalışmada belediye katı atıklarının önemli bir bileşeni olan bahçe atıklarının bol miktarda bulunan ve karbon nötr özellik gösteren bir

hammadde olarak yenilenebilir enerji üretiminde değerlendirilebileceği vurgulamıştır. Ancak bu atıkların karmaşık lignoselülozik yapısı, geleneksel biyolojik yöntemlerle enerji dönüşüm verimliliğini sınırlamaktadır. Bu çalışma, bahçe atıklarından sentez gazı üretimi için termokimyasal bir yaklaşım önermektedir. Bu kapsamda, süs ağaçlarından dünya genelinde yüksek miktarlarda üretilen bahçe atıklarının temsili bir türü olan at kestanesi kabukları (HCS'ler) model biyokütle olarak seçilmiştir. Bollukları ve sürdürülebilirlik potansiyelleri bu seçimi desteklemektedir. Laboratuvar ölçekli piroliz deneyleri, 10 °C dk⁻¹ sabit ısıtma hızında ve 100-640 °C sıcaklık aralığında, CO₂ atmosferi altında gerçekleştirilmiştir. Bu koşullar, HCS kaynaklı uçucu bileşiklerle gaz fazı reaksiyonlarını teşvik ederek sürecin sürdürülebilirliğini artırmıştır. CO₂ bu ortamda hafif bir oksidan gibi davranarak uçucu biyoyağ bileşenlerini CO'ya dönüştürmüş ve sentez gazı üretimini kolaylaştırmıştır. Ayrıca, %5 (ağırlıkça) Ni bazlı katalizör ilavesi, CO₂ destekli reaksiyonları hızlandırarak sentez gazı verimini artırmış ve CO/H₂ oranını 3,7'ye yükseltmiştir. N₂ atmosferinde gerçekleştirilen geleneksel katalitik piroliz ile karşılaştırıldığında, CO₂ emisyonlarının 2,51 kat azalarak 87,55 mg g⁻¹ HCS seviyesine düşmesi, süreçte CO₂'nin etkin şekilde kullanıldığını göstermektedir. Elde edilen bulgular, CO₂ destekli katalitik pirolizin lignoselülozik atıkların değerlendirilmesinde etkili bir yöntem olduğunu ortaya koyarken, aynı zamanda CO₂ emisyonlarının azaltılmasına da katkı sağladığını göstermektedir.

Chang vd. (2025): Organik bileşenlerin katalitik pirolizi yoluyla aromatik hidrokarbonların (AH'ler) kontrollü hazırlanmasına ilişkin sınırlı bilgi, lignoselülozik biyokütle bazlı AH'lerin yüksek verimle elde edilmesini engellemektedir. Bu rapor; selüloz, ksilan ve lignine atıfta bulunarak, organik bileşenlerin katalitik pirolizini takiben AH oluşumuna yönelik sistematik bir incelemeyi açıklamaktadır. Sonuçlar, programlı bir ısıtma sürecinde (20 °C/dk), (Ca-Fe)/HZSM-5 katalizörünün selüloz, ksilan ve ligninin bozunmasını sırasıyla %24,56, %17,29 ve %19,45 artış oranlarıyla teşvik ettiğini ve selüloz ile ksilanın pirolizi sırasında benzen salınımını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Hızlı bir ısıtma sürecinde (20 °C/ms), Ca-Fe tek başına selülozdan elde edilen biyopetrol verimi üzerinde olumlu bir etki sunarken, HZSM-5 ve (Ca-Fe)/HZSM-5 her üç bileşenden de yüksek biyopetrol verimi sağlamıştır. Özellikle, Ca-Fe ve HZSM-5, selüloz pirolizini takiben sıvı ürün ve AH verimleri üzerinde, ksilan pirolizini takiben ise AH verimi üzerinde sinerjik etkiler sergilemiştir. Alkoller, aldehitler ve furanlar, hem selüloz hem de ksilan pirolizi yoluyla AH üretmek için uygun öncüllerdir. Ligninin AH'ye dönüşümü, dehidrasyon-deoksijenasyon-aromatizasyon ve dehidrasyon-hidrideoksijenasyon dahil olmak üzere çeşitli potansiyel reaksiyon yollarını

içermiştir. (Ca-Fe)/HZSM-5 ile katalize edilen bileşenlerin AH üretimine yönelik piroliz sıralaması ksilan>selüloz>lignin şeklindedir. Ca-Fe parçacıklarının varlığı, selüloz/ksilan/lignin karışımının pirolizinde HZSM-5'in deaktivasyonunu engellemiştir.

Tang vd. (2025) yapmış oldukları bu çalışmada, şeker kamışı küspesi (SCPB) üzerine Cu/Ni nitrat emdirilmesinin piroliz kinetiği davranışını ve bozunma etkilerini yavaş piroliz yoluyla incelemektedir. Bu süreci araştırmak için hem biyokömür oluşumunu hem de sentez gazı gelişimini analiz eden, borulu fırın ile geleneksel bir prosedürde simüle edilmiş piroliz ve birleşik termogravimetrik analiz/Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (TGA/FTIR) kullanılmıştır. DeneySEL sonuçlar, maksimum ağırlık kaybının biyokütlenin yaklaşık %60'ının kömüre termokimyasal dönüşümünde gerçekleştiğini ortaya koymaktadır; SCPB/CuNi, 328 °C'de, yani SCPB'den 10 °C aşağıda ve CuNi'den 5 °C yukarıda bir ara bozunma göstermiştir. Biyokütlenin karbonizasyon kinetiği çalışması, azot atmosferinde dinamik ısıtma hızlarında (10, 20 ve 30 °C dk⁻¹) bir TGA kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kinetik parametreler, Flynn-Wall-Ozawa (FWO) ve Dağıtılmış Aktivasyon Enerjisi Modeli (DAEM) kullanılarak tahmin edilmiştir; örneğin, SCPB için $E_a = 234 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ olup, bu değer SCPB/CuNi için olan $90 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 'den çok daha yüksektir. Ayrıca, kısa analizlerle değerlendirildiği üzere, TGA kaynaklı ve borulu fırında üretilen biyokömürlerin neredeyse özdeş fizikokimyasal özelliklere sahip olduğu bulunmuştur; bu da TGA'nın biyokütle piroliz çalışmaları için geçerli bir platform olduğunu doğrulamaktadır. Eşzamanlı olarak üretilen CO_x, N_xO_x, CH₄ ve H₂ sentez gazları ise TGA-FTIR/Py-MS ile incelenmiştir. Sentez gazları, enerji geri kazanımı ve kimyasal sentez uygulamaları için değerli fırsatlar sunmaktadır

Huang vd. (2025) yapmış oldukları bu çalışmada Attapuljit (ATP) ve Zn/ZSM-5 kademeli katalizi, biyokütle pirolizinde ürün seçiciliğini artırırken katalizör tedarik maliyetini önemli ölçüde azaltarak ikili bir avantaj sunmuştur. Bu çalışmada, bir dizi ATP bazlı katalizör (ATP/25, ATP/600, HATP/25, HATP/600, Zn/HATP/600, Cu/HATP/600 ve La/HATP/600) ve bunların Zn/ZSM-5 ile kademeli kombinasyonları (ATP&Zn/ZSM-5 kademeli katalizörleri), çam talaşının Py-GC/MS yoluyla katalitik hızlı pirolizi için değerlendirilmiştir. ATP katalizörleri alifatik hidrokarbonların (AHC'ler) ve furanların oluşumunu teşvik etmiş; Cu/HATP/600, en yüksek deoksijenasyon (oksijenden arındırma) verimliliğini göstererek (oksijenli bileşikler %99,66'dan %53,24'e düşmüştür) %31,13 propen ve %12,93 propan dahil olmak üzere %45,56 AHC seçiciliği sağlamıştır. Kademeli sistem, aromatik hidrokarbon üretiminde beklentilerin üzerinde performans göstererek, BTX (benzen, toluen, ksilen)

seçiciliğini tahmini değerlere göre %10'dan fazla artırırken, hacimli oksijenli bileşikleri minimize etmiş ve azotlu bileşikleri baskılamıştır. Cu/HATP/600&Zn/ZSM-5 kademeli sistemi %49,73 aromatik (%30,52 BTX) ve %27,31 AHC elde etmiştir. Tek başına Zn/ZSM-5 ile karşılaştırıldığında, propen seçiciliği %8,39'dan %17,93'e yükselirken, PAH'lar (polisiklik aromatik hidrokarbonlar) %14,24'ten %8,92'ye düşmüştür. HATP/25&Zn/ZSM-5 ise %52,19 aromatik, %31,73 BTX ve %23,40 AHC ile benzer sonuçlar vermiştir. Bu bulgular, geleneksel zeolit bazlı sistemlere kıyasla yaklaşık yarı maliyetine yüksek performans elde edilebileceğini kanıtlamakta ve ATP&Zn/ZSM-5 kademeli katalizini, lignoselülozik biyokütleyi endüstriyel öneme sahip yüksek değerli kimyasallara dönüştürmek için verimli bir yaklaşım olarak konumlandırmaktadır.

Valizadeh vd. (2025): Fosil yakıtlara yaygın bağımlılık ve artan maliyetleri, uygulanabilir alternatifler arayışını zorunlu kılmıştır. Bu çalışma, odunsu biyokütlenin katalitik piroliziyle jet yakıtı aralığında aromatik hidrokarbonlar (C₈-C₁₆) üretmenin güvenilir bir yöntemini ayrıntılarıyla ortaya koymaktadır. Bunu yapmak için, NaOH (N-HZSM-5) ve HCl (H-HZSM-5) kullanılarak HZSM-5 modifiye edildi ve üç tip talaşın (S₁, S₂ ve S₃) pirolizinde kullanıldı. S₁ pirolizinde, HZSM-5, Non-C testine kıyasla daha düşük bir biyoyağ verimine rağmen C₈-C₁₆ aromatiklerinin seçiciliğini artırmıştır. Talaş numuneleri arasında S₂ bileşimsel ve termal özellikleri nedeniyle en yüksek C₈-C₁₆ aromatikleri (%44,2) piroliz ile elde edilmiştir. S₂ pirolizinde N-HZSM-5 kullanımı biyo-yag verimini (ağırlıkça %46,9) ve C₈-C₁₆ aromatikler için seçiciliği (ağırlıkça %49,3) en üst düzeye çıkarmıştır. N-HZSM-5, C₈-C₁₆ aromatiklerinde minimum düşüşle üç döngü boyunca istikrarlı bir performans sergilemiştir. Bu çalışma, lignoselülozik biyokütleden biyoyakıt üretimi için sürdürülebilir ve uygulanabilir bir yöntem önermektedir.

Yao vd. (2025): Biyokütle hammaddeleri ve bunların karmaşık bileşenleri çok çeşitli piroliz ürünleri verebilir. Dahası, katalitik piroliz biyokütlenin yüksek değerli kimyasallara dönüştürülmesi için gelecek vadeden bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. Bu çalışma, kurak bölge biyokütlesi olan *Alhagi sparsifolia Shap'in* (A. sparsifolia) piroliz davranışını, kinetiğini, termodinamiğini ve evrilen ürünlerini incelemiştir. HZSM-5 katalizörü üzerindeki katalitik piroliz gerçekleştirilmiş ve katalitik olmayan piroliz ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, HZSM-5 ilavesiyle kütle kaybının ağırlıkça %69,35-74,98'den %48,78-58,53'e düştüğünü göstermiştir. Her iki bozunma süreci de üç aşamada gerçekleşmiştir: 200 °C'nin altında, 200-500 °C ve 500-900 °C. HZSM-5 varlığı, pik sıcaklıklarını 352,8-377,7 °C'den 328,7-331,4 °C'ye düşürmüştür.

Ek olarak, ortalama görünür aktivasyon enerjisi $102,79 \text{ kJ mol}^{-1}$ 'den $78,00 \text{ kJ mol}^{-1}$ 'ye düşmüştür. Pozitif ΔH ve ΔG değerleri, her iki bozunmanın da endotermik ve kendiliğinden gerçekleşmeyen olduğunu doğrulamıştır. Ancak, HZSM-5 kullanımı, enerji ihtiyacını azaltırken numunenin reaktivitesini artırmıştır. GC-MS analizi, katalitik olmayan pirolizde oluşan ürünlerin temel olarak fenoller ve ketonlar olduğunu; katalitik pirolizin ise ürün kompozisyonunu basitleştirerek daha yüksek seçicilikle asetik asit ve furfural oluşumunu desteklediğini ortaya koymuştur.

Guo vd., (2024): Klor içeren uçucu organik bileşiklerin (CVOC'ler) oksidasyonu için bir katalizörün katalitik davranışı, büyük ölçüde oksitleyici ve asidik bölgeler arasındaki sinerjik etkileşime bağlıdır. Bu çalışmada, oksidasyon bölgelerinin (CeO_2) konumunun zeolit'in asidik bölgeleriyle olan sinerjik etkisini nasıl etkilediğini araştırmak amacıyla, CeO_2 'nin iç ve dış yüzeylerde farklı dağılımlarına sahip iki katalizör hazırlanmıştır. 4.0Ce-USY-ex ve 4.0Ce-USY-dp (USY zeoliti) katalizörleri sırasıyla iyon değişimi ve çöktürme yöntemleriyle sentezlenmiştir. Sonuçlar, 4.0Ce-USY-ex katalizörünün 1,2-dikloroetan (DCE) katalitik parçalanmasında çok daha yüksek aktivite gösterdiğini ortaya koyarken, 4.0Ce-USY-dp katalizörünün diğer yapıdaki CVOC'lerin (diklorometan (DCM), trikloroetilen (TCE), klorobenzen (CB)) parçalanmasında daha yüksek aktivite sergilediğini göstermektedir. 4.0Ce-USY-ex katalizöründe CeO_2 , esas olarak USY zeolitinin gözenek kanallarında dağılmıştır ve yüzeyde çok sayıda güçlü asidik merkez bulunmaktadır. Bu durum, CVOC'lerin deklorasyon dönüşümünü kolaylaştırmaktadır. Buna karşılık, 4.0Ce-USY-dp katalizöründe CeO_2 çoğunlukla zeolit'in dış yüzeyinde yer almakta ve güçlü oksidasyon yeteneği sergileyerek CVOC'lerin derin oksidasyonuna katkı sağlamaktadır. Ayrıca, 4.0Ce-USY-ex katalizörünün yüzeyindeki fazla sayıda güçlü asidik merkez, yüzeyde karbon türlerinin yoğun şekilde birikmesine yol açmakta ve bu da DCE'ye karşı katalizörün kararlılığını önemli ölçüde azaltmaktadır. Öte yandan, 4.0Ce-USY-dp ve CeO_2 katalizörlerinin yüzeyindeki yüksek miktardaki aktif oksijen türleri, DCE'nin derin oksidasyonunu teşvik ederek yüzey karbon oluşumunu azaltmakta ve böylece katalizör kararlılığını artırmaktadır. Sonuç olarak, bu çalışmada oksidasyon bölgelerinin konumunun, asidik bölgelerle olan sinerjik etkileşimi üzerindeki etkisi ortaya konmuş ve uygun aktif bölge dağılımına sahip CVOC bozunma katalizörlerinin rasyonel tasarımı için yeni yaklaşımlar sunulmuştur.

Park vd., (2018): Ferrierit zeolit üzerinde metanol-olefin (MTO) reaksiyonunun katalitik performansı, katalizörün dış yüzeyindeki asit bölgelerini seçici olarak maskeleyen bir CeO_2 kaplamasının eklenmesiyle büyük ölçüde iyileştirildi. Bu kaplamanın yokluğunda, dış yüzeyde

kok oluşumu ve bunun sonucunda da girişlerin tıkanması nedeniyle katalitik performansında önemli bir bozulma gözlenmiştir. Dış yüzeyde seçici CeO_2 kaplaması, iletim elektron mikroskobu, NH_3 'ün sıcaklık programlı desorpsiyonu, N_2 adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi ve ksenon adsorpsiyon ölçümleri kullanılarak incelenmiş ve yapı-aktivite ilişkisi ortaya çıkarılmıştır. MTO reaksiyonunda CeO_2 kaplı ferrierit zeolitinin katalitik performansı MFI veya yüksek silika CHA zeolitinkine benzerdi. Gözlenen $\text{C}_4=$ ve $\text{C}_6=$ 'nin tercihli oluşumu, aromatiklerden ~%90 arınmış olması, ağır kokun ihmal edilebilir düzeyde birikmesi nedeniyle elde edilmiştir. Bu çalışma, ferrierit zeolit üzerinde seçici CeO_2 kaplamanın, katalizör rejenerasyonu ve hidrotermal yaşlandırma sırasında etkili olduğunu, katalizörün ömrünü uzattığını ve katalitik uygulamalar için seçiciliği geliştirdiğini göstermektedir.

Maupin vd., (2011), yapmış oldukları bu çalışmada bu çalışmanın amacı, iki tip oluşan hibrit katalizörlerde olası sinerjiyi değerlendirmek ve bunların izopropanolün katalitik yanmasındaki performanslarını incelemektir. Uçucu organik bileşiklerin (VOC'ler), özellikle izopropanolün katalitik oksidasyonu için seryum oksit ve zeolitler baz alınarak hazırlanan çeşitli katalizörler test edilmiştir. Bu çalışma, reaksiyonun 5. saatinden sonra farklı sıcaklıklarda katalizörlerin aktivitesinin, seçiciliğinin ve deaktivasyonunun belirlenmesiyle değerlendirilmiştir. Çalışmanın önemli bir kısmı, katalizörlerin hazırlanması ve karakterizasyonu, özellikle de oksijen depolama ve hareketliliğinin incelenmesiydi. Hibrit katalizörler, oksijen depolama kapasitesi ve oksijen izotop değişimi açısından bir sinerji etkisi göstermektedir. Ancak, bazı örneklerde katalitik oksidasyonda sinerji etkisi görülse bile, oksijen hareketliliği izopropanol yanmasında daha iyi sonuçlar garanti etmemektedir.

Chen vd., (2024): Biyokütle pirolizi, çeşitli biyokütle hammaddelerini kullanarak sürdürülebilir enerji üretimi yöntemi olarak büyük ilgi görmektedir. Piroliz ürünleri, katı, sıvı ve gaz türleri de dahil olmak üzere piroliz işleminden elde edilen her türlü üründür. Bu inceleme, analitik piroliz-gaz kromatografisi/kütle spektrometrisi (Py-GC/MS) uygulamasının, dört piroliz modu bağlamında, yani tek besleme stoğu pirolizi, birlikte piroliz, katalitik piroliz ve katalitik birlikte piroliz bağlamında, pirolizatların özelliklerine dair iç görüler elde etmek amacıyla yapıldığını vurgulamaktadır. Her bir piroliz modunun kendine özgü ürünleri, faydaları ve sınırlamalarının kapsamlı bir biçimde anlaşılması, lignoselülozik ve alg biyokütlesi gibi farklı hammaddelerin piroliz ürünlerinin analiz edilmesiyle sağlanır. Dahası, bu çalışma, reaksiyonların aktivasyon enerjilerini tahmin etmeye odaklanan yoğunluk fonksiyon teorisi (DFT) gibi tekniklerle veya reaksiyon hızı ve mekanizmasına odaklanan kinetik çalışmalarla

piroliz mekanizmalarına daha fazla ışık tutmak için Py-GC/MS'in bütünleştirilmesini tartışmaktadır. Son olarak, piroliz faktörlerine ve seviyelerine parametrelerin etkisinin daha kapsamlı bir değerlendirmesini elde etmek için piroliz optimizasyonu için deney tasarımı (DoE) teknikleri önerilmiştir.

Kong vd. (2022) tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, *Spirulina platensis* (*S. platensis*), *Tetrademus obliquus* (*T. obliquus*) ve *Chlorella vulgaris* (*C. vulgaris*) türlerinin piroliz özellikleri; termogravimetrik analiz-kızılötesi spektroskopi (TG-FT-IR), piroliz-gaz kromatografisi/kütle spektrometrisi (Py-GC/MS) ve kinetik modelleme yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, farklı mikroalg türlerinin elementel ve biyokimyasal bileşimlerinin piroliz davranışlarını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Üç mikroalgin piroliz süreci genel olarak kurutma, hızlı piroliz ve karbonizasyon olmak üzere üç aşamada gerçekleşmiştir. Ana piroliz reaksiyonlarının 500-600 K sıcaklık aralığında meydana geldiği belirlenmiştir. TG-FT-IR analizleri, *S. platensis*'in yüksek karbon içeriği nedeniyle piroliz sırasında *T. obliquus* ve *C. vulgaris*'e kıyasla daha fazla CO₂ ve C=O bağı içeren bileşikler oluşturduğunu ortaya koymuştur. Kinetik analiz sonuçlarına göre görünür aktivasyon enerjileri *C. vulgaris* (173,24-404,13 kJ mol⁻¹) > *S. platensis* (173,96-329,89 kJ mol⁻¹) > *T. obliquus* (151,39-289,95 kJ mol⁻¹) sıralamasını izlemiştir. Bu sonuçlar, *C. vulgaris*'in termal bozunmaya karşı daha yüksek enerji gereksinimine sahip olduğunu göstermektedir. Py-GC/MS analizleri, *S. platensis* piroliz ürünlerinde aminler, amitler ve diğer azotlu bileşiklerin en yüksek kütle oranına sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, söz konusu mikroalgin yüksek azot ve protein içeriği ile ilişkilendirilmiştir. Buna karşılık, lipid içeriklerinin etkisiyle *T. obliquus* ve *C. vulgaris* pirolizinden elde edilen hidrokarbonların miktarının, *S. platensis*'ten elde edilen hidrokarbonlardan bir miktar daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Shu vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, metanolün yüksek hidrojen içeriği ve suyun sağladığı ilave hidrojen katkısı nedeniyle metanol buhar reformlama (MSR) reaksiyonunun hidrojen üretimi açısından umut verici bir enerji teknolojisi olduğu vurgulanmıştır. Metanol buhar reformlama reaksiyonunda hidrojen verimini artırmak amacıyla, glikoz, selüloz ve aktif karbonun farklı karbon kaynakları olarak kullanıldığı, hidrotermal yöntemle sentezlenmiş Ru-tabanlı karbon kaplı CeO₂ katalizörleri hazırlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, glikoz kullanılarak hazırlanan Ru/CG-CeO₂ katalizörünün 400 °C reaksiyon sıcaklığında 0,276 mol/saat hidrojen üretim hızı ile en yüksek katalitik performansı sergilediğini göstermiştir. Bu değer, selülozdan elde edilen Ru/CC-CeO₂ (0,230 mol/saat) ve

aktif karbondan elde edilen Ru/CA-CeO₂ (0,253 mol/saat) katalizörlerinin performanslarından daha yüksektir. Söz konusu üstün performans, CeO₂ desteği ile karbon tabakası arasındaki sinerjik etkiye bağlanmıştır. Glikoz kaynaklı karbon kaplama, aktif Ru türleri ile CeO₂ desteği arasındaki etkileşimi güçlendirmiş, böylece elektron transferini kolaylaştırarak katalizör yüzeyinde yüksek miktarda oksijen boşluğu oluşumunu teşvik etmiştir. Oluşan oksijen boşlukları, CO ve substrattan türeyen oksijenli ara türlerin adsorpsiyon kapasitesini artırmış ve sonuç olarak hidrojen üretim verimini yükseltmiştir. Ayrıca, hazırlanan tüm katalizörlerin kararlılıkları ve karbon birikimine karşı dirençleri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, Ru/CG-CeO₂ katalizörünün yalnızca yüksek hidrojen üretim performansı değil, aynı zamanda üstün kararlılık ve karbon birikimine karşı yüksek direnç gösterdiğini de ortaya koymuştur.

Eloi vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, farklı özelliklere sahip iki veya daha fazla bileşenin bir araya getirilmesiyle oluşturulan hibrit malzemelerin sentezi incelenmiştir. Bu yaklaşım, özellikle karmaşık reaksiyon ağlarına sahip katalitik süreçler de dâhil olmak üzere birçok uygulama alanında yüksek performanslı malzemelerin geliştirilmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Çalışmada, iyi tanımlanmış iki fazdan oluşan (H-ZSM-5 ve CeO₂) hibrit malzemelerin hazırlanmasına yönelik iki farklı sentez yöntemi değerlendirilmiştir. Bu yöntemler kapsamında, nano boyutlu H-ZSM-5'in CeO₂ yüzeyi üzerine dağıtılması ve nano H-ZSM-5 çekirdeği ile seryum oksit (CeO₂) kabuğundan oluşan çekirdek-kabuk (core-shell) yapıları katalizörlerin sentezi gerçekleştirilmiştir. Her iki yöntemde de H-ZSM-5 ve CeO₂ fazları arasında yüksek düzeyde etkileşim sağlanırken, fazların karakteristik özelliklerinin korunduğu belirlenmiştir. Hazırlanan hibrit malzemelerin katalitik performansını değerlendirmek amacıyla model reaksiyon olarak 1,3-bütandiolün dehidrasyonu seçilmiştir. Reaksiyonda elde edilen istenen ürünler ve ara ürünler olan 1,3-bütadien (BD), 3-büten-2-ol (3B2OL) ve 2-büten-1-ol (2B1OL) ile istenmeyen yan ürün propilenin (PP) oluşumu karşılaştırılmış ve performans kriteri olarak (BD + 3B2OL + 2B1OL)/PP seçicilik oranı kullanılmıştır. Sonuçlar, H-ZSM-5 zeolitlerinin CeO₂ yüzeyine dağıtılması yönteminin 1,3-bütadien seçiciliğini artırmada en etkili sentez yaklaşımı olduğunu göstermiştir. Bu yöntemle hazırlanan hibrit katalizörde, referans malzemeye kıyasla daha yüksek bir (BD + 3B2OL + 2B1OL)/PP seçicilik oranı elde edilmiş ve bu değer 2,1'den 3,9'a yükselmiştir.

Zhang vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, uçucu organik bileşiklerin (VOC) ciddi çevresel ve sağlık riskleri oluşturması nedeniyle düşük sıcaklıklarda etkin bir şekilde giderilmesine yönelik yeni bir katalizör geliştirilmiştir. Değerli metal bazlı katalizörler

yüksek katalitik performans göstermelerine rağmen, yüksek sıcaklıklarda meydana gelen sinterleşme ve kümelenme problemleri nedeniyle uygulama alanları sınırlanmaktadır. Bu nedenle, reaksiyon sürecinde değerli metallerin göçünü ve aglomerasyonunu önlemek, katalizör performansını artırmak ve inaktivasyonu azaltmak açısından büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, kabuk katmanı olarak mezogözenekli zeolit kullanılan ve Pt-CeO₂ aktif ara yüzeyleri içeren yeni bir kapsüllenmiş katalizör (Pt-CeO₂@mezo-S1) sentezlenmiş ve toluenin katalitik oksidasyonunda değerlendirilmiştir. CeO₂ ilavesiyle oluşturulan Pt-CeO₂ aktif ara yüzeyinin, toluenin düşük sıcaklıklarda bozunmasını hızlandırdığı ve 160 °C’de tam oksidasyonun gerçekleşmesini sağladığı belirlenmiştir. Uygulanan kristal faz dönüşüm stratejisi, platinin dağılımını iyileştirerek ve Pt-CeO₂ ara yüzeylerinin oluşumunu kolaylaştırarak katalizörün özgül yüzey alanını artırmıştır. Ayrıca, zeolit kabuk yapısı ve mezogözenekli kanallar, Pt-CeO₂ aktif bileşenlerini etkin şekilde hapsedip stabilize ederek platin sinterleşmesini engellemiş; böylece katalizöre üstün su direnci ve yüksek sıcaklık kararlılığı kazandırmıştır. Yoğunluk fonksiyoneli teorisi (DFT) hesaplamaları, Pt-CeO₂ aktif ara yüzeylerinin oksijen boşluğu oluşumunu azalttığını ve gaz fazındaki oksijenin aktivasyonunu kolaylaştırdığını ortaya koymuştur. Bunun yanı sıra, Pt-CeO₂@mezo-S1 katalizörü üzerinde gerçekleşen toluen bozunma mekanizmasının Mars–van Krevelen (MvK) mekanizması ile ilerlediği, in situ DRIFTS analizleriyle doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen Pt-CeO₂@mezo-S1 katalizörünün VOC’lerin düşük sıcaklıklarda yüksek verimle giderilmesine yönelik endüstriyel uygulamalar için umut verici bir aday olduğunu göstermektedir.

Krishna ve Makkee (2005) tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, seçici katalitik indirgeme (SCR) sürecinde kok oluşumunun olası nedenleri ve oluşan kok birikintilerinin sıcaklık programlı oksidasyonu (TPO), HFER, HZSM-5 ve %15 CeO₂/H-zeolit katalizörleri üzerinde incelenmiştir. Kullanılan malzemeler TGA, NH₃-TPD ve in-situ FT-IR teknikleri ile karakterize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, HFER bazlı katalizörlerin propen kullanılarak gerçekleştirilen SCR reaksiyonunda NO_x (NO + NO₂) dönüşümünde, HZSM-5 bazlı katalizörlere kıyasla daha üstün performans sergilediğini göstermiştir. Ayrıca, NO_x dönüşüm derecesinin belirlenmesinde NO’nun oksidasyonu sonucu oluşan NO₂’nin tek önemli ara ürün olmadığı ortaya konmuştur. Zeolitlerin topolojisi ve asitlik özelliklerinin, propenin seçici aktivasyonunda ve NO₂ ile reaksiyonunda önemli rol oynadığı belirlenmiştir. HZSM-5 bazlı katalizörlerde karbonlu bileşiklerin çökeltme hızının, NO₂ ile aktive edilmiş propenin reaksiyon hızından daha yüksek olması nedeniyle NO’ya karşı seçiciliğin azaldığı ve seçiciliksiz indirgenmenin meydana geldiği tespit edilmiştir. Zeolit yüzeylerinde biriken karbonlu türlerin

yapısı ve miktarının, zeolitın asitliği, yapısal özellikleri ve reaksiyon ortamına (inert veya oksidatif atmosfer) bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Oksijen varlığında kok oluşum hızının arttığı ve oluşan kokun büyük bir kısmının zeolit yapısında tutulduğu, bunun da NO_x giderim performansını olumsuz etkilediği görülmüştür. İn-situ FT-IR analizleri, HFER ile karşılaştırıldığında HZSM-5 üzerinde oluşan hidrokarbon birikintilerinin daha heterojen ve karbon bakımından daha zengin olduğunu göstermiştir. TPO sonuçları ise hidrokarbon birikintilerinin yalnızca ihmal edilebilir düzeydeki bir kısmının NO_x dönüşümünde aktif rol oynadığını ortaya koymuştur.

Manda vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, hidrojen üretimi ve karbon nanofiberlerin (CNF) değerlendirilmesi için ekonomik bir yöntem olarak metanın (CH_4) parçalanması, %20 ağırlıkça Ni/Fe katalizörü üzerinde incelenmiştir. Çalışma sonucunda katalizörün elektriksel iletkenlik ve hidrojen depolama özellikleri sergilediği belirlenmiştir. TEM görüntüleri, elde edilen CNF'lerin açık uçlu yapıya sahip olduğunu gösterirken, XRF analizleri katalizörden yaklaşık %70 oranında nikel geri kazanımı sağlandığını ortaya koymuştur. Empedans analizleri, nikel varlığının sağladığı yüksek iletkenlik nedeniyle CNF'lerin pil elektrodu uygulamalarında kullanıma potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir. Elde edilen CNF'lerin hidrojen depolama kapasitesi 0,151 mmol/gcat H_2 olarak belirlenirken, CNF'lerden nikelin geri kazanılmasıyla bu değer 0,361 mmol/gcat H_2 'ye yükselmiştir. Ayrıca, lityum (Li) katkılanması ile hidrojen depolama kapasitesi yaklaşık 0,862 mmol/gcat H_2 seviyesine ulaşmış ve böylece katalizörün hidrojen depolama malzemesi olarak önemli bir potansiyele sahip olduğu ortaya konmuştur. Katalizörler BET yüzey alanı (BET-SA), H_2 -TPR, XRD, Raman spektroskopisi, TEM ve H_2 kemisorpsiyonu teknikleriyle karakterize edilmiş; elde edilen sonuçlar doğrultusunda Ni/Fe katalizörünün yüksek hidrojen ve CNF üretim oranları sağlaması nedeniyle ekonomik açıdan uygun bir katalizör olduğu belirlenmiştir.

5.MATERYAL VE METOD

Tez kapsamında sentezlenen malzemelerin karakteristik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla aşağıda açıklamaları verilen analiz teknikleri kullanılmıştır. Bu analiz yöntemleri hakkında kısaca bilgilendirme yapılmış ve malzemelerin sentez yöntemleri de farklı bir başlık altında bu bölümde verilmiştir.

5.1. Karakterizasyon Teknikleri

Lignoselülozik, algal biyokütle ve sentezlenen katalizör örneklerine uygulanan karakterizasyon yöntemleri bu bölüm altında verilmiştir.

5.1.1. Taramalı elektron mikroskobu enerji dağılımlı x-ışını spektroskopisi (SEM-EDX-Haritalama)

Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope, SEM), malzemelerin yüzey morfolojisinin ve mikroyapısal özelliklerinin yüksek çözünürlükte incelenmesini sağlayan en yaygın karakterizasyon tekniklerinden biridir. Organik ve inorganik malzemelerin nanometre ile mikrometre ölçeğindeki yapılarının analizinde yaygın olarak kullanılan SEM, yüksek büyütme kapasitesi sayesinde numune yüzeyinin ayrıntılı görüntülerinin elde edilmesine olanak tanımaktadır. Günümüzde kullanılan gelişmiş SEM cihazları, yüz binlerce kat büyütme sağlayarak malzemelerin yüzey topografisi, parçacık boyutu, şekli ve dağılımı hakkında ayrıntılı bilgi sunmaktadır. SEM analizinin en önemli avantajlarından biri, Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDX) sistemi ile birlikte kullanılabilmesidir. EDX analizi, incelenen numunenin elementel bileşimini nitel ve yarı nicel olarak belirlemeye imkân sağlamaktadır. SEM ve EDX tekniklerinin birlikte kullanılması, numunenin hem morfolojik özelliklerinin hem de kimyasal bileşiminin aynı analiz sırasında değerlendirilmesine olanak tanıyarak malzeme karakterizasyonunda kapsamlı bilgiler sunmaktadır. EDX analizinin çalışma prensibi, yüksek enerjili elektron demetinin numune yüzeyine çarpması sonucunda atomların iç kabuk elektronlarının yer değiştirmesine dayanmaktadır. İç kabuktaki elektron boşlukları, daha yüksek enerji seviyelerindeki elektronlar tarafından doldurulurken enerji farkı karakteristik X-ışınları şeklinde açığa çıkmaktadır. Oluşan bu X-ışınlarının enerjisi, her element için kendine özgü olduğundan numunede bulunan elementlerin tanımlanması mümkün olmaktadır. Bu özellik sayesinde SEM-EDX analizi, malzemelerin morfolojik özelliklerinin yanı sıra elementel dağılımlarının ve kimyasal bileşimlerinin güvenilir bir şekilde belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan güçlü bir

karakterizasyon yöntemi olarak kabul edilmektedir (Mohammed ve Abdullah, 2018).

Biyokütle örneklerinin ve sentezlenen katalizörlerin yüzey analizleri ve element içeriklerinin belirlenmesi için yapılan SEM-EDX-Haritalama analizleri Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan taramalı elektron mikroskobu (ZEISS, SUPRA 40 VP) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Örneklerin elektriksel iletkenliğinin sağlanması için kaplama cihazında (Quorum, Q300 model) platin ile kaplama işlemi uygulanmıştır. Hem biyokütle hem de katalizör örneklerine uygulanan tüm SEM analizlerinde, 15 kV hızlandırma voltajı (EHT), ~10 mm çalışma mesafesi (WD), farklı büyütme oranları (500x, 1kx, 2,5kx, 15kx, 50kx) ve ikincil elektron (SE) görüntüleme yöntemi kullanılmıştır.

5.1.2. Yüzey alanı ölçümü ve gözeneklilik dağılımı (Çok Noktalı BET) analizi

Gözeneklilik ve yüzey alanı analizi, modern malzeme biliminde önemli bir rol oynar. Bunun merkezinde, malzeme bilimi alanına olağanüstü başarılı bir katkı sağlayan Brunauer–Emmett–Teller (BET) teorisi yer alır. BET yöntemi, 1930’larda gözenekli yüzeyler için geliştirilmiştir. BET denklemi, fiziksel kimya ve gözeneklilik analizinde en çok kullanılan denklemlerden birisidir. 1930’larda mikro gözeneksiz, açık yüzeyler için geliştirilen bu cihaz, günümüzde karmaşık gözenekliliğe sahip modern adsorbentlere uygulanmaktadır. BET teorisi mikrogözenekte adsorpsiyonu tanımlamak için geliştirilmemiş olsa da BET alanı artık herhangi bir gözenekli malzemenin karakterizasyonu için fiili standart haline gelmiştir. IUPAC tarafından “gözenekli malzemelerin yüzey alanını değerlendirmek için en yaygın kullanılan yöntem” olarak tanınmıştır. Ayrıca, 1995’ten beri Uluslararası Standartlaştırma Örgütü (ISO) tarafından yüzey alanı belirleme standardı olarak kabul edilmektedir. Bu da mikro gözenekli malzemeler dahil olmak üzere en önemli değerli figür olarak kabul edilebilir (Osterrieth vd., 2022). IUPAC sınıflandırmasına göre, çapı 2 nm’den küçük olan gözenekler mikrogözenek, 2-50 nm aralığında olan gözenekler mezogözenek, 50 nm ve daha büyük çapa sahip olan gözenekler ise makrogözenek olarak adlandırılmaktadır (Dolaş, 2024).

Sentezlenen katalizörlerin BET yüzey alanı, gözenek boyutu (nm) ve gözenek hacmi (cm^3/g) değerlerinin belirlenmesi için Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Brunauer, Emmet ve Teller yüzey alanı tayin cihazı (BET, Micromeritics-ASAP2020) kullanılmıştır. Analizden önce uygulanan degaz işleminde sıcaklık 100 °C ve süre 300 dk olarak belirlenmiştir.

5.1.3. X-ışını difraktometresi (XRD) analizi

X-ışını kırınım (XRD) analizi, malzemelerin kristal yapısını belirler. Bu bilgilerden kristal kafes yapısı, kristal fazları ve ortalama tane boyutu belirlenir (Khan vd., 2020). X-ışını difraksiyonu (XRD), katı ve toz haldeki malzemelerin faz analizinde yaygın olarak kullanılan temel karakterizasyon tekniklerinden biridir. X-ışını difraktometresi yardımıyla malzemede bulunan fazlar, fazların miktarları, kristalit boyutları, örgü (latis) parametreleri, kristal yapıdaki değişimler, kristalografik yönelmeler ve atomik konumlar hakkında bilgi elde edilebilmektedir. Bu çalışmada kullanılan Empyrean model XRD cihazı, 2300 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklarda analiz yapabilme kapasitesine sahiptir. Cihaz; hava, harici gaz veya vakum ortamında çalıştırılabilmektedir. Ölçümlerde kullanılabilen en küçük adım büyüklüğü 0,0001° olup, tarama hızı 0,0001°/dk'ya kadar ayarlanabilmektedir. Tarama açısı aralığı, 2θ için -3° ile 160° arasında değişmektedir. Cihazın dedeksiyon sınırı nedeniyle, yapıda konsantrasyonu %1'in altında bulunan metalik fazların tespiti mümkün olmayabilmektedir (Gündüz Meriç, 2019).

Sentezlenen katalizörlerin kristal yapılarının belirlenmesi için Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan X-Işını Kırınım Cihazı (XRD, Panalytical-Empyrean) kullanılmıştır. Analiz sırasında CuKα ($\lambda=0,15405$ nm) radyasyonu kullanılarak, 2θ açısı aralığı 10-90° olacak şekilde 2°/dk tarama hızında X-ışını kırınım desenleri elde edilmiştir.

5.1.4. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) analizi

FT-IR, inorganik malzemelerin tespiti ve analizinde yaygın olarak kullanılan çok önemli bir analitik tekniktir. Kimyasal bileşim analizi, yapı tanımlama ve faz tanımlamasından inorganik malzemelerin yüzey analizine kadar geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Temel prensip, maddelerin kızılötesi aralığında spesifik emilim bantlarına sahip olmasıdır ve bunlar kimyasal bağlarda çeşitli titreşimleri tetikler. Moleküllere bağlanan kimyasallar titreşir ve bu titreşimler, moleküllere bağlı farklı fonksiyonel grupların belirlenmesini sağlar. Mevcut araştırmaların çoğu, esas olarak organik moleküllerin veya seramik ve mineraller gibi belirli inorganik maddelerin sentezine odaklanmıştır (Al-amin vd., 2025).

Biyokütle örneklerinin ve sentezlenen katalizörlerin fonksiyonel gruplarının belirlenmesi için Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan FT-IR cihazı (Agilent Technologies, Cary 630) kullanılmıştır.

Örneklerin spektrumları $4000-400\text{ cm}^{-1}$ dalga boyu aralığında, $0,4\text{ cm}^{-1}$ çözünürlük ile zayıf toplam frekans (ATR) modülü kullanılarak elde edilmiştir.

5.1.5. Geçirimli elektron mikroskobu (TEM) analizi

TEM (Geçirimli Elektron Mikroskobu) ise yüksek enerjili elektronların çok ince hazırlanmış bir numunenin içinden geçirilmesi ve bu elektronların toplanması prensibine dayanır. TEM ile birkaç angström (10^{-10} m) mertebesine kadar çözünürlük elde edilebilmekte, böylece nano ölçeğin ötesine geçilerek atomik düzeyde incelemeler gerçekleştirilebilmektedir. Bu nedenle TEM, özellikle malzeme biliminde kristal yapıların, kusurların ve atomik dizilimlerin incelenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. TEM daha çok numunenin iç yapısı ve atomik düzeni hakkında bilgi verir. TEM ile yüzey analizi yapılabilir de bu analizler genellikle yüzeye çok yakın bölgelerin kristal yapısı, ara yüzeyler veya ince filmler üzerinde yoğunlaşır. TEM numunelerinin elektron geçirgenliği sağlamak amacıyla genellikle onlarca ila yüzlerce nanometre kalınlığa kadar inceltilmesi gerekir. TEM atomik çözünürlükte iç yapı ve kristalografik analizler için tercih edilmektedir (Asan, 2015).

Sentezlenen katalizörlerin morfolojik, yapısal ve elementel bilgilerinin belirlenmesi için Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezinde (ARUM) bulunan Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM, JEOL-JEM 1220) kullanılmıştır. Analiz gerçekleştirilirken farklı bölgelerden 200 ile 50 nm arasında değişen çözünürlüklerde görüntüler alınmıştır.

5.1.6. Elementel analiz (CHN)

Elementel analiz cihazı, katı, sıvı ve gaz örneklerde bulunan organik ve anorganik maddelerin yapısındaki karbon (C), hidrojen (H), azot (N) ve kükürt (S) elementlerinin eş zamanlı olarak tayin edilmesini sağlayan bir analiz sistemidir. Cihaz bünyesinde sıcaklığı $800-1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında hassas şekilde kontrol edilebilen fırınlar bulunmaktadır. Cihazın çalışma prensibi üç temel aşamada açıklanabilir. İlk aşamada, oto-örnekleyiciye yerleştirilen ve kalay (Sn) kapsül içerisinde bulunan örnekler, cihaz tarafından yakma fırınına aktarılır. Bu işlem den hemen önce, oksidatif ortamın sağlanması amacıyla belirli miktarda oksijen gazı reaktöre dozlanır. Yüksek sıcaklık, katalizör, kalay kapsül ve oksijen atmosferinin etkisiyle örnekte ani ve tam yanma gerçekleşir. İkinci aşamada, yanma sonucu oluşan gaz karışımı taşıyıcı inert gaz olan helyum (He) yardımıyla kromatografi kolonuna taşınır. Kolonda bileşenlerine ayrılan gazlar daha sonra bir ısı iletkenlik dedektörüne (Thermal Conductivity Detector, TCD)

yönlendirilir. Son aşamada ise TCD tarafından her bir gazın miktarıyla orantılı elektriksel sinyaller oluşturulur. Elde edilen bu sinyaller, kromatogramdaki pik alanları ile ilişkilendirilerek örneğin elementel bileşim yüzdelerinin hesaplanmasında kullanılır (Yargıç, 2017).

Biyokütle örneklerinin içerdiği karbon (C), hidrojen (H), azot (N), oksijen (O) ve kükürt (S) içeriğinin belirlenmesi için Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan elementel analiz cihazı (LECO, CHN/S 628), örneklerin ısı değerlerinin hesaplanması için ise Dulong formülü (Harker ve Backhurst 1981) kullanılmıştır.

$$Q_{GVC}=338,2C+1442,8(H-(O/8)) + 94,2S \text{ (kJ/kg)} \quad \text{D.1.}$$

Eşitlikte;

C: Karbon kütle kesri (%)

H: Hidrojen kütle kesri (%)

O: Oksijen kütle kesri (%)

S: Kükürt kütle kesri (%)

5.2. Biyokütle Örneklerine Uygulanan Ön-analizler

Tez çalışmasındaki lignoselülozik biyokütle olan ve Karadeniz bölgesinde yetiştirilen göknar ağacı talaşı Bilecik ili Organize Sanayi Bölgesinde faaliyetlerini sürdüren, orman ürünleri ve kereste imalatı yapan Aslanoğlu Kereste San. ve Tic. Ltd. Şti.'den temin edilmiştir. Talaş halinde temin edilen biyokütle örneğine boyut küçültme uygulanmamıştır.

Tez çalışmasındaki algal biyokütle olan *Chlorella* tozu ticari olarak Mel and Mira firmasından temin edilmiştir. *Chlorella* tozu deniz yosunu ailesine ait bir mikroalg türüdür. Yüksek protein, vitamin, mineral ve antioksidan içermektedir.

Lignoselülozik ve algal biyokütle örneklerinin içerdiği nem miktarı Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan nem tayin cihazı (Sartorius, MA 150) ile belirlenmiştir. Bu amaçla, $2\pm0,001$ g biyokütle örneği cihazın alüminyum numune kabına yerleştirilmiş ve örneklerin içerdiği nem miktarları dijital göstergeden okunmuştur.

Lignoselülozik biyokütlenin ön-analizleri bu biyokütlenin piroliz işlemine uygun olup olmadığının belirlenmesi için çok önemlidir. Göknar ağacı talaşının içerdiği kül (ASTM D 1102-84), uçucu madde (ASTM E 897-82), ekstraktif madde (ASTM E 1600-08), hemiselüloz, selüloz ve lignin (Li vd., 2004) miktarları belirlenerek ön analizler tamamlanmıştır.

5.3. Katalizörlerin Sentezi

Bu çalışmada, CeO₂ ve H-FER zeolitini birleştiren bir hibrit katalizör elde etmek için iki sentez prosedürü geliştirilmiştir. İlk prosedürde, seryum katmanlı çift hidroksitin nanozeolitlerin üzerine dağıtılması sağlanmıştır. Bu malzeme, CeO₂/H-FER olarak gösterilmiştir. İkinci prosedürde ise CeO₂ nanopartiküllerini nano-FER yüzeyinde dağıtarak bir H-FER çekirdeği ve bir CeO₂ kabuğu olan çekirdek-kabuk katalizörü, yani H-FER@CeO₂ üretilmiştir. Farklı bir aktif bölgede reaksiyona giren iki ardışık reaksiyonun yönlendirilmesi, farklı bir katalizör tasarımı ve dolayısıyla farklı bir sentez yaklaşımı tarafından etkilenebilir. Farklı aktif bölgelerin doğasına ve yakınlığına bağlı olarak, hammadde ve ara maddeler farklı şekilde reaksiyona girebilir.

Belirlenen sentez prosedürlerinde sırasıyla (i) modifiye edilmiş homojen alkalizasyon metodu ile CeO₂ sentezi (ii) sol-jel metodu ile hibrit CeO₂/H-FER sentezi (iii) hibrit H-FER@CeO₂ çekirdek-kabuk sentezi (iv) her iki prosedürle sentezlenen hibrit malzemelere ağırlıkça %1, 3 ve 5 oranlarında Ni yükleme işlemleri yapılmış ve aşağıda verilmiştir:

(1) CeO₂'nin eldesi için öncelikle modifiye edilmiş homojen alkalizasyon yaklaşımı kullanılmıştır (Furukawa vd., 2010). Ce-LDH'tan (Ce-çift tabakalı hidroksit) CeO₂ sentezinde ilk olarak Ce(NO₃)·6H₂O tartılır, distile su eklenir, 400 rpm'de karıştırılır. Daha sonra 0,5 M HMT eklenir ve 90 °C'de 400 rpm'de 3 saat reflux edilir. 3 saat sonunda çözelti 60 °C'ye düşürülür; 500 rpm'de 0,5 M NaOH çözeltisi ile çöktürme işlemi gerçekleştirilir. 30 dk boyunca yaşlandırma işlemi yapılır. Elde edilen çökelti süzme yoluyla alınır ve üç kez damıtılmış su ve bir kez etanol ile yıkanır. Son olarak, malzemeler 80 °C'de 12 saat kurutulur ardından kalsinasyon işlemi gerçekleştirilir. H-FER zeolitleri ticari olarak satın alınmıştır.

(2) Sol-jel metodu ile hibrit malzeme sentezinde, öncelikle üretilen CeO₂ tartılır, distile su ve etanol içerisinde 5 dakika boyunca ultrasonik banyo altında dispersiyon yapılır. Sonra manyetik karıştırıcıda 400 rpm'de karıştırmaya devam edilir. H-FER suda ıslatılır, 1 M TPAOH yavaşça CeO₂ süspansiyonuna eklenir ve 400 rpm'de karıştırmaya devam edilir. Sulu H-FER yavaşça CeO₂ süspansiyonuna eklenir ve 400 rpm'de 10 dakika karıştırmaya devam edilir.

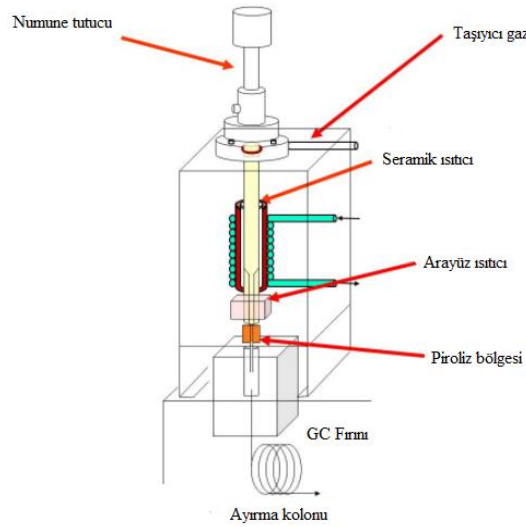
TEOS ve etanol karışımı hazırlanarak karışıma eklenir. 200 rpm’de oda sıcaklığında 3 saat boyunca karıştırma işlemi yapılır. Daha sonra süzülüp damıtılmış su ve etanol ile yıkanır. 80 °C’de 12 saat kurutulur, ardından kalsinasyon işlemi gerçekleştirilir.

(3) Çekirdek-kabuk hibrit malzeme sentezi için ilk olarak, $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ tuzu distile suda çözülür, 2 ml suda ultrasonik banyoda çözülür. Ce içerikli çözelti H-FER çözeltisine eklenir ve 400 rpm’de 5 dk. oda sıcaklığında karıştırılır. Daha sonra HMT, distile suda çözülür. HMT çözeltisi ana çözeltiye eklenir, 50 °C’de yaşlandırma işlemi yapılır. Malzeme süzülür, damıtılmış su ve etanol ile yıkanır, ardından kalsinasyon işlemi gerçekleştirilir. Bazı sentezlerde miktarlar artırılarak prosedüre devam edilmiştir.

(4) En son iki sentez prosedürü ile hazırlanan malzemelere ağırlıkça %1, 3 ve 5 oranlarında Ni tuzu emdirme yöntemiyle eklenmiş ve kalsinasyon işlemi yapılmıştır.

5.4.Py-GC/MS Analizleri

Katalizörlü ve katalizörsüz piroliz deneylerinin gerçekleştirilmesi için Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Py-GC/MS (Frontier, PY2020i, QP2010) sistemi kullanılmıştır. Py-GC/MS sistemine ait şematik gösterim Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Py-GC/MS sisteminin şematik olarak gösterilmesi (Yaman, 2018).

Katalitik olmayan piroliz deneyleri, flash piroliz olarak 550 °C’de biyokütle örneklerinin 10 dk boyunca bozundurulması ile gerçekleştirilmiştir. Piroliz ünitesindeki arayüz sıcaklığı 320 °C, kolon uzunluğu, kolon çapı ve film kalınlığı sırası ile 30 m × 0,25 mm × 0,25

µm, kolon sabit fazı %5 difenil %95 dimetilpolisiloksan olan “ultra alloy” kapiler kolon (Frontier, Japonya)’dur. Kolon sıcaklığı 40 °C, enjeksiyon sıcaklığı 320 °C, hareketli faz olan %99,99 saflıkta kullanılan helyumun kolondan akış hızı ise 1 mL/dk’dır.

Katalitik piroliz deneyleri ise katalizör:biyokütle oranı 1:10 olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Piroliz, GC ve MS şartları katalizörsüz piroliz deneyleri ile aynıdır. Bu deneylerde elde edilen kromatogramlar, NEST kütüphanesinde yapılan tarama sonucu elde edilen bileşenlerin aldehitler, azotlu bileşikler, alkoller, asitler, fenolikler, aromatikler, alifatikler, ketonlar, furanlar, poliaromatik hidrokarbonlar, oksijenli fenoller, esterler ve diğer bileşenler olmak üzere 13 gruba ayrılması ile aydınlatılmıştır.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneyisel çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular bu bölüm altında detaylı olarak verilmiştir.

6.1. Biyokütlelerin Karakterizasyon Sonuçları

Bu bölüm altında lignoselülozik biyokütle örneği olan göknar ağacı talaşı ve algal biyokütle olan *Chlorella* tozuna uygulanan analiz sonuçları verilmiştir.

6.1.1. Biyokütle örneklerine uygulanan ön-analiz sonuçları

Göknar ağacı talaşına uygulanan kısa analiz ve bileşen analiz sonuçları ile *Chlorella* tozuna uygulanan kısa analiz sonuçları Tablo 6.1’de verilmiştir. Göknar ağacı talaşının nem içeriği kütlece %7,01 iken, *Chlorella* tozunun nem içeriği kütlece %6,60 olarak bulunmuştur. Nem içeriği, biyokütlenin yakıt özelliklerini doğrudan etkileyen bir faktördür ve biyokütle örneklerinin piroliz ile değerlendirilebilmesi için bu değerin düşük olması istenmektedir (Özbay vd., 2023). Kısa analizde yer alan kül, uçucu madde ve sabit karbon içerikleri biyokütlenin piroliz işleminde değerlendirilmesinde uygun olup olmadığını belirlemek için önemli parametrelerdir. Piroliz ile yüksek verimde gaz ve sıvı ürün elde edebilmek için yüksek uçucu madde, düşük kül ve düşük sabit karbon içeriğine sahip biyokütle örneklerinin, ikincil kraking reaksiyonlarını ve inorganik katalitik etkileri sınırladığı önceki çalışmalarda belirlenmiştir (Ali vd., 2026a). Bu özelliklere sahip olan biyokütle örneklerinde kimyasal tür çeşitliliği olarak daha zengin ve külün katalitik etkisi kaynaklı bozunma olmadan gerçek piroliz davranışını yansıtan ürün dağılımı elde edilebilmektedir (Qiu vd., 2026). Göknar ağacı talaşı ağırlıkça %7,01 nem, %0,21 kül, %80,74 uçucu madde ve %12,04 sabit karbon içerirken, *Chlorella* tozunda bu değerler sırasıyla %6,60, %5,82, %81,59 ve %5,99 olarak hesaplanarak bu iki biyokütle örneğinin piroliz yöntemi ile termokimyasal dönüşüm için uygun birer hammadde olduğu belirlenmiştir. Lignoselülozik biyokütle olarak Göknar ağacı talaşının içerdiği ekstraktif madde, hemiselüloz, lignin ve selüloz miktarları sırası ile kütlece %12,51, %24,90, %42,30 ve %20,08 olarak hesaplanmıştır. Lignoselülozik biyokütlelerin piroliz davranışı büyük ölçüde uçucu fraksiyonlar (hemiselüloz ve selüloz), aromatik yapı (lignin) ve ekstraktif bileşenler tarafından belirlenmektedir. Genel olarak hemiselüloz ve selülozun 325-400 °C aralığında ısı bozunarak yüksek miktarda uçucu ürün oluşturduğu (Yaman, 2023), ligninin ise daha geniş sıcaklık aralığında parçalanarak fenolik türevli bileşiklerin oluşumuna katkı sağladığı bilinmektedir (Bitencourt ve Mello, 2026; Yogalakshmi vd., 2022). Göknar

talaşının sahip olduğu yüksek lignin içeriği fenolik bileşik oluşum potansiyelini artırırken, içerdiği hemiselüloz ve selüloz oranı da uçucu ürün verimini desteklemekte; dolayısıyla seçilen lignoselülozik biyokütlenin piroliz ve Py-GC-MS analizleri için uygun bir hammadde olduğu değerlendirilmektedir.

Tablo 6.1. Gökmar ağacı talaşı ve *Chlorella* tozunun ön-analiz sonuçları

Analiz	Gökmar Ağacı Talaşı	<i>Chlorella</i> tozu
<i>Kısa Analiz</i>		
Nem (%)	7,01	6,60
Kül (%)	0,21	5,82
Uçucu Madde (%)	80,74	81,59
Sabit Karbon* (%)	12,04	5,99
<i>Bileşen Analizi</i>		
Ekstraktif Madde (%)	12,51	-
Hemiselüloz (%)	24,90	-
Lignin (%)	42,30	-
Selüloz** (%)	20,08	-

*Sabit Karbon= 100-(Nem+Kül+Uçucu Madde)

** Selüloz miktarı (%) = 100 – (% Ekstraktif + % Hemiselüloz + % Lignin + % Kül)

6.1.2. Biyokütle örneklerine uygulanan elementel analiz ve ısı değer sonuçları

Elementel analiz sonuçlarına göre biyokütle örneklerinin içerdiği karbon, hidrojen, azot, oksijen miktarları ve bu değerler kullanılarak hesaplanan H/C, O/C, molar gösterim ve ısı değer Tablo 6.2’de verilmiştir. Piroliz uygulanacak örnekte karbon içeriği yüksek ise elde edilen uçucu bileşiklerin enerji içeriği de yüksek olacaktır. Azot içeriğinin yüksek olması genelde istenmez çünkü piroliz ürününde NO_x ve istenmeyen azotlu ürünlerin varlığına neden olurken, yüksek oksijen içeriği ise oksijenli yan ürünlerin oluşumuna neden olabilir. O/C ve H/C oranları aromatisasyon derecesi, oksijen giderim davranışı ve ürün dağılımını belirleyen temel göstergeler olup bu değerlerin düşük olduğu biyokütle örnekleri enerji içeriği daha yüksek olan piroliz ürününü sağlar (Ali et al., 2026; Qiu et al., 2026). Gökmar ağacı talaşı yüksek oksijen içeriği (kütlece %51,56) ve düşük azot içeriği (kütlece %0,24) ile tipik bir lignoselülozik biyokütle örneğidir. *Chlorella* tozu ise %47,96 karbon ve %6,58 hidrojen içerirken oldukça yüksek bir değer olan %11,02 azot içermektedir. Biyokütle örneklerinde karşılaşılan bu farklılıklar H/C ve O/C oranlarına da yansımış olup, gökmar ağacı talaşı için H/C (1,99) ve O/C

(0,91) değerleri oksijence zengin ve alifatik yapıyı temsil ederken, *Chlorella* tozu için hesaplanan H/C (1,65) ve O/C (0,54) değerleri daha düşük oksijenli ve daha yüksek karbon içerikli bir yapıya işaret etmektedir. Elde edilen elementel analiz sonuçları, iki biyokütlenin piroliz davranışlarının belirgin şekilde farklı karakterde olduğunu göstermektedir. Ayrıca *Chlorella* tozunun yüksek azot içeriği (%11,02), piroliz sırasında azotlu uçucu bileşiklerin oluşma ihtimalini artırırken, göknar ağacı talaşının düşük azot içeriği (%0,24) daha temiz bir uçucu ürün profili oluşumuna olanak sağlamaktadır. Isıl değerler karşılaştırıldığında ise *Chlorella* tozunun 19,50 MJ/kg ile daha yüksek enerji içeriğine sahip olduğu görülürken, göknar ağacı talaşının 14,58 MJ/kg değeriyle daha düşük enerji yoğunluğuna sahip olduğu hesaplanmıştır. Elementel analizden elde edilen bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, göknar ağacı talaşının lignoselülozik yapısı nedeniyle oksijenli uçucu bileşikler açısından zengin bir piroliz davranışı sergilemesi beklenirken, *Chlorella* tozunun protein ağırlıklı yapısı nedeniyle azot içeren bileşiklerin baskın olduğu farklı bir ürün dağılımı oluşturacağı tahmin edilmektedir.

Tablo 6.2. Göknar ağacı talaşı ve *Chlorella* tozunun elementel analiz sonuçları

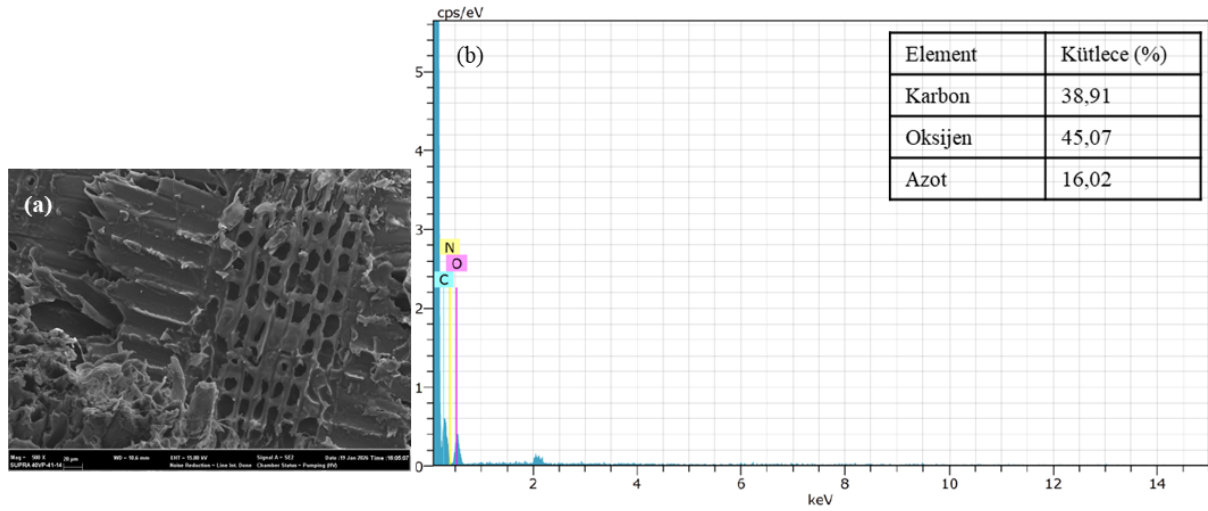
	Göknar ağacı talaşı	<i>Chlorella</i> tozu
Karbon (%)	41,34	47,96
Hidrojen (%)	6,86	6,58
Azot (%)	0,24	11,02
Oksijen* (%)	51,56	34,44
H/C	1,99	1,65
O/C	0,91	0,54
Molar Gösterim	CH _{1,99} N _{0,005} O _{0,91}	CH _{1,65} N _{0,2} O _{0,54}
Isıl Değer (MJ/kg)	14,58	19,50

*Oksijen (%) = 100-(Karbon (%)+ Hidrojen (%)+ Azot (%))

6.1.3. Biyokütle örneklerine uygulanan SEM-EDX analizi sonuçları

Biyokütle örneklerinin yüzey morfolojilerinin ve yapısal özelliklerinin incelenmesi, partikül şekli, gözeneklilik ve yüzey heterojenliğinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen SEM analiz sonuçları ve bu yüzeylerin elementel bileşimini belirleyerek element içeriklerinin dağılımını belirlemek için gerçekleştirilen EDX analizi sonuçları sırası ile göknar ağacı talaşı için Şekil 6.1 ve *Chlorella* tozu için Şekil 6.2’de verilmiştir. Tipik bir lignoselülozik biyokütle olan göknar ağacı talaşının SEM görüntülerine göre yapısı gözenekli ve bozulmamış yüzeylere

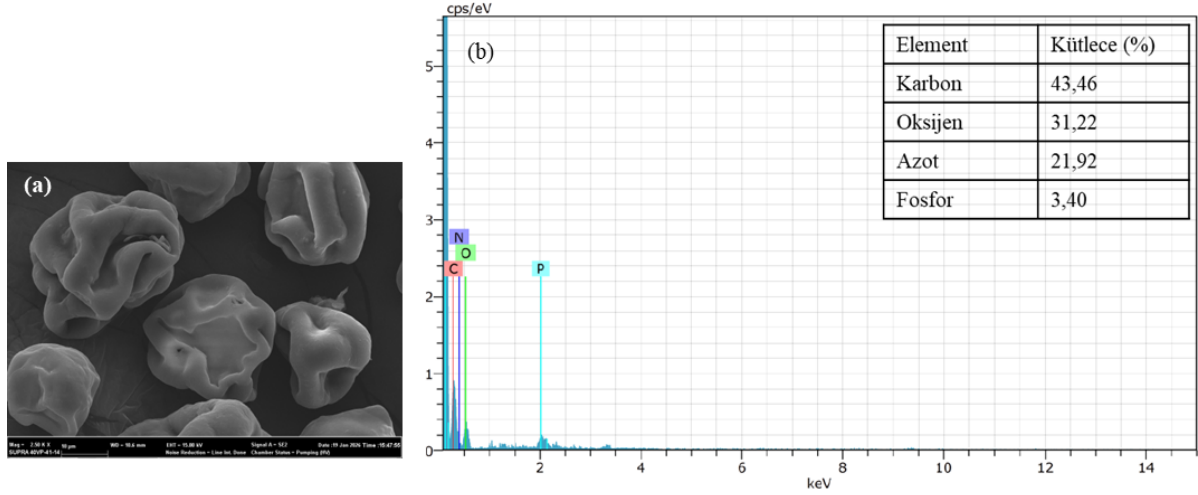
sahip, katı, pürüzsüz, kompakt lif demetleri şeklindedir. Bazı iç kanallar ise literatür ile uyum içerisinde kısmen tıkanmış kalın kanallara sahiptir (Ali vd., 2026b). EDX analizine göre göknar ağacı talaşı kütlece %38,91 karbon, %45,07 oksijen ve %16,02 azot içermektedir. ~2keV civarında çıkan pik analiz öncesinde yapılan platin kaplamanın sebep olduğu Pt elementine aittir ve bu sebeple element tablosunda gösterilmemiştir. EDX analizinde veri yüzeyden toplanırken, elementel analizde ise tüm numunenin ortalama bileşimi hesaplanır. Bu sebeple, iki yöntemin ölçüm yöntemi farklı olduğundan sonuçlar arasında sapma görülmesi kabul edilebilirdir.



Şekil 6.1. Göknar ağacı talaşına ait (a) SEM görüntüsü (500x) (b) EDX spektrumu

Chlorella, tatlı suda yaşayan tek hücreli ve küresel şekilli bir organizmadır (Ru vd., 2020). Doğal ortamında düzgün küresel yapıya sahip olan bu mikro canlı, kurutma işlemine bağlı olarak bir miktar büzülebilir ve bu da yapılan SEM analizinde yüzeyde pürüzlülük olarak görülmüştür. Hücre boyut çapı, Şekil 6.2’de gösterildiği gibi yaklaşık 10 µm civarındadır. Bu çap değeri literatürde verilen ortalama çap değerleri ile uyumlu olup, bazı farklar tür varyantı, kültür ortamı, kurutma yöntemi gibi parametrelerden kaynaklanmaktadır (Anwer, 2023). Yapılan EDX analizine göre *Chlorella* tozu yüzeyinde kütlece %43,46 karbon, %31,22 oksijen, %21,92 azot ve %3,40 fosfor belirlenmiştir. ~2keV civarında çıkan pik analiz öncesinde yapılan platin kaplamanın sebep olduğu Pt elementine aittir ve bu sebeple göknar ağacı talaşının element tablosunda olduğu gibi *Chlorella* tozunun element tablosunda da gösterilmemiştir. *Chlorella* tozunda tespit edilen fosfor, hücresel ATP, nükleik asitler ve fosfolipit yapılarından ileri gelmektedir (Anwer, 2023). Özellikle yüksek azot ve fosfor içeriği biyokütleinin protein ve

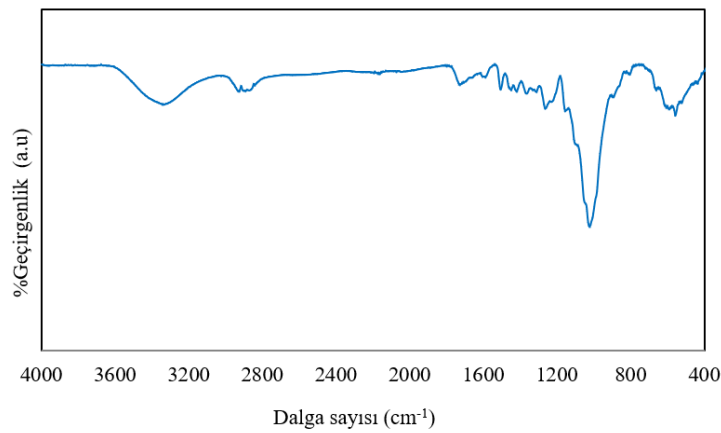
fosfat grupları bakımından yüzeyce zengin olduğunu göstermektedir. Bu durum, piroliz sürecinde azot içeren uçucu bileşiklerin oluşum potansiyelini artırabilmektedir.



Şekil 6.2. *Chlorella* tozuna ait (a) SEM görüntüsü (2,5kx) (b) EDX spektrumu

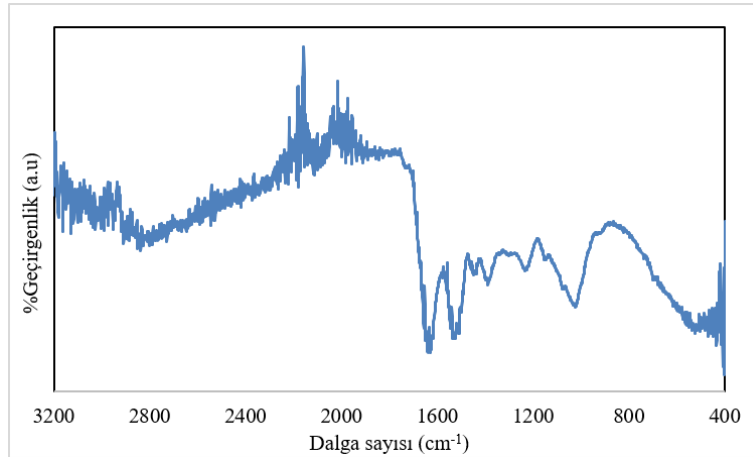
6.1.4. Biyokütle örneklerine uygulanan FT-IR analizi sonuçları

Gökmar ağacı talaşına ait FT-IR spektrumu Şekil 6.3'te verilmiştir. O-H grubunu ifade eden geniş pik 3356 cm^{-1} civarında gözlenmiştir. Metil ve metilen gruplarında yer alan C-H gerilme titreşimlerine ait olan pikler ise $2924\text{--}2856\text{ cm}^{-1}$ 'de yer almaktadır. C=O grupları, 1742 cm^{-1} bölgesinde yer alan piklere atfedilmiştir. Metil, metilen ve karbonil gruplarına ait olan bu pikler lignoselülozik biyokütle örneğinde belirgin olarak gözlenmektedir. Alkol, fenol, eter ve ester gruplarına ait C-O gerilme titreşimine ait şiddetli pikler 1241 cm^{-1} bölgesinde ve 1036 cm^{-1} bölgesinde görülmektedir. $894\text{--}841\text{ cm}^{-1}$ 'de benzen türevlerindeki C-H bağımlı gösteren düzlem dışı eğilme titreşimi yer almaktadır (Khan vd., 2018; Maliutina vd., 2017).



Şekil 6.3. Gökmar ağacı talaşına ait FT-IR grafiği

Chlorella tozunun FT-IR spektrumu Şekil 6.4’de verilmiştir. Bu spektrum, tipik bir mikroalg biyokütlesi örneğinin protein, karbonhidrat ve lipidlerden oluşan kompleks yapısını doğrulamaktadır. Yaklaşık 1631 cm^{-1} ve 1526 cm^{-1} ’de gözlenen güçlü absorpsiyon bantları sırasıyla C=O ve N-H, C-N titreşimlerine karşılık gelmekte olup biyokütledeki amid gruplarını dolayısıyla proteinlerin varlığını göstermektedir (Arif vd., 2021). $2947\text{--}2836\text{ cm}^{-1}$ bölgesindeki pikler ise alifatik C-H gerilme titreşimlerinden kaynaklanmakta ve lipid bileşenlerini işaret etmektedir. 1233 cm^{-1} civarındaki pikler fosfat ve amid gruplarıyla, 1029 cm^{-1} ’deki belirgin pik ise polisakkaritlerin karakteristik C-O-C ve C-O titreşimleri ile ilişkilendirilebilir (Musah vd., 2022). Bu sonuçlar *Chlorella* biyokütlesinin yüksek miktarda protein ve karbonhidrat içerdiğini, ayrıca belirli miktarda lipid ve fosforlu biyomolekül barındırdığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, EDX analizinde de C, O, N ve P elementlerinin *Chlorella* tozu yapısında belirlenmiş olması FT-IR sonuçlarıyla oldukça uyumludur.

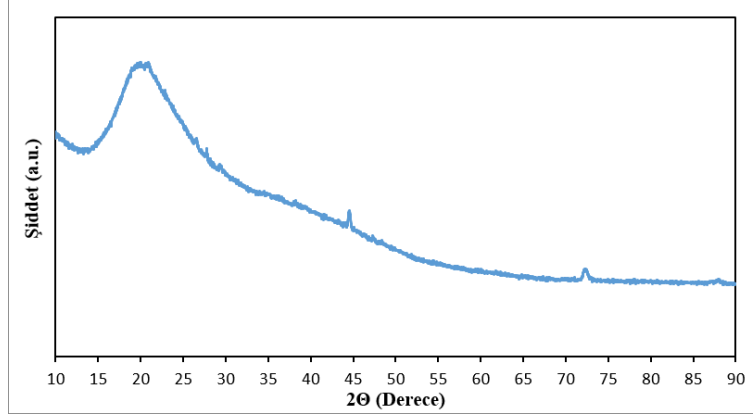


Şekil 6.4. *Chlorella* tozuna ait FT-IR grafiği

6.1.5. *Chlorella* tozu örneğine uygulanan XRD analizi sonucu

Chlorella tozuna ait XRD kırınım deseni Şekil 6.5.’te verilmiştir. Yaklaşık $2\theta=20,9^\circ$ ’da geniş bir pik gözlenmiştir. Bu geniş pik, biyokütle örneğinin büyük ölçüde amorf yapıda olduğunu göstermektedir. Mikroalg biyokütlesinde bulunan protein, polisakkarit, lipid ve diğer organik bileşenler, kristal düzen yerine amorf bir yapı oluşturduğundan bu tür geniş pikler görülmektedir (Rohman vd., 2024). Buna ek olarak, $26,6^\circ$, $27,8^\circ$, $29,4^\circ$, $44,6^\circ$, $72,1^\circ$ ve $88,0^\circ$ bölgelerinde düşük şiddetli pikler tespit edilmiştir. Ancak bu piklerin şiddetlerinin düşük olması, numune içerisinde baskın kristalin fazların bulunmadığını göstermektedir. EDX analizinde numunenin temel olarak C, O, N ve P elementlerinden oluştuğu belirlenmiştir.

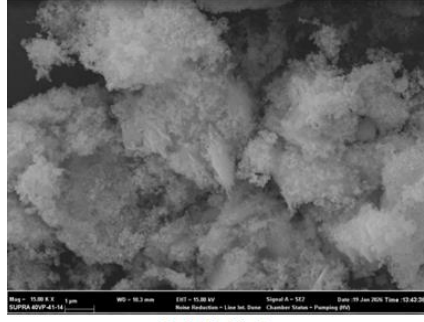
Özellikle $26,6^\circ$ ve $44,6^\circ$ civarında gözlenen pikler, biyokütle içerisindeki karbonlu yapıların kısa menzilli düzenlenmesi veya fosfor içeren biyomoleküler yapıların katkısıyla ilişkilendirilebilir (Youssef vd., 2025). Sonuç olarak, XRD ve EDX bulguları birlikte değerlendirildiğinde *Chlorella* biyokütlesinin ağırlıklı olarak amorf organik bileşenlerden oluştuğu, düşük derecede düzenli yapısal bölgeler içerdiği anlaşılmaktadır.



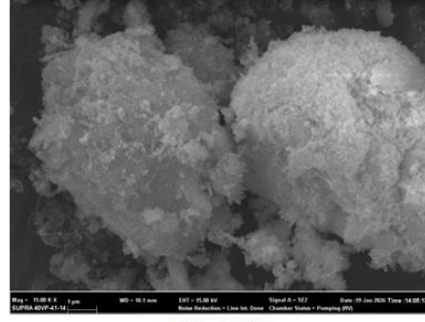
Şekil 6.5. *Chlorella* tozuna ait XRD spektrumu

6.2. Katalizör Örneklerinin Karakterizasyon Sonuçları

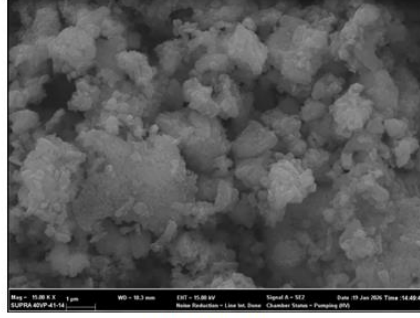
Bu bölüm proje kapsamında hazırlanan katalizörlerin karakterizasyon çalışmaları sonuçlarından oluşmaktadır. Malzemelerin SEM görüntüleri kalsine olmuş CeO_2 , sol-jel metodu ile hazırlanan $\text{CeO}_2/\text{H-FER}$, çekirdek-kabuk metoduyla hazırlanan $\text{H-FER}@\text{CeO}_2$ ve ayrıca Ni yüklü hibrit katalizörler için sırasıyla Şekil 6.6, 6.7, 6.8’te verilmiştir.



CeO_2 (kalsine)

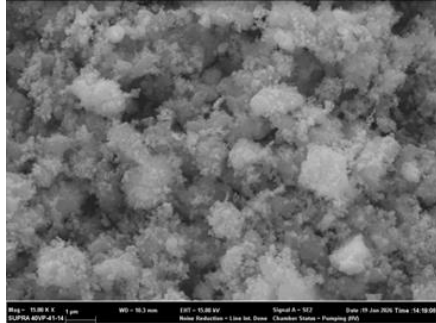


$\text{CeO}_2/\text{H-FER}$

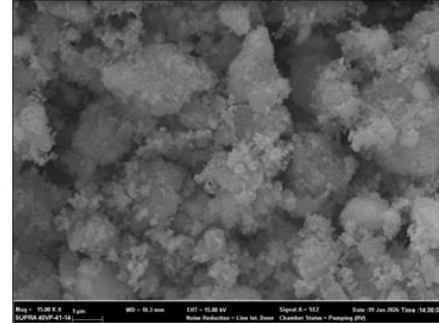


H-FER@CeO_2

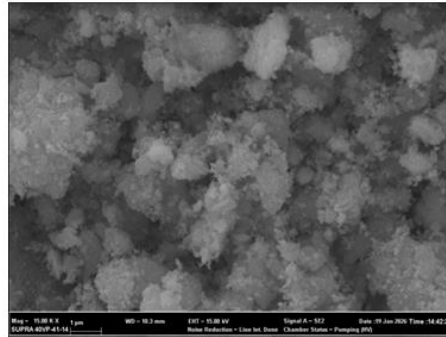
Şekil 6.6. Boş katalizörlerin SEM görüntüleri (kalsine olmuş CeO_2 , sol-jel metoduyla hazırlanmış $\text{CeO}_2/\text{H-FER}$ ve çekirdek-kabuk metoduyla hazırlanmış H-FER@CeO_2 , 15 KX büyütme)



1%Ni $\text{CeO}_2/\text{H-FER}$

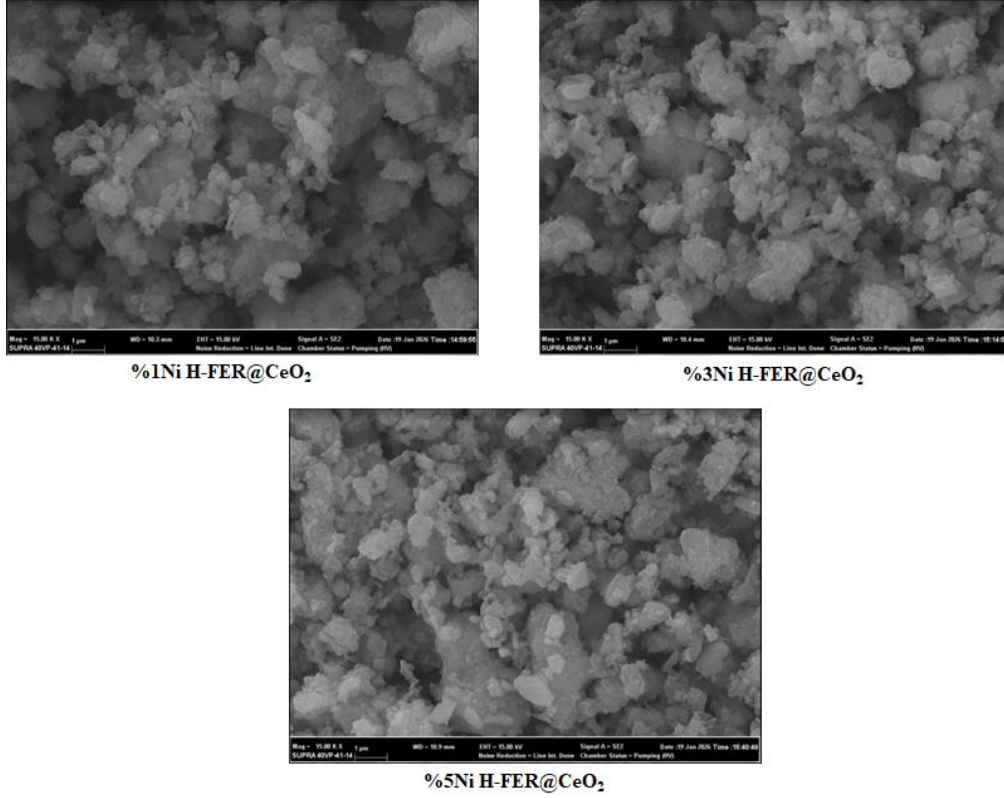


3%Ni $\text{CeO}_2/\text{H-FER}$



5%Ni $\text{CeO}_2/\text{H-FER}$

Şekil 6.7. Sol-jel metoduyla sentezlenen Ni içerikli katalizörlerin SEM görüntüleri (15 KX büyütme)



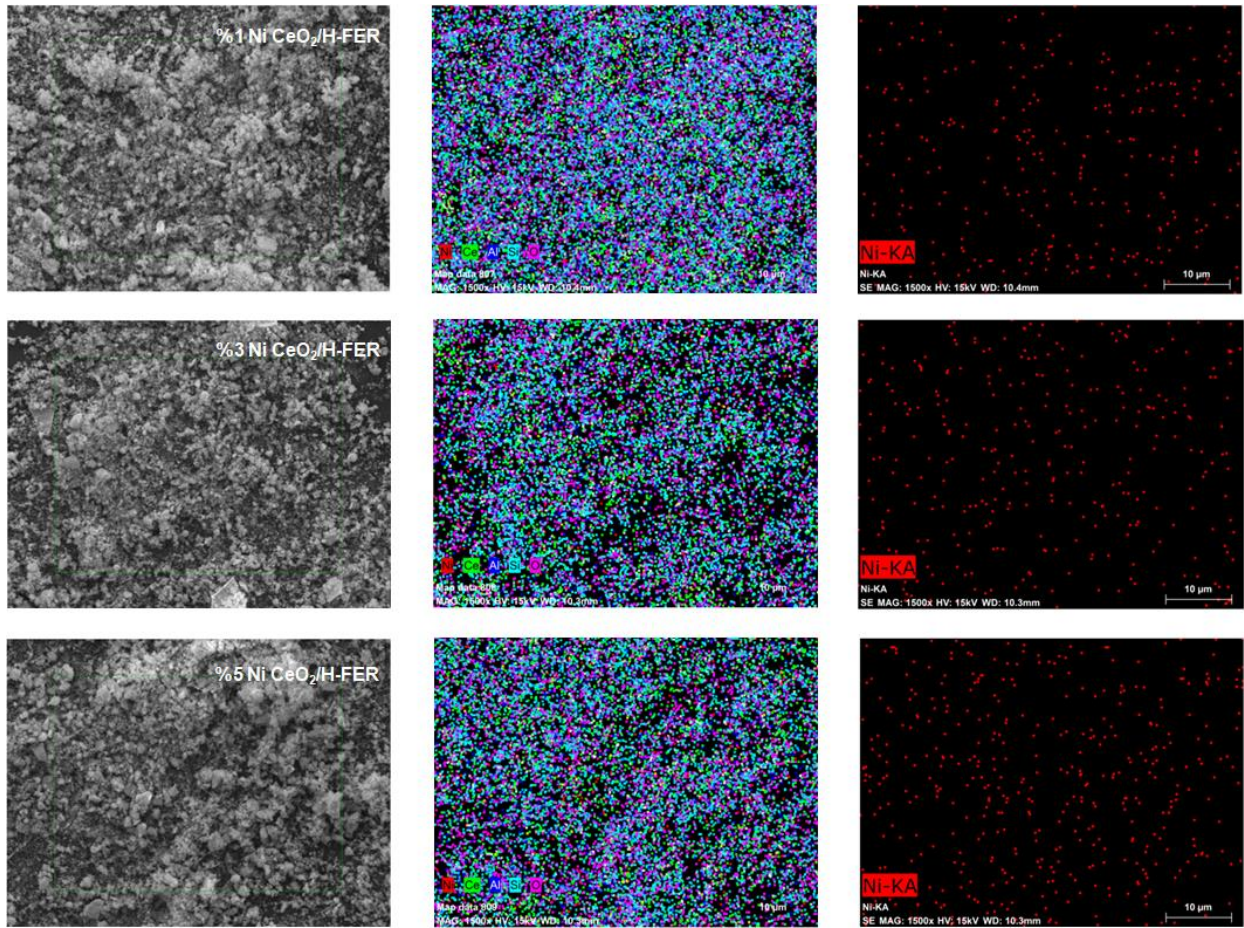
Şekil 6.8. Çekirdek-kabuk metoduyla sentezlenen Ni içerikli katalizörlerin SEM görüntüleri (15 KX büyütme)

Şekil 6.6’da çift tabakalı hidroksit Ce-LDH’den kalsine edilmiş CeO_2 için daha büyük plakaların yüzeyinde daha küçük ve düzensiz parçacıklar gözlenmiştir. Bu parçacıkların daha büyük plakalarla benzer bir bileşime sahip olduğu varsayılır (Gavindaraju vd., 2022). Ce-LDH’nin CeO_2 ’ye kalsinasyonundan sonra, malzeme levha benzeri yapısını korumuştur. Hibrit malzemelerin (sol-jel ve çekirdek-kabuk metoduyla sentezlenen) fiziksel karışımının SEM görüntülerinde hem CeO_2 hem de H-FER fazları gözlemlenmektedir. Bu malzemeler arasında dikkate değer farklılıklar vardır. CeO_2 /H-FER hibrit malzemeleri, CeO_2 ’nin plaka benzeri yapısı ile küp benzeri zeolit kristalleri arasında yüksek derecede yakınlık göstermektedir. Zeolitler, CeO_2 plakalarının hem etrafında hem arasında hem de üstünde tutarlı ve yoğun bir şekilde dağılmıştır, bu da hidrolize edilmiş TEOS ile Ce-LDH veya CeO_2 ’nin yüzey hidroksil grupları arasındaki reaksiyona bağlanmaktadır (Erto vd., 2017).

Şekil 6.7. ve 6.8. sırasıyla, %1, 3 ve 5 oranlarında Ni içerikli katalizörlerde CeO_2 nanoparçacıklarının zeolit yüzeyinde ve gözeneklerde dağılımını ve CeO_2 kaplı FER katalizörlerinin morfolojilerini göstermektedir. Ana FER zeolitinin şekli düzensiz olmasına rağmen, yüzeyi temiz ve pürüzsüzdür. Artan Ni yüklemesiyle birlikte, katalizör yüzeyi daha

çok Ni parçacıklarıyla kaplanmış ve parçacık boyutları artmıştır. CeO_2 parçacıklarının yoğunluğu doğrusal olarak orantılı görünmektedir. SEM ile gözlemlenen morfolojilerde literatürle tutarlı olarak ana zeolitin yüzeyinin temiz ve pürüzsüz olduğu, CeO_2 kaplaması sonrasında ise ilgili zeolit yüzeyinin nano boyutlu CeO_2 parçacıklarıyla kaplandığı bulunmuştur. H-FER çekirdek- CeO_2 kabuk metoduyla sentezlenen katalizörlerde küp benzeri zeolit kristallerin yoğunlaştığı ve zeolit yapısının korunduğu gözlenmiştir. Sol-jel metoduyla sentezlenen CeO_2 'nin H-FER yüzeyinde ve gözeneklerde dağılımında, katalizörlerde CeO_2 'nin plaka yapısının daha fazla korunduğu görülmüştür.

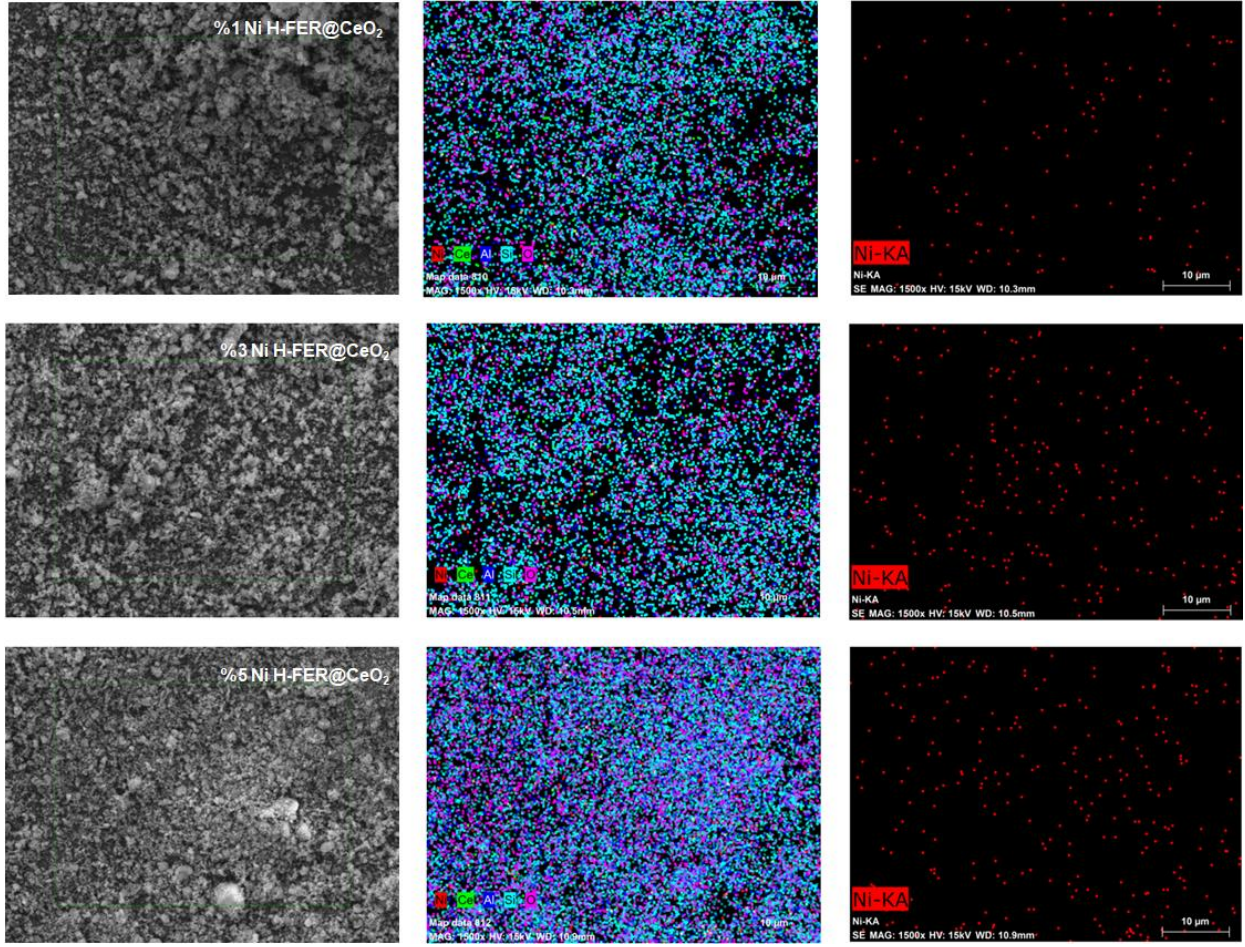
Nikel yüklü sol-jel ve çekirdek-kabuk metoduyla sentezlenen katalizörlere ait SEM-EDX görüntüleri sırasıyla Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'te verilmiştir.



Şekil 6.9. Sol-jel metoduyla sentezlenen katalizörlerin SEM-EDX görüntüleri

Şekil 6.9'da sol-jel yöntemiyle sentezlenen %1Ni CeO_2 /H-FER, %3Ni CeO_2 /H-FER ve %5Ni CeO_2 /H-FER katalizörlerine ait SEM görüntüleri ile EDX element dağılım haritaları verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde tüm katalizörlerin heterojen yüzey morfolojisine sahip olduğu görülmektedir. CeO_2 parçacıklarının H-FER zeolit yüzeyi üzerinde

kümelenmeden dağıldığı ve Ni yükleme işleminin morfolojik yapıda önemli bir bozulmaya neden olmadığı gözlenmiştir. Ayrıca Ni yükleme miktarının artmasıyla birlikte belirgin bir partikül büyümesi veya yoğun aglomerasyon oluşmaması, uygulanan sol-jel yönteminin metal türlerinin destek yüzeyine etkin şekilde dağılmasını sağladığını göstermektedir. Element haritalarında Si ve Al elementlerinin tüm yüzeye homojen şekilde yayıldığı görülmektedir. Bu durum H-FER zeolit yapısının katalizör içerisinde düzenli olarak korunduğunu göstermektedir. Ce ve O elementlerinin dağılımı incelendiğinde ise seryum oksit fazının destek yüzeyinde geniş bir alana yayıldığı ve belirli bölgelerde yoğunlaşma göstermeden dağıldığı anlaşılmaktadır. Bu sonuçlar CeO_2 'nin zeolit yüzeyi üzerinde başarılı şekilde oluşturulduğunu ve kompozit yapının homojen karakter kazandığını doğrulamaktadır (Park vd., 2018). Sağ sütunda verilen Ni-K α haritaları nikel türlerinin yüzey dağılımı hakkında bilgi vermektedir. %1Ni CeO_2 /H-FER örneğinde Ni metali tüm analiz alanına yayılmış durumda olup yüksek dağılımlı metal türlerinin varlığını göstermektedir. %3Ni yüklemesi sonrasında Ni metalinin yoğunluğu artarken dağılımın halen homojen olduğu görülmektedir. %5Ni CeO_2 /H-FER katalizöründe ise Ni metalinin sayısında belirgin artış gözlenmekle birlikte büyük metal kümeleri veya yoğun birikimler oluşmamıştır. Bu durum yüksek metal yüklemesinde dahi Ni türlerinin destek yüzeyinde etkin şekilde dağıldığını göstermektedir. Ni haritalarında kırmızı noktaların sayısının Ni yükleme miktarı ile uyumlu olarak %1Ni < %3Ni < %5Ni şeklinde artması, hedeflenen metal yükleme oranlarının başarıyla gerçekleştirildiğini doğrulamaktadır. Bunun yanında herhangi bir bölgede aşırı yoğun Ni birikiminin gözlenmemesi, Ni türlerinin yüksek dispersiyonla dağıldığını ve metal-destek etkileşiminin güçlü olduğunu göstermektedir (Eloi vd., 2024).



Şekil 6.10. Çekirdek-kabuk metoduyla sentezlenen katalizörlerin SEM-EDX görüntüleri

Şekil 6.10’da verilen SEM görüntüleri incelendiğinde, çekirdek-kabuk yöntemiyle hazırlanan tüm katalizörlerin homojen bir yüzey morfolojisine sahip olduğu görülmektedir. H-FER çekirdeğinin CeO_2 kabuğu ile kaplanması sonucunda yüzey yapısının daha bütüncül bir görünüm kazandığı dikkat çekmektedir. Sol-jel yöntemiyle hazırlanan $\text{CeO}_2/\text{H-FER}$ katalizörlerine kıyasla burada parçacıkların daha düzenli dağıldığı ve yüzey heterojenliğinin daha düşük olduğu söylenebilir (Park vd., 2018). Bu durum çekirdek-kabuk sentez yönteminin destek ve aktif faz arasında daha kontrollü bir yapı oluşturduğunu göstermektedir. EDX haritalarında Si ve Al elementlerinin tüm analiz alanı boyunca homojen şekilde dağıldığı görülmektedir. Bu sonuç H-FER zeolit çekirdeğinin yapısal bütünlüğünü koruduğunu ve sentez işlemleri sırasında zeolit yapısında belirgin bir bozulma meydana gelmediğini göstermektedir (Eloi vd., 2024). Bunun yanında Ce ve O elementlerinin tüm yüzey boyunca yayılmış olması CeO_2 kabuğunun çekirdek yüzeyini başarılı bir şekilde kapladığını doğrulamaktadır. Elementlerin homojen dağılımı çekirdek-kabuk yapının yalnızca teorik olarak değil, morfolojik açıdan da başarıyla oluşturulduğunu göstermektedir. Ni-Kα haritaları incelendiğinde %1Ni H-

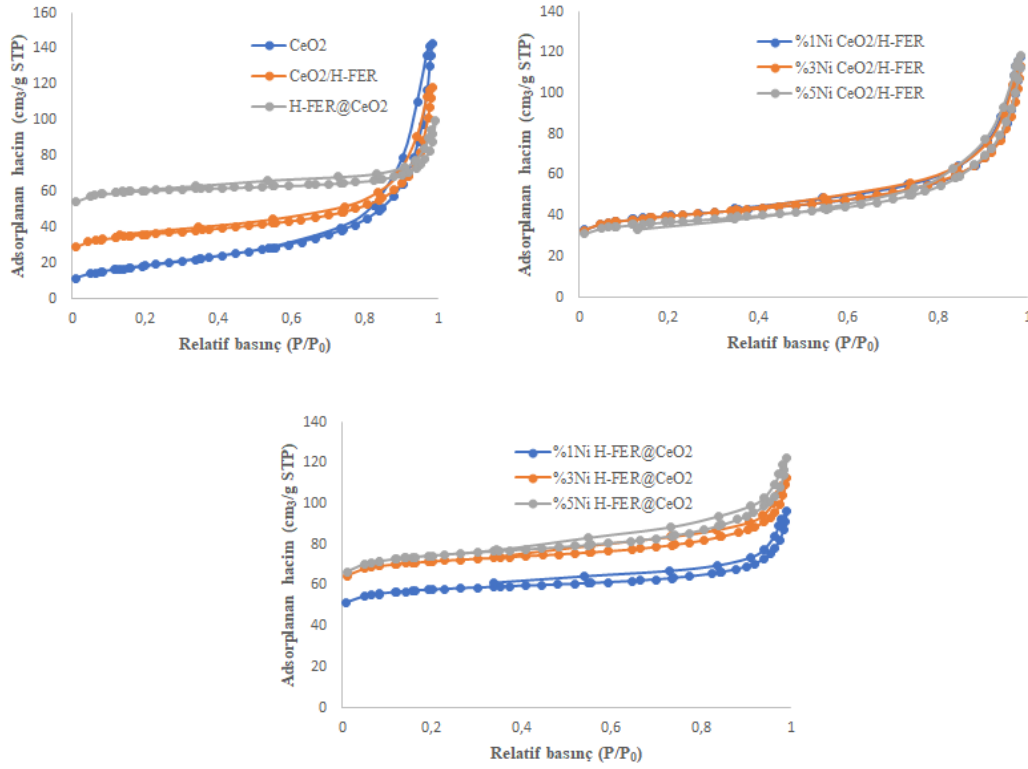
FER@CeO₂ örneğinde Ni türlerinin yüzey boyunca homojen dağıldığı görülmektedir. Ni metali belirli bölgelerde yoğunlaşmaktan ziyade tüm yüzeye yayılmış durumdadır. Bu durum düşük metal yüklemelerinde Ni türlerinin CeO₂ kabuğu üzerinde yüksek dispersiyonla dağıldığını göstermektedir. %3Ni H-FER@CeO₂ katalizöründe Ni metali sayısında belirgin artış gözlenmektedir. Bununla birlikte Ni'nin homojen dağılımını koruduğu ve belirgin metal kümeleri oluşturmadığı görülmektedir. Bu sonuç, çekirdek-kabuk yapısının artan metal yüklemesine rağmen etkin bir dağılım sağlayabildiğini göstermektedir. %5Ni H-FER@CeO₂ örneğinde Ni metal yoğunluğu daha da artmıştır. Haritalarda Ni noktalarının tüm yüzeye yayılmış şekilde bulunması, metal yüklemesi artmasına rağmen önemli ölçüde aglomerasyon oluşmadığını göstermektedir. Bununla birlikte SEM görüntüsünde bazı bölgelerde daha büyük parçacık oluşumları gözlenmektedir. Bu durum yüksek Ni yüklemesi sonucunda sınırlı düzeyde metal kümelenmesi veya CeO₂ kabuğu üzerinde lokal yoğunlaşmalar meydana gelmeye başladığını düşündürmektedir. Ancak bu oluşumların yaygın olmaması, genel olarak yüksek dispersiyonun korunduğunu göstermektedir (Guo vd., 2024). Ni yükleme miktarının artmasına paralel olarak Ni-K α sinyal yoğunluğunun düzenli şekilde artması, hedeflenen metal yükleme oranlarının başarıyla gerçekleştirildiğini doğrulamaktadır. Ayrıca Ni dağılımının tüm örneklerde homojen karakter göstermesi, Ni türleri ile CeO₂ kabuğu arasında güçlü bir etkileşim bulunduğunu ve metal parçacıklarının kabuk yüzeyinde etkin şekilde stabilize edildiğini göstermektedir.

Sentezlenen katalizörlerin çok noktalı BET yüzey alanları, BJH adsorpsiyon ortalama gözenek çapları ve gözenek boyutları Tablo 6.3'te verilmiştir. H-FER@CeO₂ çekirdek-kabuk katalizörleri en yüksek yüzey alanlarına sahipken, CeO₂ en düşük yüzey alanına sahiptir. CeO₂/H-FER katalizörleri orta düzeyde yüzey alanlarına ve gözenek hacimlerine sahiptir. Bu sonuç, bu katalizörlerin %50/%50 ağırlık oranında H-FER ve CeO₂ kombinasyonundan oluştuğu göz önüne alındığında beklentiyle örtüşmektedir. Çekirdek-kabuk katalizörlerindeki yüzey alanı artışı ve gözenek hacmi düşüşü hem seryumun hem de nikelin zeolitin yüzeyine ve gözenek içlerine daha fazla dağıldığını ve girdiğini göstermektedir. Sol-jel metodunda CeO₂'nin H-FER üzerine dağılımının katalizör yapısını daha fazla etkilemesine bağlı olarak numunelerin yüzey alanları doğrusal olarak azalırken, makrogözenekli CeO₂ dağılımı nedeniyle hibrit katalizörlerde dış yüzey alanları tek CeO₂'ye kıyasla da yükselmiştir (Eloi vd., 2024).

Tablo 6.3. Katalizörlerin fiziksel özellikleri

Katalizör	S_{BET} (m ² /g)	$V_{gözenek}$ (cm ³ /g)	Gözenek boyutu (nm)
CeO ₂	65,8	0,22	1,30
CeO ₂ /H-FER	117,2	0,15	1,13
H-FER@CeO ₂	191,9	0,07	0,97
%1Ni CeO ₂ /H-FER	130,3	0,14	1,04
%3Ni CeO ₂ /H-FER	129,1	0,14	1,01
%5Ni CeO ₂ /H-FER	119,7	0,15	1,22
%1Ni H-FER@CeO ₂	183,4	0,08	0,85
%3Ni H-FER@CeO ₂	227,2	0,08	0,76
%5Ni H-FER@CeO ₂	236,6	0,09	0,76

Özetle, BET sonuçları, H-FER'in eklenmesinin CeO₂ bazlı katalizörlerin yüzey alanını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Özellikle, H-FER@CeO₂ yapısı, gözenek hacminin azalmasıyla birlikte en yüksek yüzey alanını sergileyerek mikrogözenekli yapıların baskınlığını göstermektedir. Ni yüklemesiyle birlikte, CeO₂/H-FER serisi daha yüksek metal içeriklerinde hafif gözenek tıkanması gösterirken (metal parçacıkları gözenekleri kısmen bloke ediyor), H-FER@CeO₂ katalizörleri yüzey alanında sürekli bir artış göstermekte, bu da metal dağılımının iyileştiğini ve metal-destek etkileşimlerinin güçlü olduğunu göstermektedir. En yüksek yüzey alanı, %5 Ni yüklü H-FER@CeO₂ katalizörü için elde edilmiş olup, bu da onu katalitik uygulamalar için umut vadeden bir aday haline getirmektedir. H-FER@CeO₂ katalizörü, azalmış gözenek hacmine rağmen önemli ölçüde daha yüksek bir yüzey alanına sahiptir. Bu davranış, ağırlıklı olarak mikrogözenekli bir yapının oluşumuna bağlanabilir. CeO₂'nin H-FER çerçevesine çökmesi, gözeneklerin daralmasına ve daha büyük gözeneklerin kısmen tıkanmasına yol açarken, aynı zamanda çok sayıda küçük gözenek oluşturur (Park vd., 2018). Sonuç olarak, mikrogözeneklerin katkısı nedeniyle yüzey alanı artarken, toplam gözenek hacmi azalır. Bu, mezogözenekli özelliklerden mikrogözenekli özelliklere geçişi gösterir ve zeolitik çerçeve üzerinde yüksek oranda dağılmış bir CeO₂ fazını düşündürür. Gözenek boyutu dağılımlarının analizi, katalizörlerin gözenek özellikleri için daha fazla bilgi sağlamaktadır.



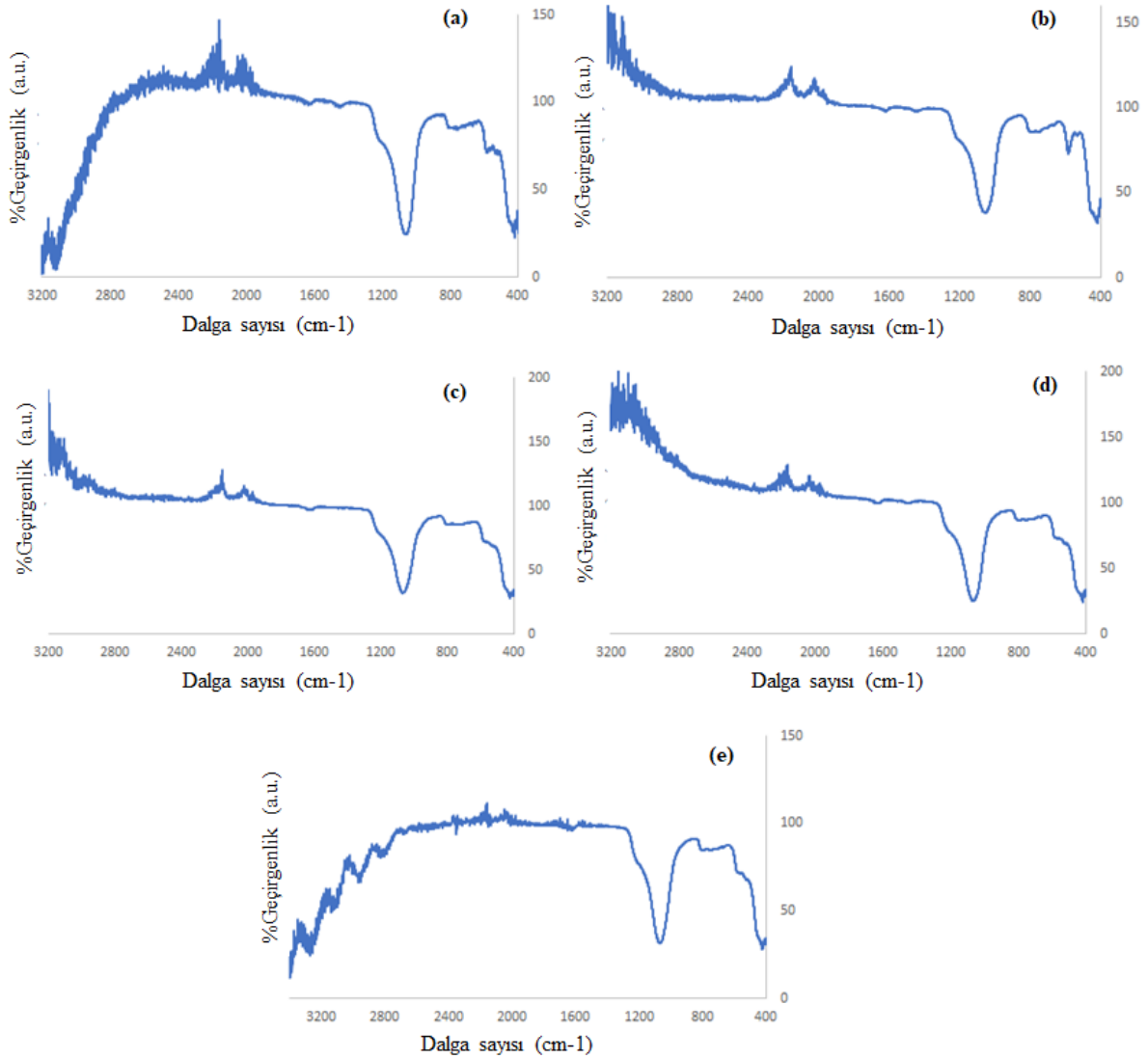
Şekil 6.11. Katalizörlerin N₂ adsorpsiyon/desorpsiyon izotermi

Bu çalışmada incelenen tüm katalizörler için N₂-sorpsiyon izotermi Şekil 6.11’de gösterilmiştir. Katalizörler, şekilde görüldüğü üzere, IUPAC tarafından sınıflandırıldığı gibi Tip I izoterm sergilemektedir (Choi vd., 2009). İzoterm, dar mikrogözeneklerdeki gelişmiş adsorban-adsorptif etkileşimlerle ilgili olan çok düşük p/p^0 ’de (tip Ia) dik bir N₂ alımı ile karakterize edilmiştir. Bu izoterm tipi, esas olarak dar mikrogözeneklere (genişlikler <1 nm) sahip mikrogözenekli malzemelerle ilişkilidir (Ding ve Gao, 2021). Daha yüksek bağıl basınçlarda ($p/p^0 > 0,8$), en belirgin olan küçük bir histerezis gözlemlenmiştir. Bu histerezis döngüsü, zeolitlerin kümelenmesi nedeniyle oluşan parçacıklar arası boşlukların varlığını gösterebilir (Choi vd., 2009; Ding ve Gao, 2021). Sonuç olarak, bu malzemelerde gözlemlenen mezogözeneklilik, parçacıklar arası kılcal yoğunlaşmaya (yani ikincil mezogözeneklere) bağlı olabilir ve nano boyutlu zeolitlerde yaygın olarak gözlemlenir. CeO₂ kaplı H-FER katalizörleri için CeO₂ yüklemesi, düşük p/p^0 değerlerinde adsorbe edilen N₂ miktarında azalmaya, ancak yüksek P/P_0 değerlerinde adsorbe edilen N₂ miktarında artışa neden olmuştur. Bu bulgu, yüksek P/P_0 değerlerinde gözenek hacmini artıracak makrogözenekli CeO₂ oluşumunu düşündürmektedir.

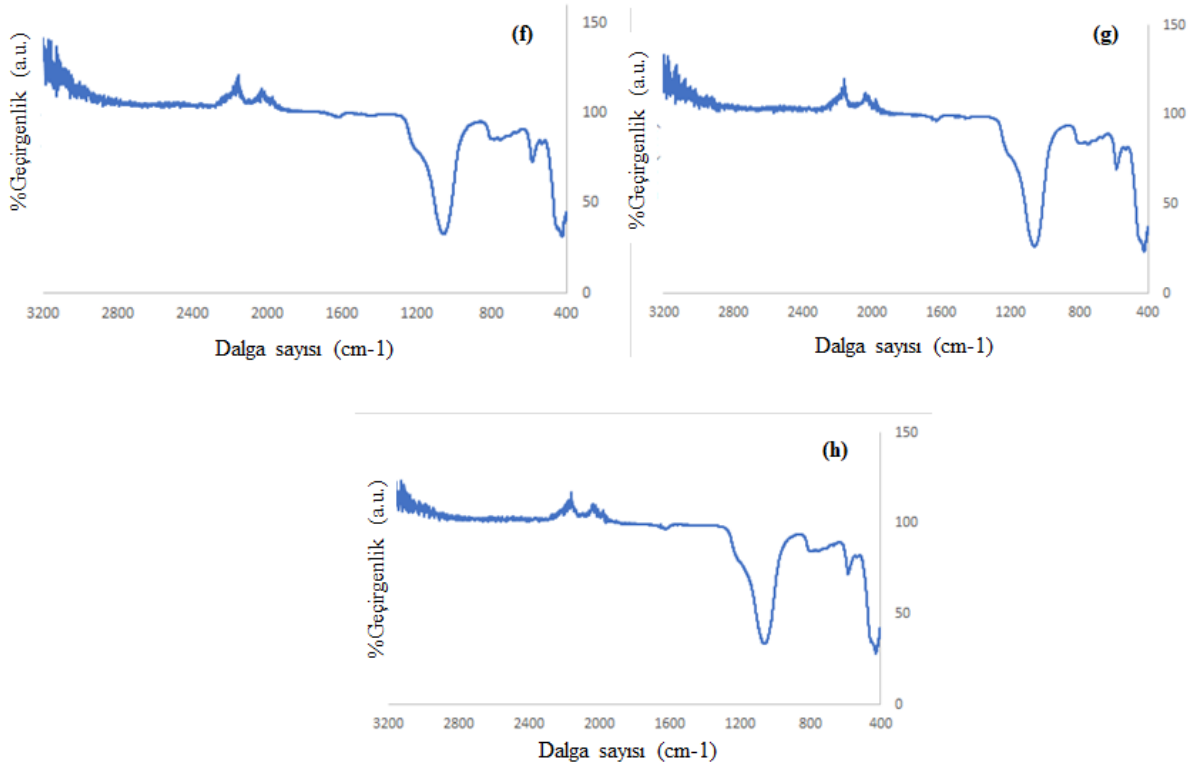
Tüm malzemelere ait FT-IR spektrumları boş, metal yüklü katalizörler için sırasıyla Şekil 6.12’de görülmektedir. FT-IR spektrumlarına bakıldığında, 3200 cm^{-1} bölgesinde gözlenen geniş absorpsiyon bandı katalizör yüzeyinde bulunan hidroksil grupları ile adsorplanmış su moleküllerinin O-H gerilme titreşimlerine bağlanmıştır (Cao vd., 2017). Bu bandın varlığı özellikle CeO_2 yüzeylerinde bulunan hidroksil türleri ve H-FER zeolit yapısındaki Brønsted asit merkezleriyle ilişkilendirilmektedir. CeO_2 ’nin yüksek oksijen depolama kapasitesi nedeniyle yüzey hidroksil yoğunluğunu artırması, bu bölgede gözlenen bandın belirginleşmesine katkı sağlamaktadır. $3000\text{-}2800\text{ cm}^{-1}$ aralığında gözlenen absorpsiyon bantları alifatik C-H gerilme titreşimlerinden kaynaklanmaktadır. Bu bantlar sentez sırasında kullanılan organik öncüllerden veya sol-jel yöntemine bağlı olarak yüzeyde kalabilen eser miktardaki organik kalıntılardan ileri gelebilmektedir. Kalsinasyon işlemi sonrasında bu bantların şiddetinin azalması, organik türlerin büyük ölçüde uzaklaştırıldığını göstermektedir. $2400\text{-}2000\text{ cm}^{-1}$ bölgesinde gözlenen absorpsiyonlar yüzeyde adsorplanmış karbon dioksit molekülleri ile karbonat ve bikarbonat türlerinin titreşimleriyle ilişkilendirilmiştir (Allothman 2012). Özellikle seryum oksit bazlı katalizörlerde atmosferik CO_2 ’nin yüzeye adsorplanması sonucu bu bölgede karakteristik bantların ortaya çıktığı bilinmektedir. Bu durum CeO_2 fazının yüzey aktifliğinin ve bazik karakterinin bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Yaklaşık 1100 cm^{-1} civarında gözlenen kuvvetli absorpsiyon bandı FER tipi zeolit yapısındaki Si-O-Si bağlarının asimetrik gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir (Babaei, 2017). Bu bant zeolit iskeletinin temel karakteristik özelliklerinden biri olup sentez ve metal yükleme işlemleri sonrasında yapısal bütünlüğün korunduğunu göstermektedir. Ayrıca bu bandın belirgin şekilde korunması, CeO_2 kaplama ve Ni yükleme işlemlerinin zeolit kristal yapısında önemli bir bozulmaya yol açmadığını ortaya koymaktadır. Yaklaşık 800 cm^{-1} bölgesinde gözlenen bant Si-O-Si bağlarının simetrik gerilme titreşimlerine bağlanmıştır. Bu titreşimler zeolit yapısının karakteristik özelliklerinden biri olup 1100 cm^{-1} bölgesindeki bantla birlikte değerlendirildiğinde FER iskeletinin sentez sonrasında korunduğunu doğrulamaktadır. 600 cm^{-1} civarında gözlenen absorpsiyonlar ise zeolit yapısında bulunan T-O-T (T=Si veya Al) bağlarının halka titreşimleriyle ilişkilendirilmektedir (Carapellucci ve Milazzo, 2003). Bu bölgedeki bantların korunması, özellikle H-FER@ CeO_2 çekirdek-kabuk yapısının oluşturulması sırasında zeolit kafes yapısının zarar görmediğini ve kristal yapının muhafaza edildiğini göstermektedir.

$500\text{-}400\text{ cm}^{-1}$ bölgesinde gözlenen bantlar Ce-O ve Ni-O bağlarının titreşimlerinden kaynaklanmaktadır. Bu absorpsiyonların varlığı seryum oksit fazının başarıyla oluştuğunu ve

nikel türlerinin katalizör yüzeyine etkin bir şekilde yüklenebildiğini göstermektedir. Ni yükleme oranının artırılmasıyla bu bölgede gözlenen bantların şiddetinde meydana gelen değişimler, metal-oksit etkileşimlerinin güçlendiğine işaret etmektedir. Özellikle H-FER@CeO₂ çekirdek-kabuk katalizörlerinde bu bölgedeki titreşimlerin daha belirgin hale gelmesi, CeO₂ kabuğunun oluşumunu ve Ni türlerinin kabuk yüzeyinde dağıldığını destekleyen önemli bir bulgu olarak değerlendirilebilir.



Şekil 6.12. Katalizörlere ait FT-IR grafikleri



Şekil 6.12. Katalizörlere ait FT-IR grafikleri

(a) $\text{CeO}_2/\text{H-FER}$ (b) $\text{H-FER}@ \text{CeO}_2$
(c) %1Ni $\text{CeO}_2/\text{H-FER}$ (d) %3Ni $\text{CeO}_2/\text{H-FER}$ (e) %5Ni $\text{CeO}_2/\text{H-FER}$
(f) %1Ni $\text{H-FER}@ \text{CeO}_2$ (g) %3Ni $\text{H-FER}@ \text{CeO}_2$ (h) %5Ni $\text{H-FER}@ \text{CeO}_2$

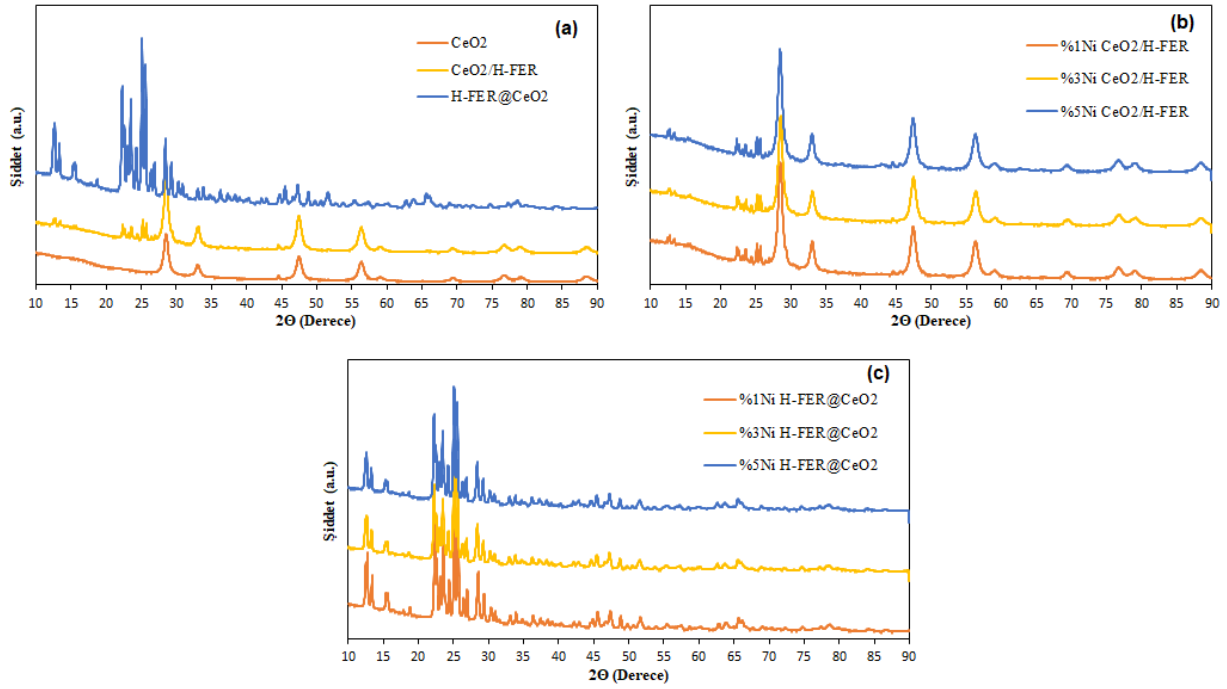
Tüm katalizörlere ait XRD grafikleri Şekil 6.13'te verilmiştir. Şekil 6.13 (a)'da metal yüklenmemiş CeO_2 , $\text{CeO}_2/\text{H-FER}$ ve $\text{H-FER}@ \text{CeO}_2$ katalizörlerine ait XRD desenleri verilmiştir. Saf CeO_2 örneğinde yaklaşık $2\theta=28,6^\circ$; $33,1^\circ$; $47,5^\circ$; $56,3^\circ$; $59,1^\circ$; $69,4^\circ$; $76,7^\circ$ ve $79,1^\circ$ değerlerinde gözlenen karakteristik pikler florit yapılı kübik CeO_2 fazına karşılık gelmektedir. Bu pikler sırasıyla (111), (200), (220), (311), (222), (400), (331) ve (420) düzlemlerine aittir. Piklerin keskin ve belirgin olması sentezlenen CeO_2 fazının yüksek kristalliğe sahip olduğunu göstermektedir. $\text{CeO}_2/\text{H-FER}$ kompozitinde CeO_2 'ye ait karakteristik piklerin korunması, seryum oksit fazının zeolit destek üzerinde başarılı şekilde oluşturulduğunu göstermektedir. Bununla birlikte pik şiddetlerinde meydana gelen azalma ve pik genişlemeleri CeO_2 parçacıklarının H-FER yüzeyine dağıldığını ve kristallik boyutunun bir miktar küçüldüğünü düşündürmektedir. $\text{H-FER}@ \text{CeO}_2$ çekirdek-kabuk katalizöründe ise yaklaşık $2\theta=9-10^\circ$; 13° ; $22-26^\circ$ ve 27° civarında görülen pikler FER tipi zeolit yapısına ait

karakteristik piklerdir. Bu piklerin korunması çekirdek olarak kullanılan H-FER yapısının sentez sırasında bozulmadığını göstermektedir. Ayrıca CeO_2 'ye ait piklerin de gözlenmesi çekirdek-kabuk yapısının başarıyla oluşturulduğunu doğrulamaktadır. H-FER piklerinin CeO_2 /H-FER örneğine göre daha belirgin olması CeO_2 'nin yüzeyde ince bir kabuk oluşturduğunu ve zeolit çekirdeğinin kristal yapısını koruduğunu göstermektedir.

Şekil 6.13 (b)'de %1, %3 ve %5 Ni yüklenmiş CeO_2 /H-FER katalizörlerinin XRD desenleri verilmiştir. Ni yüklemesi sonrasında tüm örneklerde CeO_2 'nin karakteristik pikleri korunmuştur. Bu durum metal yükleme işleminin destek yapısında herhangi bir kristal faz dönüşümüne neden olmadığını göstermektedir. Özellikle $28,6^\circ$; $33,1^\circ$; $47,5^\circ$ ve $56,3^\circ$ civarındaki CeO_2 piklerinin tüm örneklerde varlığını sürdürmesi, seryum oksit kristal yapısının yüksek sıcaklıktaki kalsinasyon sonrasında da stabil kaldığını göstermektedir. Ni yükleme miktarının %1'den %5'e artırılmasıyla CeO_2 piklerinde belirgin bir yer değişimi gözlenmemektedir. Bu durum Ni iyonlarının büyük ölçüde CeO_2 kristal örgüsüne girmediğini, daha çok yüzeyde yüksek dağılımlı NiO türleri halinde bulunduğunu düşündürmektedir. Ayrıca yaklaşık $37,2^\circ$; $43,3^\circ$ ve $62,9^\circ$ civarında gözlenen zayıf sinyaller NiO fazına ait (111), (200) ve (220) yansımalarıyla ilişkilendirilebilir. Ancak bu piklerin oldukça zayıf olması, Ni türlerinin yüksek dispersiyonda bulunduğunu ve büyük NiO kristallerinin oluşmadığını göstermektedir. Özellikle %1 ve %3 Ni yüklemelerinde belirgin NiO piklerinin görülmemesi, Ni' nin destek üzerinde oldukça homojen dağıldığını göstermesi açısından olumlu bir sonuçtur. %5 Ni yüklemesinde bazı piklerin şiddetindeki artış ve taban çizgisindeki değişimler NiO parçacıklarının kısmen aglomerasyon eğilimi göstermeye başladığını düşündürmektedir. Ancak yine de belirgin yeni kristal fazların oluşmaması metal-destek etkileşiminin güçlü olduğunu göstermektedir.

Şekil 6.13 (c)'de %1, %3 ve %5 Ni yüklenmiş H-FER@ CeO_2 çekirdek-kabuk katalizörlerinin XRD desenleri verilmiştir. Tüm örneklerde FER zeolitine ait karakteristik piklerin korunması, çekirdek yapının Ni yükleme ve kalsinasyon işlemlerinden etkilenmediğini göstermektedir. Bu durum çekirdek-kabuk sentez yönteminin yapısal kararlılık açısından başarılı olduğunu ortaya koymaktadır. Aynı zamanda CeO_2 'ye ait karakteristik piklerin de korunması CeO_2 kabuğunun kristal yapısını muhafaza ettiğini göstermektedir. CeO_2 ve H-FER piklerinin aynı anda gözlenmesi çekirdek-kabuk mimarisinin oluştuğuna dair önemli bir kanıt oluşturmaktadır. Ni yüklemesi arttıkça herhangi bir yeni kristalin fazın ortaya çıkmaması, Ni türlerinin büyük ölçüde amorf veya yüksek dağılımlı halde bulunduğunu göstermektedir. Bu

durum katalitik açıdan oldukça avantajlıdır çünkü yüksek metal dispersiyonu aktif yüzey alanını artırmaktadır. Özellikle %3Ni H-FER@CeO₂ ve %5Ni H-FER@CeO₂ örneklerinde CeO₂ piklerinin şiddetinde hafif artış gözlenmesi, Ni ile CeO₂ arasındaki etkileşimin kristal düzeni kısmen iyileştirmiş olabileceğini düşündürmektedir. Bununla birlikte herhangi bir Ce-Ni karma oksit fazına ait belirgin yeni piklerin gözlenmemesi, Ni'nin büyük ölçüde yüzeyde dağılmış halde bulunduğunu göstermektedir.



Şekil 6.13. Katalizörlere ait XRD grafikleri

(a) Boş (b) sol-jel metoduyla sentezlenen (c) çekirdek-duvar metoduyla sentezlenen katalizörler

Katalizörlere ait TEM görüntüleri Şekil 6.14'te verilmiştir. Şekilde verilen TEM görüntüleri incelendiğinde, sol-jel yöntemiyle sentezlenen boş CeO₂/H-FER katalizörünün düzensiz şekilli ve birbirine bağlı nanopartiküllerden oluşan aglomere olmuş bir morfoloji sergilediği görülmektedir. Görüntüde koyu bölgeler yüksek elektron yoğunluğuna sahip CeO₂ fazını temsil ederken daha açık kontrastlı bölgeler H-FER zeolit yapısına karşılık gelmektedir. CeO₂ parçacıklarının zeolit yüzeyine başarıyla tutunduğu ve kompozit yapının oluştuğu gözlenmektedir. Bununla birlikte parçacıkların birbirleriyle temas halinde bulunması, sol-jel sentezine özgü belirli düzeyde aglomerasyonun meydana geldiğini göstermektedir (Eloi vd., 2024).

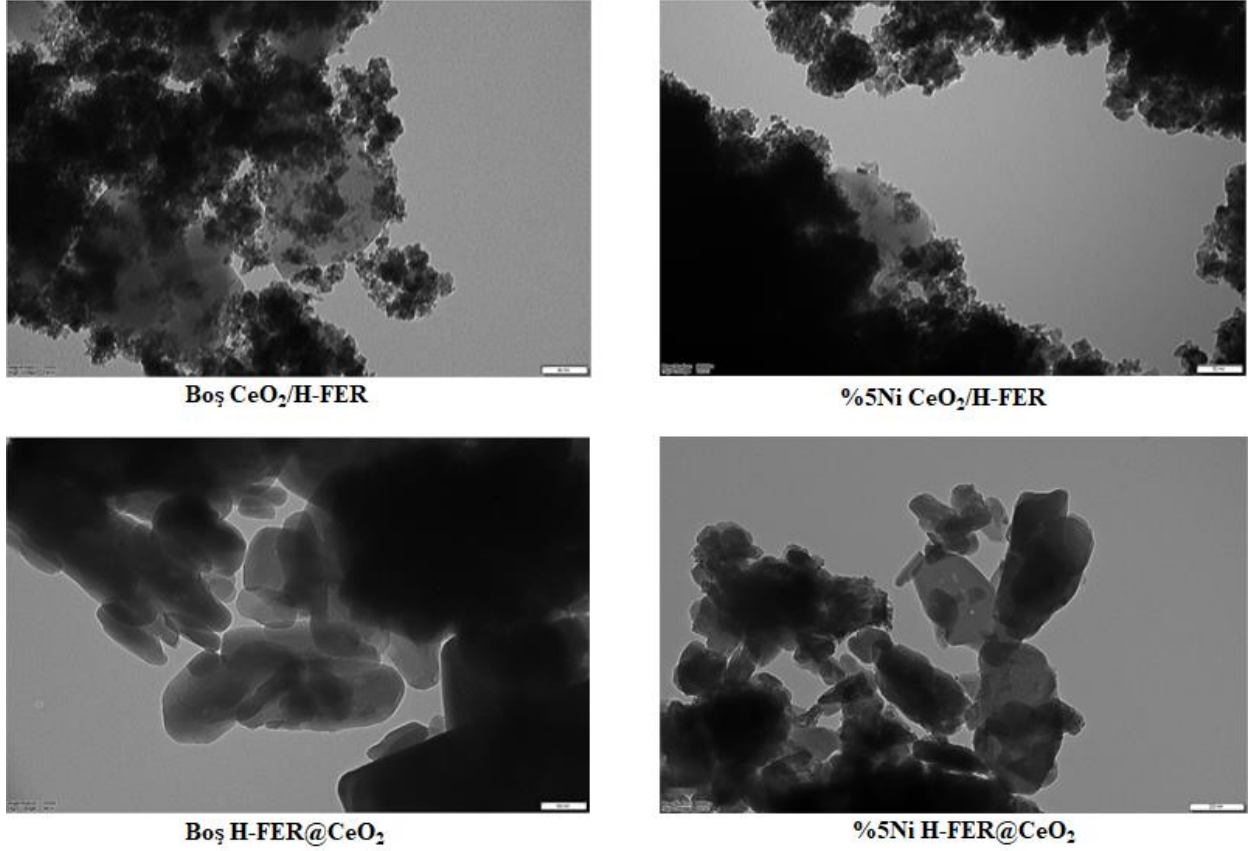
%5Ni CeO₂/H-FER katalizörüne ait TEM görüntüsünde genel morfolojik yapının korunduğu görülmektedir. Ni yüklemesi sonrasında CeO₂ ve H-FER fazları arasındaki temasın devam ettiği, yapıda belirgin bir çökme veya bozunma meydana gelmediği anlaşılmaktadır. Ancak boş katalizöre kıyasla bazı bölgelerde daha yoğun kontrastlı alanların oluşması, Ni türlerinin CeO₂ yüzeyi üzerinde yerleşmesi ve kısmen parçacık büyümesine katkıda bulunmasıyla ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte büyük metal kümelerinin gözlenmemesi, Ni türlerinin destek yüzeyinde dispersiyonla dağıldığını göstermektedir. Bu gözlem, SEM-EDX analizlerinde elde edilen homojen Ni dağılımı sonuçlarıyla uyumludur.

Boş H-FER@CeO₂ katalizörüne ait TEM görüntüsü diğer örneklerle göre daha belirgin yapısal özellikler sergilemektedir. Görüntüde nispeten daha büyük ve düzenli parçacıkların varlığı dikkat çekmektedir. Açık ve koyu kontrast bölgeleri arasındaki farklar, H-FER çekirdeği ile CeO₂ kabuğu arasında yoğunluk farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Özellikle parçacıkların çevresinde gözlenen daha açık kontrastlı bölgeler ile merkezdeki daha koyu alanlar, çekirdek-kabuk yapısının oluştuğunu destekleyen önemli morfolojik göstergeler olarak değerlendirilebilir. Bu durum XRD analizlerinde belirlenen H-FER ve CeO₂ fazlarının birlikte varlığıyla da uyum göstermektedir.

%5Ni H-FER@CeO₂ katalizöründe çekirdek-kabuk yapının genel olarak korunduğu görülmektedir. Ni yüklemesi sonrasında parçacık morfolojisinde önemli bir değişiklik meydana gelmemiş ve yapısal bütünlük korunmuştur. Bazı bölgelerde kontrast farklılıklarının artması, Ni türlerinin CeO₂ kabuğu üzerinde yerleşmesiyle ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte belirgin metal aglomerasyonlarının görülmemesi, Ni parçacıklarının kabuk yüzeyinde homojen şekilde dağıldığını göstermektedir. Ayrıca çekirdek-kabuk yapısının Ni yükleme sonrasında da korunmuş olması, CeO₂ kabuğunun metal türlerini stabilize etme açısından etkili olduğunu göstermektedir.

TEM sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, hem sol-jel hem de çekirdek-kabuk yöntemleriyle hedeflenen hibrit yapıların başarıyla sentezlendiği görülmektedir. Sol-jel yöntemiyle hazırlanan katalizörlerde daha düzensiz ve aglomere olmuş bir morfoloji gözlenirken, çekirdek-kabuk yöntemiyle hazırlanan H-FER@CeO₂ katalizörlerinde daha düzenli ve kompakt bir yapı elde edilmiştir. Ni yüklemesi sonrasında her iki katalizör sisteminde de yapısal bütünlük korunmuş ve belirgin metal aglomerasyonları oluşmamıştır. Bu durum Ni türlerinin destek yüzeyinde yüksek dispersiyonla dağıldığını ve metal-destek etkileşiminin güçlü olduğunu göstermektedir. Özellikle H-FER@CeO₂ sisteminde gözlenen

düzenli morfoloji ve korunan çekirdek-kabuk yapısı, katalitik reaksiyonlarda aktif merkezlerin daha etkin kullanılmasına katkı sağlayabilecek önemli bir avantaj olarak değerlendirilmektedir.

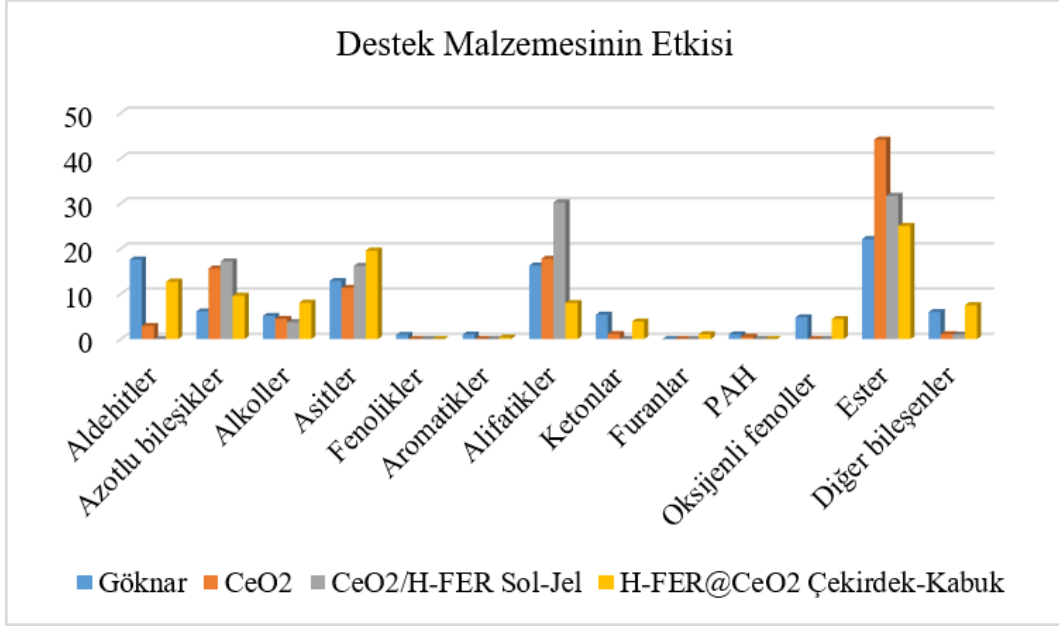


Şekil 6.14. Katalizörlere ait TEM görüntüleri

6.3. Py-GC/MS Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar

Gök nar ağacı talaşının pirolizinde destek malzemesinin ürün dağılımı üzerine etkisi Şekil 6.15'te verilmiştir. Gök nar talaşının katalizör kullanılmadan gerçekleştirilen piroliz reaksiyonuna göre ürün dağılımında aldehytler, asitler, alifatikler ve esterler gruplar olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, selüloz, hemiselüloz ve lignin içeren lignoselülozik biyokütle örneklerinin pirolizinin incelendiği literatür çalışmaları ile uyum içerisindedir. Selüloz ve hemiselülozun parçalanma ürünleri oksijenli bileşikler oluştururken, lignin parçalanması ise fenolik ve aromatik bileşikler oluşturmaktadır (Saleh vd., 2025; El-Bari vd., 2024). Gök nar ağacı talaşının piroliz ürünleri içerisinde aldehytlerin yüksek olması, selüloz ve hemiselülozun termal bozunması sırasında oluşan karbonil ara ürünlerinden kaynaklanırken, asitlerin varlığı ise asetil grupları, hemiselüloz bozunması ve biyokütlerde bulunan ekstraktif kökenli yağ asidi türevlerinin ısıl bozunması ile ilişkilendirilebilir (Carrier vd., 2020). CeO₂ katalizörlüğünde

gerçekleştirilen piroliz deneyleri sonucunda en dikkat çekici eğilim, bozunma ürünleri içerisindeki ester miktarının artması aynı zamanda aldehit miktarının da azalmasıdır. CeO₂ katalizör yüzeyinin redoks karakteri ve oksijen boşlukları sebebiyle oksijenli ara ürün dönüşümünü desteklediği sonucuna varılabilir. CeO₂ katalizörün bu özelliği aldehit, keton ve asit gibi oksijenli ara ürünlerin tekrar dönüşerek, esterleşme reaksiyon ürünlerine yönelmesine katkı sağlamış olabilir (Shao vd., 2021). CeO₂ katalizörün bu aktivitesi yakıt potansiyeli açısından istenen bir sonuçtur; çünkü esterler, asit ve aldehitlere göre daha düşük korozivite ve daha yüksek enerji yoğunluğu ile ilişkilendirilirler. Sol-jel yöntemiyle sentezlenmiş CeO₂/H-FER katalizörlüğünde gerçekleştirilen piroliz deneylerinde, alifatik bileşiklerin arttığı belirlenmiştir. Alifatiklerin artmış olması, yakıt karakteri açısından önemli bir sonuçtur çünkü alifatik hidrokarbonlar piroliz sıvı ürününün yakıt karakteri açısından en olumlu gruplardan biridir. H-FER'in Brønsted asit merkezleri parçalanma, dehidrasyon ve yeniden düzenlenme reaksiyonlarını desteklerken, CeO₂'nin Ce⁺⁴/Ce⁺³ redoks çifti ve oksijen boşlukları aldehit, keton ve karboksilik asit gibi oksijenli bileşiklerin deoksijenasyonunu kolaylaştırabilir. Ayrıca sol-jel yöntemiyle elde edilen homojen CeO₂ dağılımı ve yüksek aktif yüzey alanı, katalitik aktif merkezlerin biyokütle piroliz buharlarıyla temasını artırarak hidrokarbon oluşumunu desteklemiş olabilir. Sonuç olarak oksijenli bileşiklerin bir kısmı alifatik hidrokarbonlara dönüştürülmüş ve ürün dağılımında alifatik fraksiyonun önemli ölçüde yükselmesine neden olmuştur (El-Bari vd., 2024; Lei vd., 2020). Bu katalizör varlığında, azotlu bileşiklerin de arttığı görülmüştür, bu durum CeO₂ ile H-FER'in birlikte kullanılmasının hidrokarbonlaşma ve deoksijenasyon reaksiyonlarında da etkili olabileceğini gösterir. H-FER'in asidik gözenekli yapısı, kraking, dehidrasyon ve izomerizasyon gibi reaksiyonları destekleyebilir (Wei vd., 2025). H-FER@CeO₂ katalizörünün kullanıldığı piroliz reaksiyonlarının bozunma ürünlerinde asitlerin dikkate değer bir şekilde arttığı belirlenmiştir. Çekirdek-kabuk yapıda aktif merkezlerin erişilebilirliği, gözenek yapısı ve CeO₂-H-FER ara yüzeyinin, ürün dağılımını farklılaştırdığı düşünülebilir (Zhou vd., 2026). Aldehitlerin katalizörsüz piroliz deneylerine göre azalması istenen bir sonuçtur; çünkü aldehitler biyoyağ kararlılığı açısından genellikle istenmeyen, reaktif oksijenli bileşiklerdir (Sun vd., 2025; El-Bari vd., 2024). Elde edilen sonuçlara göre, farklı destek malzemelerinin piroliz ürün dağılımını etkilediği belirlenmiştir. CeO₂ ester oluşumunu desteklerken, sol-jel yöntemiyle sentezlenmiş CeO₂/H-FER alifatik hidrokarbon oluşumunu desteklemekte son olarak ise çekirdek-kabuk yöntemiyle sentezlenen H-FER@CeO₂ katalizörü ester ve asit oluşumunu desteklemiştir.

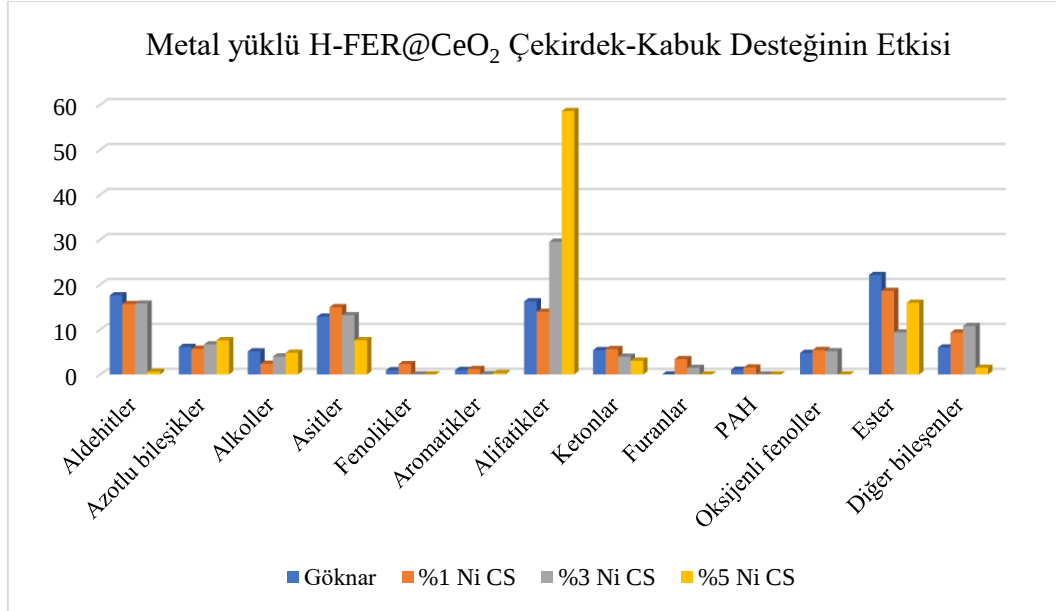


Şekil 6.15. Göknar ağacı talaşının pirolizinde destek malzemesinin etkisi

Çekirdek-kabuk metoduyla sentezlenen %1, %3 ve %5 Ni içerikli katalizörlerin göknar ağacı talaşının pirolizine olan etkisinin belirlenmesi için gerçekleştirilen Py-GC/MS analizlerinin sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 6.16’da verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Ni miktarının artmasının ürün dağılımında her fonksiyonel grup için farklı bir seçicilik oluşturduğunu göstermektedir. Özellikle %3 ve %5 Ni yüklemeleri arasında alifatik hidrokarbon oluşumunda belirgin bir artış gözlenmiştir; aldehitler, esterler ve diğer oksijenli bileşiklerin miktarında ise önemli değişimler görülmüştür. Bu durum, metal yüklemesinin yalnızca aktif merkez sayısını değil, aynı zamanda reaksiyon sistemini de değiştirdiğini göstermektedir. Ni yüklü katalizör eşliğinde gerçekleştirilen hızlı piroliz deneylerinde nikelin temel rolü, reaksiyonlar sırasında oluşan oksijenli ara ürünlerdeki C-O bağlarının kırılması, hidrojen transfer reaksiyonlarının hızlandırılması ve hidrokarbon oluşumunun desteklenmesidir (Yin vd., 2020; Cho, 2020). Ni miktarındaki değişim, bu reaksiyonların göreceli hızlarını değiştirebilir. En dikkat çekici sonuçlardan biri aldehit grubundaki değişimde görülmektedir. Piroliz sıvı ürünü içerisindeki aldehitler en reaktif oksijenli bileşiklerden biri olduğu için istenmeyen ürünlerdir. Depolama sırasında aldol kondenzasyonu, polimerizasyon ve reçineleşme reaksiyonlarına neden olarak sıvı ürünün viskozitesini artırabilir ve depolama koşullarında kararlılığı azaltabilir (Dickerson ve Soria, 2013). Özellikle %5 Ni içeren H-FER@CeO₂ çekirdek-kabuk katalizörünün, aldehitlerin giderilmesi açısından diğer katalizörlerden belirgin şekilde daha başarılı olduğu belirlenmiştir. Uzun zincirli alifatik hidrokarbonların (alkanlar ve alkenler) artması, sıvı ürünün hidrokarbon karakterini güçlendirdiği için yakıt özelliklerinin iyileştiğini gösterir. Sonuçlar

incelendiğinde, sıvı ürün içindeki alifatik miktarını en çok artıran katalizörün %5 Ni içeren H-FER@CeO₂ çekirdek-kabuk katalizörü olduğu görülmüştür. Bu sonuç, yalnızca daha fazla hidrokarbon oluştuğunu değil, aynı zamanda piroliz reaksiyonlarının oksijenli ürünlerden hidrokarbon oluşumuna doğru kaydığını göstermektedir. Oksijenli fenol miktarının da bu katalizör varlığında dikkat çekici biçimde azalmış olması bunun bir diğer kanıtıdır. Ni katalizörler hidrojen transferi, dekarbonilasyon, dekarboksilasyon ve C-O bağlarının parçalanması reaksiyonlarını hızlandırmaktadır (Lei vd., 2020). Bu nedenle daha yüksek Ni yüklemelerinde oksijenli ara ürünlerin hidrokarbonlara dönüşmesi beklenen bir sonuçtur. Sıvı ürün içerisindeki serbest yağ asitleri ve kısa zincirli karboksilik asitler, korozif özelliği artırmaktadır. Bu sebeple katalizör kullanılarak sıvı ürün içindeki asit miktarının azaltılması da hedeflenmektedir. Katalizör varlığında, karboksilik asitler CO₂ ve hidrokarbonlara dönüşürler, bu reaksiyonlar ayrıca sıvı ürünün oksijen içeriğini düşüren önemli mekanizmalardan biridir (Liu vd., 2014). Ester oluşumu incelendiğinde, Ni yüklemesi arttıkça ester miktarı doğrusal olarak artmamaktadır. Buna göre, seri ve paralel reaksiyonlar olarak gerçekleşen piroliz reaksiyonları sırasında esterlerin yalnızca oluşum reaksiyonlarında değil, parçalanma reaksiyonlarında da rol aldığı belirlenebilir. %3 Ni yüklenen katalizör, esterlerin hidrokarbonlara dönüşmesini kolaylaştırmıştır. %5 Ni yüklenen katalizör kullanıldığında ise, katalitik seçiciliğin değişmesi ve farklı reaksiyon yolları arasındaki rekabetten dolayı ester miktarında artış gerçekleşmiş olabilir (Belousov vd., 2021). Uzun zincirli yağ asidi esterleri serbest yağ asitlerine göre daha düşük korozivite ve daha yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle yakıt özellikleri açısından yakıt kalitesini bozmayan bileşikler olarak değerlendirilmekle birlikte, katalizör varlığında gerçekleştirilen piroliz işlemlerinde temel hedef hidrokarbon bakımından zengin ürünlerin elde edilmesidir. Bu nedenle alifatik hidrokarbonların artması ve esterlerin tamamen giderilmeden orta seviyelerde bulunması, ürün dağılımının yakıt karakteri yüksek bileşiklere doğru yöneldiğini göstermektedir (Rath vd., 2026). Yaklaşık %6–8 arasında kalan azotlu bileşiklerin dağılımı, Ni yüklü katalizörün göknar ağacı talaşı gibi düşük azot içerikli lignoselülozik biyokütle örneğinin pirolizinde azotlu ürün oluşumunu kayda değer şekilde değiştirmedeği belirlenmiştir. Fenolik bileşiklerin sıvı ürün içerisindeki dağılımı incelendiğinde, tüm deney sonuçlarında oldukça düşük değerler belirlenmiştir. Fenolik bileşikler, ligninin bozunma ürünleridir (Özbay ve Yaman, 2018). Elde edilen grafiklere göre, lignin pirolizi sırasında oluşan fenolik ara ürünlerin katalizör yüzeyinde dehidroksilasyon, demetoksilasyon, dekarbonilasyon ve kondenzasyon gibi ikincil reaksiyonlara uğrayarak ikincil ürünlere dönüştüğü söylenebilir (Pan vd., 2024). Sonuç olarak, Ni yükleme oranının çekirdek-

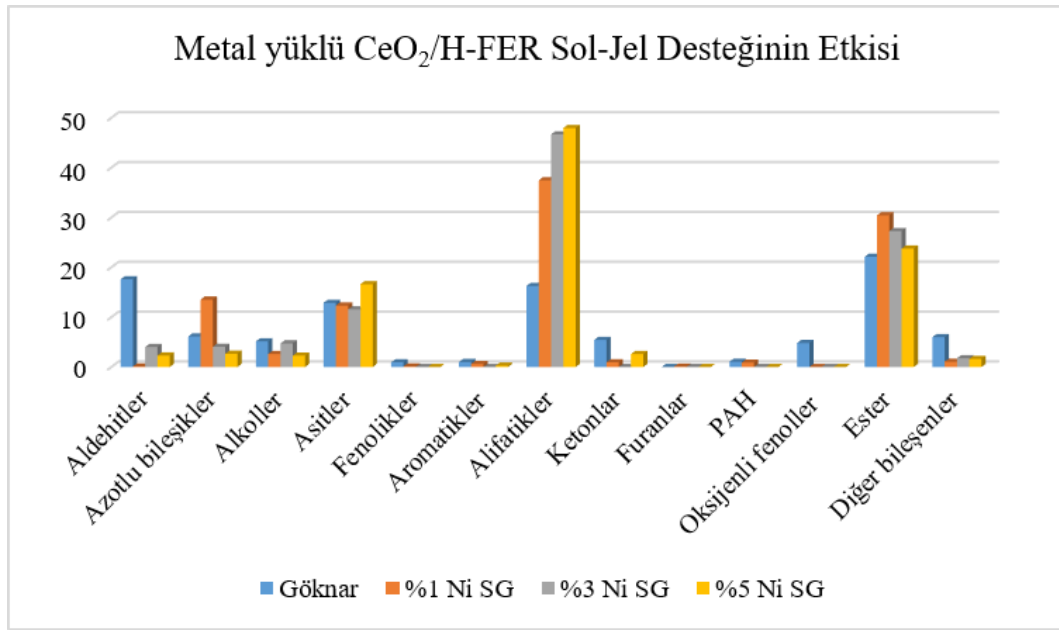
kabuk katalizörün ürün seçiciliğini önemli ölçüde değiştirdiği, özellikle %5 Ni yüklenen H-FER@CeO₂ katalizörün hidrokarbon bakımından zengin ürün oluşumunu destekleyerek piroliz ürünlerinin yakıt potansiyelini artırdığı görülmüştür.



Şekil 6.16. Çekirdek-kabuk metoduyla sentezlenen %1, %3 ve %5 Ni içerikli katalizörlerin göknar ağacı talaşının pirolizine olan etkisi

Sol-jel yöntemiyle sentezlenen %1, %3 ve %5 Ni içerikli katalizörlerin göknar ağacı talaşının pirolizine olan etkisinin belirlenmesi için gerçekleştirilen Py-GC/MS analizlerinin sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 6.17’de verilmiştir. Sol-jel yöntemiyle hazırlanan ve farklı oranlarda Ni içeren CeO₂/H-FER katalizörleri, göknar ağacı talaşı pirolizinde ürün seçiciliğini çekirdek-kabuk yönteminde de olduğu gibi önemli ölçüde değiştirmiştir. Özellikle %3 ve %5 Ni içeren katalizörler oksijenli bileşiklerin (aldehit, keton, oksijenli fenoller ve diğer oksijenli ürünler) azaltılmasını sağlarken, alifatik hidrokarbon oluşumunu artırmıştır. Alifatik hidrokarbonlar sıvı ürün içerisinde istenen ürünler olduğundan, bu katalizörler sıvı ürünün iyileştirilmesinde ön plana çıkmaktadır (Yin vd., 2020). Elde edilen sonuçlardan ester miktarları incelendiğinde, sıvı ürün içerisindeki en yüksek ester fraksiyonunun %1 Ni içeren katalizör ile sağlandığı, katalitik olmayan deneylerde düşük olan PAH oluşumunun katalizör kullanımı ile daha da azaldığı belirlenmiştir. Katalizör yardımı ile PAH bileşiklerinin miktarının azaltılması istenen bir durumdur. PAH’lar yüksek molekül ağırlıklı, kararlı ve toksik bileşiklerdir. Mutajenik ve kanserojen özellik gösterebilirler (Feng vd., 2025). Bu sebeple, PAH oluşumunun azaltılması, hem piroliz sıvı ürününün çevresel etkisini azaltır, hem de sürdürülebilir yakıt üretimi açısından önemli bir avantaj olarak değerlendirilebilir. Elde edilen

bu sonuçlar, sol-jel yöntemiyle elde edilen homojen metal dağılımının Ni yüklü CeO₂/H-FER arasındaki sinerjik etkileşimi güçlendirdiğini ve katalitik piroliz ürünlerini daha düşük oksijen içeriğine ve daha yüksek yakıt potansiyeline sahip bir kompozisyona yönlendirdiğini göstermektedir. Çekirdek-kabuk yöntemi, özellikle yüksek Ni yüklemelerinde (%5 Ni) oksijenli bileşiklerin giderilmesi ve alifatik hidrokarbon oluşumu bakımından daha yüksek katalitik aktivite göstermiştir. Sol-jel yöntemi ise daha dengeli bir ürün dağılımı sağlayarak hidrokarbon üretimini artırırken uzun zincirli ester fraksiyonunun da korunmasını sağlamıştır. Bu durum, çekirdek-kabuk yapının daha yüksek reaksiyon aktivitesine, sol-jel yönteminin ise daha kontrollü ürün seçiciliğine sahip olduğunu göstermiştir.

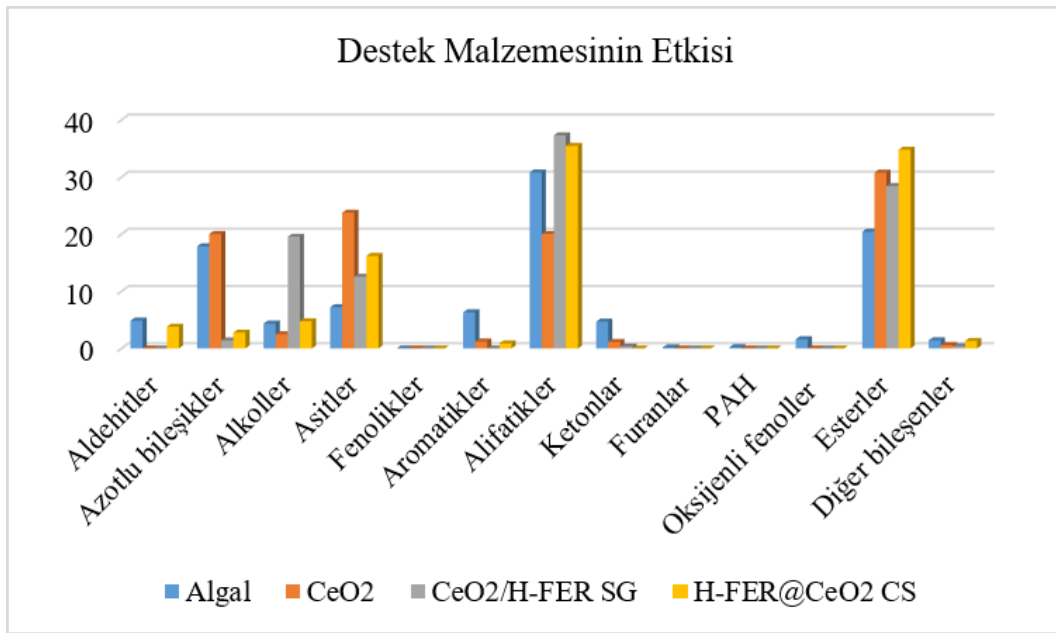


Şekil 6.17. Sol-jel metoduyla sentezlenen %1, %3 ve %5 Ni içerikli katalizörlerin göknar ağacı talaşının pirolizine olan etkisi

Chlorella tozunun pirolizinde destek malzemesinin ürün dağılımı üzerine etkisi Şekil 6.18’de verilmiştir. Göknar ağacı talaşından farklı olarak *Chlorella*’nın yüksek protein (~%40-60) ve lipid (~%10-30) içeriği nedeniyle ürün dağılımında azotlu bileşikler, yağ asidi türevleri ve uzun zincirli hidrokarbonların daha belirgin olduğu görülmüştür (Gong vd., 2014). Aldehit miktarının hem katalitik olmayan hem de katalitik pirolizden elde edilen sıvı ürünler içerisinde düşük olduğu belirlenirken, en az aldehit miktarı özellikle CeO₂ ve CeO₂/H-FER SG katalizörleri kullanıldığında elde edilmiştir. Bu sonuç, karbonhidrat kökenli aldehitlerin katalizör yüzeyinde ileri dönüşüm reaksiyonlarına uğramasından dolayı olabilir. Mikro alglerde karbonhidrat oranı, lignoselülozik biyokütlelere göre daha düşük olduğundan, aldehitlerin

başlangıçta da düşük oranda oluşması beklenen bir sonuçtur (Li vd., 2019). Elde edilen sonuçlarda en dikkat çekici değişimlerden biri azotlu bileşiklerin miktarında görülmüştür. *Chlorella* tozu protein içeriği yüksek olduğundan, piroliz reaksiyonları sırasında piridinler, pirroller, amidler, nitriller ve aminler oluşmaktadır (Yin vd., 2023). Piroliz sıvı ürününün yakıt özellikleri incelendiğinde, azotlu bileşikler yanma sırasında NO_x emisyonlarına sebep olduğu için istenmezler (Li vd., 2019). Bu bileşikler ayrıca sıvı ürünün kimyasal kararlılığını da olumsuz etkileyebilir. CeO₂/H-FER SG ve H-FER@CeO₂ CS katalizörleri kullanıldığında azotlu bileşiklerin kayda değer şekilde azalması, destek malzemesinin azotlu ara ürünlerin ikincil dönüşümünü desteklediğini göstermektedir. Alkol içeriğinin CeO₂/H-FER katalizörü varlığında artmış olması uzun zincirli yağ alkollerinin (1-hexadecanol, 1-octadecanol ve 1-heneicosanol gibi) veya sterol türevlerinin korunmasıyla ilişkili olabilir (Blasio ve Balzano, 2021). CeO₂ katalizör varlığında sıvı ürün içerisindeki asit oranının %7,21'den %23,77'ye arttığı belirlenmiştir. Mikro alglerde bulunan yağ asitleri ve lipidlerin parçalanması sonucunda oluşan serbest yağ asitlerinin CeO₂ varlığında daha fazla korunduğu düşünülebilir. Buna karşılık CeO₂/H-FER SG ve H-FER@CeO₂ CS kullanıldığında asit miktarı azalmakta ancak katalizörsüz piroliz deneylerinden elde edilen asit miktarından daha düşük seviyelere azaltılamamıştır. Bu sonuç, H-FER'in Brønsted asit merkezlerinin yağ asidi türevlerinin ikincil katalitik dönüşümünü kolaylaştırmış olabileceğine bağlanabilir (Li vd., 2019). Fenolik bileşikler ligninin bozunma ürünü olduğundan, *Chlorella* tozunun pirolizinden elde edilen sıvı ürün içerisinde fenolik bileşenlere rastlanmamıştır. Katalitik olmayan ve katalitik pirolizden elde edilen alifatik miktarları karşılaştırıldığında, *Chlorella* tozunun pirolizinden %30,81; CeO₂ katalizör kullanıldığında %20,04; CeO₂/H-FER SG kullanılan katalizörde %37,31 ve H-FER@CeO₂ CS kullanılan katalizörde %35,45 oranında alifatik hidrokarbon elde edildiği hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler CeO₂/H-FER SG desteğinin lipid kökenli uzun zincirli hidrokarbon oluşumunu daha etkin şekilde desteklediğini göstermektedir (Li vd., 2019). Sıvı ürün yakıt özellikleri açısından incelendiğinde bu sonuç istenen bir sonuçtur, uzun zincirli alifatik hidrokarbonlar sıvı ürünün enerji yoğunluğunu artıran en önemli ürün gruplarından biridir (Bridgwater, 2012). Sıvı ürün içerisinde bulunan ketonlar, yakıt özellikleri açısından aldehit ve asitlere göre daha az sorun oluştururlar. Ancak, oksijen içerirler ve hidrokarbonlara göre daha düşük ısı değere sahiptir. Bu sebeple piroliz reaksiyonları sırasında katalizör kullanılarak hidrokarbonlara dönüştürülmeleri hedeflenir (Bridgwater, 2012; Liu vd., 2014; Lei vd., 2020). Katalizör kullanılmadığında sıvı ürün içerisinde %4,69 oranında keton bulunurken, katalitik piroliz ile bu değer H-FER@CeO₂ CS ~%0 değerine kadar düşürülmüştür. Ester grubu

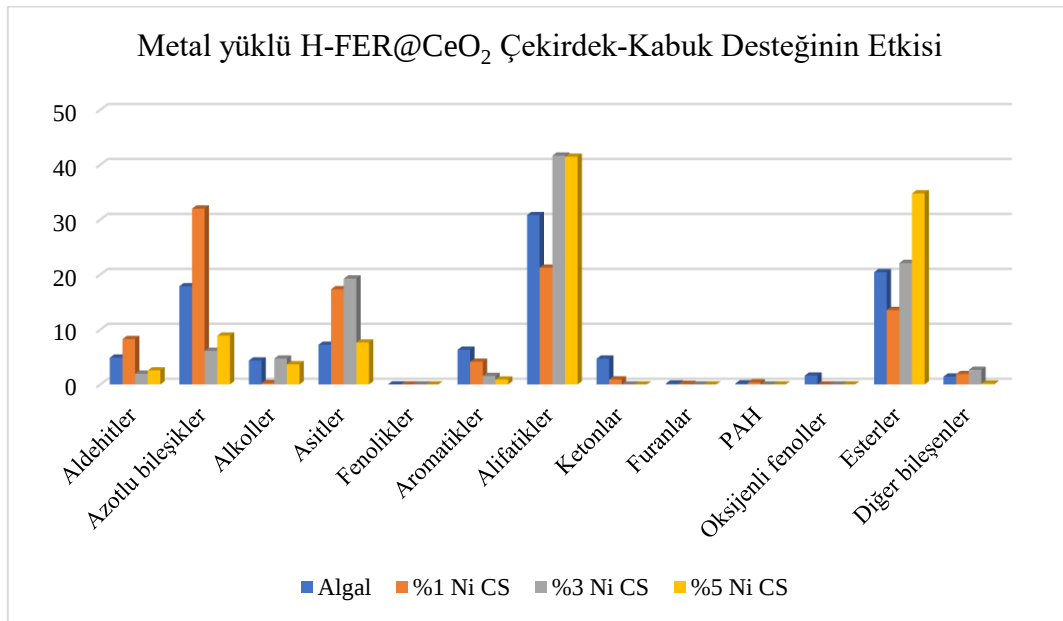
ise destek malzemesi farkından en çok etkilenen grup olarak karşımıza çıkmaktadır. Mikro alglerde lipit içeriği yüksek olduğundan uzun zincirli yağ asidi esterlerinin oluşumu beklenen bir sonuçtur. Özellikle H-FER@CeO₂ CS katalizör kullanıldığında ester fraksiyonunun en yüksek oranda elde edilmesi, yakıt özellikleri açısından avantaj sağlayabilir. Elde edilen sonuçlara göre, kullanılan destek malzemesinin *Chlorella* tozunun pirolizinde ürün seçiciliğini belirleyen en önemli parametrelerden biri olduğunu göstermiştir. CeO₂/H-FER SG desteği, hidrokarbon bakımından zengin ve oksijenli ile azotlu bileşikler bakımından daha dengeli bir ürün dağılımı sağlayarak yakıt kalitesi açısından en başarılı katalitik performansı sergilerken, H-FER@CeO₂ CS katalizörü uzun zincirli ester oluşumunu daha fazla hızlandırmıştır.



Şekil 6.18. *Chlorella* tozunun pirolizinde destek malzemesinin etkisi

Çekirdek-kabuk yöntemiyle sentezlenen %1, %3 ve %5 Ni içerikli katalizörlerin *Chlorella* tozunun pirolizine olan etkisinin belirlenmesi için gerçekleştirilen Py-GC/MS analizlerinin sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 6.19'da verilmiştir. Nikel yüklü H-FER@CeO₂ katalizörlerinin, *Chlorella* tozunun piroliz ürün dağılımını önemli ölçüde değiştirdiği belirlenmiştir. Azotlu bileşikler sıvı ürün içerisinde istenmeyen bileşiklerdir ve katalizöre %1 oranında Ni yüklenmesi azotlu bileşiklerin %32 oranına çıkmasına sebep olmuştur. Ni yükleme oranının %3 ve %5'e çıkarılmasıyla istenmeyen bu bileşiklerin önemli ölçüde azaldığı (sırasıyla %6,11 ve %8,89), buna karşılık alifatik hidrokarbonların sırasıyla yaklaşık %41,65 ve %41,45 oranına yükseldiği belirlenmiştir. Bu durum, yüksek Ni yüklemelerinde katalitik deoksijenasyon ve hidrokarbon oluşumunun daha etkin gerçekleştiğini düşündürmektedir (Li

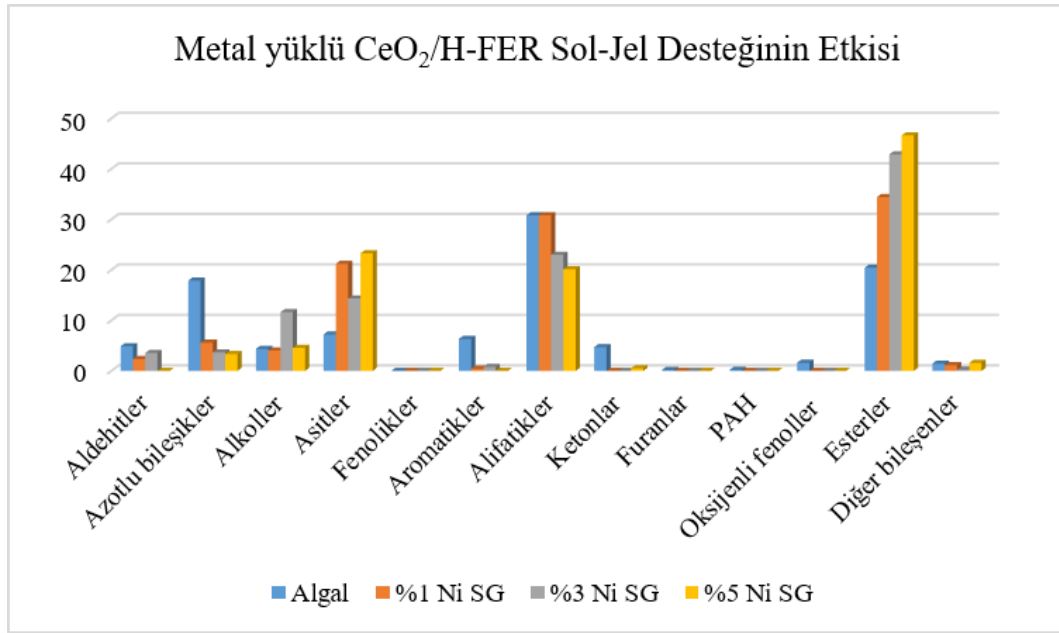
vd., 2019; Lei vd., 2020). Buna ek olarak, keton, furan, PAH ve oksijenli fenol miktarlarının tüm katalizörlerde oldukça düşük seviyelerde kalması, istenmeyen oksijenli ve toksik bileşiklerin oluşumunun katalizörler tarafından desteklenmediğini göstermektedir. %5 Ni yüklü katalizör kullanıldığında, sıvı ürün içerisindeki ester miktarı en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Buna göre, uzun zincirli yağ asidi esterlerinin ürün dağılımında korunduğunu veya tercihi olarak oluştuğunu düşünülebilir. Bunun yanında, sıvı ürün içindeki yakıt özelliğini en çok iyileştiren alifatik bileşiklerin de %5 Ni yüklü katalizör varlığında en yüksek değere ulaşması %5 Ni H-FER@CeO₂ katalizörünün *Chlorella* tozu pirolizinde yakıt potansiyeli yüksek ürünlerin elde edilmesi açısından en başarılı katalitik performansı sergilediğini göstermektedir. (De Deus Junior vd., 2024).



Şekil 6.19. Çekirdek-kabuk metoduyla sentezlenen %1, %3 ve %5 Ni içerikli katalizörlerin *Chlorella* tozunun pirolizine olan etkisi

Sol-jel yöntemiyle sentezlenen %1, %3 ve %5 Ni içerikli katalizörlerin *Chlorella* tozunun pirolizine olan etkisinin belirlenmesi için gerçekleştirilen Py-GC/MS analizlerinin sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 6.20’de verilmiştir. Yüklenen Ni miktarının %1’den %5’e artırılmasıyla ester fraksiyonunun yaklaşık 2 katına arttığı, buna karşılık azotlu bileşiklerin %5,39’dan %3,34’e kadar düştüğü belirlenmiştir. Ni’nin aktif hidrojen transferi ve C-N bağlarının kırılmasını kolaylaştırarak azotlu ara ürünlerin dönüşümünü desteklediğini ve sıvı ürünün azotlu bileşiklerden arındırılmasını sağlamış olabilir (Liu vd., 2023). Sıvı ürünlerin içerdiği alifatik hidrokarbon miktarları incelendiğinde %1 Ni yüklü katalizör varlığında kayda değer bir farklılık görülmezken, %3 ve özellikle %5 Ni yüklemelerinde bu bileşiklerin belirli

ölçüde azaldığı belirlenmiştir. Buna ek olarak, %5 Ni yüklü CeO₂/H-FER kullanıldığında ester miktarındaki belirgin artış, uzun zincirli yağ asidi türevlerinin tamamen parçalanmak yerine tercihli olarak korunduğunu veya yeniden oluştuğunu göstermektedir. Sol-jel yöntemiyle hazırlanan katalizörlerde metalin homojen dağılımı ve metal-destek etkileşiminin güçlenmesi, ürün seçiciliğini hidrokarbon oluşumundan ziyade uzun zincirli esterlerin oluşumu ve korunması yönünde değiştirmiş olabilir (Carrasco Díaz vd., 2024). Genel olarak değerlendirildiğinde, sol-jel yöntemiyle hazırlanan CeO₂/H-FER destek üzerinde Ni yükleme oranının artırılması, *Chlorella* tozunun pirolizinde azotlu bileşiklerin azaltılması ve ester bakımından zengin bir ürün dağılımının elde edilmesi açısından olumlu bir etki göstermiştir. *Chlorella* tozunun pirolizinde kullanılan tüm katalizör sonuçları birbiriyle kıyaslandığında %5 Ni H-FER@CeO₂ katalizörünün en yüksek alifatik hidrokarbon seçiciliğini sağlarken azotlu bileşikler de önemli ölçüde azaltması sayesinde en uygun katalizör olarak seçilmiştir.



Şekil 6.20. Sol-jel metoduyla sentezlenen %1, %3 ve %5 Ni içerikli katalizörlerin *Chlorella* tozunun pirolizine olan etkisi

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, iki farklı yöntemle sentezlenen farklı oranlarda nikel içeren katalizör örnekleri ile lignoselülozik ve algal biyokütle örnekleri olan göknar ağacı talaşı ve *Chlorella* tozu detaylı bir şekilde karakterize edilmiştir. Hazırlanan katalizörlerin yapısal ve fiziksel özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla SEM, SEM-EDX-Haritalama, XRD, çok noktalı BET, TEM ve FT-IR analizleri gerçekleştirilmiştir. Sentezlenen malzemelerin SEM analizleri sonucunda, H-FER çekirdek-CeO₂ kabuk metoduyla sentezlenen katalizörlerde küp benzeri zeolit kristallerinin yoğunlaştığı ve zeolit yapısının korunduğu gözlenmiştir. SEM-EDX sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, sol-jel yöntemiyle sentezlenen CeO₂/H-FER katalizörlerinde CeO₂ fazının destek üzerinde homojen şekilde dağıldığı, Ni yükleme işleminin yapısal bütünlüğü bozmadığı ve Ni türlerinin özellikle %1 ve %3 yüklemelerde oldukça yüksek dispersiyon gösterdiği belirlenmiştir. %5 Ni yüklemesinde de belirgin bir aglomerasyon gözlenmemesi, sol-jel sentez yönteminin metal dağılımı açısından başarılı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu yüksek dispersiyonlu yapı, katalitik reaksiyonlarda aktif merkez sayısının artmasına ve dolayısıyla katalitik performansın iyileşmesine katkı sağlayabilecek önemli bir avantaj olarak değerlendirilmektedir. Çekirdek-kabuk metoduyla sentezlenen katalizörlerde ise, H-FER çekirdeğinin CeO₂ kabuğu ile başarılı şekilde kaplandığı doğrulanmıştır. Si, Al, Ce ve O elementleri tüm yüzey boyunca homojen dağılım göstermiştir. Ni türleri tüm yükleme oranlarında yüksek dispersiyonla dağılmıştır. %5 Ni yüklemesinde sınırlı düzeyde parçacık büyümesi gözlenirse de belirgin aglomerasyon oluşmamıştır. Çekirdek-kabuk yapısı, sol-jel yöntemiyle hazırlanan katalizörlere kıyasla daha düzenli ve homojen bir metal dağılımı sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar, H-FER@CeO₂ katalizörlerinde güçlü metal-destek etkileşimi ve başarılı çekirdek-kabuk mimarisinin oluştuğunu göstermektedir. Sol-jel metoduyla sentezlenen CeO₂'nin H-FER yüzeyinde ve gözeneklerde dağılımında, katalizörlerde CeO₂'nin plaka yapısının daha fazla korunduğu görülmüştür. H-FER'in eklenmesinin CeO₂ bazlı katalizörlerin yüzey alanını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Özellikle, H-FER@CeO₂ yapısı, gözenek hacminin azalmasıyla birlikte en yüksek yüzey alanını sergileyerek mikrogözenekli yapıların baskınlığını göstermektedir. Ni yüklemesiyle birlikte, CeO₂/H-FER serisi daha yüksek metal içeriklerinde hafif gözenek tıkanması gösterirken (metal parçacıkları gözenekleri kısmen bloke ediyor), H-FER@CeO₂ katalizörleri yüzey alanında sürekli bir artış göstermekte, bu da metal dağılımının iyileştiğini ve metal-destek etkileşimlerinin güçlü olduğunu göstermektedir. En yüksek yüzey alanı, %5 Ni yüklü H-FER@CeO₂ katalizörü için

elde edilmiş olup, bu da onu katalitik uygulamalar için umut vadeden bir aday haline getirmektedir. FT-IR analizleri tüm katalizörler için gerçekleştirilmiştir ve olması muhtemel fonksiyonel gruplar elde edilmiştir. XRD sonuçları birlikte değerlendirildiğinde; Sol-jel yöntemiyle $\text{CeO}_2/\text{H-FER}$ kompoziti, çekirdek-kabuk yöntemiyle $\text{H-FER}@\text{CeO}_2$ yapısı başarılı şekilde oluşturulmuştur. Ni yükleme işlemi desteklerin kristal yapısında bozulmaya neden olmamıştır. CeO_2 'nin florit yapısı tüm katalizörlerde korunmuştur. FER zeolitinin karakteristik kristal yapısı hem sol-jel hem de çekirdek-kabuk sentezlerinde muhafaza edilmiştir. Belirgin NiO piklerinin görülmemesi Ni türlerinin yüksek dispersiyonda dağıldığını ve metal-destek etkileşiminin güçlü olduğunu göstermektedir. Özellikle $\text{H-FER}@\text{CeO}_2$ çekirdek-kabuk katalizörleri hem zeolit kristallliğini hem de CeO_2 fazını koruyarak daha düzenli bir yapı sergilemiş olup katalitik uygulamalar açısından avantajlı bir morfoloji ortaya koymuştur. TEM analizleri, $\text{CeO}_2/\text{H-FER}$ ve $\text{H-FER}@\text{CeO}_2$ katalizörlerinin başarıyla sentezlendiğini, Ni yükleme işleminin yapısal bütünlüğü bozmadığını ve Ni türlerinin destek yüzeyinde yüksek dispersiyonla dağıldığını ortaya koymuştur. Ayrıca $\text{H-FER}@\text{CeO}_2$ örneklerinde gözlenen kontrast farklılıkları ve parçacık morfolojisi, çekirdek-kabuk yapısının oluştuğunu destekleyen önemli kanıtlar sağlamıştır. Bu sonuçlar XRD, SEM ve EDX analizlerinden elde edilen bulgularla uyumlu bulunmuştur. Sonuç olarak, katalizörlerin yapısal özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla temel karakterizasyon teknikleri kullanılmış ve sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu kanaatine varılmıştır.

Biyokütle örneklerinin karakterizasyon sonuçlarına bakıldığında, göknar ağacı talaşının yüksek lignin ve sabit karbon içeriği hidrokarbon ve fenolik türevlerin oluşumunu sağlarken, *Chlorella* tozunun yüksek protein ve lipit içeriği azotlu bileşikler ile uzun zincirli hidrokarbon ve yağ asidi türevlerinin oluşumuna katkı sağlamıştır. Her iki biyokütlenin sahip olduğu nem içeriğinin düşük olması ve uygun organik madde kompozisyonu, katalitik piroliz sürecinde yüksek katma değerli kimyasallar ve yakıt potansiyeli yüksek ürünlerin elde edilmesine olanak sağlamıştır.

Katalizör ve biyokütle örneklerinin karakterizasyon çalışmaları tamamlandıktan sonra katalitik piroliz deneyleri Py-GC/MS sisteminde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar hem göknar ağacı talaşı hem de *Chlorella* tozu hammaddelerinin ürün dağılımının destek tipi, sentez yöntemi ve Ni yükleme oranından önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. Her iki biyoküttele de katalitik piroliz şartları, katalizörsüz pirolize kıyasla hidrokarbon seçiciliğini artırırken istenmeyen oksijenli ve azotlu bileşiklerin oluşumunu azaltmıştır. Özellikle çekirdek-

kabuk yöntemiyle sentezlenen katalizörler, sol-jel yöntemiyle hazırlanan katalizörlere göre daha yüksek alifatik hidrokarbon oluşumu sağlayarak yakıt potansiyeli açısından daha avantajlı bir ürün dağılımı oluşturmuştur. *Chlorella* tozunun pirolizinde Ni yükleme oranının artması, azotlu bileşiklerin azalmasını ve hidrokarbon oluşumunun artmasını sağlarken, göknar ağacı talaşında ise oksijenli bileşiklerin azaltılması ve hidrokarbon bakımından zengin ürünlerin elde edilmesi üzerinde belirgin bir etki göstermiştir. Her iki biyokütlede de PAH oluşumunun az olması ve ürün seçiciliğinin yakıt kalitesini artıracak yönde değişmesi, geliştirilen katalitik sistemlerin etkinliğini ve sistemin çevresel etkisinin azaldığını ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, özellikle çekirdek-kabuk yöntemiyle hazırlanan katalizörlerin yenilenebilir biyoyakıt ve katma değerli kimyasal üretimi açısından önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

KAYNAKÇA

- Abi Bianasari, A., Le, M. T., Bakar, M. S. A., Mansur, D., Ja'afar, F. H. M., Cheok, Q., & Azad, A. K. (2026). Phenol-rich bio-oil synthesis via single and dual metal-oxide/zeolite catalysts in biomass catalytic pyrolysis: Comparison of $Y_2O_3/ZSM-5$ and $MgO/Y_2O_3/ZSM-5$. *Biomass and Bioenergy*, 205, 108565.
- Abolore, R. S., Jaiswal, S., & Jaiswal, A. K. (2024). Green and sustainable pretreatment methods for cellulose extraction from lignocellulosic biomass and its applications: A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 7, 100396.
- Acaroğlu, H., & Güllü, M. (2022). Climate change caused by renewable and non-renewable energy consumption and economic growth: A time series ARDL analysis for Turkey. *Renewable Energy*, 193, 434-447.
- Ahmet, Ö., Şaşmaz, M. Ü., & Bahtiyar, E. (2015). Türkiye’de Yeşil Ekonomi Açısından Yenilenebilir Bir Enerji Kaynağı: Rüzgâr Enerjisi. *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Sosyal ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 2015(1), 85-93.
- Aishwarya, S., Sruthi, G., Aditya, M. N., Sivagami, K., & Chakraborty, S. (2022). Biomass energy conversion using thermochemical and biochemical technologies. *Sustainable and Clean Energy Production Technologies*, 93-131.
- Akça, Y., & Kamacı, A. (2021). TR81 Bölgesinin Yenilenebilir Enerji Durumu. *Bartın Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 12(24), 400-412.
- Ali, A. T., Sasmal, S., Swain, M., Ram, D. K., & Shadangi, K. P. (2026a). Sustainable biochemicals and fuels from catalytic fast co-pyrolysis of biomass and waste plastics. *Chemical Engineering Journal: Green and Sustainable*, 100053.
- Al-Amin, K., Kawsar, M., Mamun, M. T. R. B., & Hossain, M. S. (2025). Fourier transform infrared spectroscopic technique for analysis of inorganic materials: a review. *Nanoscale Advances*, 7(21), 6677-6702.
- Ali, F., Dawood, A., Hussain, A., Alnasir, M. H., Khan, M. A., Butt, T. M., ... & Hamid, A. (2024). Fueling the future: biomass applications for green and sustainable energy. *Discover sustainability*, 5(1), 156.

- Al, K. (2021). Biyokütle Enerji Santralleri İçin Tarımsal Atıklar: Şanlıurfa İlinde Tarımsal Atık ve Artıkların Değerlendirilmesi. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 4(2), 67-76.
- Ali, N. B., Abdedayem, A., Garrigue, P., Achchaq, F., Ragoubi, M., & Ben-Ali, S. (2026b). Comparative Study of Cellulose Extraction From Lignocellulosic Biomass Wastes. *Chemistry Africa*, 9(2), 47.
- Alothman, Z. A. 2012. A review: Fundamental Aspects of Silicate Mesoporous Materials. *Materials*, 5(12), 2874-2902.
- Alptekin, F. M., & Celiktaş, M. S. (2022). Review on catalytic biomass gasification for hydrogen production as a sustainable energy form and social, technological, economic, environmental, and political analysis of catalysts. *ACS omega*, 7(29), 24918-24941.
- Anantharaman, A. P., Jaya Prakash, C., Bangarraju, O., & Jayabalan, T. (2024). Catalytic pyrolysis of algae: kinetics and thermodynamic analysis. *Chemical Engineering Communications*, 211(2), 147-161.
- Anwer, S. S. (2023). Direct analysis of algae for determination of major and minor elements using energy dispersive X-ray fluorescence (EDXRF). *Kuwait Journal of Science*, 50(4), 697-702.
- Arif, M., Li, Y., El-Dalatony, M. M., Zhang, C., Li, X., & Salama, E. S. (2021). A complete characterization of microalgal biomass through FT-IR/TGA/CHNS analysis: An approach for biofuel generation and nutrients removal. *Renewable Energy*, 163, 1973-1982.
- Arı, F., & Yılmaz, V. (2023). Türkiye’de ve Dünya’da Enerji Kaynaklarının Genel Görünümü ve Alternatif Enerji Kaynaklarının Önemi. *Dicle Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (34), 496-519.
- Asan, G. MoS₂ ile Modifiye Edilmiş Camsı Karbon Elektrot Kullanılarak Dopamin, Ürik Asit ve Askorbik Asit’in Elektrokimyasal Yöntemlerle Tayini. Gazi Üniversitesi Doktora Tezi, Haziran 2015.
- ASTM, Standart test method for volatile matter in analysis sample refuse derived fuel-3, *ASTM Annual Book of American Society for Testing and Materials Standards* Easton, M.D., USA, E-897-82 (1983).

- ASTM, Standart test method for ash in wood, *ASTM Annual Book of American Society for Testing and Materials Standards* Easton, M.D., USA, D-1102-84 (1983).
- ASTM, Standart test method for extractives in wood, In *ASTM Annual Book of American Society for Testing and Materials Standards* Easton, M.D., USA, D-1600-08 (1983).
- Babaei, M., Anbia, M., Kazemipour, M. 2017. "Synthesis of zeolite/carbon nanotube composite for gas separation", *Can.J.Chem.*, 95, 162-168.
- Bagher, A. M., Vahid, M. M. A., Reza, B. M., Mohsen, M., & Mahshid, G. (2015). Tidal energy: Advantage and disadvantage. *Bulletin of Advanced Scientific Research*, 1(4).
- Barua, A., & Rasel, M. S. (2024). Advances and challenges in ocean wave energy harvesting. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 61, 103599.
- Belousov, A. S., Esipovich, A. L., Kanakov, E. A., & Otopkova, K. V. (2021). Recent advances in sustainable production and catalytic transformations of fatty acid methyl esters. *Sustainable Energy & Fuels*, 5(18), 4512-4545.
- Bettmer, J., Bayón, M. M., Encinar, J. R., Sánchez, M. L. F., & Medel, A. S. (2009). The emerging role of ICP-MS in proteomic analysis. *Journal of proteomics*, 72(6), 989-1005.
- Bhushan, S., Jayakrishnan, U., Shree, B., Bhatt, P., Eshkabilov, S., & Simsek, H. (2023). Biological pretreatment for algal biomass feedstock for biofuel production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), 109870.
- Bilek, S., Melikoğlu, A. Y., & Cesur, S. (2019). Tarımsal atıklardan selüloz nanokristallerinin eldesi, karakteristik özellikleri ve uygulama alanları. *Akademik Gıda*, 17(1), 140-148.
- Bilgiç, S., Toğrul, B., & Paksoy, T. (2021). Sürdürülebilir enerji yönetimi için BWM yöntemi ile yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi. *Verimlilik Dergisi*, (2), 95-110.
- Bitencourt, G. R., & Mello, P. A. (2026). Screening of Phenolic Compounds in Aqueous Extracts of Pyrolysis Oils by High-Resolution Mass Spectrometry. *Processes*, 14(7), 1079.
- Blasio, M., & Balzano, S. (2021). Fatty acids derivatives from eukaryotic microalgae, pathways and potential applications. *Frontiers in Microbiology*, 12, 718933.

- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and bioenergy*, 38, 68-94.
- Cao, J., Huang, T., Liu, R., Xi, X., Wu, D. 2017. Nitrogen-doped carbon coated stainless steel meshes for flexible supercapacitors, *Electrochim. Acta*, 230, 265-270.
- Carapellucci, R., Milazzo, A. 2003. Membrane systems for CO₂ capture and their integration with gas turbine plants, *Proc.Inst.Mech.Eng.Part A.J.Power Energy*, 217, 505-517.
- Carrasco Díaz, A., Abdelouahed, L., Brodu, N., Montes-Jiménez, V., & Taouk, B. (2024). Upgrading of pyrolysis bio-oil by catalytic hydrodeoxygenation, a review focused on catalysts, model molecules, deactivation, and reaction routes. *Molecules*, 29(18), 4325.
- Carrier, M., Fournet, R., Sirjean, B., Amsbury, S., Alfonso, Y. B., Pontalier, P. Y., & Bridgwater, A. (2020). Fast pyrolysis of hemicelluloses into short-chain acids: An investigation on concerted mechanisms. *Energy & Fuels*, 34(11), 14232-14248.
- Cha, H., Kim, Y., Lee, T., Park, S. J., & Kwon, E. E. (2026). Sustainable hydrogen production through catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass using carbon dioxide. *Energy Conversion and Management*, 347, 120564.
- Chang, G., Dai, S., Kang, H., Li, J., Liu, Y., Zhang, J., & Guo, Q. (2025). Understanding the enhanced preparation of aromatic hydrocarbons in pyrolysis of individual lignocellulosic biomass components over a (Ca-Fe)/HZSM-5 catalyst. *Fuel*, 386, 134228.
- Chen, W. H., Ho, K. Y., Aniza, R., Sharma, A. K., Saravanakumar, A., & Hoang, A. T. (2024). A review of noncatalytic and catalytic pyrolysis and co-pyrolysis products from lignocellulosic and algal biomass using Py-GC/MS. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 134, 51-64.
- Cho, S. H., Jung, S., Park, Y. K., Tsang, Y. F., Ryu, C., & Kwon, E. E. (2020). Synergistic effects of CO₂ on ex situ catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass over a Ni/SiO₂ catalyst. *Journal of CO₂ Utilization*, 39, 101182.
- Choi, S., Drese, J.H., Jones, C.W. (2009). Adsorbent materials for carbon dioxide capture from large anthropogenic point sources, *Chem. Sus. Chem*, 2, 796-854.

- de Deus Junior, J. O., Alves, J. L. F., e Melo, V. R. D. M., de Oliveira, A. A. S., de Oliveira, K. F. S., de Araújo Melo, D. M., & Braga, R. M. (2024). Conversion of microalgae into renewable hydrocarbons through catalytic pyrolysis: A bibliometric analysis. *Algal Research*, 81, 103602.
- Deng, W., Feng, Y., Fu, J., Guo, H., Guo, Y., Han, B., ... & Zhou, H. (2023). Catalytic conversion of lignocellulosic biomass into chemicals and fuels. *Green Energy & Environment*, 8(1), 10-114.
- Dickerson, T., & Soria, J. (2013). Catalytic fast pyrolysis: a review. *Energies*, 6(1), 514-538.
- Ding, F., & Gao, M. 2021. Pore wettability for enhanced oil recovery, contaminant adsorption and oil/water separation: A review, *Advances in Colloid and Interface Science*, 289, 102377.
- Dolaş, H. (2024). Aktif Karbon Yapısında Hiyerarşik Gözenek Oluşumu için Aktifleştirici Ajan Olarak Bor Türevi Kullanımının Optimizasyonu. *MAS Journal of Applied Sciences*, 9 (Özel Sayı), 795-809.
- El Bari, H., Fanezoune, C. K., Dorneanu, B., Arellano-Garcia, H., Majozi, T., Elhenawy, Y., ... & Ashour, F. H. (2024). Catalytic fast pyrolysis of lignocellulosic biomass: Recent advances and comprehensive overview. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 178, 106390.
- Eldem, M. (2017). Güneş Enerjisi. *TMMOB EMO Ankara Şubesi Haber Bülteni*, 5, 7-10.
- Eloi, L., Fayad, G., Poissonnier, J., Ma, J., Makshina, E., Sels, B. F., ... & Verberckmoes, A. (2024). Synthesis of hybrid materials containing H-ZSM-5 and CeO₂ for green butadiene production. *Catalysis Today*, 436, 114732.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) Enerji Verimliliği (ENVER) (2026). [Erişim: 01.06.2026, <https://enerjiverimlilik.enerji.gov.tr/Home/Privacy>]
- Erdoğan, M. (2014). Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyelinin termodinamik analiz yöntemi ile incelenerek, yenilenebilir enerji kullanımının gelecek projeksiyonlarının değerlendirilmesi. *İstanbul Aydın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*.

- Erto, A., Chianese, S., Lancia, A. (2017). On the mechanism of benzene and toluene adsorption in single-compound and binary systems: energetic interactions and competitive effects, *Desalin. Water Treat.*, 86, 259-265.
- Feng, Y., Li, Z., & Li, W. (2025). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): environmental persistence and human health risks. *Natural Product Communications*, 20(1), 1934578X241311451.
- Fernández, L. A. G., Ramos, V. C., Polo, M. S., & Castillo, N. A. M. (2023). Fundamentals in applications of algae biomass: A review. *Journal of environmental management*, 338, 117830.
- Furukawa, H., Ko, N., Go, Y.B., Aratani, N., Choi, S.B., Choi, E., Yazaydın, A.O., Snurr, R.Q., O’Keeffe, M., Kim, J., Yaghi, O.M. (2010). Ultrahigh porosity in metal-organic frameworks, *Science*, 329, 424-8.
- Genel, S. (2023). Biyokütlenin heterojen katalizör varlığında katalitik hidrotermal sıvılaştırma yöntemi ile sıvılaştırılması ve elde edilen ürünlerin karakterizasyonu. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(3), 675-687.
- Gong, X., Zhang, B., Zhang, Y., Huang, Y., & Xu, M. (2014). Investigation on pyrolysis of low lipid microalgae *Chlorella vulgaris* and *Dunaliella salina*. *Energy & fuels*, 28(1), 95-103.
- Govindaraju, S., Arumugasamy, S. K., Chellasamy, G., & Yun, K. (2022). Zn-MOF decorated bio activated carbon for photocatalytic degradation, oxygen evolution and reduction catalysis, *Journal of Hazardous Materials*, 421, 126720.
- Guo, X., Li, Z., Zhou, A., Shi, Y., Wang, Y., & Zhou, R. (2024). Ce-modified USY zeolite catalysts for catalytic oxidation of chlorinated VOCs: Effect of the location of CeO₂ and its synergistic effect with USY zeolite. *Journal of Rare Earths*, 42(11), 2068-2077.
- Gündüz Meriç, G. (2019). *Metal içerikli silika mikro kürelerin sentezi, karakterizasyonu ve aktivitelerinin incelenmesi*. (Doktora tezi). Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.
- Harker, J.H., Backhurst, J.R. Fuel and Energy 120, *Academic Press Inc.*, London (1981).

- Hasar, M. F., & Taşkan, E. (2021). Ön İşlem Uygulanmış Alg Biyokütlesinin Mikrobiyal Yakıt Hücrelerinde Elektrik Üretim Performansının Araştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33(2), 645-654.
- Hassan, Q., Viktor, P., Al-Musawi, T. J., Ali, B. M., Algburi, S., Alzoubi, H. M., ... & Jaszczur, M. (2024). The renewable energy role in the global energy Transformations. *Renewable Energy Focus*, 48, 100545.
- Huang, Y., Zhang, J., Sekyere, D. T., Wang, C., Guo, R., Liu, J., ... & Liu, W. (2025). Selective Production of Light Olefins and Aromatics via Catalytic Fast Pyrolysis of Biomass over Attapulgite and Zn/ZSM-5 Cascade Catalyst. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 107233.
- Kalak, T. (2023). Potential use of industrial biomass waste as a sustainable energy source in the future. *Energies*, 16(4), 1783.
- Kanber, K. A. R. A. (2025). Karbonhidratlar ve Metabolizması. *Hayvan Besleme ve Beslenme Hastalıkları*, 108(4), 15.
- Khan, A. S., Man, Z., Bustam, M. A., Nasrullah, A., Ullah, Z., Sarwono, A., ... & Muhammad, N. (2018). Efficient conversion of lignocellulosic biomass to levulinic acid using acidic ionic liquids. *Carbohydrate polymers*, 181, 208-214.
- Khan, H., Yerramilli, A. S., D'Oliveira, A., Alford, T. L., Boffito, D. C., & Patience, G. S. (2020). Experimental methods in chemical engineering: X-ray diffraction spectroscopy-XRD. *The Canadian journal of chemical engineering*, 98(6), 1255-1266.
- Kırcı, H. (2001). Selüloz Türevleri ve Kullanım Yerleri. *KSÜ Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4, 119-130.
- Kong, W., Shen, B., Ma, J., Kong, J., Feng, S., Wang, Z., & Xiong, L. (2022). Pyrolysis of *Spirulina platensis*, *Tetrademus obliquus* and *Chlorella vulgaris* by TG-FTIR and Py-GC/MS: kinetic analysis and pyrolysis behaviour. *Energy*, 244, 123165.
- Krishna, K., & Makkee, M. (2005). Coke formation over zeolites and CeO₂-zeolites and its influence on selective catalytic reduction of NO_x. *Applied Catalysis B: Environmental*, 59(1-2), 35-44.

- Lee, J., Kim, M., Lee, T., Chen, W. H., & Kwon, E. E. (2025). Carbon-negative syngas production via CO₂-assisted catalytic pyrolysis of lignocellulosic yard waste: A case study on horse chestnut shells. *Journal of Environmental Management*, 394, 127381.
- Lee, J., Kim, S., You, S., & Park, Y. K. (2023). Bioenergy generation from thermochemical conversion of lignocellulosic biomass-based integrated renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 178, 113240
- Lei, L., Wang, Y., Zhang, Z., An, J., & Wang, F. (2020). Transformations of biomass, its derivatives, and downstream chemicals over ceria catalysts. *ACS Catalysis*, 10(15), 8788-8814.
- Lewandowski, W. M., Ryms, M., & Kosakowski, W. (2020). Thermal biomass conversion: A review. *Processes*, 8(5), 516.
- Li, F., Srivatsa, S. C., & Bhattacharya, S. (2019). A review on catalytic pyrolysis of microalgae to high-quality bio-oil with low oxygeneous and nitrogenous compounds. *Renewable and sustainable energy reviews*, 108, 481-497.
- Li, S., Xu, S., Liu, S., Yang, C., Lu, Q. Fast pyrolysis of biomass in free-fall reactor for hydrogen-rich gas, *Fuel Processing Technology*, 85: 1201-1211 (2004).
- Lin, Y. Y., Chen, W. H., Colin, B., Petrissans, A., Quirino, R. L., & Petrissans, M. (2022). Thermodegradation characterization of hardwoods and softwoods in torrefaction and transition zone between torrefaction and pyrolysis. *Fuel*, 310, 122281.
- Liu, C., Wang, H., Karim, A. M., Sun, J., & Wang, Y. (2014). Catalytic fast pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Chemical Society Reviews*, 43(22), 7594-7623.
- Liu, L., Zhou, W., Wang, Y., Yao, Y., Qian, J., Wu, J., ... & Fan, L. (2023). Cascaded catalytic copyrolysis of microalgae and LDPE with Ni/Biochar and HZSM-5 for improving high-grade bio-oil production. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(44), 15964-15974.
- Luo, Z., & Zhou, J. (2025). Thermal conversion of biomass. In *Handbook of climate change mitigation and adaptation* (pp. 1233-1289). Cham: Springer Nature Switzerland.

- Maliutina, K., Tahmasebi, A., Yu, J., & Saltykov, S. N. (2017). Comparative study on flash pyrolysis characteristics of microalgal and lignocellulosic biomass in entrained-flow reactor. *Energy Conversion and Management*, 151, 426-438.
- Manda, K., Boggala, S., Varimalla, S., Aytam, H. P., Basak, P., Inkollu, S., & Akula, V. (2024). Zero-emission hydrogen production by CH₄ pyrolysis over Ni/Ferrierite catalyst: Examination of the deactivated catalysts for electrical conductivity and H₂ storage properties. *International Journal of Hydrogen Energy*, 68, 511-519.
- Maupin, I., Mijoin, J., Barbier Jr, J., Bion, N., Belin, T., & Magnoux, P. (2011). Improved oxygen storage capacity on CeO₂/zeolite hybrid catalysts. Application to VOCs catalytic combustion. *Catalysis Today*, 176(1), 103-109.
- Mohammed, A., & Abdullah, A. (2018). Scanning electron microscopy (SEM): A review. In *Proceedings of the 2018 international conference on hydraulics and pneumatics—HERVEX, Băile Govora, Romania* (Vol. 2018, pp. 7-9).
- Musah, B. I., Wan, P., Xu, Y., Liang, C., & Peng, L. (2022). Contrastive analysis of nickel (II), iron (II), copper (II), and chromium (VI) removal using modified *Chlorella vulgaris* and *Spirulina platensis*: characterization and recovery studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(5), 108422.
- Oğuz, M., & Akkurt, Ş. (2017). Kayseri ilinin yenilenebilir enerji potansiyeli. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(2), 362-374.
- Osterrieth, J. W., Rampersad, J., Madden, D., Rampal, N., Skoric, L., Connolly, B., ... & Fairen-Jimenez, D. (2022). How reproducible are surface areas calculated from the BET equation?. *Advanced Materials*, 34(27), 2201502.
- Öztürk, S., & Çeykel, İ. T. (2023). Türkiye'nin Yenilenebilir Enerji Kaynakları Kullanımı Üzerine Bir Değerlendirme. *Disiplinlerarası*, 99.
- Özbay, N., & Yaman, E. (2018). Enhancing the phenolic content of bio-oil by acid pre-treatment of biomass. *International Journal of Renewable Energy Development*, 7(2).
- Özbay, N., Yaman, E., Yargıç, A. Ş., & Şahin, R. Z. Y. (2023). Hydrothermal vs. dilute acid pre-treatments: comparison of the biomass properties, distribution of pyrolysis products, and bio-oil characteristics. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(2), 739-753.

- Özsoy, A. B. (2024). *Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde güneş enerjisinin yeri: Çatı Güneş Enerji Santrali (GES) uygulama örneği*. (Yüksek Lisans Tezi). Bahçeşehir Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Pan, Z., Wu, X., Bodi, A., van Bokhoven, J. A., & Hemberger, P. (2024). Catalytic pyrolysis mechanism of lignin moieties driven by aldehyde, hydroxyl, methoxy, and allyl functionalization: the role of reactive quinone methide and ketene intermediates. *Green Chemistry*, 26(18), 9899-9910.
- Park, S. J., Jang, H. G., Lee, K. Y., & Cho, S. J. (2018). Improved methanol-to-olefin reaction selectivity and catalyst life by CeO₂ coating of ferrierite zeolite. *Microporous and Mesoporous Materials*, 256, 155-164.
- Pata, U. K., Kartal, M. T., Adebayo, T. S., & Ullah, S. (2023). Enhancing environmental quality in the United States by linking biomass energy consumption and load capacity factor. *Geoscience Frontiers*, 14(3), 101531.
- Ragauskas, A. J., Beckham, G. T., Biddy, M. J., Chandra, R., Chen, F., Davis, M. F., ... & Wyman, C. E. (2014). Lignin valorization: improving lignin processing in the biorefinery. *science*, 344(6185), 1246843.
- Raj, A., & Ghodke, P. K. (2025). Investigation of in situ and ex situ catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass waste for the production of de-oxygenated C8-C18 range enhanced liquid fuel precursor-reaction mechanisms and optimization. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 107179.
- Rath, G. K., Palencia, J. D. G., & Dalai, A. K. (2026). A Comprehensive Review on Biomass Valorization Through Thermochemical Pathways: Product Properties and Usage of Artificial Intelligence. *Energies*, 19(12), 2938.
- Rohman, G. A. N., Nawaz, A., Hossain, M. M., & Razzak, S. A. (2024). From biomass to Energy: Investigating *Chlorella pyrenoidosa*’s potential for fuel and carbon materials. *Bioresource Technology*, 408, 131171.
- Roga, S., Bardhan, S., Kumar, Y., & Dubey, S. K. (2022). Recent technology and challenges of wind energy generation: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102239.

- Ru, I. T. K., Sung, Y. Y., Jusoh, M., Wahid, M. E. A., & Nagappan, T. (2020). *Chlorella vulgaris*: A perspective on its potential for combining high biomass with high value bioproducts. *Applied Phycology*, 1(1), 2-11.
- Saleh, Y., Ali, L., & Altarawneh, M. (2025). Recent advances in biomass valorization through thermochemical processes, bio-oil production and AI strategies: a concise review. *RSC advances*, 15(54), 45943-45978.
- Sayed, E. T., Olabi, A. G., Alami, A. H., Radwan, A., Mdallal, A., Rezk, A., & Abdelkareem, M. A. (2023). Renewable energy and energy storage systems. *Energies*, 16(3), 1415.
- Sekar, M., Mathimani, T., Alagumalai, A., Chi, N. T. L., Duc, P. A., Bhatia, S. K., ... & Pugazhendhi, A. (2021). A review on the pyrolysis of algal biomass for biochar and bio-oil—Bottlenecks and scope. *Fuel*, 283, 119190.
- Shao, S., Liu, C., Xiang, X., Li, X., Zhang, H., Xiao, R., & Cai, Y. (2021). In situ catalytic fast pyrolysis over CeO₂ catalyst: Impact of biomass source, pyrolysis temperature and metal ion. *Renewable Energy*, 177, 1372-1381.
- Shu, R., Xie, L., Hu, B., Tian, Z., Wang, C., Chen, Y., & Xu, Y. (2024). Reinforcement of methanol catalytic reforming for hydrogen production through Ru-based carbon-coated CeO₂ catalyst. *Fuel*, 365, 131262.
- Singh, U., Rizwan, M., Malik, H., & García Márquez, F. P. (2022). Wind energy scenario, success and initiatives towards renewable energy in India-A review. *Energies*, 15(6), 2291.
- Sing, N., Mahali, K., & Roy, S. (2024). An Overview on Biofuels: Advantages and Disadvantages. *Recent Developments in Chemistry and Biochemistry*, 98-116.
- Sun, W., Yan, Y., Wei, Y., Ma, J., Niu, Z., & Hu, G. (2025). Catalytic pyrolysis of biomass: a review of zeolite, carbonaceous, and metal oxide catalysts. *Nanomaterials*, 15(7), 493.
- Şenpınar, A., & Gençoğlu, M. T. (2006). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Çevresel Etkileri Açısından Karşılaştırılması. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 49-54.
- Tang, M., Chevillot-Biraud, A., Lau-Truong, S., Khalil, A. M., Deng, J., Wang, C. H., & Chehimi, M. M. (2025). Understanding the catalytic pyrolysis conversion of metal salt-

- impregnated biomass into biogas and nanocatalyst-coated porous biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 107337.
- Tatman, A. (2023). *Metal yüklenmiş katalizörlerin biyokütlenin pirolizinde kullanılması*. (Yüksek lisans tezi). Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilecik.
- Teh, J. S., Teoh, Y. H., How, H. G., & Sher, F. (2021). Thermal analysis technologies for biomass feedstocks: a state-of-the-art review. *Processes*, 9(9), 1610.
- Toklu, E. (2017). Biomass energy potential and utilization in Turkey. *Renewable Energy*, 107, 235-244.
- Torkashvand, M., Hasan-Zadeh, A., & Torkashvand, A. (2022). Mini review on importance, application, advantages and disadvantages of biofuels. *J. Mater. Environ. Sci*, 13(6), 612-630.
- Topuz, A., & Mert, H. (2022). Beslenme, Lipitler ve Ateroskleroz Oluşumu. *Sağlık Bilimleri Alanında Uluslararası Araştırmalar X*, 159.
- Ürün, E., & Soyu, E. (2016). Türkiye'nin Enerji Üretiminde Yenilenebilir Enerji Kaynakları Üzerine Bir Değerlendirme. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 31-45.
- Qiu, Q., Lin, J., Meng, F., Li, X., Li, S., & Tang, Y. (2026). Pyrolysis mechanism of cotton stalk catalyzed by bone char in situ: Py-GC/MS and DFT studies. *Renewable Energy*, 125260.
- Valizadeh, S., Khani, Y., Valizadeh, B., Kim, J. C., Cho, K., & Park, Y. K. (2025). Enhanced generation of jet fuel-range aromatic hydrocarbons through catalytic pyrolysis of woody biomass by simple chemical treatment on ZSM-5 catalyst. *Bioresource Technology*, 425, 132320.
- Wang, Y., Akbarzadeh, A., Chong, L., Du, J., Tahir, N., & Awasthi, M. K. (2022). Catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass for bio-oil production: A review. *Chemosphere*, 297, 134181.
- Wang, Z., Liang, D., Li, X., Huang, H., He, X., Li, Z., & Dong, Y. (2025). Catalytic fast co-pyrolysis of lignocellulosic biomass and polypropylene over bimetallic catalysts to

- promote the formation of hydrocarbons. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 107199.
- Watford, M., & Wu, G. (2018). Protein. *Beslenmedeki Gelişmeler*, 9(5), 651-653.
- Wei, L., Wang, H., Dong, Q., Li, Y., & Xiang, H. (2025). A review on the research progress of Zeolite catalysts for heavy oil cracking. *Catalysts*, 15(4), 401.
- Yakıncı, Z. D., & Kök, M. (2017). Yenilenebilir Enerji ve Toplum Sağlığı. *İnönü Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu Dergisi*, 5(1), 43-55.
- Yaman, E. (2018). *Biyokütleden fenolik hidrokarbonlarca zengin değerli kimyasalların elde edilmesi*. (Doktora Tezi). Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.
- Yaman, E. (2023). Influence of catalyst support type on silver poplar pyrolysis vapors: a Py/GC-MS study. *Journal of Porous Materials*, 30(5), 1427-1438.
- Yao, Z., Tong, J., Jiang, J., Yu, Q., Tursunov, O., Wang, X., ... & Qi, W. (2025). Catalytic pyrolysis of *Alhagi sparsifolia* Shap biomass over HZSM-5: Thermal behavior, kinetics, thermodynamics and evolved products. *Industrial Crops and Products*, 229, 120985.
- Yargıç, A. Ş. (2017). *Karbon köpük üretimi ve karakterizasyonu*. (Doktora tezi). Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.
- Yin, S., Shao, Y., Bao, T., & Zhu, J. (2023). Review on nitrogen transformation during microalgae thermochemical liquefaction: Recent advances and future perspectives. *Energy & Fuels*, 37(3), 1525-1544.
- Yin, W., Gu, H., Figueirêdo, M. B., Xia, S., Venderbosch, R. H., & Heeres, H. J. (2021). Stabilization of fast pyrolysis liquids from biomass by catalytic hydrotreatment using Raney nickel “type” catalysts. *Fuel processing technology*, 219, 106846.
- Yogalakshmi, K. N., Sivashanmugam, P., Kavitha, S., Yukesh Kannah, R., & Rajesh Banu, J. (2022). Lignocellulosic biomass-based pyrolysis: A comprehensive review. *Chemosphere*, 286, 131824.
- Yolcan, O. O., & Köse, R. (2020). Türkiye’nin güneş enerjisi durumu ve güneş enerjisi santrali kurulumunda önemli parametreler. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 196-215.

- Yolcu, A. (2019). *Biyokütle olarak tatlı sorgum bitkisi kullanan 5MW elektrik kapasiteli biyokütle santralinin incelenmesi*. (Yüksek lisans Tezi). Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Isparta.
- Youssef, H. M., Mohamed, F., Abd Elhameed, M. S., & Elsayed, K. N. (2025). New insights into enhancement of cadmium biosorption from industrial wastewater through *Chlorella sorokiniana* HMYA based thin-film. *RSC advances*, 15(58), 50346-50378.
- Yu, S., Yang, X., Li, Q., Zhang, Y., & Zhou, H. (2023). Breaking the temperature limit of hydrothermal carbonization of lignocellulosic biomass by decoupling temperature and pressure. *Green Energy & Environment*, 8(4), 1216-1227.
- Zhang, H., Yang, K., Tao, Y., Yang, Q., Xu, L., Liu, C., ... & Xiao, R. (2023). Biomass directional pyrolysis based on element economy to produce high-quality fuels, chemicals, carbon materials-A review. *Biotechnology advances*, 69, 108262.
- Zhang, Q., Yang, S., Zhang, H., He, T., Liu, W., Sun, X., ... & Peng, H. (2024). Unveiling the confinement and interface effect on low temperature degradation of toluene over mesoporous zeolite encapsulated Pt-CeO₂ catalyst. *Chemical Engineering Journal*, 485, 150004.
- Zhou, R., Liu, W., Lin, Z., Zhou, J., & Liu, L. (2026). Challenges and Opportunities in Core–Shell Zeolite Catalysts. *ACS Materials Au*, 6(2), 243-267.