T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI ENERJİ BİTKİLERİ VE ORGANİK ATIKLAR KULLANILARAK ELDE EDİLEN ENERJİ PELETLERİNDE KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ

Hediye İrem ÖZGÜNDÜZ

DOKTORA TEZİ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Kimya Mühendisliği Programı

Danışman

Doç. Dr. Nil ACARALI

Temmuz, 2020

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI ENERJİ BİTKİLERİ VE ORGANİK ATIKLAR KULLANILARAK ELDE EDİLEN ENERJİ PELETLERİNDE KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ

Hediye İrem ÖZGÜNDÜZ tarafından hazırlanan tez çalışması 14.07.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Kimya Mühendisliği Programı DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir

Doç. Dr. Nil ACARALI
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

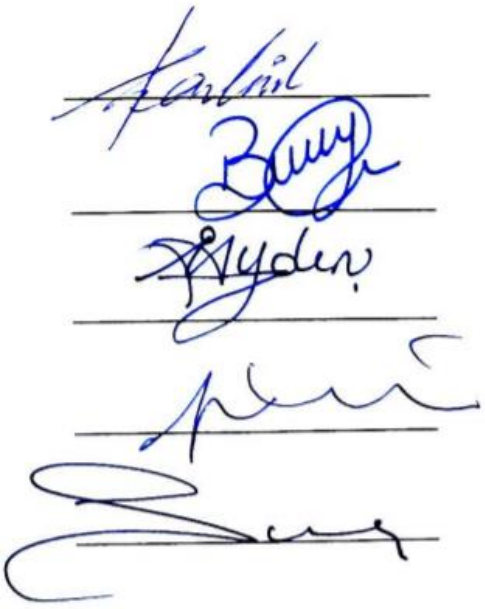
Doç. Dr. Nil ACARALI, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Belma ÖZBEK, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İsmail AYDIN, Üye
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Prof. Dr. Jale GÜLEN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Selva ÇAVUŞ, Üye
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa



Danışmanım Doç. Dr. Nil ACARALI sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Farklı Enerji Bitkileri ve Organik Atıklar Kullanılarak Elde Edilen Enerji Peletlerinde Karakteristik Özelliklerin İncelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Hediye İrem ÖZGÜNDÜZ



Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün FDK-2019-3605 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Aileme

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmalarımın her aşamasında bilgisini, tecrübesini ve sonsuz desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen, çalışmalarımda her zaman yol gösterici olan, fikir ve görüşlerine çok değer verdiğim sayın hocam Doç. Dr. Nil ACARALI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tez çalışmam süresince tez izleme komitemde yer alan değerli hocalarım, Prof. Dr. Belma ÖZBEK, Prof. Dr. İsmail AYDIN'a; ayrıca Prof.Dr. Jale GÜLEN'e, Prof.Dr. İbrahim DOYMAZ'a ve Dr. Öğr. Üyesi Burcu ÇORBACIOĞLU'na desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne FDK-2019-3605 numaralı projesi ile doktora tez çalışmama desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmamda gerçekleştirdiğim analizlerim için Yıldız Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne, Gazi Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'na teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın her anında desteğini, dostluğunu her zaman hissettiren sevgili arkadaşım Kimya Mühendisi Gizem KANDİLCİ'ye çok teşekkür ederim.

Çalışmalarımda kullandığım sığır kuyruğu bitkisinin temininde bana yardımcı olan ve desteğini, sevgisini her zaman üzerimde hissettiğim çok sevgili dayım rahmetli Hüseyin KUNDAK ve geven bitkisi temininde benden yardımlarını esirgemeyen sayın Dr. Şakir ÇANKAYA'ya, keçi boynuzu organik atıklarının temininde bana yardımcı olan Antalya Konserve Pekmez Gıda San Tic Ltd Şti'ye desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Hayatımın her anında yanımda olan, sevgi, destek ve dualarını benden hiçbir zaman esirgemeyen en kıymetlim sevgili ailem babam Hasan ÖZGÜNDÜZ'e, annem Nilgün ÖZGÜNDÜZ'e, halam Servet ÖZGÜNDÜZ'e, kardeşlerim Emre ÖZGÜNDÜZ ve Duygu ÖZGÜNDÜZ'e ayrıca yeğenlerim Efe ve Deniz ÖZGÜNDÜZ'e sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Hediye İrem ÖZGÜNDÜZ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ xi
KISALTMA LİSTESİ xii
ŞEKİL LİSTESİ xiii
TABLO LİSTESİ xvii
ÖZET xix
ABSTRACT xxi
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 3
1.3 Hipotez 4
2 ENERJİ 6
2.1 Enerji Tanımı 6
2.2 Enerji Kaynakları 7
2.2.1 Yenilenemeyen Enerji Kaynakları 8
2.2.2 Yenilenebilir Enerji Kaynakları 20
2.3 Türkiye'de Enerji Kaynaklarına Genel Bakış 35
2.4 Dünya'da Enerji Kaynaklarına Genel Bakış 38
3 BİYOKÜTLE 43
3.1 Biyokütle Tanımı 43
3.2 Biyokütle Kaynakları 45
3.2.1 Bitkisel Biyokütle Kaynakları 46
3.2.2 Hayvansal Biyokütle Kaynakları 46
3.2.3 Kentsel ve Endüstriyel Kaynaklı Biyokütleler 47
3.3 Biyokütle Dönüşüm Prosesleri 47
3.3.1 Termokimyasal Dönüşüm Prosesleri 49
3.3.2 Biyokimyasal Dönüşüm Prosesleri 56
3.3.3 Fizikokimyasal Dönüşüm Prosesleri (Transesterifikasyon) 58
3.4 Lignoselülozik Biyokütle'nin Kimyasal Yapısı 60
3.4.1 Selüloz 62
3.4.2 Hemiselüloz 62
3.4.3 Lignin 63
3.5 Biyokütle Kullanımının Avantajları 63

3.6 Biyokütle Kullanımının Dezavantajları.....65
4 ENERJİ TARIMI.....66
4.1 Türkiye'de Enerji Tarımı.....66
5 TORREFAKSİYON.....71
5.1 Torrefaksiyon Prosesine Genel Bakış.....71
5.2 Torrefaksiyon Proses Mekanizması.....72
5.3 Torrefaksiyon Proses Adımları.....74
5.4 Torrefaksiyon Proses Ürünleri.....77
5.4.1 Katı Fazlı Ürünler.....77
5.4.2 Sıvı Fazdaki Ürünler (Yoğuşabilen).....78
5.4.3 Gaz Fazdaki Ürünler (Yoğuşamayan).....78
5.5 Torrefiye Ürünlerin Özellikleri.....78
5.5.1 Hidrofobiklik.....79
5.5.2 Biyolojik Aktivitenin Ortadan Kaldırılması.....79
5.5.3 Yoğunlaştırma.....79
5.5.4 Geliştirilmiş Öğütülebilirlik.....80
5.5.5 Torrefiye Ürünün Partikül Boyutu ve Dağılımı.....80
5.5.6 Kalorifik Değer.....80
5.5.7 Enerji Yoğunluğu.....81
5.5.8 İşlenmiş Torrefiye Ürünün Patlayabilirliği.....81
5.5.9 Peletleme.....81
5.5.10 Torrefiye Biyokütle Pazarı.....82
5.6 Torrefaksiyon Operasyon Koşulları.....82
5.6.1 Reaksiyon Sıcaklığı.....82
5.6.2 Reaksiyon Süresi.....83
5.6.3 Partikül Boyutu.....83
5.6.4 Nem İçeriği.....83
5.6.5 Isıtma Hızı.....84
5.6.6 Çekirdek Sıcaklığı.....84
5.7 Diğer Proseslerde Teknolojik Uygulamalar.....85
5.7.1 Torrefaksiyon ve Peletleme.....85
5.7.2 Torrefaksiyon ve Gazlaştırma.....87
6 PELETLEME.....88
6.1 Pelet Üretimi İçin Biyokütle Kullanımı.....88
6.2 Pelet Üretim Aşamaları.....89

6.3 Peletleme Mekanizması……92
6.4 Biyopelet Kullanım Avantajları……93
6.5 Peletleme Prosesini Etkileyen Faktörler……95
6.5.1 Ham Biyokütlenin Cinsi……95
6.5.2 Ham Biyokütle Nem İçeriği……96
6.5.3 Proses Sıcaklığı……96
6.5.4 Ham Biyokütlenin Partikül Boyutu……97
6.5.5 Bağlayıcı Türü ve Miktarı……97
6.5.6 Peletleme Basıncı……98
6.6 Dünya ve Türkiye'de ki Pelet Yakıt Durumu……99
7 DENEYSEL ÇALIŞMALAR……103
7.1 Tez Çalışmasında Kullanılan Biyokütle Kaynakları ve Organik Katkı Maddeleri……103
7.2 Ham Biyokütle Kaynaklarına ve Organik Atıklara Uygulanan Ön işlemler104
7.3 Ham Biyokütle ve Organik Atıklar İçin Karakterizasyon Çalışmaları……105
7.3.1 Ham Biyokütle ve Oganik Atıkların Kısa Analizleri……105
7.3.2 Ham Biyokütle ve Oganik Atıkların Elementel Analizi……106
7.3.3 Ham Biyokütle ve Organik Atıkların Üst Isıl Değer Analizleri……106
7.3.4 Ham Biyokütle ve Organik Atıklar için Makromoleküler Bileşen Analizi……107
7.3.5 Termogravimetrik Analiz……109
7.3.6 Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FT-IR) Spektroskopisi……109
7.3.7 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi……109
7.4 Biyokütle Kaynaklarına ve Organik Atıklara Torrefaksiyon Prosesinin Uygulanması……109
7.5 Torrefiye Biyokömür Numunelerine Uygulanan Karakterizasyon Çalışmaları……112
7.5.1 Torrefiye Ürün % Kütle Kaybı……112
7.5.2 Torrefiye Ürün % Kütle Verimi ve % Enerji Verimi……113
7.5.3 Torrefiye Ürün Enerji yoğunluğu……113
7.6 Biyokömür Pelet Üretimi……114
7.7 Biyopelet Numunelerine Uygulanan Karakterizasyon Çalışmaları……115
7.7.1 Düşme/Darbe Direnci Testi……115
7.7.2 Sıkıştırma Direnci Testi……116
7.7.3 Suya Dayanım Testi……116
8 SONUÇLAR VE TARTIŞMA……117

8.1 Karakterizasyon Çalışmaları.....117
8.1.1 Ham Biyokütle ve Oganik Atıklar İçin Kısa Analiz Sonuçları.....117
8.1.2 Torrefiye Biyokömür Numuneleri İçin Kısa Analiz Sonuçları.....120
8.1.3 Ham Biyokütle ve Torefiye Biyokömür Numuneleri Elementel Analiz Sonuçları.....122
8.1.4 Ham Biyokütle ve Organik Atıklar için Makromoleküler Bileşen Analiz Sonuçları.....125
8.2 Design Expert Programı ve Torrefaksiyon Prosesi ile Biyokömür Üretim Sonuçları.....126
8.2.1 Sığır Kuyruğu - Keçiboynuzu (1. Set) Torrefaksiyon Prosesi Sonuçları.....127
8.2.2 Geven – Keçiboynuzu (2. Set) Torrefaksiyon Prosesi Sonuçları.....143
8.2.3 Geven – Mısır (3. Set) Torrefaksiyon Prosesi Sonuçları.....158
8.2.4 Sığır Kuyruğu – Mısır (4. Set) Torrefaksiyon Prosesi Sonuçları.....173
8.3 Torrefaksiyon Proses Parametrelerinin Biyokömür Ürünü Üzerine Etkilerinin İncelenmesi.....188
8.3.1 Torrefaksiyon Reaksiyon Sıcaklığının Biyokömür Ürünü Üzerine Etkisinin İncelenmesi.....188
8.3.2 Torrefaksiyon Reaksiyon Süresinin Biyokömür Ürünü Üzerine Etkisinin İncelenmesi.....192
8.3.3 Biyokütle Tanecik Boyutunun Biyokömür Ürünü Üzerine Etkisinin İncelenmesi.....194
8.4 Optimum Biyokömür Ürünleri Karakterizasyon Çalışmaları.....196
8.4.1 Termogravimetrik Analiz Sonuçları.....197
8.4.2 FT-IR Analiz Sonuçları.....201
8.4.3 Sem Analiz Sonuçları.....206
8.5 Biyopelet Numuneleri Karakterizasyon Sonuçları.....211
8.5.1 Biyopelet Numuneleri Kısa Analiz Sonuçları.....212
8.5.2 Biyopelet Numuneleri Düşme/Darbe Direnci Sonuçları.....213
8.5.3 Biyopelet Numuneleri Sıkıştırma Direnci Sonuçları.....214
8.5.4 Biyopelet Numuneleri Suya Dayanım Testi Sonuçları.....216
9 SONUÇ VE ÖNERİLER.....217
9.1 Sonuçlar.....217
9.2 Öneriler.....226
KAYNAKÇA.....227
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR.....240

SİMGE LİSTESİ

N	Azot
°C	Celcius derece
g	Gram
OH	Hidroksil grubu
H	Hidrojen
C	Karbon
kg	Kilogram
CO	Karbonmonoksil
CO_2	Karbon Dioksit
C=O	Karbonil
S	Kükürt
KWh	Kilowatt saat
MJ	Megajoule
MPa	Megapaskal
CH_4	Metan
CH_2	Metilen
µm	Mikrometre
ml	Mililitre
mm	Milimetre
N	Newton
O	Oksijen
H_2O	Su
%	Yüzde

KISALTMA LİSTESİ

ağ/ağ	Ağırlık/Ağırlık
dk	Dakika
ETKB	T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
FT-IR	Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
G-KB	Geven-Keçi boynuzu
G-M	Geven- Mısır
IE	Uluslararası Enerji Ajansı
MTEP	Milyon ton eşdeğer petrol
RSM	Yanıt yüzey yöntemi
SK-KB	Sığır kuyruğu-Keçi boynuzu
SK-M	Sığır kuyruğu-Mısır
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
T	Sıcaklık
TGA	Termogravimetrik Analiz

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Enerji kaynakları alt sınıflandırılmaları.....7
Şekil 2.2 Dünya'da ki 2014 yılı enerji tüketim paydaları.....8
Şekil 2.3 Türkiye'de birincil enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki oranları....8
Şekil 2.4 2009-2014 yılları dünya petrol tüketimi.....13
Şekil 2.5 2000-2017 Türkiye petrol üretim verileri (Milyon Ton).....13
Şekil 2.6 2018-2040 bölgesel gaz talebi.....16
Şekil 2.7 2014 yılı sektör bazında doğal gaz tüketim oranları.....17
Şekil 2.8 Tükiye'de üretilen yenilenebilir enerji miktarları.....22
Şekil 2.9 Yenilenebilir kaynakların Dünya'da elektrik enerjisi üretimindeki.....23
Şekil 2.10 Türkiye güneşlenme potansiyeli.....24
Şekil 2.11 Jeotermal enerjinin oluşum aşaması.....26
Şekil 2.12 Türkiye genelindeki jeotermal kaynaklar.....27
Şekil 2.13 2017 jeotermal enerjinin direkt kullanımının bölgelerdeki dağılımı.....27
Şekil 2.14 2017 Yılı Türkiye'nin yenilenebilir kurulu enerji potansiyeli (MW).....29
Şekil 2.15 Ülkeler bazında 2016 hidro enerji kapasiteleri.....29
Şekil 2.16 Dalga enerjisi dönüşüm prosesleri.....30
Şekil 2.17 Hidrojen enerjisi üretim döngüsü.....32
Şekil 2.18 Farklı endüstri kollarında hidrojen enerjisi üretimi.....33
Şekil 2.19 Sektörlere göre 2017 yılı enerji tüketiminde biyoenerjinin payı.....34
Şekil 2.20 2018 Küresel biyoelektrik üretimi.....35
Şekil 2.21 2016 yılı üretilen enerjinin Türkiye yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynaklarına göre payları.....36
Şekil 2.22 Yıllar bazında Türkiye enerji ihtiyacının yerli üretim ve ithalat yolu ile karşılanma durumları.....36
Şekil 2.23 Farklı enerji kaynaklarının 2016 yılı Türkiye enerji tüketimindeki payları.....37
Şekil 2.24 Türkiye'de harcanan enerjinin sektörel bazdaki paylaşımı.....37
Şekil 2.25 Türkiye G20 ülkeleri arasındaki enerji tüketimi.....38
Şekil 2.26 Yıllara göre enerji tüketiminin kaynak bazında dağılımı.....40
Şekil 2.27 Küresel elektrik üretiminin yararlanılan kaynaklara göre dağılımı.....41
Şekil 2.28 Yıllar bazında değişik enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin miktarları.....42
Şekil 3.1 Biyokütle enerji döngüsü.....44
Şekil 3.2 Biyokütle kaynakları sınıflandırılması.....46
Şekil 3.3 Biyokütle dönüşüm sistemleri.....48
Şekil 3.4 Van Krevlen diyagramı.....49
Şekil 3.5 Biyokütle piroliz reaksiyonu basamakları.....52
Şekil 3.6 Biyokütle gazlaştırma prosesi ve son ürün uygulama alanları.....54
Şekil 3.7 Glikoz- etil alkol fermantasyon çevrimi.....57
Şekil 3.8 Hidrolitik fermantasyon ile etanol üretimi.....58
Şekil 3.9 Bitkisel yağ asitlerinin alkol ile veridiği transesterifikasyon tepkimesi...59
Şekil 3.10 Biyodizel proses basamakları.....60
Şekil 3.11 Hemiselülozik biyokütlenin kimyasal yapısı.....62
Şekil 3.12 Hemiselüloz kimyasal yapısı.....63
Şekil 4.1 Enerji tarımının kırsal alandaki kalkınmaya etkisi.....68
Şekil 4.2 Karacabey kırsalı enerji tarımı ve C4 enerji bitkileri verim skalası.....70

Şekil 5.1 Torrefaksiyon prosesi uygulanmış biyokütlenin kimyasal yapısındaki değişiklik……72
Şekil 5.2 Torrefaksiyon reaksiyon mekanizması……74
Şekil 5.3 Torrefaksiyon proses adımları……75
Şekil 5.4 Biyokütle yapısındaki ana bileşenlerin kütle kaybı……76
Şekil 5.5 Torrefaksiyon prosesi sırasında oluşan ürünler……77
Şekil 5.6 Torrefiye pelet üretim şeması……82
Şekil 5.7 Torrefiye biyokütle üretim prosesi……86
Şekil 6.1 Pelet üretiminde kullanılan biyokütle kaynakları……88
Şekil 6.2 Değişik enerji kaynaklarının CO_2 emisyonları……89
Şekil 6.3 Biyokütle peletleme proses basamakları……91
Şekil 6.4 Peletleme mekanizması……93
Şekil 6.5 Küresel pelet üretim gelişimi……100
Şekil 6.6 2019 yılı Dünya pelet üretim ve tüketim oranları……101
Şekil 7.1 IKA A11 el tipi öğütücü……105
Şekil 7.2 FRITSCH elek sarsma cihazı……105
Şekil 7.3 İKA C 4000 adyabatik kalorimetre cihazı……107
Şekil 7.4 İnert azot gazı ortamında uygulanan torrefaksiyon proses düzeneği….104
Şekil 7.5 Ham biyokütle ve değişik proses koşullarında üretilen torrefiye biyokömür numuneleri……104
Şekil 7.6 Hidrolik pres……115
Şekil 7.7 Biyopelet numuneleri……115
Şekil 8.1 Sığır Kuyruğu TG eğrisi……117
Şekil 8.2 Geven TG eğrisi……118
Şekil 8.3 Keçi Boynuzu TG eğrisi……118
Şekil 8.4 Mısır TG eğrisi……119
Şekil 8.5 Torrefaksiyon sıcaklığına bağlı biyokömür element içeriğindeki değişim……123
Şekil 8.6 Torrefiye biyokömür numuneleri için Van Krevelen diyagramı……125
Şekil 8.7 SK-KB biyokömür numuneleri %Kütle Kaybı tahmin edilen değerler ile deneysel değerlerin karşılaştırılması……130
Şekil 8.8 Sıcaklık ve kalma süresi parametrelerinin SK-KB biyokömür % kütle kaybı üzerine etkisi……132
Şekil 8.9 Sıcaklık ve tanecik boyutu parametrelerinin SK-KB biyokömür %kütle kaybı üzerine etkisi……132
Şekil 8.10 Tanecik boyutu ve kalma süresi parametrelerinin SK-KB biyokömür %kütle kaybı üzerine etkisi……133
Şekil 8.11 SK-KB biyokömür numuneleri %kütle verimi tahmin edilen değerler ile deneysel değerlerin karşılaştırılması……135
Şekil 8.12 Sıcaklık ve kalma süresi parametrelerinin SK-KB biyokömür %kütle verimi üzerine etkisi……136
Şekil 8.13 Kalma süresi ve tanecik boyutu parametrelerinin SK-KB biyokömür %kütle verimi üzerine etkisi……137
Şekil 8.14 Sıcaklıki ve tanecik boyutu parametrelerinin SK-KB biyokömür %kütle verimi üzerine etkisi……138
Şekil 8.15 SK-KB biyokömür numuneleri %enerji verimi tahmin edilen değerler ile deneysel değerlerin karşılaştırılması……139
Şekil 8.16 Sıcaklık ve kalma süresi parametrelerinin SK-KB biyokömür %enerji verimi üzerine etkisi……141

Şekil 8.17 Kalma süresi ve tanecik boyutu parametrelerinin SK-KB biyokömür %enerji verimi üzerine etkisi……142
Şekil 8.18 Sıcaklık ve katkı maddesi oranı parametrelerinin SK-KB biyokömür %enerji verimi üzerine etkisi……142
Şekil 8.19 G-KB biyokömür numuneleri %kütle kaybı deneysel veriler ile tahmin edilen verilerin karşlaştırılması……146
Şekil 8.20 G-KB biyokömür numuneleri için sıcaklık ve kalma süresi parametrelerinin % kütle kaybı üzerine etkisi……148
Şekil 8.21 G-KB biyokömür numuneleri için kalma süresi – biyokütle tanecik boyutu parametrelerinin % kütle kaybı üzerine etkisi……148
Şekil 8.22 G-KB biyokömür numuneleri için sıcaklık – biyokütle tanecik boyutu parametrelerinin % kütle kaybı üzerine etkisi……149
Şekil 8.23 G-KB biyokömür numuneleri %kütle verimi deneysel veriler ile tahmin edilen verilerin karşlaştırılması……150
Şekil 8.24 G-KB biyokömür numuneleri için sıcaklık ve kalma süresi parametrelerinin %kütle verimi üzerine etkisi……152
Şekil 8.25 G-KB biyokömür numuneleri için kalma süresi – biyokütle tanecik boyutu parametrelerinin %kütle verimi üzerine etkisi……152
Şekil 8.26 G-KB biyokömür numuneleri için sıcaklık – biyokütle……153
Şekil 8.27 G-KB biyokömür numuneleri %enerji verimi deneysel veriler ile tahmin edilen verilerin karşlaştırılması……154
Şekil 8.28 G-KB biyokömür numuneleri için sıcaklık ve kalma süresi parametrelerinin %enerji verimi üzerine etkisi……156
Şekil 8.29 G-KB biyokömür numuneleri için kalma süresi – biyokütle tanecik boyutu parametrelerinin %enerji verimi üzerine etkisi……157
Şekil 8.30 G-KB biyokömür numuneleri için sıcaklık – biyokütle tanecik boyutu parametrelerinin %enerji verimi üzerine etkisi……158
Şekil 8.31 G-M biyokömür numuneleri %kütle kaybı deneysel veriler ile tahmin edilen verilerin karşlaştırılması……161
Şekil 8.32 G-M biyokömür numuneleri için sıcaklık ve kalma süresi parametrelerinin % kütle kaybı üzerine etkisi……162
Şekil 8.33 G-M biyokömür numuneleri için kalma süresi ve tanecik boyutu parametrelerinin % kütle kaybı üzerine etkisi……163
Şekil 8.34 G-M biyokömür numuneleri için sıcaklık ve katkı maddesi parametrelerinin % kütle kaybı üzerine etkisi……164
Şekil 8.35 G-M biyokömür numuneleri %kütle verimi deneysel veriler ile tahmin edilen verilerin karşlaştırılması……165
Şekil 8.36 G-M biyokömür numuneleri için sıcaklık ve kalma süresi parametrelerinin %kütle verimi üzerine etkisi……167
Şekil 8.37 G-M biyokömür numuneleri için sıcaklık ve katkı maddesi oranı parametrelerinin %kütle verimi üzerine etkisi……167
Şekil 8.38 G-M biyokömür numuneleri için kalma süresi – biyokütle tanecik boyutu parametrelerinin %kütle verimi üzerine etkisi……168
Şekil 8.39 G-M biyokömür numuneleri %enerji verimi deneysel veriler ile tahmin edilen verilerin karşlaştırılması……169
Şekil 8.40 G-M biyokömür numuneleri için sıcaklık ve kalma süresi parametrelerinin %enerji verimi üzerine etkisi……171
Şekil 8.41 G-M biyokömür numuneleri için tanecik boyutu ve katkı maddesi parametrelerinin %enerji verimi üzerine etkisi……172

Şekil 8.42 G-M biyokömür numuneleri için tanecik boyutu ve sıcaklık parametrelerinin %enerji verimi üzerine etkisi……172
Şekil 8.43 SK-M biyokömür numuneleri %Kütle Kaybı tahmin edilen değerler ile deneysel değerlerin karşılaştırılması……176
Şekil 8.44 SK-M biyokömür numuneleri için sıcaklık ve kalma süresi parametrelerinin %kütle kaybı üzerine etkisi……177
Şekil 8.45 SK-M biyokömür numuneleri için sıcaklık ve katkı maddesi oranı parametrelerinin %kütle kaybı üzerine etkisi……178
Şekil 8.46 SK-M biyokömür numuneleri için kalma süresi ve tanecik boyutu parametrelerinin %kütle kaybı üzerine etkisi……178
Şekil 8.47 SK-M biyokömür numuneleri %Kütle verimi tahmin edilen değerler ile deneysel değerlerin karşılaştırılması……180
Şekil 8.48 SK-M biyokömür numuneleri için sıcaklık ve kalma süresi parametrelerinin %kütle verimi üzerine etkisi……182
Şekil 8.49 SK-M biyokömür numuneleri için sıcaklık ve katkı maddesi oranı parametrelerinin %kütle verimi üzerine……182
Şekil 8.50 SK-M biyokömür numuneleri için kalma süresive tanecik boyutu parametrelerinin %kütle verimi üzerine etkisi……183
Şekil 8.51 SK-M biyokömür numuneleri %enerji verimi deneysel veriler ile tahmin edilen verilerin karşlaştırılması……185
Şekil 8.52 SK-M biyokömür numuneleri için sıcaklık ve kalma süresi parametrelerinin %enerji verimi üzerine etkisi……187
Şekil 8.53 SK-M biyokömür numuneleri için sıcaklık ve katkı maddesi oranı parametrelerinin %enerji verimi üzerine etkisi……187
Şekil 8.54 SK-M biyokömür numuneleri için kalma süresi ve tanecik boyutu parametrelerinin %enerji verimi üzerine etkisi……188
Şekil 8.55 Torrefaksiyon reaksiyon sıcaklığının %kütle kaybı üzerine etkisi……190
Şekil 8.56 1. Deney seti ham (a) ve optimum biyokömür (b) numuneleri TGA, DTG ve DTA profilleri……198
Şekil 8.57 2. Deney seti ham (a) ve optimum biyokömür (b) numuneleri TGA, DTG ve DTA profilleri……199
Şekil 8.58 3. Deney seti ham (a) ve optimum biyokömür (b) numuneleri TGA, DTG ve DTA profilleri……200
Şekil 8.59 4. Deney seti ham (a) ve optimum biyokömür (b) numuneleri TGA, DTG ve DTA profilleri……200
Şekil 8.60 Ham sığır kuyruğu FT-IR spektrumu……201
Şekil 8.61 Ham geven FT-IR spektrumu……202
Şekil 8.62 1. Deney seti optimum biyokömür numunesi FT-IR spektrumu……203
Şekil 8.63 2. Deney seti optimum biyokömür numunesi FT-IR spektrumu……203
Şekil 8.64 3. Deney seti optimum biyokömür numunesi FT-IR spektrumu……204
Şekil 8.65 4. Deney seti optimum biyokömür numunesi FT-IR spektrumu……205
Şekil 8.66 Sığır kuyruğu SEM görüntüsü……206
Şekil 8.67 Geven SEM görüntüsü ……207
Şekil 8.68 1. Deney seti optimum biyokömür numunesi SEM görüntüsü……208
Şekil 8.69 2. Deney seti optimum biyokömür numunesi SEM görüntüsü……209
Şekil 8.70 3. Deney seti optimum biyokömür numunesi SEM görüntüsü……210
Şekil 8.71 4. Deney seti optimum biyokömür numunesi SEM görüntüsü……211
Şekil 8.72 Biyokömür peletleri düşme direnci analiz sonrası görünümleri……214
Şekil 8.73 Biyokömür peletleri sıkıştırma direnci sonuçları……215

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Türkiye fosil enerji kaynakları……9
Tablo 2.2 Kömür sınıflarına göre özellikleri……11
Tablo 2.3 Dünya doğal gaz kaynaklarının bölgesel dağılımı……15
Tablo 2.4 Dünya doğal gaz kaynaklarının ülke bazında dağılımları……15
Tablo 2.5 Doğal gaz 2015 tüketim oranları……16
Tablo 2.6 Dünya ve Türkiye'de ki toryum rezevlerinin miktarları……18
Tablo 2.7 Türkiye'nin Dünya enerji üretimindeki yeri……19
Tablo 2.8 Yenilenebilir enerji kaynakları sınıflandırılması……21
Tablo 2.9 Türkiye'de ki mevcut yenilenebilir enerji kaynakları verileri……21
Tablo 2.10 Türkiye güneş santralleri kapasitesi……24
Tablo 2.11 Türkiye rüzgar santralleri……25
Tablo 2.12 Türkiye'de denizlere ait dalga kapasiteleri……31
Tablo 2.13 Yıllara göre Türkiye'deki elektrik enerjisinin durumu……38
Tablo 2.14 Küresel enerji tüketim miktarları……39
Tablo 2.15 Gelişmiş ülkelerde üretilen elektrik enerjisinin kullanılan kaynaklara göre payları……41
Tablo 3.1 Termokimyasal dönüşüm prosesleri……50
Tablo 3.2 Değişik piroliz koşulları ve ürünler……53
Tablo 3.3 Bazı lignoselülozik bitkilerin kimyasal yapıları……61
Tablo 5.1 Farklı peletlerin karakteristik özellikleri……86
Tablo 6.1 Biyopelet ve biriketlerin karakteristik özellikleri……90
Tablo 6.2 Tarımsal kaynaklı ürünlerin üretim miktarları ve enerji kapasiteleri..102
Tablo 7.1 Torrefaksiyon deney planı……112
Tablo 7.2 Bağımsız değişkenler için Design Expert programı ile belirlenen optimum koşullar……114
Tablo 8.1 Ham biyokütle ve organik atıkların kısa analiz sonuçları……119
Tablo 8.2 Torrefiye biyokömür ürünlerinin kısa analiz sonuçları……121
Tablo 8.3 Ham biyokütle ve organik atıkların elementel analiz sonuçları……122
Tablo 8.4 Torrefiye biyokömür ürünlerin elementel analiz sonuçları……124
Tablo 8.5 Torrefiye biyokömür ürünleri için H/C ve O/C atomik oranları……124
Tablo 8.6 Makromoleküler bileşen analiz sonuçları……126
Tablo 8.7 Torrefaksiyon prosesi ile üretilen SK-KB biyokömür analiz sonuçları……128
Tablo 8.8 SK-KB biyokömür numuneleri %kütle kaybı analizi için önerilen model istatiksel değerleri……129
Tablo 8.9 % Kütle kaybı ANOVA sonuçları……131
Tablo 8.10 SK-KB biyokömür numuneleri %kütle verimi analizi için önerilen model istatiksel değerleri……134
Tablo 8.11 % Kütle verimi ANOVA sonuçları……135
Tablo 8.12 SK-KB biyokömür numuneleri %enerji verimi analizi için önerilen model istatiksel değerleri……139
Tablo 8.13 % Enerji verimi ANOVA sonuçları……140
Tablo 8.14 Torrefaksiyon prosesi ile üretilen G-KB biyokömür analiz sonuçları……144

Tablo 8.15 G-KB biyokömür numuneleri %kütle kaybı analizi model istatiksel değerleri……145
Tablo 8.16 G-KB %Kütle kaybı ANOVA sonuçları……147
Tablo 8.17 G-KB biyokömür numuneleri %kütle verim analizi model istatiksel değerleri……149
Tablo 8.18 G-KB %kütle verimi ANOVA sonuçları……151
Tablo 8.19 G-KB biyokömür numuneleri %enerji verim analizi model istatiksel değerleri……154
Tablo 8.20 G-KB %enerji verimi ANOVA sonuçları……155
Tablo 8.21 Torrefaksiyon prosesi ile üretilen G-M biyokömür analiz sonuçları..159
Tablo 8.22 G-M biyokömür numuneleri %kütle kaybı analizi model istatiksel değerleri……160
Tablo 8.23 G-M %kütle kaybı ANOVA sonuçları……161
Tablo 8.24 G-M biyokömür numuneleri %kütle verim analizi model istatiksel değerleri……164
Tablo 8.25 G-M %kütle verimi ANOVA sonuçları……166
Tablo 8.26 G-M biyokömür numuneleri %enerji verim analizi model istatiksel değerleri……169
Tablo 8.27 G-M %enerji verimi ANOVA sonuçları……170
Tablo 8.28 Torrefaksiyon prosesi ile üretilen SK-M biyokömür analiz sonuçları……174
Tablo 8.29 SK-M biyokömür numuneleri %kütle kaybı analizi model istatiksel değerleri……175
Tablo 8.30 SK-M %kütle kaybı ANOVA sonuçları……176
Tablo 8.31 SK-M biyokömür numuneleri %kütle verimi analizi için önerilen model istatiksel değerleri……179
Tablo 8.32 SK-M %Kütle verimi ANOVA sonuçları……181
Tablo 8.33 SK-M biyokömür numuneleri %enerji verim analizi model istatiksel değerleri……184
Tablo 8.34 SK-M %enerji verimi ANOVA sonuçları……185
Tablo 8.35 Torrefaksiyon sıcaklığının biyokömür ürün sonuçlarına etkisi……189
Tablo 8.36 Torrefaksiyon proses süresinin biyokömür ürün sonuçlarına etkisi.192
Tablo 8.37 Biyokütle tanecik boyutunun biyokömür ürün sonuçlarına etkisi…..195
Tablo 8.38 Deney setleri için torrefaksiyon prosesi optimum koşulları……197
Tablo 8.39 Optimum koşullarda üretilen biyopelet kısa analiz sonuçları……212
Tablo 8.40 Biyokömür peletleri düşme direnci sonuçları……213
Tablo 8.41 Biyokömür peletleri suya dayanım sonuçları……216

ÖZET

Farklı Enerji Bitkileri ve Organik Atıklar Kullanılarak Elde Edilen Enerji Peletlerinde Karakteristik Özelliklerin İncelenmesi

Hediye İrem ÖZGÜNDÜZ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Nil ACARALI

Dünyadaki enerji tüketiminin büyük bir kısmını birincil enerji kaynakları oluşturmaktadır. Kalabalıklaşan nüfus ve sanayileşmeden dolayı fosil enerji kaynakların rezervleri sürekli azalma eğilimindedir. Alternatif yenilenebilir enerji kaynaklarından biyokütlenin, düşük ısıl değer, yüksek nem ve uçucu madde içeriği, düşük yoğunluk ve yüksek oksijen/karbon oranı nedeniyle fosil yakıtlara göre dezavantajları söz konusudur. Bunları azaltarak yakıt enerjisi içeriğini iyileştirmek için biyokütleye, torrefaksiyon adlı termal ön işlem uygulanmaktadır.

Bu tez çalışmasında, ülkemizde yaygın olarak kullanılan geleneksel enerji kaynaklarına alternatif, her türlü toprak şartlarına uygun, dağlık bölgelerde kendiliğinden yetişen yabani, çok yıllık bitkilerden, geven (Astragalus) (Uşak ilinden) ve sığırkuyruğu (Verbascum Thapsus) (Afyonkarahisar ilinden) enerji bitkilerine, organik endüstriyel atıklar (keçiboynuzu ve mısır endüstriyel atığı) ilave edilerek, enerji potansiyeli arttırılmış biyopelet üretimi ve karakterizasyonu yapılmıştır. Biyopelet üretiminde kullanılan yakıt özelliği geliştirilmiş biyokömürlerin üretim optimizasyonu için "Central Composite Design"

optimizasyon yöntemi uygulanarak değişik proses koşulları için 4 faktör ve 5 seviye içeren torrefaksiyon deney setleri hazırlanmıştır. İnert ortamda gerçekleştirilen torrefaksiyon proses koşulları için bağımsız değişkenler; sıcaklık (200-320°C), kalma süresi (15-75 dk), tanecik boyutu (1-5 mm) ve organik endüstriyel atık oranı (%0-100 ağ/ağ) olarak belirlenmiştir. Her deney seti için torrefaksiyon ile üretilen biyokömürlerin analiz sonuçları, design expert programı desirability fonksiyonu ile çözümlendirilerek optimum biyokömür numuneleri üretim koşulları belirlenmiş ve optimum biyokömür numunelerinin üretimi yapılmıştır.

Tezin 2. aşamasında, optimum biyokömür numunelerinden yoğunlaştırılmış biyopelet üretimi hidrolik pres ile sabit basınçta (25 MPa) gerçekleştirilmiştir. Alternatif enerji kaynakları olarak değerlendirilmek istenen biyopeletlerin yakıt karakteristik özellikleri incelenmiştir. Cevap yüzey yöntemi ile üretilen biyokömürlere uygulanan torrefaksiyon prosesi için lineer model önerilmiştir. Üretilen biyokömürlerin yakıt karakteristik özellikleri için en etkili parametrenin reaksiyon sıcaklığı olduğu belirlenmiştir. Pelet karakterizasyon çalışmalarıyla da 3. ve 4. Set biyopeletlerin biyoyakıt amaçlı kullanılabileceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji bitkileri, biyokütle, torrefaksiyon, pelet

ABSTRACT

Investigation of Characteristic Properties of Energy Pellets Obtained Using Different Energy Plants and Organic Wastes

Hediye İrem ÖZGÜNDÜZ

Department of Chemical Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Nil ACARALI

Major energy consumption in the world includes primary energy sources. Due to crowded population and industrialization, the reserves of fossil energy sources tend to decrease steadily. Biomass, an alternative renewable energy source, has disadvantages compared to fossil fuels due to its low thermal value, high moisture, volatile content, low density, high oxygen/carbon ratio. Thermal pretreatment called torrefaction is applied on biomass to reduce effects and improve energy content.

In this study, Astragalus (Uşak) and verbascum thapsus (Afyonkarahisar), which are alternatives to traditional energy sources commonly used in Turkey, suitable for all kinds of soil conditions, grows spontaneously in mountains and perennial energy plants, were used for biopellet production improved energy potential by adding industrial wastes (carob, corn) and characterization was carried out.

For the production optimization of biochars with improved fuel properties used in biopellet production, "Central Composite Design" was applied and torrefaction sets (4 factors, 5 levels) were prepared for different process conditions. For inert

environment torrefaction conditions, independent variables were determined as temperature (200-320°C), residence time (15-75 min), particle size (1-5 mm) and industrial waste ratio (0-100 %w/w). Analysis results of biochars produced by torrefaction for each set were analyzed using design expert desirability function, and optimum biochars were determined and optimum biochar samples were produced.

In second stage, the production of condensed biopellets from optimum biochars was carried out with hydraulic press at 25MPa. The fuel characteristics of biopellets that are intended to be considered as alternative energy sources have been examined. As a result of response surface method, a linear model has been proposed for torrefaction in production. It has been determined that the most effective parameter for fuel characteristics of the produced biochar is the reaction temperature. With pellet characterization studies, it was determined that the third and fourth sets can be used for biofuels.

Keywords: Energy plants, biomass, torrefaction, pellet

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Alternatif yenilenebilir enerji kaynakları içinde büyük bir enerji potansiyeline sahip biyokütle enerjisinin kullanılabilmesi için çok çeşitli prosesler geliştirilmiştir. Biyokütle, fiziksel süreçler, doğrudan yakma, karbonizasyon, piroliz, gazlaştırma, torrefaksiyon prosesleri gibi termo kimyasal süreçler veya anaerobik olan biyokimyasal süreçler ile biyoyakıta dönüştürülerek kullanılabilir hale getirilebilmektedir.

Torrefaksiyon, hammaddenin oksijensiz ortamda, 200–350°C aralığında, 15–120 dakika arasında düşük ısıtma hızında ısıtılmasıyla oluşan termokimyasal bir ön prosestir. Torrefaksiyon prosesi sonucunda, biyokütle yapısında bulunan uçucu gazlar, lignin, selüloz, hemiselüloz yapıları ve nem biyokütleden uzaklaştırılmaktadır. Geriye kalan yapının karbon yoğunluğu ve enerji verimliliği orijinal hammaddeye kıyasla daha yüksektir.

Torrefaksiyon prosesi dört ana basamakta gerçekleşmektedir. Torrefaksiyon prosesinin ilk evresi kurutma evresidir. Kurutma evresi, temelde iki basamaktan oluşmaktadır. Birinci basamağında sıcaklık 100°C de sabit tutulmakta ve biyokütle içindeki serbest suyun yapıdan ayrılması sağlanmaktadır. Bu aşamada, biyokütlede kimyasal değişim olmamaktadır. Nemin tamamı biyokütleden ayrılmaktadır. İkinci basamakta ise sıcaklık 120-150°C ye çıkarılarak ligninin kısmi olarak bozunması sağlanmaktadır. Bu bozunma aynı zamanda yapıya bağlayıcı özellik de kazandırmaktadır. Torrefaksiyon prosesinin en çok enerji gerektiren basamağı kurutma basamağıdır. Kurutma işlemi sonucunda biyokütle ağırlığının yaklaşık %10'unu kaybeder. Kurutma işleminden 150°C de çıkan kurumuş biyokütle torrefaksiyon işlemi için uygun sıcaklığa getirilmiş olmaktadır.

Torrefaksiyon prosesinin ikinci evresini torrefaksiyon bölgesi oluşturmaktadır. 150–200°C aralığındaki birinci basamağa "reaktif kurutma bölgesi" denir. Bu aşamada hidrojen ve karbon bağlarının kırılması ve hemiselüloz moleküllerinin dekompozisyonu başlar. Bu basamaktan sonra biyokütlenin yapısal deformasyonu geri döndürülemez. İkinci aşama sıcaklığın 200–250°C aralığında olduğu basamaktır. Bu aşama, hemiselüloz için sertleşme bölgesini oluşturur ve reaktif kuruma bölgesinde kısmi dekompozisyon sonucu oluşan polimer yapıların az miktarda karbonlaştırılması şeklinde tanımlanabilir. Yoğunlaşabilir sıvılar ve yoğunlaşamayan gazların oluşturduğu intramoleküler hidrojen, C–C ve C–O bağlarının parçalanmasına sebep olur. Torrefaksiyon bölgesinin üçüncü evresinde sıcaklık, 250–300°C arasındadır. Sıcaklığın en yüksek olduğu basamaktır. Bu aşamada hemiselülozun, uçucu maddelere ve katı ürüne ayrışması meydana gelmektedir. Bununla birlikte lignin ve selüloz, sınırlı miktarda devolatilizasyon ve karbonizasyona uğrar. Biyokütlenin hücre yapısı tamamen kırılmış olur ve oluşan torrefiye biyokütle soğutma bölgesine geçer.

Torrefaksiyon prosesinin üçüncü ve son evresi soğutma evresidir. Torrefaksiyon işlemi sonucunda oluşan torrefiye biyokütle sistemi prosesin en yüksek sıcaklığında terkeder. Yeterli soğutma yapılamazsa oksijenle temasında alev alabilir. Ek olarak yüksek sıcaklığa sahip torrefiye ürünün taşınması ve depolanması da tehlike arz etmektedir. Bu sebeple ürünün soğutulması son derece önemlidir. Soğutma işlemi sıcak hava veya buharlaşmış sıvı formunda enerjiyi üründen çıkarır. Çıkarılan enerji daha sonra biyokütleyi kurutmak veya ön ısıtma yapmak için gereken enerjinin bir kısmını tekrar sağlayabilir.

Literatür araştırmalarında köknar ve ladin talaşı kullanılarak gerçekleştirilen torrefaksiyon prosesi çalışmaları yer almaktadır. Yapılan çalışmalarda farklı sıcaklık koşulları taranarak kütle kayıpları incelenmiştir. Ayrıca biyokütle tanecik boyutları göz önüne alınarak farklı proses sürelerinde torrefaksiyon reaktör performansları için gerekli optimizasyon koşullarını incelemiş ve torrefaksiyon prosesi için ısıtma değerleri artarken enerji verimliliğinde düşüş gözlendiği sonucuna varılmıştır.

Palmiye bitkisinden yararlanılarak gerçekleştirilen torrefaksiyon prosesleri ile ilgili değişik çalışmalarda bulunmaktadır. Bu çalışmalarda genellikle farklı biyokütleler üzerine uygulanan prosesler sonucu torrefiye üründe gözlenen enerji ve kütle verimlilikleri değerlendirilmiştir. Numunelerdeki kül ve nem analizleri de göz önüne alınarak biyokütlelerin çekirdek kabukları, lifli yapıları ayrı ayrı analiz edilmiş ve bu yapıların özellikle yüksek enerji verimliliğine sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Torrefaksiyon prosesi ile ilgili araştırmalarda ayrıca biyokütle yapısındaki hemiselüloz, selüloz, ksilan, lignin ve dextran bileşiklerinden hammadde olarak yararlanılıp farklı sıcaklıklarda termal bozunmalarının incelendiği çalışmalarda dikkat çekmektedir. Çalışmalar, biyokütle yapısındaki makromoleküllerin farklı proses sıcaklıklarında farklı davranışlar sergilediklerini göstermektedir.

Bu çalışmada, literatürdeki araştırmalardan farklı olarak geniş ve sürdürülebilir yetiştirilme potansiyeline sahip olan enerji bitkilerinden torrefaksiyon prosesi ile yakıt karakteristik özellikleri iyileştirilmiş ve enerji içeriği kömüre yaklaştırılmış biyokömür üretimi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra üretilen biyokömür numuneleri peletleme prosesine tabi tutularak hacimsel enerji yoğunlukları artırılmış ve alternatif yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanımı öngörülmüştür.

1.2 Tezin Amacı

Ekonomik ve sosyal ilerlemenin önemli parametrelerinden biri olan enerjinin, yaşam kalitesinin yükseltilmesinde önemli bir rol oynadığı bilinmektedir. Dünya enerji ihtiyacının büyük kısmı, nüfus ve sanayileşmeye paralel olarak fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Fosil yakıtlar toplam birincil enerji ihtiyacımızın %90'lık kısmını oluştururken, bu yakıtların yaklaşık %80'lik bir kısmının ithalat yoluyla karşılanması enerji bakımından dışa bağımlı bir ülke olduğumuzu göstermektedir. Bu dışa bağımlılığı azaltarak, yerel kaynaklarımızı daha fazla değerlendirebilmek için bu tez çalışmasında, fosil yakıt rezervlerine alternatif olabilecek ve ekolojik dengeyi korumamıza yardım edecek yenilenebilir enerji kaynağı amaçlı biyokütle kullanımı amaçlanmıştır. Yapılan araştırmalar sonucu klasik biyokütle kullanımı yerine düşük karbondioksit konsantrasyonuna sahip,

mevsimsel kuraklığa dayanıklı, az su ihtiyacına gereksinim duyan, ışık şiddetini kullanma yeteneği yüksek ve kalorifik değere sahip enerji bitkilerinin kullanılabileceğine karar verilmiştir. Bu amaçla Afyonkarahisar'dan temin edilen sığır kuyruğu ve Uşak ilinden temin edilen geven enerji bitkilerine, yanma özelliklerini geliştirmek amaçlı inert ortamda ve ılıman koşullarda torrefaksiyon adı verilen termal bir ön işlem uygulanmıştır. Torrefaksiyon prosesinin uygulanacağı deney planının oluşturulması kısmında ise proses koşullarını optimize ederek, üretim maliyetini düşürmek amaçlı Design Expert programı/ Cevap Yüzey Metodu/ Merkezi Kompozit Tasarımından yararlanılmıştır. Deney deseni oluşturulurken, tezin ikinci aşamasında üretimi gerçekleştirilen biyopeletlerde doğal bağlayıcı amaçlı kullanılması planlanan organik endüstriyel atıklarda (pekmez üretimi keçiboynuzu atığı ve yağ üretimi mısır atığı) ham biyokütleye katkı maddesi olarak eklenmiştir. Torrefaksiyon prosesi ile üretilen nem, kül ve uçucu madde içerikleri düşürülmüş, karbon oranı ve enerji potansiyeli artırılmış biyokömür örneklerine karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Proses koşullarını içeren bağımsız değişkenlerin, karakterizasyon analiz sonuçları üzerindeki etkileri incelenerek, matematiksel modellemeleri yapılmış ve sonraki tahminlemelerde kullanılabilirliği öngörülmüştür. Karakterizasyon sonuçları cevap yüzey metodu ile çözümlendirilerek optimum üretim koşulları belirlenmiştir. Belirlenen optimum koşullarda üretilen biyokömür numunelerinden daha sonra sabit basınç altında peletleme prosesi ile yoğunlaştırılmış biyopeletler elde edilmiştir.

Torrefaksiyon ve peletleme prosesi bir arada kullanılarak, birim hacimdeki enerji yoğunluğu yükseltilmiş, yanma karakteristik özellikleri iyileştirilmiş, ekolojik açıdan temiz, hidrofobik, pellet sağlamlığı yüksek, üretim ve nakliye maliyeti düşük, mevcut enerji kaynaklarına alternatif olabilecek, kalorifik değeri kömüre yaklaşmış, çevreci ve verimli biyopelet yakıt üretimi amaçlanmıştır. Bu yönüyle, biyoyakıt teknolojisinin geliştirilmesine katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

1.3 Hipotez

Ülkemizdeki iklim şartlarının uygunluğundan, ekonomik ve sürdürülebilir olmasından dolayı sığır kuyruğu, geven gibi enerji sınıfı bitkiler ile organik

tarımsal ve endüstriyel atıklara dayalı biyoyakıt üretim potansiyelinin gelecekte oldukça önemli bir yer tutacağı öngörülmektedir. Ayrıca, ülkemiz için yenilikçi bir yöntem olan torrefaksiyon prosesi ile enerji potansiyeli kömüre yakın, yanma kalitesi iyiletirilmiş, taşıma ve depolama kolaylığı bakımından avantajlı pelet biyoyakıt üretiminin sağlanabileceği düşünülmektedir. Hali hazırda dünyada pelet üretimi konusunda çeşitli girişimler bulunmaktayken, ülkemizde bu alanda yeterli girişim bulunmamaktadır. Bu çalışmanın, ülkemizin 2023 hedefleri arasında yer alan biyokütle kullanımının enerji payındaki artışını destekleyeceği, ayrıca temiz enerji sağlayacak pelet biyoyakıt üretimi ile dışa bağımlılığımızı azaltacağı ve ulusal ölçekte yenilik içereceği düşünülmüştür.

Bu bağlamda, termal ön işlem olan torrefaksiyon prosesi ile yoğunlaştırılmış biyokütle üretiminin sağlandığı peletleme prosesi birleştirilerek; Mevcut enerji kaynaklarına alternatif, nem, uçucu madde ve kül içeriği azaltılmış, karbon içeriği artırılmış, yüksek enerji yoğunluklu, hidrofobik, çevresel koşullara dayanıklı, sera etkisi azaltılmış, depolanabilirliği ve nakliye açısından ekonomik pellet biyoyakıt üretimi çalışılmıştır.

2
ENERJİ

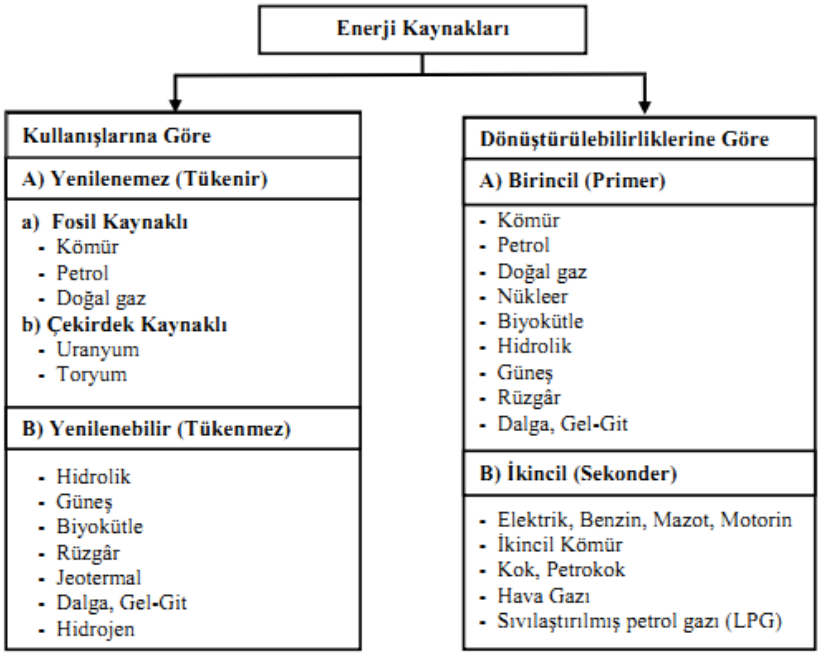
2.1 Enerji Tanımı

Enerji, günlük yaşantının devamlılığı açısından temel girdilerdendir. Endüstriyel devrim öncesi enerji gereksinimleri su, odun, rüzgar gibi doğal kaynaklardan sağlanırken, sanayi devriminin en büyük gelişmelerinden biri olan buharlı makinelerde kömür kullanılabileceğinin bulunması enerji ihtiyacının sağlanabileceği kaynakların değişmesine sebep olmuştur [1]. Enerji, yani "energeia", "en" ile "ergon sözcüklerinden türetilen yunan kökenli bir kelimedir ve soyut anlamda iş gerçekleştirebilme kabiliyetidir. Statik veya dinamik haldeki parçacıklardan elektrik enerjisi üretilebilmesi için enerjinin mekanik veya ısı formunda olması gerekmektedir [2].

Enerji, bir ülkenin gelişmesini, kalkınmasını ve refah seviyesinin yükselmesini belirleyen en önemli girdilerden biridir. Şehirleşmeyle birlikte artan dünya nüfusu ve sanayi alanındaki gelişmeler enerji tüketiminin hızlı artışına neden olmaktadır. Japonya, Amerika, Almanya gibi gelişmiş sanayiye sahip ülkelerde, enerji sarfiyatı kişi başı olarak, diğer ülkelere oranla çok yüksektir [3]. Geleneksel olarak enerji ihtiyacı büyük ölçüde kömür, petrol gibi yeraltı fosil kaynaklardan karşılanmaktadır. Bu kaynaklar üzerine yapılan istatistiksel çalışmalar, enerji tüketiminin %23.5'lik payını oluşturan kömür rezervlerinin 230 sene, %34.8'lik paya sahip petrol rezervinin 41 sene, %21.1'lik doğal gaz rezervinin ise 62 sene içerisinde tükeneceğini ön görmektedir. Doğal kaynaklardaki azalışa rağmen refah düzeyindeki artışa parallel olarak enerji arzındaki artış, beraberinde ülkelerin dışa bağımlı bir enerji politikası izlemesine sebep vermektedir [4]. Dışa bağımlılığı önlemek, kyto protokolü amaçları doğrultusunda sera gaz emisyonlarını azaltarak çevresel sorunların önüne geçerek ülke kalkınmasına katkı sağlamak amacı ile yeni alternatif yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması öncelik taşımaktadır.

2.2 Enerji Kaynakları

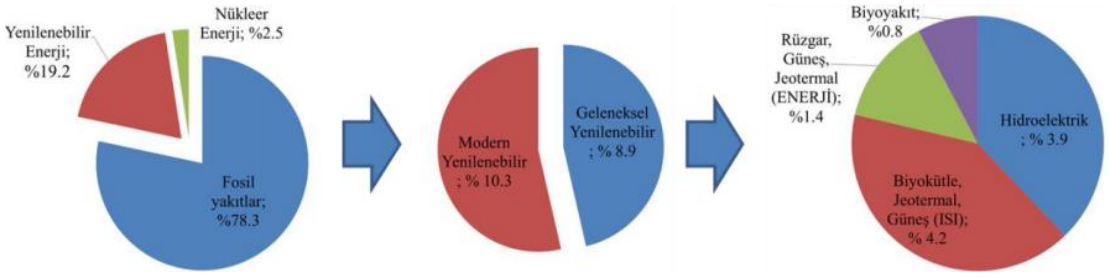
Üretim prosesleri yardımı ile enerji sağlamak amacı ile kullanılan kaynaklara enerji kaynakları denilmektedir. Kullanım yöntemleri göz önüne alınarak; Yenilenebilir enerji kaynakları ve yenilenemeyen enerji kaynakları olarak adlandırılmaktadır. Yenilenebilen enerji kaynakları; kullandığımız yakıtların temelini oluşturan güneş enerjisi başta olmak üzere, kinetik enerjiye dönüşebilen rüzgar enerjisi, hidrojen enerjisi, biyokütleden elde edilen enerji, biyogaz enerjisi, jeotermal ve hidrotermal enerjisi sayılabilmektedir. Bu kaynaklara karşılık petrol, linyit kömürü, maden kömürü, doğal gaz gibi fosil bazlı enerjiler ile atom bazlı nükleer enerjiyi ise yenilenemeyen enerji kaynakları arasında gösterebilir. Ayrıca enerji kaynakları, üretilebilirliklerine görede doğalgaz, kömür, petrol gibi doğadan direkt olarak sağlanabilen birincil kaynaklar ve bu kaynaklardan üretilen petrol ürünleri, elektrik, havagazı, LPG gibi ikincil kaynaklar olarak da tanımlanmaktadır. Enerji kaynakları alt sınıflandırılmaları Şekil 2.1'de gösterilmiştir [5, 6].



Şekil 2.1 Enerji kaynakları alt sınıflandırılmaları [6]

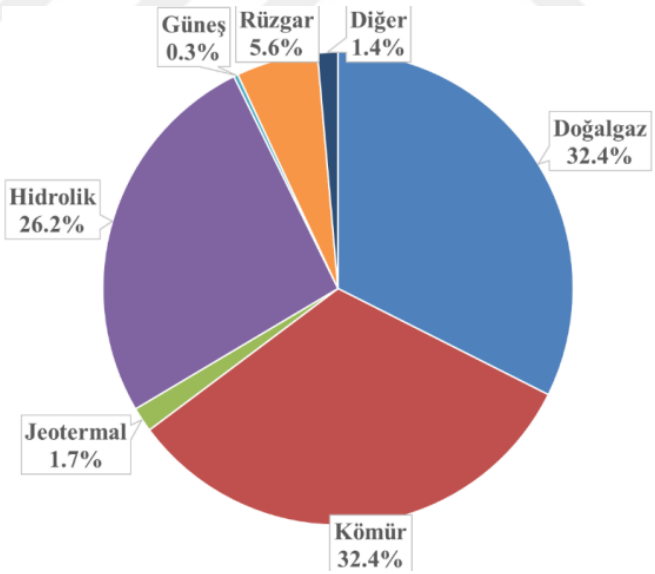
Günümüzde ülkelerin mevcut teknojilerini kullanarak düşük üretim maliyetleri ile kolayca ulaşabildikleri yenilenemeyen enerji kaynakları yerine dünya'da ki nüfus artışı ve enerji arz talep ilişkisine bağlı olarak alternatif yenilenebilen enerji

kaynakları üzerine yapılan çalışmalar yoğunlaşmıştır. Dünya'da hali hazırda çoğunlukla kullanılan enerji kaynakları fosil yakıtlardır. 2014 yılı dünya enerji tüketim paydalarına bakıldığında (Şekil 2.2), fosil yakıtların %78.3'lik bir paya sahip olurken, yenilenebilir enerji kaynaklarının ise sadece %2.5'lik bir orana sahip olduğu gözlenmiştir.



Şekil 2.2 Dünya'da ki 2014 yılı enerji tüketim paydaları [7]

Türkiye'nin ise %68'lik bir pay ile elektrik enerjisi eldesinde dış ülkelere bağımlılık göstermekle beraber yenilenebilir kaynaklar ile artan enerji ihtiyacının büyük bir kısmını karşılayabileceği düşünülmektedir. Türkiye'de ki mevcut birincil enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki oranlarına bakıldığında yenilenebilir kaynakların %32 'lik bir orana sahip olduğu görülmektedir (Şekil 2.3) [7].



Şekil 2.3 Türkiye'de birincil enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki oranları [7]

2.2.1 Yenilenemeyen Enerji Kaynakları

Doğadaki oluşum süreçleri ve yeniden oluşumları uzun zaman alan, bu nedenden dolayı kapasiteleri sınırlı olan ve zamanla tükenmekte olan enerji kaynakları

yenilenemeyen enerji kaynakları olarak tanımlanmaktadır. Oluşumları uzun süreçlerde meydana gelmesine rağmen, tükenme hızları çok daha kısa olan bu enerji kaynakları; kömür, petrol türevleri ve doğalgaz gibi fosil yakıtlar ve nükleer enerji şeklinde gruplandırılabilir.

Günümüzde gelişmekte olan ülkelerde enerji kaynakları açısından kömür rezevlerine yatırım sağlanırken, gelişmiş ülkelerde ise fosil yakıtlardan olan doğalgaz kaynaklarının, kömür ve petrolün yerini aldığı bilinmektedir. Ayrıca mevcut petrol kaynaklarının çoğunun tüketilmiş olması ve petrol piyasasının politik karmaşalardan etkilenmesi sebebi ile petrol ithal eden ülkelerde ciddi sorunlar oluşmaktadır. Aynı zamanda sera gazı etkisi gibi çevresel faktörlerin etkisiylede fosil yakıtların sürdürülebilirlikleri mümküm olmamaktadır. Bu ve benzeri sebeplerden dolayı geleçekte fosil yakıtların yerini yenilenebilen enerji kaynaklarının ve nükleer enerjinin alması beklenmektedir.

Türkiye'nin jeolojik yapısı nedeni ile fosil kaynakların enerji potansiyelleri, Ortadoğu ve Kafkas ülkeleri ile karşılaştırıldığında çok geniş olmadığı görülmektedir. Buna rağmen Türkiye'de linyit rezevleri ülke ihtiyacını karşılayabilecek düzeydedir. Türkiye'nin mevcut fosil enerji kaynakları Tablo 2.1'de gösterilmiştir [2, 8].

Tablo 2.1 Türkiye fosil enerji kaynakları [8]

Kaynaklar (Milyon Ton)	Görünür	Muhtemel	Mümkün	Toplam
Taş Kömürü	526	425	368,4	1319,4
Linyit	13442	451	7	13900
Petrol	43,13	-	-	43,13
Doğalgaz (milyar m^3)	7	-	-	7
Asfalit	45	29,5	8	82,5
Bitüm	817	555	269	1641

2.2.1.1 Kömür Enerjisi

Kömür; bataklıklardaki lignoselülozik bitkilerin yapısında zaman içerisinde meydana gelen fiziksel ve biyokimyasal değişimler ile oluşan, ana bileşimi %55-

%95 aralığında karbon olmakla beraber, bünyesinde düşük oranda hidrojen, kükürt, azot, oksijen gibi elementleri ve inorganik maddeleri de bulunduran heterojen yapıda, yanabilir tortul kayaçtır. Bataklık ve nehirlerde bulunan bitkiler ayrışma sonucu bakterilerin yardımı ile turbaya dönüşür. Oluşan turba katmanları yerkabuğu hareketleri ile daha iç kısımlara ilerleyerek, biyokimyasal tepkimeler yardımı değişik bileşimlerde kömür ve linyite dönüşürler. Her kömür çeşitinin yapısı ve içeriği, yapısında bulundurduğu inorganik ve organik maddelere bağlı değişmekle beraber, temelde maseraller, su ve minarellerden oluşmaktadır. Kömürleşme reaksiyonu sonucu kimyasal, biyokimyasal ve fiziksel dönüşümler ile bitki kalıntılarının yapısında bulunan hidrojen ve oksijen elementleri uzaklaştırılarak, karbon yüzdesi yüksek hidrokarbon oluşumu sağlanır. Bu dönüşüm sırasında oluşan metan gazı ise doğal gaz kaynaklarına katkı sağlar. Kömür oluşumu sırasındaki ısı ve basınç koşullarının kömür kalitesi üzerinde doğrudan etkisi bulunmaktadır. Düşük kaliteli linyit kömürü, düşük basınç ve ısı etkisi ile oluşurken, bitümlü kömürler daha yüksek basınç ve sıcaklık koşullarında meydana gelmektedir. Yüksek kaliteli antrasitler ise çok yüksek basınç ve sıcaklık koşullarında oluşmaktadır. Uluslararası sektörde kömür için tanımlanan sınıflandırma ve özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir [9].

Kömür, çok esli zamanlardan beri fosil bazlı enerji kaynağı olarak kullanılmıştır. 1960'lı yılların başında kömür enerji kaynağı olarak önemini korurken, 60'lı yılların sonunda petrol kullanımı önem kazanmış fakat termik santrallerdeki öneminden dolayı kömürün tekrar Dünya piyasasında kullanımı artmıştır.

Dünya genelinde kömür rezerv kapasitesi çok gözükmekle beraber 122 yıl içerisinde rezervlerin tükenebileceği ön görülmektedir. Birçok ülke kömür rezervleri açısından zengin olmasına rağmen rezervlerin %69'luk bir kısmı dört ülke arasında paylaşılmaktadır. Rezervlerin % 28.9'luk bir payı 238 milyar ton ile Amerika'da bulunurken, Rusya 157 milyar ton civarındaki kapasitesi ile %19'luk bir payı içermektedir. Bu iki ülkeyi %13.9'lık pay ve 114 milyar ton kapasite ile Çin ve % 7.1'lik yüzde ve 58 milyar ton ile Hindistan izlemektedir.

İstatistiksel bilgilere göre dünyadaki kömür kaynakları 861 milyar tonken, Türkiye'nin sahip olduğu kömür kaynaklarının kapasitesi ise 15,2 milyar tondur.

Bu kapasitenin %91'ini linyit kömürü oluştururken %9'luk kısmını ise maden kömürü oluşturmaktadır. Düşük kalorifik değere sahip olan linyit kömürü, yapısında yüksek oranda nem ve kül bulundurduğu için düşük kömür sınıflandırmasında bulunmaktadır.

Tablo 2.2 Kömür sınıflarına göre özellikleri [9]

Taşkömürü		**Kahverengi Kömürler (Brown Coal)**	
Bitümlü	**Antrasit**	**Linyit**	**Alt Bitümlü**
Koyu siyah	Parlak Siyah	Kahverengi	Siyah
Blok şeklinde kırılma	Merceksi kırılma	Kırılgan, çabuk toz halinde ufalanma	Oksidasyonla veya kurutma sonucunda ince parçalar ve toz halinde ufalanma
Batlı ve kompakt	Sert ve dayanıklı	Masif, odunsu veya üniform kilsi doku	Masif
*5390-7700 kcal/kg	*7000 kcal/kg'ın üstünde	*4610 kcal/kg'ın altında	*4610-6390 kcal/kg
Uçucu madde miktarı ve nem içeriği düşük	Uçucu madde miktarı ve nem içeriği düşük	Uçucu madde miktarı ve nem içeriği yüksek	Uçucu madde ve nem içerikleri bitümlü kömürden daha yüksek
Sabit karbon içeriği yüksek	Sabit karbon içeriği yüksek	Düşük karbon içeriği	Sabit karbon içeriği bitümlü kömürden düşük
Koklaşabilir	Koklaşmaz	4165 kcal/kg altında ısıl değerde olup topaklaşma özelliği göstermez	4165-5700 kcal/kg arasında kalorifik değerde olup topaklaşma özelliği göstermez

Bu özelliklerine rağmen elde edilebilirliği yüksek olduğu için yoğun bir şekilde kullanılan enerji kaynağıdır. Türkiye'de maden kömürü açısından en zengin havza Zonguldak'ta bulunmaktadır. Türkiye'de çıkartılan linyit kömürlerinin %56'lık bir oranı kilogram başına 1000-1500 kcal ısıl değeri ile düşük bir enerjiye sahiptir. Bu nedenle düşük ısıl değere sahip olan linyit kömürleri termik santrallerde yakıt ihtiyacını karşılarken, kilogram başına 1000-5000 kcal yüksek ısıldeğere sahip olan linyit kömürleri ise sanayi sektöründe kullanılmaktadır. Türkiye'de ki linyit kaynaklarının büyük bir kısmı %46'lık bir oranla Afşin-Elbistan havzasında yer almaktadır [8, 9, 10, 11]

2.2.1.2 Petrol Enerjisi

Petrol, yunan dilinde "oleum" yani yağ kelimesi ile "petra" yani taş kelimelerinden gelmektedir. Petrol oluşumu, milyonlarca yıllık bir zaman içerisinde bitki, hayvan vb. organic atıkların bakteriler ile basınç, ortam sıcaklığı gibi dış koşullarda fizikokimyasal prosesler yardımı ile çürüyerek yer katmanlarının altında kalması

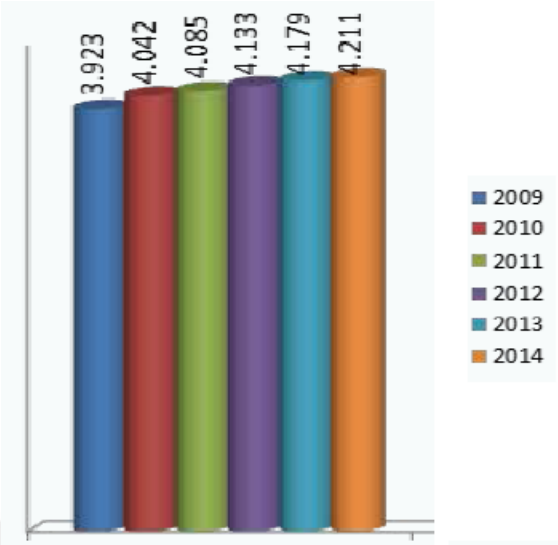
sonucu gerçekleşir. Bu nedenden dolayı petrol rezervlerinin büyük bir çoğunluğu Türkiye'de fay hatları üzerinde yer almaktadır.

Petrol kimyasal olarak %80-85 C, %10-15 H, %3-10 aralığında da O, S, N elementlerinden oluşan yanıcı ve viskoz bir sıvıdır. Yapısındaki S yüzdesine bağlı olarak ise petrol, ağır ve hafif olarak adlandırılmaktadır. Buna göre %1'den daha az sülfür bulunduran "tatlı petrol", % 1'den daha fazla bulunduran ise "ekşi" olarak sınıflandırılmaktadır. Petrol kalitesini etkileyen en önemli özelliklerden bazılarıda gravitesi yani akışkanlık derecesi ve viskozitesi yani yapışkanlık derecesidir. Suya göre düşük özgül ağırlığa sahip olan petrolün gravitesi 0.7-0.9 aralığındadır. En hafif petrol 0.650 gr/cm^3 özgül ağırlık ile Rus petrolüyken, en ağır petrol ise 1.080 gr/cm^3 özgül ağırlığa sahip Meksika petrolüdür. Günümüzde petrol için özgül ağırlık ile ters orantılı olan "A.P.I. Gravite derecesi" terimi kullanılmaktadır. Gravite arttıkça petrol kaliteside artmaktadır. Gravitesi az yani hafif petrolün borular ile taşınması daha kolay olmakta ve rafinaj işlemleri sonrasında fazla asfalt açığa çıkarmamaktadır [12, 13].

Dünyada artan enerji ihtiyacına parallel olarak, petrole olan ilgide sürekli artış göstermektedir. Buna bağlı olarakda yeni teknolojiler yardımı ile rezerv arayışları hızlı bir ivme kazanmaktadır. Dünya genelindeki rezervler içerisinde 264,3 milyar varillik rezerv ile Suudi Arabistan %21,9'lik en yüksek paya sahiptir. Ayrıca en yüksek rezerv oranlarına sahip 20 ülkeden 7 tanesi Kuzey Afrika coğrafyasında bulunmaktadır. Bu ülkeler arasında bulunan Kanada 200 yıllık rezerv içeriği ile en az rezervlerini tüketmiş ülke durumundadır. Dünya genelinde ise mevcut petrol rezevleri, üretim seviyesini 42 sene daha sürdürebilecek durumdadır [14].

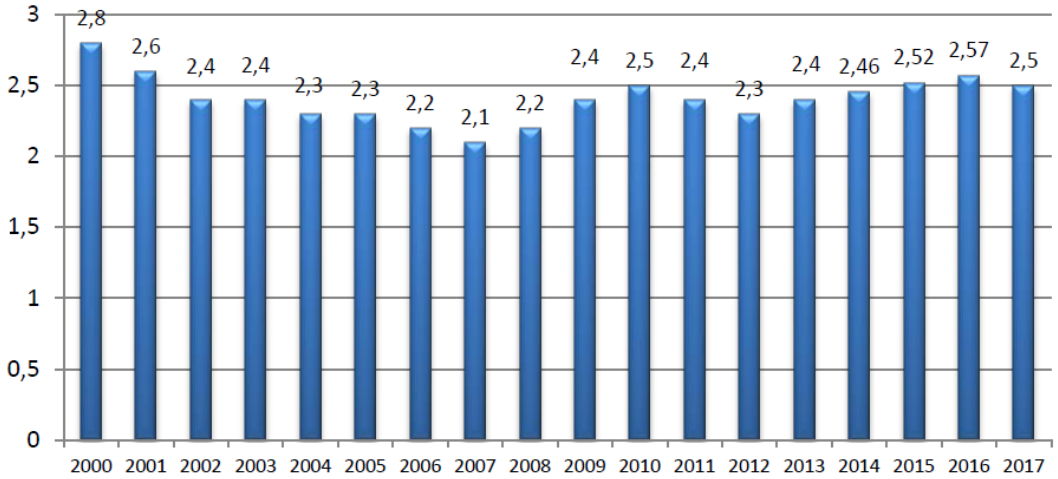
2014 yılı istatistiksel verilere göre petrol rezervleri 1700 milyar varildir. Bu rezervlerin çoğu yaklaşık olarak %48'lik oranla Orta Doğu bölgesinde ve %20'lik oranlada Amerikanın güney kesiminde yer almaktadır. Tüketim ivmesi aynı şekilde devam ederse petrol için 52 senelik rezerv kaldığı düşünülmektedir [15]. 2009-2014 arası petrolün enerji kaynağı olarak dünya genelindeki tüketimi Şekil 2.4'de verilmiştir.

Türkiye'de ise 2009 ekonomik kriz sonrasıbir önceki seneye göre petrol harcanmasında %17'lik düşüş olmuştur. 2000 senesi enerji tüketiminde petrol %40,6'lık paya sahipken, 2015 içerisinde petrol ün payı %30'a gerilemiştir.



Şekil 2.4 2009-2014 yılları dünya petrol tüketimi [15]

Günlük bazda 2016 yılı petrol tüketimi 854 milyon varildir. ETKB istatistiklerine göre 2023 için enerji ihtiyacı toplamının 2011 yılına kıyasla %90 oranında artması ve petrol tüketiminin, enerji tüketimindeki oranınında %26 civarında olması öngörülmektedir. 2000–2017 arası Türkiye genelinde üretilen ham petrol verileri Şekil 2.5'de verilmiştir.



Şekil 2.5 2000-2017 Türkiye petrol üretim verileri (Milyon Ton) [16]

2.2.1.3 Doğal Gaz Enerisi

Doğal gaz enerjisi, hayvansal ve bitkisel organik atıkların yerkürenin iç kısımlarında sıcaklık ve basınç koşullarında kimyasal dönüşümü sonucu oluşmuş, hiçbir proses ile işlenmesine gerek olmadan direkt olarak kullanılabilen fosil yakıtlardandır. Kokusu rengi olmayan yanıcı özellikte, zehirsiz ve hafif bir gazdır. Normal koşullar halinde doğada gaz halinde bulunmaktadır. Doğal gazın bileşimi %70-90 arasında metan gazından oluşurken, yapısında ağır hidrokarbonlardan olan propan ve etan gazlarınıda az bir miktar bulundurmaktadır. Ayrıca karbondioksit, azot, oksijen, su ve kükürt içerikli safsızlıklarıda yapısında bulundurabilmektedir. Avrupa'da 1670 yılında ilk kez kömür damıtma prosesi ile üretilmiştir [9, 12, 13].

Doğal gaz, diğer fosil kaynaklı enerji sistemlerine kıyasla yüksek verimde ve ucuz olması, gaz fazında bulunmasından dolayı kolay kontrol edilebilir olması, kullanım ve lojistiğinin rahat olması, sera gazı etkisinin az olması ve bu yüzden çevreye verdiği negatif etkisinin daha düşük olmasından dolayı gittikçe yaygınlaşan bir enerji kaynağı durumunu almıştır [17]. Bütün bu özelliklerine karşı doğal gazın büyük ölçüde depolanması sorun yaratmaktadır. Bu yüzden boru hatları lojistiği ile kullanım yerlerine taşınmalıdır. Dünya geneline ise sıvılaştırılmış doğal gaz formunda ulaştırılabilmesi mümkündür. Doğal gaz sıvılaştırılarak hacminin 600 katı kadar azaltılabilmekte ve bu şekilde daha fazla miktarda enerjinin depolanmasına olanak sağlanabilmektedir. Fakat bu proses maliyeti artırmaktadır [12]. İstatiksel verilere göre Dünya'da doğal gaz kaynakları 2015 yılında 186,9 trilyon m^3 olarak belirtilmiştir. Bu kaynakların önemli bir kısmı Katar ve İran' da bulunmak üzere yaklaşık %42'lik bir pay ile Orta Doğu çoğrafyasında yer almaktadır. Avrupa ise kaynakların yaklaşık %30'luk kısmı ile 2. sıradadır. Dünya'da ki doğal gaz tüketimine bakıldığında ise %28'lik payın Kuzey Amerika olduğu, yaklaşık %28'le Avrupanın ve yaklaşık %17'lik oranla da OrtaDoğu'nun izlediği görülmektedir. Dünya'daki doğal gaz kaynaklarının bölgesel dağılımı Tablo 2.3'de verilmiştir [18].

Tablo 2.3 Dünya doğal gaz kaynaklarının bölgesel dağılımı [18]

Bölge	Miktar (Trilyon m^3)	Dünya Toplamındaki Payı (%)
Orta Doğu	80,0	42,8
Avrupa ve Avrasya	56,8	30,4
Asya Pasifik	15,6	8,4
Afrika	14,1	7,5
Kuzey Amerika	12,8	6,8
Güney ve Orta Amerika	7,6	4,1
Dünya Toplamı	186,9	100,0

Dünya genelinde ki doğal gaz kaynaklarının ülkelere göre yüzdelik oranları ise Tablo 2.4'de gösterilmiştir.

Tablo 2.4 Dünya doğal gaz kaynaklarının ülke bazında dağılımları [18]

Ülke	Miktar (Trilyon m^3)	Dünya Toplamındaki Payı (%)
İran	34,0	18,2
Rusya	32,3	17,3
Katar	24,5	13,1
Türkmenistan	17,5	9,4
ABD	10,4	5,6
Suudi Arabistan	8,3	4,5
Birleşik Arap Emirlikleri	6,1	3,3
Venezuela	5,6	3,0
Nijerya	5,1	2,7
Cezayir	4,5	2,4
Çin	3,8	2,1
Irak	3,7	2,0
Dünya Toplamı	186,9	100

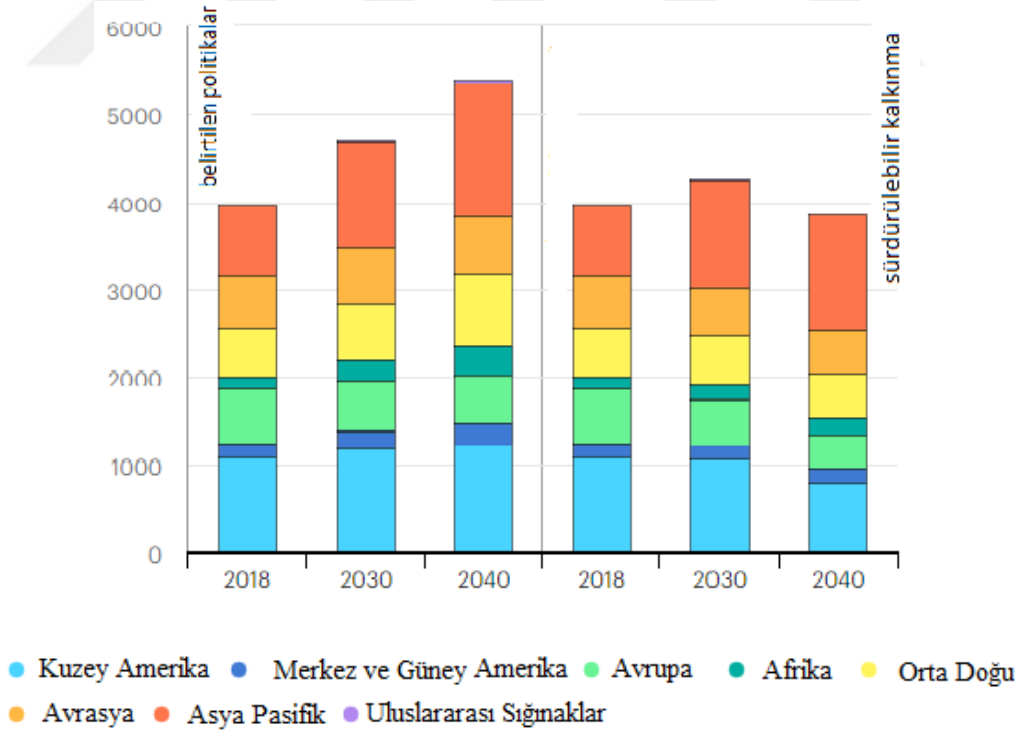
Doğal gaz kaynaklarının Dünya genelinde kıtalara göre 2015 yılı tüketim oranları Tablo 2.5'de verilmiştir.

Tablo 2.5 Doğal gaz 2015 tüketim oranları [18]

Bölge	Miktar (Milyar m^3)	Dünya Toplamındaki Payı (%)
Avrupa ve Avrasya	1.003,5	28,8
Kuzey Amerika	963,6	28,1
Asya Pasifik	701,1	20,1
Ortadoğu	490,2	14,1
Güney ve Orta Amerika	174,8	5,0
Afrika	135,5	3,9
Dünya Toplamı	3.468,6	100,0

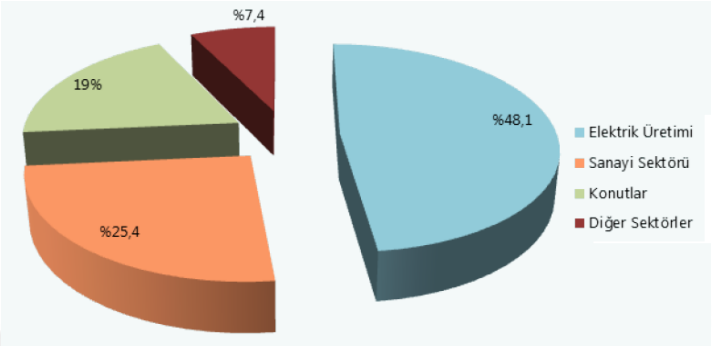
Doğal gaz 2018 yılında %4,6'lık bir yükselişle Dünya küresel enerji ihtiyacındaki artışın yarısına yakınını karşılamıştır. 2010 yılından günümüze kadar doğal gaz kullanımının büyük bir bölümü Amerika, Çin ve Orta Doğu ülkeleri olarak üç ana bölgede yoğunlaşmıştır. Doğal gaz ile ilgili politikalar çerçevesinde gaz talebinin üçte bir oranında artacağı öngörülerek, 2030 yılına kadar doğal gaz talebinin petrol ve kömüre oranla artacağı düşünülmektedir.

Uluslararası enerji ajansı verilerine göre 2018-2040 yılları arası Dünya üzerindeki bölgelerde doğal gaz talebi Şekil 2.6'da verilmiştir [17].



Şekil 2.6 2018-2040 bölgesel gaz talebi [17]

Türkiye'de ise doğal gaz 2008'de yenilenemeyen enerji kaynakları tüketiminde ilk defa ilk sırayı alırken, 2009 yılında küresel etkilerden dolayı tüketiminde biraz gerilemeye uğramıştır. Türkiye'de doğal gazın söktörel bazda kullnımının en yüksek olduğu şehirleşmeden dolayı elektrik sektörüdür. 2014 yılı sektörlere göre doğal gaz tüketim oranları Şekil 2.7'de verilmiştir [15].



Şekil 2.7 2014 yılı sektör bazında doğal gaz tüketim oranları [15]

Bugünde doğal gaz kaynakları küresel birincil enerji talebinin %23'ünü ve elektrik üretiminin ise yaklaşık dörtte birini oluşturmaktadır.

2.2.1.4 Nükleer Enerji

Füzyon ve fisyon reaksiyonları ile atom çekirdeğinin parçalanması ile açığa çıkan yüksek enerji "nükleer veya çekirdek enerjisi" şeklinde adlandırılmaktadır. Bu çekirdek reaksiyonları sonucu elde edilen yüksek ısı enerjisi, nükleer reaktörlerde farklı prosesler yardımıyla kinetik enerji formuna ve sonrasında da jenaratörlerle elektrik enerjisi üretiminde kullanılırlar. Fisyon tepkimeleri yardımı ile nötronlarla ağır atom çekirdeklerinin parçalanması sonucu nükleer enerji ve bir kaç adet de nötron elde edilmektedir. Daha sonrasında uygun prosesler yardımı ile bu nötronlarda tepkimeye sokularak fisyon reaksiyonlarının devamlılığı sağlanabilmektedir. Bunun yanı sıra nükleer enerji eldesinde yararlanılabilen diğer bir reaksiyonda füzyon tepkimesidir. Bu tepkime ise hafif atom çekirdeklerinin biraraya gelmesi ile gerçekleşmektedir. Bu reaksiyonda yüksek sıcaklık yardımı ile yüksek enerji seviyelerine çıkan çekirdeklerin birbirleriyle çarpışmaları sonucu nükleer enerji elde edilebilmektedir. Fisyon tepkimesi sonucu nükleer enerji, reaktörler yardımı ile nükleer yakıt ve çeşitli prosesler ile ısı enerjisine dönüştürülürler. Daha sonra elde edilen ısı enerji soğutuculardan geçirilerek

türbinler vasıtası ile kinetik enerji formuna dönüştürülür ve jenaratörler yardımı ile de elektrik enerjisi elde edilir [12, 14].

Nükleer enerji üretiminde yararlanılan elementler toryum ve uranyumdur. Atom ağırlığı 238,0289 g/mol olan Uranyum normal şartlar altında katı fazda bulunan gri renkli metaldir. İlk kez 1789 yılında bulunmuştur. Bir kilogram uranyum elementinden üretilen nükleer enerji yaklaşık oniki ton kömür enerjisine karşılık gelmektedir. Diğer bir radyoaktif madde olan toryum ise 232,0381 g/mol atom ağırlığına sahip, doğada çok miktarda bulunan, normal koşullar altında katı fazda olan gümüş renkli bir elementtir. İlk kez 1828 yılında bulunmuştur. Toryum teryüzünde serbest halde değil altmışaltı mineralin içerisinde bulunmaktadır. Bu minerallerden olan Thorite ve Monazit mineralleri üretimde kullanılmaktadır [14]. Toryum, günümüzde nükleer enerji üretiminde uranyum kadar kullanılmamaktadır. Fakat son zamanlarda uranyum elementine kıyasla tehlikesi daha az olduğu için Japonya, Kanada ve Hindistan gibi ülkelerde, bu elementin nükleer enerji üretimindeki kullnımına yönelik çalışmalar hız kazanmıştır.

Türkiye'de yaklaşık olarak 10 bin 500-ton uranyum elementi (düşük kalite) bulunmaktadır. Özellikle Aydın, Yozgat, Uşak ve Salihli civarlarında ekonomik değere sahip uranium kaynakları bulunmuştur. Tüm uranium kaynaklarının ise 120.000-ton civarında olduğu düşünülmektedir. Türkiye'de ki toryum rezervleri ise 380 bin ton civarındadır ve Türkiye %41'lik pay ile toryum kaynakları bakımından Dünya'da ki en zengin ülke konumundadır. Dünya ve Türkiye'de ki toryum rezevlerinin miktarları Tablo 2.6'da verilmiştir [19].

Tablo 2.6 Dünya ve Türkiye'de ki toryum rezevlerinin miktarları [19]

Ülke	Toryum Rezervi (Ton)	Toplam Rezerve Oranı (%)
Hindistan	846.000	16
Türkiye	744.000	14
Brezilya	606.000	11
Avusturalya	521.000	10
ABD	434.000	8
Mısır	380.000	7
Norveç	320.000	6
Venezuela	300.000	6
Diğer Ülkeler	1.234.000	22
Dünya Toplam	5.385.000	100

2017 yılında yayınlanan Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı verilerine göre otuzbir ülkede faal halde bulunan dörtyüzkırkdokuz nükleer reaktör yer almaktadır. Dünya çapında nükleer enerjinin elektrik üretimindeki payı % 11'dir. 2015 yılında en fazla miktarda nükleer santralin bulunduğu Amerika, yaklaşık %20'lik pay ile elektrik enerjisi üretimini nükleer enerjiden sağlamıştır. Bunu %18,6'lık pay ile Rusya, %31,7'lik pay ile Güney Kore ve %76,3'lük pay ile Fransa takip etmektedir. Türkiye'nin Dünya'da ki enerji üretimindeki yeri ise Tablo 2.7'de verilmiştir [18, 19].

Tablo 2.7 Türkiye'nin Dünya enerji üretimindeki yeri [19]

Katagori	**Türkiye'nin Konumu**	**Birinci Ülke**	**Nükleer Santral Adedi**	**Dünya Toplamındaki Payı (%) (2010)**	**Birinci Ülkenin Dünya Toplamındaki Payı (%) (2010)**
Dünya Birincil Enerji Tüketimi	21	Çin	17	0,9	20,3
Elektrik Üretimi	20	ABD	100	1,0	20,3
Doğalgaz Tüketimi	24	ABD	100	1,2	21,7
Doğalgaz İthalatı	8	ABD	100		
Ülkelerin Rusya'dan Doğalgaz İthalatı	4	Almanya	9		
Hidroelektrik Enerji Tüketimi	12	Çin	17		
Kömür Üretimi	11	Çin	17	0,5	48,3
Kömür Tüketimi	15	Çin	17	1,0	48,2
Dünya Jeotermal Enerji Kapasitesi	14	ABD	100	0,7	28,4
Dünya Güneş Enerjisi Kapasitesi	29	Almanya	9		43,5
Dünya Rüzgar Enerjisi Kapasitesi	16	Çin	17	0,8	22,4

Günümüzde oluşan çevresel sorunlar ucuz, kolay erişilebilir ve sürdürülebilirliği olan enerji kaynaklarına yönelime neden olmuştur. Nükleer enerjide, temiz enerji olması, hava şartlarından çok etkilenmemesi, maliyet fiyatlandırılmasında diğer enerjilere oranla daha düşük maliyette olması, santrallerin sera gazı emisyonuna neden olmaması ve dolayısıyla küresel ısınmayı azaltmada pozitif etkisinin olması gibi avantajlarından dolayı alternative enerji kaynakları olarak düşünülmektedir [20].

2.2.2 Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Fosil yakıtlara alternatif olacağı düşünülen yenilenebilir yani temiz enerji kaynakları, potansiyeli güneşten gelen, doğa tarafından üretilen, doğada tüketildikçe kendiliğinden yeniden üretilen yani yeniden oluşum hızı, tükenme potansiyelinden hızlı gerçekleşen enerji kaynakları şeklinde tanımlanmaktadır [8, 21]. Bu sürdürülebilir özellikte olan enerji kaynakları, tükenmemeleri, çevreye daha az karbondioksit salınımı vererek çevreci olmaları, işletim maliyetlerinin düşük olması, yerel ve güzenilir olmaları aynı zamanda da ülkelerin dışa bağımlı konumlarını azaltmaları sebebinden dolayı son yıllarda önemlerini artırmışlardır [1, 22].

Güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, hidrotermal enerji, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi, odun enerjisi, dalga enerjisi ve gel-git sonucu elde edilen enerji, hidrojen enerjisi vb. yenilenebilir enerjilere örnek olarak verilebilir [22]. Yenilenebilir enerji kaynaklarını, üretim prosesleri göz önüne alınarak;

- Güneş, okyanuslardaki yüzey ve dip suyu sıcaklık farkı olmasından doğan okyanus ısıl gücü, jeotermel enerji vb. yenilenen ısı sonucu üretilen enerjiler
- Rüzgar enerjisi, su yani hidrolik enerji ve okyanuslarda oluşan gel-git enerjisi gibi yenilenen hareket enerjisi ile üretilen enerjiler
- Biyokütle enerjisi gibi sürdürülebilirliği olan bitkisel maddelerden üretilebilen enerjiler şeklinde gruplandırılabilir [23].

Aynı zamanda yenilenebilir enerjiler, Tablo 2.8'de gösterildiği gibi üretildikleri enerji kaynakları temel alınarak ay, dünya ve güneş temelli enerji sistemleri olarakta sınıflandırılabilirler [4].

Tablo 2.8 Yenilenebilir enerji kaynakları sınıflandırılması [4]

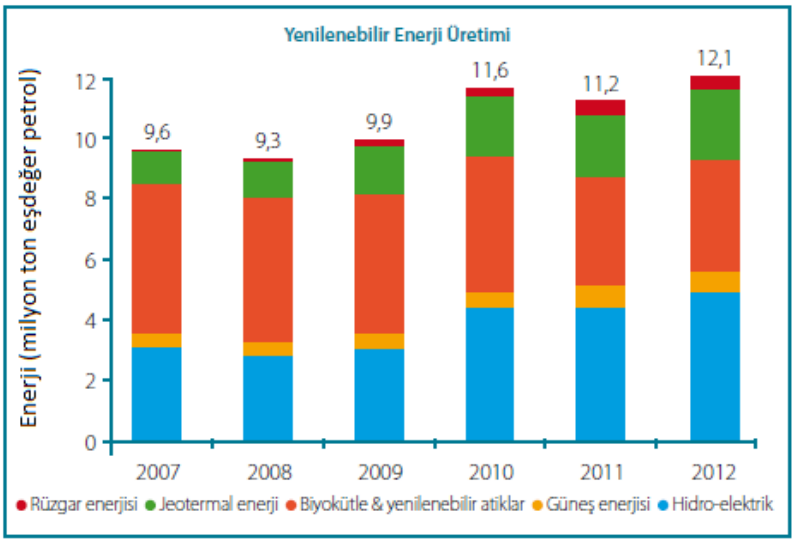
Yenilenebilir enerji kaynakları				
Ana Kaynak	**Birincil Enerji Kaynakları**	**Doğal enerji dönüsümü**	**Teknik enerji dönüsümü**	**Kullanım enerjisi**
GÜNEŞ	Su	Buharlaşma, Yağış	Su güç tesisleri (hidroelektrik santralleri)	Elektrik enerji
	Rüzgar	Atmosferdeki hava hareketi	Rüzgar enerjisi tesisleri	Elektrik ve mekanik enerji
		Dalga Hareketi	Dalga enerjisi tesisleri	Elektrik ve mekanik enerji
	Güneş Işınları	Yer ve atmosferin ısınması	Isı pompaları	Isı enerjisi
		Güneş ışınları	Toplayıcılar	Isı enerjisi
			Solar hücreler (güneş pilleri)	Elektrik enerjisi
	Biyokütle	Biyokütle üretimi	Isı güç tesisleri	Isı ve elektrik
			Dönüşüm tesisleri	Yakıt enerjisi
DÜNYA	Yer merkezi ısısı	Jeotermal enerji	Jeotermal güç tesisleri	Isı ve elektrik enerjisi
AY	Ay çekimi gücü	Gel-git olayı	Gel-git güç santralleri	Elektrik enerjisi

Türkiye'de dört mevsim yaşanabilmesi ve doğal kaynakların zenginliğinden dolayı rüzgar, biyokütle, güneş vb. yenilenebilir enerji kaynaklarının kapasiteleri yüksektir. Enerji Bakanlığı'na ait Türkiye'de ki yenilenebilir enerji kaynaklarına ait istatiksel veriler Tablo 2.9'da verilmiştir [8].

Tablo 2.9 Türkiye'de ki mevcut yenilenebilir enerji kaynakları verileri [8]

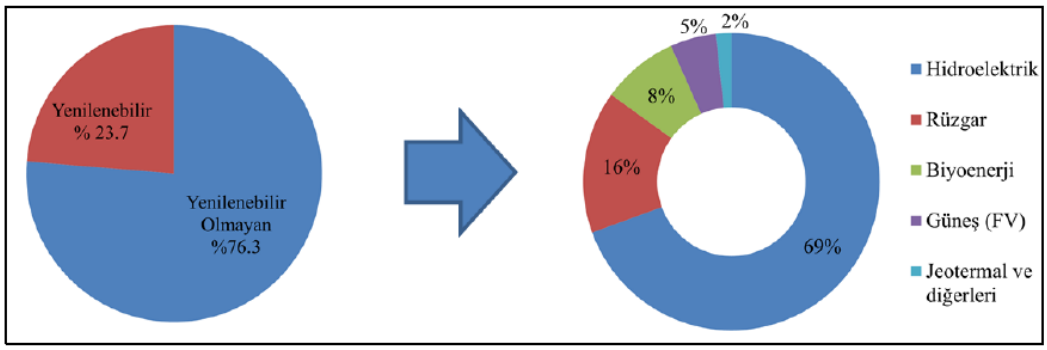
Kaynaklar	**Görünür**	**Muhtemel**	**Mümkün**
Güneş (milyar	380	-	380
Rüzgar (Deniz MW)	10463	-	10463
Rüzgar (Kara MW)	37389	-	37389
Jeotermal (Elektrik	640	-	532
Jeotermal (Isı MW)	31500	-	28152
Biyokütle (Mtep)	32	-	32
Hidrolik (milyar kWh)	433	216	140

Türkiye'de ki mevcut yenilenebilir enerji kaynakları kapasitesi göz önüne alınarak, 2023 yılı için bu kaynakların elektik üretiminde %30'luk ve ulaştırma sektöründe de %10'luk pay alacağı öngörülmektedir. 2012 yılı için Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilen enerji oranları Şekil 2.8'de verilmiştir [24].



Şekil 2.8 Tükiye'de üretilen yenilenebilir enerji miktarları [24]

Isı enerjisi ve kinetik enerji üretiminde en çok fosil bazlı yakıtlar kullanılırken, elektrik enerjisi eldesinde ise yenilenebilir enerji kaynaklarının kullnımı daha fazladır. Bu sebepden Dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretiminde kullanım oranları, kaynakların enerji tüketimindeki payından %4,5 civarında daha yüksektir. Enerji ihtiyaçlarındaki artış gelişmekte olan ülkelerde, gelişmiş ülkelere kıyasla daha fazladır. Fakat mevcut teknolojiler ile yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretim maliyeti fosil yakıtlara kıyasla yüksek olduğu ve fosil rezervlerin ulaşılabilirliği daha mümkün olduğu için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı henüz istenilen düzeyde değildir. Dünya üzerinde yenilenebilir kaynakların elektrik enerjisi üretimindeki kullanım payları Şekil 2.9'da verilmiştir [7].



Şekil 2.9 Yenilenebilir kaynakların Dünya'da elektrik enerjisi üretimindeki payları [7]

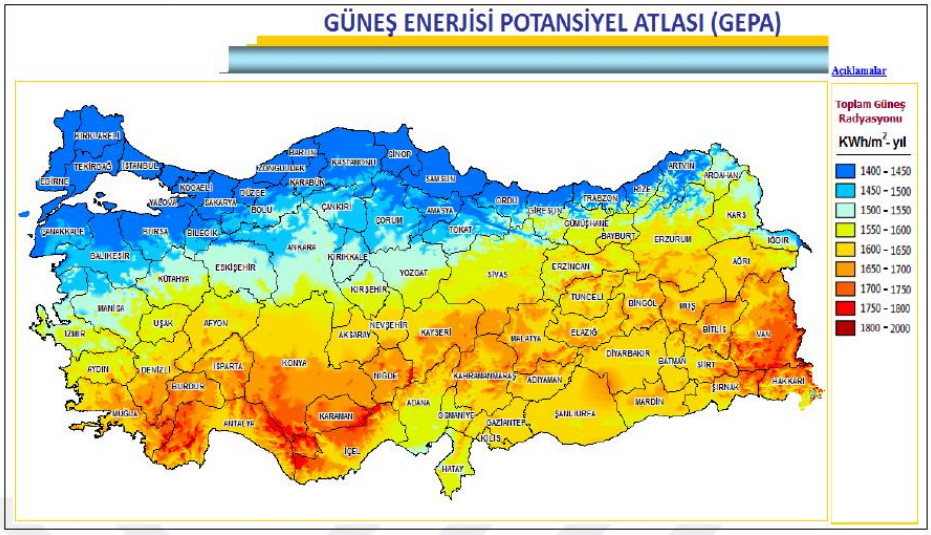
2.2.2.1 Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, güneş içerisinde gerçekleşen doğal füzyon reaksiyonları ile saniyeler içersinde hidrojenin helyuma dönüştürüldüğü ve meydana gelen kütle farkının ısı enerjisi şeklinde radyasyon şeklinde yayıldığı güçlü bir enerjidir. Nükleer enerji hariç yeryüzündeki bütün enerjilerin doğrudan veya dolaylı yönde ana kaynağı durumundadır. Güneşin beş milyar yıldan daha çok ömrünün olduğu bilindiği için, sonsuz enerji kaynağı olarak düşünülmektedir. Güneş enerjisinin radyosyon yoluyla Dünya yüzeyine ulaşabilen kısmı 1.8×10^{11} MW' dır [1, 21]. Çok yüksek güce sahip güneş enerjisinin bir yılda Yerküreye ulaşan miktarı, mevcut fosil rezervlerinden 160 kat daha fazladır. Ayrıca güneş enerjisinden, hidroelektrik ve nükleer santrallarden bir yıl içerisinde üretilebilen elektrik enerjisinin 15 bin katı enerji sağlanabilmektedir [7].

En temiz ve çevresel enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisi farklı prosesler yardımı ile termal enerjiye çevrilerek endüstride ve konutlarda sıcak su veya soğutma suyu ihtiyacında, ısıtma sistemlerinde, seraların ısıtılmasında ve gıda kurutma proseslerinde kullanılabilmektedir. Ayrıca güneş enerjisinden %15 kapasite ile çalışan fotovoltaik hücreler yani güneş pilleri ile elektrik enerjisi üretimide yapılabilmektedir. Bu hücreler, hesap makinelerinden büyük sanayi uygulamalarına kadar çok geniş bir alanda kullanılabilmektedirler [4, 21, 23].

Türkiye coğrafik konumu açısından güneş enerjisinden en iyi şekilde yararlanabilen ülkelerden biridir. Türkiye'nin yıllık olarak güneş alma süresi 2737 saat, metre kare başına düşen güneş enerjisi miktarı ise 1527 kWh'dir. 2016 yılı

verilerine göre ülkemizde güneş enerjisi santrallerinin gücü 832.5 Mw'tır. Ülkemizde aylar bazında güneşlenme süresi en uzun olan ay temmuz iken aralık ayında ise en düşük seviyededir. 2010 yılında yapılan bir çalışma ile ülkemizin güneşlenme kapasitesine göre çıkartılan haritası Şekil 2.10'da verilmiştir [7, 8].



Şekil 2.10 Türkiye güneşlenme potansiyeli [7]

Türkiye'de güneş enerjisi 56 bin MW kapasite ile 380 milyar kWh elektrik enerjisine dönüştürülebilecek düzeydedir. Güneş enerjisi santrallerimizin mevcut durumu Tablo 2.10'da verilmiştir [8].

Tablo 2.10 Türkiye güneş santralleri kapasitesi [8]

Güneş Santralleri Profili	
Aktif Santral Sayısı	428
Kurulu Güç	792,80 MWe
Kurulu Güce Oranı	% 0,6
Yıllık Elektrik Üretimi	~927 GWh
Üretimin Tüketime Oranı	% 0,32

2.2.2.2 Rüzgar Enerjisi

Rüzgar enerjisi, ısıları ve basınçları farklı hava akımlarının birbirleri ile yer değiştirmesi sonucu kinetik enerjinin rüzgar gülleri veya jenaratörler yardımı ile elektrik enerjisine dönüştürülmesi ile kullanılırlar. Rüzgar enerjisinin, santrallerin

yakıt maliyetleri düşük olması, sürdürülebilir olması ve çevresel etkilerinin olumlu olmasından dolayı avantajları vardır. Fakat santrallerinin kurulumunun büyük alanlara yayılması, mevsimsel koşullardan etkilenmeleri ve gürültü kirliliğine sebep vermelerinden dolayı olumsuz yönlerde içermektedirler [7, 8, 12].

Ülkemizde çalışma potansiyeli 5404 MW olan 164 rüzgar santrali bulunmakta ve yaklaşık 12 milyar kWh elektrik enerjisi elde edilmektedir. Türkiye, rüzgar enerjisi olarak yaklaşık 48 bin'lik bir potansiyele sahiptir. Türkiye rüzgar santralleri verileri Tablo 2.11' de verilmiştir [7, 8].

Tablo 2.11 Türkiye rüzgar santralleri durumu [8]

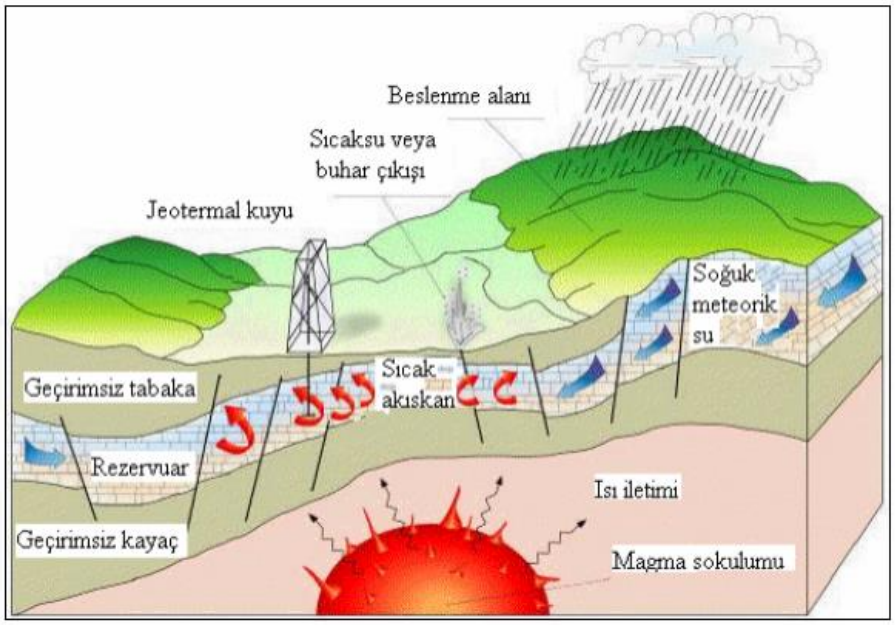
Rüzgar Santralleri Profili	
Aktif Santral Sayısı	164
Kurulu Güç	5404 MWe
Kurulu Güce Oranı	%6,4
Yıllık Elektrik Üretimi	~13926 GWh
Üretimin Tüketime Oranı	%5,16

2.2.2.3 Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji, yerküre alt katmanlarındaki volkanik kaynaklarda bulunan ısının magmatic alışkanlar yardımı ile yeryüzüne taşınması ile elde edilen ısı enerjisidir. Jeotermal kaynaklar genellikle fay hatları üzerinde yoğunlaşmışlardır ve yapılarında erimiş halde çeşitli kimyasallar bulundururlar. Jeotermal enerjinin rüzgar ve güneş enerjisi gibi diğer yenilenebilir kaynaklara göre sürdürülebilir olması, ve mevsimsel değişikliklere bağımlı olmamasından dolayı avantajları bulunmaktadır. Ayrıca geleneksel enerji kaynaklarının neden olduğu küresel ısınma etkisini ve karbon emisyonunuda azaltırlar. Jeotermal enerjinin oluşum aşaması Şekil 2.11'de verilmektedir [25, 26].

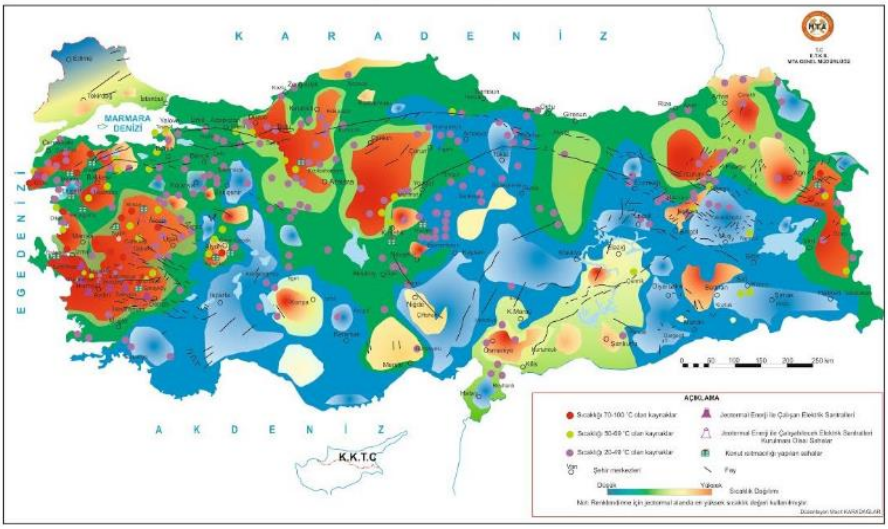
Jeotermal enerjiler bulundukları kaynak sıcaklıklarına göre değişik kullanım alanlarına sahiptirler. 70 °C'ye kadar sıcaklık aralığında bulunan kaynaklar sera ve endüstriyel alanlarda kullanılırken, 150 °C ve üstü sıcaklığa sahip olan kaynaklar

ise özellikle elektrik üretimi için kullanılmaktadırlar. Fakat bu yüksek sıcaklığa sahip kaynakların genellikle volkanik bölgelere yakın olması beklenmektedir [26].



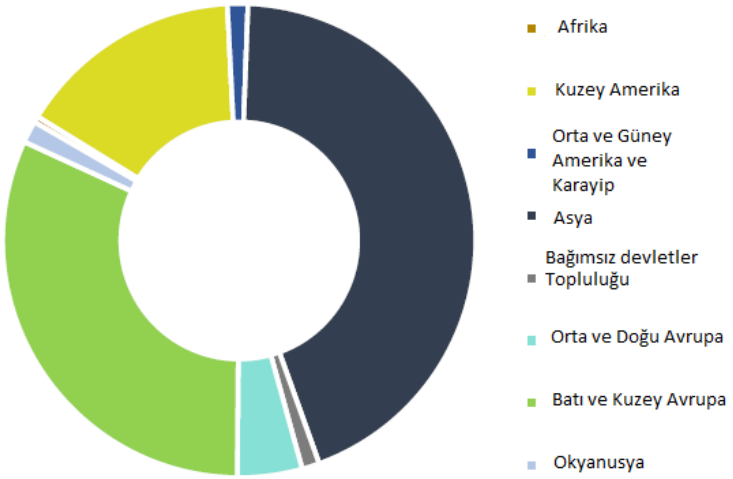
Şekil 2.11 Jeotermal enerjinin oluşum aşaması [25]

Türkiye aktif fay hatları üzerinde bulunduğundan dolayı jeotermal kaynaklar bakımından diğer ülkelere kıyasla zengin durumdadır. Türkiye genelinde farklı sıcaklık derecelerine sahip 1000 farklı kaynak bulunmaktadır. Bu kaynakların %78'lik oranı batı kesimde, %9'luk kısmı İç Anadolu bölgesinde, %7'lik kısmı ise kuzey batı kesimlerinde yeralmaktadır. Konut ısıtma, kaplıcalar, sanayi kullanımları gibi direkt kullanımlar, ülkemizde % 90 oranında bulunan orta seviye sıcaklığa sahip jeotermal kaynaklar ile sağlananırken, %10'luk kısmı ise elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. Türkiye genelindeki jeotermal kaynakların dağılmı Şekil 2.12'de verilmiştir [27].



Şekil 2.12 Türkiye genelindeki jeotermal kaynaklar [27]

Dünya genelindeki bölgelerin, jeotermal enerjinin doğrudan kullanımı ile elektrik enerjisi üretimindeki paylarına bakıldığında %44'luk oranla Asya'nın ilk sırada, %36 ile Avrupa'nın 2. sırada ve %15'lik oranlada Kuzey Amerikanın 3. sırada yer aldığı görülmektedir. Şekil 2.13'te 2017 yılı jeotermal enerjinin direkt kullanımının bölgelerdeki dağılımı verilmiştir [28].



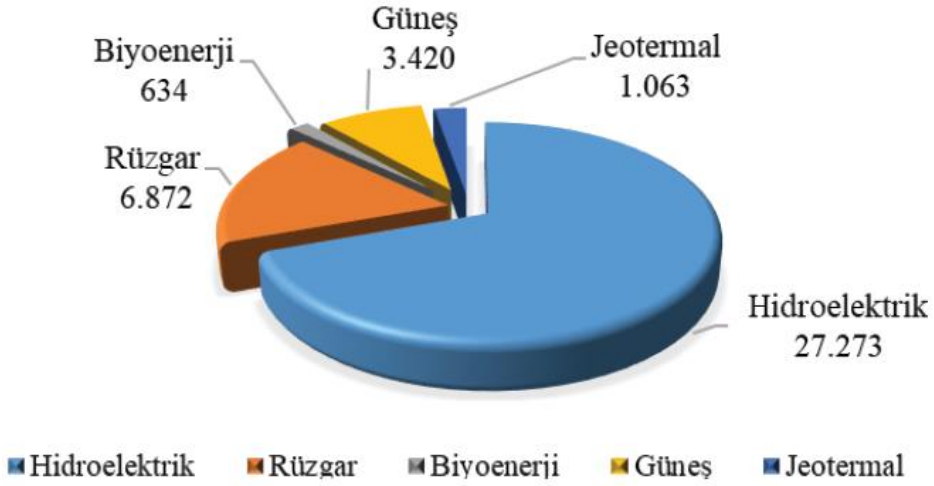
Şekil 2.13 2017 jeotermal enerjinin direkt kullanımının bölgelerdeki dağılımı [28]

Dünyada jeotermal enerji kurulu kapasitesi 2016 verileri 12,7 GW olarak verilmiştir. 2015 yılında jeotermal enerji santralleri ile global elektrik üretiminin yaklaşık olarak % 0,3'lük bir kısmı üretilmiştir. Dünya genelinde Amerika 2,5 GW kurulu jeotermal güç kapasitesi ile ilk sırada yer alırken, Filipinler 1,9 GW ile 2. , Endonezya ise 1,5 GW ile 3. sırada bulunmaktadır [29].

2.2.2.4 Hidrolik Enerji

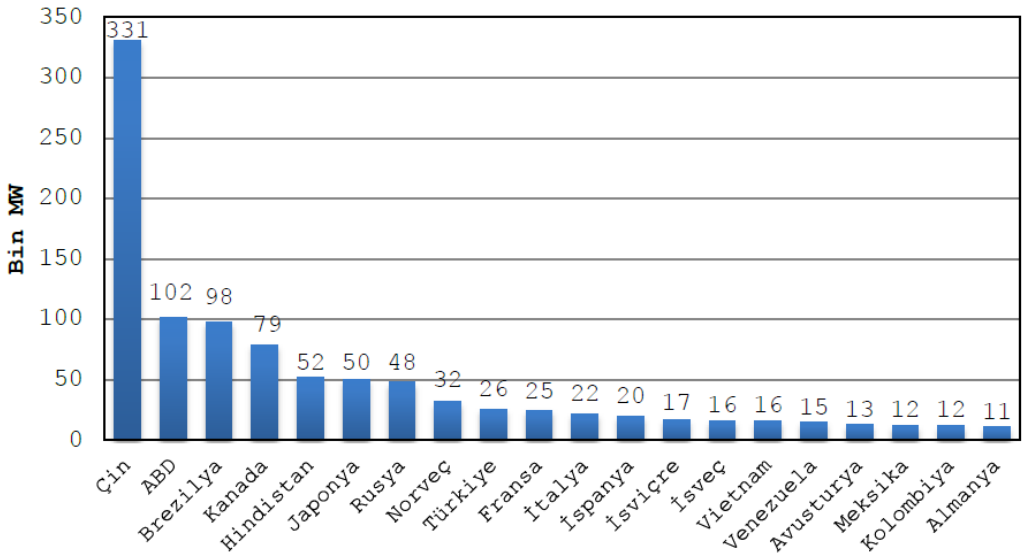
Hidrolik enerji, dağlık alanlar içeren ve yağış potansiyeli yüksek olan coğrafi bölgeler üzerine kurulan barajlar yardımı ile suyun toplanması ve yüksek bir seviyeden akışı sırasında oluşan potansiyel enerjinin hareket enerjisine çevrilmesi ile üretilen enerjidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından en çok yararlanılan hidrolik enerji üretimi için diğer enerji kaynaklarına göre daha uygun maliyette olan hidroelektrik santralleri kurulmakta ve suyun potansiyel enerjisinden kaynaklanan güç kullanılan türbinler yardımı ile kinerik enerjiye daha sonrada mekanik enerjiye çevrilerek kullanılmaktadır [30, 31]. Hidrolik enerji ile elektrik üretimi iki farklı şekilde gerçekleştirilmektedir. İlk üretim şekli barajlarda toplanan suyun yüksekteki borulardan belli bir ivme ile akması sonucu türbinlere uygulanan basınç yardımı ve jeneratörler ile elektrik üretimidir. İkinci tür elektrik üretimi ise akarsuların, nehirlerin üzerine kurulan daha alçak bir setten suyun ivmelendirilmesi ile gerçekleştirilmektedir [32]. Hidrolik enerji, uzun süreli ve yüksek verimle çalışan, çevresel, santral kurulum maliyeti düşük olan, ülkelerin enerji bakımından diğer ülkelere bağımlılığını azaltabilen ve en çok yararlanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Hidro enerjinin üretilmesinde doğrudan bölgelerin çoğrafik durumu etkili olduğu için Türkiye, Malezya, Brezilya gibi ülkelerde bu enerjinin kullanım kapasiteleri oldukça yüksektir [33].

2017 verilerine göre Türkiye'de elektrik üretiminin %32'lik payını yenilenebilen enerjiler karşılamaktadır. Türkiye'de elektrik enerjisi için yararlanılan yenilenebilir enerjiler arasında onuncu sırada bulunan hidro enerjinin kurulu potansiyeli diğer yenilenebilen enerjilere göre yüksektir. Türkiye'nin yenilenebilir kurulu enerji potansiyeli Şekil 2.14'de verilmiştir. 2017 yılı için kurulu hidrolik enerji potansiyeli yaklaşık 27 bin MW olan Türkiye'nin hidro enerji kapasitesi yıllık 160 TWh olarak öngörülmektedir. Ülkemizde kurulu potansiyeli yaklaşık 27 bin olan faal haldeki 596 hidrolik enerji santrali ile yıllık elektrik enerjisi üretimi 93653 GWh'dir. 2011-2017 yılları arasında Türkiye'de hidro enerji kapasitesi yaklaşık olarak %56'lık bir artışta bulunmuştur [31, 34].



Şekil 2.14 2017 Yılı Türkiye'nin yenilenebilir kurulu enerji potansiyeli (MW) [31]

2016 istatiksel bilgilerine göre hidrolik enerji kullanılarak dünya genelinde 4102 TWh elektrik üretimi gerçekleştirilmiştir. Hidro enerji kurulu potansiyeli 2016 yılında 1246000 MW olarak belirtilmiştir. 2016 hidro enerji kapasiteleri Şekil 2.15'de verilmiştir [34].



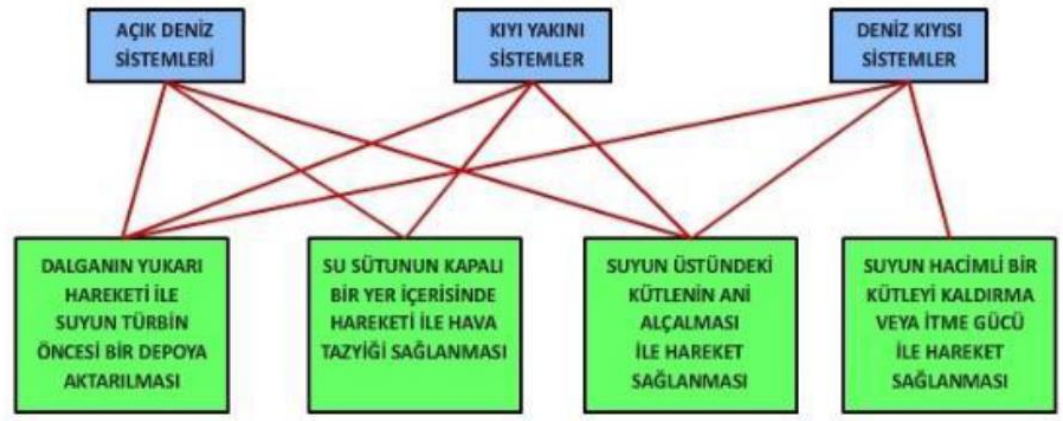
Şekil 2.15 Ülkeler bazında 2016 hidro enerji kapasiteleri [34]

Hidro enerji potansiyeli en yüksek olan ülke bir önceki yıl olduğu gibi 2017 yılında da Çin olmuştur. Bu ülkeyi Amerika ve Brezilya izlemiştir. Türkiye'nin ise yaklaşık 27 bin MW toplam kapasitesinin olduğu belirlenmiştir. 2017 Dünya hidro enerji kurulu kapasitesi ise 1.266,960 MW'tır [31].

2.2.2.5 Dalga Enerjisi

Dalga enerjisi, yerküredeki farklı sıcaklık değişimlerinden dolayı rüzgarın deniz ve okyanus üstünde esmesi sonucu oluşan dalgaların önüne kurulan enerji dönüştürücüler ile üretilen enerjidir. Bu sistemlerle elde edilen mekanik dalga enerjisi, kinetik enerjiye çevrilerek kullanılabilmektedir. Dünyamızın ¾ oranında sularla çevrili olmasından dolayı dalga enerjisi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre çok yüksek bir kapasiteye sahiptir. Dalga enerjisinden yararlanılarak 1 kW elektrik eldesi için 1 m^2 'lik bir alana ihtiyaç vardır. Bu rüzgar veya güneş enerjisinin dönüştürülmesi için ihtiyaç duyulan alana göre oldukça düşüktür. Bunun yanısıra okyanuslardan elde edilebilen dalga enerjisinin sadece yüzde birlik bir kısmı dünya enerji ihtiyacının %20'lik kısmını karşılayabilmektedir [35, 36].

Deniz ve okyanusların üst yüzeylerinde ve altlarında rüzgarın uyguladığı basınç sonucu elde edilen dalganın enerjiye çevrilebilmesi için üç farklı dönüşüm prosesi uygulanmaktadır. Dönüşüm prosesleri Şekil 2.16'da verilmiştir [37].



Şekil 2.16 Dalga enerjisi dönüşüm prosesleri [37]

Kıyı yakını oluşan dalgalar düzensiz oldukları ve düşük potansiyelli oldukları için enerji üretiminde istenilen verime sahip değillerdir. Açık denizlerin kırk metreden daha derin olmaları ve yerçekiminden daha az etkilenmelerinden dolayı deniz yüzeyinde rüzgar daha etkili olmakta ve daha düzenli, yüksek dalgalar görülebilmektedir. Bu yüzden açık denizlerden üretilen dalga enerjisi potansiyeli çok daha yüksektir [35]. Okyanusların sahip olduğu yüksek enerjili dalgalardan dolayı dalga enerjisi üretim kapasitesi, daha düşük enerjili dalgaların oluştuğu iç

denizlere kıyasla çok daha yüksektir. Dalga enerjisi mevcut yenilenebilen enerji kaynaklarına nazaran daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olup, sürdürülebilir olmaları, karbon monoksit emisyonu içemedikleri için sera gazı etkisine ve asit yağmurları gibi olumsuz çevresel etkilere sebep vermemeleri, dolayısıyla temiz enerji olmaları, maliyet açısından düşük sermaye gerektirmeleri, deniz ekolojik dengesini korumaya yardımcı olmaları ve fosil bazlı yakıtlara bağımlılığı azaltmaları gibi avantajlara sahiptirler [37, 38, 39].

Dalga enerjisinin doğrudan elektrik enerjisine çevrilerek depolanabilmesi ve kullanılabilmesi haricinde, tuzdan arındırma, sulama, su ürünleri yetiştiriciliği gibi alanlarda da kullanımları mevcuttur. Ayrıca gelecekte derin denizlerdeki sıvılaşmış karışımların pompalanması ve hidrojen üretiminde de bu sistemlerden yararlanılabileceği düşünülmektedir [39].

Türkiye'nin coğrafik konumu ve yüksek dalga kapasitesine sahip olmasından dolayı dalga enerjisi ile ilgili araştırmalar devam etmektedir. Toplam kıyılarının uzunluğu yaklaşık 8 bin km olan Türkiye'de, kıyı boyu uzunluğunun sadece 1/5'i kullanılarak, senelik 10 TWh dalga enerjisi üretilebileceği düşünülmektedir. Üretilen bu enerji Türkiye'de yararlanılan başka bir yenilenebilir enerji kaynağı olan hidrolik enerji kapasitesinin %12,5'i kadardır. Türkiye'de ki denizlere ait dalga kapasiteleri Tablo 2.12' de verilmiştir [36].

Tablo 2.12 Türkiye'de denizlere ait dalga kapasiteleri [36]

Bölge	**Güç**
Karadeniz	1.96-4.22 kWh/m
Marmara Denizi	0.31-0.69 kWh/m
Ege Denizi	2.86-8.75 kWh/m
Akdeniz	2.59-8.26 kWh/m
İzmir-Antalya	3.91-12.05 kWh/m

Dünya genelinde ise dalga gücü potansiyeli bakımından zengin bölgeler; batı İskoçya kıyıları, kuzey Kanada, Güney Afrika, Avustralya ve Amerika Birleşik Devletleri'nin kuzeybatı kıyıları şeklinde sıralanabilir [38]. Dünya'da 2015 senesinde 530 MW kapasitede hesaplanan dalga enerjisinin büyük kısmı akıntıdan elde edilen enerjidir. Güney Kore'de 254 MW ve Fransa'da ise 240 MW'lık dalga enerjisi dönüşüm santralleri bulunmaktadır [34].

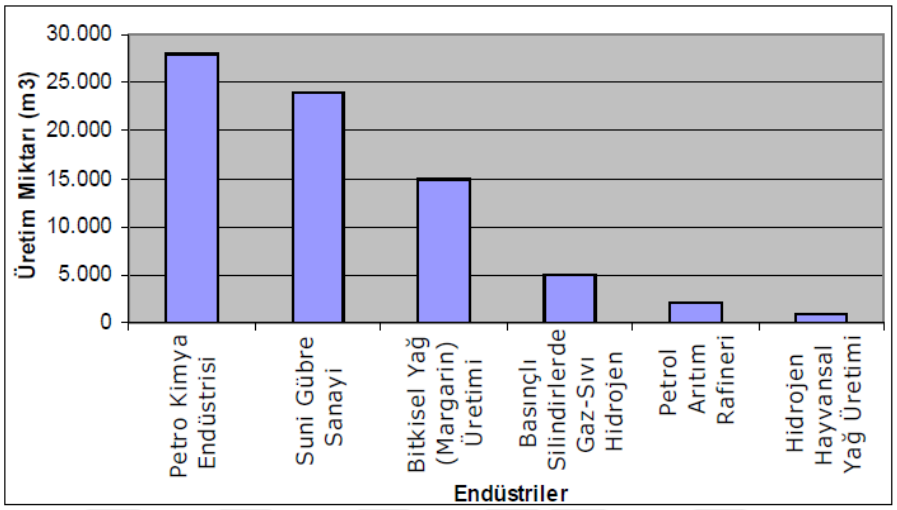
2.2.2.6 Hidrojen Enerjisi

Evrenin başlıca enerji kaynağı olan hidrojen, evrende en fazla bulunan, havaya göre çok hafif olan, kokusu, rengi bulunmayan, zehirli olmayan, saf halde değil, bileşik halinde bulunan bir gazdır. Hidrojen diğer yenilenebilir enerji kaynakları gibi doğrudan bir enerji kaynağı olarak kullanılamaz. Diğer kaynaklardan üretilen enerjiyi aktarnakta, depolamakta ve kullanılabilir forma çevirme proseslerinde yararlanılabilir [40, 41]. Hidrojen, sıvı fazda iken gaz fazındaki hacmine göre 700 kat daha küçük yer kapladığı için -253°C'de likit forma getirilerek depolanabilir. Mevcut yakıtlara göre birim kütlede en fazla enerji kapasitesine sahiptir. Doğal gaza göre 2,1 kat, petrole göre 2,8 kat daha fazla enerjiye sahiptir, ayrıca üretimi sırasında sadece su buharı açığa çıktığı, zararlı gaz emisyonu bulunmadığı için çevreci bir enerji kaynağı olarak düşünülmektedir [42, 43]. Hidrojen enerjisi, yakıt hücreleri, katalitik yanma veya doğrudan yanma prosesleri ve buhar iyileştirme prosesleri ile üretilebilir. Hidrojen enerjisi üretim döngüsü Şekil 2.17'de verilmiştir [40, 41].



Şekil 2.17 Hidrojen enerjisi üretim döngüsü [40]

Hidrojen enerjisi, endüstride ve konutlarda elektrik enerjisi üretimi için kullanılabilirken, birim kütle başına enerji potansiyeli çok fazla olduğu için uzay araçları ve balon gibi hava taşıtlarında da kullanım alanı bulmaktadır. Ayrıca petrol rafinasyonunda, malzeme biliminde ve gıda sanayisinde de yararlanılan bir enerji kaynağı durumundadır. Ülkemizde de Şekil 2.18'de verildiği gibi değişik endüstri kollarında hidrojen enerjisi üretimi mevcuttur [41].



Şekil 2.18 Farklı endüstri kollarında hidrojen enerjisi üretimi [41]

Dünya genelinde de yıllık olarak yaklaşık 120 milyon ton hidrojen üretimi gerçekleştirilmektedir. Üretilen hidrojenin üçte ikisi saf halde, 1/3'ü ise diğer gazlarla karışım halinde elde edilmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre, hidrojenin küresel enerji ve enerji dışı kullanımının yaklaşık %4'ü 14,4 EJ' a eşittir. Dünya'da hidrojen enerjisi üretiminin yaklaşık %95'i doğal gaz ve kömürden üretilirken, %5'lik kısmı ise klor üretiminde yan ürün olarak elde edilmektedir [44].

2.2.2.7 Biyoenerji

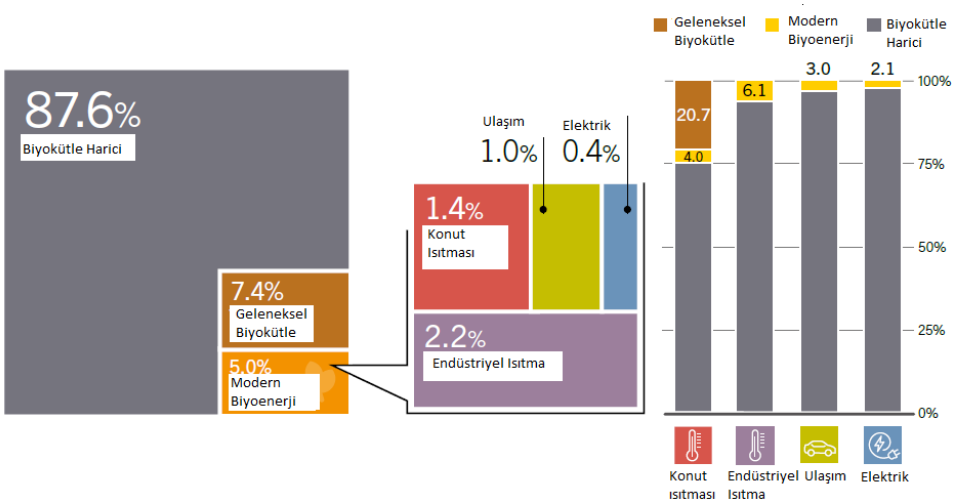
Çevresel etkileri diğer enerji kaynaklarına göre daha az olan biyoenerji yeşil yapraklı bitkilerin fotosentez çevriminden yararlanarak ürettikleri enerji çeşitidir.

Dünya enerji konseyi ise biyoenerjiyi; ormansal ve tarımsal atıklar gibi geleneksel biyokütleden, modern biyokütleden ve etanol ya da biyo dizel gibi biyoyakıtlardan elde edilen enerji olarak tanımlamaktadır. Biyoenerji diğer enerji kaynaklarının aksine katı, sıvı ve gaz yakıtlara dönüştürülebilen çok yönlü bir enerji kaynağıdır.

Değişik organik hammaddeler biyoenerji üretimi için farklı proseslerle termal enerjiye, elektrik enerjisine ve ulaşım için biyoyakıtlara dönüştürülebilirler [45, 46]. Biyokütleden enerji üretmek için geleneksel ve modern enerji üretim prosesleri kullanılmaktadır. Geleneksel olarak doğrudan yakma prosesleri ile üretilen enerji evsel ve endüstriyel ısınma ve pişirme işlemleri için kullanılırken, modern yöntemlerden olan tarımsal, endüstriyel ve organik atıkların fermantasyon, piroliz gibi kimyasal prosesler yardımı ile biyokömür, biyodizel, biyobenzin gibi biyoyakıtlara dönüştürülmesi sonucu elde edilen enerji ise ısı ve elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır [47].

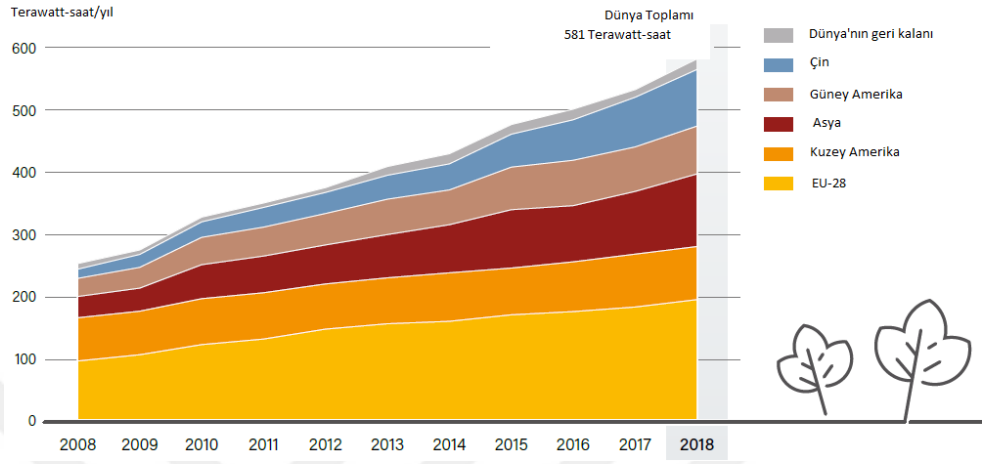
2000'li yılların ilk yarısında enerji üretiminde yerli kaynakların kullanımına katkı sağlayarak maliyeti düşürmek ve temiz enerji kullanımını artrmak amacı ile tarım temelli enerji üretimine yani biyoyakıtlara ağırlık verilmeye başlanmıştır. 2013 yılında fosil kaynaklı benzine %1 oranında biyoetanol karıştırılarak kullanılmaya başlanmıştır [3].

Biyoenerji, küresel enerji arzına yenilenebilir enerji kaynakları arasında en fazla katkıyı sağlayan enerji kaynağıdır. Geleneksel biyokütle dahil olmak üzere biyo enerji 2017 yılı için enerji tüketimine yaklaşık olarak % 12,4 katkıda bulunmuştur. Biyoenerji olarak kullanılan etanol ve biyodizel üretiminin ise dünya çapında 2024 yılına kadar sırasıyla 134,5 ve39 milyar litreye ulaşması beklenmektedir. Değişik sektörlere göre 2017 yılı için toplam enerji tüketiminde biyoenerjinin kullanım payları Şekil 2.19'da verilmiştir [48].



Şekil 2.19 Sektörlere göre 2017 yılı enerji tüketiminde biyoenerjinin payı [48]

2018 yılı verilerine göre, Çin en büyük biyoelektrik üreticisi olan ülkedir. Daha sonra ise Amerika, Brezilya, Almanya, Hindistan, Birleşik Krallık ve Japonya gelmektedir. 2018 verilerine göre küresel biyoelektrik üretimi Şekil 2.20'de verilmiştir [48].

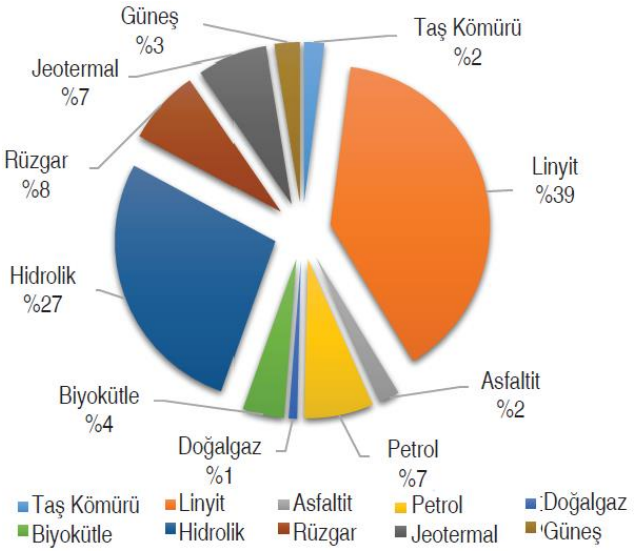


Şekil 2.20 2018 Küresel biyoelektrik üretimi [48]

2.3 Türkiye'de Enerji Kaynaklarına Genel Bakış

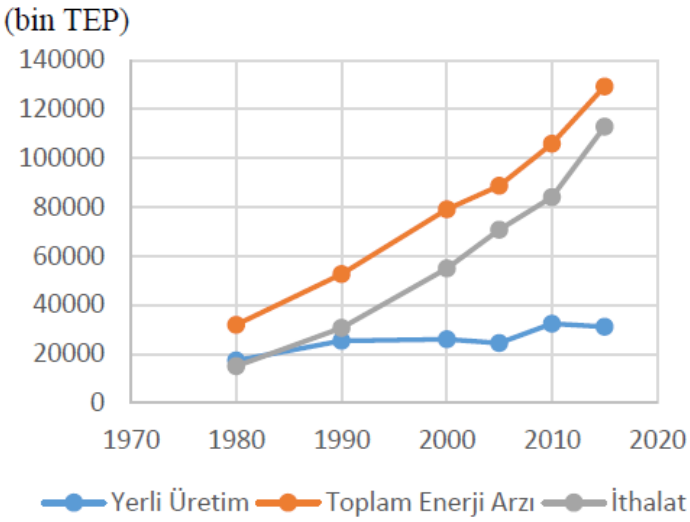
Enerji ülkelerin sosyo-ekonomik yönden gelişebilirliğini belirleyen en kritik faktörlerden biridir. Türkiye'de nüfus ve sanayileşmedeki büyümeyle beraber enerjiye duyulan ihtiyaçta artmıştır. Günümüzde eskiden kullanım payları daha yüksek olan fosil bazlı enerji kaynaklarının yerini hidro enerji, güneş enerjisi ve biyoenerji gibi yenilenebilir enerji kaynakları almaya başlamıştır.

Türkiye'de 2016 verilerine göre enerji üretiminde %39'luk oranla ençok kullanılan enerji kaynağı fosil bazlı yakıtlardır. Bu enerji kaynağını yenilenebilir enerji kaynaklarından olan hidro enerji ve güneş enerjisi izlemektedir. 2016 yılı için ülkemizde üretilen enerjinin yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynaklara göre payları Şekil 2.21'de verilmiştir [31].



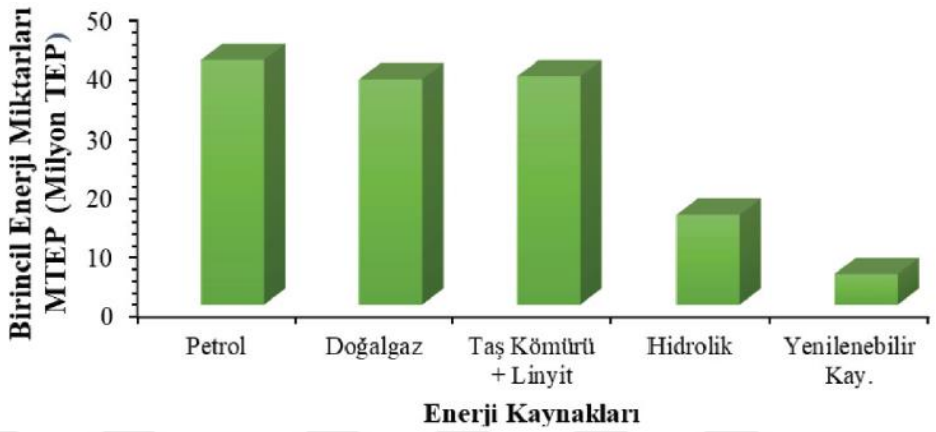
Şekil 2.21 2016 yılı üretilen enerjinin Türkiye yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynaklarına göre payları [31]

1980'lerde üretilen yerli enerjinin Türkiye'nin genel enerji ihtiyacındaki payının %54 olduğu bilinirken 2015'te ise bu pay %24'lere çekilmiştir. 2016 yılında Türkiye enerji üretiminin yaklaşık 35 bin ton petrole eşdeğerde olduğu bildirilirken, diğer ülkelerden alınan enerji ise yaklaşık 113 bin ton eşdeğer petroldür. Bu durum ülkemizin enerji açısından ne kadar dış ülkelere bağlı bir konumda olduğunu göstermektedir. 1980-2015 seneleri Türkiye enerji ihtiyacının yerel kaynaklardan ve ithalat yolu ile karşılanma oranları Şekil 2.22'de verilmiştir [31, 49].



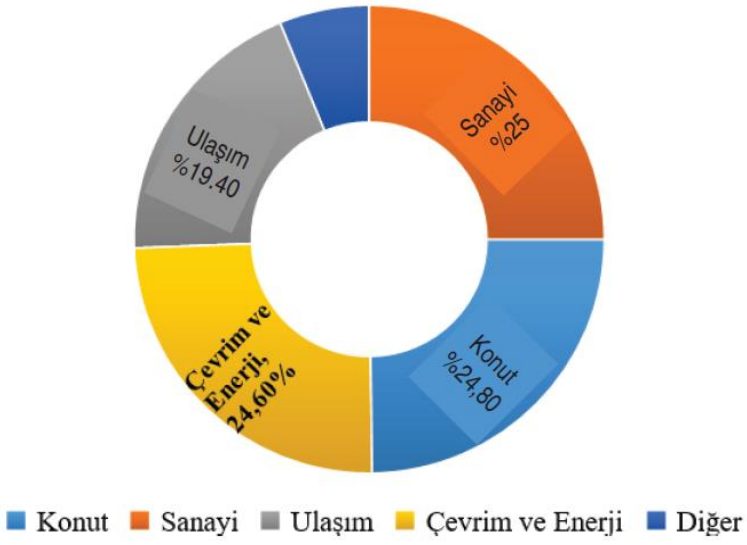
Şekil 2.22 Yıllar bazında Türkiye enerji ihtiyacının yerli üretim ve ithalat yolu ile karşılanma durumları [31]

Ülkemiz için 2015 yılı enerji tüketimi yaklaşık 131,9 milyon ton eşdeğer petrol olarak verilmişken, 2016 yılı verilerine göre 137,9 milyon ton eşdeğer petrol olduğu ve 2023 yılında bu değerin 218 milyona çıkacağı düşünülmektedir. Şekil 2.23'de 2016 yılı için Türkiye enerji tüketiminin payları verilmiştir [31].



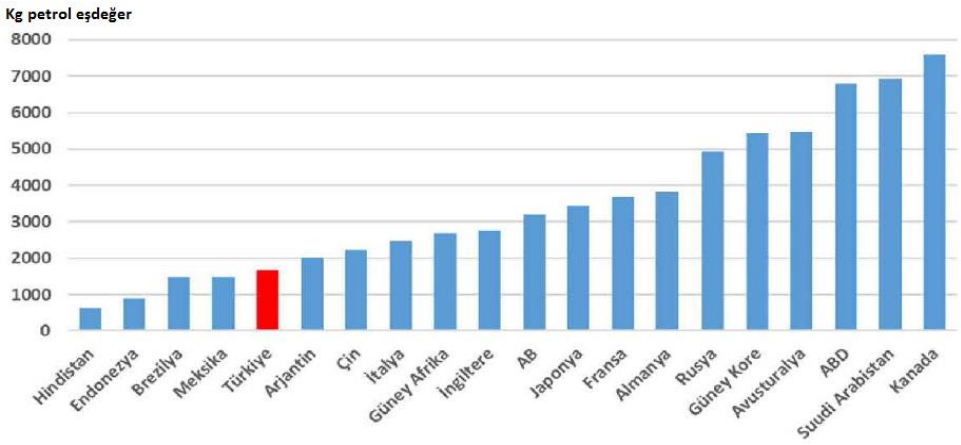
Şekil 2.23 Farklı enerji kaynaklarının 2016 yılı Türkiye enerji tüketimindeki payları [31]

Şekil 2.24'de ise 2016 yılı Türkiye'de harcanan enerjinin sektörel bazdaki paylaşımı verilmiştir [31].



Şekil 2.24 Türkiye'de harcanan enerjinin sektörel bazdaki paylaşımı [31]

Dünya bankası verilerine göre G20 ülkeleri içerisinde harcanan enerji miktarı açısından gerilerde bulunan Türkiye'de ki tüketim kişi başı yaklaşık 700 kg petrole eşdeğerdir. Türkiye'nin enerji tüketimi açısından G20 ülkeleri arasındaki yeri Şekil 2.25'te görüldüğü şekildedir [50].



Şekil 2.25 Türkiye G20 ülkeleri arasındaki enerji tüketimi [50]

Türkiye'de ki elektrik tüketimi 2015 için yaklaşık 257 milyar kWh olarak gerçekleşirken, enerji üretimi ise yaklaşık 261 milyar kWh olarak kaydedilmiştir. Ülkemiz için yıllar bazında elektrik enerjisinin enerji kaynaklarına göre üretim ve tüketimleri Tablo 2.13'de verilmiştir [49].

Tablo 2.13 Yıllara göre Türkiye'deki elektrik enerjisinin durumu [49]

Yıl	Üretim Kaynakları			Toplam (GWh)	İthalat (GWh)	İhracat (GWh)	Tüketim (GWh)
	Termik (GWh)	Hidrolik (GWh)	Rüzgar+Güneş Jeotermal (GWh)				
2002	95563	33684	153	129400	3588	435	132553
2005	122242	39561	153	161956	636	1798	160794
2008	164139	33270	1009	198418	789	1122	198085
2011	171638	52339	5418	229395	4556	3645	230306
2015	179366	67146	15271	261783	7135	3194	265724

2.4 Dünya'da Enerji Kaynaklarına Genel Bakış

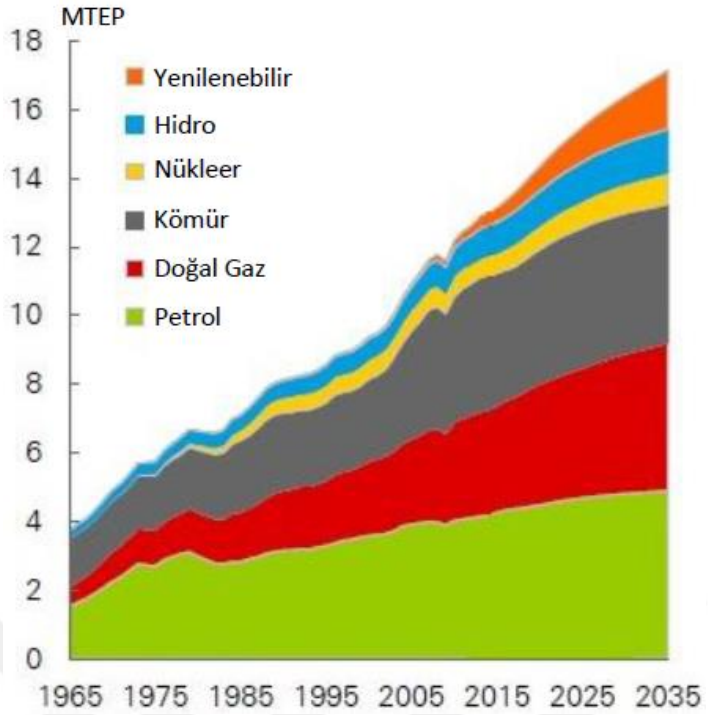
Şehirleşmenin artması ile birlikte endüstrideki gelişmeler Dünya enerji tüketiminin ve dolayısıyla enerji ihtiyacının hızla artmasına neden olmuştur. Dünya genelinde enerji ihtiyacının karşılanmasında yüksek oranda geleneksel fosil yakıtlar kullanılmasına rağmen bu kaynaklardan kömürün 134, petrolün 53 ve doğal gazın ise 52 sene içerisinde biteceği düşünülmektedir. Dünyada harcanan birincil enerji miktarı 1990'da 8779 milyon ton eşdeğer petrol iken 2015'de 13147 milyon ton eşdeğer petrol miktarına yükselmiştir. Bu miktara bağlı olarak günümüzde 14 milyar ton eşdeğer petrol enerji ihtiyacı mevcutken, aynı hızda

büyümenin devam etmesine bağlı enerji ihtiyacının 20 yıllık bir sürede %45'lik bir yükselişe uğrayacağı ve 2035 yılında 208 milyar ton eşdeğer petrol enerji ihtiyacına ulaşacağı düşünülmektedir. 2015 verilerine göre en çok enerji harcayan ülke 3014 milyon ton eşdeğer petrol ile Çin olarak kayıtlara geçerken, yaklaşık 2280 milyon ton eşdeğer petrol ile Amerika 2. sırada yer almaktadır. Türkiye ise sıralamada 19. sıradadır. Tablo 2.14'de verildiği gibi enerji tüketiminde Çin ve Amerika toplam miktarın yaklaşık yarısını karşılamaktadır.

Tablo 2.14 Küresel enerji tüketim miktarları [49]

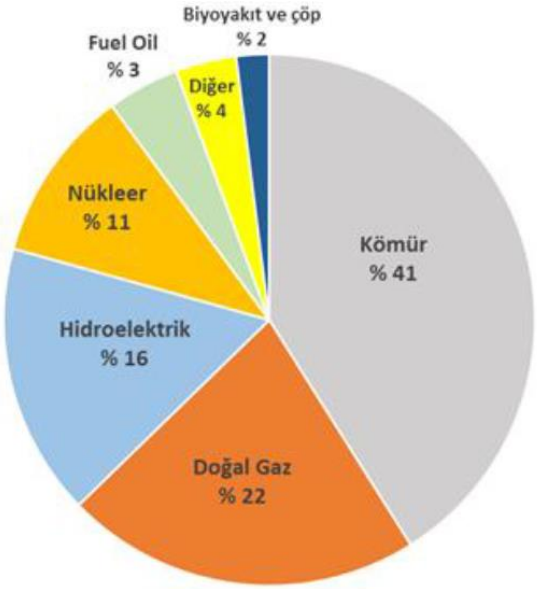
Ülke	**2013 (MTEP)**	**2014 (MTEP)**	**2015 (MTEP)**	**Ülkelerin 2015 Yılı Birincil Enerji Tüketimi (%)**
Çin	2903,9	2970,3	3014,0	22,9
ABD	2271,7	2300,5	2280,6	17,3
Hindistan	626	666,2	700,5	5,3
Rusya	688	689,8	666,8	5,1
Japonya	465,8	453,9	448,5	3,4
Kanada	335	335,5	329,9	2,5
Almanya	325,8	311,9	320,6	2,4
Brezilya	290	297,6	292,8	2,2
G. Kore	270,9	273,1	276,9	2,1
İran	247,6	260,8	267,2	2,0
Türkiye	120,3	123,9	129,3	1,0

İstatiksel bilgilere göre Şekil 2.26'da görüldüğü gibi yıllar bazında küresel olarak harcanan enerjinin büyük bir kısmını petrol ve kömür kaynakları oluşturmaktadır [34, 49, 50, 51].



Şekil 2.26 Yıllara göre enerji tüketiminin kaynak bazında dağılımı [51]

Dünya elektrik üretimine bakıldığında birincil enerji kanaklarından yaklaşık 10 bin TWh elektrik üretimi ile Çin ve Amerika'nın liderliği koruduğu görülmektedir. Sıralamada daha sonra Hindistan, Rusya ve Japonya gelirken, Türkiye ise elektrik üretiminde yaklaşık 261 milyar kWh ile 17. sıradadır. Küresel elektrik üretimi kaynak bazında incelendiğinde enerj üretim maliyeti düşük olduğu için en çok kömürden ve daha sonrada hidro enerji, rüzgar enerjisi ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklardan yararlanıldığı görülmektedir. 2015 Uluslararası enerji ajansı verilerine göre küresel elektrik üretiminin yararlanılan kaynaklara göre dağılımı Şekil 2.27de verilmiştir [52, 53].



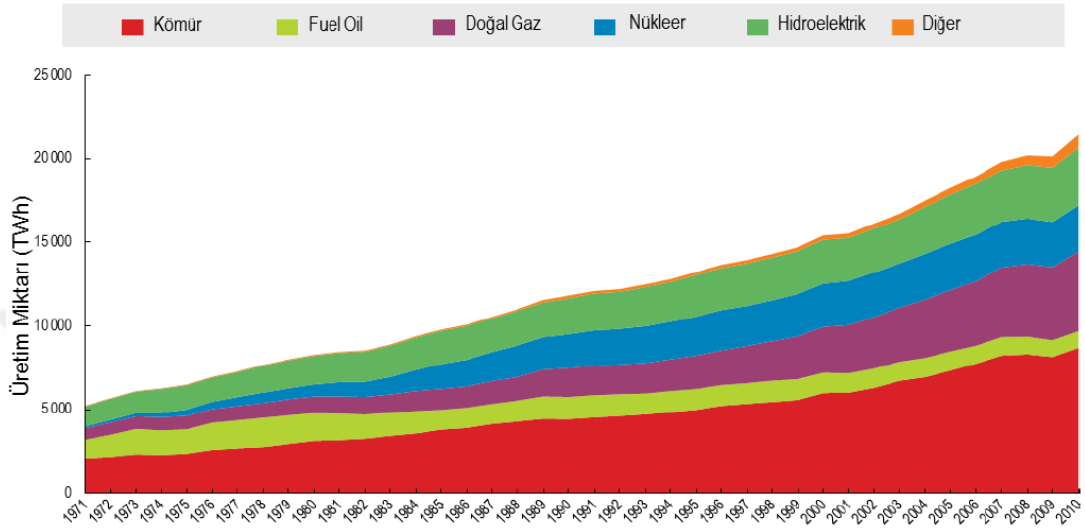
Şekil 2.27 Küresel elektrik üretiminin yararlanılan kaynaklara göre dağılımı [53]

2014 Uluslararası enerji ajansı verilerine göre; Dünya elektrik üretiminde ülkelerin kullandıkları kaynaklara bakıldığında; Çin Almanya ve Amerika'da en çok kömürden yararlanıldığı, Doğal gazın en çoullanıldığı ülkelerin Rusya ve Japonya olduğu, hidrolik enerjide ise Çin'nin liderliği koruduğu görülmektedir. Tablo 2.15'de gelişmiş ülkelerde üretilen elektrik enerjisinin kullanılan kaynaklara göre payları verilmiştir [53].

Tablo 2.15 Gelişmiş ülkelerde üretilen elektrik enerjisinin kullanılan kaynaklara göre payları [53]

	Kömür (%)	**Doğal Gaz (%)**	**Su (%)**	**Nükleer (%)**	**Fuel Oil (%)**	**Bioyakıt (%)**	**Güneş (%)**	**Rüzgâr (%)**	**Diğer (%)**
ABD	40,0	26,8	6,8	19,1	0,8	1,7	0,3	3,9	0,5
Rusya	15,8	49,1	15,6	16,6	2,6	0,3	0,0	0,0	0,0
Çin	75,8	1,7	17,5	1,9	0,1	0,9	0,1	2,0	0,0
İngiltere	36,5	26,8	2,1	19,8	0,7	5,8	0,6	7,7	0,0
Fransa	4,3	3,1	13,3	73,6	0,6	1,4	0,8	2,8	0,2
Almanya	47,0	10,5	4,1	15,3	1,0	8,6	4,7	8,4	0,3
Japonya	31,9	38,5	8,0	0,9	15,2	3,9	1,0	0,5	0,2

Kömürün küresel elektrik üretimindeki önemi 1970'li yıllardan beri yerini korumaya devam ederken, son yıllarda temiz enerji olarak daha çok kullanım alanı bulan doğal gazın payıda görünür ölçüde artmıştır. Yıllar bazında değişik enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin miktarları Şekil 2.28'de verilmiştir [53].



Şekil 2.28 Yıllar bazında değişik enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin miktarları [53]

3
BİYOKÜTLE

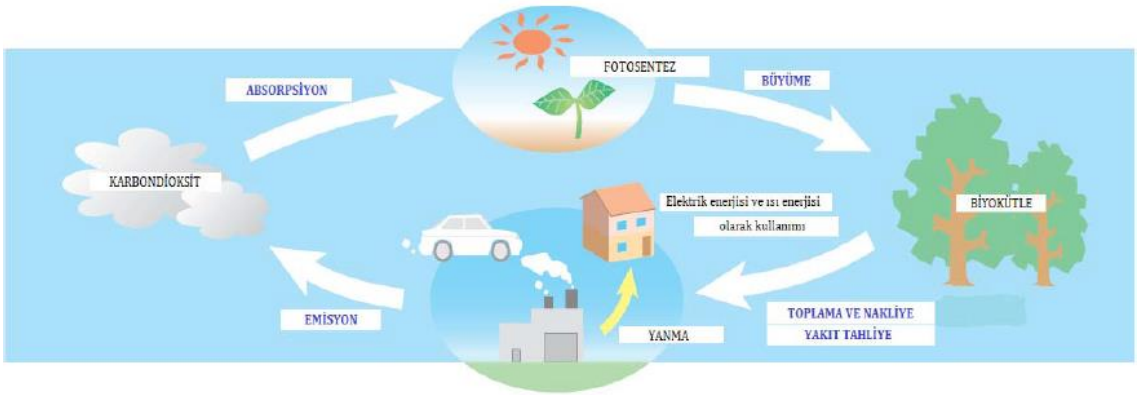
3.1 Biyokütle Tanımı

Enerji gerek teknolojk gerekse ekonomik yönden bakıldığında ülkelerin gelişmesini sağlayan en önemli parametrelerdendir. Bu yüzden gelişmiş ülkelerin enerji ihtiyacı, gelişmemiş ülkelere kıyasla çok daha fazladır. Dünyada nüfus artışı ile ekonomik gelişmelere bağlı enerji ihtiyacı giderek artmıştır. Günümüz enerji talebi daha çok fosil ve yenilenebilir kaynaklardan karşılanmaktadır. Fosil yakıtların kullanımı, üretiminin, nakliye ve depolanma giderlerinin ucuz ve kolay olmasından dolayı yaygındır. Son zamanlarda dünya genelinde fosil yakıtların aşırı harcanması ile oluşan olumsuz küresel ısınma etkileri gözlenmektedir. Aynı zamanda oluşumlarının çok uzun yıllar alması, oluşum ile tüketim süreleri kıyaslandığında ise tüketim sürelerinin daha kısa olması, rezervlerin hızlı tükenmesine sebep vermektedir. Fosil yakıtların enerji gereksiniminin karşılanmasında kullanılması, rezervlerin zamanla tükenecek olması, hava kirliliği, asit yağmuru gibi olumsuzlukları ortaya çıkarmakta ve sonuç olarak ekolojik dengenin bozulmasına neden olmaktadır [54]. Bu gibi nedenlerden dolayı alternatif yenilenebilir enerji kaynaklarının bulunması ve kullanılması ile ilgili çalışmalar son zamanlarda giderek önem kazanmaktadır. Çevreyi kirletmeyen ve en yaygın kullanım alanı bulunan yenilenebilir enerji kaynaklarından en önemlisi ise biyokütle enerjisidir. Biyokütle enerjisi ile fosil kaynakların meydana getirdiği küresel ısınma ve iklim değişikliğinin insan sağlığı üzerindeki yıkıcı etkisinin azaltılması hedeflenmektedir. Ayrıca biyokütleden üretilen biyoyakıt enerjisinin elektrik, ulaşım ve ısıtma sektöründe geniş kullanım alanı bulması için sanayileşmiş ülkelerde biyoyakıt enerjisi, Avrupa Komisyonu ve ABD Enerji Bakanlığı tarafından hazırlanan "Biyokütle Eylem Planı" ve "Çok Yıllık Plan" gibi girişimlerle desteklenmektedir [55].

Yenilenebilir enerji kaynakları sınıfında yer alan biyokütle, canlı veya yakın zamanda canlılığını yitirmiş organizmalardan elde edilen karbon bazlı biyolojik materyaldir [56].

Biyokütle, yüz yıldan daha kısa bir zaman içerisinde kendisini yenileyebilen bitkisel veya hayvansal kaynaklı organik maddeleri, tarımsal olarak özel yetiştirilen bitkileri, yosunları, evsel ya da endüstriyel atıkları, orman sanayisinden elde edilen yan ürünleri içeren bileşikler olarakta tanımlanabilmektedir [57, 58]. Biyokütle diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından farklı olarak, değişik kimyasalların, malzemelerin ve yakıtların üretimi için kullanılabilecek tek yenilenebilir karbon kaynağıdır [59]. Bitki biyokütlesi ise bitkilerin temel taşlarını oluşturan karbonhidratları doğadaki suyu ve atmosferdeki karbondioksit gazını kullanarak güneş enerjisi ve fotosentez reaksiyonları ile kimyasal enerjiye dönüştürmesi ile elde edilir [60].

Biyokütlenin kullanım veya yanma prosesleri sırasında açığa çıkardığı biyolojik kökenli CO_2 gazı, atmosferdeki CO_2 miktarında herhangi bir artışa sebebiyet vermez. Çünkü bitkiler büyüme ve metabolik prosesleri için ihtiyaç duydukları CO_2 gazını, diğer bitkilerin bozunma süreçleri sırasında atmosfere saldıkları CO_2'i kullanarak sağlamaktadırlar. Bu döngüden dolayı biyokütlenin kullanılması sırasında salınan $C0_2$ gazı tekrar bitkilerden biyokütle üretmek için kullanılır ve atmosferdeki CO_2 gaz emisyonunda bir artışa neden olmaz. Biyokütle enerjisi kullanımındaki CO_2 döngüsü Şekil 3.1'de verilmiştir [55, 60].



Şekil 3.1 Biyokütle enerji döngüsü [60]

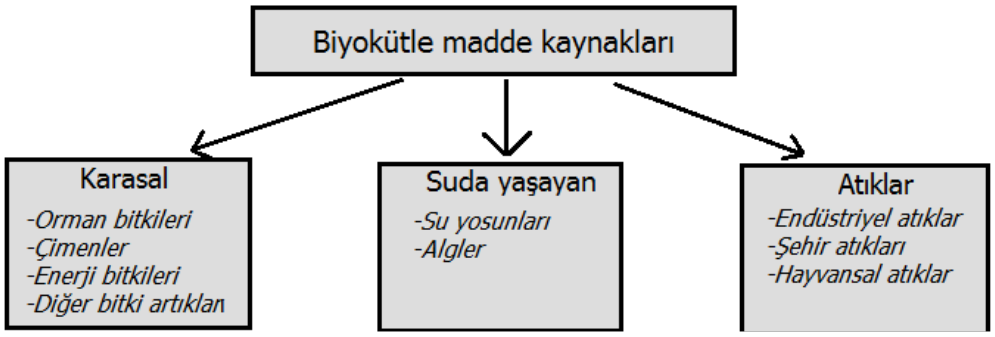
İstatiksel verilere göre Dünya'da ki toplam biyokütle rezervi 1.8 trilyon ton civarında iken biyokütleden enerji üretim potansiyeli ise 33 bin EJ'dur. Bu kapasite

Dünya genelindeki yıllık enerji tüketiminin 80 katından fazladır. Buna rağmen güncel olarak kullanılan biyokütle enerjisi Dünya'da ki mevcut birincil enerji kaynaklarının sadece %14'ünü oluşturmaktadır [55]. Ayrıca 2030 iklim ve enerji çerçevesi altında Avrupa Birliği, sera gazı emisyonlarını 1990 yılına göre %40 oranında azaltmayı ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını da 2030 yılına kadar %27 oranında artırmayı hedeflemektedir. Bu çevresel hedeflerinde ancak fosil kaynaklardan olmayan, yenilenebilir ve CO_2 nötür bir ham maddenin enerji ve malzeme üretimindeki oranının artırılması ile gerçekleştirilebileceğini öngörmektedir. Biyokütlenin de yenilenebilir doğası ve CO_2 çevriminin kapalı bir döngüde gerçekleşiyor olması biyokütle enerjisinin gelecek için ne kadar önemli olduğunu göstermektedir [61].

3.2 Biyokütle Kaynakları

Biyokütle kaynakları doğada karada ve denizde yetişebilen, fosil kaynaklardan farklı özellikler içeren canlı veya canlılığını yeni yitirmiş organizmaların oluşturdukları toplam kütle olarak ifade edilebilirler. Biyokütle kaynakları genellikle bünyelerinde ki su ve oksijen miktarları yüksek olmasına rağmen düşük yoğunlukta olan, homojen olmayan ve kalorifik açıdan düşük değerlere sahip kaynaklardır [62]. Biyokütle kaynakları; Bitkisel kaynaklar, hayvansal atıklardan elde edilen kaynaklar, evsel ve endüstriyel atıklar şeklinde sınıflandırılabilirler. Bu sınıflandırmanın haricinde biyokütle, klasik ve modern biyokütle şeklinde de ayrılabilmektedir. Klasik biyokütle, doğada var olduğu gibi kullanılabilen biyokütle kaynaklarıdır. Bu kaynaklardan en yaygın olarak kullanılanlar doğrudan yakılarak enerji üretiminde kullanılan odunlar, odunsu bitkiler, ağaç artıkları gibi ormansal kaynaklı olanlar ve tezek gibi hayvansal kaynaklı olanlardır. Modern biyokütle kaynaklarını ise özel amaçlarla enerji üretmek için yetiştirilen selülozik bitkilerin oluşturdukları enerji ormanları, enerji üretimi için özel olarak yetiştirilen algler, orman sanayisi atıklarından üretilen biodizel, etanol gibi biyolojik temelli yakıtlar, tarımsal atıklar, hayvansal, şehirsel ve endüstriyel atıklar şeklinde sıralayabiliriz [63]. Günümüzde karakavak, söğüt gibi hızlı büyüme potansiyeline sahip ağaçların özel koşullarda yetiştirildikleri enerji ormanlarından yıllık olarak yaklaşık 22 ton

biyokütle elde edilmekte ve enerji üretmek amacı ile kullanılmaktadır [64**].** Biyokütle kaynaklarının sınıflandırılması Şekil 3.2'de verimektedir [65].



Şekil 3.2 Biyokütle kaynakları sınıflandırılması [65]

3.2.1 Bitkisel Biyokütle Kaynakları

Bitkisel kaynaklı biyokütleler yardımı ile yeşil yapraklı bitkiler doğadaki oksijen ve karbondioksiti kullanarak fotosentez prosesi ile güneş enerjisini kimyasal enerji şeklinde depolarlar. Bu şekilde üretilen enerji biyokütle enerjisi adı altında kullanılmaktadır. Biyokütle enerjisi üretiminde kullanılabilen bitkisel kaynaklı biyokütle çeşitliliği karada ve suda bulunabilenler olarak çok fazladır. Orman kaynaklı ürünler, ağaçlar, özel olarak enerji üretmek amaçlı yetiştirilen C4, C3 bitkileri, selüloz, şeker ve nişasta içerikli bitkiler, biyogaz eldesinde kullanılabilen yağlı tohumlar, sulak alanlarda yetişen algler, yosunlar gibi su bitkilerini bitkisel biyokütle kaynakları arasında sayabiliriz. Son yıllarda enerji tarımı ile kurak iklimlerde yetiştirilebilen, suyu ve karbondioksiti diğer bitkilere göre daha yüksek kapasitede kullanan tatlı sorgum, pensitum, şeker kamışı gibi C4 bitkilerinden biyolojik dönüşümler ile biyoetanol, biyodizel gibi biyoyakıtların üretimide yapılmaktadır**.** Maliyet açısından değerlendirildiğinde, bir hektar araziden yıllık olarak 100 ton yaş, 30 ton civarında ise kuru bitkisel biyokütle elde edilebileceği söylenebilir. İklim koşullarının iyileştirilmesine bağlı olarak bu miktar artırılabilmekte ve bitkisel biyokütleden üretilen enerji maliyetinin diğer yakıtlarla karşılaştırıldığında oldukça uygun olduğu görülmektedir [63, 66].

3.2.2 Hayvansal Biyokütle Kaynakları

Hayvansal atıklardan üretilen biyokütle kaynakları ile klasik yöntemler ya da biyolojik dönüşüm yöntemlerinden yararlanılarak enerji üretilebilmektedir.

Hayvansal biyokütle kaynağı olarak en yaygın kullanım alanı bulunan tezek doğrudan yakma prosesi ile enerji üretiminde kullanılabilirken, oksijensiz ortamda gerçekleştirilen fermantasyon prosesi ile biyogaz üretiminde de kullanılabilmektedir. Küresel olarak çok yaygın kullanımı bulunan biyogazın kalorifik değeri, yapısında bulundurduğu metan oranına bağlı olarak 1900 ile 27500 kj/m^3 arasındadır. Dünya genelinde enerji üretiminde kulanılan hayvansal atıkların enerji kapasitesinin 20 Exajoule olduğu düşünülmekte ve özellikle Hindistan ve Çin'de hayvansal kaynaklı biyokütleden enerji üretiminin çok yaygın olduğu bilinmektedir [62, 63, 67].

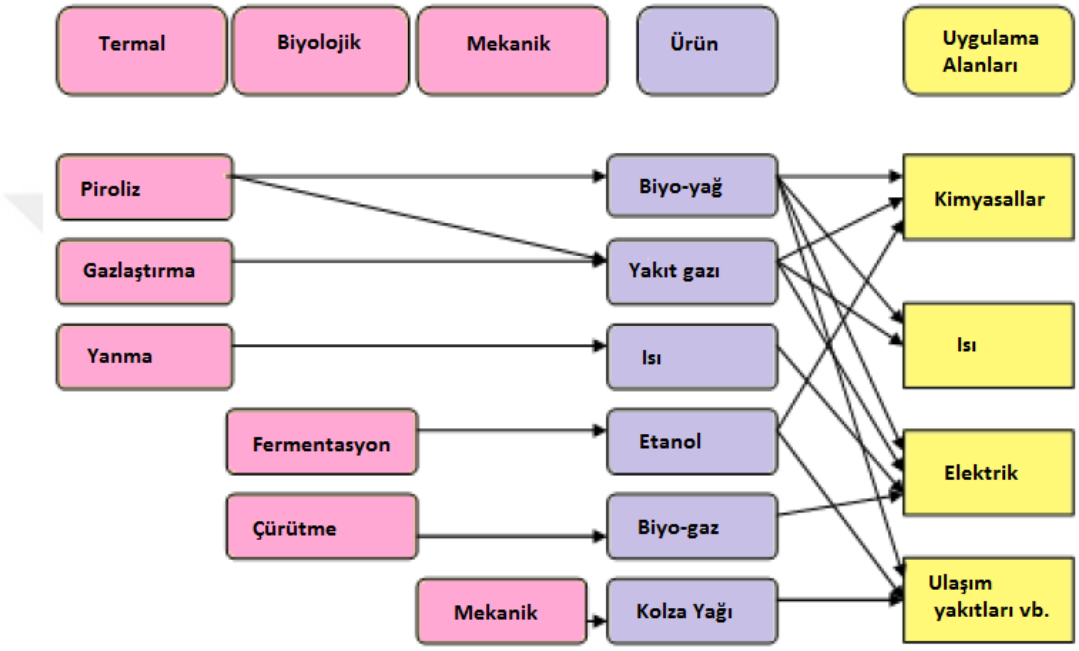
3.2.3 Kentsel ve Endüstriyel Kaynaklı Biyokütleler

Kanalizasyon ve evsel atık sular, gıda sanayisi, kağıt sanayisi, orman endüstri atıkları gibi çeşitli organik endüstriyel ve evsel atıklar, arıtma prosesleri sonucu oluşan atık sular, çöpsel atıklar bu sınıfa girmektedir. Bu tür biyokütle kaynakları biyokimyasal prosesler ve aerobik organizmalar yardımı ile metan gazı üretiminde kullanılarak değerlendirilebilmektedirler. Çöpsel atıklardan üretilen 1 m^3 metan gazının kalorifik değerinin, üretildiği biyokütlenin kimyasal yapısına bağlı değişmekle beraber yaklaşık 18 ile 27 MJ/Nm^3 civarında olduğu bilinmektedir. İstatiksel verilere göre kentsel ve endüstriyel kaynaklı atıklardan üretilen biyokütle enerjisi dünya enerji kapasitesinin 6 Exajoule'ünü karşılayabilmektedir [63, 67].

3.3 Biyokütle Dönüşüm Prosesleri

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan biyokütle, bünyelerinde bulundurdukları yüksek oranda nem ve oksijen içerikleri, boyutsal değişikliklerinden dolayı heterojen yapıda bulunmaları, düşük kütle ve enerji yoğunlukları ve düşük termal değere sahip olmaları gibi olumsuz yönlerini iyileştirmek amacı ile fiziksel prosesler veya dönüşüm prosesleri ile muamele edilirler. Biyokütle, geleneksel yöntemlerle ısı enerjisi üretebilmek için doğrudan yakılabildiği gibi modern yöntemlerle elektrik, termal enerji veya biyoyakıtlara dönüştürülerekte kullanılabilir. Biyokütle dönüşüm proseslerine, biyokütlenin karakteristik özellikleri, ısıl değeri, kimyasal yapısı, parçacık boyutu, miktarı, dönüştürülmek istendikleri enerji formu, son kullanım alanları, çevresel ve ekonomik koşullar gibi

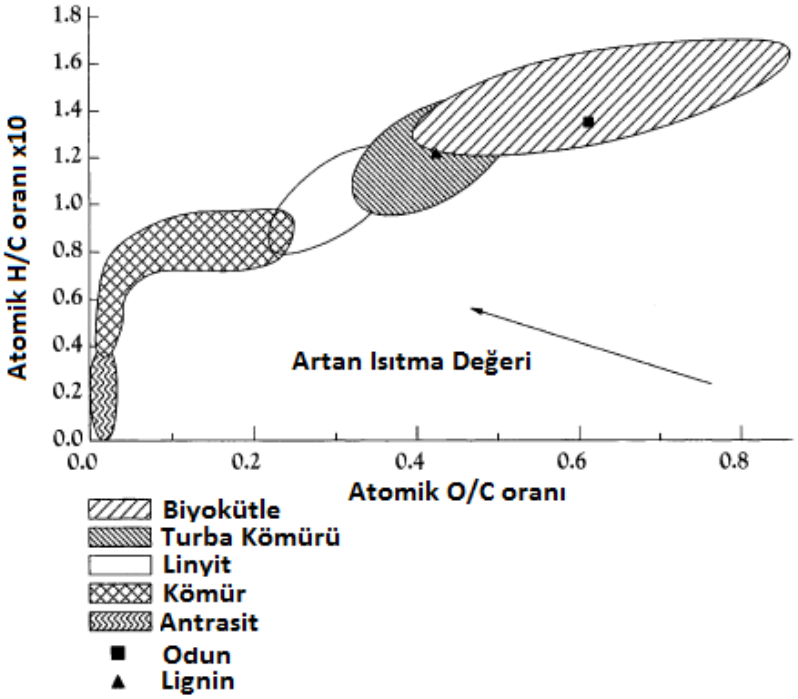
faktörler gözönünde bulundurularak karar verilebilir. Örneğin içerdikleri nem miktarı %35'ten yüksek olan biyokütle için termokimyasal prosesler kullanılamazken, yüzde şeker oranları yüksek olanlar için biyokimyasal proseslerin uygun olduğu söylenmektedir. Biyokütlenin enerjiye dönüşümünde; Termokimyasal, biyokimyasal ve fizyo-kimyasal dönüşüm prosesleri olarak üç ana dönüşüm prosesi kullanılmaktadır. Biyokütle dönüşüm prosesleri Şekil 3.3'te verilmiştir [62, 68, 69, 70].



Şekil 3.3 Biyokütle dönüşüm sistemler [62]

Biyokütle kaynaklarından modern veya geleneksel dönüşüm yöntemleri ile günümüzde kullanılmakta olan yakıtlara eşdeğer veya karakteristik özellikleri geliştirilmiş alternatif biyokütle enerjisi üretmek amaçlanmaktadır.

Biyokütle dönüşüm prosesleri ile üretilen enerji taşıyıcıların verimliliklerini klasik fosil yakıtlarla karşılaştırabilmek için Şekil 3.4'te verilen Van Krevlen diyagramı'ndan yararlanılmaktadır. Bu diyagrama göre O/C ve H/C oranlarındaki düşüş ile üretilen malzemenin enerji içeriğindeki artış hesaplanabilmektedir [71].



Şekil 3.4 Van Krevlen diyagramı [71]

3.3.1 Termokimyasal Dönüşüm Prosesleri

Biyokütleye uygulanabilen termokimyasal dönüşümler temel olarak yanma, piroliz, gazlaştırma ve sıvılaştırma prosesleri şeklinde gruplandırılmaktadır. Piroliz reaksiyonunda biyokütle oksijensiz ortamda gerçekleştirilen kimyasal reaksiyonları içerdiği için tüm termokimyasal işlemlerin ön aşaması olarak değerlendirilmektedir. Termokimyasal dönüşüm prosesleri ile üretilecek ürünün istenilen özellikleri, miktarı, kimyasal yapısı ve kullanım alanları göz önüne alınarak sıvı veya gaz ara ürünleri enerji içerikleri daha yüksek olan ürünlere dönüştürmek mümkündür**.** Termokimyasal dönüşüm prosesleri ve proses sonucu elde edilen ürünler Tablo 3.1'de verilmiştir [69, 72].

Tablo 3.1 Termokimyasal dönüşüm prosesleri [72]

Dönüsüm Prosesi	Teknik Çözümler	Son Ürünler
Termokimyasal Prosesler	Yakma	Buhar
		Proses Isısı
		Elektrik Enerjisi
	Gazlaştırma	Buhar
		Proses Isısı
		Elektrik Enerjisi
	Piroliz	Yakıt Gazı Metan
		Odun Kömürü
		Biyokömür
		Yakıt Gazı
	Sıvılaştırma	Biyogaz
		Biyoyakıt
	Torrefaksiyon	Proses Isısı
		Elektrik Enerjisi
		Biyokömür

3.3.1.1 Doğrudan Yakma

Yanma prosesi biyokütle yapısında bulunan karbon, hidrojen gibi elementlerin ve bazı metallerin oksijenle verdikleri heterojen ve homojen kimyasal reaksiyonlar olarak tanımlanmaktadır. Yanma prosesi biyokütlenin kurutulması, bünyesindeki nemin uzaklaştırılması, gazlaştırılma ve gaz fazı oksidasyonu gibi işlem basamaklarını içerir. Yanma prosesi sonucu ortama su buharı, karbondioksit ve metaloksitlerin salınımı gerçekleşir. Aynı zamanda biyokütle düşük kül ve kükürt içeriğine sahip olduğundan dolayı atmosfere verdikleri NOx, SOx gibi gaz emisyonlarının değeri diğer yakıtlara oranla daha düşüktür. Bu reaksiyonlar sırasında açığa çıkan ısı ve buhar, elektrik üreten jeneratör ve türbinler yardımı ile elektrik, ısı ve buhar enerjisi üretiminde kullanılabilir. Kullanılan biyokütlenin nem içeriği açığa çıkan ısı enerjisini doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden kullanılan biyokütlenin nem içeriğinin %50 civarında olması istenir ayrıca bu reaksiyonların net dönüşümleri %20 ile %40 arasında verimlilikte gerçekleşmektedirler. Biyokütlenin doğrudan yakılması ile elde edilen kalorifik değer, klasik fosil yakıtlar

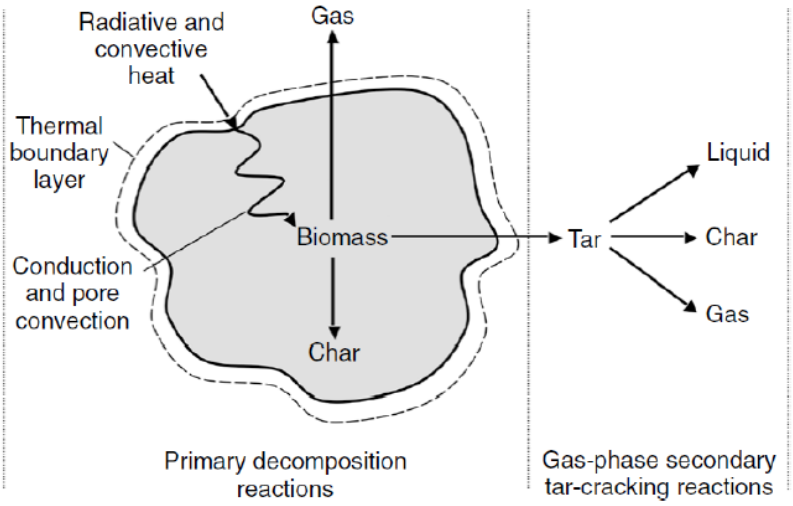
ile karşılaştırıldığında düşük kaldığı için biyokütle diğer kalorifik değerleri yüksek olan yenilenemeyen enerji kaynakları ile birlikte yakılarak kullanılabilir. Bu fosil enerji kaynaklarının kullanımını ve atmosfere verdikleri sera gazlarının emisyonunun azaltabilecek en iyi yöntemlerden birisidir [60, 72, 73].

Biyokütleden doğrudan yakma prosesi ile ısı üretimi özellikle evsel uygulamalar için çok yaygın olarak kullanılan klasik bir yöntemdir ve bu yöntem özellikle Avusturya, Fransa, Almanya ve İsveç gibi ülkelerde hala çok fazla pazar payı bulmaktadır. Son zamanlarda ise biyokütle ile enerji üreten termik santrallerde verimi artırmak amacı ile klasik yakma prosseleri yerine akışkan yatak prosesleri kullanılmaya başlanmıştır [74, 75].

3.3.1.2 Piroliz

Piroliz, biyokütlenin oksijensiz ortamda termal bozunma ile kimyasal yapısının bozunarak karbon temelli malzemeler üretmek için yararlanılan termokimyasal dönüşüm proseslerinden biridir. Piroliz reaksiyonları sırasında biyokütlenin parçalanması, aromatik bileşiklerin oluşması ve koklaşma reaksiyonları gözlenir. Piroliz prosesinde meydana gelen birincil bozunma reaksiyonları ile önce gaz ve katı kömür oluşurken daha sonra ise yoğunlaşabilir gazladan CO, CO_2, H_2 and CH_4 gibi gazlar, sıvı ürün ve kömür elde edilir. Piroliz ilk basamağında biyokütle yapısındaki su ve bazı uçucu maddeler yapıdan uzaklaştırılırken, ikinci basamakta biyokömür oluşur ve son aşamada oluşan bu biyokömürün yapısı yeniden düzenlenir [76].

Reaksiyon koşullarına bağlı olarak, piroliz prosesi ile üretilen katı ürün enerji kapasitesi yaklaşık 18 MJ/kg olan kömür, sıvı ürün enerji kapasitesi yaklaşık 22 GJ/m^3 olan biyo yağ ve gaz ürün ise enerji kapasitesi yaklaşık 6 MJ/kg olan ve yapısında H_2, CO, CH_4, CO_2, H_20 ve düşük molekül ağırlıklı uçucu organik bileşikleri bulunduran sentez gazıdır. Biyokütle piroliz reaksiyonu ve elde edilen ürünler Şekil 3.5'de gösterilmiştir [77, 78].



Şekil 3.5 Biyokütle piroliz reaksiyonu basamakları [78]

Piroliz reaksiyonlarında, sıcaklık, reaksiyon süresi, ısıtma hızı, basınç, biyokütle yapısı, tanecik boyutu gibi proses koşulları en son üretilen piroliz ürünlerinin yapısını doğrudan etkilemektedir. Piroliz reaksiyonlarının daha düşük sıcaklıklarda ve daha uzun süre buhar tesir süresi koşullarında gerçekleşmesi durumunda piroliz ürünü olarak odun kömürü elde edilirken, daha yüksek sıcaklık ve daha uzun reaksiyon süresi proliz ürünü olarak daha çok gaz ürün elde eilmesini desteklemektedir. Orta sıcaklık ve kısa buhar ile tesir süresi koşullarında çalışılması ise sıvı ürün elde edilmesine sebep verir [79]. Biyokütle piroliz reaksiyonları, yavaş, hızlı ve flaş piroliz reaksiyonları olarak tanımlanmaktadır. Yavaş proliz koşulları; 400°C civarı, uzun reaksiyon süresi ve yavaş ısıtma hızında yaklaşık %30 verim ile karbonizasyon reaksiyonu meydana gelerek yüksek miktarda odun kömürü üretilmektedir. Bu ürün ısı enerjisi üretimi için direkt yakılabildiği gibi, karbon siyahı olarak da kullanılabilmektedir. Hızlı piroliz reaksiyonları 500-700°C sıcaklık aralığında, yüksek ısıtma hızında ve kısa reaksiyon süresinde gerçekleştirilirler. Bu reaksiyon ile üretilen sıvı ürün kimyasal yakıt olarak veya petrol rafinerisinde hammadde olarak değerlendirilmektedir. Flaş piroliz reaksiyonları ise yüksek ısıtma hızında ve biyokütle parçacık boyutları 105 ile 250 µm arasında değişen çok küçük biyokütlelere uygulanmaktadır. Değişik proliz koşulları ve ürünleri Tablo 3.2'de verilmiştir [77, 78, 79].

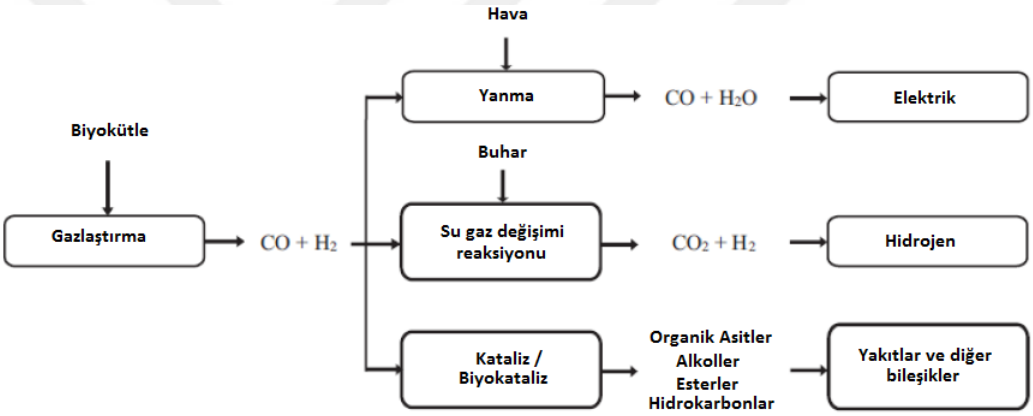
Tablo 3.2 Değişik piroliz koşulları ve ürünler [79]

Modu	Koşulları	Sıvı	Katı	Gaz
Hızlı	~500 °C, kısa sıcak buharda kalma süresi ~ 1s	%75	%12 Kömür	%13
Orta	~500 °C, kısa sıcak buharda kalma süresi ~ 10-30 s	2 fazda %50	%25 Kömür	%25
Yavaş Torefaction	~290 °C, katıların kalma süresi ~ 30 dak.	%0	% 80 Kömür	%20
Yavaş Karbonizasyon	~400 °C, Uzun buharda kalma süresi, saat veya gün	%30	% 35 Kömür	%35
Gazlaştırma	~750 °C- 900 °C	%5	%10 Kömür	%85

3.3.1.3 Gazlaştırma

Termokimyasal gazlaştırma prosesi katı veya sıvı fazdaki karbon içerikli biyokütlenin metan, hidrojen, karbonmonoksit gibi yanıcı veya karbondioksit, azot ve su buharı gibi yanıcı olmayan gaz fazındaki maddelere dönüştürülmesi prosesi olarak tanımlanmaktadır. Gazlaştırma prosesi, 600-1500°C yüksek sıcaklık aralığında, hava, buhar, oksijen veya karbondioksit gibi gazlaştırma ajanları varlığında kısmi oksidasyon şeklinde gerçekleştirilmektedir. Proses sonucu üretilen sentez gazı, son ürün olarak müşterilere satılabilir. Aynı zamanda elektrik üretiminde girdi olarak kullanılabildiği gibi yüksek kalitede yakıt veya kimyasal olarakta kullanılabilmektedir [80]. Termal dönüşüm yoluyla biyokütle gazlaştırılması prosesi odun ve tarımsal atıklar şeklindeki kuru biyokütle kaynaklarınada uygulanabilir. Bu yöntemde piroliz reaksiyonu sonucu oluşan sıvı ürün aşırı ısıtılıp gazlaştırma sonucu sentez gazı üretilmektedir. Aynı zamanda gübre veya endüstri atıkları gibi yaş biyokütleye de 220 atmosfer basıncından daha yüksek basınç altında ve 300°C'den daha üst sıcaklıklarda gazlaştırma prosesi uygulanabilmekte ve metan, hidrojen, karbonmonoksit ve karbondioksit gazları içeren ürün elde edilmektedir [81]. Gazlaştırma prosesinde üretilen son ürün olan gazın kalorifik değeri girdi olarak kullanılan biyokütle kaynağının nem içeriği ile doğrudan orantılıdır. Nem yüzdesi yaklaşık olarak en fazla %30 civarında olmalıdır. Aynı zamanda karbonmonoksit yüzdesi, karbondioksit yüzdesi ile ters orantılı olarak reaksiyon koşullarını etkilemektedir [82]. Gazlaştırma prosesi

sonucu üretilen sentez gazının çok çeşitli uygulama alanı mevcuttur. Motor veya gaz türbinlerinde sentez gazının yakılması ile elektrik ve ısı üretimi yapılabildiği gibi sentez gazı katalitik veya biyokatalitik proseslerle organik asitlerin, alkollerin üretimi için, esterlerin ve hidrokarbonların sentezlenmesinde de kullanılabilmektedir. Bu uygulama alanlarından elektrik veya ısı üretimi için biyokütle gazlaştırıcısı, bir gaz motoruna, buhar türbinime veya kazana bağlanmalıdır. Gazlaştırma prosesinde sentez gazının yanı sıra katran ve kömürde üretilmektedir. Biyoyağ yani katran, hafif aromatiklerin, poliaromatiklerin ve heterosikliklerin kompleks bir karışımıdır. Kömür ise yapısında hidrojen ve karbon içeren biyokütlenin tamamen dönüştürülmemiş kısmıdır. Bu yüzden ısıl değeri yüksektir. Gazlaştırma prosesi ve elde edilen ürünün uygulama alanları Şekil 3.6'da verilmiştir [80].



Şekil 3.6 Biyokütle gazlaştırma prosesi ve son ürün uygulama alanları [80]

3.3.1.4 Sıvılaştırma

Biyokütleye uygulanan sıvılaştırma prosesinin temeli katalizörün etkisi ile büyük moleküllerin düşük sıcaklık, yüksek basınç koşullarında küçük moleküllere parçalanması ve sıvı moleküllerin oluşmasına dayanır. Genellikle düşük sıcaklıklarda çözücü yardımı ile gerçekleştirilen sıvılaştırma prosesi, yüksek sıcaklıklarda ise basınçlı hidrojen ortamında gerçekleştirilebilir. Proses sonucu üretilen ürün açısından sıvılaştırma ve piroliz reaksiyonları birbirine benzemekle beraber farklı koşullarda gerçekleştirilmeleri ile farklılaşırlar. Sıvılaştırma reaksiyonları 525-600°C sıcaklığa ihtiyaç duyarken piroliz için daha yüksek sıcaklıklara yaklaşık 650-800°C aralığına çıkılmalıdır. Aynı zamanda sıvılaştırma reaksiyonları için ortam koşullarının 5-20 MPa aralığında yüksek basınçta olması

gerekir. Sıvılaştırma çözücü ortamında gerçekleştirildiği için pirolizde olduğu gibi kuru biyokütle şartıda aranmamaktadır. Gerçekleşme koşullarından dolayı sıvılaştırma prosesi pirolize kıyasla daha yüksek maliyet gerektirmektedir. Sıvılaştırma prosesi enerji yoğunluğu yüksek, taşınabilirliği ve depolanabilirliği daha kolay olan sıvı ürünlerin üretimi için kullanılabilmektedir [83, 84].

3.3.1.5 Torrefaksiyon

Dönüşüm prosesleri ile biyokütleden enerji üretiminde biyokütlenin düşük kalorifik değere sahip olması, yüksek nem içeriği, higroskopik yapısı, yanma prosesleri sırasında emisyon gazları vermesi, düşük enerji yoğunluğu ve düşük yanma etkinliği bazı negatif etkilere sebep vermekte ve enerji üretimi uygulamalarını sınırlandırmaktadır. Nemli yapıya sahip olan biyokütlenin yakma işlemlerinden önce kurutulması sırasında önemli bir enerji tüketimi gerçekleşmektedir. Ayrıca depolanma sırasında higroskopik yapısından dolayı tekrar nemi çekmekte bu da yanma özelliklerini azaltmaktadır. Bunların yanısıra kimyasal yapısında yüksek oranda oksijen içermesininde yakıt özellikleri üzerinde negatif etkisi bulunmaktadır. Torrefaksiyon prosesi biyokütlenin bahsedilen olumsuz etkilerini azaltarak, kimyasal özelliklerini geliştiren, enerji üretimi için daha uygun ve üstün özelliklere sahip yakıt formuna dönüştüren bir termokimyasal dönüşüm prosesidir.

Torrefaksiyon prosesi, inert ortamda veya sınırlı oksijen ortamında, 200-300 °C aralığında, yavaş ısıtma hızında biyokütle yapısındaki nem ve karbondioksiti uzaklaştırarak, hemiselüloz yapısının neredeyse tamamının bozunmasına yol açan ve biyokütle içerisindeki enerjinin büyük bir kısmını koruyarak enerji yoğunluğunu artıran termal dönüşüm yöntemi olarak tanımlanabilir. Bu proses ile biyokütle yapısından H_2O ve CO_2 uzaklaştırıldığı için yapıdaki O_2 yüzdeside azalmış olur. Böylece O/C oranı azaltılmış, gazlaştırma verimi yükselmiş hidrofobik katı yakıt elde edilir. Bu proses aynı zamanda katı ürün oluşumu sırasında duman üreten bileşenlerin yapıdan uzaklaştırılmasına sebep verdiği için ılıman piroliz olarakta tanımlanabilmektedir [85, 86].

3.3.2 Biyokimyasal Dönüşüm Prosesleri

Biyokimyasal dönüşüm proseslerinde biyokütle, enzimler veya biyokatalizörler gibi mikroorganizmalar yardımıyla yakıtlara veya değerli ürünlere dönüşümü sağlayan çeşitli katalitik kimyasal reaksiyonlara uğrar. Biyokimyasal prosesler, termokimyasal dönüşüm işlemlerine göre daha yavaş reaksiyon hızlarında daha uzun sürede gerçekleşirler. Ayrıca reaksiyon sonucu daha az yan ürün ve kirletici emisyonlar oluştuğu için enerji üretiminde çevresel dönüşüm prosesleri arasında yer alırlar. Büyük ölçekli yakıt üretimleri için termokimyasal yöntemlere göre daha düşük sıcaklıklarda çalışılabildiği ve daha büyük besleme stoğu kullanılabildiği için daha sürdürülebilir prosesler olarak bilinmektedirler.

Biyokimyasal dönüşüm prosesleri fermantasyon, oksijensiz yani anaerobik çürüme ve transesterifikasyon olarak üç ana başlıkta incelenebilir [87].

3.3.2.1 Oksijensiz (Anaerobik) Çürüme

Anaerobik yani oksijensiz çürüme, organik biyokütlenin çeşitli bakteriler yardımı ile oksijensiz ortamda biyogaz adı verilen ürüne dönüştürüldüğü biyolojik dönüşüm prosesidir. Bu proses ile üretilen biyogaz yaklaşık olarak %60 metan, %30 karbondioksit, çok az miktarda ise hidrojen sülfür içeren, kalorifik değeri yaklaşık olarak 16–20 MJm^{-3} olan ve üretildiği hammaddenin alt ısıl değerinin yaklaşık %20-30'u kadar enerji içeriğine sahip olan bir yakıttır.

Oksijensiz çürüme prosesi ile üretilen bu gaz özellikle gelişmiş ülkelerde ısı üretimi için kullanılan ucuz bir enerji kaynağıdır.

Biyogaz, doğrudan kıvılvım ateşlemeli gaz motorlarında ve türbinlerde elektrik üretimi için ve ısı üretiminde kullanılabilir. Bu yöntem yapıdaki CO_2 uzaklaştırdığı için doğal gaz kalitesinide yükseltir. Ayrıca bu proses ile toprak yapısını iyileştirme ve gübrelemede kullanılabilen katı veya sıvı faz çürüme ürünüde yan ürün olarak üretilmektedir.

Anaerobik çürüme prosesinde, tarımsal, endüstriyel, gıda ve belediye atıkları, hayvan gübreleri, endüstriyel arıtma çamurları, petrol rafineri atıkları gibi çok çeşitli biyokütle hammadde olarak kullanılabilmektedir. Fakat yapısında

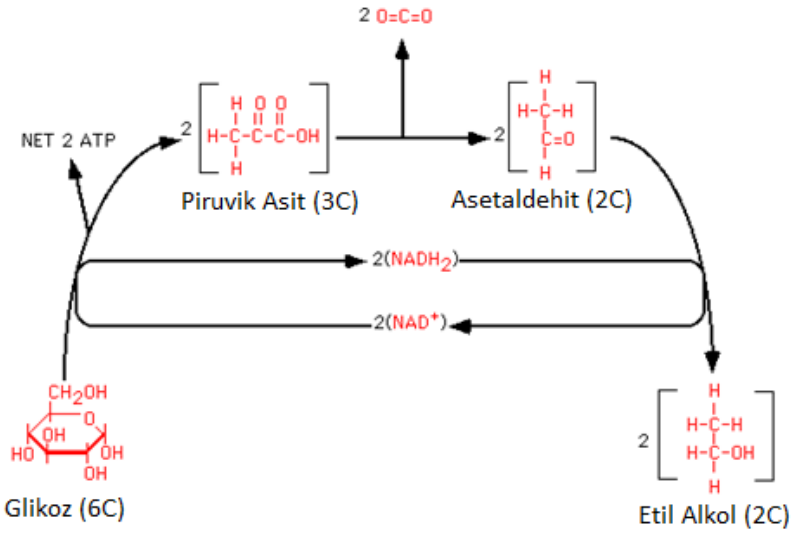
bulundurdukları ligninin bozunma zorluğundan dolayı odunsal atıklar için bu proses yüksek verimde çalışılamamaktadır [87, 88].

Biyogaz, diğer yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında daha fazla avantajlara sahip olduğu görülmektedir. İhtiyaç duyulduğu zaman üretilebilmekte ve depolanabilmektedir. Mevcut doğal gaz taşıma altyapısı kullanılarak taşınıp, dağıtılabilmekte ve doğalgazın kullanıldığı alanlarda kullanılabilmektedir.

Biyogaz teknolojisinin pişirme, aydınlatma ve kimyasal gübrelerde geleneksel kaynaklara alternatif olarak kullanılmasının sera gazı emisyonunu azaltarak küresel ısınmaya olumlu etki yapacağı bilinmektedir [89].

3.3.2.2 Fermantasyon

Biyodönüşüm proseslerinden olan fermantasyon yöntemi ile biyokütlenin kimyasal yapısını oluşturan karbonhidratlar, proteinler ve yağlar enzimler ile birlikte karbondioksit, asetik asit gibi daha küçük parçacıklara çevrilirler. Başka bir tanımla fermantasyon prosesi, Şekil 3.7'de görüldüğü gibi lignoselülozik bitkilerin kimyasal yapısında bulunan glikoz molekülünün biyoetanole yani alkole çevrildiği reaksiyonlar şeklinde de açıklanabilir [90].



Şekil 3.7 Glikoz- etil alkol fermantasyon çevrimi [90]

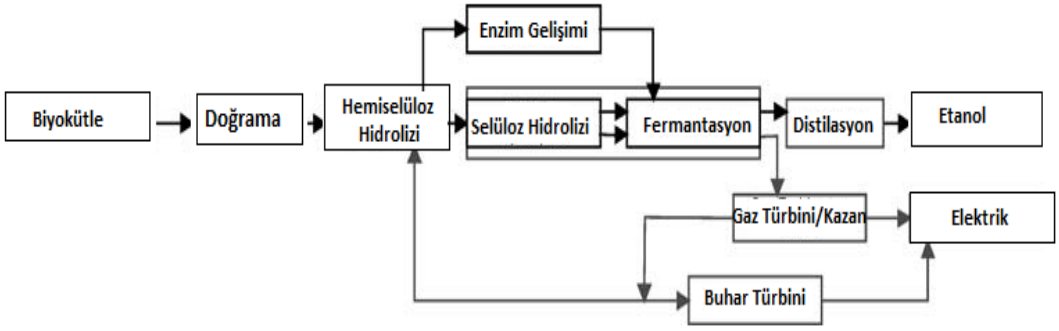
Fermantasyon prosesi genellikle şeker kamışı, şeker pancarı gibi şeker içerikli biyokütleden veya mısır, buğday gibi nişasta içerikli biyokütleden etanol üretiminde ticari olarak kullanılmaktadır. Bu dönüşüm yönteminde biyokütle

öğütüldükten sonra enzimler yardımı ile yapısındaki nişasta şekere dönüştürülür. Daha sonra ara ürün olan şeker molekülü mayalar yardımı ile etanole dönüştürülür. Üretilen etanol, damıtma prosesi ile saflaştırılarak enerji yoğunluğu yüksek bir ürün olarak elde edilir. Yan ürün olarak oluşan katı atık hayvan yemi olarak kullanılabilirken, küspe şeklinde daha sonra gazlaştırma prosesinde veya kazanlarda yakıt olarak da kulanılabilmektedir. Yaklaşık olarak bu prosedür ile 1000 kg kuru mısırdan 450 L etanol üretmek mümkündür.

Bu proses ile etanol üretiminde uzun polisakkarit zincirlerine sahip olan lignoselülozik biyokütlenin yani odunsu biyokütlenin kullanımı daha karmaşık bir prosedür gerektirmektedir. Odunsu biyokütlenin kullanıldığı proseslerde ara ürün olarak oluşan şeker molekülü etanole fermente olmadan önce asidik veya enzimatik hidroliz gerektirir. Hidrolitik fermantasyon prosesi ile etanol üretimi Şekil 3.8'de verilmiştir [75].

Fermantasyon prosesi ile üretilen etanol düşük oranlarda benzin ile karıştırılarak araçlarda adaptasyona gerek duyulmadan kullanılabilmektedir. Etanol normal benzin ile karşılaştırıldığında NOx ve toz emisyonunu düşürme avantajına sahiptir.

Şeker kamışı, mısır gibi biyokütlerden etanol üretimi Brezilya, Fransa ve Amerika'da yaygın olarak kullanılan bir biyokimyasal dönüşüm prosesidir [75, 88, 91].

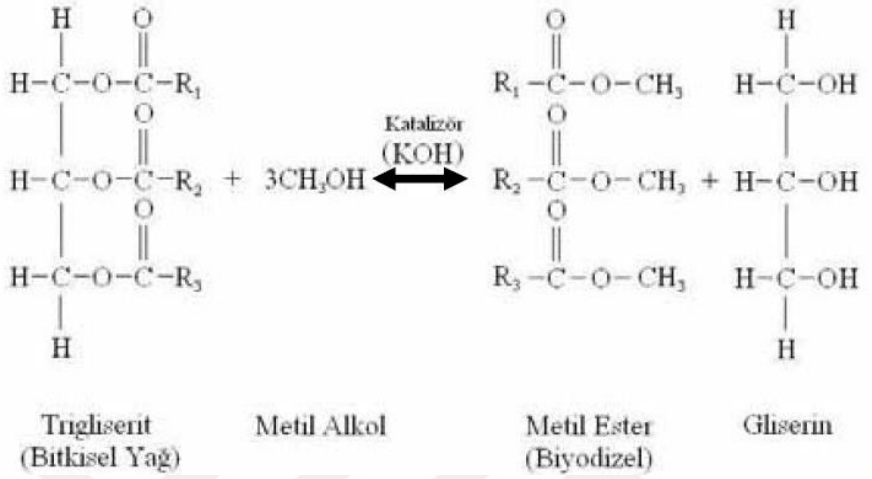


Şekil 3.8 Hidrolitik fermantasyon ile etanol üretimi [75]

3.3.3 Fizikokimyasal Dönüşüm Prosesleri (Transesterifikasyon)

Fizikokimyasal dönüşüm prosesi, yüksek yoğunluklu biyoyakıt üretimi için kullanılan bir dönüşüm prosesi olarak bilinmektedir. Fizikokimyasal dönüşüm proseslerinden biri olarak bilinen transesterifikasyon yöntemi ile kolza tohumu,

keten tohumu gibi bitkisel veya hayvansal kaynaklı yağ asitleri, alkol yani baz ve katalizör varlığında tepkime vererek, gliserin ve oksijen içerikli bir yakıt olan yag asidi alkil esteri bilinen ismiyle biyodizel üretilir. Dünya'da motor yakıtlarının özelliklerini geliştirmek için en fazla yararlanılan proses transesterifikasyon'dur. Yağ asitleri transesterifikasyon tepkimesi Şekil 3.9'da verilmiştir [92].



Şekil 3.9 Bitkisel yağ asitlerinin alkol ile veridği transesterifikasyon tepkimesi [92]

Dünya genelinde birinci nesil biyodizel üretiminde kullanılan bitkisel yağlar sırasıyla %80 civarında kolza tohumu ve %10 civarında ise ayçiçek yağıdır. Evsel atık yağlar ve mikrobiyal yağlar ise ikinci ve üçüncü nesil biyodizel üretimi için kullanılan biyokütle kaynaklarıdır. Bitkisel kaynaklı yağlar viskoziteleri, yoğunlukları ve molekül ağırlıkları yüksek olduğu için dizel motor kullanımlarında sorunlara sebep olmaktadır. Bu prosesin hedefi yakıtın viskozitesini ve konsantrasyonunu azaltmaktır. Transesterifikasyon prsesi ile üretilen yakıtın viskozluğu 1/10, molekül ağırlığı ise 1/3 oranında azalmaktadır. Ayrıca biyodizel yakıtının uçuculuğu ve yoğunluğunda da düzelmeler meydana gelmektedir.

Biyodizel, fizikokimyasal özellikleri dizel yakıta çok yakın olan, toksik etkisi olmayan, biyobozunur olan, yüksek oksijen içeriği ve yağlanma özelliklerinden dolayı dizel motorlarda verimli yanmayı sağlayan yenilenebilir bir yakıttır [55].

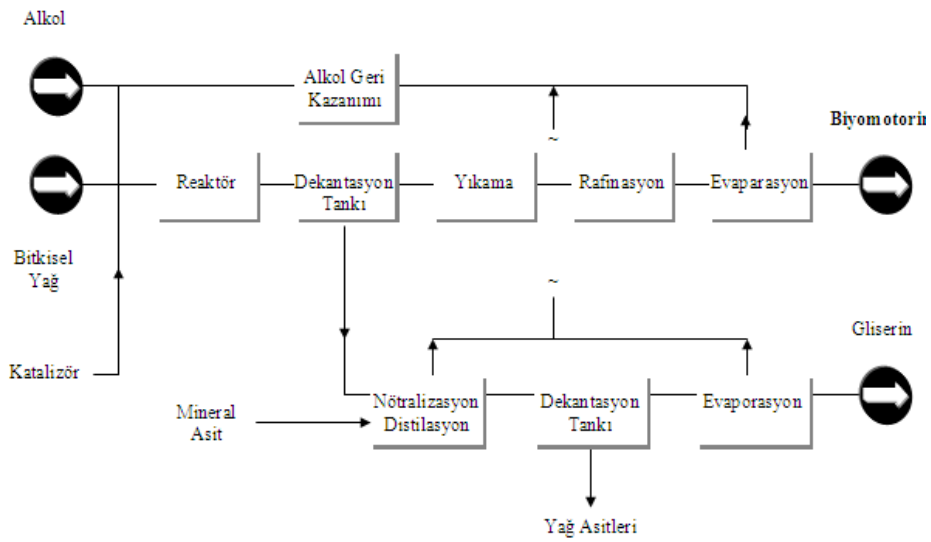
Proses girdilerinden olan alkolün, katalizörün türü, miktarı, proses sıcaklığı ve tepkimedeki su oranı esterifikasyon proses verimini etkileyen başlıca faktörlerdendir. Proses reaktanlarından olan alkolün mol yüzdesi artırılarak, ürün verimi artırılabilir. Proses maliyetine olumlu etkisi ve reaksiyon dönüşüm

yüzdesinin daha yüksek olmasından dolayı en fazla yararlanılan alkol türü metil alkoldür. Metil alkolden başka etil alkol, izopropil ve bütil alkolde bu proseste yaygın olarak kullanılan alkol çeşitleridir.

Transesterifikasyon prosesi dönüşüm yüzdesini ve tepkime hızını yükseltmek için en fazla kullanılan sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit katalizörleridir. Bu tür katalizörlerden farklı olarak asidik katalizörlerde kullanılabilir. Fakat bu katalizörler ile gerçekleştiriler tepkimelerin hızları ve dönüşüm yüzdeleri daha azdır. Ayrıca reaktan olarak kullanılan alkol miktarı daha çoktur.

Reaksiyon koşullarındaki su miktarıda çok önemlidir. Transesterifikasyon reaksiyonları çift yönlü reaksiyonlar olduğu için su miktarındaki artış, reaksiyonu ters yöne çevirir ve hidrolize neden olur.

Biyodizel üretim prosesi beş ana basamakta meydana gelmektedir. Bu basamaklar; alkol-katalizörün karışım oluşturması, transesterifikasyon tepkimesi, gliserin uzaklaştırılması, alkolün distile edilmesi ve yıkama basamağıdır. Biyodizel eldesi proses basamakları Şekil 3.10'da verilmiştir [90, 92, 93].



Şekil 3.10 Biyodizel proses basamakları [90]

3.4 Lignoselülozik Biyokütle'nin Kimyasal Yapısı

Lignoselülozik biyokütle, sert odunları, yumuşak odunları ve enerji içeriği yüksek bitkileri içeren ana yapısı ağırlıkça yaklaşık %50 selüloz, %25 hemiselüloz ve %25

lignin moleküllerinden oluşan az miktarda da su, ekstraktif madde ve inorganik bileşik olan kül içeren komposit bir malzemedir. Yapıdaki moleküllerin oranları biyokütlenin cinsine göre farklılık göstermektedir. Sert odunlarda selüoz, hemi selüloz ve ekstrakt yüzdesi daha fazla iken yumuşak yapılı odunlarda ise lignin yüzdesi daha fazla bulunur. Bazı lignoselülozik biyokütlelerin kimyasal yapısı Tablo 3.3'de verilmiştir. Yapıda bulunan lignin, hemiselüloz ve selüloz molekülleri biyokütleye esneklikle birlikte yapısal güç vermek için birbirlerine bağlı bir şekilde bulunmaktadırlar [94, 95, 96].

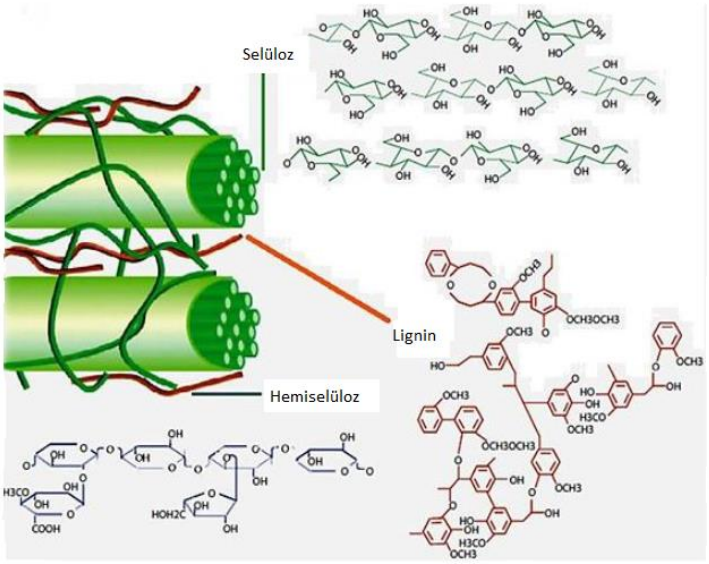
Odunsu biyokütlenin yapısında bulunan diğer bir bileşen olan ekstraktif maddeler ise çözücü yardımı ile ekstrakte edilebilen reçine, şeker, pektin, organik asitler, nişasta gibi maddeleri molekülleri içerirler ve toplam ağırlığın yaklaşık %5-15'lik kısmı oluştururlar [97].

Tablo 3.3 Bazı lignoselülozik bitkilerin kimyasal yapıları [96]

Lignoselülozik Malzeme	**%Selüloz**	**%Hemiselüloz**	**%Lignin**
Sert Ağaç Sapları	40-55	24-40	18-25
Yumuşak Ağaç Sapları	45-50	25*35	25-35
Fındık Kabuğu	25-30	25-30	30-40
Mısır Koçanları	45	35	15
Otlar	25-40	35-50	10-30
Kağıt	85-99	0	0-15
Buğday Samanı	30	50	15
Kimyasal Hamurlardan Atık Kağıtlar	60-70	10-20	5-10
Dallı Darı	45	31,4	12,0

Selüloz, lignoselülozik biyokütleye mekanik dayanıklılığı ve kimyasal stabiliteyi veren hücre duvarlarındaki ana yapısal bileşendir. Fotosentez sırasında güneş enerjisi selüloz formunda depolanır. İkinci önemli yapıyı ise bitki hücre duvarlarında yer alan farklı C5 ve C6 şekerlerinin kopolimeri şeklinde hemiselüloz bileşikleri oluşturur. Lignin ise bitki duvarında koruyucu tabaka oluşturan

aromatik bileşiklerden oluşan bir polimerdir. Hemiselülozik biyokütlenin kimyasal yapısı Şekil 3.11'da verilmiştir [73, 96].



Şekil 3.11 Hemiselülozik biyokütlenin kimyasal yapısı [73]

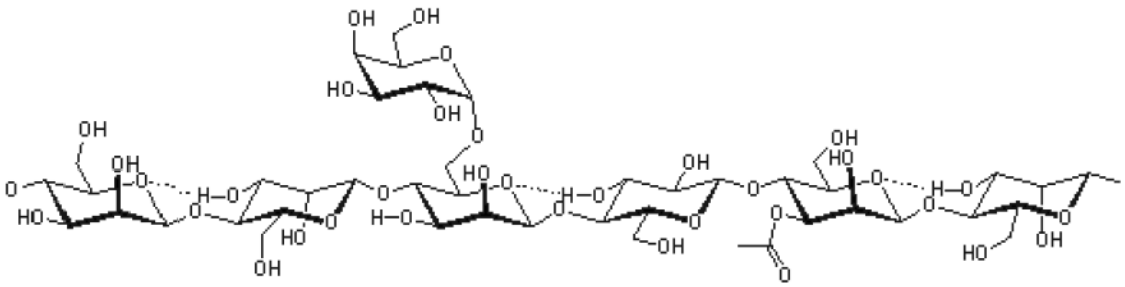
3.4.1 Selüloz

Selüloz, lignoselülozik biyokütlenin hücre duvarının yaklaşık %50'sini oluşturan $(C_6H_{10}O_5)_n$ kimyasal yapısına sahip doğrusal zincir yapıda homopolisakkarittir. Yapısında ağırlıklı olarak kristalin bölgeler bulundurmakla beraber küçük amorf bölgelerde içerirler. Selülozik polimerler mikrolifler halinde hücre duvarında bulunarak lignoselülozik biyokütlenin mekanik dayanıklılığını artıran lifli yapısını meydana getirirler. Selüloz monomerlerinden oluşan polimerik zincirler birbirlerine hidrojen bağları ile bağlıdırlar. Bu şekilde birbirine paralel selüloz zincirlerinin bulunduğu kristalin bir yapı oluştururlar. Bu kimyasal yapı biyokütlenin sulu çözeltilerde tamaman çözünmesini engelleyen hemiselüloz ve nişastaya kıyasla daha termal ve biyokimyasal dayanıklılığı bulunan bir yapıdır. Selüloz, kâğıt, suni ipek, selofan gibi birçok maddenin üretiminde hammaddeyi oluşturmaktadır [73, 94, 98].

3.4.2 Hemiselüloz

Hemiselüloz molekülleri yapısında glukoz, pentoz ve hekzoz monosakkaritlerini bulunduran kısa ve dallanmış zincirlerden oluşan bir yapıya sahiptir. Hemiselüloz yüksek derecede dallanmış bir yapıya sahip olmasından dolayı kristalin yapısı

düşük daha amorf yapıdadırlar ve polimer zincirlerine bağlı asetil grupları içerirler. Bu gruplar hemiselülozun sudaki çözünürlüğünü artırır. Fakat düşük sıcaklıklarda suda çözünmez. Buna rağmen selüloza göre daha düşük sıcaklıklarda hidrolize olur. Suda çözünürlükleri az olmasına rağmen asidik ve bazik çözücülerde çözünebilirler. Kolay çözünebilme özellikleri amorf yapılar içermeleri ve düşük molekül ağırlığına sahip olmalarına bağlanabilir. Biyokütle yapısındaki hemiselüloz kimyasal yapısı Şekil 3.12'da verilmiştir [95, 96].



Şekil 3.12 Hemiselüloz kimyasal yapısı [95]

3.4.3 Lignin

Lignin, genellikle odunsu biyokütlenin hücre duvarlarında selüloz ile birlikte bulunan dallanma derecesi yüksek amorf, kompleks ve üç boyutlu aromatik bir polimerdir. Lignoselülozik bitkinin yapısında en fazla bulunan 2. Polimerdir. Biyokütlelerin birçoğu hücreler arası boşluklarında %20-30 civarında lignin molekülü içerirler. En büyük görevi selüloz liflerini birbirlerine yapıştırmaktır. Lignin molekülünü oluşturan temel birimler birbirlerine ester bağı ile bağlıdırlar fakat karbon-karbon bağlarıda içerirler. Ayrıca yapıda hidroksil, karbonil gibi fonksiyonel yan gruplarda görülebilir. Lignin polimerinin alkali ortamlardaki çözünürlüğü yüksekken, sulu ortamdaki çözünürlükleri düşüktür. Ayrıca mikrobiyal çürümeye karşıda dayanıklıdır [73, 98].

3.5 Biyokütle Kullanımının Avantajları

Biyokütlenin en büyük avantajı yenilenebilir, sürdürülebilir ve tükenmeyen bir enerji kaynağı olmasıdır. Özellikle bitkisel, tarımsal kaynaklı biyokütle her yerde yetiştirilebileceği için sürdürülebilirliği yükseltir. Ormansal biyokütle kullanımı

ormanların daha bakımlı olmasına ve orman yangınlarının azalmasına yardımcı olur.

Biyokütle kaynakları, atmosferdeki karbon emisyonu miktarını artırmadığı için karbondioksit nötür bir enerji kaynağı olarak da bilinmektedir. Çünkü biyokütlenin yanma prosesinde atmosfere verdiği karbondioksit gazı, biyokütlenin metabolik faaliyetleri sırasında fotosentez için kullanılarak atmosferde CO_2 gazı konsantrasyonunun değişmemesine neden olur. Yani biyokütle, fosil kaynaklı yenilenemeyen enerji kaynaklarından farklı olarak doğadaki karbon döngüsünün bir kısmını oluşturur. CO_2 emisyonu sıfırdır ve küresel ısınmaya dolayısıyla iklim değişikliklerine neden olmaz. Aynı zamanda enerji kaynağı olarak fosil yakıtlar yerine kullanılması da sera gazı etkisinin azaltılmasına yardımcı olur. Biyokütlenin doğada kendiliğinden ayrışması sonucu açığa çıkam metan gazı, karbondioksit gazına göre yaklaşık 20 kat daha aktif olduğu için, biyokütlenin bozunma sürecine girmeden enerji üretiminde kullanılması sera gazı emisyonuna ekstra olumlu bir katkı sağlar [99].

Yenilenemeyen enerji kaynaklarının aksine biyokütlenin yapısında kükürt, azot, silisyum gibi elementlerin içeriği de düşüktür. Dolayısıyla CH_4, CO_2, NO_X, SO_X gibi zararlı emisyonların azaltılmasına yardımcı olurlar. Yapısında düşük oranda kükürt elementi bulundurduğu için atmosferdeki kükürt dioksit gaz emisyonuna katkısıda azdır ve asit yağmurlarına sebebiyet vermezler. Ayrıca enerji üretmek için kullanıldıklarında kömüre oranla çok daha az kül üretirler. Üretilen bu külde tarım alanlarında toprağa katkı maddesi olarak verilebildiği için geri dönüşümüde sağlanmış olur. Aynı şekilde belediye atıkları, evsel atıklar, tarımsal atıklar, orman ve endüstriyel atıklarda biyokütle kaynağı olarak kullanılabildiği için atıkların değerlendirilmesine ve atık yönetimine de yardımcı olur. Bu da sosyo ekonomik büyümeye yardımcı olur [84, 100].

Biyokütle kaynakları aynı zamanda yüksek reaktiviteye sahip biyobozunur kaynaklar oldukları için dönüşüm prosesleri sırasında yenilenemeyen fosil kaynaklara göre daha düşük başlangıç ateşleme ve yanma sıcaklığına ihtiyaç duyarlar.

Özellikle gelişmekte olan ülkelerde biyokütleden üretilen biyodizel, biyoetanol gibi biyoyakıtların kullanımı, bu ülkelerin enerji üretiminde dışa bağımlılıklarını azaltmada büyük rol oynar [100].

3.6 Biyokütle Kullanımının Dezavantajları

Biyokütle kaynaklarının diğer yenilenemeyen enerji kaynaklarının aksine daha yüksek oksijen ve hidrojen yüzdesine sahipken, enerji içeriklerinin ise daha düşük olduğu bilinmektedir. İçerdiği oksijen miktarından dolayı nem miktarındaki yükseklik biyokütleye hidrofilik bir yapı kazandırmakta ve depolanabilirliğini zorlaştırmaktadır. Ayrıca biyokütle elde edildiği kaynağa bağlı olarak yapısında suda çözünür fraksiyonlar ve gümüş, brom, nikel gibi bazı eser elementlerde içerebilir. Bu özellikler, biyokütleden enerji elde edilmesinde kullanılan dönüşüm proseslerinde olumsuzluklara sebep vermektedir.

Biyokütle yapısındaki O/C ve H/C oranlarının yüksek olması, enerji kaynağının yakıt özelliğini azaltmaktadır. Bu olumsuzluğu gidermek amacıyla biyokütleye bazı ön iyileştirme prosesleri uygulanmakta ve uygulanan bu ek işlemler maliyeti artırmaktadır. Biyokütlenin kütlesel yoğunluğunun az olmasıda depolanabilirliği ve taşınma koşullarında olumsuzluklara neden olmaktadır [101].

Biyokütlenin, bölgesel ve mevsimsel koşullara bağlı olarak kullanılabilirliği ayrıca yetiştirilmesi, hasat edilmesi, toplanması, depolanması ve taşınmasıda ek maliyetlere sebep verebilir. Günümüzde gelişmiş bir biyokütle pazarının olmamasıda yatırım maliyetlerini artırmaktadır [100].

Biyokütle üretimi tarımsal olaylara bağlı olduğu için, tarım alanlarının biyokütle üretiminde daha fazla kullanılması, diğer tarım ürünleri için gerekli olan alanı kısıtlamakta bu da pazar fiyatlarını artırabilmekte ve aynı zamanda tarımsal alanlar için rekabete neden olmaktadır [102].

4
ENERJİ TARIMI

4.1 Türkiye'de Enerji Tarımı

Toplumsal gelişme sonucu enerji talebinde artış oluşmasına rağmen aynı zamanda çevresel kirliliğinde ciddi boyutlara varması enerji üretimi için alretnatif kaynaklara yönelimi artırmıştır. Oluşan bu enerji sorunu sosyal kalkınmanın sürdürülebilirliği için de kritik bir önem taşımaktadır. Bu yüzden hükümetler mevcut enerji kaynaklarını çeşitlendirebilmek ve özellikle enerji bakımından dış ülkelere bağımlılığı azaltabilmek için değişik stratejiler geliştirmişler ve biyokütleden üretilen biyoenerji üzerine odaklanmaya başlamışlardır. Biyoenerjinin mevcut enerji kaynaklarına göre birçok avantaja sahip olmakla beraber, en büyük avantajı yanma prosesi sonucu açığa çıkan CO_2 miktarının bitkiler tarafından daha önce asimile edilen miktara eşit olmasından dolayı atmosferdeki CO_2 miktarını artırmaması ve ekosistemdeki dengeye yardımcı olmasıdır. Bu nedenle biyoenerji "yeşil enerji" olarakta tanımlanmaktadır. Daha etkili biyoenerji üretimi için yaralanılabilecek enerji kaynaklarından birinin de enerji bitkileri olduğu bilinmektedir.

Enerji bitkileri, farklı dönüşüm prosesleri ile bileşimleri petrole benzeyen yakıtlara dönüştürülebilen bitkiler olarak tanımlanabilmektedir. Enerji bitkileri, düşük yetiştirme maliyetleri, çorak alanlarda bile yetiştirilebilmeleri ve bileşenlerinin petrol yakıt bileşenlerine benzerliği gibi yüksek ekonomik faydalara sahip olmaları ve ayrıca enerji dönüşüm teknolojilerinin basit olmaları sebebi ile çok yaygın uygulama alanlarına sahiptirler.

Enerji bitkileri genel olarak üç katogoride sınıflandırılmaktadır. İlk katogoriye girenler hidrokarbonca zengin olan bitkilerdir. Bu enerji bitkilerinin yapısındaki hidrokarbonlar distilasyon edilerek, petrolden distile edilen akaryakıt gibi yağlara dönüştürülebilirler. İkinci tip enerji bitkileri ise karbonhidratlar bakımından zengin olan bitkilerdir. Bu bitkilerdeki karbonhidratlarda termokimyasal prosesler

ile etanol, metanol vb. yakıt olarak kullanılabilen kimyasallara dönüştürülebilirler. Özellikle biyoetanol üretiminde Dünya genelinde en yaygın kullanılan enerji bitkileri tatlı sorgum, dallı darı ve şeker kamışı şeklinde sıralanabilir. Üçüncü sınıfa giren enerji bitkileri ise gres yağı bakımından zengin olan bitkilerdir. Bu bitkilerdeki gres yağı ise mikrobiyal veya enzimatik kataliz ile biyodizel gibi yakıt yağlarına çevrilebilmektedir. Bu sınıfa giren enerji bitkilerinden biyodizel üretimi için en yaygın kullanılanlar kanola, soya, kolza, aspir ve ayçiçek yağlı tohumları şeklinde sıralanabilir. Ayrıca yüksek tutuşma sıcaklığı ve stabilitesinden dolayı yüksek devirli uzay araçları veya yarış arabalarında alternatif yakıt kaynağı olarak hint yağından üretilen yakıtlar kullanılabilmektedir. Bir başka alternatif yakıt üretiminde kullanılabilen ve stratejik öneme sahip olan enerji bitkisi de jojoba yağlı tohumundan üretilen yüksek sıcaklık ve basınç koşullarına karşı yüksek direnç gösteren jojoba yağıdır. Bu yağda üstün özelliklerinden dolayı roket, metalürji ve füze sektöründe kullanılmaktadır. Dünyada ki biyodizel üretiminin yaklaşık %86'sını karşılayan kolza yağlı tohumuda yüksek kaynama noktasından dolayı en çok yararlanılan enerji bitkilerinden biridir [103, 104]. Ayrıca alternatif tarımsal enerji bitkilerinin sürdürülebirliğinin sağlanması ve tarıma elverişli olmayan, kurak ve dağlık alanların değerlendirilebilmesi amacı ile enerji tarımı şeklinde tanımlanan bir tarım çeşidi oluşmuştur. Enerji tarımı özellikle enerji bitkilerinin büyük bir kısmını oluşturan şeker kamışı, dallı darı, tatlı sorgum, miscanthus, mısır gibi bir yıllık C4 sınıfı bitkiler, şeker pancarı, arpa, buğday gibi C3 sınıfı bitkiler veya büyüme hızı yüksek olan kavak, akçaağaç, okaliptüs, söğüt vb. ağaçların yetiştirildiği enerji ormanları şeklinde yapılmaktadır. Kuraklığa dayanıklı çorak ortamlarda yetiştirilebilme özelliğine sahip olan C4 bitkileri atmosferdeki karbondioksit ve suyu verimli kullandıkları ve yüksek fotosentez etkinliğine sahip oldukları için geniş tarımsal yetiştirciliği yapıldığında yeryüzündeki karbondioksit miktarını ve sera gazı etkisini düşüreceği öngörülmektedir.

Enerji tarımı ile yıllık olarak bir hektarlık alandan üretilen şeker kamışı bitkisinden yaklaşık 3500 litre alkol üretimi sağlanabilmektedir. Bunu yıllık bazda 2000 litre alkol üretilebilen mısır izlemektedir. Enerji tarımı, biyoyakıt üretilebilecek bitki yetiştiriciğinin haricinde tarım işçi istihdamını sağlaması, yeni iş olanakları

oluşturması, büyük kentlere göçün azaltılması, çorak toprakların değerlendirilmesi ile kırsal alanlarda sosyo ekonomik yönden bölgesel kalkınmaya katkı sağlaması gibi avantajlara da sahiptir. Ayrıca enerji tarımı sayesinde ürün çeşitliliği ile tarımsal ekolojinin gelişimi sağlanmakta, hasat sonrası elde edilen atıklar ve gübre çiftçiye ekstra bir kullanım alanı vererek organik tarımı desteklemektedir. Enerji tarımına verilen önem ile kırsal alanlarda değişik yönlerden yaratılabilecek kalkınma Şekil 4.1'de verilmiştir [104, 105, 106].

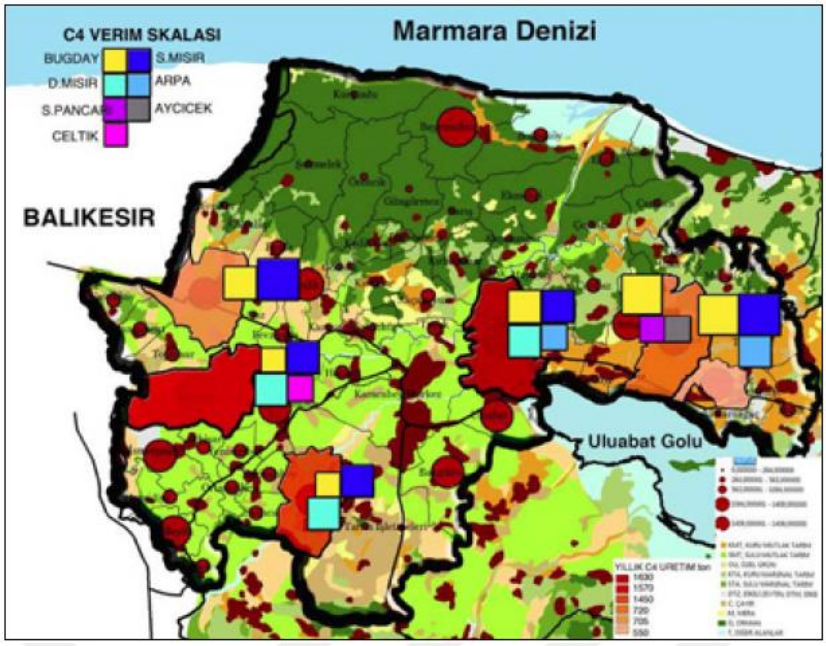


Şekil 4.1 Enerji tarumının kırsal alandaki kalkınmaya etkisi [105]

1970'ler de yaşanan enerji krizi ile Uluslararası Enerji Birliği'ne dahil olan ülkeler hızlı büyüyen ağaçlardan oluşturulan enerji ormanları yetiştiriciliğine başlamışlar ve bu ormanlardan sağladıkları odunsal biyokütleyi kullanarak ısı ve elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirmişlerdir. Bu ülkelerden biri olan Fillandiya'da enerji ihityacının yaklaşık %22'si, İsveç'te ise %18'i bu şekilde enerji ormanlarından sağlanmaktadır. 2050 yılına kadar da bu oranın enerji birliği ülkeleri arasında %50'lere ulaşacağı düşünülmektedir. Türkiye'de Uluslararası Enerji Birliği ülkeleri arasında yer almaktadır. Biktilerin fotosentez yolu ile dönüştürdükleri enerji miktarının, dünyanın yıllık olarak ihtiyaç duyduğu enerjinin on katına eşit olduğu düşünülürse enerji ormanlarının önemi daha iyi anlaşılmaktadır [107].

Birezilya'da bu konuda iyi örneklerden biridir. Ülkede 1989 yılından beri benzin yerine büyük ölçüde alternatif biyoyakıt olarak şeker kamışından üretilen biyoetanol kullanılmaktadır. Bu sayede yaklaşık 7 milyar dolar yatırıma karşılık 1976- 87 yılları arasında 12 milyar dolar petrolden tasarruf sağlanmıştır ve halihazırda her yıl üretim maliyeti %4 oranında azalmaya devam etmektedir [104].

Enerji İşleri Genel Müdürlüğü verileri ve Türkiye'nin enerji üretim kapasitesi göz önüne alındığında ise ülkenin enerji ihtiyacının çoğunun biyokütle enerjisi ile özellikle de enerji tarımı ile üretilen bitkiler ve organik atıklar yoluyla karşılanabileceği öngörülmektedir. Enerji ormanlarından sağlanabilecek biyokütle miktarı yıllık 22 ton/hektar şeklindedir. Türkiye toprak ve iklim koşullarının elverişli olmasından dolayı enerji tarımı için son derece önemli bir çografyada bulunmaktadır. Türkiye'de enerji tarımınına uygun kullanılabilir yirmi beş milyon hektar tarım alanı mevcuttur. Bu tarım alanlarının neredeyse 1,5 milyon hektarlık kısmında biyokütle kaynağı olarak yağlı tohum yetiştiriciliği yapılabilmektedir [108]. Türkiye'de enerji tarımı açısından yapılan başka bir çalışmada Karacabey kırsalında biyokütleden elde edilen biyoenerji kullanım için C4 bitkileri üretim verimliliğinin incelenmesi yapılmıştır. Kırsaldaki köylerden Sultaniye köyünde dört enerji bitkisi yetiştirilerek, üretimde sürekliliğin sağlanabileceği, üretilen enerji bitkilerinin biyokütle enerji üretimi için kullanılabileceği ve bu tarımın bölgenin sosyo ekonomik kalkınmasını destekleyeceği görülmüştür. Karacabey kırsalı enerji tarımı kapsamında yetiştirilen C4 enerji bitkilerinin verim skalası Şekil 4.2'de gösterilmiştir [105].



Şekil 4.2 Karacabey kırsalı enerji tarımı ve C4 enerji bitkileri verim skalası [105]

5
TORREFAKSİYON

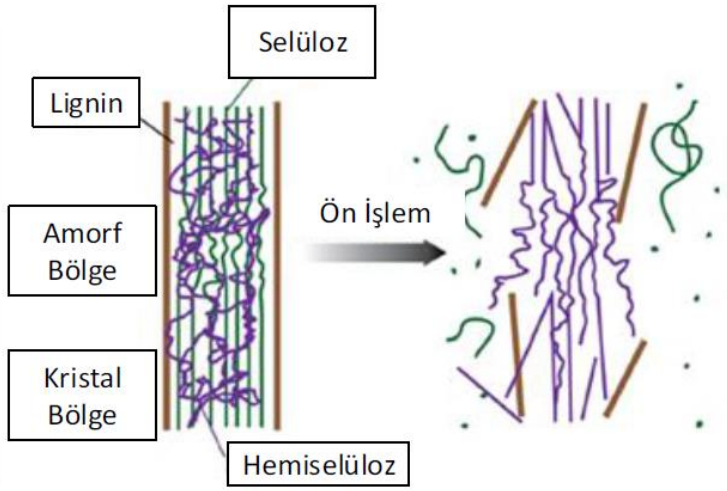
5.1 Torrefaksiyon Prosesine Genel Bakış

Biyokütleden enerji üretmek amacı ile çeşitli teknolojilerden yararlanılmaktadır. Enerji dönüşüm proseslerinden nasıl yararlanılacağı üretilecek son ürünün ve kullanılacak ham biyokütlenin özelliklerine göre değişmektedir [109,110].

Biyokütlenin, yüksek nem içeriği, hidrofilik özelliği, yanma sırasında duman oluşturması, yanma ürünlerinin sera gazı etkisini artırabilmesi ayrıca düşük dönüşüm verimi sonucu enerji yoğunluğunun ve kalorifik değerinin düşük olması gibi bazı olumsuz fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı enerji üretimi amacıyla dönüşüm proseslerinde kullanımı sınırlanabilmektedir. Son zamanlarda, biyokütle kullanımlarında oluşan bu olumsuzlukları engellemek ve enerji üretimi için biyokütlenin fizikokimyasal özelliklerini geliştirmek amacı ile termokimyasal dönüşüm proseslerinden torrefaksiyon prosesi uygulanmaktadır. Bu sayede nem içeriği azaltılmış, kalorifik değeri ve enerji yoğunluğu artırılmış, ayrıca lignoselülozik polimerler arasındaki bağların kırılmasından dolayı da öğütülebilirliği iyileştirilmiş ürünler elde edilebilmektedir [111].

Torrefaksiyon, ligno-selülozik biyokütlenin inert ortamda, 200–350°C ve 15–60 dakika kısa reaksiyon süreleri içerisinde, 50°C/dakika'dan daha düşük ısıtma hızında ısıtılmasıyla oluşan termokimyasal iyileştirme prosesi olarak tanımlanmaktadır. Torrefaksiyon sırasında biyokütle yapısında bulunan hemiselüloz, selüloz ve lignin polimerleri termal bozunmaya uğrayarak depolimerize olmaktadır. Proses sonucu biyokütle içeriğindeki uçucu gazlar ve nem yapıdan uzaklaşırken, lignin, selüloz ve hemiselüloz yapılarında ise bozunmalar meydana gelmektedir. Elde edilen torrefiye üründe O/C oranı daha düşük olacağı için, daha yüksek karbon içerikli, yüksek kalorifik değerli ve yüksek enerji yoğunluklu enerji içeriği yüksek biyoyakıt elde edilmiş olur. Ayrıca, torrefaksiyon, biyokütle yapısındaki selüloz, hemiselüloz ve ligninin kısmi

bozunmasına, lif uzunluğunun ve mekanik stabilitenin azalmasına neden olacağı için biyokütlenin fibröz yapısını ve dayanıklılığını azaltarak öğütülebilirlik özellikleri geliştirilmektedir [86, 112]. Torrefaksiyon prosesi uygulanmış lignoselülozik biyokütle'nin kimyasal yapısında oluşan değişiklik Şekil 5.1'de verilmiştir [113].



Şekil 5.1 Torrefaksiyon prosesi uygulanmış biyokütlenin kimyasal yapısındaki değişiklik [113]

5.2 Torrefaksiyon Proses Mekanizması

Torrefaksiyon prosesi süresince biyokütlenin polimer-hücre yapısında termal ayrışmadan dolayı birtakım reaksiyonlar meydana gelmektedir. Torrefaksiyon mekanizması ilk önce biyokütle yapısındaki nemin buharkaşarak uzaklaşması daha sonra ise sırasıyla hemiselülozun, lignin molekülünün ve selülozun yapısında ayrışmaların meydana gelmesiyle gerçekleşir. Torrefaksiyon prosesi sırasında biyokütle yapısında %80 oranında bulunan uçucu bileşen uzaklaşırken, %20 oranındaki karbon miktarıda artar. Torrefaksiyon reaksiyon mekanizması Şekil 5.2'de verilmiştir [101].

Lignoselülozik biyokütlenin sıcaklık etkisiyle yapısında aşağıdaki değişiklikler meydana gelmektedir [114]:

- Fiziksel olarak kuruma
- Lignin yumuşaması
- Depolimerizasyon ve kısalan polimerlerin yoğunlaşması

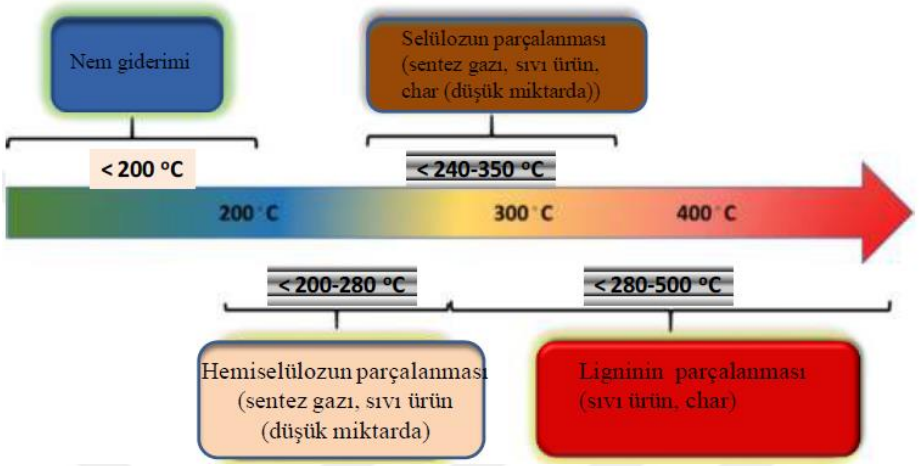
- Sınırlı buharlaşma ve karbonizasyon
- Daha kapsamlı buharlaşma ve karbonizasyon

Düşük torrefaksiyon sıcaklığında meydana gelen sınırlı buharlaşma ve karbonizasyondan dolayı hemiselüloz yapısında ayrışma meydana gelirirken aynı zamanda lignin ve selüloz yapısında da küçük ayrışmalar gerçekleşir. Dolayısıyla sıcaklık parametresinin biyokütle ayrışma derecesi üzerinde önemli bir etkisi olduğu bilinmektedir**.**

Torrefaksiyon reaksiyonu başlangıcında 100-120°C aralığında ilk önce yapıdan büyük miktarda nem uzaklaşır. 200°C sıcaklığında biyokütle yapısındaki hemiselüloz molekülünden uçucu maddelerin sınırlı olarak uzaklaşması ve karbonizasyon reaksiyonu başlar. 200-280°C aralığında reaksiyon ekzotermik olarak devam eder. Sadece hemiselüloz yapısında meydana gelen depolimerizasyon ile sınırlı buharsızlaştırma reaksiyonu oluşurken, lignin ve selülozda ise hafif depolimerizasyon ve buharsızlaştırrma reaksiyonları meydana gelir. Bu sıcaklıkta biyokütle kahve rengileşmeye başlar. Yapıdan ekstra nem, karbondioksit, büyük miktarda asetik asit ile düşük enerji içerikli bazı fenolik bileşikler uzaklaştırılır. Böylece enerji içeriğinin büyük bir kısmı torrefiye üründe kalırken, hidrofilik özelliğini kaybeder. Torrefaksiyon reaksiyonu sırasında hemiselülozun yapısında görülen depolimerizasyon ve sınırlı buharsızlaştırma reaksiyonlarından dolayı biyokütlenin yapısında önemli bir kütle kaybı gözlenir. 280°C'de reaksiyon devam ederken, karbon monoksit, fenoller, kresoller gibi hidrokarbonlar ve diğer daha ağır ürünlerin oluşumundan dolayı gaz ürün yüzdesi artmaya başlar. 300°C' den yukarıdaki sıcaklıklarda ise piroliz reaksiyonu başladığı için biyokütlenin aşırı buharlaşması başlar. Bu yüzden daha yüksek sıcaklıklarda torrefaksiyon prosesinin gerçekleştirilmesi önerilmez [107].

240°C'den düşük sıcaklıklardaki hafif torrefaksiyon reaksiyonunda büyük oranda hemiselüloz ayrışması olduğu için bu sıcaklık aralığında proses, hemiselüloz ayrışması ile karakterize edilirken, 270°C' den yukarıdaki sıcaklıklarda meydana gelen şiddetli torrefaksiyon reaksiyonu ise lignin ve selüloz yapısındaki ana değişiklikten dolayı bu moleküller ile karakterize edilir. Bu bozunma rejimi göz önüne alınarak, hemiselüloz için ayrışmanın dar sıcaklık aralığında meydana

geldiği, buna karşın lignin ve selüloz için ise geniş ayrışma aralığında gerçekleştiği belirtilmektedir. Sonuç olarak biyokütlenin en reaktif bileşeninin hemiselüloz molekülü olduğu görülmektedir 115].



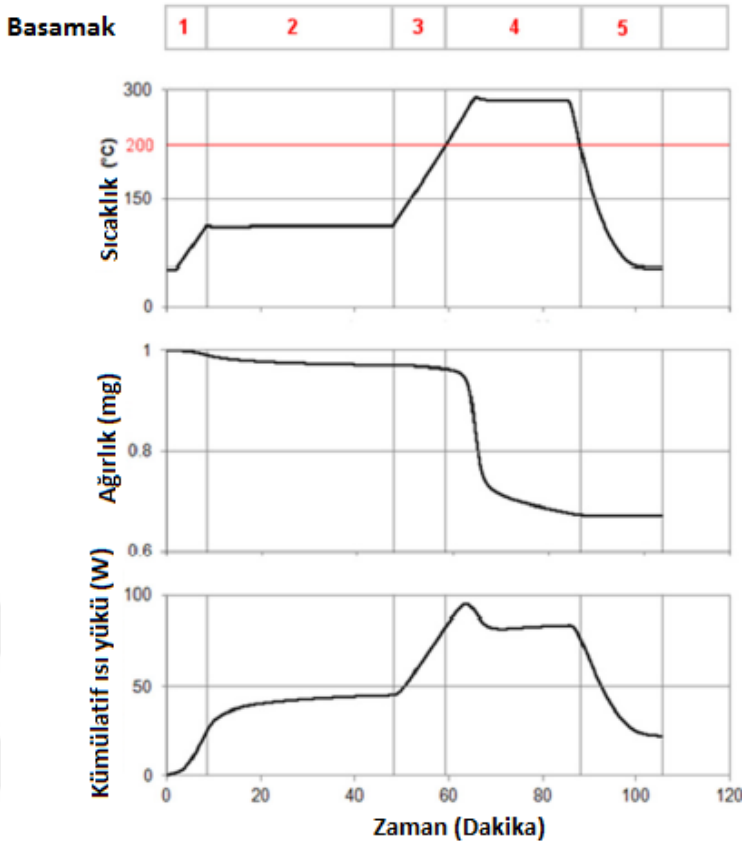
Şekil 5.2 Torrefaksiyon reaksiyon mekanizması [101]

5.3 Torrefaksiyon Proses Adımları

Torrefaksiyon, proses içerisindeki sıcaklık- zaman profillerinin daha iyi açıklanabilmesi için; İlk ısıtma, ön kurutma, kurutma sonrası ara ısıtma, torrefaksiyon reaksiyonu ve üretilen katı ürünlerin soğutulması şeklinde beş basamakta incelenebilmektedir. Torrefaksiyon proses adımları Şekil 5.3'de verilmiştir.

İlk Isıtma Basamağ: Bu basamakta ilk önce biyokütle, daha küçük ve daha homojen parçacık boyutlarına indirgenebilmek için doğrayıcıya gönderilir. Daha sonra parçacık boyutları küçültülmüş olan biyokütle kurutma aşamasına ulaşana kadar ısıtılır. Bu aşamada 100°C' ye kadar sıcaklık artar ve suyun buharlaşması ile nem uzaklaşmaya başlar.

Ön Kurutma: Bu aşamada sıcaklık 100°C' ye ulaşmıştır ve biyokütle yapısındaki serbest su sabit hızda buharlaşmaya başlar fakat kimyasal yapısında bir değişiklik olmaz. Bu sırada reaksiyon sıcaklığında önemli bir değişim olmaz. Serbest suyun tümü buharlaşana kadar yani kritik nem içeriğine ulaşana kadar reaksiyon sıcaklığı sabit kalır. Bu aşamadan sonra biyokütle yapısındaki suyun birim zamandaki buharlaşma hızı azalmaya başlar.



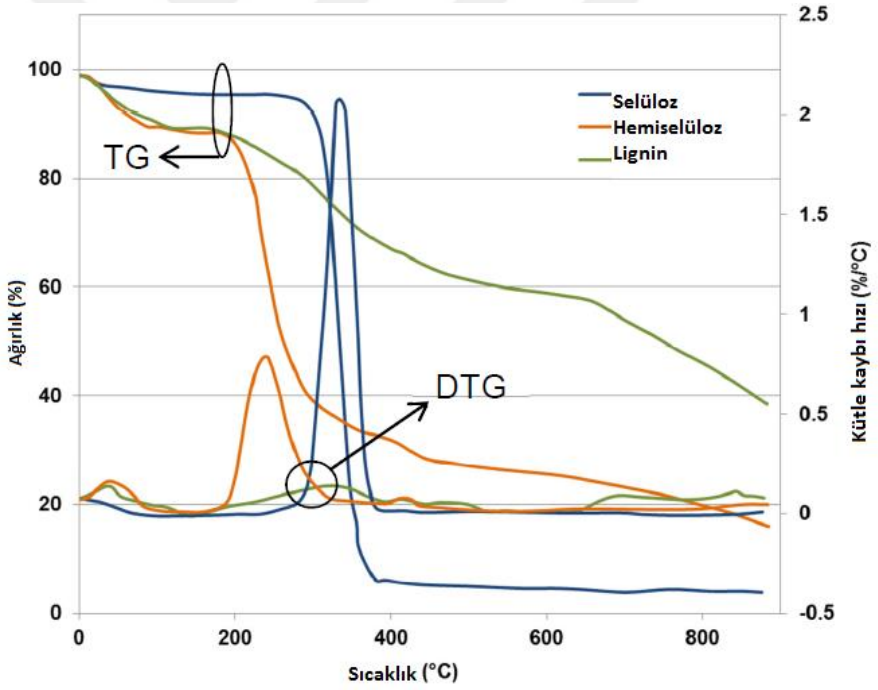
Şekil 5.3 Torrefaksiyon proses adımları [117]

Kurutma Sonrası Ara Isıtma: 3. Aşama olan bu basamakta sıcaklık 200 °C' ye kadar yükselir. Biyokütle parçacıkları içerisinde ısı ve kütle transferi meydana gelir. 160-180°C aralığında fiziksel olarak bağlı olan nem termo-yoğuşma işlemiyle giderilir bu sırada CO_2 oluşumu gözlenir. Sonuç olarak biyokütle yapısındaki hafif organik fraksiyonların buharlaşması sebebi ile bir miktar kuru madde kaybı oluşur [116].

Torrefaksiyon Reaksiyonu: Bu aşama biyokütlenin esas torrefaksiyon prosesine uğradığı kısımdır. Ayrışma, bozunma reaksiyonlarının gerçekleştiği torrefaksiyon aşaması, biyokütle sıcaklığı 200°C' nin üstüne çıktığı anda başlar ve 200°C' nin altına düştüğünde ise sona erer. Bu aşama sabit sıcaklık periyodunun yanı sıra ısıtma periyodu ve soğutma periyodunuda içerir. Torrefaksiyon sıcaklığı maksimum pik verdiği sabit sıcaklıktır ve maksimum biyokütle sıcaklığı olarakta tanımlanabilir. Buharlaşma ile kütle kaybı, bu aşamada ısıtma periyodunda başlar, sabit sıcaklık periyodu boyunca devam eder ve soğutma dönemi sonrasında ise

durur. Bütün proses göz önüne alındığında biyokütlede en fazla kuru madde kaybının gerçekleştiği aşamadır.

180–270°C aralığında reaksiyon ekzotermik olarak gerçekleşir ve hemiselüloz bozunması devam eder. Torrefaksiyon reaksiyonu sırasında ana bozunma reaksiyonları hemiselülozu etkilerken, biyokütle yapısındaki lignin ve selüloz molekülü ise daha az derecede etkilenerek bozunmaya uğrar. Bu sıcaklık aralığında biyokütlenin rengi kahve rengine döner. Yapıdan daha fazla nem, CO_2, büyük miktarda asetik asit ve enerji değeri küçük fenolik bileşikler uzaklaşır. 280°C' de reaksiyon tamamen ekzotermik olarak devam eder, gaz üretimi artar. Torrefiye biyokütke enerji içeriğinin büyük bir kısmını korurken, higroskopik özelliğini ise kaybetmiş olur. Biyokütle yapısındaki kimyasal bileşiklerde oluşan bozunmadan dolayı meydana elen kütle kayıpları Şekil 5.4'de verilmiştir [107, 117].

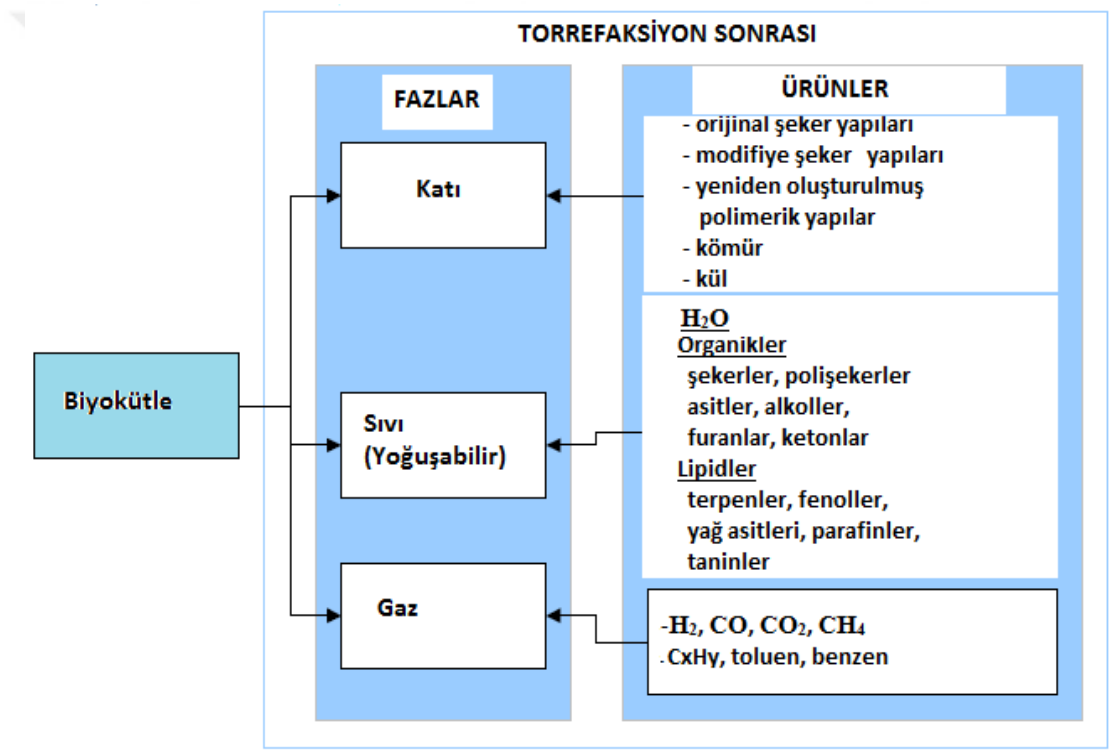


Şekil 5.4 Biyokütle yapısındaki ana bileşenlerin kütle kaybı [117]

Katı ürünün soğutulması: Elde edilen torrefiye katı ürün 200°C' den oda sıcaklığına kadar soğutulur. Bu süre içerisinde ekstra bir kütle kaybı meydana gelmez. Sadece adsorbe edilmiş reaksiyon ürünlerinin birazı buharlaşır.

5.4 Torrefaksiyon Proses Ürünleri

Ilımlı piroliz olarakta adlandırılabilen torrefaksiyon prosesi sırasında, sıcaklık, reaksiyon süresi ve ham biyokütlenin özellikleri gibi reaksiyon koşullarına bağlı olarak çok sayıda torrefiye ürün oluşabilmektedir. Bu ürünler; kahverengi veya daha koyu renkte oluşan katı ürün, çoğunlukla su, asetik asit ve diğer oksijenatları içeren yoğuşabilir sıvı ürün ve genellikle karbondioksit, karbon monoksit ve metan gibi yoğuşamayan gaz ürün olmak üzere üç ana grupta toplanmaktadır. Torrefaksiyon sırasında ham biyokütle yapısındaki nemin çoğunu ve düşük ısıl değere sahip diğer uçucu bileşenler uzaklaştırılır. Torrefaksiyon prosesi sırasında oluşan ürünler Şekil 5.5'te gösterilmiştir [118].



Şekil 5.5 Torrefaksiyon prosesi sırasında oluşan ürünler [118]

5.4.1 Katı Fazlı Ürünler

Katı fazlı torrefiye ürünleri eser miktarda kül içeren, koyu kahverenkli, karbonca zengin kömür yapısındaki ürünlerdir. Katı fazda oluşan ürünler; reaksiyon ürünleri ve orijinal şeker yapılarının karışımından oluşur. Katı fazda kalan reaksiyon ürünleri ise modifiye şeker yapılarından ve aromatik halka içeren yeniden oluşturulmuş polimerik yapılardan oluşmaktadır.

5.4.2 Sıvı Fazdaki Ürünler (Yoğuşabilen)

Sıvı fazda oluşan torrefiye ürünler üç alt grupta incelenebilir. Gruplardan biri, termal bozunma yani dehidrasyon sonucu oluşan suyu ve buharlaşma sonucu biyokütleden ayrılan serbest ve bağlı suyu içerir. Su, asıl yoğuşabilen sıvı üründür. Diğer bir alt grubu oluşturan organik ürünler ise karbonizasyon ve buharlaşma sırasında oluşan şekerler, asitler, alkoller gibi ana organik ürünleri içermektedir. Bu gruba giren asetik asit, biyokütle yapısındaki hemiselüloz fraksiyonunda bulunan ksiloz molekülünün yan zincirlerini oluşturan asetoksi ve metoksi gruplarının ayrışması ile oluşan yoğuşabilen torrefiye bir üründür. Alt gruplardan biri olan lipitler ise parafin ve yağ asitleri gibi orijinal biyokütlenin yapısında bulunan bileşiklerden oluşur. Bu bileşikler aslında gerçek reaksiyon ürünleri değildir, torrefaksiyon koşullarına bağlı olarak buharlaşabilen inert bileşiklerdir.

Biyokütlenin ayrışması ile açığa çıkan uçucu bileşenlerde az miktarda formik asit, laktik asit, hidroksil aseton ve fenol bileşikleri bulunabilir. Yoğuşabilen uçucu maddelerin miktarı sıcaklığa bağlı olarak artabilir ve uçucu fraksiyonuna daha fazla enerji artarılmasına sebep verir.

5.4.3 Gaz Fazdaki Ürünler (Yoğuşamayan)

Gaz fazı ürünleri, karbondioksit, karbonmonoksit, metan, hidrojen gibi yoğuşamayan kalıcı ürünlerini içermektedir. Yoğuşamayan torrefiye ürünlerin kalorifik değeri esas olarak karbonmonoksit gazından gelmektedir. CO_2 oluşumu biyokütle yapısındaki asit gruplarının dekarboksilasyonu ile açıklanabilirken CO oluşumu ise dehidrasyon ve dekarboksilasyon reaksiyonları ile açıklanamaz. CO oluşumu, CO_2 ve buharın gözenekli kömür ile reaksiyonu sonucu oluşur. Yüksek sıcaklıklarda CO/CO_2 oranının artması da biyokütle yapısındaki selüloz ve lignin moleküllerinin bozunması ile açıklanabilmektedir [119].

5.5 Torrefiye Ürünlerin Özellikleri

Torrefaksiyon prosesi biyokütlenin fiziksel, kimyasal ve yanıcı özelliklerini iyileştiren bir yöntemdir. Torrefiye ürünlerin karakteristik özellikleri ham biyokütlenin yapısına bağlı olduğu gibi aynı zamanda sıcaklık, reaksiyon süresi vb. torrefaksiyon proses koşullarına da bağlıdır. Torrefaksiyon prosesi ile torrefiye

ürünün parçacık dağılımı, özgül kapasitesi, termal iletkenliği, nem içeriği, kütlesel yoğunluğu, öğütülebilirliği, gözenekli yapısı, kalorifik değeri gibi fiziksel özellikleri iyileştirilebilirken aynı zamanda karbon, oksijen, hidrojen, nitrojen ve sülfür içeriği gibi elementel bileşimi, kül içeriği ve uçucu madde içerikleride iyileştirilebilmektedir.

5.5.1 Hidrofobiklik

Torrefiye biyokütle, yapısındaki O-H bağları kırıldığı için hidrofobik özellik kazanmıştır. Nem tutma ve absorblama özelliği azalmış, su itme yani hidrofobik özelliği artmıştır. Torrefiye biyokütlenin nem içeriği, proses koşullarına bağlı olarak %10'dan %6 nem içeriğine kadar azalabilir. Bu özelliği torrefiye ürünün yoğunlaştırma özelliği ile birleşince torrefiye ürünün açık havada dökülerek depolanabilirliğini mümkün kılar.

5.5.2 Biyolojik Aktivitenin Ortadan Kaldırılması

Torrefiye ürün üzerindeki tüm biyolojik aktiviteler durduğu için çürüme gibi biyolojik bozunmalar meydana gelmez ve yangın riski azalır.

5.5.3 Yoğunlaştırma

Torrefaksiyon prosesi ile hacimi ve hacimsel yoğunluğu artırılmış torrefiye ürünler elde edilir. Torrefaksiyon ve peletleme proseslerinin bereber kullanılması ile hidrofobisite özelliklerinden dolayı depolanabilme özellikleri daha da iyileştirilmiş torrefiye pelet ürünler üretilebilir.

Torrefaksiyon prosesi, dehidrasyon sonucu biyokütle lignoselülozik yapısında çatlakların başlamasına ve ilerlemesine neden olur. Böylece biyokütlenin gözenekliliği ve yoğunluğunda değişiklikler meydena gelir. Daha fazla partikül boşluğu oluşmasından dolayı artan gözeneklilik, partikül boyutunu azaltır fakat partikül yoğunluğunu ve yığın yoğunluğunu ise arttırır. Biyokütlenin özelliklerine ve torrefaksiyon koşullarına bağlı olarak hacimsel yoğunlukta 180-300 kg/m^3 civarında önemli bir azalmaya neden olur.

5.5.4 Geliştirilmiş Öğütülebilirlik

Biyokütle lifli bir yapıya sahip olduğu için öğütülmüş numunelerin işlenmesi zordur. Torrefaksiyon prosesi ile biyokütle yapısındaki hemiselüloz matrisi parçalandığı, selüloz yapısıda depolimerizasyona uğradığı için lif uzunlukları azalır ve biyokütle güçlü yapısını, mekanik dayanıklılığını kaybeder. Bu şekilde biyokütlenin öğütülebilirlik ve taşınabilirlik özellikleri iyileştirilmiş olur.

Torrefiye biyokütle kırılgan özellik kazandığı için daha iyi toz ürün haline getirilebilir. Ayrıca ham biyokütle ile kıyaslandığında torrefiye biyokütle öğütme işlemi için daha az enerji gerektirir.

5.5.5 Torrefiye Ürünün Partikül Boyutu ve Dağılımı

Biyokütlenin partikül boyutu dağılımı, parçacıkların küreselliği ve yüzey alanları gibi parametreler biyokütle yanma özelliklerinin geliştirilebilmesi için önemlidir. Bu parametrlerin iyileştirilebilmesi için torrefaksiyon prosesi uygulanabilmektedir. Torrefaksiyon işlemi ile öğütülmüş biyokütle parçacıkları kömür gibi kırılgan özellik kazanarak daha düzgün, küçük ve pürüzsüz forma gelmektedir. Bu özellik torrefiye ürünün öğütülme sırasında daha düşük enerjiye ihtiyaç duymasına sebep olur. Öğütülmüş torrefiye biyokütlenin ortalama partikül boyutunun artan reaksiyon sıcaklığı ile azaldığı da bilinmektedir.

Torrefaksiyon prosesinin ayrıca parçacık küreselliği ve yüzey alanı üzerinde de doğrusal bir etkisi vardır. Bu özelliklere ek olarak torrefaksiyon prosesi, biyokütlenin parçalanma sonrası yapısında oluşan partikül boşluklarının azalmasına neden olduğu için öğütülmüş torrefiye biyokütlenin kütlesinin ve parçacık yoğunluğunun artmasına da neden olduğu gözlenir.

5.5.6 Kalorifik Değer

Torrefaksiyon prosesi, biyokütle nem içeriğini azalttığı ve kimyasal yapısındaki C/O ve C/H oranlarını artırdığı için, artan reaksiyon sıcaklığı ve reaksiyon süresi ile biyokütlenin kalorifik değerinin artırdığı bilinmektedir.

5.5.7 Enerji Yoğunluğu

Torrefiye biyokütlenin enerji yoğunluğuda artan reaksiyon sıcaklığı ve reaksiyon süresine bağlı olarak artmakta, bu da kalorifik değeri artırmaktadır.

Torrefiye biyokütle, başlangıçtaki ham biyokütleye göre enerji içeriğinin yaklaşık %90'ını ve kütlesininde %70'ni korumaktadır. Bu yüzden torrefaksiyon prosesi sonrası torrefiye biyokütlenin yaklaşık %30 oranında enerji yoğunluğu kazandığı belirlenmiştir.

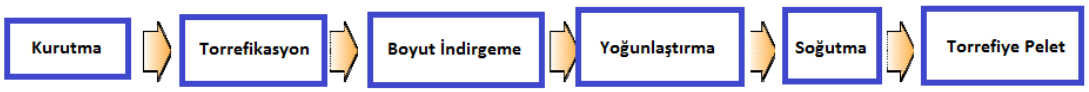
5.5.8 İşlenmiş Torrefiye Ürünün Patlayabilirliği

Toz ürünlerin işlenmesini ve taşınmasını içeren prosesler, çalışma koşulları atmosfer basıncının üzerine çıkıldığında patlama riskine sahiptirler. Talaş gibi ince partikül boyutlarına sahip olan biyokütlelerden üretilen torrefiye ürün, kolay tutuşma özelliği olan karbon tozları içerir. Bu karbon tozları konsantrasyonunun kazan gibi kapalı alanlı ekipmanlarda artması, patlama riskini artırmaktadır. Torrefiye biyokütlede ham biyokütleye göre toz patlama olasılığı daha yüksek olduğu için proses sırasında çok dikkatli olunmalıdır.

5.5.9 Peletleme

Peletleme prosesi biyokütlenin kütle ve hacimsel yoğunluğunu geliştirmektedir. Peletleme ve torrefaksiyon proseslerinin beraber kullanılması ile üretilen torrefiye peletler, işlem görmemiş biyokütleden üretilen peletlere göre daha hidrofobik olduğu ve biyobozunurluğa karşı daha dirençli olduğu için daha kolay taşınabilmekte ve depolanabilmektedir.

Torrefiye peletlerin kütlesel yoğunluğu 750–850 kg/m^3 aralığında, kalorifik değerleri 19–22 MJ/kg ve enerji yoğunluğu ise 15–18,5 GJ/m^3 aralığında değişmektedir. Ayrıca torrefiye peletlerin mekanik dayanıklılığı geleneksel peletlere göre 1,5- 2 kat daha fazladır. Çünkü yüksek proses sıcaklığı biyokütlenin polimerik yapısını daha az lifli ve daha kırılgan hale getirirken, yoğunluğunun ise artmasına sebep olmakta bu durumda peletlerin mekanik dayanımını artırmaktadır. Torrefiye peletlerin üretimi için akış şeması Şekil 5.6'da gösterilmiştir [119].



Şekil 5.6 Torrefiye pelet üretim şeması [119]

5.5.10 Torrefiye Biyokütle Pazarı

Torrefaksiyon işlemi, biyokütleye değişik pazarlar için ek değerler sağlamaktadır. Biyokütle CO_2 emisyonunu azaltmak için genellikle düşük maliyet ve düşük risk sağlayan bir kaynaktır. Yüksek hacimlere ihtiyaç duyulduğunda torrefaksiyon yöntemi ile daha yoğun üretilen biyokütlenin uzak mesafelere taşınabilirliğinde ve depolanabilirliğinde daha rekabetçi hale gelir [120, 121].

5.6 Torrefaksiyon Operasyon Koşulları

Torrefaksiyon proses verimini ve reaksiyon sonucu elde edilen ürünlerin özelliklerini başta torrefiye edilen biyokütlenin kimyasal ve fiziksel yapısı olmak üzere birçok parametre etkilemektedir. Genel olarak torrefaksiyon prosesini etkileyen parametreleri; Reaksiyon sıcaklığı, reaksiyon süresi, biyokütle parçacık boyutu, reaktör ısıtma hızı şeklinde sıralanabilmektedir.

5.6.1 Reaksiyon Sıcaklığı

Piroliz ve torrefaksiyon proseslerinin her ikisi içinde sıcaklıkta ve ısıtma hızındaki artış, biyokütlenin termal bozunma hızını artırmakta ve katı fazdaki ürünün yanında belirli bir miktarda sıvı ürün üretimine yol açmaktadır. Reaksiyon sıcaklığındaki artış ile katı fazda elde edilen ürün verimi azaltmakta ve bu azalış 250°C üzerindeki sıcaklıklarda exponansiyel olarak gözlenmektedir. Katı ürün verimindeki azalış biyokütle yapısındaki hemiselüloz ve selülozun yapısının büyük oranda, lignin molekülünün ise daha az oranda bozunmasından kaynaklanmaktedır. Reaksiyon sonucu oluşan sıvı fazdaki ürün miktarı, gaz fazdaki ürüne göre artan sıcaklıkla önemli oranda artmaktadır. Katı fazdaki ürün verimi, reaksiyon sıcaklığı 230°C'den 280°C'ye çıkılması durumunda %90'dan %70'e düşmektedir.

Artan reaksiyon sıcaklığı ile ürün kütle verimi azalırken, enerji yoğunluğu ise biyokütle yapısındaki oksijenin giderilmesi ve karbon oranının yükselmesinden dolayı artmaktadır.

5.6.2 Reaksiyon Süresi

Torrefaksiyon prosesinde, sıcaklık kadar olmamakla beraber ürün verimini etkileyen bir diğer parametrede reaksiyon süresidir. Bu parametre, torrefaksiyon proseslerinde reaktör dizaynı için reaktör kapasitesinin ve hacminin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Torrefaksiyon prosesleri için minimum reaksiyon süresi, reaksiyon sıcaklığına, biyokütlenin türüne, fiziksel, kimyasal özelliklerine ve torrefiye ürünün nihayi kullanım alanına bağlı olarak değişmektedir. Reaksiyon süresinin 20 dk'dan 40 dk.'ya çıkması ortalama kütle kaybında sadece %1'den %5'e bir artışa sebep olmaktadır. Ayrıca literatüre bakıldığında, 240°C sıcaklık ve 30 dk'dan uzun reaksiyon koşullarında çalışıldığında biyokütle öğütülebilirliği üzerinde küçük bir iyileşmeye sebep olduğu görülmektedir.

Torrefaksiyon proses süresinin biyokütle yapısında daha reaktif polimer olarak yer alan hemiselülozun bozunması üzerinde daha çok etkisi varken, 30 dakikadan daha kısa reaksiyon sürelerinde çalışıldığında selüloz molekülü içinde sınırlı bir kütle kaybına neden olduğu görülmüştür. Reaksiyon süresindeki artış ile torrefaksiyon proseslerinde katı formda oluşan ürünlerden daha fazla gaz formda ürün oluşumu gözlendiği belirtilmektedir.

5.6.3 Partikül Boyutu

Torrefaksiyon proseslerinde partikül boyutundaki artış, katı partikül içindeki ısı iletiminin azalmasına sebep olarak ürün verimini değiştirmektedir. Partikül boyutu küçüldükçe temas yüzeyi ve kütle yoğunluğu artmakta bu da ısı transferi verimini artırmaktadır. Parçacık boyutu küçüldükçe torrefaksiyon prosesi sırasında daha çok termal bozunma gözlenmekte ve torrefiye ürünün kalorifik değeri artmaktadır. Büyük parçacıkların azalan ısıtma hızı ise ürün veriminin artmasına neden olmaktadır [84, 117, 122].

5.6.4 Nem İçeriği

Torrefaksiyon prosesi ile ilgili yapılan literatür çalışmaları ham biyokütle nem içeriğinin ürün verimi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Özellikle 250°C altında gerçekleştirilen torrefaksiyon proseslerinde ham biyokütle

nem içeriğinin yüksek olmasının, kuru madde kaybını artırdığı görülmektedir. Bu artış biyokütlenin içerdiği nemin azottan daha yüksek ısı kapasitesi ve ısı iletimine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bu da torrefaksiyon hızını artırmaktadır. Ayrıca yüksek nem içerikli biyokütledeki su moleküllerinin aktifliği torrefaksiyon sırasında gerçekleşen hidroliz hızınıda artırmaktadır.

5.6.5 Isıtma Hızı

Torrefaksiyon proseslerinde ısıtma hızı parametresi prosesi doğrudan değil ama elde edilen katı, sıvı ve gaz fazdaki ürünlerin dağılımı ile ilgili etkilemektedir. Literatür çalışmaları ısıtma kızındaki artışın sıvı fazdaki ürün verimini artırırken, katı fazda elde edilen ürün veriminde ise çok etkili olmadığını göstermektedir. Bunun ana sebebi yüksek ısıtma hızlarında çalışıldığında yan reaksiyon oluşumlarının azalması şeklinde gösterilmektedir. Ayrıca artan ısıtma hızı biyokütle partikülleri içerisinde kütle ve ısı transferi etkisini azaltmaktadır.

5.6.6 Çekirdek Sıcaklığı

Torrefaksiyon reaksiyonu sırasında biyokütle çekirdek sıcaklığı parçacık büyüklüğüne bağlı olarak fırın sıcaklığının üstüne çıkmaktadır. Bu durumun fırından biyokütleye ısı aktarımı sonucu olduğu düşünülmektedir. Biyokütle çekirdek sıcaklığı, fırın sıcaklığı 250°C civarında iken bu sıcaklığın üstüne çıkmakta, 260°C'ye ulaşıldığında pik yapmakta, daha sonra ise exponensiyel olarak azalıp fırın sıcaklığına düşmektedir. Bu durum, torrefaksiyon prosesinin ilk aşamalarında biyokütlede ekzotermik reaksiyon gerçekleştiğini göstermektedir. Literatür çalışmaları, torrefaksiyon prosesi sırasında artan biyokütle parçacık boyutu ile çekirdek sıcaklığınında arttığını fakat biyokütle parçacık uzunluğundaki artışın ise minimal etkiye sebep verdiğini göstermiştir. Bunun nedeni, biyokütle içerisindeki ısı akışının küçük çaplı uzun numunede öncelikle radyal olarak gerçekleşmesinden dolayı olduğu bilinmektedir.

Torrefaksiyon proseslerinde fırın sıcaklığındaki artış ile çekirdek sıcaklığında aşırı bir artış gözlenebilir. Çekirdek sıcaklığındaki aşırı artış yaklaşık 270°C'den sonra bir azalış gösterir. Bu durum torrefaksiyon prosesleri sırasında 230°C civarında reaksiyonun ekzotermik olduğunu, daha sonra ise hemiselüloz için daha yüksek

sıcaklıklarda reaksiyonun endotermik olarak devam ettiğini göstermektedir. Aynı şekilde selüloz ve lignin içinde devam etmekte fakat daha yüksek sıcaklıkta gerçekleşmektedir. Bu durum çekirdek sıcaklığının, fırın sıcaklığı 270°C civarında iken pik yaptıktan sonra azalmaya başlamasını açıklamaktadır [84].

5.7 Diğer Proseslerde Teknolojik Uygulamalar

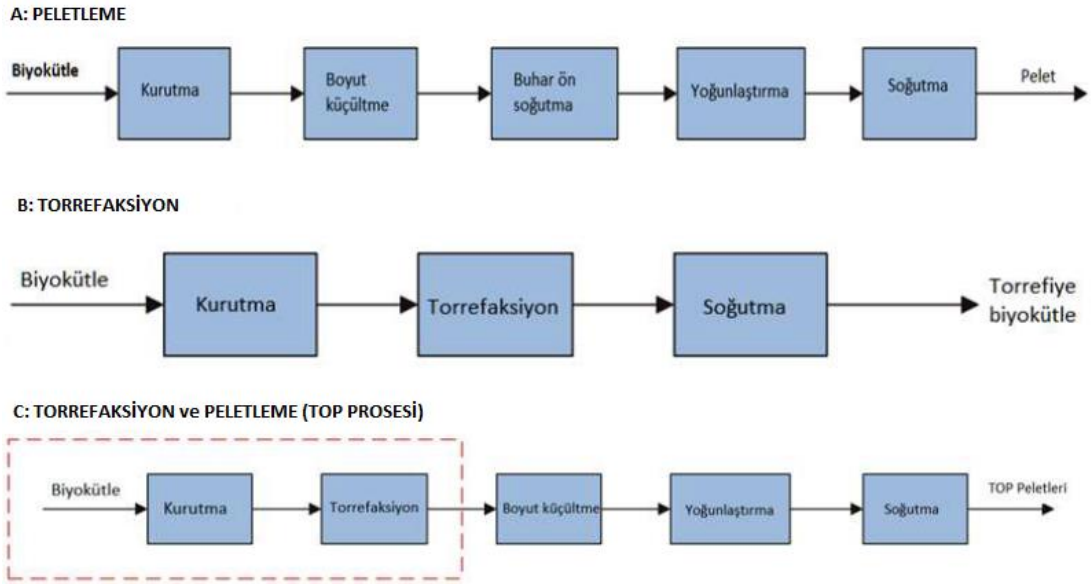
Torrefaksiyon, yüksek kaliteli biyoyakıt üretimi için biyokütleye uygulanan bir ön iyileştirme yöntemi olarak kullanılmaktadır. Üretilen biyoyakıtlardan da diğer dönüşüm yöntemleri ile biyoenerji üretilmektedir.

5.7.1 Torrefaksiyon ve Peletleme

Peletleme, biyokütleden daha homojen ve istenen formda sıkıştırılmış ürün elde etmek için kullanılan yoğunlaştırma işlemi olarak tanımlanmaktadır. Bu proses, peletlenmiş biyokütlenin, ısı ve enerji dönüşüm proseslerinde kullanılabilmesi için bazı özelliklerinin geliştirilmesine olanak vermektedir. Peletleme prosesi, biyokütlenin taşınma zorluğu, düşük kütlesel yoğunluğu, düşük enerji yoğunluğu ve işlenme zorluğu gibi bazı problemleri ortadan kaldırırken, pelet biyokütlenin nem çekme özelliği, dolayısıyla depolanabilirliği üzerine bir iyileştirme etkisi bulunmamaktadır. Peletleme ile torrefaksiyon prosesinin bir arada kullanılması, üretilen torrefiye peletlerin kalorifik değerlerinin, ögütülebilirliklerinin, yanma doğasının, depolama, taşınma ve işlenme özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılan çok önemli bir teknolojik uygulamadır. Bu yöntem, üretilen torrefiye peletlerin mevcut enerji santrallerinde kömür yerine kullanılabilirliğini mümkün kılmaktadır. Torrefaksiyon ve peletleme prosesi ile torrefiye pelet üretimi Şekil 5.7'de gösterilmiştir [116].

Torrefiye biyopeletler, normal biyokütle peletlerine göre daha iyi hidrofobik özellik, mukavemet ve kütlesel yoğunluk göstermektedirler.

Ham biyokütle peletleri depolanma sırasında atmosferdeki nemi absorplayabilir. Bu durum yapılarındaki nem oranını artıracağı için peletlerde mikrobiyal bozunma kadar fiziko kimyasal bozunmaya da sebep olmakta ve pelet biyokütlenin kullanılabilirliğini sınırlamaktadır.



Şekil 5.7 Torrefiye biyokütle üretim prosesi [116]

Torrefiye biyokütlenin peletlenmesi, torrefaksiyon prosesi ile biyokütle yapısındaki lignin yüzdesi arttığı için kolaylaşmaktadır. Ayrıca torrefaksiyon prosesi sonrası peletleme işleminin enerji etkinliği geleneksel peletleme prosesine göre çok daha yüksektir. Torrefiye peletlerde normal peletlere göre aynı enerji içeriği daha küçük hacimlerde mümkündür. Değişik peletlerin karakteristik özellikleri Tablo 5.1'de verilmiştir [116].

Tablo 5.1 Farklı peletlerin karakteristik özellikleri [116]

Özellik	Birim	Odun	Torrefiye Biyokömür	Odun Peleti		Torrefiye Biyokütle Peleti	
Nem	%Ağ	%35	%3	%10	%7	%5	%1
Alt Isıl Değer	MJ/kg	10,5	19,9	15,6	16,2	19,9	21,6
Kuru Numune Alt Isıl Değer	MJ/kg	17,7	20,4	17,7	17,7	20,4	22,7
Kütlesel Yoğunluk	kg/m^3	550	230	500	650	750	850
Enerji Yoğunluğu	GJ/m^3	5,8	4,6	7,8	10,5	14,9	18,4

5.7.2 Torrefaksiyon ve Gazlaştırma

Biyokütle gazlaştırma, biyokütleden enerji üretimi için temiz ve kullanışlı bir yöntemdir. Ham biyokütlenin lifli yapısı gibi bazı karakteristik özellikleri öğütülmesi ve gazlaştırma sistemine beslenmesi gibi gazlaştırma prosesinde bazı olumsuzluklara yol açmaktadır. Ayrıca biyokütlenin genellikle kömüre nazaran yüksek O/C içeriği, gazlaştırma proseslerindeki oksidasyon derecesini artırmakta, bu da yüksek ekserji kaybına ve düşük gazlaştırma verimine sebep olmaktadır**.**

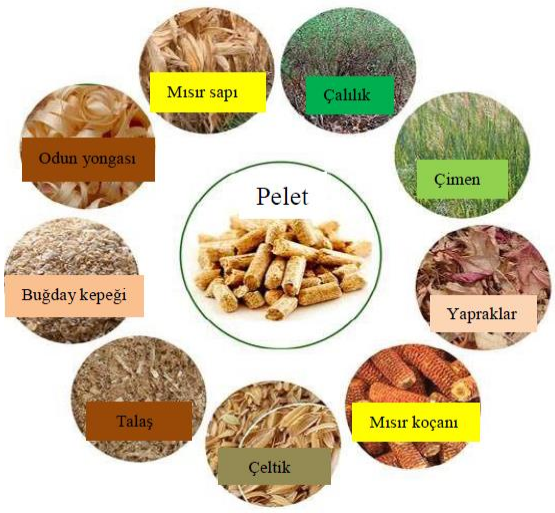
Torrefaksiyon prosesi, biyokütlenin oksijen içeriğini azalttığı için, oksidasyon reaksiyonlarının oluşumunu engellemekte ve biyokütleyi gazlaştırma için daha uygun hale getirmektedir. Torrefaksiyon ile üretilen O/C ve H/C oranı düşük, enerji içeriği büyük katı yakıtlar gazlaştırma prosesleri için daha uygun hale getirilmektedir. Torrefaksiyon ile daha geniş yüzey alanı veya daha küçük gözenek boyutuna sahip biyokütle üretimide gazlaştırma verimi üzerinde önemli etkiye sahiptir.

Yüksek sıcaklıkta üretilen torrefiye biyokütle gazlaştırma proseslerinde kullanıldığında H_2 ve CO toplamının CO_2'e oranı olarak tanımlanan sentez gazı kalitesini artırmaktadır. Ayrıca torrefaksiyon prosesi, ham biyokütlenin lignoselüloz yapısını azalttığı için gazlaştırma proseslerinde katran oluşununuda en aza indirgemektedir [123].

6
PELETLEME

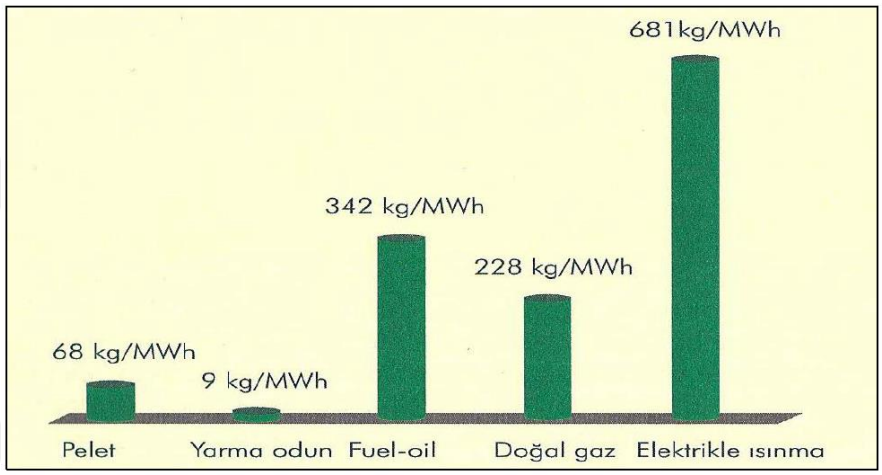
6.1 Pelet Üretimi İçin Biyokütle Kullanımı

Bitkisel, odunsal ve endüstriyel lignoselülozik biyokütle atıklarının enerji kaynağı olarak kullanımlarında karşılaşılan önemli bir problem bu maddelerin ağırlıklarına göre hacimlerinin fazla olmasından dolayı enerji dönüşüm proseslerinde kullanılabilirliğinin zorluğu ve ayrıca depolanabilirlikleri ve ulaşımdaki olumsuzluklarının ekstra maliyete sebep vermesidir. Bu olumsuzlıkları ortadan kaldırmak için orman ve tarım atıkları, endüstriyel atıklar ve enerji bitkileri gibi Şekil 6.1 'de gösterilen lignoselülozik biyokütlenin kurutulup, yüksek basınç altında peletlenerek evsel ısıtma ve enerji dönüşüm sistemlerinde yakıt amaçlı biyopelet olarak kullanılması dünya genelinde gittikçe yaygınlaşmıştır. Peletler basınç altında presleme ve nem giderme yani kurutma işlemlerinden geçirilerek düşük nem oranında optimize edilirler. Böylece yüksek enerji yoğunlukluna sahip ve yanma özellikleri iyileştirilmiş pelet üretimi gerçekleştirilebilir. Nem içeriğinin minimalize eldilmesi, biyopeletlerde mikrobiyal olayların yavaşlamasına böylece depolanma sürelerinin uzamasına ve taşınabilirliğinin olumlu etkilenmesine neden olmaktadır [124].



Şekil 6.1 Pelet üretiminde kullanılan biyokütle kaynakları [124]

Biyokütleden üretilen peletler mevcut sıvı veya katı fosil yakıtlara göre birçok yönden daha avantajlıdır. Peletler yandığı zaman sera gazı etkisi yaratmamaktadır. 1 ton benzinin yanması sonucu 3,11 ton CO_2 atmosfere salınırken, 1 ton kuru biyokütlenin yanması sonucu atmosfere salınan CO_2 miktarı 0,467 ton'dur [125]. Ayrıca diğer enerji üretiminde kullanılan kaynakların yol açtığı CO_2 emisyon değerleri karşılaştırıldığında; 1 MWh enerji üretimi sırasında pelet, fuel-oil ve doğal gazın atmosfere verdiği CO_2 miktarları sırası ile 68 kg, 342 kg ve 228 kg olarak bilinmektedir. Değişik enerji kaynaklarının yaydığı CO_2 emisyon miktarları Şekil 6.2'de gösterilmiştir [126].



Şekil 6.2 Değişik enerji kaynaklarının CO_2 emisyonları [126]

Peletlerin yanmasıyla salınan bu CO_2 emisyonu, bitkinin önceki yıllarda fotosentez için harcadığı CO_2'le eşdeğerdedir. Bu özellikler göz önünde bulundurularak biyokütle peletlerinin fosil yakıtların yerine tercih edilmesi veya beraber kullanımının ülkemizdeki karbondioksit emisyonlarının azaltılmasında önemli bir rol oynayacağı düşünülmektedir. Dünya çapında en geniş biyopelet pazarı hali hazırda Avrupa'da yer almaktadır. Küresel olarak 2010 yılında biyopelet kullanımı 15 milyon ton civarındayken, bu değer 2015'e gelindiğinde 228 milyon ton değerine ulaşmış, 2030'da ise 400 milyon ton civarında olacağı öngörülmüştür [127].

6.2 Pelet Üretim Aşamaları

Mevcut fosil bazlı yakıtların kullanılması ile ortaya çıkan çevre kirliliği, sera gazı emisyonu ve mevcut enerji kaynaklarına bağımlılıktan kaynaklanan enerji krizi

gibi olumsuzlukları hafifletmek için alternatif yenilenebilir enerji kaynakları olarak biyokütle kullanılabilmektedir. Biyokütle birçok çevresel avantajının yanı sıra düşük enerji yoğunluğu, yüksek nem içeriği, mevsimsel ve coğrafi konumlara bağımlılığı, bunlara ek olarak heterojen yapıya sahip olmasından dolayı enerji dönüşüm sistemlerindeki besleme zorlukları gibi dezavantajları nedeniyle enerji kaynağı olarak kullanımında sınırlamalar mevcuttur. Bu olumsuzlukları gidermek ve yakıt kalitesini artırmak amacı ile biyokütleye torrefaksiyon gibi termal ön iyileştirme prosesleri uygulanmaktadır.

Torrefiye biyokütle yakıtının özellikleri, ham biyokütleye göre çok daha avantajlı olsada kütle ve enerji yoğunlukları geleneksel kömür yakıtından daha düşük olabilmektedir. Ayrıca torrefiye biyoyakıt genellikle toz halinde üretildiği için depolama ve taşınma sırasında patlama tehlikesi içermektedir. Bu problemler, ham biyokütle veya torrafiye biyokütlenin yüksek basınç altında mekanik ekstrüzyon yoluyla biriket veya pelet şeklinde yoğunlaştırılması ile giderilebilir [128].

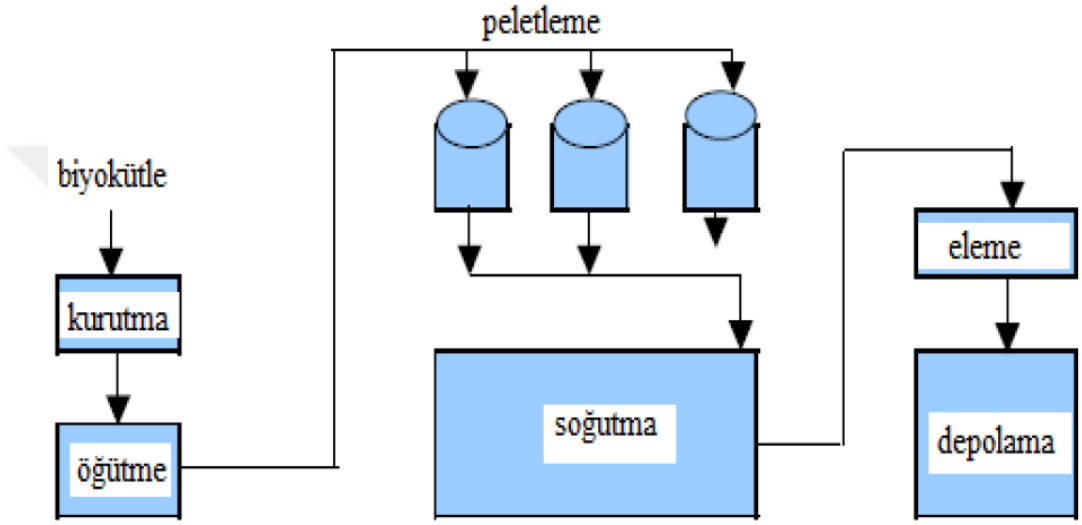
Biyopelet, organik biyokütlenin kurutulup nem giderilmesi daha sonra ise öğütülerek küçük ve homojen partikül boyutlarına getirilmesi ve yüksek basınç ile preslenerek 6-12 mm arası çap ve 10-30 mm arası uzunlukta silindirik formda üretilmesi ile elde edilir. Biyokütleden üretilen pelet ve biriketlerin genel özellikleri Tablo 6.1'de verilmiştir. Pelet üretiminde kullanılan ham biyokütlenin kimyasal ve fiziksel yapısı, son kullanım alanı ve kazandırılmak istenilen özellikleri göz önünde bulundurularak kimyasal bağlayıcıların kullanılıp kullanılmayacağına karar verilebilmektedir [129, 130].

Tablo 6.1 Biyopelet ve biriketlerin karakteristik özellikleri [130]

Özellikler	Peletler	Biriketler
Isı Değeri	16,92 – 17,64 MJ/kg	16,92 – 17,64 MJ/kg
Yoğunluk	650 – 700 kg/m^3	650 – 700 kg/m^3
Çap	6 – 16 mm	65 mm
Uzunluk	20 – 30 mm	25 – 200 mm
Kül İçeriği	% 0,4 – 1,0	% 0,5
Rutubet	% 7 – 12	% 7 – 12

Pelet üretim prosesleri; Ham biyokütlenin depolanması sonrası ön hazırlığı, peletlenmesi ve peletleme sonrası işlemler şeklinde birkaç aşamadan

oluşmaktadır. Peletleme öncesi hazırlıklar ise kullanılacak ham biyokütlenin karakteristik özelliklerine bağlı olarak genellikle öğüterek boyut küçültme, kurutma ve iyileştirme aşamalarını içermektedir. Peletleme prosesi sonrasında da üretilen biyopeletler soğutuculara aktarılmakta ve küçük parçacıkların ayrılması içinde elenmektedir. Güncel peletleme teknolojilerinde kullanılan ham biyokütlenin %35 nem oranına kadar kurutulmasına ve proses sonrası soğutulmasına ihtiyaç duyulmamaktadır. Biyokütlenin yoğunlaştırılması amacı ile uygulanan peletleme proses basamakları Şekil 6.3'de gösterilmiştir [131].



Şekil 6.3 Biyokütle peletleme proses basamakları [131]

Biyokütlenin Kurutulması

Nem içeriği %50 civarında olan ham biyokütle toplanıp, parçalanır ve nem oranı yaklaşık %10 civarına inene kadar fırında kurutulur. Böylece ham biyokütlenin nem içeriği düşürülerek mikrobiyal reaksiyonlara karşı etkinliği azaltılmış, depolanma süresi ise uzatılmış olur. Düşük ağırlıklı biyokütlenin taşınma maliyetide azaltılmış olur. Ayrıca düşük nem içerikli biyokütlenin enerji yoğunluğuda daha fazladır.

Boyut Küçültme için Öğütme

Nem içeriği azaltılan ham biyokütle, parçacık boyutunu küçültmek ve daha homojen parçacık dağılımı elde etmek amacı ile 3mm'den daha küçük boyutlarda öğütülür.

Yüksek Basınç Altında Presleme

Biyokütle, peletleme proseslerinde düz veya silindir şeklindeki pelet kalıpları ile yüksek basınç uygulanıp preslenerek belirli standartlarda ki peletler şekline getirilmektedir. Peletlerin bağlayıcılığını ve dayanıklılığını artırmak amacı ile preslenme aşamasında toplam ağırlığın %1'ini geçmeyecek oranda kimyasal veya bitkisel bağlayıcılar eklenmektedir.

Peletlerin Soğutulması

Peletleme prosesinde silindir kalıplarda biyokütlenin sıkıştırılması sırasında sıcaklık artışı meydana gelebilmekte ve basıçtan dolayıda peletler parçalanabilmektedir. Bu olumsuzlukları gidermek, pelet sertliğini ve stabilizasyonunu artırmak amacı ile peletleme sonrası soğutma işlemi uygulanmaktadır.

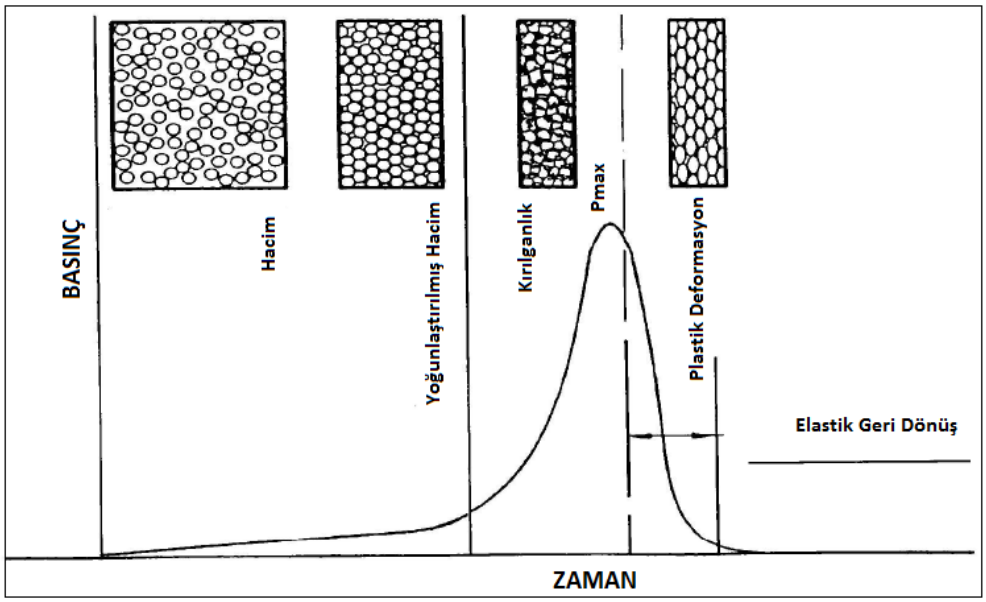
Peletleme prosesi ile ham biyokütlenin yanma etkinliği ve enerji verimliliği 300 kat artırılmakta, böylece enerji dönüşüm sistemlerinde kullanılan biyokütle yakıt ağırlığı da 1/3 oranında azaltılmaktadır. Bu durumda ülke ekonomisine ciddi katkı sağlamaktadır [125, 131].

Peletleme prosesi ile ham biyokütlenin fiziksel, kimyasal karakteristik özellikleri ve yanma profili düzeltilmektedir. Yoğunluğu artırılan peletlerin birim hacimdeki enerji değeri yükselmekte, çevre kirliliğine sebep olan emisyonlar düşürülmekte, depolama ve transfer maliyetleri azaltılarak daha ekonomik yakıt üretilebilmektedir.

6.3 Peletleme Mekanizması

Peletleme prosesinin ilk basamağında biyokütle içindeki partiküller uygulanan düşük basınç ile birbirlerine yaklaşmakta ve basınç yardımı ile aktarılan enerji parçacıklar arası etkileşim ile parçacık-pres kalıp duvarı arasındaki etkileşime harcanmaktadır. Daha sonra yüksek basınç altında partiküller birbirleri ile daha çok temasa zorlanarak elastik ve plastik deformasyona uğramaktadır. Bu şekilde kısa mesafeli bağlanma kuvvetleri olan Van der Waals kuvvetleri ve elektrostatik kuvvetlerin etkinliği artmaktadır. Stres altında kırılganlığı artan partiküller bu mekaniksel kuvvetler yardımı ile birbirine kenetlenmektedir. Böylece yüksek basınç altında presleme işlemi biyokütlenin hacmi azalıp, yoğunluğu ise

biyokütleyi oluşturan bileşenlerin gerçek yoğunluklarına yaklaşana kadar devam etmektedir. Peletleme aşamasında basınç sonucu oluşan ısı biyokütle bileşenlerinin erime noktalarına yaklaşmasına ve yumuşamasına sebep vermektedir. Özellikle biyokütle bileşenlerinden olan lignin molekülü 140°C olan düşük erime noktasından dolayı, presleme işleminde üretilen ısı enerjisinden dolayı yumuşamakta ve termoset özelliği göstermektedir. Peletleme sonrası soğutma aşamasında ise bu yumuşayan bileşenler parçacıklar arasında çok güçlü köprüler oluşmasını sağlamaktadır. Peletleme prosesi sonrası üretilen peletlerdeki partiküller arası boşluklar %70 oranında azaldığı için geriye dönüş gerçekleşmemektedir. Peletleme prosesi sırasında partiküller arasında meydana gelen değişiklikler Şekil 6.4'de gösterilmektedir [132, 133].



Şekil 6.4 Peletleme mekanizması [133]

6.4 Biyopelet Kullanım Avantajları

Alternatif enerji kaynağı olarak üretilen biyopeletlerin çap, uzunluk, parçacık yoğunluğu, hacmi, mukavemeti, sertliği gibi fiziksel yapısı, peletlerin kullanım alanlarını, kullanılacakları proseslerin dizaynını, uzun süre depolanabilirliğini ve taşınabilirliğini etkileyen en önemli parametrelerdendir. Küçük ölçekli proseslerde yanma özellikleri bakımından ince peletler tercih edilirken, uzun peletler otomatik besleme sistemlerine sahip proseslerde kullanılabilmektedir. Peletleme işlemi ile birim hacimdeki enerji yoğunlukları artırılmış olan biyopeletler,

yoğunlaştırıldıkları için daha düşük taşıma maliyetine ve daha yüksek depolama kapasitesine sahip olurlar. Ayrıca nem içerikleri azaltılması da dayanıklılıkları ve daha uzun süre depolanabilirliklerine katkı sağlamaktadır.

Peletlerin %80'den daha fazla dayanıklılık oranı içermesi yüksek kaliteli, %70-80 arasında dayanıklılık göstermeleri orta düzeyde kaliteli ve %70'den daha az dayanıklılıkta olanlar ise düşük kaliteli olarak tanımlanmaktadır [134].

Peletleme işlemiden geçen malzemelerin yüksek yoğunluk ve ısı değerine ulaştığı gözlenmiştir. Tarımsal atıkların taşınması, depolanması ve kullanımı pelet haline geldiklerinde mümkün olabilmektedir. Peletler ağırlıkça petrolden elde edilen enerjisinin yarısına denktir ve 1/3 hacmindedir. Pelet üretiminde genellikle DIN standartları kullanılır. Uzunluk olarak 10-40 mm aralığında, çap olarak ise 6 mm civarında çalışılarak depolama hacimleri yaklaşık 650 kg/m^3 civarında peletler elde edilebilir. Peletlerin ev bazlı yakacak amaçlı kullanımı doğal gaz ve fuel oil'e kıyasla daha az olumsuzluklara neden olmakta fakat daha fazla kullanım kolaylığı vermektedir [127].

Peletleme işlemi ile elde edilen biyoyakıtlarda, diğer yakıtlara göre aynı enerjinin maliyeti %40-%45 oranında daha ucuzdur. Pelet yakıtın tamamen yanması enerji kaybını azaltmaktadır. Ayrıca preslenen pelet yakıtın yanma prosesi daha uzun süre almaktadır. İçerdikleri nem oranı %10 ve daha az olan kaliteli peletlerin yandıkları zaman verdikleri kül miktarıda mevcut yakıtlar ile kıyaslandığında oldukça düşük olmakta ve yaklaşık %0,5 civarında kül içermektedirler. Bu oran kömürde %10-50 civarında iken, peletleme prosesi uygulanmamış ağaç kaynaklı yakıtta ise %6-10 civarında değişim göstermektedir. Literatür araştırmaları evsel yakıt olarak 25 kg pelet kullanıldığında 65 g kül açığa çıktığını, böylece yakma prosesinin veriminin arttığını ve maliyetin ise aynı oranda azaldığını göstermektedir [125, 135].

Peletleme prosesinin en önemli özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

- Atıkların enerji içeriklerini artırarak anında ya da daha sonra yanma, kömürleşme, piroliz veya gazlaştırma gibi gelişmiş termo kimyasal dönüşüm proseslerinde kullanımı

- Daha az depolama hacmi ihtiyacı
- Daha kolay işleme prosesi ve nakliyenin sağlanması ile masrafların indirgenmesi
- Pelet birim hacmindeki enerji yoğunluğunun artırılması
- Fermentasyon prosesi sonucu gözlenen kütle kaybının azaltılması
- Sülfür ve diğer hava kirliliğine neden olan maddeleri içermemeleri
- Kül içeriklerinin azaltılmış olması
- Daha homojen partikül boyutlarına sahip olması
- Hacimsel yoğunluklarının ve enerji yoğunluklarının artırılmış olması

6.5 Peletleme Prosesini Etkileyen Faktörler

Peletleme prosesi ile üretilen biyopeletlerin karakteristik özelliklerini temel olarak peletlerin son kullanım alanları etkilemektedir. Özellikle biyopeletlerin üretildiği ham biyokütle kaynaklarının cinsi, lignin, selüloz içeriği gibi kimyasal yapısı, nem yüzdesi ve partikül boyutu gibi özellikleri büyük ölçüde pelet karakterizasyonunu etkilemektedir. Ham biyokütlenin özellikleri haricinde sıcaklık, basınç gibi proses koşulları ve kalıp boyutları gibi presleme parametreleri de üretilen biyopeletlerin kalitesi üzerinde önemli etilere sahiptir.

6.5.1 Ham Biyokütlenin Cinsi

Ham biyokütlenin cinsi, kimyasal yapısı üretilecek peletlerin depolanabilirliği ve kullanım alanlarını etkilemektedir. Biyokütlenin kimyasal yapısındaki hemiselüloz, selüloz ve lignin içeriğininde peletlerin dayanıklılığı üzerinde büyük etkisi bulunmaktadır. Özellikle 100°C'de yumuşama özelliğine sahip olan lignin bağlayıcı özelliği ile biyokütlenin peletlenmesine katkıda bulunmaktadır. Özellikle yapılarında yüksek oranda lignin ve reçine molekülleri bulunduran odunsu kaynaklar yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında çalşıldığında, yapılarındaki lignin molekülünün yumuşaması ile bağlayıcılık özelliği kazanırlar. Bu yüzden odun kaynaklı biyopeletlerin yoğunluklarının ve dayanıklılıklarının daha iyi oluğu bilinmektedir. Bitkisel biyokütle kaynaklarından üretilen biyopeletlerin dayanıklılıkları ise lignin yüzdeleri daha az olduğu için daha düşüktür. Biyokütle maliyetide üretim maliyetini doğrudan etkileyeceği için çok önemli bir parametredir [113, 135].

6.5.2 Ham Biyokütle Nem İçeriği

Kullanılan mevcut yakıt kaynakları ile karşılaştırıldığında biyokütle kaynaklarının nem oranlarının daha fazla olduğu bilinmektedir. Biyokütle yapısındaki nem oranı, peletleme prosesini, nihai ürünün yoğunluğu, dayanıklılık derecesi, kalorifik değeri ve yanma etkinliği gibi kalitesini belirleyen özelliklerini, depolanabilirlik süresi ve taşınma özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Yoğunlaştırılmış ve dayanıklılığı yüksek biyopelet üretimi için biyokütle kaynağının optimum nem oranına sahip olması istenmektedir. Bu oran selülozik biyokütlede yaklaşık %5-10 civarında iken, tarımsal otlarda ise ağırlıkça %10-20 civarındadır. Peletleme proseslerinde nem, biyokütle yapısındaki moleküller arası bağları güçlendirerek yapıştırıcı etkisi yapmakta ve dayanıklılığı artırmaktadır. Ayrıca biyokütle yapısındaki nem, moleküllerin yüzey alanlarını artırarak Van der Walls bağlarını etkinleştirmektedir. Optimum nem içeriğinin altındaki nem oranlarında çalışılması ise uygulanacak proses basıncının artmasına bu da malzemenin kalıpta sıkışmasından dolayı peletleme işlemlerinde maliyete yol açmaktadır. Ayrıca nem içeriği çok düşük olan biyokütlenin preslenme sırasında ısı iletimini bloke etmeside üretilen peletlerin dayanıklılık dereceleri üzerinde olumsuz etkiye neden olur. Optimum değerden daha yüksek nem içeriğide pelet yoğunluklarında azalmaya sebep vermekte ve mekanik özellikler üzerinde negatif etkiye neden olmaktadır [113, 136, 137].

6.5.3 Proses Sıcaklığı

Peletleme proseslerinde sıcaklık parametresinin, üretilen peletlerin mekanik dayanıklılığı ve presleme sırasındaki enerji ihtiyacı üzerinde büyük bir etkisi vardır. Presleme sırasında sıcak buhar kullanımı biyokütle yapısındaki moleküllerinin birbirne bağlanma etkisini artırdığı için üretilen peletlerin sağlamlığını artırmakta ve presleme enerji ihtiyacınıda azaltmaktadır. Ayrıca yüksek sıcaklıkta çalışılması pelet kalıbı ile ham biyokütle arasındaki sürtünmeyi azaltacağı için peletleme prosesinin sürdürülebilirliğini artırmakta bu da üretim kapasitesini artırmaktadır. Fakat proses sıcaklığında optimum koşulların üzerine çıkıldığında üretilen peletler yeterli nem içeriğine sahip olmayacağı için moleküller arası bağlar zayıflatmakta bu da yapıda çatlakların oluşmasına ve dayanıklılığın

düşmesine neden olmaktadır. Yapılan literatür çalışmaları presleme prosesleri için 65-95°C aralığında çalışıldığı zaman yükek kalitede peletler üretilebileceğini göstermiştir [137].

Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda, bitişik parçacıklar arasındaki arayüzey alanında bir artış gözlenmektedir Bu durumda lifler ve parçacıklar arasındaki Van der Waals kuvvetleri ve hidrojen bağları ile mekanik ara kilitlenmeye neden olmakta ve yapışma mukavemetini artırmaktadır [138].

6.5.4 Ham Biyokütlenin Partikül Boyutu

Biyokütle partikül büyüklüğü ve dağılımının peletleme prosesi üzerinde önemli bir etkisi olduğu bilinmektedir. Peletleme proseslerinde büyük yüzey alanlarına sahip küçük partiküller biyopeletlerin yoğunluğunun artmasına ve daha güçlü peletlerin üretilmesine neden olmaktadır. Ayrıca ham biyokütlenin dar partikül boyut dağılımı, kurutma aşamasında nem dağılımını eşit olmasını sağlamaktadır. Farklı boyutta parçacık dağılımı içeren biyokütlelerde, peletleme prosesi sırasında küçük partiküller aşırı kuru hale gelebilmekte ve bu kurulukta, yoğunlaştırma basamağında partiküllerin kendi kendine bağlanabilirliğini zorlaştırmaktadır [139].

Biyokütle partikül boyutunun azalması, parçacıkların yüzey alanlarını artıracağı için presleme işleminde temas yüzeylerini artırmakta ve yapışmanın daha etkili olmasına neden olmaktadır. Kaliteli pelet üretimi için partikül dağılımında büyük parçacıkların yanı sıra yaklaşık %10-20 aralığında küçük parçacıkların da olması, bu küçük partiküllerin, büyük partiküllerin oluşturduğu boşluklara girerek pelet yoğunluğunu ve sağlamlığını artıracağı bilinmektedir. Ayrıca büyük partikül boyutlu biyokütleden üretilen peletlerde yeterli bağlanma derecesine ulaşılamadığı için çatlaklar oluştuğu bundan dolayı pelet dayanıklılığının ve kalitesinin düştüğü görülmektedir. Bu yüzden kaliteli pelet üretimi için ham madde öğütmede yaklaşık 3-4 mm çapında eleklere sahip öğütücü değirmenlerin kullanılması tercih edilmelidir [137].

6.5.5 Bağlayıcı Türü ve Miktarı

Bağlayıcılar, kaliteli biyokütle pelet üretiminde çok önemli bir rol oynamaktadırlar. Biyopelet üretimi sırasında bağlayıcı kullanımı, peletlerin dayanıklılığını artırıp,

fiziksel kalitesini iyileştirmekte ayrıca üretim sırasında oluşan tozlanmayı azaltmaktadır. Ayrıca peletleme verimini artırarak, üretim sırasında ihtiyaç duyulan enerji girdisini ve maliyeti de indirgemektedir. İstenilen fiziksel ve termal özelliklere sahip peletlerin üretimi için kullanılacak bağlayıcı ham biyokütlenin özellikleri göz önünde bulundurularak seçilmelidir. Literatür bilgilerine bakıldığında odunsu biyokütlenin peletlenme proseslerinde bağlayıcı katkısının %2 civarında tutulması gerektiği görülmektedir. Pelet üretiminde kullanılan ham biyokütlenin nem içeriği partikülleri birarada tutup bağlayıcı görevi yapmasına elverişli değil ise en yaygın kullanılan katkı maddesi su dur. Suyun haricinde doğal optimal bağlayıcılık özelliği olan lignin molekülüde peletleme prosesi sırasında oluşan ısı ile yumuşayarak bağlayıcılık özelliği vermektedir. Lignin içeriği yeterli olmayan biyokütle kaynaklarında ise bağlayıcı olarak en çok kullanılan katkı maddesi lifli yapıda olan sebze bazlı yağlardır. Bu yağlar aynı zamanda peletleme kalıplarındaki sıkışıklığı ve sürtünme etkisini azaltarak peletleme proseslerini kolaylaştırmaktadırlar. Yapılan araştırmalar lignin oranları yaklaşık %23 civarında bulunan susam bitkisinin ve pamuk saplarının bağlayıcı olarak biyokütle peletleme proseslerinde kullanılabileceğini göstermektedir. Bu katkı maddelerinin yanısıra bağlayıcı amacı ile en çok kullanılan malzeme nişastadır [137, 139].

6.5.6 Peletleme Basıncı

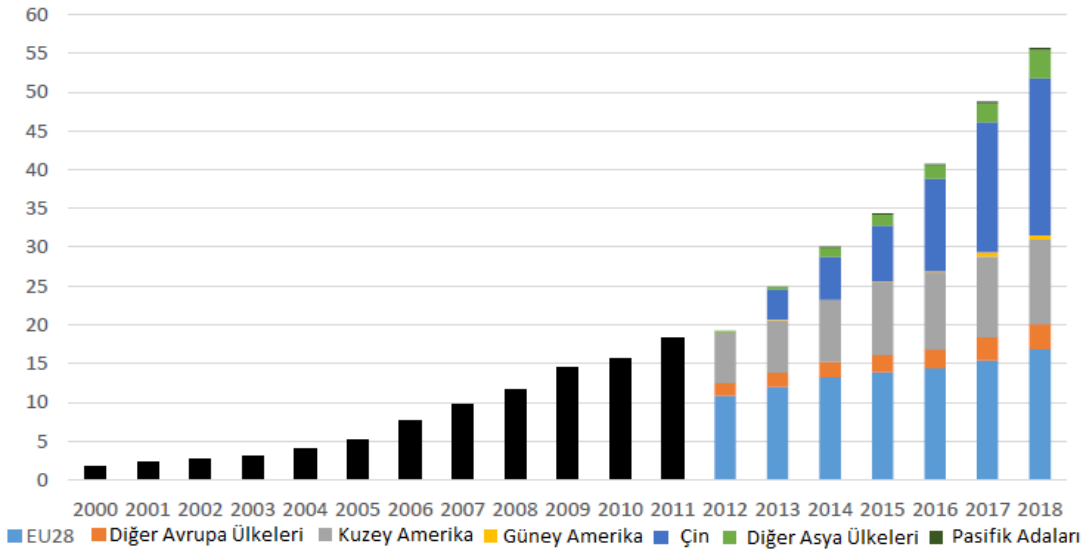
Biyokütle peletleme proseslerinde uygulanan basınç değerinin, üretilen peletlerin sağlamlığı, yoğunluğu ve pelet üretimi için gerekli olan enerji ihtiyacı üzerine önemli bir etkisi vardır. Peletleme prosslerinde basınç uygulanarak biyokütle yapısında bulunan lignin, pektin veya nişasta gibi doğal bağlayıcılar partiküller arasındaki bağlanmayı artırmaktadır. Bu sayede uygulanan basınçtaki artış ile daha yoğunlaştırılmış peletler üretilmekte ve peletlerin sıkıştırma direnci, sağlamlığı gibi bazı mekaniksel özellikleri de iyileştirilmektedir. Biyokütleye uygulanan peletleme basıncı ile pelet yoğunluğu arasındaki bağlantı, biyokütlenin bitki hücre duvar yoğunluğu ile değişmektedir. Literatür araştırmalarına bakılarak peletleme proseslerinde maksimum uygulanan basınç değerlerinin 50 MPa ile 600 MPa arasında değiştiği söylenebilmektedir. Peletleme proseslerinde ki bu basınç

değeri için bir maksimum mevcuttur. Bu değer aşıldığında uygulanan enerjinin fazlası aşırı ısı enerjisine dönüşekte ve pelet kalitesini düşürmektedir [136].

6.6 Dünya ve Türkiye'de ki Pelet Yakıt Durumu

Odunsu biyokütleden üretilen biyopeletler, mevcut fosil kaynakların tüketiminden kaynaklanan çevresel kaygılardan dolayı özellikle Avrupa'da somut ve güvenilir alternatif enerji kaynakları olarak kabul edilmektedir. Bundan dolayı pelet yakıtların üretimi ve enerji üretiminde kullanımları son yıllarda hızlı bir ivme ile artış göstermiştir. Üretilen peletlerin yanma kapasitelerinin geliştirilmesi ve yüksek enerji verimliliğine sahip peletlerin yakılabilmesi için uygun proseslerin tasarlanma çalışmalarıda giderek artmaktadır. Son yapılan çalışmalar ile biyopeletlerin sadece evsel ısıtmalarda değil, aynı zamanda kojenerasyon ve enerji santrallerinde kullanımına da olanak sağlanmıştır.

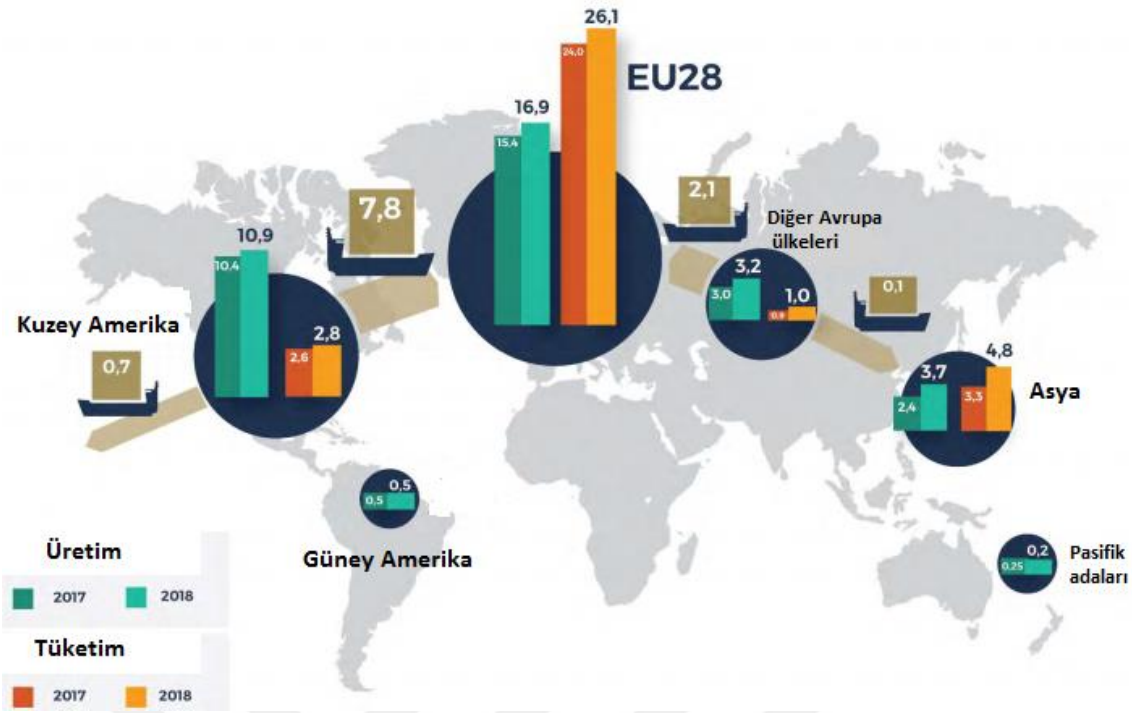
Avrupa Pelet Konseyi EPC'ye göre 2016 yılında küresel olarak odun peleti tüketimi %6'lık bir artış ile 27,8 milyon ton değerine ulaşmıştır. Bu artış ile Avrupa, Dünya'da ki pelet tüketiminin %80'ini (21,7 milyon ton) elinde tutarak, ana pelet tüketicisi konmuna gelmiştir. Ayrıca Avrupa'da odun peleti üretimi 2010 yılından itibaren artan bir grafik göstermiş ve 2014 yılında %35'lik bir artışa ulaşmıştır. 2014'de Avrupa'da odun peleti üretimi, küresel üretimin %50'sini elinde tutarak 13,5 milyon ton olarak kayıtlara geçmiştir. Bu üretimin 2,1 milyon ton kadarı en büyük kapasiteye sahip Almanya'da gerçekleştirilmiştir. Almanya'yı, 1,6 milyon ton ile İsveç ve 1,3 milyon tonluk üretim ile Letonya izlemiştir. 2016 yılında ise Avrupa 16,6 milyon tonluk üretim hacmi ile kullanılan peletlerin %74'lük kısmını tedarik etmiştir. Bu oranda yaklaşık olarak küresel üretimin %57'lik bir kısmına karşılık gelmektedir. Avrupa'da pelet tüketiminin yaklaşık %61,8'lik büyük bir kısmı konut ve ticari ısıtma amaçlı ısı enerjisine dönüştürülerek kullanılırken, %38,2'lik kısmı ise güç üretiminde kullanılmaktadır. Küresel bazda pelet üretim gelişimi Şekil 6.5'de verilmiştir [131, 138, 140].



Şekil 6.5 Küresel pelet üretim gelişimi [140]

Avrupa biyoenerji istatiksel raporu 2019 verilerine göre ise küresel pelet üretimi 2018 yılında %14 oranında büyümeye devam etmiştir. Asya'da da pelet üretimi hızla büyümeye devam etmiş. Çin'in yanı sıra Viyetnam, Malezya ve Taylant'da da pelet üretim hacmi 2018 yılında %54 oranında artmıştır. Aynı şekilde Dünya pelet tüketimi de bir önceki yıla göre %14 artarak yaklaşık 35 milyon ton değerine ulaşmıştır. Küresel düzeyde konut ve ticari pelet tüketimi nin ise yaklaşık 1,3 milyon ton artarken, endüstriyel pelet tüketiminin ise yaklaşık 3 milyon ton arttığı rapor edilmiştir. Avrupa biyoenerji istatiksel raporuna göre 2019 yılı için belirtilen pelet üretim ve tüketim oranları Şekil 6.6'de verilmiştir [140].

Tütkiye coğrafi konumu ve iklimsel koşullarından dolayı tarımsal çeşitliliği olan bir ülke konumundadır. Dolayısıyla tarımsal kaynaklı biyokütlede Türkiye için enerji üretiminde çok önemli bir kapasiteye sahiptir. Biyokütleden değişik enerji dönüşüm sistemleri kullanılarak biyoyakıt üretilmekte, üretilen değişik biyoyakıtlarda son kullanım alanına göre ısı ve elektrik enerjisi şeklinde kullanıcıya sunulmaktadır.



Şekil 6.6 2019 yılı Dünya pelet üretim ve tüketim oranları [140]

Avrupa Birliği'de biyoyakıtlarıda içeren yenilenebilir enerji kaynakları kullanımını 2020 yılı hedeflerinde %20 oranında artırmayı amaçlamıştır. Bu doğrultuda Türkiye'de %73 olan enerji bakımından dış ülkelere bağımlılığını azaltıp, yerli enerji kaynaklarına verilen önemi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırmayı amaçlamıştır. Belirtilen amaçlar doğrultusunda 2023 yılı için elektrik üretiminde yenilenebilir kaynakların payı yaklaşık %30 olarak bildirilmiştir.

Türkiye'de en fazla tahıl ve yağlı tohumların üretimi yapılmakta, bu üretimlerden de en çok buğday, arpa, pamuk gibi ürünlerin tarımsal atıkları oluşmaktadır. Türkiye'de tarımsal kaynaklı atıkların enerji potansiyeli yaklaşık 50-65 MTEP/yıl seviyesinde iken, enerji dönüşümünde yararlanılabilecek tarımsal kaynaklı atıklar 13 milyon ton, bunların kalorifik değerleri ise 228 PJ'dur. Mevcut bazı tarımsal kaynaklı ürünlerin üretim miktarları ve enerji kapasiteleri Tablo 6.2'de verilmiştir. Ülkemizde biyokütleden üretilebilecek enerji potansiyeli bu kadar yüksek olmasına rağmen yeterli ödenekler ve teknik imkanlar bulunmadığı için yeteri kadar yararlanılamamaktadır [113, 141].

Tablo 6.2 Tarımsal kaynaklı ürünlerin üretim miktarları ve enerji kapasiteleri [113]

Tarla Bitkileri	**Atıklar**	**Üretim (Milyon Ton)**	**Mevcut Atıklar (Milyon Ton)**	**Enerji Potansiyeli (MTEP)**
Buğday	Saman	22.4	3.5	1.43
Mısır	Bitki Sapı & Mısır Koçanı	2.9	4.1	1.70
Arpa	Saman	7.9	1.2	0.50
Çavdar	Saman	0.3	0.05	0.02
Yulaf	Saman	0.3	0.05	0.02
Pirinç	Saman & Kabuk	0.3	0.2	0.07
Tütün	Bitki Sapı	0.2	0.2	0.09
Pamuk	Bitki Sapı & Çırçır	2.4	2.1	0.85
Ay Çiçeği	Bitki Sapı	0.8	1.3	0.44
Yer Fıstığı	Saman & Kabuk	0.007	0.002	0.01
Soya	Saman	0.005	0.001	0.005
* MTEP : Milyon Ton Eşdeğer Petrol				

7
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

7.1 Tez Çalışmasında Kullanılan Biyokütle Kaynakları ve Organik Katkı Maddeleri

Bu çalışmada, ülkemizde yaygın olarak bulunan ve geleneksel enerji kaynaklarına alternatif olarak değerlendirilebileceği düşünülen, enerji bitkileri sınıfından geven ve sığır kuyruğu bitkileri ham biyokütle kaynakları olarak değerlendirilmiştir. Bu bitkilerin yakıt karakteristik özelliklerine katkı sağlanması ve tezin bir sonraki aşamasını içeren kaliteli biyopelet üretiminde doğal bağlayıcı olarak kullanım amaçlı değişik endüstriyel organik atıklar (keçiboynuzu ve mısır) ise katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Biyokütlenin düşük ısıl değer, yüksek nem ve uçucu madde içerikleri, düşük yoğunluğu ve yüksek oksijen/karbon oranı nedeniyle kömür gibi fosil yakıtlara göre dezavantajları söz konusudur. Tez çalışmasının birinci aşamasında, biyokütlenin karakteristik özelliklerinden kaynaklanan problemleri en aza indirmek ve yakıt enerji potansiyelini iyileştirerek, yüksek kaliteli biyoyakıt elde etmek amacıyla biyokütlelere termal ön işlem olarak torrefaksiyon dönüşüm prosesi uygulanmıştır. Torrefaksiyon prosesi uygulanırken deney setlerinin belirlennesi için deney tasarım metodlarından Design Expert optimizasyon programı/ merkezi kompozit tasarım yönteminden yararlanılmıştır. Tezin ikinci aşamasında ise belirlenen deney planı göz önüne alınarak torrefaksiyon prosesi ile üretilen torrefiye biyokömürlere uygulanan analiz sonuçları, design expert programında yanıt yüzey yöntemi (RSM/response surface methodology) ile çözümlendirilmiş ve her deney seti için optimum üretim koşulları belirlenmiştir. Belirlenen optimum koşullarda üretilen torrefiye biyoyakıtlarla peletleme çalışmaları gerçekleştirilip optimum biyopelet üretimi yapılmıştır. Tez çalışmasının ilk aşaması olan torrefaksiyon prosesi uygulanmasında biyokütle kaynağı olarak kullanılan geven bitkisi, Uşak ili kırsallarından, sığır kuyruğu bitkisi ise Afyonkarahisar İhsaniye ilçesi / Üçlerkayası köyü kırsalından temin edilmiştir.

Geven bitkisi çok yıllık bitkilerden olup, baklagiller familyasından gelmektedir. Dağlık alanlarda ve kurak iklim koşullarında kendiliğinden yetişebilme özelliğine sahiptir. Geven bitkisinden çıkarılan kitre ilaç sanayisinde ve ebru sanatında kullanılabilmektedir. Sığır kuyruğu bitkisi ise iki yıllık bitki olup, sıracagiller familyasından gelmektedir. Geven bitkisi gibi dağlık alanlarda ve kurak iklim koşullarında yetişebilme özelliğine sahiptir. Ligno selülozik yapıdaki bu bitkiler, mevcut fosil enerji kaynaklarından olan kömüre kıyasla daha düşük kül ve uçucu madde içeriğine sahip olmakla beraber nispeten kömüre yakın ısıl değere sahip oldukları için; Alternatif enerji kaynağı olarak düşünülen biyokömür üretiminde ham biyokütle kaynağı olarak kullanılmışlardır. Ham biyokütlelerden enerji içeriği geliştirilmiş biyokömür üretimi için uygulanan torrefaksiyon prosesinde ayrıca katkı maddesi amaçlı ve literatür bilgilerinden yola çıkılarak bağlayıcı özellikleri olduğu bilinen endüstriyel organik atıklardan keçiboynuzu ve mısır atığı kullanılmıştır. Keçiboynuzu organik atığı Antalya'da faaliyet gösteren Antalya Konserve Pekmez Gıda San Tic Ltd Şti' den pekmez üretim atığı olarak temin edilmiştir. Keçiboynuzu atığının tez çalışmasında kullanılmasının sebeplerinden biri de, bu atıkların kalorifik değerlerinden dolayı bilinçsiz olarak yakılıp kırsal alanlarda evsel ısı üretimi için kullanılıyor olması ve tezde uygulanan prosesde kullanılarak endüstriyel atıkların ülke ekonomisine katkı sağlanabileceğinin gösterilmek istenmesidir. Tez çalışmasında, bağlayıcı özelliği ve karakteristik yanma özelliklerinden dolayı özellikle peletleme aşamasında doğal bağlayıcı olarak değerlendirilebileceği düşünülen bir başka organik endüstriyel atık için Konya'da faaliyet gösteren yağ üretim firmasından temin edilen mısır sap ve koçan atıkları da kullanılmıştır.

7.2 Ham Biyokütle Kaynaklarına ve Organik Atıklara Uygulanan Ön işlemler

Torrefaksiyon prosesi ile biyokömür üretiminde kullanılmak üzere temin edilen ham biyokütleler ve organik atıklar önce laboratuvar ortamında oda sıcaklığında daha sonra ise 105 °C etüv ortamında kurutulmuştur. Kurutma işleminden sonra laboratuvar ölçekli öğütme cihazı olan Şekil 7.1' de gösterilen IKA A11 marka el tipi öğütücü kullanılarak değişik boyutlarda numunelere parçalanmışlardır. Elde

edilen numunelerin, deneylerde kullanılması kararlaştırılan 1000-5000 µm tanecik boyutundaki fraksiyonlarına ayrılabilmesi için farklı gözenek açıklığına sahip elekler ve Şekil 7.2'de gösterilen FRITSCH marka elek sarsma cihazı kullanılmıştır.



Şekil 7.1 IKA A11 el tipi öğütücü



Şekil 7.2 FRITSCH elek sarsma cihazı

7.3 Ham Biyokütle ve Organik Atıklar İçin Karakterizasyon Çalışmaları

Torrefaksiyon prosesi öncesi ham biyokütlelere ve organik atıklara numunelerin yakıt karakterizasyonunu belirleyebilmek amacı ile elementel analiz, kısa analizler, makromoleküler bileşen analizi, üst ısıl değer analizi, Termogravimetrik analiz (TG/DTA), FT-IR analizi ve SEM analizleri yapılmıştır.

7.3.1 Ham Biyokütle ve Oganik Atıkların Kısa Analizleri

Numunelerin nem, kül, uçucu madde ve sabit karbon içeriklerini belirleyebilmek için TGA cihazından yararlanılarak kısa analizler gerçekleştirilmiştir. İlk olarak her numuneden yaklaşık olarak 10 mg tartılıp, 100 ml/dk akış hızı ile azot atmosferi altında 10 °C/dk ısıtma hızında 105 °C' ye ısıtılmıştır. Numune, nem içeriğini uzaklaştırmak için bu sıcaklıkta 10 dakika kadar tutulmuştur. Daha sonra numune 100 ml/dk akış hızı ile azot atmosferi koşulunda 40 °C/dk ısıtma hızında 900 °C'ye kadar ısıtılmıştır. Bu aşamada numune uçucu madde içeriğini uzaklaştırmak için bu sıcaklıkta 7 dakika kadar tutulmuştur. Bir sonraki aşamada yine 100 ml/dk akış

hızı ile azot atmosferi altında sıcaklık 20 °C/dk soğutma hızında kontrollü olarak 600 °C' ye düşürülmüştür. Bu sıcaklığa ulaşıldığında azot atmosferi değiştirilerek numune 100 ml/dk akış hızındaki kuru hava atmosferinde sabit ağırlığa gelene kadar tutulmuştur. Kalan ağırlık numunenin kül içeriğini vermiştir. Numunenin sabit karbon miktarı ise toplamdan çıkartılarak hesaplanmıştır [78, 142].

7.3.2 Ham Biyokütle ve Oganik Atıkların Elementel Analizi

Ham biyokütle ve organik atıkların C, H, N ve S içerikleri Thermo Scientific Flash 2000 elementel analiz cihazı ile Gazi Üniversitesi Kimya Bölümü laboratuvarında yapılmıştır. Numunelerdeki oksijen miktarı ise farktan yararlanılarak hesaplanmıştır [143].

7.3.3 Ham Biyokütle ve Organik Atıkların Üst Isıl Değer Analizleri

Üst ısıl değer olarak da bilinen kalorifik değer, termokimyasal dönüşüm sistemlerinin etkinliğini etkileyen ve enerji üretiminde yakıt olarak kullanılan biyokütlenin kalitesini gösteren hammaddenin önemli bir özelliğidir. Deneysel çalışmada kullanılan biyokütlelerin ve organik atıkların kalorifik değerini belirleyebilmek için Şekil 7.3'de gösterilen İKA C 4000 adyabatik kalorimetre cihazı kullanılmıştır. Numunelerin kalorifik değerleri (7.1) eşitliğinden yararlanılarak hesaplanmıştır.

$$Q = \frac{(C \times \Delta T - Qf)}{m} \left(\frac{J}{g}\right) \tag{7.1}$$

Q= Numunelerin üst ısıl değeri (J/g)

C= Kalorimetre sisteminin ısı kapasitesi (J/K)

ΔT= Ölçülen sıcaklık artışı (K)

Qf= Tüm ikincil enerjilerin toplamı (J)

M= Numune miktarı (g)



Şekil 7.3 İKA C 4000 adyabatik kalorimetre cihazı

7.3.4 Ham Biyokütle ve Organik Atıklar için Makromoleküler Bileşen Analizi

Numunelerin kimyasal yapısındaki makromoleküler bileşenleri oluşturan ekstraktif madde, selüloz, lignin ve hemiselüloz içerikleri ilgili standartlar uygulanarak tayin edilmiştir.

7.3.4.1 Ekstraktif Madde Analizi

Numunelerin ekstraktif madde içeriğini tayin edebilmek için Tappi T204 cm-07 prosedürü izlenmiştir. Kurutulan ve analize uygun tanecik boyutuna elenen numuneler (0,4 mm) yaklaşık 2,0 g tartılarak hacimsel 2:1 benzen/etanol çözeltisi ile 5 saat boyunca soxhlet ekstraksiyonu ile muamele edilmiştir. İşlem sonucu elde edilen kalıntı oda sıcaklığında kurutulup, daha sonra sabit tartıma ulaşıncaya kadar 105 °C sıcaklıkta etüvde tutulmuştur. Sabit tartıma gelen numuneler desikatöre alınarak oda sıcaklığına kadar soğutulmuş ve tartımları alınmıştır. Gerekli hesaplamalar (7.2) eşitliğinden yararlanılarak yapılmıştır [144], [145].

$$\%\text{Ekstraktif Madde} = \frac{m0 - m1}{m0} \times 100 \tag{7.2}$$

m0= Analiz öncesi numune miktarı (g)

m1= Analiz sonrası numune miktarı (g)

7.3.4.2 Hemiselüloz Analizi

Numunelerin ekstraktif madde analizi sonrası elde edilen kalıntı, 150 ml NaOH (20 g/l) çözeltisi içerisine alınmıştır. Bu çözelti yaklaşık 3,5 saat geri soğutucu altında kaynatılmıştır. Prosedür sonucu çözelti filtre edilip, kalıntı Na^+ iyonu içermeyene kadar saf su ile yıkanmış ve sabit tartıma gelene kadar kurutulmuştur. Daha sonra kalıntı desikatörde oda sıcaklığına getirilmiş ve tartımı alınmıştır. Numunenin hemiselüloz içeriği (7.3) eşitliğinden yararlanılarak hesaplanmıştır [146].

$$\%\text{Hemiselüloz} = \frac{m1 - m2}{m0} \times 100 \tag{7.3}$$

m0= Ekstraktif madde analizi öncesi numune miktarı (g)
m1= Hemiselüloz analizi öncesi numune miktarı (g)
m2= Hemiselüloz analizi sonrası numune miktarı (g)

7.3.4.3 Lignin Analizi

Estraktif madde analizinden elde edilen kalıntıdan 1 g tartılmış ve yaklaşık 15 °C sıcaklıktaki soğuk 15 ml %72'ik H_2SO_4 çözeltisi bulunan bir behere aktarılarak, numunenin çözünmesi sağlanmıştır. Daha sonra beher ağzı kapatılarak 20 °C'lik su banyosunda 24 saat tutulmuştur. Daha sonra karışım bir balon içerisine aktarılıp 300 ml saf su ile H_2SO_4 çözeltisi %6 oranına seyreltilmiş ve 4 saat süresince geri soğutucu altında kaynatılmıştır. Çözelti filtre edilip kalıntıdan $SO4^{-2}$ iyonunu uzaklaştırabilmek için sıcak su ile kıyanmıştır. Yıkanan kalıntı 105 °C etüvde sabit ağırlığa gelene kadar kurutulmuş, desikatörde soğutulup tartımı alınmıştır. Numune içerisindeki lignin miktarı (7.4) eşitliğinden yararlanılarak hesaplanmıştır [146, 147].

$$\%\text{Lignin} = \frac{m4(1 - \%\text{Ekstraktif madde})}{m3} \times 100 \tag{7.4}$$

m3= Ekstraktif madde analizi sonucu kalıntıdan alınan kütle (g)

m4= Analiz sonucu kalıntı miktarı (g)

7.3.4.4 Selüloz Analizi

Numune içerisindeki selüloz analizi ise toplamdan çıkartılarak (7.5) eşitliğinden yararlanarak hesaplanmıştır [146].

$$\%\text{Selüloz} = 100 - (\%\text{Kül} + \%\text{Ekstraktif madde} + \%\text{Lignin} + \%\text{Hemiselüloz}) \quad (7.5)$$

7.3.5 Termogravimetrik Analiz

Numunelerin ayrışmasına yol açan reaksiyonların başladığı sıcaklık aralığının izlenebilmesi için termogravimetrik analiz uygulanmıştır. Bu analiz Yıldız Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda SII6000 Exstar TG/DTA 6300 cihazı kullanılarak yapılmıştır. Analizler 10°C/dakika ısıtma hızında ortam sıcaklığından 900°C' ye kadar ısıtılarak azot ortamında gerçekleştirilmiş ve numunelerin kütle kayıpları sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçülmüştür.

7.3.6 Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FT-IR) Spektroskopisi

Numunelerin yapısındaki kimyasal bağların ve fonksiyonel grupların belirlenerek moleküler yapılarının aydınlatılabilmesi amacı ile FT-IR analizi uygulanmıştır. Bu analiz Yıldız Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda Perkin Elmer Spectrum 100 ATR FT-IR cihazı kullanılarak 650-4000 cm^{-1} dalga boyu aralığında gerçekleştirilmiştir.

7.3.7 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

Numunelerin yüzey özelliklerini ve morfolojisini belirlemek için SEM cihazı ile yüksek çözünürlükte örnek görüntüleri alınmıştır. Bu analiz Yıldız Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda Zeiss EVO LS 10 SEM cihazı kullanılarak gerçekleştirirlmiş ve numunelerin yapısal farklılıkları belirlenmiştir.

7.4 Biyokütle Kaynaklarına ve Organik Atıklara Torrefaksiyon Prosesinin Uygulanması

Yüksek enerji içerikli ve yanma özellikleri iyileştirilmiş biyoyakıt üretimi için ham biyokütle kaynakları (sığır kuyruğu veya geven bitkisi) ve katkı maddeleri olarak endüstriyel organik atıklar (keçi boynuzu veya mısır) kullanılarak, düşük ısıtma hızında (10°C/dk) ve inert azot ortamında kül fırını ile Şekil 7.4'de gösterildiği gibi

torrefaksiyon prosesi uygulanmıştır. Yapılan literatür araştırmaları ve ön denemeler sonucunda torrefaksiyon prosesi ile üretilen torrefiye biyokömürün enerji içeriği ve karakteristik özellikleri üzerine en etkili parametrelerin ham biyokütlenin tanecik boyutu, proses sıcaklığı, proses süresi ve organik katkı maddesi oranı olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7.4 İnert azot gazı ortamında uygulanan torrefaksiyon proses düzeneği

Enerji potansiyeli geliştirilmiş biyokömür üretiminin optimizasyonu ve prosesi etkileyen bağımsız değişkenlerin birbirleri ve cevap yüzeyleri ile etkileşimlerini değerlendirmek amacı ile Design Expert programı/cevap yüzey yöntemi/merkezi kompozit tasarımı kullanılarak, 4 bağımsız değişken, 5 seviye ve merkezde 6 tekrar olacak şekilde 30 deneme içeren deney setleri oluşturulmuştur. Deney setlerinde bağımsız değişkenler; sıcaklık (200-320°C), kalma süresi (15-75 dk), tanecik boyutu (1-5 mm) ve organik atık oranı (% 0-100 ağ/ağ) şeklinde belirlenmiştir. Her bir bağımsız değişken için 5 seviye aralığı uygulanarak geven veya sığır kuyruğu enerji bitkilerinden torrefaksiyon prosesi ile kömüre alternatif olarak kullanılabileceği düşünülen biyokömür (Şekil 7.5) üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.5 Ham biyokütle ve değişik proses koşullarında üretilen torrefiye biyokömür numuneleri

Torrefaksiyon proses yanıtlarından olan, üretilen biyokömürlerin % kütle kaybı, % kütle verimliliği, % enerji verimliliği, ısıl değeri (MJ/kg) ve enerji yoğunluğu gibi analiz sonuçları ise bağımlı değişkenler olarak değerlendirilmiştir. [85]. Tanımlanan bağımsız değişkenlere göre oluşturulan deney planı Tablo 7.1'de verilmiştir.

Tablo 7.1 Torrefaksiyon deney planı

	Torrefaksiyon Prosesi			
Bağımsız Değişkenler	Sıcaklık (°C)	Kalma Süresi (dk)	Tanecik Boyutu (mm)	Katkı Maddesi Atık Oranı (% ağ/ağ)
Seviye Aralığı	200-320	15-75	1-5	0-100
1. Set	SK-KB*			
2. Set	G-KB**			
3. Set	G-M***			
4. Set	SK-M****			

* SK-KB= Sığır Kuyruğu-Keçi Boynuzu

** G-KB= Geven-Keçi Boynuzu

*** G-M= Geven- Mısır

**** SK-M= Sığır Kuyruğu-Mısır

7.5 Torrefiye Biyokömür Numunelerine Uygulanan Karakterizasyon Çalışmaları

Torrefaksiyon prosesi ile üretilen torrefiye biyokömür numunelerinin karakterizasyonu için Bölüm 7.3'de bahsedilen analizler uygulanmıştır. Ayrıca torrefaksiyon proses yanıtlarından olan % kütle kaybı, % kütle verimi, % enerji verimi ve enerji yoğunluğu parametreleri de ürünlerin karakterizasyonu için kullanılmıştır.

7.5.1 Torrefiye Ürün % Kütle Kaybı

Torrefaksiyon prosesi ile ham biyokütlenin yapısında nem kaybı ve ısıl bozunma gerçekleşmekte bundan dolayı da biyokütlede kütle kaybı gözlenmektedir. Biyokütlede meydana gelen kütle kaybı (7.6) eşitliğinden yararlanılarak hesaplanmıştır [148].

$$\%\ \text{Kütle Kaybı} = \frac{(m0 - m1)}{m0} \times 100 \qquad (7.6)$$

m0= Torrefaksiyon proses öncesi kurutulmuş ham biyokütle miktarı (g)

m1= Torrefaksiyon prosesi sonrası torrefiye ürün miktarı (g)

7.5.2 Torrefiye Ürün % Kütle Verimi ve % Enerji Verimi

Torrefaksiyon prosesi ile ham biyokütle yapısından kısmen bozunmalar sonucu çeşitli uçucu maddeler uzaklaşmaktadır. Bu bozunmalar sonucu oluşan gaz fazı ile ham biyokütlenin yapısında kütle ve kimyasal enerji kaybı meydana gelmektedir. Bu kayıplar sonucu hesaplanan kütle ve enerji verimi, torrefaksiyon prosesini değerlendirebilmek için en önemli parametrelerdir. Kütle verimi (7.7) eşitliği yardımıyla torrefiye biyokömür ağırlığının ham biyokütle ağırlığına oranlanması ile hesaplanabilmektedir.

$$\text{Kütle Verimi} = \frac{\text{Torrefiye biyokömür kütlesi (g)}}{\text{Ham biyokütle kütlesi (g)}} \times 100 \qquad (7.7)$$

Enerji verimi ise (7.8) eşitliği yardımıyla kütle veriminin ve numunelerin üst ısıl değerlerinin bir fonksiyonu olarak hesaplanabilmektedir. Bu iki parametre biyokütleden torrefiye ürüne transfer olan kütle ve kimyasal enerjiyi tanımlayabilmek ve elde edilen torrefiye ürünün karakterizasyonu için kullanılmaktadır [85, 149].

$$\text{Enerji Verimi} = \text{Kütle Verimi} \times \frac{\text{Torrefiye biyokömür üst ısıl değeri } \left(\frac{J}{g}\right)}{\text{Ham biyokütle üst ısıl değeri } \left(\frac{J}{g}\right)} \times 100 \qquad (7.8)$$

7.5.3 Torrefiye Ürün Enerji yoğunluğu

Torrefaksiyon prosesi ile lignoselülozik biyokütlenin kimyasal yapısında kısmen meydana gelen bozunmalar sonucu gaz fazına kütle transferi enerji transferinden daha fazla gerçekleşmektedir. Bu olay proses sonucu enerji yoğunluğu daha yüksek torrefiye ürün elde edildiğini göstermektedir. Yani torrefiye ürünün birim hacimde bulundurduğu enerji miktarı daha fazladır. Bu şekilde tanımlanan enerji yoğunluğu (7.9) eşitliğinden yararlanarak hesaplanmıştır [120, 149].

$$\text{Enerji Yoğunluğu} = \frac{\text{Enerji Verimi}}{\text{Kütle Verimi}} \quad (7.9)$$

7.6 Biyokömür Pelet Üretimi

Design Expert optimizasyon programı/Yüzey yanıt metodu ve merkezi kompozit tasarımından yararlanılarak torrefaksiyon prosesi ile enerji içerikleri iyileştirilmiş biyokömür üretimi gerçekleştirilmiştir. Sığır kuyruğu ve Geven biyokütleleri için ayrı ayrı oluşturulan deney setleri ile üretilen biyokömür numunelerine Bölüm 7.5'de bahsedilen analizler uygulanarak proses yanıtları elde edilmiştir. Yüzey yanıt yöntemi ile elde edilen proses yanıtları Design Expert programı ile çözümlendirilerek her deney seti için torrefaksiyon prosesi optimum koşulları belirlenmiştir. Optimum proses koşulları Tablo 7.2'de verilmiştir.

Tablo 7.2 Bağımsız değişkenler için Design Expert programı ile belirlenen optimum koşullar

	Torrefaksiyon Prosesi Optimum Koşulları			
Bağımsız Değişkenler	Sıcaklık (°C)	Kalma Süresi (dk)	Tanecik Boyutu (mm)	Katkı Maddesi Atık Oranı (% ağ/ağ)
1. Set (SK-KB)	290	60	4	75
2. Set (G-KB)	290	57	4	25
3. Set (G-M)	290	60	3	75
4. Set (SK-M)	290	60	4	70

Her deney seti için ayrı ayrı belirlenen optimum koşullar, hammadde karışımlarına uygulanarak optimum proses koşullarında torrefiye biyokömür numuneleri üretilmiştir. Daha sonra presleme kalıbına alınan torrefiye biyokömür numunesine hidrolik pres (Şekil 7.6) yardımı ile 20 MPa basınçta peletleme işlemi uygulanmıştır. Elde edilen peletlerin (Şekil 7.7) çaplarının 1 cm, uzunluklarının ise 1-1,5 cm aralığında değiştiği belirlenmiştir.



Şekil 7.6 Hidrolik pres



Şekil 7.7 Biyopelet numuneleri

7.7 Biyopelet Numunelerine Uygulanan Karakterizasyon Çalışmaları

Torrefiye biyokömür numunelerinden hidrolik pres yardımı ile üretilen biyopelet numunelerinin kimyasal yapılarının karakterizasyon çalışmaları için Bölüm 7.3'de bahsedilen nem içeriği, kül içeriği ve üst ısıl değer analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca peletlerin fiziksel özelliklerinin tayin edilebilmesi için peletlere düşme/darbe direnci testi, sıkıştırma direnci testi ve suya dayanım testi uygulanmıştır.

7.7.1 Düşme/Darbe Direnci Testi

Darbe direnci testi, peletlenerek yoğunlaştırılmış yakıtların depolanma veya nakliye sırasında bozunmadan kalabilmesi yani dayanıklılığının test edilmesi için uygulanan bir analizdir. Literatür çalışmalarında birkaç farklı metod ile analiz edilebildiği görülmektedir. Bu çalışmada, belirli bir referans noktasından düşürme yöntemi kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Biyopeletlerin dayanıklılığını test etmek için seçilen peletler, 1,85 m yükseklikten metal zemine serbest olarak bırakılmıştır. Bu işlem 4 kez tekrarlandıktan sonra peletler 3 mm delik boyutlu elek ile elenmiş ve elek üstünde kalan pelet ağırlığı başlangıç ağırlığının yüzdesi olarak (7.10) eşitliğinden yararlanarak hesaplanmıştır [129, 150].

$$\% \text{ Darbe Direnci} = \frac{\text{Analiz sonrası pelet ağırlığı (g)}}{\text{Analiz öncesi pelet ağırlığı (g)}} \times 100 \qquad (7.10)$$

7.7.2 Sıkıştırma Direnci Testi

Pelet yakıtlar için nihayi kullanım alanlarına ulaşıncaya kadar bütünlüğünü koruyabilmeleri fiziksel özellikleri bakımından çok önemli bir parametredir. Pelet bütünlüğü, pelet sertliği ile orantılı olarak değişmekte bu da sıkıştırma direnci ile test edilebilmektedir. Sıkıştırma direnci, pelet yakıtların sıkıştırma prosesinde bütünlüğünün bozulmadan yani kırılmadan önceki uygulanabilecek maksimum sıkıştırma yükü şeklinde belirtilmektedir. Bu analiz için peletler, çekme basma cihazında iki plaka arasına yerleştirilmiş ve peletler kırılana kadar sabit hızda basınç artırılarak sıkıştırma kuvveti uygulanmıştır. Uygulanan basınca karşı peletlerin kırılma direnci tespit edilmiştir [151].

7.7.3 Suya Dayanım Testi

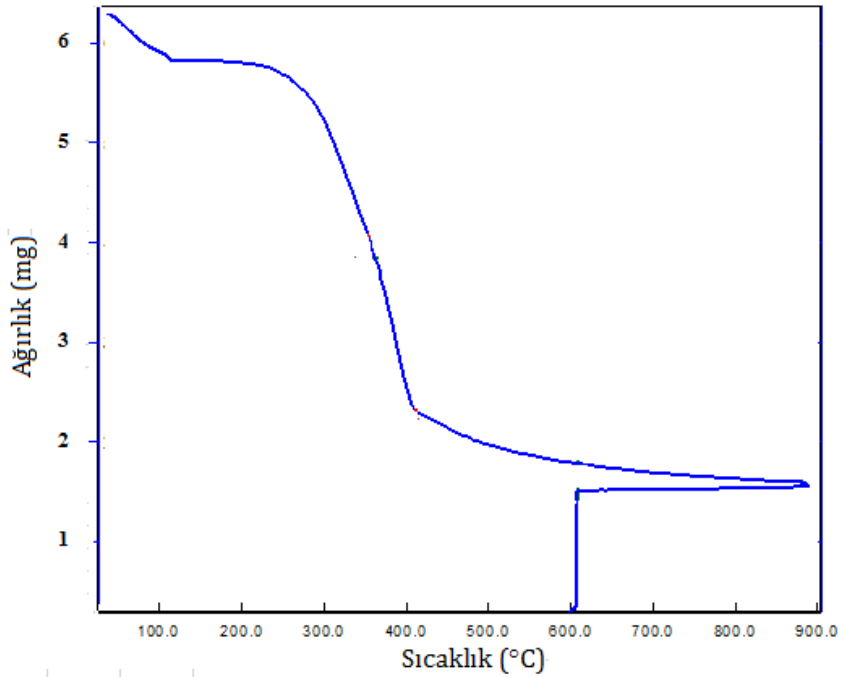
Pelet yakıtlar nakliye veya depolanma sırasında yağmur ya da yüksek nem koşulları gibi olumsuz çevre koşullarına maruz kalabilmektedir. Bu gibi olumsuzluklar da pellet yakıtların yanma kalitesi üzerinde negatif etkilere sebep olmaktadır. Bu yüzden pellet yakıtlara suya dayanımlarının test edilebilmesi için analizler uygulanmaktadır. Literatür çalışmalarında çok çeşitli analizler olmakla beraber, bu çalışmada peletlerin suya dayanımları, suda bekletme süreleri ile test edilmiştir [113, 150].

8
SONUÇLAR ve TARTIŞMA

8.1 Karakterizasyon Çalışmaları

8.1.1 Ham Biyokütle ve Oganik Atıklar İçin Kısa Analiz Sonuçları

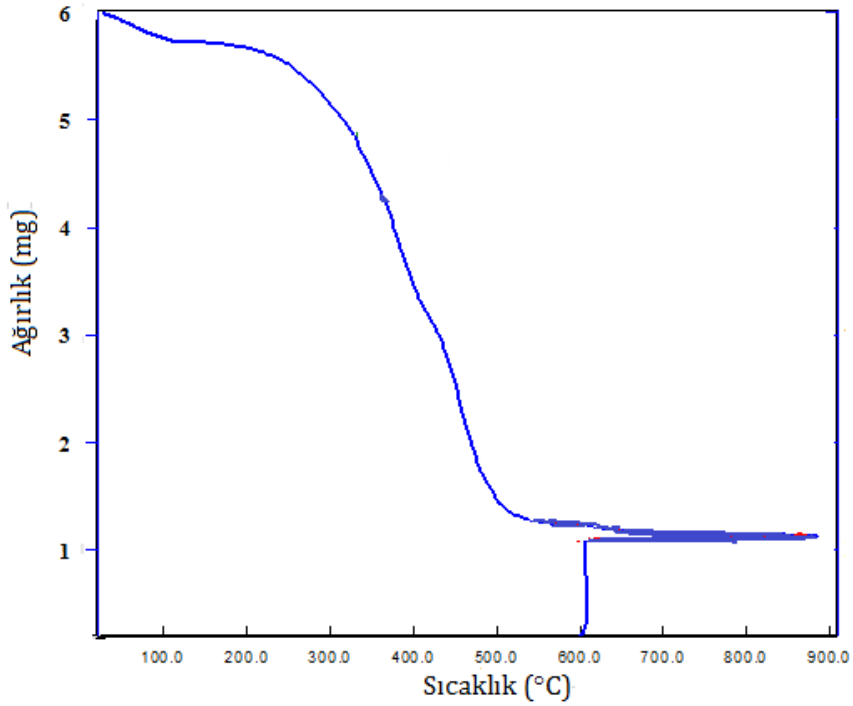
Torrefaksiyon prosesinde kullanılan ham biyokütle ve organik atıkların yakıt karakteristik özelliklerini belirleyebilmek için kısa analizler Bölüm 7.3.1'de açıklandığı gibi TGA cihazından yararlanılarak ardaşık ısıtma işlemi ile gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucu elde edilen TG grafikleri Şekil 8.1-8.4'de sırası ile verilmiştir.



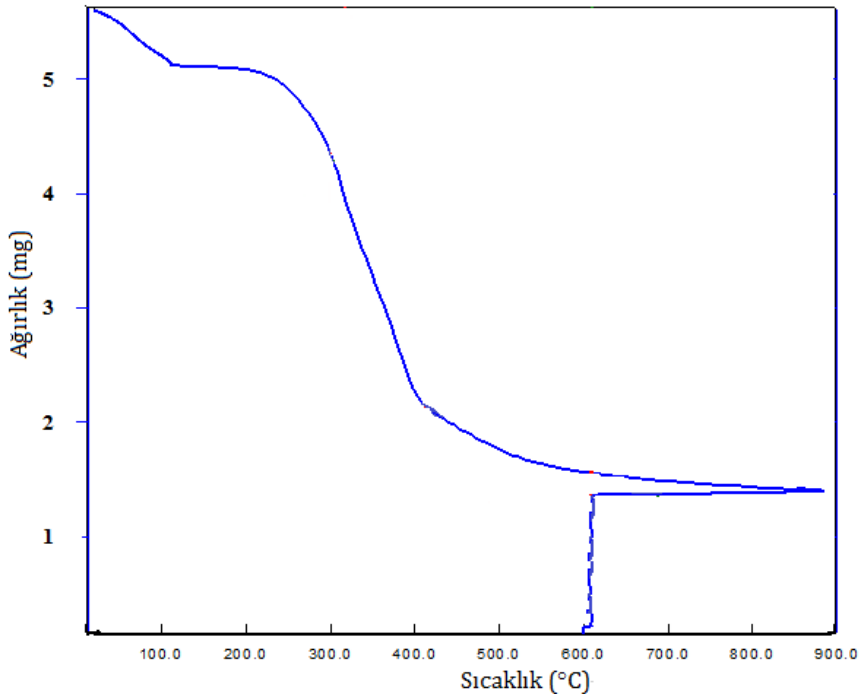
Şekil 8.1 Sığır Kuyruğu TG eğrisi

Numunelerin TG eğrilerine bakıldığında ilk gözlenen ağırlık kaybının yapıdaki su moleküllerinin ve nemin uazaklaştırılması sonucu olduğu görülmüştür. Daha sonra gözlenen ikinci büyük ağırlık kaybı ise biyokütlenin yapısından hemiselüloz, selüloz ve lignin gibi makromoleküller ile karbondioksit, su ve karbonmonoksit gibi moleküllerin ısıtma sonucu uçucu madde olarak yapıdan uzaklaştırılması ile

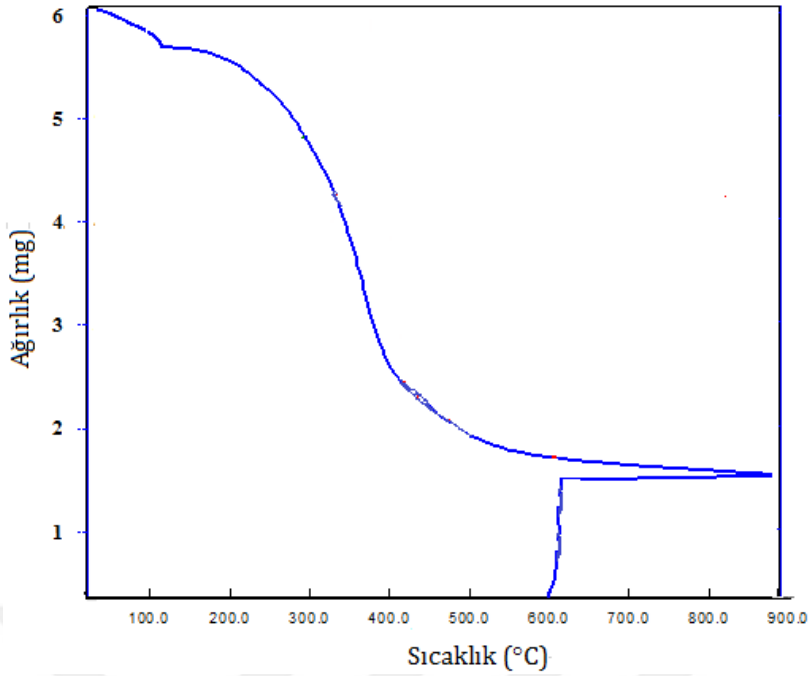
oluşmuştur. Daha sonra kuru hava atmosferinde 600 °C civarında uygulanan proses ile biyokütle yapısındaki sabit karbonun tamamen yanarak analiz edilmesi sağlanmıştır.



Şekil 8.2 Geven TG eğrisi



Şekil 8.3 Keçi Boynuzu TG eğrisi



Şekil 8.4 Mısır TG eğrisi

Deneysel çalışmada kullanılan ham biyokütle ve organik atıkların termogravimetrik analizi ile elde edilen kısa analiz sonuçları ve kalorimetre bombası kullanılarak hesaplanan üst ısıl değer sonuçları Tablo 8.1'de verilmiştir.

Tablo 8.1 Ham biyokütle ve organik atıkların kısa analiz sonuçları

Kısa Analiz Sonuçları					
	% Nem	% Uçucu Madde	% Kül	% Sabit Karbon	Üst Isıl Değer (MJ/kg)
Sığır Kuyruğu	8,04	73,43	6,33	12,19	16,68
Geven	5,17	75,34	4.50	14,99	18,44
Keçi Boynuzu	8,1	78,80	3,07	10,03	15,86
Mısır	9,26	68,23	5,79	16,72	16,47

Tablo 8.1'de verildiği gibi ham biyokütle numunelerinden olan geven bitkisinin uçucu madde ve sabit karbon içeriğinin sığır kuyruğu bitkisine kıyasla daha yüksek olduğu, bundan dolayı da daha yüksek kalorifik değere sahip olduğu belirlenmiştir.

Ayrıca Literatür bilgilerine göre biyokütlenin mineraller bakımından da zengin olduğu bilinmektedir. Bu durum biyokütle yapısındaki kül oranına katkı sağlamıştır. Yanma proseslerinde yüksek oranda kül açığa çıkarması da literatür ile uyumlu olarak daha düşük kalorifik değerlere sahip olduğunu göstermektedir. Bu sebepten dolayı da düşük nem ve kül içeriğine sahip olan geven bitkisinin kalorifik değerinin daha yüksek belirlendiği söylenebilir. Mevcut fosil enerji kaynaklarından linyit kömürünün literatür bilgileri ile karşılaştırıldığında ise, biyokütlenin uçucu madde miktarının daha yüksek, sabit karbon miktarının ve kalorifik değerinin ise daha düşük olduğu söylenebilir. Literatür bilgilerine göre linyit kömürü için kalorifik değerin ortalama 3500-5000 cal/g (14,65-20,93 MJ/kg) arasında değiştiği bilinmektedir [142, 152].

Tez çalışmasında yararlanılan ham biyokütle ve organik atıkların kısa analiz sonuçları toplu olarak değerlendirildiğinde; Numunelerin sabit karbon oranlarının % 10,03 ile %16,72 arasında değişirken, üst ısıl değerlerinin ise 3793,89 ile 4411,41 cal/g aralığında değiştiği belirlenmiştir.

8.1.2 Torrefiye Biyokömür Numuneleri İçin Kısa Analiz Sonuçları

Farklı sıcaklık değerlerinde torrefaksiyon prosesleri gerçekleştirilen biyokütle numunelerinin yapılarından termal işlemden dolayı önemli değişiklikler meydana gelmiştir. Torrefaksiyon prosesi ile elde edilen biyokömür ürünlerinin yakıt karakteristiğini belirleyebilmek için kısa analiz sonuçları TGA eğrilerinden yararlanılarak hesaplanmış ve Tablo 8.2'de verilmiştir.

Tablo 8.2 Torrefiye biyokömür ürünlerinin kısa analiz sonuçları

Kısa Analiz Sonuçları						
	Proses Koşulu	% Nem	% Uçucu Madde	% Kül	% Sabit Karbon	Üst Isıl Değer (MJ/kg)
1.SET (SK-KB)	200 °C	3,91	60,74	4,65	30,7	19,19
	260 °C	5,39	48,52	14,6	31,49	22,45
	320 °C	8,81	40,1	17,94	33,15	23,79
2.SET (G-KB)	200 °C	3,48	68,11	13,24	15,18	19,52
	260 °C	3,07	56,81	12,37	27,75	23,42
	320 °C	3,21	48,05	13,68	35,06	24,79
3.SET (G-M)	200 °C	3,51	68,41	9,65	18,43	20,71
	260 °C	4,14	44,59	13,26	38,01	22,98
	320 °C	4,96	40,99	15,74	38,31	24,43
4.SET (SK-M)	200 °C	3,63	72,94	8,65	14,78	19,56
	260 °C	3,75	50,02	12,76	33,47	22,3
	320 °C	3,17	34,37	12,5	49,96	23,47

Torrefaksiyon sonucu biyokütlenin yapısında meydana gelen yapısal değişikliklerden dolayı proses sıcaklığındaki artış ile biyokömür ürünlerinin uçucu madde içeriklerinin azalırken, sabit karbon ve kül içeriklerinin ise yükseldiği belirlenmiştir. Değişik proses koşullarında gerçekleştirilen torrefaksiyon prosesi ile biyokütle yapısındaki bileşenler termal işlemden dolayı ayrışmakta ve yapıdan ilk önce düşük molekül ağırlıklı hidrokarbon yapıları olmak üzere karbon monoksit, karbon dioksit, hidrojen ve sıvı ürün içeren uçucular uzaklaşarak, uçucu madde içeriğinin azalmasına yol açmaktadır [131].

Özellikle G-KB biyokömür ürününün sabit karbon içeriği proses sıcaklığına bağlı olarak %15,18'den %35,06'ya yaklaşık 2,3 kat artarken, SK-M biyokömür ürününün sabit karbon içeriği ise %14,78'den %49,96'ya yaklaşık 3,4 kat artmıştır. Torrefaksiyon prosesi ile meydana gelen kütle kaybı torrefiye ürünlerde kül ve sabit karbon içeriklerinin artmasına yol açmıştır. Aynı zamanda torrefaksiyon prosesi ile biyokütle yapısında meydana gelen değişiklikler kül miktarındaki artış ile alakalıdır. Çünkü termal işlem sırasında biyokütle yapısındaki organik bileşikler parçalanırken, inorganik bileşikler ise ayrışmazlar ve oluşan kül miktarına katkı sağlarlar. Literatür bilgileride çoğunlukla kül bileşiminde bulunan alkali ve toprak

alkali metallerin torrefaksiyon prosesi sırasında genellikle torrefiye ürünlerin yapısında kaldığını göstermektedir.

Termal işlem ile biyokömür yapısındaki kül oranının artması yanma prosesleri için negatif bir etki vermesine rağmen, biyokütlenin yapısındaki uçucu bileşenlerin uzaklaştırılması ve sabit karbonun artması üretilen biyokömür numunelerinin kalorifik değerlerinde artışa sebep olmuştur. Çünkü yüksek sabit karbon içeriği, yanma prosesleri sırasında torrefiye biyokömürün daha fazla ısı açığa çıkarması anlamına gelmektedir. Proses sıcaklığındaki artış ile biyokömür numunelerinin ısıl değerlerinin arttığı ve 320°C proses sıcaklığında biyokömür numunelerinin kalorifik değerlerinin yaklaşık 23,47 MJ/kg ile 24,79 MJ/kg aralığında değiştiği görülmüştür [61, 142, 153].

8.1.3 Ham Biyokütle ve Torefiye Biyokömür Numuneleri Elementel Analiz Sonuçları

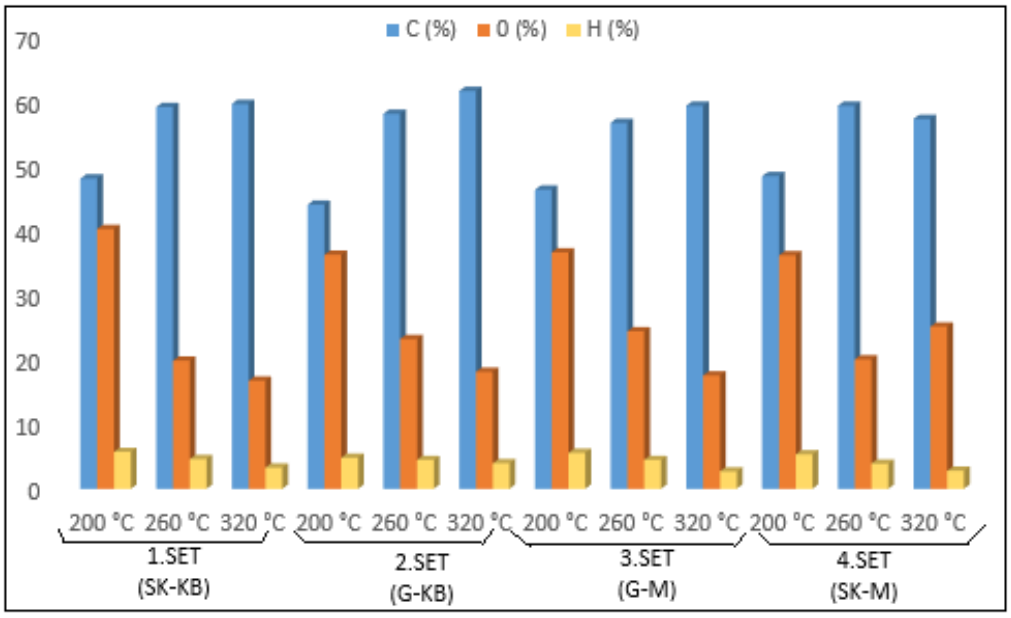
Torrefaksiyon prosesi ile ham biyokütlenin kimyasal bileşiminde meydana gelen değişiklikleri ve üretilen torrefiye biyokömür numunelerinin yakıt karakteristik özelliklerini açıklayabilmek için gerçekleştirilen elementel analiz sonuçları Tablo 8.3 ve 8.4'de verilmiştir. Analiz sonucu numunelerin içerdiği C, H, N ve S oranları elde edilirken, Oksijen oranı ise numunelerin içerdiği kül oranıda göz önüne alınarak farktan yararlanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 8.3 Ham biyokütle ve organik atıkların elementel analiz sonuçları

	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)	%Kül
Sığır Kuyruğu	43,34	3,88	0,82	0,30	45,33	6,33
Geven	44,88	6,90	1,33	0,23	42,16	4,50
Keçi Boynuzu	44,90	4,40	1,58	0,32	45,73	3,07
Mısır	43,60	6,26	0,76	0,09	43,5	5,79

Torrefaksiyon prosesi biyokütle kimyasal bileşiminin değişikliğe uğramasına sebep olmuştur. Torrefaksiyon sıcaklığındaki artış, yapıdaki C'nun ağırlıkça yüzdesini artırırken O ve H yüzdelerinin ise azalmasına neden olmuştur. Bu azalma

eğilimi (Şekil 8.5), proses süresince biyokütlenin dehidrasyona uğramasından ve karbondioksit çıkışından kaynaklanmaktadır. CO_2, CO ve H_2O emisyonları, biyoyakıt içeriğindeki H/C ve O/C atomik oranlarının da proses sıcaklığındaki artışa bağlı olarak azalmasına yol açmıştır. Torrefaksiyon prosesindeki sıcaklık artışı ile biyokütlenin yapısından daha fazla oksijenin uzaklaştırılması, biyokütle yapısındaki O/C atomik oranını azaltarak, biyoyakıtın enerji yoğunluğunu artırmış ve biyokütleyi gazlaştırma prosesi için daha uygun hale getirmiştir.



Şekil 8.5 Torrefaksiyon sıcaklığına bağlı biyokömür element içeriğindeki değişim

Çünkü torrefaksiyon prosesi ile dumana sebep olan biyokütle yapısındaki uçucular ve su buharı uzaklaştırılabildiği için torrefiye biyoyakıt yanma işlemleri boyunca daha az duman salımına sebep olmakta ve enerji kaybı azalmaktadır [78, 111, 119, 154]. Bundan dolayı torrefiye biyokömür ham biyokütle ile karşılaştırıldığında yanma prosesleri sırasında daha az duman ve is oluşumuna sebep olduğu için enerji üretiminde yakıt olarak kullanımının daha uygun olacağı düşünülebilir [142].

Tablo 8.4 Torrefiye biyokömür ürünlerin elementel analiz sonuçları

	Proses Koşulu	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)	% Kül
1.SET (SK-KB)	200 °C	48,19	5,73	0,98	0,1	40,35	4,65
	260 °C	59,29	4,62	1,49	0,1	19,9	14,6
	320 °C	59,79	3,29	2,13	0,06	16,79	17,94
2.SET (G-KB)	200 °C	44,13	4,83	1,23	0,21	36,36	13,24
	260 °C	58,25	4,48	1,6	0,05	23,25	12,37
	320 °C	61,79	3,97	2,22	0,16	18,18	13,68
3.SET (G-M)	200 °C	46,46	5,59	1,6	0	36,7	9,65
	260 °C	56,83	4,48	4,42	0,16	20,85	13,26
	320 °C	59,49	2,7	4,32	0,14	17,61	15,74
4.SET (SK-M)	200 °C	48,56	5,36	1,17	0	36,26	8,65
	260 °C	59,48	3,91	3,62	0,14	20,09	12,76
	320 °C	57,45	2,81	1,87	0,17	25,2	12,5

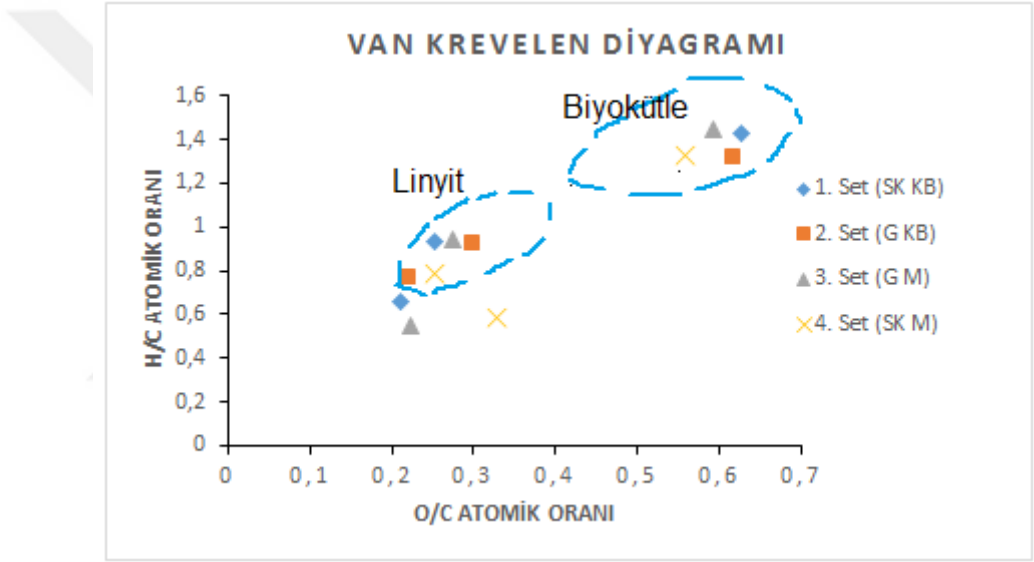
Her torrefaksiyon seti için sıcaklığa bağlı olarak üretilen biyokömürün yakıt özelliklerinin nasıl değiştiğini gözlemleyebilmek için Tablo 8.5'de ki atomik H/C ve O/C oranlarından yararlanılarak Şekil 8.6'de verilen Van Krevelen diyagramı oluşturulmuştur.

Tablo 8.5 Torrefiye biyokömür ürünleri için H/C ve O/C atomik oranları

	Proses Koşulu	H/C	O/C
1.SET (SK-KB)	200 °C	1,43	0,63
	260 °C	0,94	0,25
	320 °C	0,66	0,21
2.SET (G-KB)	200 °C	1,31	0,62
	260 °C	0,92	0,30
	320 °C	0,77	0,22
3.SET (G-M)	200 °C	1,44	0,59
	260 °C	0,95	0,28
	320 °C	0,54	0,22
4.SET (SK-M)	200 °C	1,32	0,56
	260 °C	0,79	0,25
	320 °C	0,59	0,33

Bu diyagramdan da görüldüğü gibi daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen torrefaksiyon prosesi ile biyokömür yapısındaki karbon yüzdesi artarken, yapıdan oksijen molekülünün uzaklaşmasına bağlı olarak H/C ve O/C oranları azalmış ve buna bağlı olarak torrefiye biyokömür numunelerinin yakıt özellikleri iyileştirilmiştir. Üretilen biyokömür ürünlerindeki H/C ve O/C oranındaki düşüş, torrefaksiyon prosesi sırasında biyokütle yapısındaki bağlı su molekülünün ve hafif uçucuların dehidrasyon, deoksijenasyon ve dehidrojenasyon reaksiyonları ile serbest bırakılması ile açıklanabilir [155].

Proses sıcaklığındaki artış ile üretilen biyokömür numuneleri yakıt özellikleri bakımından linyit kömürünün yakıt özelliklerine yaklaştığı görülmüştür [156].



Şekil 8.6 Torrefiye biyokömür numuneleri için Van Krevelen diyagramı

Ayrıca torrefikayon prosesi ile biyokütlenin karbona oranla yapısındaki oksijen ve hidrojen yüzdesinin azalması, elde edilen biyokömür numunelerinin kalorifik değerlerini artışına sebep olmuştur.

8.1.4 Ham Biyokütle ve Organik Atıklar için Makromoleküler Bileşen Analiz Sonuçları

Lignoselülozik ham biyokütle ve organik atıkların yapısal özelliklerini anlayabilmek için numunelere Bölüm 7.3.4'de bahsedilen analizler uygulanarak bileşen analizi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Tablo 8.6'da verilmiştir.

Tablo 8.6 Makromoleküler bileşen analiz sonuçları

Makromoleküler Bileşen Analizi				
	%Ekstraktif Madde	%Hemiselüloz	%Selüloz	%Lignin
Sığır Kuyruğu	19,34	50,90	6,18	17,25
Geven	20,77	43,26	17,08	14,39
Keçi Boynuzu	17,83	46,29	17,59	15,22
Mısır	7,48	30,72	40,18	15,83

Analiz sonuçları incelendiğinde numunelerin ekstraktif madde ve lignin içeriklerinin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. En yüksek hemiselüloz içeriğine sahip olan numunenin, ham biyokütle kaynağı olarak kullanılan sığır kuyruğu bitkisi olduğu gözlenmiştir. Organik atık olarak değerlendirilen mısırın ise en yüksek selüloz içeriğine sahip görülmüştür.

Lignoselülozik maddelerin içerdikleri makromoleküler bileşikler bitkiye doğal olarak bağlayıcılık özelliği kazandırmakta bu da peletleme proseslerine ekstra bir katkı sağlamaktadır. Ayrıca ham biyokütle kaynağı olarak kullanılan sığır kuyruğu ve geven bitkisinin hemiselüloz içeriklerinin yüksek olduğu gözlenirken, selüloz ve lignin oranlarının ise daha düşük olduğu belirlenmiştir. Termal davranışlara karşı mukavemetinin yüksek olduğu bilnen lignin mokekülünün biyokütle yapısında nispeten az oranda bulunmasından dolayı, ham biyokütlelere yüksek sıcaklıkta torrefaksiyon prosesi uygulanabileceğine karar verilmiştir.

8.2 Design Expert Programı ve Torrefaksiyon Prosesi ile Biyokömür Üretim Sonuçları

Ham biyokütle kaynakları ve organik endüstriyel atıklar kullanılarak mevcut fosil enerji kaynaklarına alternatif olabilecek, enerji içerikleri iyileştirilmiş ve çevreye duyarlı biyokömür numunelerinin üretimi inert azot atmosferinde, düşük ısıtma hızında torrefaksiyon prosesi ile gerçekleştirilmiştir. Bölüm 7.4'de bahsedilen prosesi etkileyen bağımsız değişkenlerin birbirleri ve cevap yüzeyleri üzerindeki

etkilerini değerlendirerek optimize edebilmek için Design Expert programı/cevap yüzey yöntemi/merkezi kompozit tasarımından yararlanılmıştır.

Her set için ayrı ayrı merkezi kompozit tasarımı ile deney tasarım desenleri gerçekleştirilip, üretilen biyokömür numunelerine belirlenen cevap yüzey analizleri uygulanmıştır. Elde edilen analiz sonuçları ve Design Expert programı ANOVA analiz sonuçları birarada değerlendirilerek, her set için biyokütle ve organik endüstriyel atıklardan biyokömür üretiminin optimum proses koşulları belirlenmiştir. Ayrıca her set için belirlenen optimum koşullar göz önüne alınarak üretilen optimize biyokömür numunelerinin karakterizasyonu için TG/DTA, FT-IR ve SEM analizlerinden yararlanılmıştır.

8.2.1 Sığır Kuyruğu - Keçiboynuzu (1. Set) Torrefaksiyon Prosesi Sonuçları

Torrefaksiyon prosesi ile biyokömür üretiminde 1. Set için ham biyokütle kaynağı olarak Sığır Kuyruğu bitkisi ve katkı maddesi olarak da keçi boynuzu endüstriyel atığı kullanılmıştır. Proses sıcaklığı, proses kalma süresi, biyokütle tanecik boyutu ve organik katkı maddesi oranı şeklinde belirlenen bağımsız değişkenler ve her bağımsız değişken için ayarlanan seviye aralıkları göz önüne alınarak merkezi kompozit tasarım yöntemi ile deney tasarım deseni oluşturulmuştur. Tablo 8.7'de verilen deney tasarım formülasyonları ile üretilen biyokömür numunelerine yanıt yüzeyleri olarak belirlenen %Kütle kaybı, %Kütle verimi, %Enerji verimi, enerji yoğunluğu ve ısıl değer analizleri uygulanmıştır. Uygulanan analiz sonuçları optimizasyon programı ile değerlendirilerek yanıt yüzeylerinin model uyumlulukları belirlenerek ANOVA analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlara göre her bir yanıt yüzeyi için bağımlı değişkenlerin bağımsız değişkenlerle ilişkisini tanımlayan regresyon modelleri oluşturulmuştur.

Tablo 8.7 Torrefaksiyon prosesi ile üretilen SK-KB biyokömür analiz sonuçları

No	Sıcaklık (°C)	Kalma Süresi (dk)	Tanecik Boyutu (mm)	KB % (ağ/ağ)	Kütle Kaybı (%)	Kütle Verimi (%)	Enerji Verimi (%)	Enerji Yoğunluğu	Isıl Değer (MJ/kg)
1	260	45	3	100	44,35	55,65	78,18	1,40	22,30
2	230	60	4	75	42,73	57,27	70,95	1,24	20,11
3	260	45	3	50	40,55	59,45	83,57	1,41	22,76
4	260	45	3	50	58,82	41,18	55,92	1,36	21,98
5	260	45	5	50	55,62	44,38	59,99	1,35	22,37
6	290	60	2	75	65,65	34,35	43,46	1,27	21,52
7	290	60	2	25	63,02	36,98	47,14	1,27	20,94
8	290	60	4	75	62,52	37,48	50,57	1,35	21,91
9	290	30	4	25	60,87	39,13	49,13	1,26	21,20
10	260	75	3	50	54,34	45,66	61,40	1,34	21,77
11	230	60	2	25	29,54	70,46	85,24	1,21	19,88
12	230	60	4	25	41,90	58,10	69,23	1,19	20,12
13	230	30	2	75	36,15	63,85	76,89	1,20	20,49
14	230	30	4	25	41,18	58,82	71,70	1,22	20,59
15	230	30	4	75	32,19	67,81	84,79	1,25	20,30
16	200	45	3	50	16,44	83,56	99,03	1,19	19,19
17	290	30	2	25	62,22	37,78	48,14	1,27	20,94
18	260	45	3	50	54,02	45,98	60,86	1,32	21,43
19	260	45	3	50	52,55	47,45	63,35	1,34	21,62
20	260	45	3	0	59,94	40,06	50,49	1,26	21,02
21	260	45	3	50	52,60	47,40	63,03	1,33	21,53
22	230	60	2	75	37,53	62,47	73,45	1,18	20,00
23	260	45	3	50	51,59	48,41	65,02	1,34	22,45
24	290	30	2	75	54,03	45,97	54,88	1,19	20,31
25	290	30	4	75	55,41	44,59	63,04	1,41	22,95
26	320	45	3	50	70,32	29,68	37,62	1,27	23,79
27	290	60	4	25	68,13	31,87	38,78	1,22	20,55
28	260	45	1	50	52,19	47,81	64,75	1,35	22,36
29	260	15	3	50	53,86	46,14	61,87	1,34	21,71
30	230	30	2	25	30,22	69,78	88,10	1,26	20,75

8.2.1.1 SK-KB Biyokömür Ürünlerinin %Kütle Kaybı Sonuçları

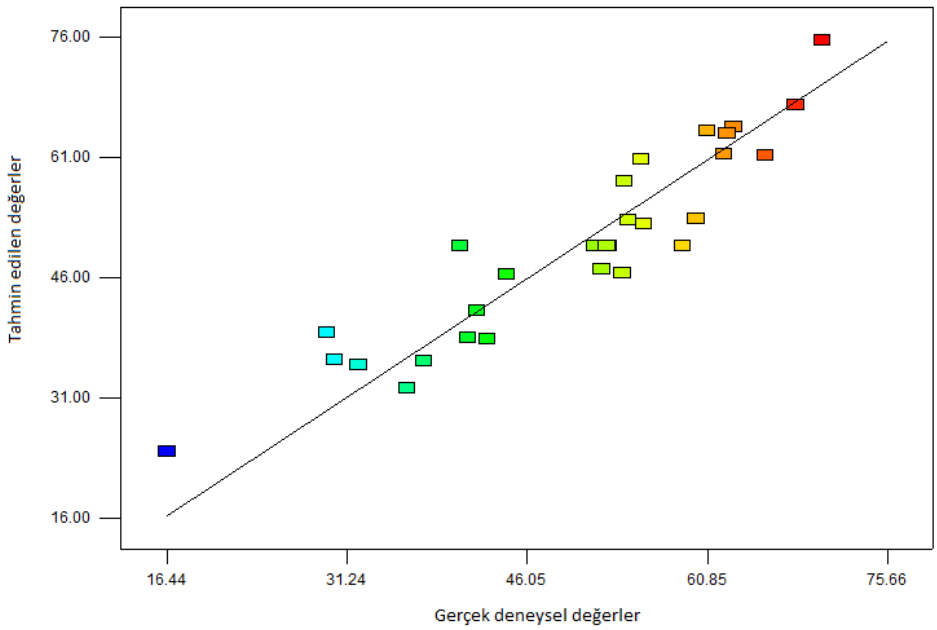
Sığır kuyruğu bitkisine keçiboynuzu organik katkı maddesi eklenerek gerçekleştirilen torrefaksiyon prosesi ile üretilen biyokömür numunelerinin %Kütle kayıbı sonuçları varyans analizi yardımı ile incelenerek, regrasyon katsayıları ve model uyumlulukları değerlendirilmiştir.

Torrefaksiyon proses sonuçları incelendiğinde, uygulanan bağımsız değişkenlerin, reaksiyon sonucu üretilen biyokömür ürünlerinin %Kütle kayıpları üzerine etkilerinin açıklanmasında lineer model uygun bulunmuştur. Bu modelin kabul edilmesinde, programın belirlediği diğer modellere göre p değerinin küçük olması, R^2 değerinin büyük olması, standart sapma değerinin küçük olması ve kalıntı hata karaler toplamı olan PRESS değerinin de küçük olması göz önüne alınmıştır. Bahsedilen değerler toplu olarak Tablo 8.8'de verilmiştir.

Tablo 8.8 SK-KB biyokömür numuneleri %kütle kaybı analizi için önerilen model istatiksel değerleri

	Std. Sapma	R^2	Düzeltilmiş R^2	Beklenen R^2	PRESS
Lineer	**5,18**	**0,8606**	**0,8383**	**0,8017**	**954,63**
2FI	5,16	0,8951	0,8399	0,7799	1059,49
Kuadratik	4,71	0,9308	0,8662	0,7604	1153,57
Kübik	5,59	0,9545	0,8115	-0,3024	6270,50

Önerilen lineer modelin regresyon katsayısının (R^2) 0,8606 olması, bu modelin deneysel verileri %86,06 oranında açıklayabildiğini göstermektedir. Düzeltilmiş regresyon katsayısının 0,8383 olarak belirlenmeside Şekil 8.7'de verildiği gibi beklenen değerler ile deneysel değerler arasında yüksek bir uyumluluğun var olduğunu göstermiştir. Bu cevap yüzeyi için lineer modelin uygulanabilirliğinin kabul edimesinde beklenen regresyon katsayısı (0,8017) ile düzeltilmiş regresyon katsayısının (0,8383) birbirine yakın olmasının da önemi vardır. Ayrıca yeterli tahminleme değerinin bu model için 24,283 olarak bulunması ve istenen şekilde 4'de büyük olması, modelin yeni verilerin tahminlenmesini yeterli kılacağı sonucuna varılmıştır.



Şekil 8.7 SK-KB biyokömür numuneleri %Kütle Kaybı tahmin edilen değerler ile deneysel değerlerin karşılaştırılması

%Kütle kaybı sonuçları için kabul edilen lineer modelin Tablo 8.9'da verilen varyans anaiz sonuçları incelendiğinde modele ait p deperinin 0,0001'den küçük olduğu görülmektedir. Bu değerin küçük olması, torrefaksiyon prosesini etkileyen bağımsız değişkenlerden en az bir tanesinin üretilen biyokömürün % Kütle kaybı analizi üzerinde lineer olarak önemli bir etkisinin olduğunu göstermiştir.

%Kütle kaybı Anova sonuçları incelendiğinde, belirlenen p değerlerine göre ($p<0,05$) sıcaklık (A) parametresinin torrefaksiyon prosesi üzerine büyük ölçüde etkili olduğu, sonucuna varılmıştır. Bağımsız değişkenlerin p değerleri birbirleri ile karşılaştırıldığında ise %Kütle kaybı üzerine en etkili parametrenin sıcaklık olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 8.9 %Kütle kaybı ANOVA sonuçları

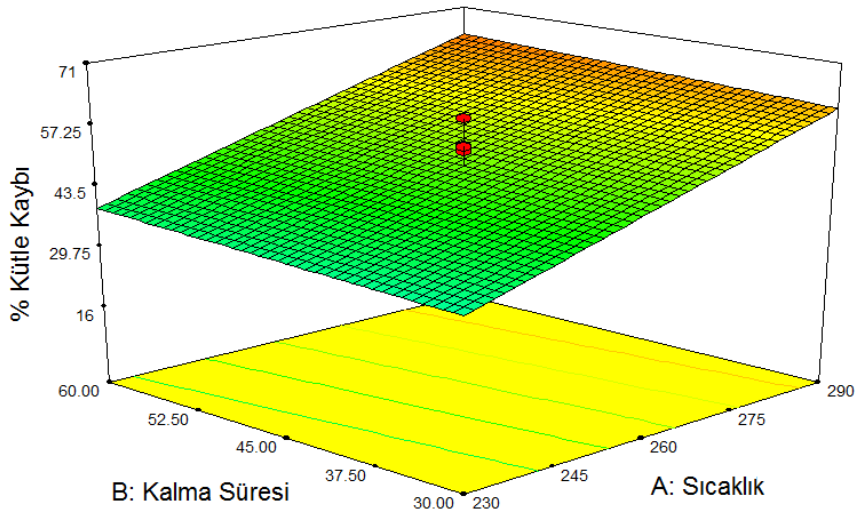
Cevap 1	%Kütle Kaybı				
	Lineer Modele ait ANOVA Sonuçları				
	Kareler Toplamı	df	Kare Ortalaması	F Değeri	p-değeri Prob>F
Model	**4143,24**	**4**	**1035,81**	**38,58**	**< 0,0001**
A-Sıcaklık	3957,43	1	3957,43	147,41	< 0,0001
B-Kalma Süresi	65,67	1	65,67	2,45	0,1304
C-Tanecik Boyutu	46,55	1	46,55	1,73	0,1998
D-% KB	73,59	1	73,59	2,74	0,1103
Kalıntı	671,14	25	26,85		
Uyum Eksikliği	493,80	20	24,69	0,70	0,7456
Yeterli Tahminleme	24,283				

%Kütle kaybı için regresyon analizi sonucunda elde edilen lineer model, kodlanmış bağımsız değişkenler cinsinden eşitlik (8.1)'de verilmiştir.

$$\%\text{Kütle kaybı} = +49{,}97+12{,}84*A+1{,}65*B+1{,}39*C-1{,}75*D \qquad (8.1)$$

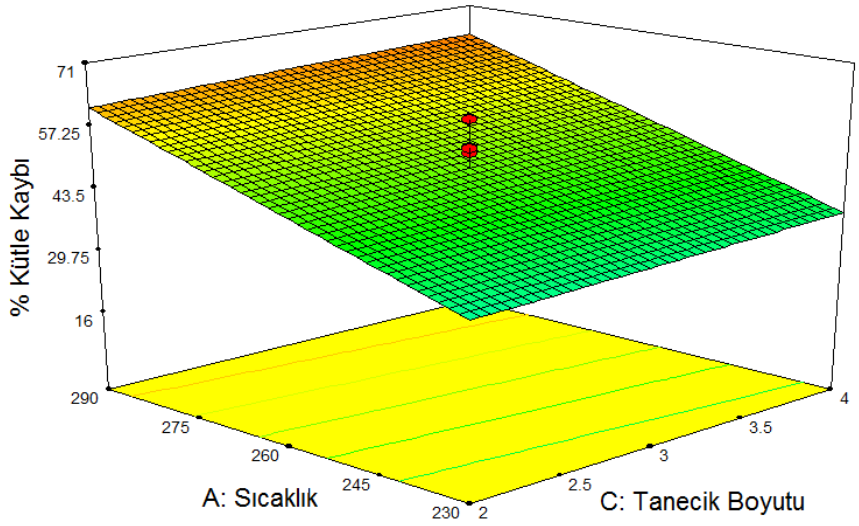
(A: Sıcaklık, B: Kalma Süresi, C: Tanecik Boyutu, D: %Keçi Boynuzu Katkı Maddesi Oranı)

Elde edilen lineer modele ait yanıt yüzeyi grafikleri sırası ile Şekil 8.8-8.10'da verilmiştir.



Şekil 8.8 Sıcaklık ve kalma süresi parametrelerinin SK-KB biyokömür %kütle kaybı üzerine etkisi

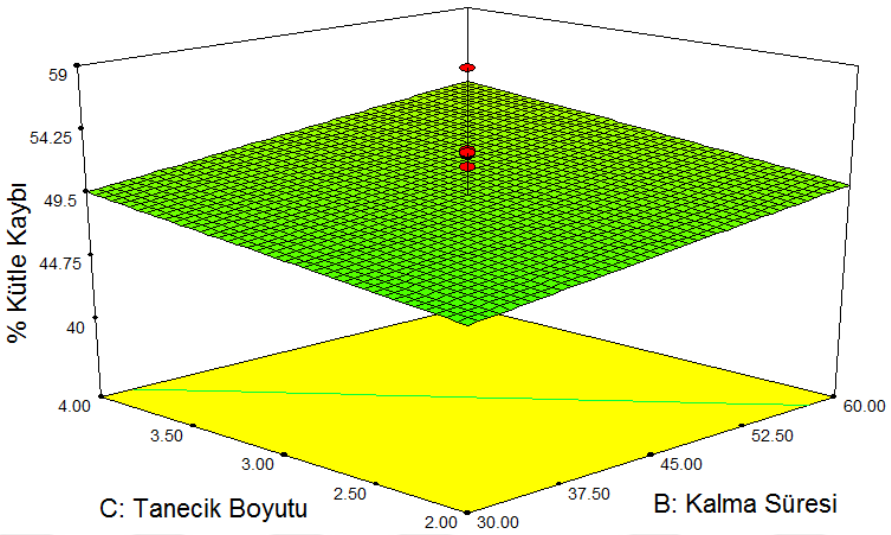
Üretilen biyoyakıtların %Kütle kaybı için oluşturulan lineer modeldeki değişkenlerin katsayıları göz önüne alındığında reaksiyon sıcaklığı'nın (A) en etkili parametre olduğu, diğer bağımsız değişkenlerinde sıcaklık kadar etkili olmasalarda torefaction prosesi sonucu meydana gelen %Kütle kaybı üzerinde pozitif etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca organik katkı maddesinin ise beklenen etkiyi göstermediği belirlenmiştir [115, 157].



Şekil 8.9 Sıcaklık ve tanecik boyutu parametrelerinin SK-KB biyokömür %kütle kaybı üzerine etkisi

Analiz sonuçları incelendiğinde, üretilen SK-KB biyokömür numunelerinin %Kütle kaybı değerlerinin %16,44 ile %70,32 arasında değiştiği görülmüştür.

Torrefaksiyon prosesi ile üretilen SK-KB biyokömür ürünleri için 200 °C proses sıcaklığı, 45 dakika proses süresi ve 3 mm biyokütle tanecik boyutu koşulları için en düşük %Kütle kaybı sonucunu verdiği, 320°C proses sıcaklığı, 45 dakika proses süresi ve 3 mm biyokütle tanecik boyutu koşulları için ise en yüksek %Kütle kaybı sonuçlarına ulaşıldığı gözlenmiştir. Bu veriler de torrefaksiyon prosesi için proses süresi ve tanecik boyutuna göre reaksiyon sıcaklığının daha etkili bir parameter olduğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 8.10 Tanecik boyutu ve kalma süresi parametrelerinin SK-KB biyokömür %kütle kaybı üzerine etkisi

8.2.1.2 SK-KB Biyokömür Ürünlerinin %Kütle Verimi Sonuçları

Sığır kuyruğu bitkisine keçiboynuzu organik katkı maddesi eklenerek gerçekleştirilen torrefaksiyon prosesi ile üretilen biyokömür numunelerinin %Kütle verimi ANOVA sonuçları incelenerek, varyans analizi yapılmış, regrasyon katsayıları ve model uyumlulukları değerlendirilmiştir.

Torrefaksiyon proses sonuçları incelendiğinde, uygulanan bağımsız değişkenlerin, reaksiyon sonucu üretilen biyokömürün kütle verimi üzerine etkilerinin tanımlanmasında lineer model önerilmiştir. Bu modelin belirlenmesinde, diğer modellere göre p değerinin küçük olması, R^2 değerinin büyük olması, standart sapma değerinin küçük olması ve kalıntı hata karaler toplamı olan PRESS değerinin küçük olması göz önüne alınmıştır. Bahsedilen değerler Tablo 8.10'da verilmiştir.

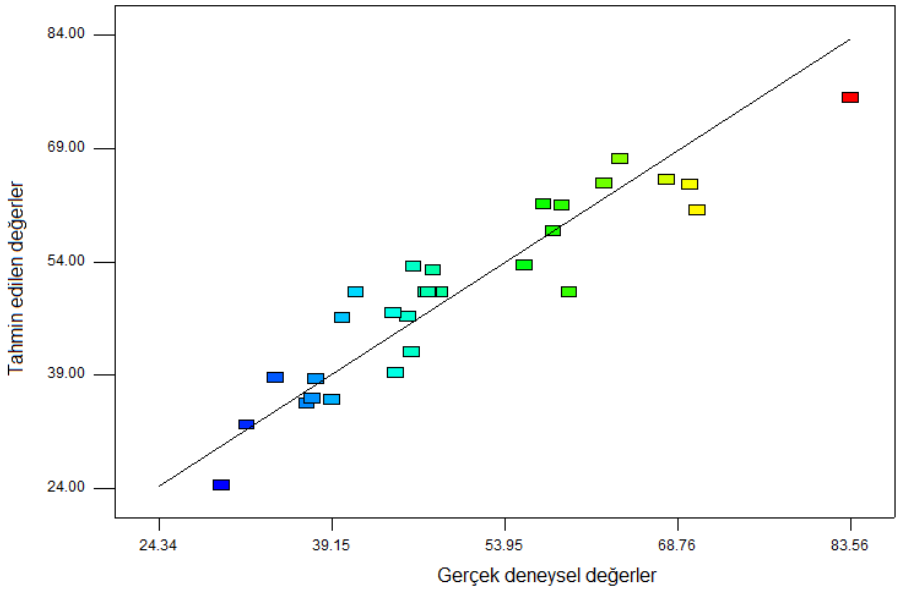
Tablo 8.10 SK-KB biyokömür numuneleri %kütle verimi analizi için önerilen model istatiksel değerleri

	Std. Sapma	R^2	Düzeltilmiş R^2	Beklenen R^2	PRESS
Lineer	**5,18**	**0,8606**	**0,8383**	**0,8017**	**954,63**
2FI	5,16	0,8951	0,8399	0,7799	1059,49
Kuadratik	4,71	0,9308	0,8662	0,7604	1153,57
Kübik	5,59	0,9545	0,8115	-0,3024	6270,50

Üretilen biyokömür numuneleri %Kütle verimi analiz sonucu için önerilen lineer modelin regresyon katsayısının (R^2) 0,8606 olması, bu modelin deneysel verileri %86,06 oranında açıklayabildiğini göstermektedir. Düzeltilmiş regresyon katsayısının 0,8383 olarak bulunmasıda Şekil 8.11'de görüldüğü gibi %Kütle verimi için beklenen değerler ile deneysel verileri arasında bir uyumluluğun olduğunu kanıtlamaktadır.

%Kütle verimi analiz sonuçlarının yorumlanmasında lineer modelin uygulanabilirliğinin kabul edimesinde beklenen regresyon katsayısı (0,8017) ile düzeltilmiş regresyon katsayısının (0,8383) birbirine yakın olmasının da önemi vardır. Yeterli tahminleme değerinin bu model için 24,283 olarak bulunması ve istenen doğrultuda 4'den büyük olması, lineer modelin yeni verilerin tahminlenmesinde de yeterli olacağı sonucuna varılmıştır.

%Kütle verimi sonuçları için kabul edilen lineer modelin Tablo 8.11'de verilen varyans analiz sonuçları incelendiğinde modele ait p değerinin 0,0001'den küçük olduğu görülmektedir. Lineer model p değerin küçük olması, torrefaksiyon prosesini etkileyen bağımsız değişkenlerden en az bir tanesinin üretilen biyokömürün %Kütle verimi analizi üzerinde lineer olarak önemli bir etkisinin olduğunu göstermiştir [120].



Şekil 8.11 SK-KB biyokömür numuneleri %kütle verimi tahmin edilen değerler ile deneysel değerlerin karşılaştırılması

Lineer modelin %Kütle verimi ANOVA sonuçları incelendiğinde, belirlenen p değerlerine göre ($p<0,05$) sıcaklık (A) parametresinin torrefaksiyon prosesi üzerine büyük ölçüde etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 8.11 %Kütle verimi ANOVA sonuçları

Cevap 2	%Kütle Verimi				
	Lineer Modele ait ANOVA Sonuçları				
	Kareler Toplamı	df	Kare Ortalaması	F Değeri	p-değeri Prob>F
Model	**4143,24**	**4**	**1035,81**	**38,58**	**< 0,0001**
A-Sıcaklık	3957,43	1	3957,43	147,41	< 0,0001
B-Kalma Süresi	65,67	1	65,67	2,45	0,1304
C-Tanecik Boyutu	46,55	1	46,55	1,73	0,1998
D-% KB	73,59	1	73,59	2,74	0,1103
Kalıntı	671,14	25	26,85		
Uyum Eksikliği	493,80	20	24,69	0,70	0,7456
Yeterli Tahminleme	24,283				

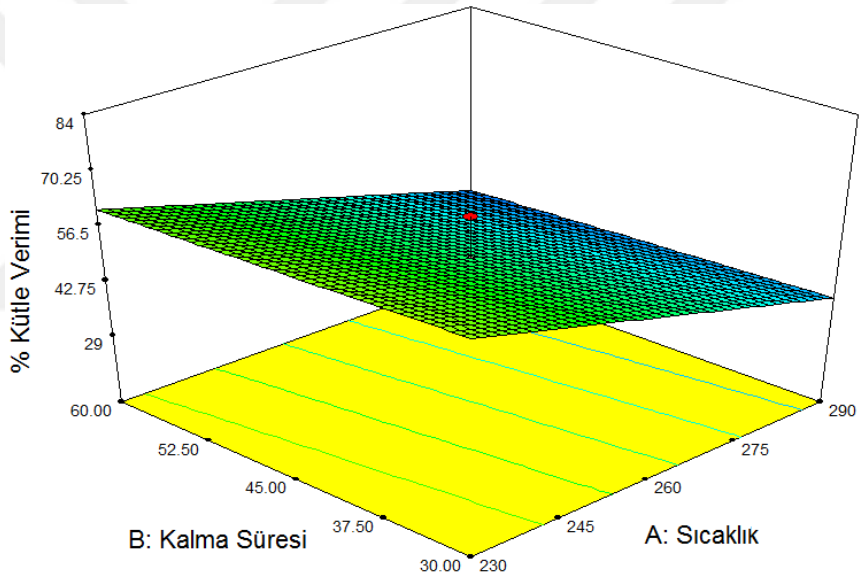
Modeli etkileyen bağımsız değişkenlerin p değerleri birbirleri ile karşılaştırıldığında ise %Kütle verimi üzerine en etkili parametrenin sıcaklık olduğu tespit edilmiştir.

%Kütle verimi için regresyon analizi sonucunda elde edilen lineer model, kodlanmış bağımsız değişkenler cinsinden eşitlik (8.2)'de verilmiştir.

$$\%\text{Kütle Verimi} = +50{,}03-12{,}84*A-1{,}65*B-1{,}39*C+1{,}75*D \qquad (8.2)$$

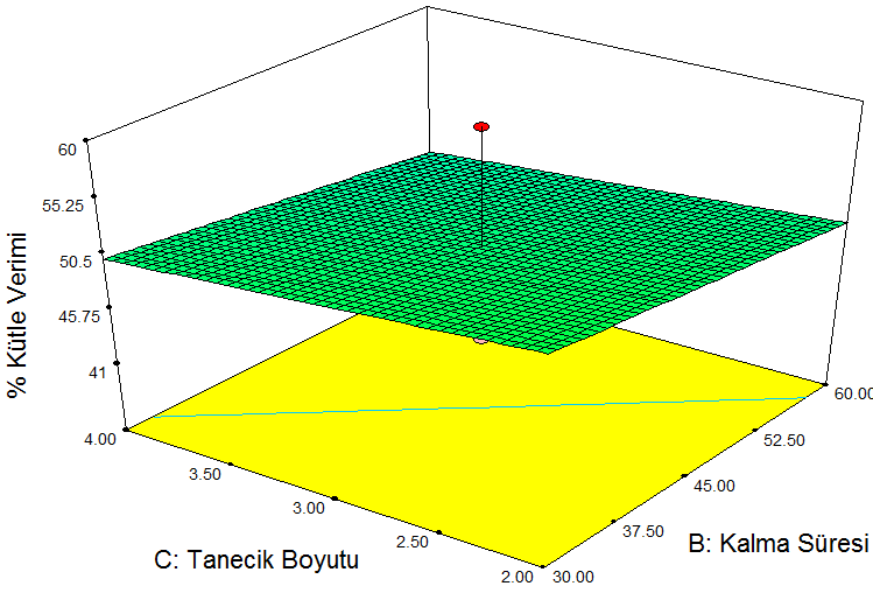
(A: Sıcaklık, B: Kalma Süresi, C: Tanecik Boyutu, D: %Keçi Boynuzu Katkı Maddesi Oranı)

SK-KB biyokömürü %Kütle verimi lineer modeline ait yanıt yüzeyi grafikleri sırası ile Şekil 8.12-8.14'de verilmiştir.



Şekil 8.12 Sıcaklık ve kalma süresi parametrelerinin SK-KB biyokömür %kütle verimi üzerine etkisi

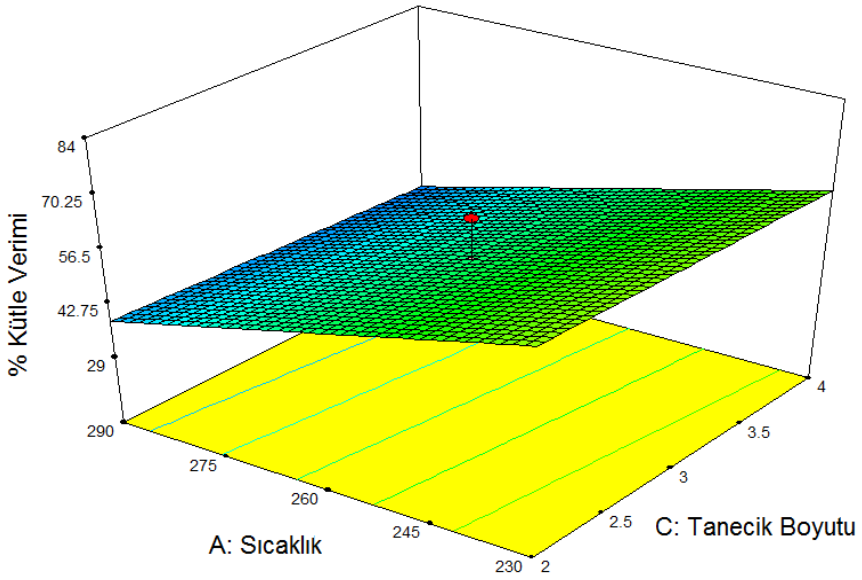
Torrefaksiyon prosesi ile üretilen biyokömürlerin %Kütle verimi için oluşturulan lineer modeldeki değişkenlerin katsayıları göz önüne alındığında da yine reaksiyon sıcaklığı'nın (A) en etkili parametre olduğu desteklenmektedir.



Şekil 8.13 Kalma süresi ve tanecik boyutu parametrelerinin SK-KB biyokömür %kütle verimi üzerine etkisi

Analiz sonuçları incelendiğinde, torrefaksiyon prosesi ile üretilen SK-KB biyokömür numunelerinin %Kütle verimi analiz sonuçlarının %29,68 ile %83,56 arasında değiştiği bulunmuştur. SK-KB biyokömür numuneleri için en düşük kütle verimi; 320°C proses sıcaklığı, 45 dakika proses süresi ve 3 mm biyokütle tanecik boyutunda gözlenirken, en yüksek kütle verimi ise 200°C proses sıcaklığı, 45 dakika proses süresi ve 3 mm biyokütle tanecik boyutunda gerçekleştiği görülmüştür. Bu verilerde, torrefaksiyon sıcaklığındaki artışının biyokömür %Kütle veriminde ciddi bir azalışa neden olduğunu göstererek analiz sonucu için geliştirilen lineer modeli desteklemektedir.

Bağımsız değişkenlerin ürün kütle verimi üzerindeki etkisi grafikler üzerinden incelendiğinde ise torrefaksiyon sıcaklığının etkisi kadar belirgin olmamakla beraber, reaksiyon kalma süresinin ve biyokütle tanecik boyutununda biyokömür kütle verimi üzerinde azaltıcı bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Bu bağımsız değişkenlerin yanı sıra, daha sonra uygulanacak peletleme çalışmalarında doğal bağlayıcı amacı ile kullanılması düşünülen organik katkı maddesinin ise biyokömür kütle verimi üzerinde pozitif bir etkisinin bulunduğu söylenebilir.



Şekil 8.14 Sıcaklıki ve tanecik boyutu parametrelerinin SK-KB biyokömür %kütle verimi üzerine etkisi

8.2.1.3 SK-KB Biyokömür Ürünlerinin %Enerji Verimi Sonuçları

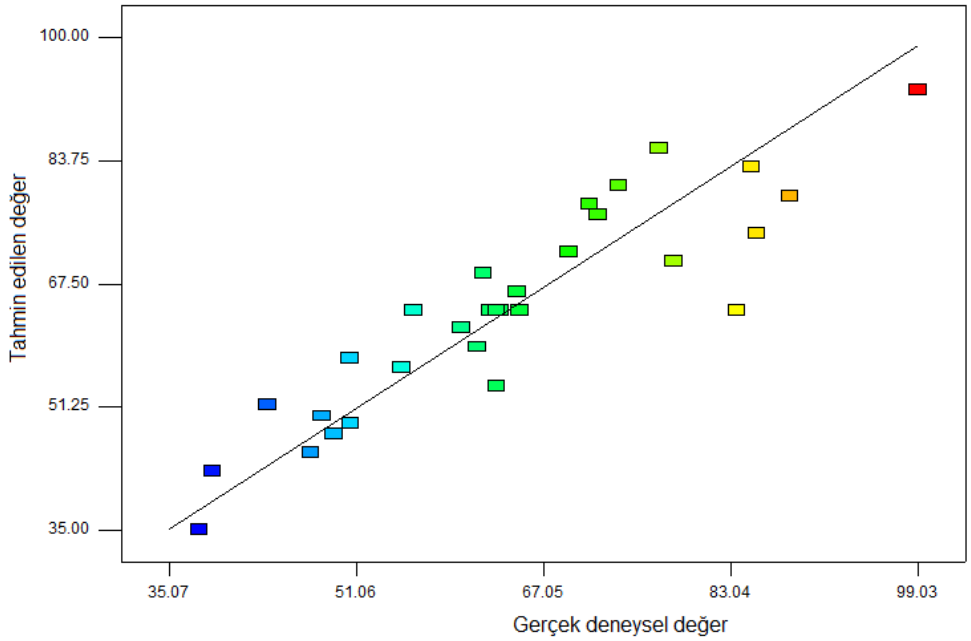
Sığır kuyruğu-keçiboynuzu biyokömür numunelerinin %Enerji verimi ANOVA sonuçları incelenerek, varyans analizi yapılmış, regrasyon katsayıları ve model uyumlulukları değerlendirilmiştir.

Torrefaksiyon proses sonuçları incelendiğinde, bağımsız değişkenlerin reaksiyon sonucu üretilen biyokömür numuneleri %Enerji verimi üzerine etkilerinin tanımlanmasında lineer model önerilmiştir. Bu modelin belirlenmesinde, diğer modellere göre p değerinin küçük olması, standart sapma değerinin küçük olması ve kalıntı hata karaler toplamı olan PRESS değerinin de küçük olması göz önüne alınmıştır. R^2 değeri ise diğer modellere göre nispeten küçük olmakla beraber, diğer modellere göre beklenen regresyon katsayısı (0,7412) ile düzeltilmiş regresyon katsayısının (0,7833) birbirine yakın olması da lineer modelin seçilmesine katkı sağlamıştır. Lineer model istatiksel değerleri Tablo 8.12'de verilmiştir.

Tablo 8.12 SK-KB biyokömür numuneleri %enerji verimi analizi için önerilen model istatiksel değerleri

	Std. Sapma	R^2	Düzeltilmiş R^2	Beklenen R^2	PRESS
Lineer	**7,09**	**0,8132**	**0,7833**	**0,7412**	**1739,42**
2FI	6,46	0,8821	0,8201	0,7752	1510,79
Kuadratik	6,94	0,8926	0,7924	0,6630	2264,60
Kübik	8,14	0,9310	0,7143	0,3628	4282,20

SK-KB biyokömür numuneleri %Enerji verimi analiz sonucu için önerilen lineer modelin regresyon katsayısının (R^2) 0,8132 olması, bu modelin deneysel verileri %81,32 oranında açıklayabildiğini göstermektedir. Biyokömür için %Enerji verimi beklenen sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasındaki uyum Şekil 8.15'de verilen grafik ile gösterilmiştir.



Şekil 8.15 SK-KB biyokömür numuneleri %enerji verimi tahmin edilen değerler ile deneysel değerlerin karşılaştırılması

Yeterli tahminleme değerinin lineer model için 20,049 olarak bulunması ve istenen doğrultuda 4'den büyük olması, lineer modelin bağımsız değişkenlerin farklı verileri içinde tahminlemede yeterli olacağını göstermiştir.

%Enerji verimi sonuçları için kabul edilen lineer modelin Tablo 8.13'de verilen varyans analiz sonuçları incelendiğinde modele ait p deperinin 0,0001'den küçük

olduğu görülmektedir. Lineer model p değerin küçük olması, torrefaksiyon prosesini etkileyen bağımsız değişkenlerden en az bir tanesinin üretilen biyokömürün %Enerji verimi analizi sonucunu lineer olarak etkilediğini göstermiştir.

Tablo 8.13 %Enerji verimi ANOVA sonuçları

Cevap 3	%EnerjiVerimi				
	Lineer Modele ait ANOVA Sonuçları				
	Kareler Toplamı	df	Kare Ortalaması	F Değeri	p-değeri Prob>F
Model	**5465,32**	**4**	**1366,33**	**27,21**	**< 0.0001**
A-Sıcaklık	5046,50	1	5046,50	100,49	< 0.0001
B-Kalma Süresi	144,08	1	144,08	2,87	0,1027
C-Tanecik Boyutu	34,20	1	34,20	0,68	0,4170
D-% KB	240,54	1	24,.54	4,79	0,0382
Kalıntı	1255,48	25	50,22		
Uyum Eksikliği	817,38	20	4,.87	0,47	0,8982
Yeterli Tahminleme	20,049				

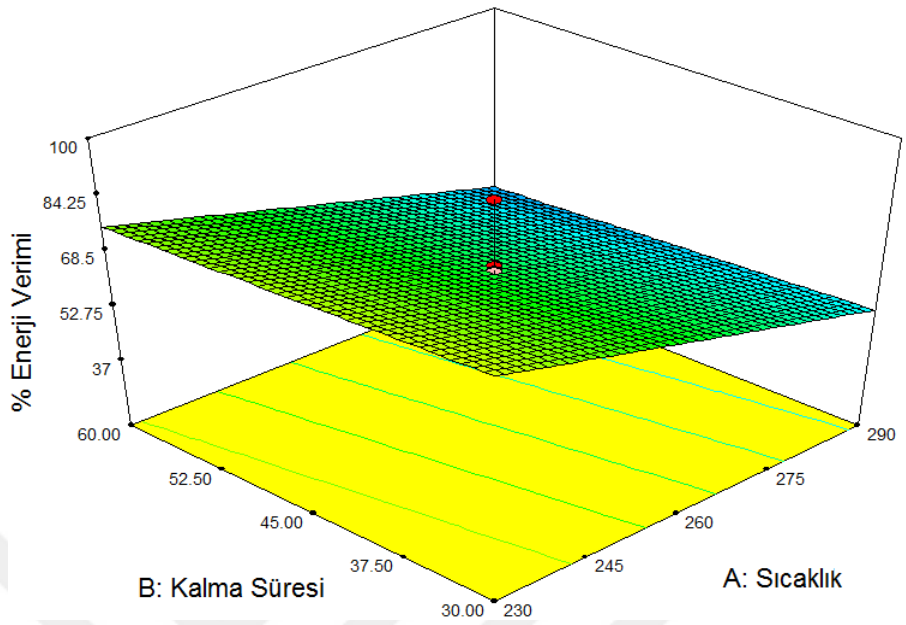
Lineer modelin %Enerji verimi Anova sonuçları incelendiğinde, belirlenen p değerlerine göre ($p<0,05$) sıcaklık (A) ve keçi boynuzu katkı maddesi oranı (D) parametrelerinin torrefaksiyon prosesi üzerine büyük ölçüde etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

%Enerji verimi için regresyon analizi sonucunda elde edilen lineer model, kodlanmış bağımsız değişkenler cinsinden eşitlik (8.3)'de verilmiştir.

$$\%\text{Enerji Verimi} = +64,07-14,50*A-2,45*B-1,19*C+3,17*D \quad (8.3)$$

(A: Sıcaklık, B: Kalma Süresi, C: Tanecik Boyutu, D: %Keçi Boynuzu Katkı Maddesi Oranı)

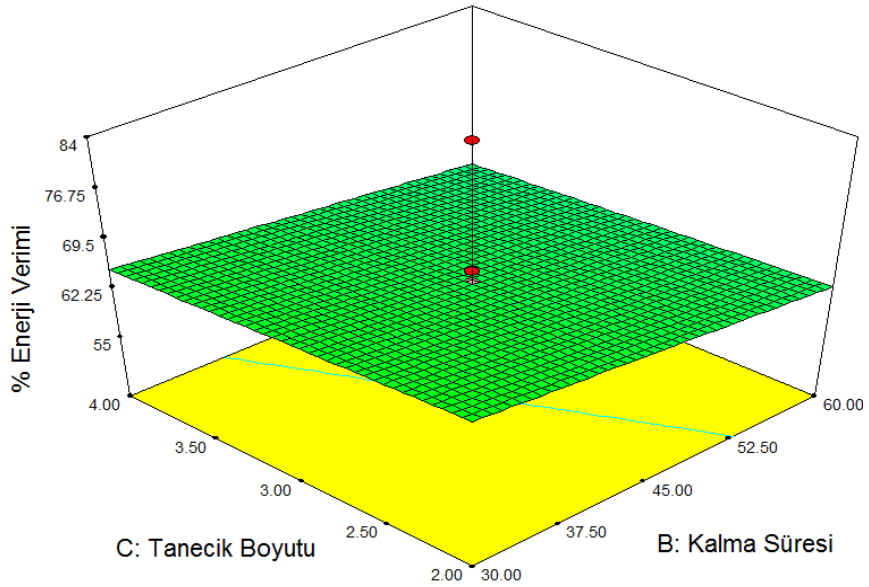
SK-KB biyokömürü %Enerji verimi lineer modeline ait yanıt yüzeyi grafikleri sırası ile Şekil 8.16- 8.18'de verilmiştir.



Şekil 8.16 Sıcaklık ve kalma süresi parametrelerinin SK-KB biyokömür %enerji verimi üzerine etkisi

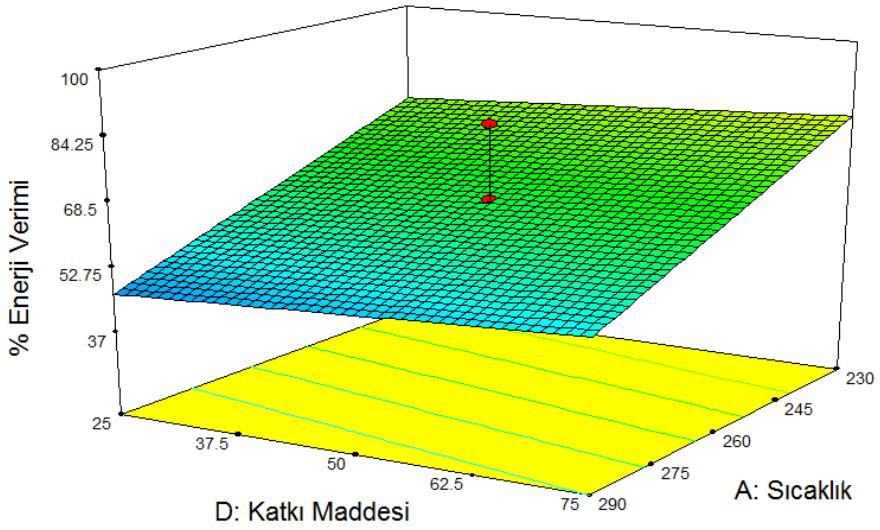
Analiz sonuçları incelendiğinde biyokömür numuneleri %Enerji verimi değerlerinin %37,62 ile %99,03 arasında değiştiği gözlenmiştir. En düşük enerji veriminin en yüksek poses sıcaklığı olan 320°C' de, en yüksek enerji veriminin ise en düşük proses sıcaklığı olan 200°C' de meydana geldiği belirlenmiştir.

SK-KB biyokömür numuneleri %enerji verimi için üretilen lineer denklem göz önüne alındığında en etkili parametrenin reaksiyon sıcaklığı olduğu ve enerji verimi üzerinde azaltıcı etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Proses sıcaklığının yanısıra reaksiyon süresi ve biyokütle tanecik boyutununda, torrefaksiyon prosesi enerji verimi üzerinde negatif etkiye sahip olduğu söylenebilir. Biyokömür numunelerine daha sonra uygukanacak olan peletleme işlemi için yapıya katılan organik katkı maddesinin ise sıcaklık parametresinden sonra %Enerji verimi üzerinde etkisi olduğunu ve bu etkininde verimi artırıcı yönde gözlendiğini söyleyebiliriz.



Şekil 8.17 Kalma süresi ve tanecik boyutu parametrelerinin SK-KB biyokömür %enerji verimi üzerine etkisi

Enerji verimi üzerine en etkili parametre olan proses sıcaklığındaki artış ile enerji veriminde gözlenen azalışın, biyokömür numunelerinde gözlenen kütle verimindeki azalıştan kaynaklandığı düşünülmektedir. Sıcaklık artışı ile nem ve uçucu bileşenler biyokömür yapısından uzaklaştığı, bununda enerji veriminde bir azalışa sebep verdiği bilinmektedir.



Şekil 8.18 Sıcaklık ve katkı maddesi oranı parametrelerinin SK-KB biyokömür %enerji verimi üzerine etkisi

8.2.2 Geven – Keçiboynuzu (2. Set) Torrefaksiyon Prosesi Sonuçları

Ham biyokütle kaynağı olarak Geven bitkisi ve endüstriyel organik atık amaçlı keçi boynuzu atığı kullanılarak torrefaksiyon prosesi ile inert azot ortamında ve düşük ısıtma hızında biyokömür üretimi gerçekleştirilmiştir. 2. Set çalışmaları kapsamında üretimleri gerçekleştirilen G-KB biyokömür numumelerinin deney tasarımı, proses bağımsız değişkenleri olarak belirlenen reaksiyon sıcaklığı, reaksiyon kalma süresi, biyokütle tanecik boyutu ve organik katkı maddesi parametreleri ve bu parametreler için belirlenen seviye aralıkları göz önüne alınarak design expert programı- cevap yüzey yöntemi- merkezi kompozit tasarımı ile oluşturulmuştur. Elde edilen deney tasarım deseninden yararlanılarak gerçekleştirilen torrefaksiyon proseslerinin %kütle kaybı, %kütle verimi, %enerji verimi, enerji yoğunluğu ve ısıl değer sonuçları bağımsız değişlenler üzerinden değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları için design expert programı ile optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilerek, varyans analizleri yapılmış ve proses koşulları olan bağımsız değişkenleri, analiz sonuçları olarak kabul edilen bağımlı değişkenler ile ilişkisini tanımlayan regresyon modelleri oluşturulmuştur. G-KB biyokömür numuneleri için belirlenen deney tasarım deseni ve analiz sonuçları Tablo 8.14'de verilmiştir.

Tablo 8.14 Torrefaksiyon prosesi ile üretilen G-KB biyokömür analiz sonuçları

No	Sıcaklık (°C)	Kalma Süresi (dk)	Tanecik Boyutu (mm)	KB % (ağ/ağ)	Kütle Kaybı (%)	Kütle Verimi (%)	Enerji Verimi (%)	Enerji Yoğunluğu	Isıl Değer (MJ/kg)
1	260	45	3	100	41,21	58,79	82,59	1,41	22,30
2	230	60	4	75	36,61	63,39	77,85	1,23	20,60
3	260	45	3	50	41,68	58,32	65,13	1,12	21,44
4	260	45	3	50	45,08	54,92	62,91	1,15	21,98
5	260	45	5	50	52,88	47,12	62,08	1,32	24,37
6	290	60	2	75	60,21	39,79	52,33	1,32	21,79
7	290	60	2	25	61,05	38,95	48,20	1,24	21,86
8	290	60	4	75	55,95	44,05	60,33	1,37	22,97
9	290	30	4	25	58,04	41,96	59,03	1,41	23,68
10	260	75	3	50	47,96	52,04	57,23	1,19	23,50
11	230	60	2	25	30,99	69,01	77,93	1,13	19,95
12	230	60	4	25	33,40	66,60	86,53	1,30	21,87
13	230	30	2	75	30,17	69,83	85,04	1,22	20,18
14	230	30	4	25	37,73	62,27	75,67	1,22	20,45
15	230	30	4	75	34,19	65,82	80,95	1,23	20,63
16	200	45	3	50	22,46	77,54	78,85	1,02	19,52
17	290	30	2	25	60,99	39,00	50,15	1,29	22,72
18	260	45	3	50	46,33	53,67	61,45	1,14	21,97
19	260	45	3	50	47,66	52,34	59,78	1,14	21,92
20	260	45	3	0	44,48	55,52	66,12	1,19	21,98
21	260	45	3	50	48,27	51,73	60,52	1,17	22,45
22	230	60	2	75	32,84	67,16	82,22	1,22	20,28
23	260	45	3	50	45,88	54,13	63,93	1,18	22,67
24	290	30	2	75	58,29	41,71	29,79	0,71	20,45
25	290	30	4	75	55,88	44,12	57,43	1,30	21,83
26	320	45	3	50	64,55	35,45	39,71	1,12	24,79
27	290	60	4	25	62,07	37,93	50,56	1,33	22,44
28	260	45	1	50	44,88	55,12	70,80	1,28	21,79
29	260	15	3	50	40,10	59,90	70,62	1,18	22,63
30	230	30	2	25	27,20	72,80	80,41	1,10	19,51

8.2.2.1 G-KB Biyokömür Ürünlerinin %Kütle Kaybı Sonuçları

Geven bitkisi ve keçiboynuzu organik katkı maddesi ile oluşturulan 2. Set için torrefaksiyon prosesi sonucu biyokömür numunelerinde meydana gelen %Kütle kaybının Anova analizi yapılarak regresyon katsayıları ve model uyumluluğu değerlendirilmiştir. G-KB biyokömür numuneleri %Kütle kaybı değişiminin bağımsız değişkenlere bağlı olarak lineer model ile açıklanabileceği belirlenmiştir.

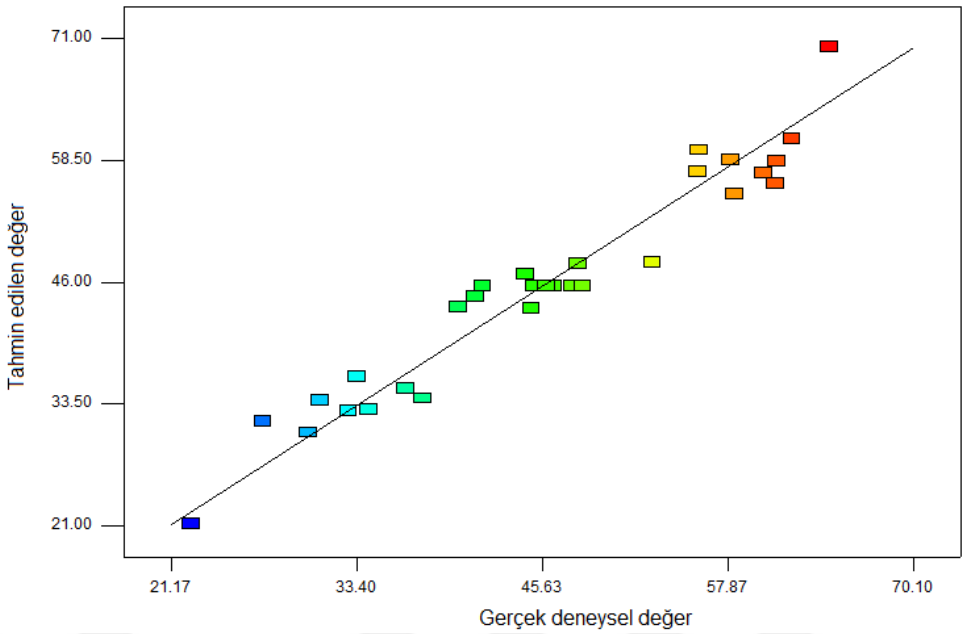
G-KB biyokömür numuneleri %Kütle kaybı analizi için lineer modelin önerilmesinde, diğer modellere göre p değerinin 0,0001'den daha küçük olması, R^2 değerinin ise büyük olması değerlendirilmiştir. Ayrıca kalıntı hata kareler toplamı olan PRESS değerinin küçük olması ve beklenen regresyon katsayısı (0,9090) ile düzeltilmiş regresyon katsayısının (0,9298) birbirine yakın olması da lineer modelin yeni verilerin tahminlenmesinde de kullanılabileceğini göstermiştir. Önerilen model için istatiksel değerler Tablo 8.15'de verilmiştir.

Tablo 8.15 G-KB biyokömür numuneleri %kütle kaybı analizi model istatiksel değerleri

	Std. Sapma	R^2	Düzeltilmiş R^2	Beklenen R^2	PRESS
Lineer	**3,07**	**0,9395**	**0,9298**	**0,9090**	**354,71**
2FI	2,86	0,96	0,939	0,8981	397,07
Kuadratik	2,71	0,9718	0,9454	0,8677	515,61
Kübik	2,57	0,9881	0,9508	0,2908	2762,98

Torrefaksiyon prosesi için uygun bulunan lineer modelin regresyon katsarısı R^2 değerinin 0,9395 olarak bulunması, lineer modelin G-KB biyokömür numuneleri için kütle kaybı analizini %93,95 düzeyinde açıklayabileceğini göstermiştir. Ayrıca lineer model için yeterli tahminleme değerinin 39,029 olarak bulunması, kabul edilen modelin yeni verilerin tahmilenmesi için de uygun olacağını göstermiştir.

G-KB biyokömür numuneleri %Kütle kaybı analizi için beklenen değerler ile deneysel değerlerin uyumlu olduğu Şekil 8.19'da gösterilmiştir.



Şekil 8.19 G-KB biyokömür numuneleri %kütle kaybı deneysel veriler ile tahmin edilen verilerin karşlaştırılması

G-KB biyokömür %Kütle kaybı varyans analizi Tablo 8.16'da verilmiştir. ANOVA sonuçlarından, %Kütle kaybı cevap yüzeyinin lineer model ile açıklanabileceği belirlenmiştir. Lineer model p değeri <0,0001 olarak hesaplanmıştır [158]. Bu durum prosesi etkileyen bağımsız değişkenlerden en az bir tanesinin biyokömür %Kütle kaybı üzerinde istatistiksel olarak önemli etkiye sahip olduğunu ve ayrıca parametrelerin sonuçlarını sadece lineer olarak etkilediğini göstermektedir.

Anova analiz sonuçlarına göre proses koşulları olarak belirlenen bağımsız değişkenlerin p değerleri incelendiğinde, sıcaklık (A) parametresi için hesaplanan p değeri <0,05 olarak bulunduğu için sıcaklık parametresinin uygulanan torrefaksiyon prosesi için etkili bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır. G-KB biyokömür %Kütle kaybı için regresyon analizi ile önerilen lineer model, kodlanmış bağımsız değişkenler cinsinden eşitlik (8.4)'de verilmiştir.

$$\%\text{Kütle kaybı} = +45{,}63+12{,}23*A+1{,}10*B+1{,}17*C-0{,}58*D \quad (8.4)$$

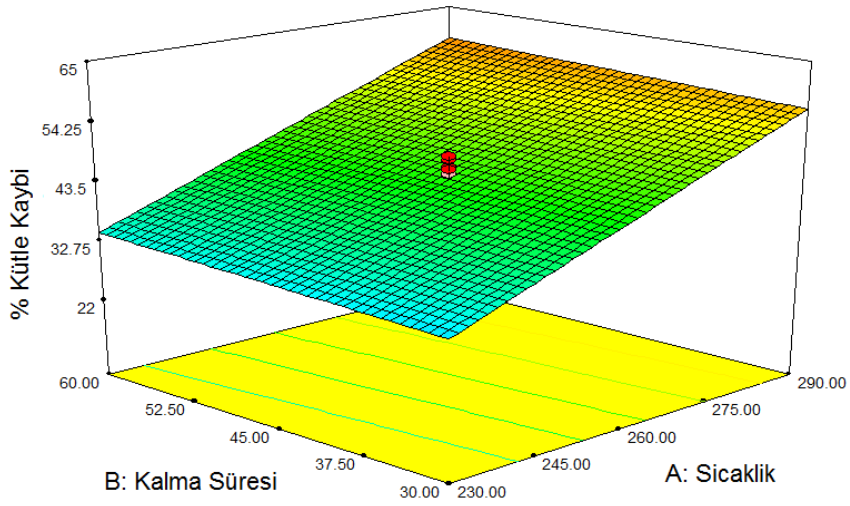
(A: Sıcaklık, B: Kalma Süresi, C: Tanecik Boyutu, D: % Keçi Boynuzu Katkı Maddesi Oranı).

Tablo 8.16 G-KB %Kütle kaybı ANOVA sonuçları

Cevap 1	%Kütle Kaybı				
	Lineer Modele ait ANOVA Sonuçları				
	Kareler Toplamı	df	Kare Ortalaması	F Değeri	p-değeri Prob>F
Model	**3660,12**	**4**	**915,03**	**97,06**	**< 0,0001**
A-Sıcaklık	3590,18	1	3590,18	380,82	< 0,0001
B-Kalma Süresi	28,97	1	28,97	3,07	0,0918
C-Tanecik Boyutu	32,95	1	32,95	3,50	0,0733
D-% KB	8,01	1	8,01	0,85	0,3654
Kalıntı	235,69	25	9,43		
Uyum Eksikliği	208,36	20	10,42	1,91	0,2452
Yeterli Tahminleme	39,029				

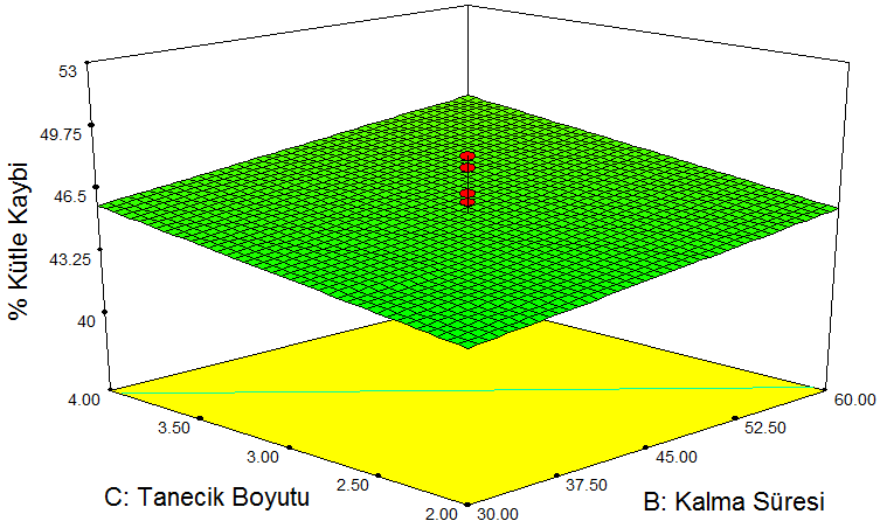
Üretilen biyokömür %Kütle kaybı sonuçları için önerilen lineer modeldeki değişkenlerin katsayıları incelendiğinde torrefaksiyon reaksiyon sıcaklığı'nın (A) sonuçlar üzerinde en etkili parametre olduğu, diğer parametrelerinde sıcaklık kadar etkili olmamakla beraber biyokömür %Kütle kaybı üzerinde pozitif etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Organik katkı maddesi olarak kullanılan keçi boynuzu atıklarının ise beklenen etkiyi göstermediği belirlenmiştir.

G-KB biyokömür numuneleri %kütle kaybı yüzey yanıt grafikleri Şekil 8.20-8.22'de verilmiştir.

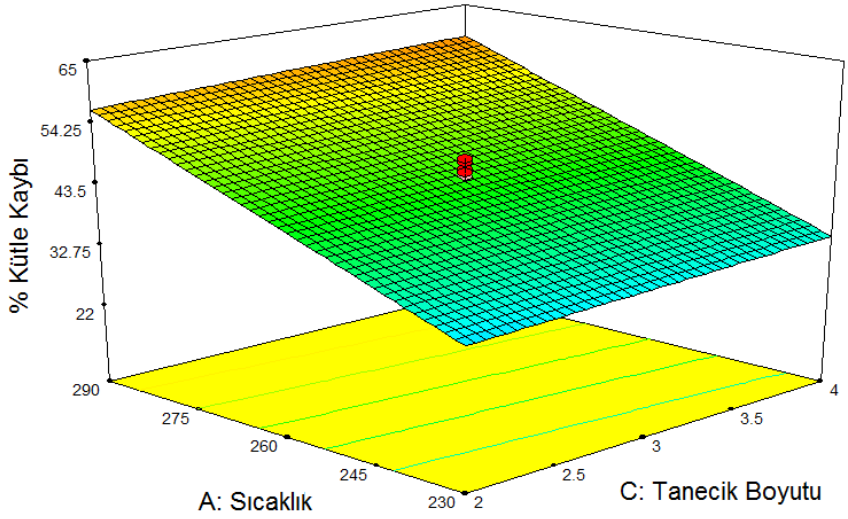


Şekil 8.20 G-KB biyokömür numuneleri için sıcaklık ve kalma süresi parametrelerinin %kütle kaybı üzerine etkisi

Torrefaksiyon prosesi ile üretilen G-KB biyokömür numunelrinin analiz sonuçlarına bakıldığında %Kütle kaybı değerlerinin %22,46 ile %64,55 arasında değiştiği görülmüştür. En düşük %Kütle kaybına 200°C, 45 dakika ve 3mm koşullarında, en yüksek %Kütle kaybı değerine ise 320°C, 45 dakika ve 3 mm proses koşullarında ulaşıldığı belirlenmiştir. Verilen bu analiz sonuçlarıda, ANOVA sonuçlarını destekleyerek, proses sıcaklığının en etkili parameter olduğunu ve %Kütle kaybı üzerinde pozitif bir etkiye sahip olduğunu desteklemiştir.



Şekil 8.21 G-KB biyokömür numuneleri için kalma süresi – biyokütle tanecik boyutu parametrelerinin %kütle kaybı üzerine etkisi



Şekil 8.22 G-KB biyokömür numuneleri için sıcaklık – biyokütle tanecik boyutu parametrelerinin %kütle kaybı üzerine etkisi

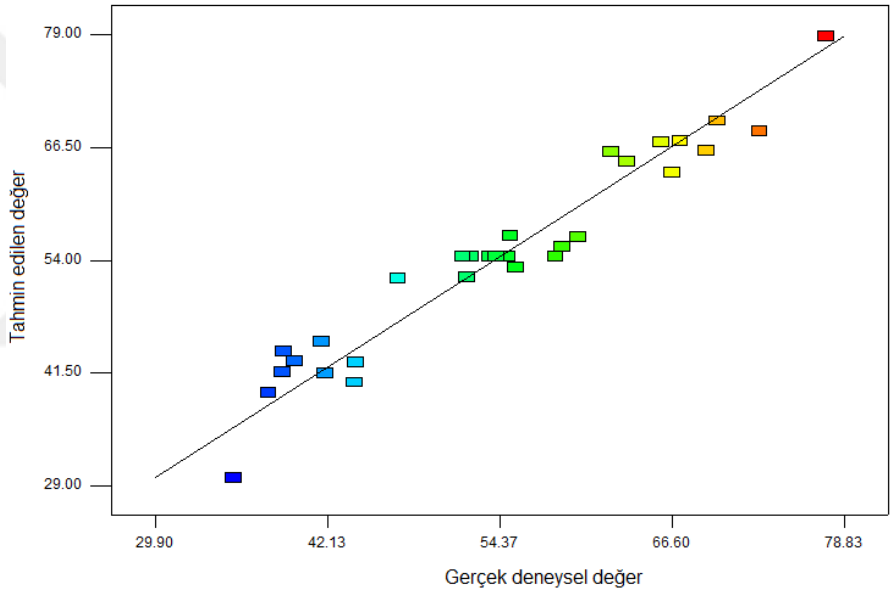
8.2.2.2 G-KB Biyokömür Ürünlerinin %Kütle Verimi Sonuçları

Geven bitkisi ve keçiboynuzu karışımına uygulanan torrefaksiyon prosesi sonuçları Design Expert programı ve ANOVA analizi sonuçları incelenerek değerlendirilmiştir. Torrefaksiyon sonuçları incelendiğinde, reaksiyon sıcaklığı, süresi ve biyokütle parçacık büyüklüğü gibi bağımsız değişkenlerin, üretilen biyokömür %Kütle verimi üzerine etkisinin lineer model ile açıklanabileceği bulunmuştur. Analiz sonucu p değerinin 0,0001 değerinden küçük olması lineer modelin önerilmesine sebep olmuştur. Ayrıca R^2 değerinin büyük olması ve lineer modele ait küçük standart sapma değeri ile küçük kalıntı hata karaler toplamı olan PRESS değeride model seçiminde göz önüne alınmıştır. Önerilen modele ait değerler Tablo 8.17'de verilmiştir.

Tablo 8.17 G-KB biyokömür numuneleri %kütle verim analizi model istatiksel değerleri

	Std. Sapma	R^2	Düzeltilmiş R^2	Beklenen R^2	PRESS
Lineer	**3,07**	**0,9395**	**0,9298**	**0,9090**	**354,71**
2FI	2,86	0,96	0,939	0,8981	397,07
Kuadratik	2,71	0,9718	0,9454	0,8677	515,61
Kübik	2,57	0,9881	0,9508	0,2908	2762,98

Önerilen modellere ait R^2 değeri karşılaştırıldığında lineer modeles için R^2 değerinin 0,9395 olduğu görülmüştür. Bu değer lineer model ile deneysel verilerin birbiri ile tutarlılık içerisinde olduğu sonucunu vermiştir. Ayrıca bu modele ait Düzeltilmiş R^2 değeri 0,9298, beklenen R^2 değeri ise 0,9090 olarak bulunmuştur. Beklenen regresyon katsayısı R^2 değeri ile düzeltilmiş regresyon katsayısı R^2 değerleri arasındaki fark diğer modellere göre daha az olduğu için birbirleriyle kabul edilebilir derecede uyumluluk gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bu durumu Şekil 8.23'de desteklemektedir. Ayrıca proses verilerindeki değişkenliğin %93,95 oranında önerilen lineer model ile açıklanabileceği de söylenebilir. Lineer model için 39,029 verilen "yeterli tahminleme" değerinin de 4'ten büyük olması %Kütle verimliliği sonuçlarının bu model ile açıklanabileceğini desteklemektedir.



Şekil 8.23 G-KB biyokömür numuneleri %kütle verimi deneysel veriler ile tahmin edilen verilerin karşlaştırılması

%Kütle verimi ANOVA analiz sonuçları Tablo 8.18'de verilmiştir. Önerilen lineer model için p değeri <0,0001 olarak görülmektedir. Bu durum torrefaksiyon sonucu %Kütle verimliliği sonuçlarını bağımsız değişkenlerden en az bir tanesinin istatistiksel olarak önemli bir şekilde etkilediğini ve bu etkinin lineer olduğunu göstermektedir [158]. Anova analiz sonuçları incelendiğinde, bağımsız değişkenler arasından sıcaklık (A) parametresinin p<0,05 olması, bu parametrenin %Kütle verimi üzerine büyük ölçüde etkili olduğunu göstermiştir.

Tablo 8.18 G-KB %kütle verimi ANOVA sonuçları

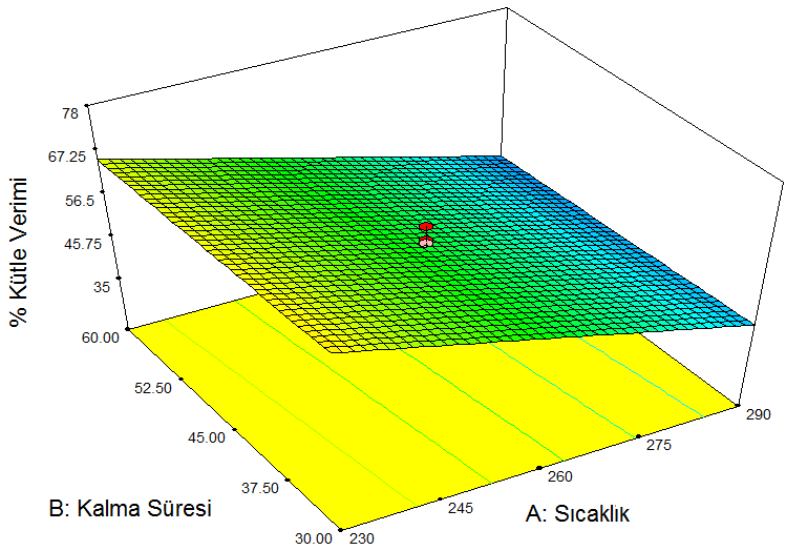
Cevap 2	%Kütle Verimi				
	Lineer Modele ait ANOVA Sonuçları				
	Kareler Toplamı	df	Kare Ortalaması	F Değeri	p-değeri Prob>F
Model	**3660,12**	**4**	**915,03**	**97,06**	**< 0,0001**
A-Sıcaklık	3590,18	1	3590,18	380,82	< 0,0001
B-Kalma Süresi	28,97	1	28,97	3,07	0,0918
C-Tanecik Boyutu	32,95	1	32,95	3,50	0,0733
D-% KB	8,01	1	8,01	0,85	0,3654
Kalıntı	235,69	25	9,43		
Uyum Eksikliği	208,36	20	10,42	1,91	0,2452
Yeterli Tahminleme	39,029				

Diğer bağımsız değişkenlerin p değerleri incelendiğinde ise reaksiyon süresi ve biyokütle tanecik boyutu parametrelerinin de sıcaklık kadar olmasa da sonuçlar üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır. %Kütle verimi regresyon analiz sonucu elde edilen lineer model, kodlanmış bağımsız değişkenler cinsinden eşitlik (8.5)'de verilmiştir.

$$\%\text{Kütle verimi} = +54{,}37 - 12{,}23*A - 1{,}10*B - 1{,}17*C + 0{,}58*D \quad (8.5)$$

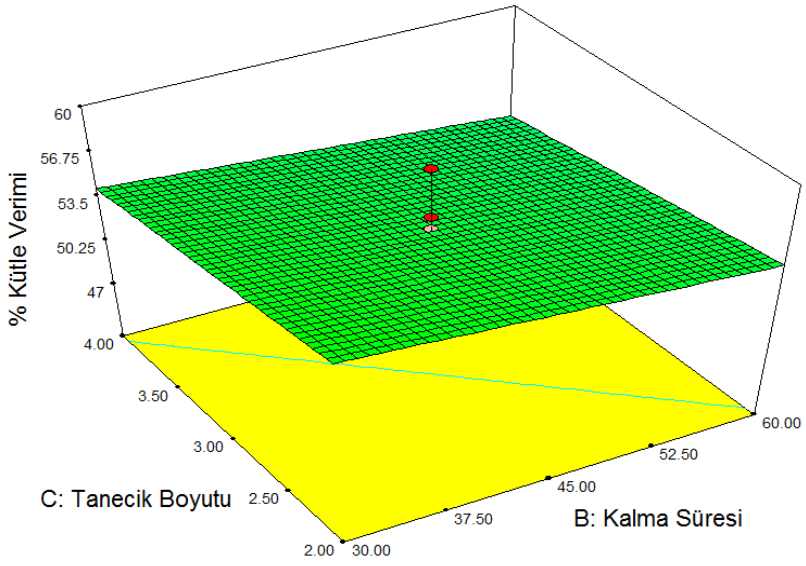
(A: Sıcaklık, B: Kalma Süresi, C: Tanecik Boyutu, D: % Keçi Boynuzu Katkı Maddesi Oranı)

Üretilen biyoyakıtların %Kütle verimlilikleri için oluşturulan lineer modeldeki değişkenlerin katsayıları gözönüne alındığında reaksiyon sıcaklığı'nın (A) en etkili parametre olduğu gözlenmiştir. Ayrıca reaksiyon sıcaklığı (A), kalma süresi (B), tanecik boyutu (C) değerlerinin negatif lineer etkiye sahip olduğu ve ürün verimini azalttığı sonucuna varılmıştır. Elde edilen modele ait yanıt yüzeyi grafikleri Şekil 8.24-Şekil 8.26'da verilmiştir.



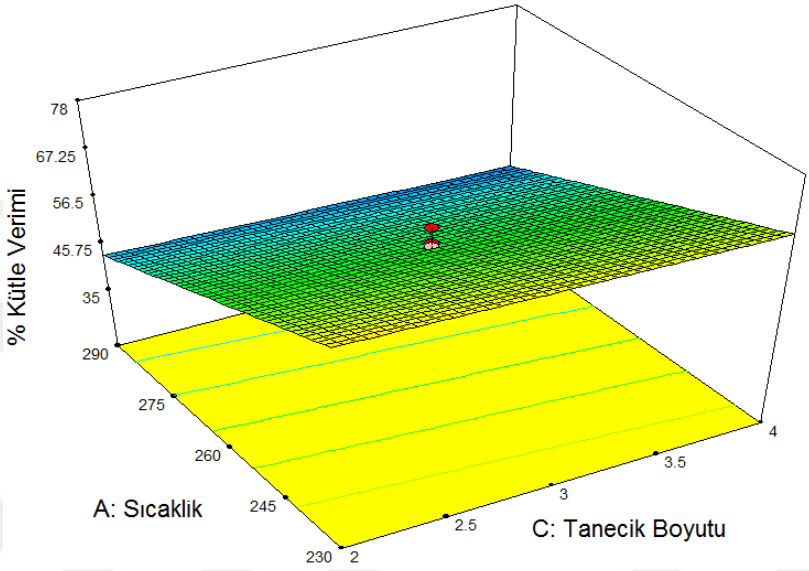
Şekil 8.24 G-KB biyokömür numuneleri için sıcaklık ve kalma süresi parametrelerinin %kütle verimi üzerine etkisi

G-KB biyokömür numunelerinin analiz sonuçlarına bakıldığında %Kütle verimi değerlerinin %35,45 ile %77,54 arasında değiştiği görülmüştür. En düşük %Kütle verimine 320°C, 45 dakika ve 3 mm proses koşullarında ulaşıldığı, en yüksek %Kütle verimi değerine ise 200°C, 45 dakika ve 3mm koşullarında ulaşıldığı belirlenmiştir. Verilen bu analiz sonuçlarıda proses sıcaklığının en etkili parametre olduğunu ve artan proses sıcaklığı ile %Kütle veriminin azaldığını desteklemiştir.



Şekil 8.25 G-KB biyokömür numuneleri için kalma süresi – biyokütle tanecik boyutu parametrelerinin %kütle verimi üzerine etkisi

G-KB biyokömür numunelerinde torrefaksiyon prosesi ile gözlenen kütle verimindeki azalışın, literatür bilgilerinin de desteklediği gibi lignoselülozik biyokütlenin kimyasal yapısının yaklaşık %30'unu oluşturan en uçucu bileşenlerin, genellikle yapıdaki hemiselülozun termal bozunması ile torrefaksiyon gazları şeklinde yapıdan uzaklaşması sonucu oluştuğu düşünülmektedir. Ayrıca kütle verimindeki azalışı, daha yüksek sıcaklıklarda meydana gelen selülozun yüksek, lignin molekülünün ise kısmen termal parçalanmasıda desteklemektedir [159].



Şekil 8.26 G-KB biyokömür numuneleri için sıcaklık – biyokütle tanecik boyutu parametrelerinin %kütle verimi üzerine etkisi

8.2.2.3 G-KB Biyokömür Ürünlerinin %Enerji Verimi Sonuçları

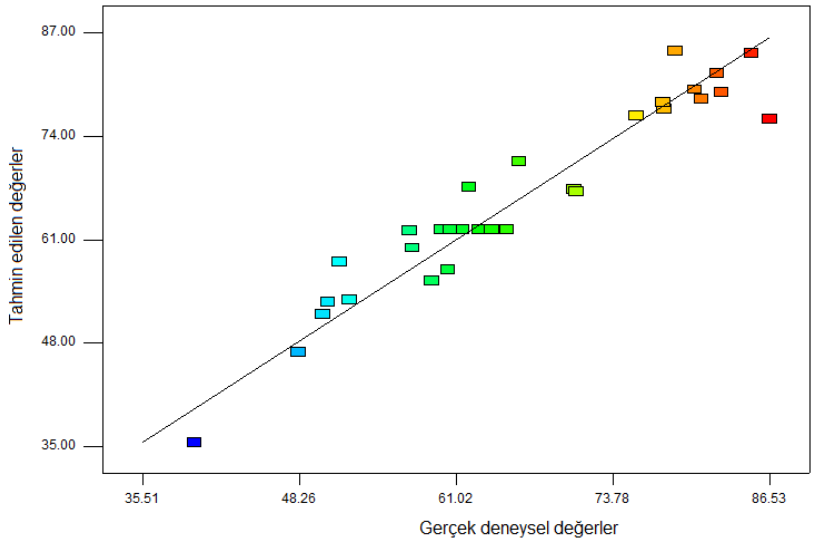
Biyokütle kaynağı Geven bitkisi ve organik katkı maddesi karışımına uygulanan torrefaksiyon prosesi sonucu %Enerji verimi sonuçları Design Expert programı ve ANOVA analizi sonuçları incelenerek değerlendirilmiştir. Uygulanan cevap yüzey yöntemi ile analiz sonuçlarının optimizasyonu ve bağımsız değişkenlerin %Enerji verimi ve birbirleri ile ilişkisi belirlenmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde, torrefaksiyon sıcaklığı, süresi ve biyokütle parçacık büyüklüğü gibi bağımsız değişkenlerin, üretilen biyokömür %Enerji verimi üzerine etkisinin lineer model ile açıklanabileceği bulunmuştur. Analiz sonucu lineer modelin önerilmesine p değerinin 0,0001 değerinden küçük olması göz önüne alınarak karar verilmiştir. R^2 değerinin büyük olması, standart sapma ve kalıntı hata karaler toplamı olan PRESS

değerlerinin küçük olması da lineer modelin seçilmesini desteklemiştir. %Enerji verimi için önerilen modellerin istatiksel verileri Tablo 8.19'da verilmiştir.

Tablo 8.19 G-KB biyokömür numuneleri %enerji verim analizi model istatiksel değerleri

	Std. Sapma	R^2	Düzeltilmiş R^2	Beklenen R^2	PRESS
Lineer	**5,64**	**0,8263**	**0,7985**	**0,7394**	**1194,56**
2FI	6,16	0,8427	0,7599	0,5714	1964,84
Kuadratik	5,05	0,9165	0,8387	0,5394	2111,71
Kübik	2,94	0,9868	0,9452	-0,2404	5686,64

Önerilen model için R^2 değeri karşılaştırıldığında lineer modele ait R^2 değeri 0,8263_olarak bulunmuştur. Lineer model için düzeltilmiş R^2 değerinin 0,7985, beklenen R^2 değerinin ise 0,7394 olduğu belirlenmiştir. Lineer modele ait R^2 değeri diğer modellerin değerleri ile karşılaştırıldığında biraz daha düşük olmasına rağmen, beklenen regresyon katsayısı değeri ile düzeltilmiş regresyon katsayısı değerleri arasındaki fark diğer modellere göre daha az olduğu için %Enerji verim, sonuçları için lineer modelin daha uygun olacağı düşünülmüştür. Ayrıca bu iki değerin birbirine yakın olması değerlerin birbirleriyle kabul edilebilir derecede uyumluluk gösterdiğini de desteklemektedir. Deneysel veriler ile tahmin edilen verilerin uyumlu olduğu Şekil 8.27'de görülmektedir.



Şekil 8.27 G-KB biyokömür numuneleri %enerji verimi deneysel veriler ile tahmin edilen verilerin karşlaştırılması

Ayrıca %Enerji verimi sonuçları için parametrelerdeki değişkenliğin %82,63 oranında önerilen lineer model ile açıklanabileceği söylenebilir. Lineer model için 21,364 olarak hesaplanan "yeterli tahminleme" değerinin de 4'ten büyük olması %Enerji verimi sonuçlarının bu model ile açıklanabileceğini desteklemektedir.

%Enerji verimi Tablo 8.20'de ANOVA analiz sonuçlarında görüldüğü gibi lineer model için p değeri <0,0001 olarak hesaplanmıştır. Bu durum prosesi etkileyen bağımsız değişkenlerden en az bir tanesinin G-KB biyokömür ürünü %Enerji verimi üzerinde istatistiksel olarak önemli etkiye sahip olduğunu ve ayrıca bağımsız değişkenlerin %Enerji verimi sonuçlarını lineer olarak etkilediğini göstermiştir.

Tablo 8.20 G-KB %enerji verimi ANOVA sonuçları

Cevap 3	%Enerji Verimi				
	Lineer Modele ait ANOVA Sonuçları				
	Kareler Toplamı	df	Kare Ortalaması	F Değeri	p-değeri Prob>F
Model	**3788.18**	**4**	**947.05**	**29.73**	**< 0.0001**
A-Sıcaklık	3634.46	1	3634.46	114.10	< 0.0001
B-Kalma Süresi	40.14	1	40.14	1.26	0.2723
C-Tanecik Boyutu	0.41	1	0.41	0.013	0.9104
D-% KB	113.17	1	113.17	3.55	0.0711
Kalıntı	796.31	25	31.85		
Uyum Eksikliği	775.00	20	38.75	9.09	0.0112
Yeterli Tahminleme	21,364				

Anova analiz sonuçlarına göre bağımsız değişkenlerin p değerleri incelendiğinde, sıcaklık (A) parametresi için hesaplanan p değeri <0,05 olarak bulunduğu için sıcaklık parametresinin uygulanan torrefaksiyon prosesi %Enerji verimi sonuçları üzerinde büyük ölçüde etkili olduğu sonucu çıkartılmıştır. %Enerji verimi için

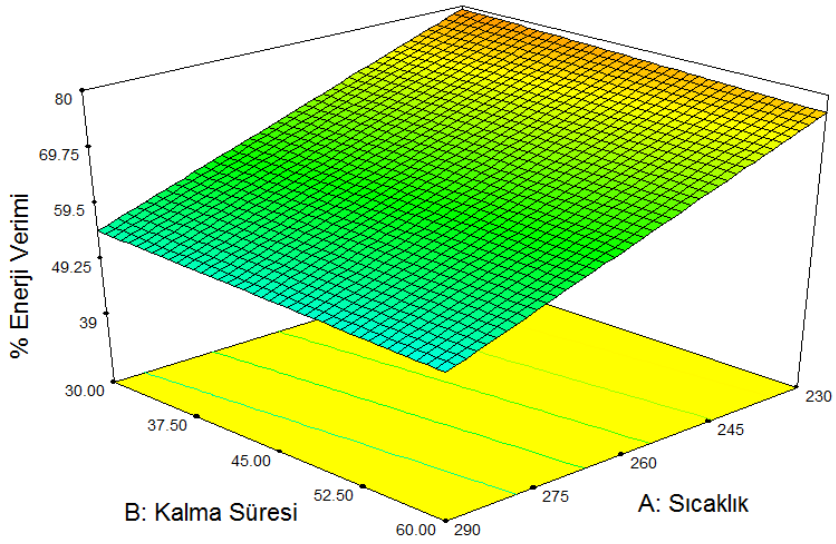
regresyon analizi sonucunda elde edilen lineer model, kodlanmış bağımsız değişkenler cinsinden eşitlik (8.6)'da verilmiştir.

$$\%\text{Enerji verimi} = +65{,}93 - 12{,}31*A - 1{,}29*B + 0{,}13*C + 2{,}17*D \quad (8.6)$$

(A: Sıcaklık, B: Kalma Süresi, C: Tanecik Boyutu, D: % Keçi Boynuzu Katkı Maddesi Oranı)

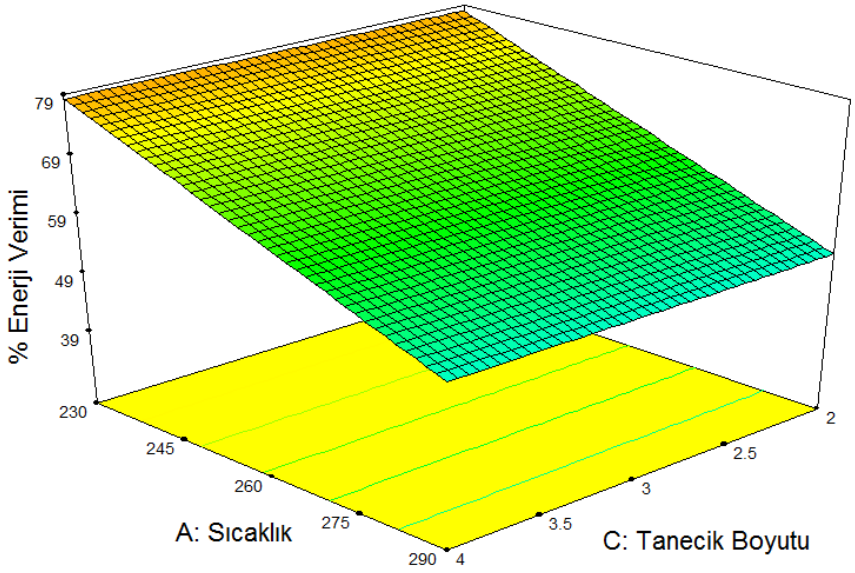
Elde edilen biyokömürün %Enerji verimi sonuçları için önerilen lineer modeldeki değişkenlerin katsayıları incelendiğinde torrefaksiyon reaksiyon sıcaklığı'nın (A) sonuçlar üzerinde en etkili parametre olduğu, diğer parametrelerinde sıcaklık kadar etkili olmamakla beraber biyokömür %Enerji verimini etkilediği söylenebilir. Lineer model incelendiğinde, biyokömür %Enerji verimini proses sıcaklığının ve proses süresinin azaltıcı yönde, biyokütle tanecik boyutu ve organik katkı maddesinin ise artırıcı yönde etkilediği görülmüştür. Lineer modele ait yanıt yüzeyi grafikleri Şekil 8.28-Şekil 8.30' da verilmiştir.

G-KB biyokömür numunelrinin analiz sonuçlarına bakıldığında %Enerji verimi değerlerinin %29,79 ile %86,53 arasında değiştiği görülmüştür. En düşük %Enerji verimine 290°C, 30 dakika ve 2 mm proses koşullarında ulaşıldığı, en yüksek %Enerji verimi değerine ise 230°C, 60 dakika ve 4mm koşullarında ulaşıldığı belirlenmiştir. Verilen bu analiz sonuçlarıda proses sıcaklığının en etkili parametre olduğunu ve artan proses sıcaklığı ile %Enerji veriminin azaldığını desteklemiştir.

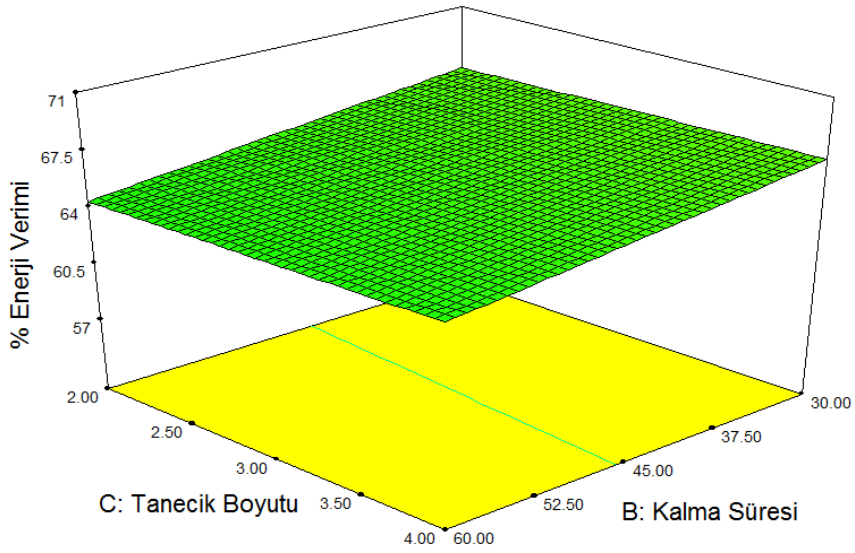


Şekil 8.28 G-KB biyokömür numuneleri için sıcaklık ve kalma süresi parametrelerinin % enerji verimi üzerine etkisi

Aynı torrefaksiyon koşullarında üretilen biyokömür numunelerinin %Kütle verimi ve %Enerji verimi değerlerini karşılaştırabilmek için 320°C, 45 dakika ve 3 mm proses koşulları göz önüne alındığında, ürün % Enerji veriminin %39,71 ile, %Kütle verimi %35,45 oranına göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Çünkü torrefaksiyon prosesi ile biyokütle yapısında meydana gelen termal bozunma sonucu oluşan torrefiye ürünün, başlangıç kütlesinin yaklaşık %70'ini korurken, enerji içeriğinin ise %90'nı nı koruduğu bilinmektedir. Dolayısı ile torrefaksiyon prosesi sonucu biyokömür oluşumunda, yüksek kütle kaybına bağlı olarak kütle veriminde azalış gözlenmesine rağmen enerji verimindeki azalış ise daha düşük gerçekleşmiştir. Bu şekilde kömüre yakın kalorifik değerlere sahip biyokömür ürünlerinin üretilebileceği de söylenebilir [159].



Şekil 8.29 G-KB biyokömür numuneleri için kalma süresi–biyokütle tanecik boyutu parametrelerinin %enerji verimi üzerine etkisi



Şekil 8.30 G-KB biyokömür numuneleri için sıcaklık–biyokütle tanecik boyutu parametrelerinin %enerji verimi üzerine etkisi

8.2.3 Geven–Mısır (3. Set) Torrefaksiyon Prosesi Sonuçları

3. Set çalışmaları kapsamında ham biyokütle kaynağı Geven bitkisi ve organik atık amaçlı mısır endüstriyel atığı torrefaksiyon prosesi ile inert azot atmosferinde ve düşük ısıtma hızında biyokömür üretimi için kullanılmıştır. Üretimleri gerçekleştirilen G-M biyokömür numumelerinin deney tasarımı, torrefaksiyon sıcaklığı, proses süresi, biyokütle tanecik boyutu şeklinde tanımlanan bağımsız değişkemler ve bu değişkenler için belirlenen seviye aralıkları kullanılarak design expert programı- cevap yüzey yöntemi- merkezi kompozit tasarımı ile oluşturulmuştur. Üretilen G-M biyokömür ürünlerinin %Kütle kaybı, %Kütle verimi, %Enerji verimi, enerji yoğunluğu ve ısıl değer analizleri bağımsız değişlenler üzerinden değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları design expert/ yanıt yüzey yöntemi ile optimize edilerek, proses torrefaksiyon koşulları olan rak belirlenen bağımsız değişkenlerin, analiz sonuçları olarak kabul edilen bağımlı değişkenler ile ilişkisini tanımlayan regresyon modelleri oluşturulmuştur. G-M biyokömür üretimi için oluşturulan deney tasarım deseni ve analiz sonuçları Tablo 8.21'de verilmiştir.

Tablo 8.21 Torrefaksiyon prosesi ile üretilen G-M biyokömür analiz sonuçları

No	Sıcaklık (°C)	Kalma Süresi (dk)	Tanecik Boyutu (mm)	M % (ağ/ağ)	Kütle Kaybı (%)	Kütle Verimi (%)	Enerji Verimi (%)	Enerji Yoğunluğu	Isıl Değer (MJ/kg)
1	260	45	3	100	60,66	39,34	53,16	1,35	23,19
2	230	60	4	75	32,43	67,57	79,25	1,17	21,42
3	260	45	3	50	49,98	50,02	63,51	1,27	22,28
4	260	45	3	50	49,81	50,19	65,39	1,30	22,86
5	260	45	5	50	48,77	51,23	68,42	1,34	25,33
6	290	60	2	75	64,77	35,23	44,21	1,25	22,66
7	290	60	2	25	62,08	37,92	48,95	1,29	22,74
8	290	60	4	75	62,20	37,80	49,44	1,31	23,88
9	290	30	4	25	61,71	38,30	50,52	1,32	24,62
10	260	75	3	50	59,79	40,21	51,30	1,28	22,39
11	230	60	2	25	35,76	64,24	77,23	1,20	21,17
12	230	60	4	25	29,15	70,85	86,36	1,22	22,75
13	230	30	2	75	31,35	68,65	79,78	1,16	20,98
14	230	30	4	25	29,29	70,72	82,20	1,16	21,69
15	230	30	4	75	35,44	64,56	77,34	1,20	21,87
16	200	45	3	50	18,49	81,51	96,18	1,18	20,71
17	290	30	2	25	64,89	35,11	47,08	1,34	23,62
18	260	45	3	50	48,47	51,53	67,09	1,30	22,85
19	260	45	3	50	50,01	49,99	64,94	1,30	22,80
20	260	45	3	0	38,84	61,16	75,99	1,24	21,99
21	260	45	3	50	48,91	51,09	65,36	1,28	22,45
22	230	60	2	75	37,30	62,70	71,80	1,15	20,67
23	260	45	3	50	49,04	50,96	64,53	1,27	22,98
24	290	30	2	75	64,58	35,42	40,12	1,13	20,45
25	290	30	4	75	59,73	40,27	48,13	1,20	21,82
26	320	45	3	50	69,79	30,21	37,01	1,23	24,43
27	290	60	4	25	62,31	37,69	44,43	1,18	22,00
28	260	45	1	50	57,37	42,63	55,40	1,30	22,21
29	260	15	3	50	49,93	50,07	63,36	1,27	22,21
30	230	30	2	25	34,37	65,63	72,70	1,11	19,51

8.2.3.1 G-M Biyokömür Ürünlerinin %Kütle Kaybı Sonuçları

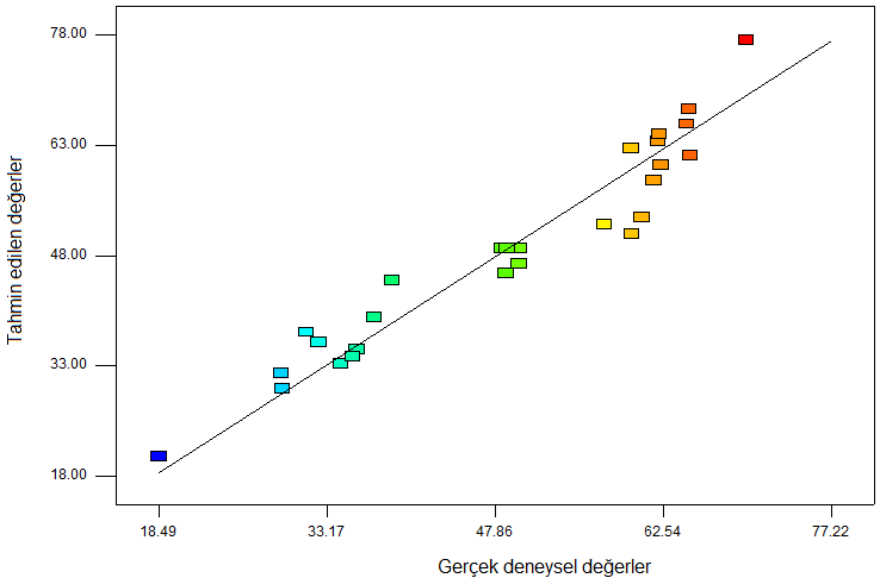
Geven bitkisi ve mısır organik katkı maddesi için uygulanan 3. Set torrefaksiyon prosesi sonucu üretilen biyokömür numunelerinin %Kütle kaybı sonuçlarının Anova analizi yapılarak regresyon katsayıları ve model uyumluluğu değerlendirilmiştir. G-M biyokömür numuneleri %Kütle kaybı analizinin bağımsız değişkenlere bağlı olarak lineer model ile açıklanabileceği belirlenmiştir.

%Kütle kaybı analiz sonuçları için lineer modelin kullanılmasına, önerilen diğer modellere göre daha küçük p değerine sahip olduğu ($p< 0.0001$) için karar verilmiştir. Diğer modellerle R^2 değerleri karşılaştırıldığında nispeten büyük olmasına rağmen, beklenen regresyon katsayısı (0,8849) ile düzeltilmiş regresyon katsayısının (0,9144) birbirine yakın olması lineer modelin yeni verilerin tahminlenmesinde kullanılabileceğini göstermiştir. Ayrıca kalıntı hata kareler toplamı olan PRESS değerinin diğer modeler için belirlenen değerlerden küçük olmasıda lineer modelin seçilmesini desteklemiştir. Önerilen model için istatiksel değerler Tablo 8.22'de verilmiştir.

Tablo 8.22 G-M biyokömür numuneleri %kütle kaybı analizi model istatiksel değerleri

	Std. Sapma	R^2	Düzeltilmiş R^2	Beklenen R^2	PRESS
Lineer	**4,00**	**0,9262**	**0,9144**	**0,8849**	**623,00**
2FI	4,52	0,9283	0,8906	0,8054	1053,81
Kuadratik	4,11	0,9532	0,9095	0,7321	1450,80
Kübik	2,32	0,9930	0,9711	0,0499	5144,48

G-M biyokömür üretimi torrefaksiyon prosesi için uygun bulunan lineer modelin regresyon katsayısı R^2 değeri 0,9262 olarak bulunmuştur. Bu değer, G-M biyokömür %Kütle kaybı analiz sonuçlarının % 92,62 oarnında lineer model ile açıklanabileceğini göstermektedir. Model için 34,69 olarak bulunan yeterli tahminlenme değeri de, lineer modelin yeni deneysel verilerin tahminlenmesinde kullanılabileceğini göstermiştir. G-M biyokömür numuneleri %Kütle kaybı analizi için beklenen değerler ile deneysel değerlerin uyumlu olduğu Şekil 8.31'de gösterilmiştir.



Şekil 8.31 G-M biyokömür numuneleri %kütle kaybı deneysel veriler ile tahmin edilen verilerin karşlaştırılması

G-M biyokömür %Kütle kaybı varyans analizi Tablo 8.23'de verilmiştir.

Tablo 8.23 G-M %kütle kaybı ANOVA sonuçları

Cevap 1	%Kütle Kaybı				
	Lineer Modele ait ANOVA Sonuçları				
	Kareler Toplamı	df	Kare Ortalaması	F Değeri	p-değeri Prob>F
Model	**5014,78**	**4**	**1253,70**	**78,40**	**< 0.0001**
A-Sıcaklık	4811,04	1	4811,04	300,85	< 0,0001
B-Kalma Süresi	24,73	1	24,73	1,55	0,2252
C-Tanecik Boyutu	66,83	1	66,83	4,18	0,0516
D-% M	112,18	1	112,18	7,01	0,0138
Kalıntı	399,79	25	15,99		
Uyum Eksikliği	397,69	20	19,88	47,41	0,0002
Yeterli Tahminleme	34,69				

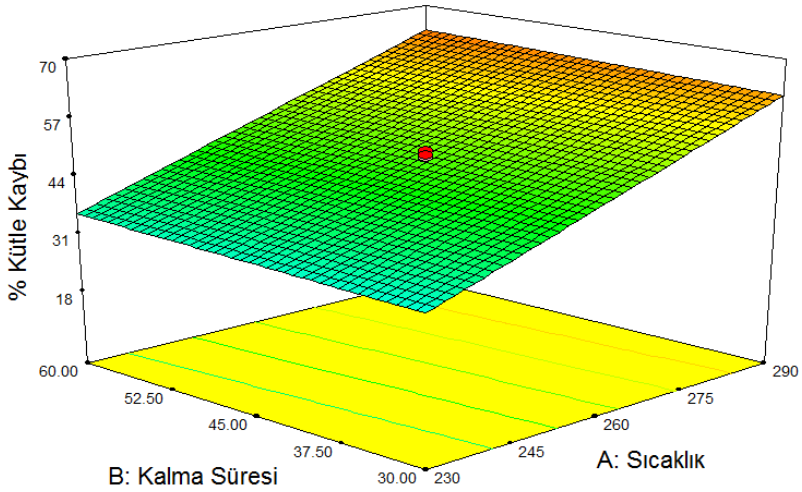
Anova sonuçlarına göre lineer model için p değerinin 0,0001'den küçük olması, bağımsız değişkenlerin torrefaksiyon proses sonuçlarını lineer olarak etkilediğini ve en az bir tane bağımsız değişkenin sonuçlar üzerinde istatiksel olarak önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Anova sonuçlarına göre bağımsız değişkenlerin p değerleri incelendiğinde, torrefaksiyon proses sıcaklığı (A) ve %Mısır katkı maddesi (D) oranı parametreleri p değerlerinin 0,05'den küçük olduğu ve bu yüzden %Kütle kaybı analizi için etkili parametreler olduğu bulunmuştur. Ayrıca tanecik boyutu bağımsız değişkeninde, analiz sonuçlarını diğer bahsedilen parametreler kadar olmamakla beraber etkilediği söylenebilir. G-M biyokömür %Kütle kaybı için regresyon analizi ile önerilen lineer model, kodlanmış bağımsız değişkenler cinsinden eşitlik (8.7)'de verilmiştir.

$$\%\text{Kütle kaybı} = +48{,}91+14{,}16*A+1{,}02*B-1{,}67*C+2{,}16*D \tag{8.7}$$

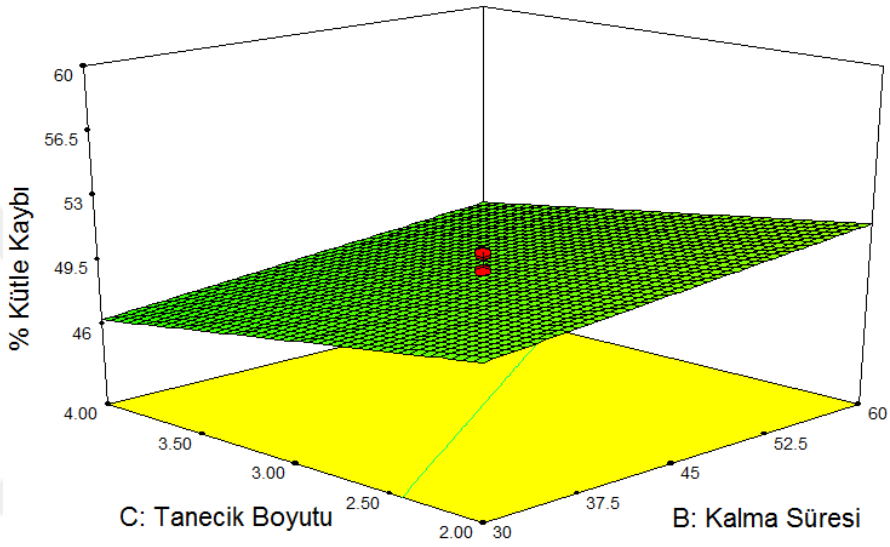
(A: Sıcaklık, B: Kalma Süresi, C: Tanecik Boyutu, D: % Mısır Katkı Maddesi Oranı),

Üretilen biyokömür %Kütle kaybı sonuçları için önerilen lineer modeldeki değişkenlerin katsayıları incelendiğinde biyokömür %Kütle kaybı verilerinin, proses sıcaklığı ve eklenen organik katkı maddesi oranındaki artış ile doğru orantılı olarak artacağı görülmüştür. Ayrıca biyokütle tanecik boyutundaki küçülmeninde analiz sonuçlarını artıracağı sonucuna varılmıştr. G-M biyokömür numuneleri %Kütle kaybı yüzey yanıt grafikleri Şekil 8.32-8.34'de verilmiştir.



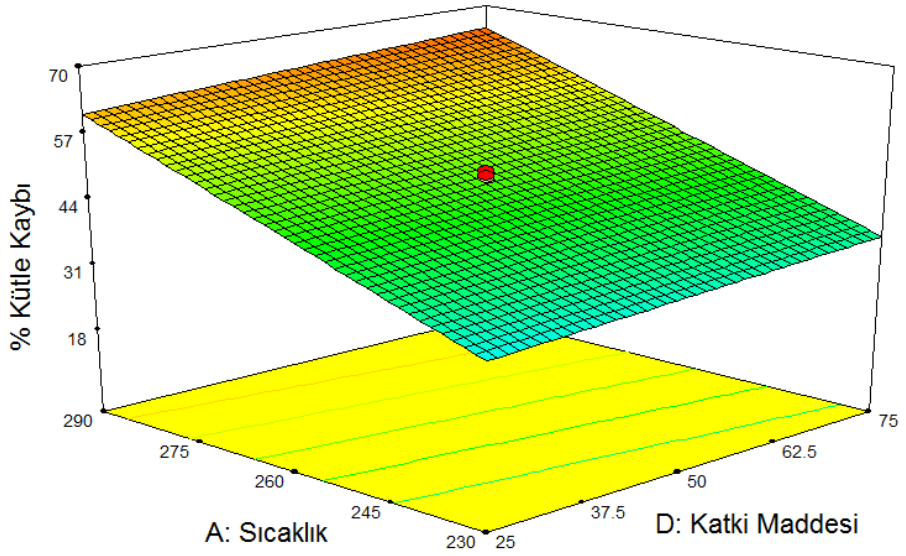
Şekil 8.32 G-M biyokömür numuneleri için sıcaklık ve kalma süresi parametrelerinin %kütle kaybı üzerine etkisi

Torrefaksiyon prosesi ile üretilen G-M biyokömür numunelrinin analiz sonuçlarına bakıldığında %Kütle kaybı değerlerinin %18,49 ile %69,79 arasında değiştiği görülmüştür. En düşük %Kütle kaybına 200°C, 45 dakika, 3 mm tanecik boyutu ve %50 mısır katkı maddesi oranı koşullarında, en yüksek %Kütle kaybı değerine ise 320°C, 45 dakika ve 3 mm tanecik boyutu ve %50 mısır katkı maddesi oranı proses koşullarında ulaşıldığı belirlenmiştir. Verilen bu analiz sonuçlarıda, ANOVA sonuçlarını destekleyerek, proses sıcaklığının en etkili parameter olduğunu ve %Kütle kaybı üzerinde pozitif bir etkiye sahip olduğunu desteklemiştir.



Şekil 8.33 G-M biyokömür numuneleri için kalma süresi ve tanecik boyutu parametrelerinin %kütle kaybı üzerine etkisi

Anova sonuçlarına göre %Kütle kaybı üzerinde etkili olduğu belirlenen bir başka parametrede organik katkı maddesi oranıdır. Bu parametrenin etkisini gözleyebilmek için 23. ve 20.deneyler incelenmiştir. Proses sıcaklığı, proses süresi ve biyokütle tanecik boyutu sabit tutularak %katkı maddesi oranı artırıldığında %Kütle kaybının da %38,84'den %49,04 değerine yükseldiği belirlenmiştir.



Şekil 8.34 G-M biyokömür numuneleri için sıcaklık ve katkı maddesi parametrelerinin %kütle kaybı üzerine etkisi

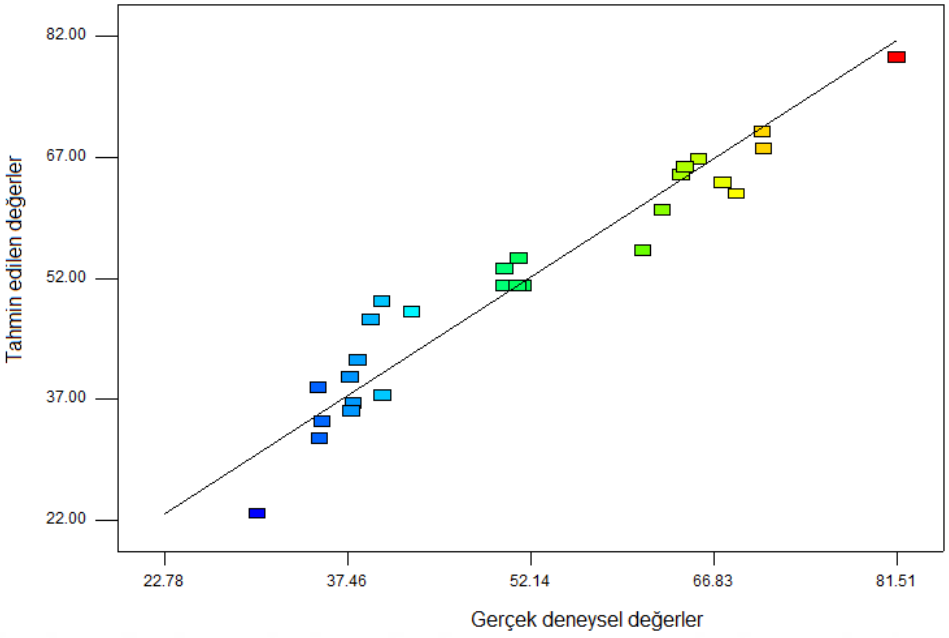
8.2.3.2 G-M Biyokömür Ürünlerinin %Kütle Verimi Sonuçları

Geven- Mısır karışımına uygulanan torrefaksiyon prosesi sonuçları Design Expert programı ve ANOVA analizi sonuçları incelenerek %Kütle verimi için regresyon katsayıları ve model uyumluluğu değerlendirilmiştir. 3. Set torrefikasyon sonuçları incelendiğinde, %Kütle verimi üzerine bağımsız değişkenlerin etkisinin lineer model ile açıklanabileceği sonucuna varılmıştır. Varyans analizi sonucu R^2 değerinin diğer modellere göre nispeten küçük olmasına rağmen, istenildiği gibi p değerinin 0,0001 değerinden küçük olması ve standart sapma ile küçük kalıntı hata karaler toplamı değerlerinin de küçük olması modelin seçimini desteklemiştir. Önerilen modele ait değerler Tablo 8.24'de verilmiştir.

Tablo 8.24 G-M biyokömür numuneleri %kütle verim analizi model istatiksel değerleri

	Std. Sapma	R^2	Düzeltilmiş R^2	Beklenen R^2	PRESS
Lineer	**4.00**	**0.9262**	**0.9144**	**0.8849**	**623.00**
2FI	4.52	0.9283	0.8906	0.8054	1053.81
Kuadratik	4.11	0.9532	0.9095	0.7321	1450.80
Kübik	2.32	0.9930	0.9711	0.0499	5144.48

Önerilen lineer model için beklenen regresyon katsayısı (0,8849) ile düzeltilmiş regresyon katsayısı (0,9144) arasındaki farkın %20'den az olması lineer modelin yeni deneysel verilerin tahminlenmesinde kullanılabileceğini göstermiştir. Ayrıca beklenen regresyon katsayısı R^2 değeri ile düzeltilmiş regresyon katsayısı R^2 değerlerinin birbirine yakın olması Şekil 8.35'de gösterildiği gibi, tahmin edilen analiz sonuçlarının deneysel veriler ile uyumluluk içinde olduğunu desteklemektedir.



Şekil 8.35 G-M biyokömür numuneleri %kütle verimi deneysel veriler ile tahmin edilen verilerin karşlaştırılması

Önerilen lineer model için R^2 değerinin 0,9262 olması, torrefikasyon proses verilerindeki değişkenliğin %92,62 oranında bu model ile açıklanabileceğini göstermektedir. Analiz sonuçlarına göre "yeterli tahminleme" değerinin 34,69 bulunması da %Kütle verimi sonuçlarının lineer model ile açıklanabilir kılmıştır.

%Kütle verimi için Anova analiz sonuçları Tablo 8.25'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde lineer model için p değeri <0,0001 şeklinde bulunmuştur. Modele ait p değerinin küçük olması, bağımsz değişkenlerden en az bir tanesinin %Kütle verimi üzerinde lineer olarak etkili olduğunu göstermiştir.

Tablo 8.25 G-M %kütle verimi ANOVA sonuçları

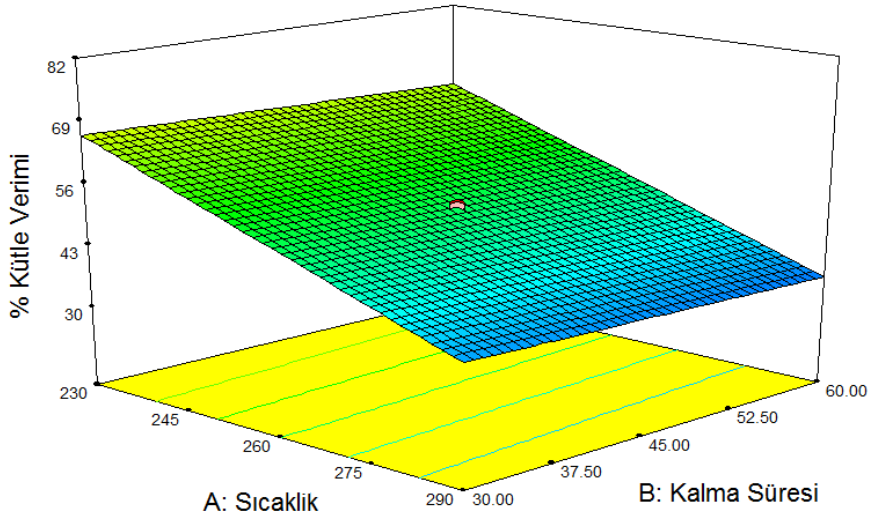
Cevap 2	%Kütle Verimi				
	Lineer Modele ait ANOVA Sonuçları				
	Kareler Toplamı	df	Kare Ortalaması	F Değeri	p-değeri Prob>F
Model	5014.78	4	1253.70	78.40	< 0.0001
A-Sıcaklık	4811.04	1	4811.04	300.85	< 0.0001
B-Kalma Süresi	24.73	1	24.73	1.55	0.2252
C-Tanecik Boyutu	66.83	1	66.83	4.18	0.0516
D-% M	112.18	1	112.18	7.01	0.0138
Kalıntı	399.79	25	15.99		
Uyum Eksikliği	397.69	20	19.88	47.41	0.0002
Yeterli Tahminleme	34,690				

%Kütle verimi Anova sonuçları incelendiğinde p değeri 0,05'den küçük olduğu görülen torrefaksiyon proses sıcaklığının analiz sonuçlarında en etkili parametre olduğu, %Katkı maddesi oranınında sıcaklıktan sonra sonuçlar üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır. %Kütle verimi regresyon analiz sonucu elde edilen lineer model, kodlanmış bağımsız değişkenler cinsinden eşitlik (8.8)'de verilmiştir.

$$\%\text{Kütle verimi} = +51{,}09-14{,}16*A-1{,}02*B+1{,}67*C-2{,}16*D \quad (8.8)$$

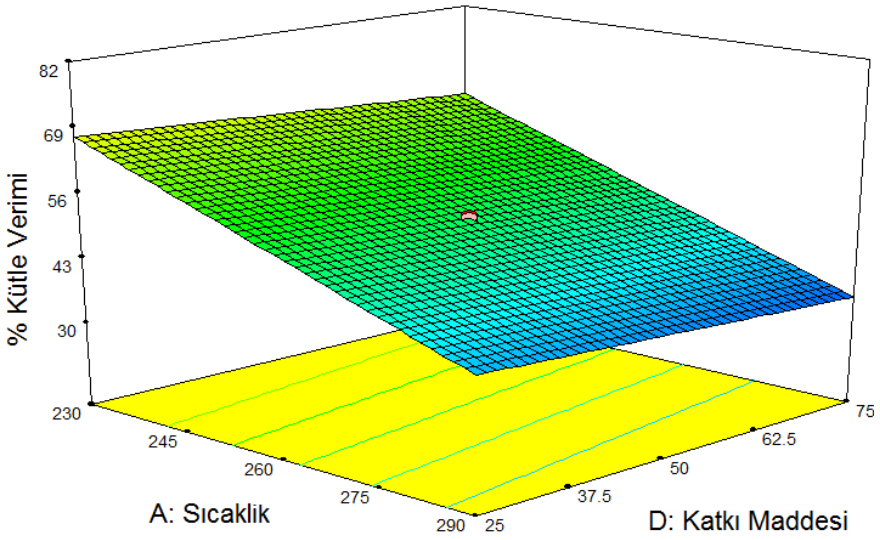
(A: Sıcaklık, B: Kalma Süresi, C: Tanecik Boyutu, D: %Mısır Katkı Maddesi Oranı)

Üretilen G-M biyokömür %Kütle verimi için verilen lineer modeldeki değişkenlerin katsayıları incelendiğinde proses sıcaklığındaki artışın %Kütle verimini azaltacağı görülmektedir. Aynı şekilde diğer etkili parametre olan organik katkı maddesi mısırında, karışıma eklenme oranındaki artışa göre kütle veriminde azalmaya yol açacağı belirlenmiştir. Elde edilen modele ait yanıt yüzeyi grafikleri Şekil 8.36-Şekil 8.38' de verilmiştir.



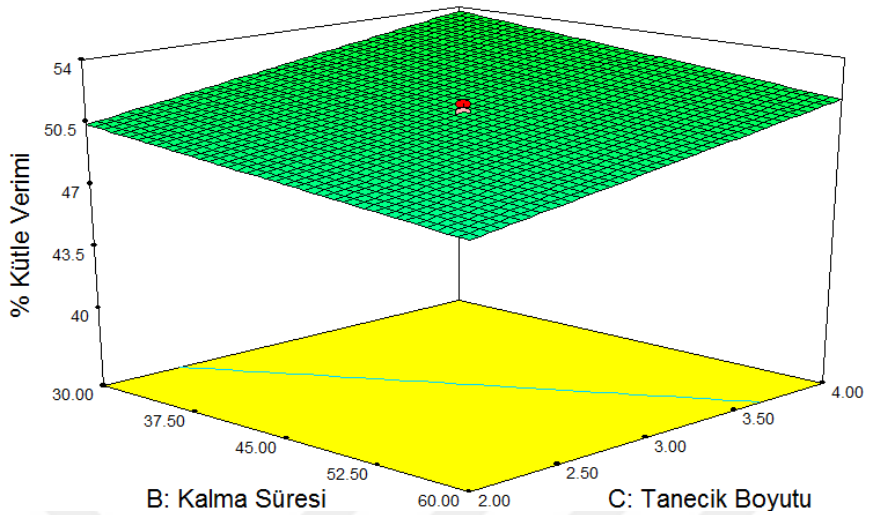
Şekil 8.36 G-M biyokömür numuneleri için sıcaklık ve kalma süresi parametrelerinin %kütle verimi üzerine etkisi

G-M biyokömür numunelerinin analiz sonuçlarına bakıldığında %Kütle verimi değerlerinin %30,21 ile %81,51 arasında değiştiği görülmüştür. En düşük %Kütle verimine 320°C, 45 dakika, 3 mm tanecik boyutu ve %50 mısır katkı maddesi oranı koşullarında, en yüksek %Kütle kaybı değerine ise 200°C, 45 dakika ve 3 mm tanecik boyutu ve %50 mısır katkı maddesi oranı proses koşullarında ulaşıldığı belirlenmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde, proses için verilen lineer modelinde desteklediği gibi proses sıcaklığındaki artış ile biyokömür %Kütle verimi sonuçlarında artış meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 8.37 G-M biyokömür numuneleri için sıcaklık ve katkı maddesi oranı parametrelerinin %kütle verimi üzerine etkisi

Torrefaksiyon prosesinde organik katkı maddesi oranınında %Kütle verimi sonuçları üzerinde etkili olan diğer bir parametre olduğu bulunmuştur.



Şekil 8.38 G-M biyokömür numuneleri için kalma süresi – biyokütle tanecik boyutu parametrelerinin %kütle verimi üzerine etkisi

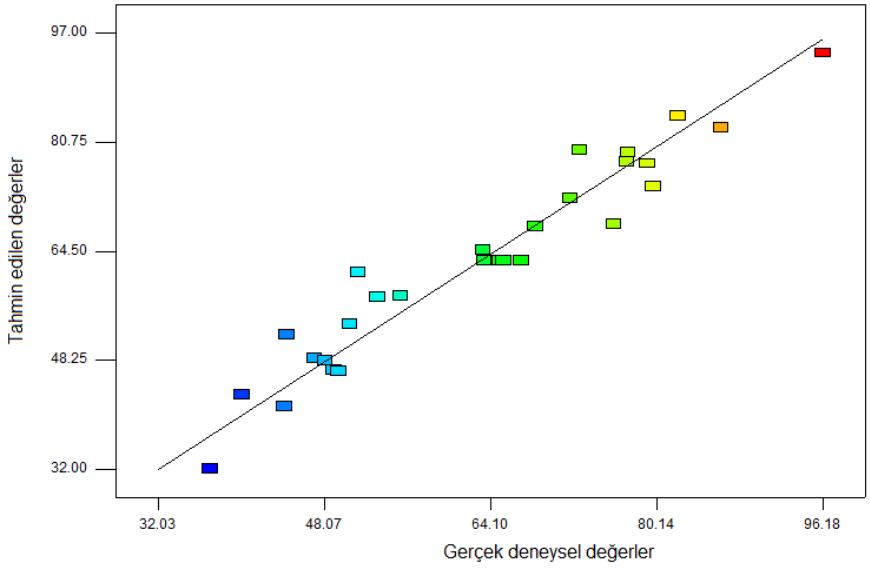
8.2.3.3 G-M Biyokömür Ürünlerin %Enerji Verimi Sonuçları

3. set kapsamında geven ve organik katkı maddesi mısır karışımına uygulanan torrefaksiyon prosesi sonucu %Enerji verimi sonuçları Design Expert programı ve ANOVA sonuçları incelenerek değerlendirilmiştir. Uygulanan cevap yüzey yöntemi ile %Enerji verimi analiz sonuçlarının optimizasyonu ve proses koşulları olan bağımsız değişkenlerin analiz sonuçları ve birbirleri ile ilişkisi belirlenmiştir. ANOVA sonuçlari incelendiğinde, bağımsız değişkenlerin, üretilen biyokütle %Enerji verimi üzerine etkisinin lineer model ile açıklanabileceği bulunmuştur. %Enerji verimi sonuçları için lineer modelin kabul edilmesinde, model p değerinin 0,0001 değerinden küçük olması değerlendirilmiştir. R^2 değerinin istenilen şekilde büyük olması, standart sapma ve kalıntı hata karaler toplamı olan PRESS değerlerinin küçük olması da lineer modelin seçilmesini desteklemiştir. %Enerji verimi için önerilen modellerin istatiksel verileri Tablo 8.26'da verilmiştir.

Tablo 8.26 G-M biyokömür numuneleri %enerji verim analizi model istatiksel değerleri

	Std. Sapma	R^2	Düzeltilmiş R^2	Beklenen R^2	PRESS
Lineer	**4.24**	**0.9315**	**0.9206**	**0.8955**	**686.92**
2FI	4.81	0.9331	0.8978	0.7820	1433.03
Kuadratik	4.55	0.9527	0.9086	0.7322	1760.04
Kübik	1.11	0.9987	0.9945	0.9612	255.15

Kabul lineer modelin regresyon katsayısının (R^2) 0,9315 olması, lineer modelin deneysel verileri %93,15 oranında açıklayabildiğini göstermiştir. Modele ait düzeltilmiş regresyon katsayısının 0,9206 olarak belirlenmeside Şekil 8.39'da verildiği gibi beklenen analiz sonuçları ile deneysel olarak elde edilen analiz sonuçları arasında yüksek bir uyumluluğun var olduğunu göstermiştir. Ayrıca %Enerji verimi için lineer modelin uygulanabilirliğinin kabul edimesinde beklenen regresyon katsayısı (0,8955) ile düzeltilmiş regresyon katsayısının (0,9206) birbirine yakın olmasının da önemi vardır. Ayrıca yeterli tahminleme değerinin bu model için 35,80 olarak bulunması ve istenen şekilde 4'de büyük olması, modelin %Enerji verimi için yeni verilerin tahminlenmesini yeterli kılacağı sonucuna varılmıştır.



Şekil 8.39 G-M biyokömür numuneleri %enerji verimi deneysel veriler ile tahmin edilen verilerin karşlaştırılması

G-M biyokömür ürünleri %Enerji verimi ANOVA sonuçları Tablo 8.27'de verilmiştir.

%Enerji verimi analiz sonuçları incelendiğinde, önerilen lineer model için p değerinin <0,0001 şeklinde hesaplandığı görülmüştür. Bu durum torrefaksiyon prosesini etkileyen bağımsız değişkenlerden en az bir tanesinin G-M biyokömür ürünü %Enerji verimi analizi için istatistiksel olarak önemli etkiye sahip olduğunu ve bağımsız değişkenlerin analiz sonuçlarını lineer olarak etkilediğini göstermiştir.

Tablo 8.27 G-M %enerji verimi ANOVA sonuçları

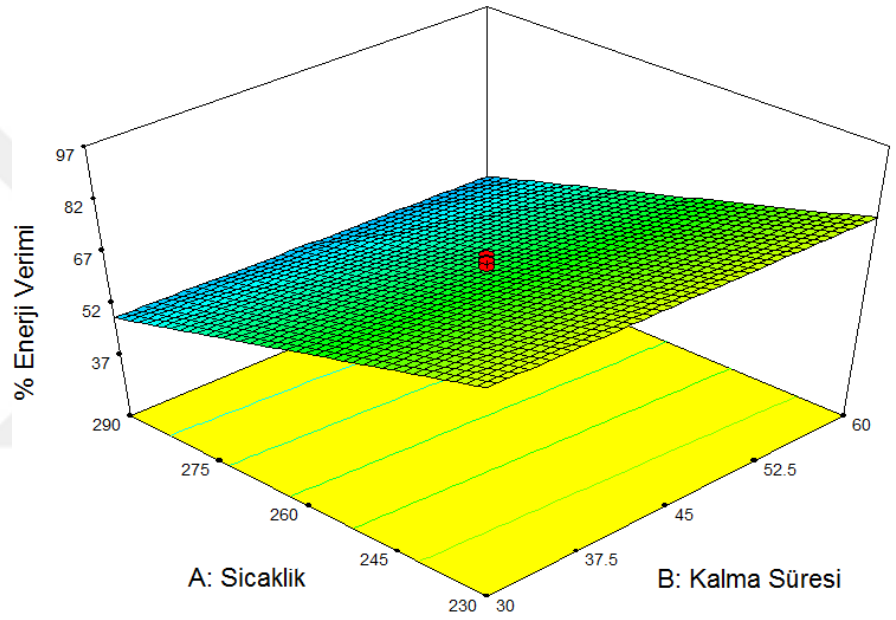
Cevap 3	%Enerji Verimi				
	Lineer Modele ait ANOVA Sonuçları				
	Kareler Toplamı	df	Kare Ortalaması	F Değeri	p-değeri Prob>F
Model	6122.20	4	1530.55	85.00	< 0.0001
A-Sıcaklık	5769.22	1	5769.22	320.41	< 0.0001
B-Kalma Süresi	17.23	1	17.23	0.96	0.3373
C-Tanecik Boyutu	159.36	1	159.36	8.85	0.0064
D-% M	176.39	1	176.39	9.80	0.0044
Kalıntı	450.15	25	18.01		
Uyum Eksikliği	443.16	20	22.16	15.85	0.0031
Yeterli Tahminleme	21,364				

Anova analiz sonuçlarına göre bağımsız değişkenlerin p değerleri incelendiğinde, torrefaksiyon sıcaklığı (A), biyokütle tanecik boyutu (C) ve eklenen organik katkı maddesi yüzdesi (D) parametrelerinin biyokömür %Enerji verimi üzerinde etkili değişkenler olduğu tespit edilmiştir. %Enerji verimi için regresyon analizi sonucunda elde edilen lineer model, kodlanmış bağımsız değişkenler cinsinden eşitlik (8.9)'da verilmiştir.

$$\%\text{Enerji verimi} = +63{,}04 - 15{,}50*A - 0{,}85*B + 2{,}58*C + 2{,}71*D \quad (8.9)$$

(A: Sıcaklık, B: Kalma Süresi, C: Tanecik Boyutu, D: % Mısır Katkı Maddesi Oranı)

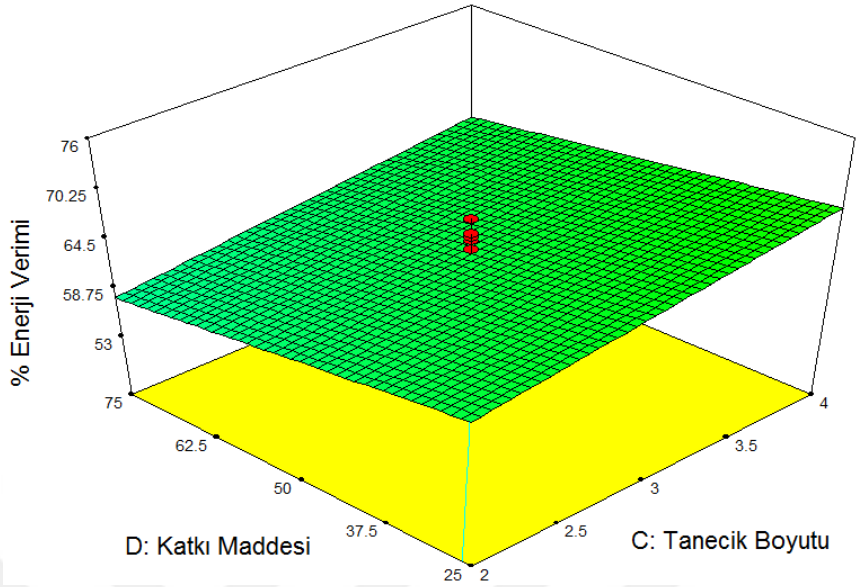
G-M biyokömür %Enerji verimi sonuçları için kabul edilen lineer modeldeki bağımsız değişkenlerin katsayıları incelendiğinde torrefaksiyon reaksiyon sıcaklığı'nın (A) sonuçlar üzerinde en etkili parametre olduğu gözlenmiştir. Ayrıca matematiksel modellemesi yapılan %Enerji verimi sonuçları için beklendiği gibi proses sıcaklığındaki artışın ürün enerji veriminde azalışa sebep olacağı fakat biyokütle tanecik boyutu ve katkı maddesi oranının ise enerji verimini artırıcı yönde etki edeceği belirlenmiştir. Lineer modele ait yanıt yüzeyi grafikleri Şekil 8.40- Şekil 8.42' de verilmiştir.



Şekil 8.40 G-M biyokömür numuneleri için sıcaklık ve kalma süresi parametrelerinin %enerji verimi üzerine etkisi

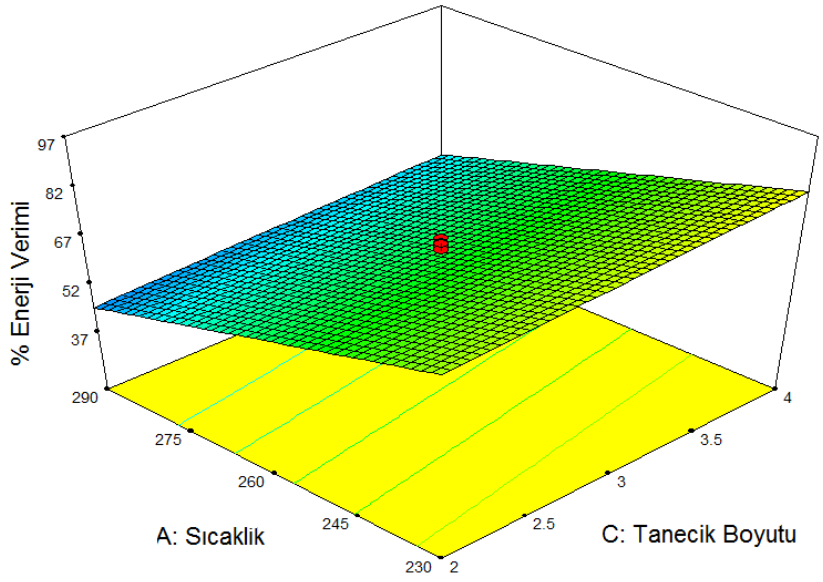
G-M biyokömür analiz sonuçlarına bakıldığında %Enerji verimi değerlerinin %37,01 ile %96,18 arasında değiştiği görülmüştür. En düşük %Enerji verimine 320°C, 45 dakika, 3 mm ve %50 Mısır katkı maddesi proses koşullarında ulaşıldığı, en yüksek %Enerji verimi değerine ise 200°C, 45 dakika, 3 mm ve %50 M koşullarında ulaşıldığı belirlenmiştir. Verilen bu analiz sonuçları da proses sıcaklığının en etkili parametre olduğunu ve artan proses sıcaklığı ile %Enerji veriminin azaldığını desteklemiştir. Çünkü torrefaksiyon prosesi ile biyokütle yapısında meydana gelen kütle transferinin enerji transferine göre daha fazla

olduğu ve enerji yoğunluğu artırılmış biyokömür ürünleri elde edilebildiği bilinmektedir.



Şekil 8.41 G-M biyokömür numuneleri için tanecik boyutu ve katkı maddesi parametrelerinin %enerji verimi üzerine etkisi

Analiz sonuçlarına göre torrefaksiyon prosesi %Enerji verimi sonuçlarının artan biyokütle tanecik boyutu ile arttığı görülmektedir. Bu artışın sebebinin tanecik boyutu küçüldükçe kütle transferinin ve dolayısı ile kütle kaybının azalması bundan dolayıda enerji veriminin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 8.42 G-M biyokömür numuneleri için tanecik boyutu ve sıcaklık parametrelerinin %enerji verimi üzerine etkisi

8.2.4 Sığır Kuyruğu–Mısır (4. Set) Torrefaksiyon Prosesi Sonuçları

Ham biyokütle kaynağı Sığır kuyruğu ve organik atık amaçlı mısır endüstriyel atığı 4. Set için torrefaksiyon prosesi ile inert azot atmosferinde ve düşük ısıtma hızında biyokömür üretimi için kullanılmıştır. 4. Set SK-M biyokömür numumelerinin üretimi için deney deseni, torrefaksiyon sıcaklığı, proses süresi, biyokütle tanecik boyutu ve organik katkı maddesi oranı olarak tanımlanan bağımsız değişkenler ile bu parametrelerin uygulandığı seviye aralıkları kullanılarak design expert programı- cevap yüzey yöntemi- merkezi kompozit tasarımı ile oluşturulmuştur. Üretilen SK-M biyokömür ürünlerinin analiz sonuçları için %Kütle kaybı, %Kütle verimi, %Enerji verimi, enerji yoğunluğu ve ısıl değer sonuçları program cevap çıktıları olarak bağımsız değişkenler üzerinden değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar yanıt yüzey yöntemi ile optimize edilerek, bağımlı değişkenlerin birbirleri ile ve bağımsız değişkenlerle ilişkisi tanımlanarak matematiksel modelleri oluşturulmuştur. SK-M biyokömür üretimi için oluşturulan deney tasarım deseni ve analiz sonuçları Tablo 8.28'de verilmiştir.

Tablo 8.28 Torrefaksiyon prosesi ile üretilen SK-M biyokömür analiz sonuçları

No	Sıcaklık (°C)	Kalma Süresi (dk)	Tanecik Boyutu (mm)	M % (ağ/ağ)	Kütle Kaybı (%)	Kütle Verimi (%)	Enerji Verimi (%)	Enerji Yoğunluğu	Isıl Değer (MJ/kg)
1	260	45	3	100	54,43	45,57	64,14	1,41	23,19
2	230	60	4	75	48,40	51,60	62,47	1,21	20,92
3	260	45	3	50	47,23	52,77	66,99	1,27	23,67
4	260	45	3	50	65,55	34,45	42,23	1,23	22,86
5	260	45	5	50	62,45	37,55	49,27	1,31	22,80
6	290	60	2	75	71,41	28,59	38,54	1,35	22,39
7	290	60	2	25	71,36	28,64	36,87	1,29	21,78
8	290	60	4	75	68,16	31,84	41,97	1,32	22,78
9	290	30	4	25	68,94	31,06	39,35	1,27	22,06
10	260	75	3	50	62,15	37,85	46,24	1,22	22,78
11	230	60	2	25	37,58	62,42	76,30	1,22	20,68
12	230	60	4	25	49,99	50,01	57,76	1,16	20,12
13	230	30	2	75	41,98	58,02	72,98	1,26	20,89
14	230	30	4	25	49,23	50,77	62,39	1,23	21,41
15	230	30	4	75	37,93	62,07	75,80	1,22	21,10
16	200	45	3	50	23,14	76,86	80,62	1,05	19,56
17	290	30	2	25	70,15	29,85	38,43	1,29	21,78
18	260	45	3	50	61,04	38,96	47,30	1,21	22,64
19	260	45	3	50	59,43	40,57	47,98	1,18	22,05
20	260	45	3	0	69,90	30,10	37,94	1,26	21,02
21	260	45	3	50	59,26	40,74	48,91	1,20	22,39
22	230	60	2	75	43,35	56,65	70,95	1,25	20,80
23	260	45	3	50	58,34	41,66	48,58	1,17	22,30
24	290	30	2	75	59,75	40,25	50,18	1,25	20,70
25	290	30	4	75	61,17	38,83	53,65	1,38	23,87
26	320	45	3	50	77,04	22,96	26,28	1,14	23,47
27	290	60	4	25	76,10	23,90	28,75	1,20	20,96
28	260	45	1	50	58,86	41,14	56,43	1,37	23,26
29	260	15	3	50	60,55	39,45	46,82	1,19	22,13
30	230	30	2	25	38,32	61,68	78,67	1,28	21,58

8.2.4.1 SK-M Biyokömür Ürünlerinin %Kütle Kaybı Sonuçları

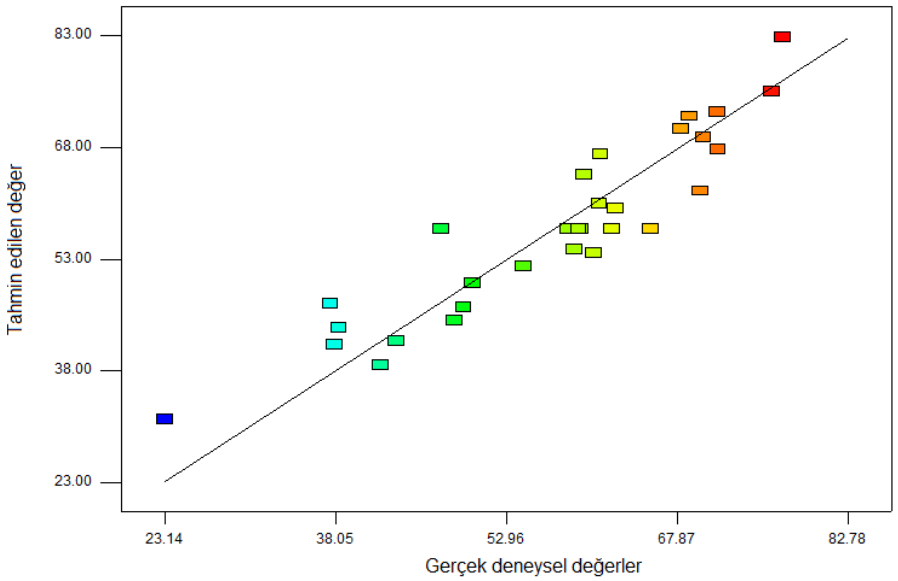
SK ve mısır organik katkı maddesi kullanılarak 4. Set için uygulanan torrefaksiyon prosesi sonucu üretilen biyokömür numuneleri için %Kütle kaybı analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucu elde edilen veriler cevap yüzey yöntemi kapsamında çözümlendirilerek, Anova sonuçları, regresyon katsayıları ve matematiksel modellemesi geliştirilmiştir.

SK-M biyokömür ürünleri %Kütle kaybı analiz sonuçları için 0,0001'den küçük p değerine sahip olan lineer modelin yanıtların tanımlanmasında kullanılabileceğine karar verilmiştir. Modele ait regresyon katsayısı 0,8576 olarak bulunmuştur. Beklenen regresyon katsayısı (0,7980) ile düzeltilmiş regresyon katsayısının (0,8348) birbirine yakın olması, tanımlanan lineer modelin yeni değerlerin tahminlenmesinde kullanılabileceğini göstermiştir. Ayrıca tanımlanan lineer modelin küçük PRESS değerine sahip olmasıda seçimi desteklemiştir. Önerilen model için istatiksel değerler Tablo 8.29'da verilmiştir

Tablo 8.29 SK-M biyokömür numuneleri %kütle kaybı analizi model istatiksel değerleri

	Std. Sapma	R^2	Düzeltilmiş R^2	Beklenen R^2	PRESS
Lineer	5.29	0.8576	0.8348	0.7980	993.48
2FI	5.31	0.8912	0.8339	0.7788	1087.98
Kuadratik	4.68	0.9331	0.8707	0.7827	1068.90
Kübik	5.94	0.9498	0.7920	-0.6880	8302.99

Önerilen lineer model için regresyon katsayısının (R^2) 0,8576 olması, deneysel verilerin bu model ile %85,76 oranında açıklanabileceğini göstermiştir. Deneysel veriler ile beklenen değerlerin birbirine yakın olduğu ise Şekil 8.43'de verildiği gibi düzeltilmiş regresyon katsayısının (0,8348) büyüklüğü ile açıklanabilmektedir. Modelin yeni verileri tahminlenmesinde kullanılabileceğine de, yeterli tahminleme değerinin 23,755 şeklinde 4'den büyük bir değer olması ile karar verimiştir.



Şekil 8.43 SK-M biyokömür numuneleri %kütle kaybı tahmin edilen değerler ile deneysel değerlerin karşılaştırılması

SK-M biyokömür %Kütle kaybı sonuçlarını tanımlamak için kabul edilen lineer modelin varyans analiz sonuçları Tablo 8.30'da verilmiştir.

Tablo 8.30 SK-M %kütle kaybı ANOVA sonuçları

Cevap 1	%Kütle Kaybı				
	Lineer Modele ait ANOVA Sonuçları				
	Kareler Toplamı	df	Kare Ortalaması	F Değeri	p-değeri Prob>F
Model	4218.25	4	1054.56	37.63	< 0.0001
A-Sıcaklık	3953.88	1	3953.88	141.08	< 0.0001
B-Kalma Süresi	66.27	1	66.27	2.36	0.1367
C-Tanecik Boyutu	45.90	1	45.90	1.64	0.2124
D-% M	152.20	1	152.20	5.43	0.0282
Kalıntı	700.65	25	28.03		
Uyum Eksikliği	509.42	20	25.47	0.67	0.7662
Yeterli Tahminleme	23,755				

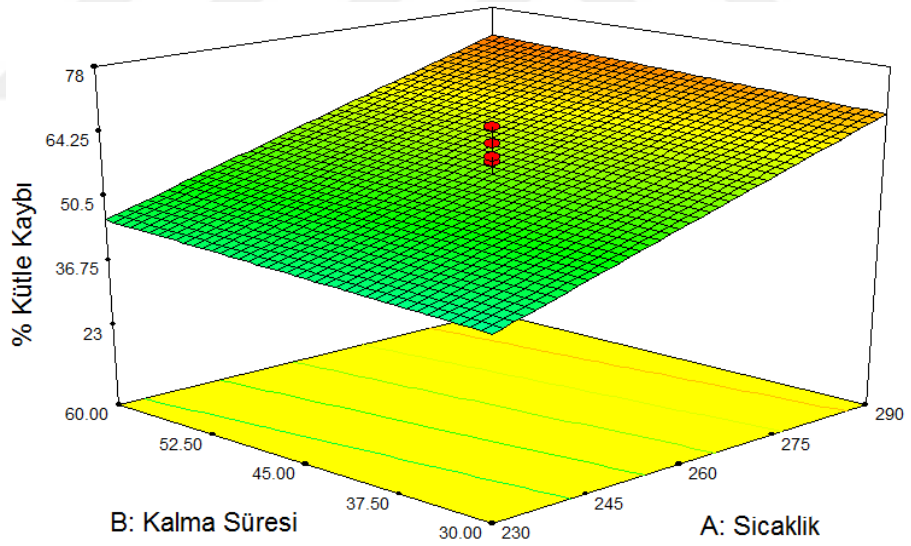
Sonuçları incelendiğinde modele ait p deperinin 0,0001'den küçük olması, torrefaksiyon prosesi için tanımlanan bağımsız değişkenlerden en az birinin analiz sonuçlarını lineer olarak etkilediğini göstermiştir.

SK-M biyokömür %Kütle kaybı varyans analizi incelendiğinde, lineer model için belirlenen p değerlerine göre ($p<0,05$) sıcaklık (A) ve katkı maddesi oranı (D) bağımsız değişkenlerinin torrefaksiyon prosesi üzerinde etkili parametreler olduğu bulunmuştur. Ayrıca p değeri daha küçük olmasından dolayı analiz sonuçlarında proses sıcaklığının daha etkili olduğu görülmüştür. %Kütle kaybı regresyon analizi sonucu elde edilen lineer model, kodlanmış bağımsız değişkenler cinsinden eşitlik (8.10)'de verilmiştir.

$$\%\text{Kütle kaybı} = +57,11+12,84*A+1,66*B+1,38*C-2,52*D \qquad (8.10)$$

(A: Sıcaklık, B: Kalma Süresi, C: Tanecik Boyutu, D: %Mısır Katkı Maddesi Oranı)

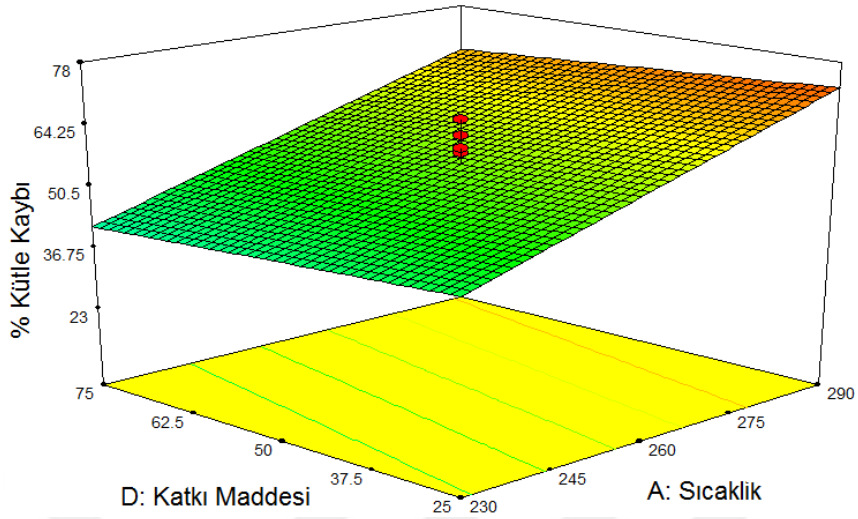
SK-M biyokömür için belirlenen lineer modele ait yanıt yüzeyi grafikleri sırası ile Şekil 8.44- 8.46' da verilmiştir.



Şekil 8.44 SK-M biyokömür numuneleri için sıcaklık ve kalma süresi parametrelerinin %kütle kaybı üzerine etkisi

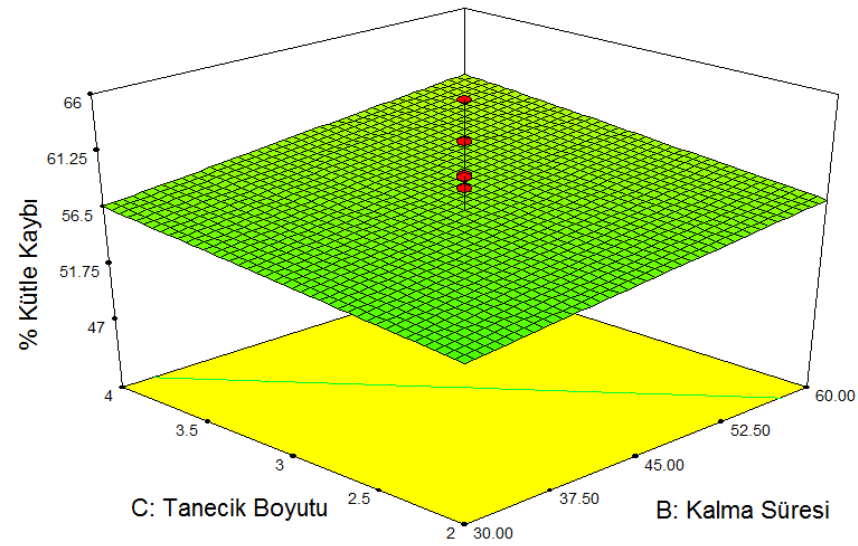
SK-M biyokömür analiz sonuçlarına bakıldığında %Kütle kaybı değerlerinin %23,14 ile %77,04 arasında değiştiği görülmüştür. En düşük %Kütle kaybı 200°C, 45 dakika, 3 mm ve %50 Mısır katkı maddesi proses koşullarında ulaşıldığı, en

yüksek %Kütle kaybı değerine ise 320°C, 45 dakika, 3 mm ve %50 Mısır katkı maddesi koşullarında ulaşıldığı belirlenmiştir.



Şekil 8.45 SK-M biyokömür numuneleri için sıcaklık ve katkı maddesi oranı parametrelerinin %kütle kaybı üzerine etkisi

Verilen bu analiz sonuçları da proses sıcaklığının en etkili parametre olduğunu ve artan proses sıcaklığı ile %Kütle kaybı sonuçlarının da arttığını desteklemiştir. Çünkü torrefaksiyon prosesindeki sıcaklık artışı ile biyokütlenin yapısındaki bağlı nem ve küçük molekül ağırlıklı uçucu maddeler uzaklaştırılmaktadır. Ayrıca bu moleküllerle birlikte büyük oranda hemiselüloz molekülünün, daha az oranda da selüloz ve lignin moleküllerinin parçalanması kütle kaybına yol açmaktadır.



Şekil 8.46 SK-M biyokömür numuneleri için kalma süresi ve tanecik boyutu parametrelerinin %kütle kaybı üzerine etkisi

8.2.4.2 SK-M Biyokömür Ürünlerinin %Kütle Verimi Sonuçları

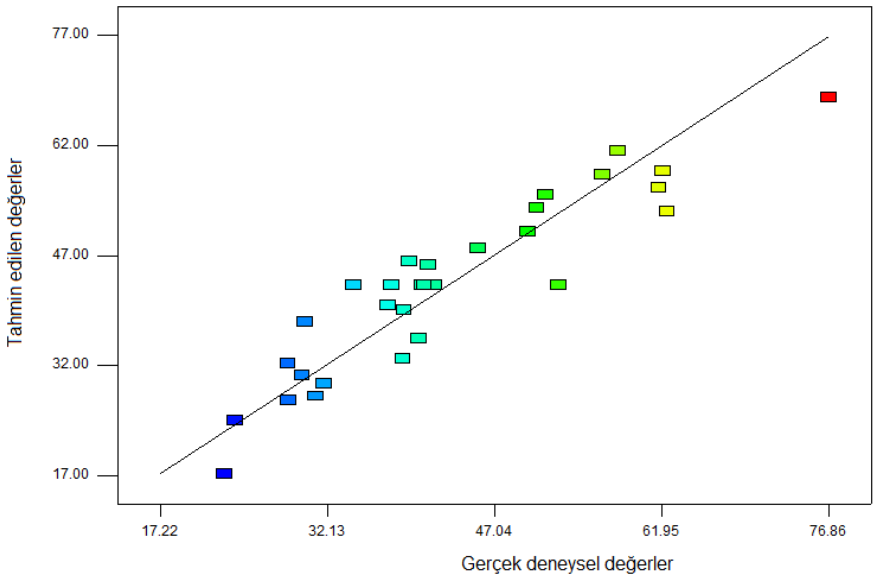
Sığır kuyruğu ve mısır için gerçekleştirilen torrefaksiyon prosesi ile üretilen biyokömür numunelerinin %Kütle verimi ANOVA sonuçları incelenerek, varyans analizi yapılmış, regrasyon katsayıları, model uyumlulukları değerlendirilmiş ve analiz sonuçları için matematiksel model belirlenmiştir.

Bağımsız değişkenlerin torrefaksiyon prosesi üzerine etkileri incelendiğinde, üretilen SK-M biyokömür ürünleri için %Kütle verimi sonuçlarının lineer model ile açıklanabileceği saptanmıştır. Analiz sonuçları için lineer modelin kabul edilmesinde, diğer modellere göre p değerinin küçük olması göz önüne alınmıştır. Ayrıca büyük R^2 ve standart sapma değerine sahip olması ile birlikte küçük kalıntı hata karaler toplamı PRESS değerine sahip olmasıda modelin seçimini desteklemiştir. Önerilen modellere ait istatiksel değerler Tablo 8.31'de verilmiştir.

Tablo 8.31 SK-M biyokömür numuneleri %kütle verimi analizi için önerilen model istatiksel değerleri

	Std. Sapma	R^2	Düzeltilmiş R^2	Beklenen R^2	PRESS
Lineer	**5,29**	**0,8576**	**0,8348**	**0,7980**	**993,48**
2FI	5,31	0,8912	0,8339	0,7788	1087,98
Kuadratik	4,68	0,9331	0,8707	0,7827	1068,90
Kübik	5,94	0,9498	0,7920	-0,6880	8302,99

Üretilen SK-M biyokömür numuneleri % Kütle verimi sonuçları için önerilen lineer modelin regresyon katsayısının (R^2) 0,8576 olduğu bulunmuştur. Bu değer %Kütle verimi için lineer modelin deneysel verileri %85,76 oranında açıklayabildiğini göstermiştir. Düzeltilmiş regresyon katsayısının 0,8348 bulunması da Şekil 8.47'de görüldüğü gibi %Kütle verimi için beklenen değerlerin deneysel değerler ile uyumluluk gösterdiğini kanıtlamıştır.



Şekil 8.47 SK-M biyokömür numuneleri %Kütle verimi tahmin edilen değerler ile deneysel değerlerin karşılaştırılması

%Kütle verimi analiz sonuçları için önerilen lineer modelin uygulanabilirliğinin kabul edimesinde, beklenen regresyon katsayısı (0.7980) ile düzeltilmiş regresyon katsayısının (0,8348) birbirine yakın olmasının da önemi vardır. Yeterli tahminleme değerinin bu model için 23,755 olarak bulunması ve istenen doğrultuda 4'den büyük olması, lineer modelin yeni verilerin tahminlenmesinde de yeterli olacağı sonucuna varılmıştır.

SK-M biyokömür ürünleri için %Kütle verimi varyans analizi Tablo 8.32'de verilmiştir. ANOVA sonuçları incelendiğinde, %Kütle verimi cevap yüzeyi için lineer model p değeri<0,0001olduğu görülmüştür. Bu durum bağımsız değişkenlerden en az birinin sonuç üzerinde etkisinin bulunduğunu ve %Kütle verimi sonucunu lineer olarak etliledığini göstermiştir.

%Kütle verrimi Anova sonuçlarına göre proses koşulları olarak belirlenen bağımsız değişkenlerin p değerleri incelendiğinde, sıcaklık (A) ve katkı maddesi (D) parametreleri p değeri <0,05 olarak bulunmuştur. Bu durum sıcaklık ve katkı maddesi parametrelerinin uygulanan torrefaksiyon prosesi için etkili parametreler olduğunun göstermiştir.

Tablo 8.32 SK-M %Kütle verimi ANOVA sonuçları

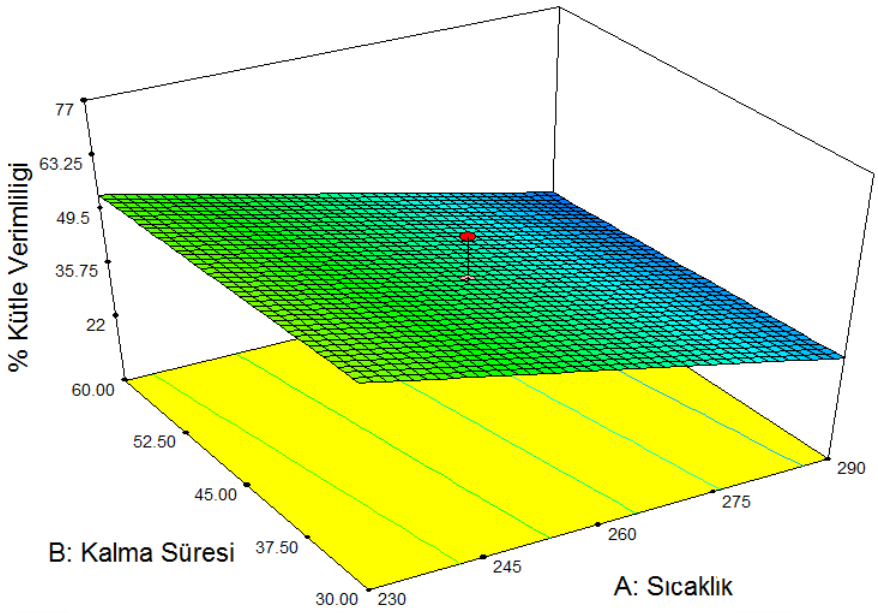
Cevap 2	%Kütle Verimi				
	Lineer Modele ait ANOVA Sonuçları				
	Kareler Toplamı	df	Kare Ortalaması	F Değeri	p-değeri Prob>F
Model	4218,25	4	1054,56	37,63	< 0,0001
A-Sıcaklık	3953,88	1	3953,88	141,08	< 0,0001
B-Kalma Süresi	66,27	1	66,27	2,36	0,1367
C-Tanecik Boyutu	45,90	1	45,90	1,64	0,2124
D-% M	152,20	1	152,20	5,43	0,0282
Kalıntı	700,65	25	28,03		
Uyum Eksikliği	509,42	20	25,47	0,67	0,7662
Yeterli Tahminleme	23,755				

SK-M biyokömür %Kütle verimi için regresyon analizi ile önerilen lineer model, kodlanmış bağımsız değişkenler cinsinden eşitlik (8.11)'de verilmiştir.

$$\%\text{Kütle verimi} = +42,89-12,84*A-1,66*B-1,38*C+2,52*D \quad (8.11)$$

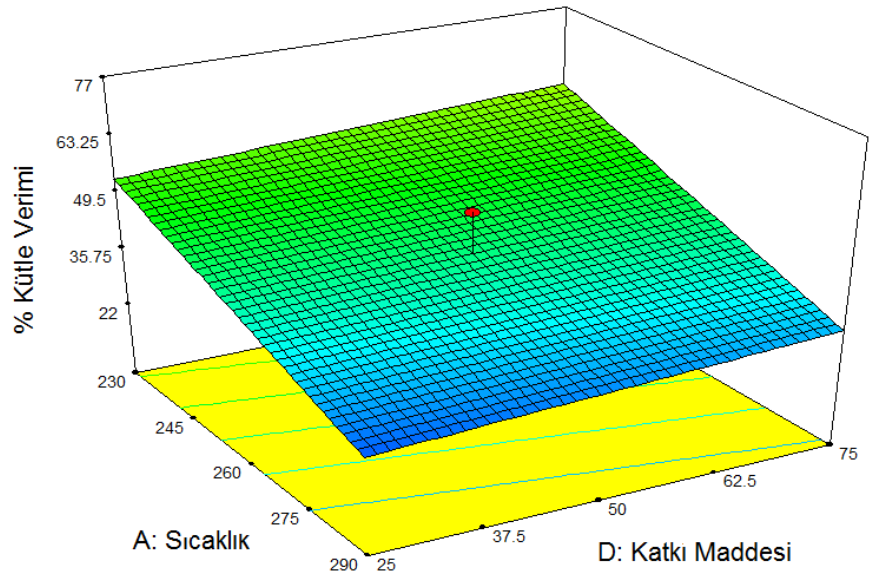
(A: Sıcaklık, B: Kalma Süresi, C: Tanecik Boyutu, D: % Mısır Katkı Maddesi Oranı)

Üretilen biyokömür %Kütle verimi sonuçları için önerilen lineer modeldeki değişkenlerin katsayıları incelendiğinde torrefaksiyon reaksiyon sıcaklığı'nın (A) sonuçlar üzerinde en etkili parametre olduğu ve sonuçları azaltıcı yönde etkilediği belirlenmiştir. Organik katkı maddesi olarak kullanılan mısırın ise sonuçlar üzerinde pozitif etkiye sahip olduğu görülmüştür. SK-M biyokömür numuneleri %Kütle verimi yüzey yanıt grafikleri Şekil 8.48-8.50'de verilmiştir.



Şekil 8.48 SK-M biyokömür numuneleri için sıcaklık ve kalma süresi parametrelerinin %kütle verimi üzerine etkisi

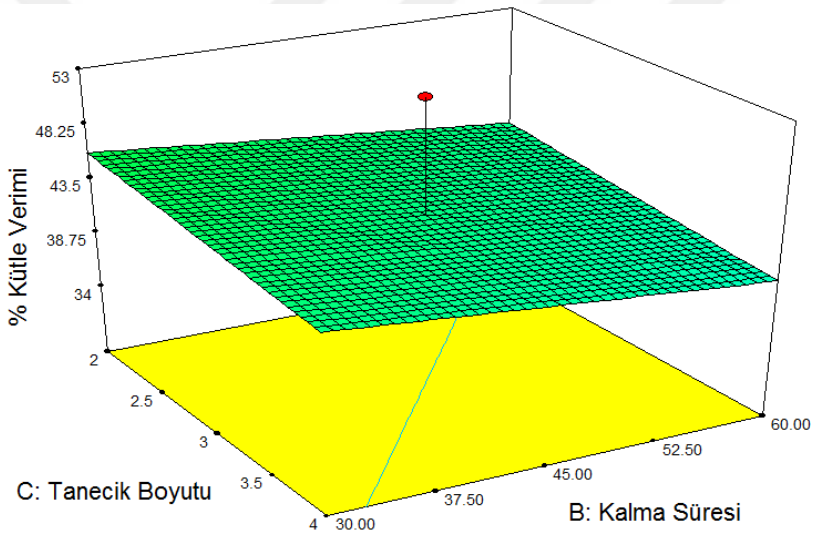
Analiz sonuçları incelendiğinde, torrefaksiyon prosesi ile üretilen SK-M biyokömür numunelerinin %Kütle verimi analiz sonuçlarının %22,96 ile %76,86 arasında değiştiği bulunmuştur. SK-M biyokömür numuneleri için en düşük kütle verimi; 320°C proses sıcaklığı, 45 dakika proses süresi ve 3 mm biyokütle tanecik boyutunda gözlenirken, en yüksek kütle verimi ise 200°C proses sıcaklığı, 45 dakika proses süresi ve 3 mm biyokütle tanecik boyutunda gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 8.49 SK-M biyokömür numuneleri için sıcaklık ve katkı maddesi oranı parametrelerinin %kütle verimi üzerine etkisi

Bu veriler, yüksek torrefaksiyon sıcaklığında biyokütle yapısındaki uçucu maddelerin uzaklaştırılması ve makromoleküler yapısındaki bozunmadan dolayı kütle kaybındaki artış ile kütle veriminin azaldığını desteklemektedir.

Proses koşullarını gösteren bağımsız değişkenlerin ürün kütle verimi üzerindeki etkisi grafikler üzerinden incelendiğinde, torrefaksiyon sıcaklığının etkisi kadar belirgin olmamakla beraber, reaksiyon kalma süresinin ve biyokütle tanecik boyutunun biyokömür kütle verimi üzerinde azaltıcı etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Bu bağımsız değişkenlerin yanı sıra, daha sonra uygulanacak peletleme çalışmalarında doğal bağlayıcı amacı ile kullanılması düşünülen organik katkı maddesinin ise biyokömür kütle verimi üzerinde pozitif bir etkisinin bulunduğu belirlenmiştir.



Şekil 8.50 SK-M biyokömür numuneleri için kalma süresive tanecik boyutu parametrelerinin %kütle verimi üzerine etkisi

8.2.4.3 SK-M Biyokömür Ürünlerinin %Enerji Verimi Sonuçları

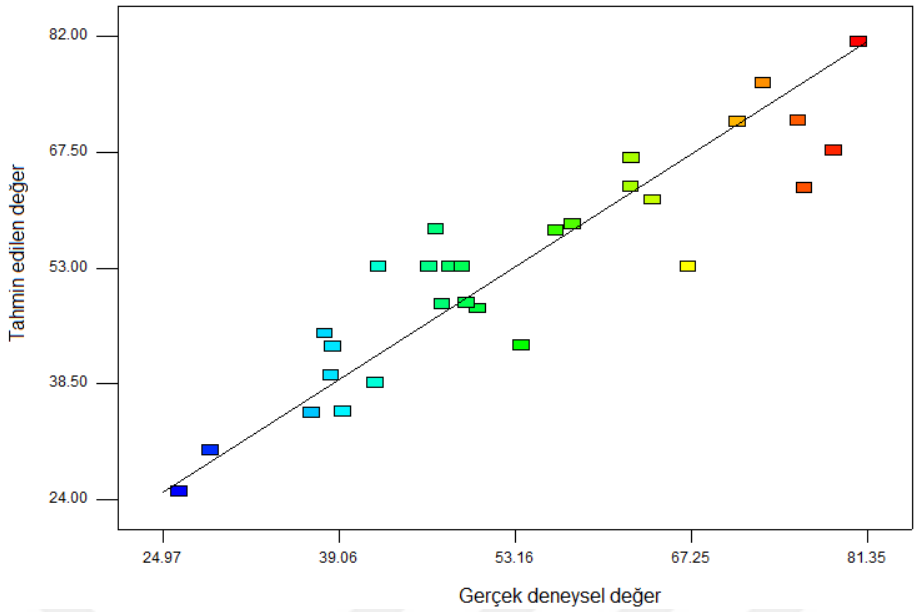
Sığır kuyruğu ve mısır organik katkı maddesi karışımına uygulanan torrefaksiyon prosesi sonucu %Enerji verimi sonuçları Design Expert programı ve ANOVA analizi incelenerek değerlendirilmiştir. Cevap yüzey yöntemi uygulanarak, analiz sonuçlarının optimizasyonu yapılmış ve bağımsız değişkenlerin %Enerji verimi ve birbirleri ile ilişkisi belirlenmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde bağımsız değişkenlerin, üretilen biyokütle %Enerji verimi üzerine etkisinin lineer model ile açıklanabileceği görülmüştür. Lineer modelin önerilmesine p değerinin 0,0001

değerinden küçük olması göz önüne alınarak karar verilmiştir. R^2 değerinin büyük olması, standart sapma ve kalıntı hata karaler toplamı olan PRESS değerlerinin küçük olması da lineer modelin seçilmesini desteklemiştir. %Enerji verimi için önerilen modellerin istatiksel verileri Tablo 8.33'de verilmiştir.

Tablo 8.33 SK-M biyokömür numuneleri %enerji verim analizi model istatiksel değerleri

	Std. Sapma	R^2	Düzeltilmiş R^2	Beklenen R^2	PRESS
Lineer	**6,70**	**0,8292**	**0,8018**	**0,7649**	**1545,08**
2FI	6,35	0,8834	0,8220	0,7529	1624,13
Kuadratik	6,58	0,9012	0,8090	0,6745	2139,13
Kübik	8,33	0,9261	0,6940	-1,6033	17108,10

Verilen model için R^2 değerleri karşılaştırıldığında lineer modele ait R^2 değeri 0,8292 olarak bulunmuştur. Lineer model için düzeltilmiş R^2 değerinin 0,8018, beklenen R^2 değerinin ise 0,7649 olduğu belirlenmiştir. Lineer modele ait R^2 değeri diğer modellerin değerleri ile karşılaştırıldığında biraz daha düşük olmasına rağmen, beklenen regresyon katsayısı değeri ile düzeltilmiş regresyon katsayısı değerleri arasındaki fark diğer modellere göre daha az olduğu için %Enerji verim, sonuçları için lineer modelin daha uygun olacağı düşünülmüştür. Ayrıca bu iki R^2 değerinin birbirine yakınlığı, birbirleri ile uyumlu olduklarını da desteklemiştir. Deneysel veriler ile tahmin edilen verilerin uyumluluğu Şekil 8.51'de görülmektedir. Aynı zamanda %Enerji verimi sonuçları için parametrelerdeki değişkenliğin %82,92 oranında önerilen lineer model ile açıklanabileceği düşünülmektedir. Lineer model için 20,609 olarak hesaplanan "yeterli tahminleme" değerinin de 4'ten büyük olması da %Enerji verimi sonuçlarının bu model ile açıklanabileceğini desteklemektedir.



Şekil 8.51 SK-M biyokömür numuneleri %enerji verimi deneysel veriler ile tahmin edilen verilerin karşlaştırılması

%Enerji verimi Tablo 8.34 ANOVA analiz sonuçlarında görüldüğü gibi lineer model için p değeri <0,0001 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 8.34 SK-M %enerji verimi ANOVA sonuçları

Cevap 3	%Enerji Verimi				
	Lineer Modele ait ANOVA Sonuçları				
	Kareler Toplamı	df	Kare Ortalaması	F Değeri	p-değeri Prob>F
Model	5449,02	4	1362,26	30,34	< 0,0001
A-Sıcaklık	4767,75	1	4767,75	106,18	< 0,0001
B-Kalma Süresi	134,73	1	134,73	3,00	0,0956
C-Tanecik Boyutu	126,45	1	126,45	2,82	0,1058
D-% M	420,10	1	420,10	9,36	0,0052
Kalıntı	1122,59	25	44,90		
Uyum Eksikliği	752,34	20	37,62	0,51	0,8724
Yeterli Tahminleme	20,609				

Bu durum prosesi etkileyen bağımsız değişkenlerden en az bir tanesinin SK-M biyokömür ürünü %Enerji verimi üzerinde istatistiksel olarak önemli etkiye sahip olduğunu ve sonuçları lineer olarak etkilediğini göstermiştir.

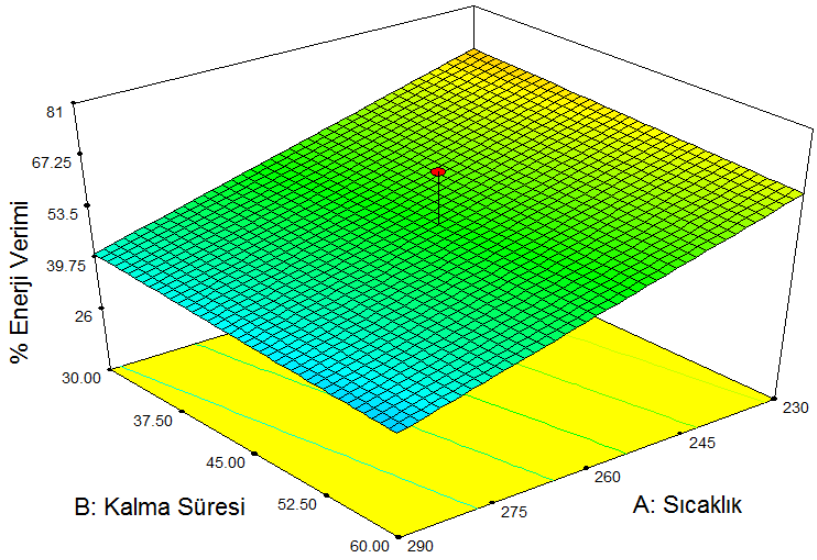
Anova analiz sonuçlarına göre bağımsız değişkenlerin p değerleri incelendiğinde, sıcaklık (A) ve katkı maddesi oranı (D) parametrelerinin p değeri <0,05 olarak bulunduğu için bu parametrelerin uygulanan torrefaksiyon prosesi %Enerji verimi sonuçları üzerinde büyük ölçüde etkili olduğu sonucuna varılmıştır. %Enerji verimi için regresyon analizi sonucunda elde edilen lineer model, kodlanmış bağımsız değişkenler cinsinden eşitlik (8.12)'de verilmiştir.

$$\%\text{Enerji verimi} = +53{,}16 - 14{,}09*A - 2{,}37*B - 2{,}30*C + 4{,}18*D \qquad (8.12)$$

(A: Sıcaklık, B: Kalma Süresi, C: Tanecik Boyutu, D: % Mısır Katkı Maddesi Oranı)

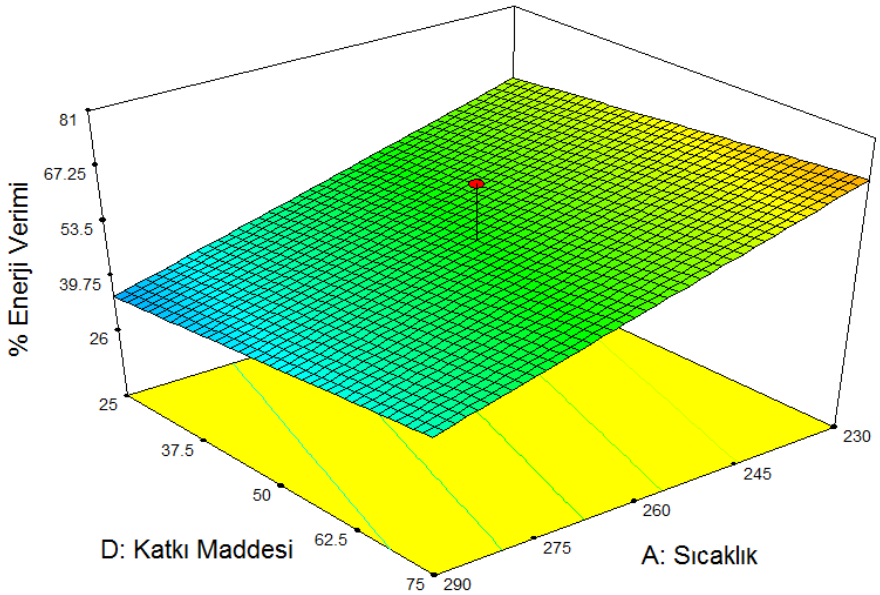
Biyokömürün %Enerji verimi sonuçları için önerilen lineer modeldeki değişkenlerin katsayıları incelendiğinde torrefaksiyon reaksiyon sıcaklığı'nın (A) sonuçlar üzerinde en etkili parametre olduğu aynı zamanda mısır katkı maddesi oranının da (D) %Enerji verimi sonuçları üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Önerilen lineer model incelendiğinde, biyokömür %Enerji verimi sonuçlarını sıcaklık, tanecik boyutu ve kalma süresi parametrelerinin artırıcı yönde, mısır katkı maddesi oranınn ise azaltıcı yönde etkilediği belirlenmiştir. Lineer modele ait yanıt yüzeyi grafikleri Şekil 8.52- Şekil 8.54' de verilmiştir.

SK-M biyokömür numuneleri analiz sonuçlarına bakıldığında %Enerji verimi değerlerinin %26,28 ile %80,62 arasında değiştiği görülmüştür. En düşük %Enerji verimine 320°C, 45 dakika ve 3 mm proses koşullarında ulaşıldığı, en yüksek %Enerji verimi değerine ise 200°C, 45 dakika ve 3mm koşullarında ulaşıldığı belirlenmiştir. Verilen bu analiz sonuçlarıda proses sıcaklığının en etkili parametre olduğunu ve artan proses sıcaklığı ile %Enerji veriminin azaldığını desteklemiştir.

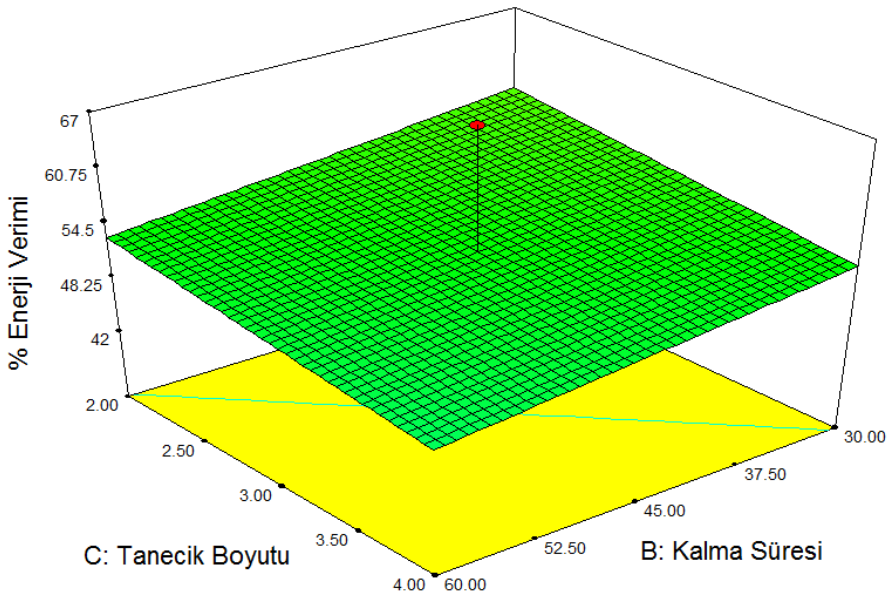


Şekil 8.52 SK-M biyokömür numuneleri için sıcaklık ve kalma süresi parametrelerinin %enerji verimi üzerine etkisi

SK-M biyokömür numuneleri için %Enerji verimi ve %Kütle verimi minimum ve maksimum değerleri karşılaştırıldığında, %Enerji verimlerinin daha fazla olduğu görülmektedir. Bu literatür bilgisi ile uyumlu olarak, torrefaksiyon prosesi ile biyokütlenin yapısından uçucu moleküllerin uzaklaşturılması sonucu kütle kaybının artmasına rağmen, C içeriğindeki artıştan dolayı ısıl değerin yükselmesi ile açıklanabilmektedir.



Şekil 8.53 SK-M biyokömür numuneleri için sıcaklık ve katkı maddesi oranı parametrelerinin %enerji verimi üzerine etkisi



Şekil 8.54 SK-M biyokömür numuneleri için kalma süresi ve tanecik boyutu parametrelerinin %enerji verimi üzerine etkisi

8.3 Torrefaksiyon Proses Parametrelerinin Biyokömür Ürünü Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Biyokütle kaynağıenerj olarak Geven veya sığır kuyruğu bitkileri kullanılarak dört ayrı set şeklinde gerçekleştirilen torrefaksiyon prosesleri üzerine, proses koşulları olan reaksiyon sıcaklığı, reaksiyon süresi, biyokütle tanecik boyutu ve eklenen katkı maddesi oranının etkileri üretilen biyokömür ürün verimlilikleri üzerinden değerlendirilmiştir.

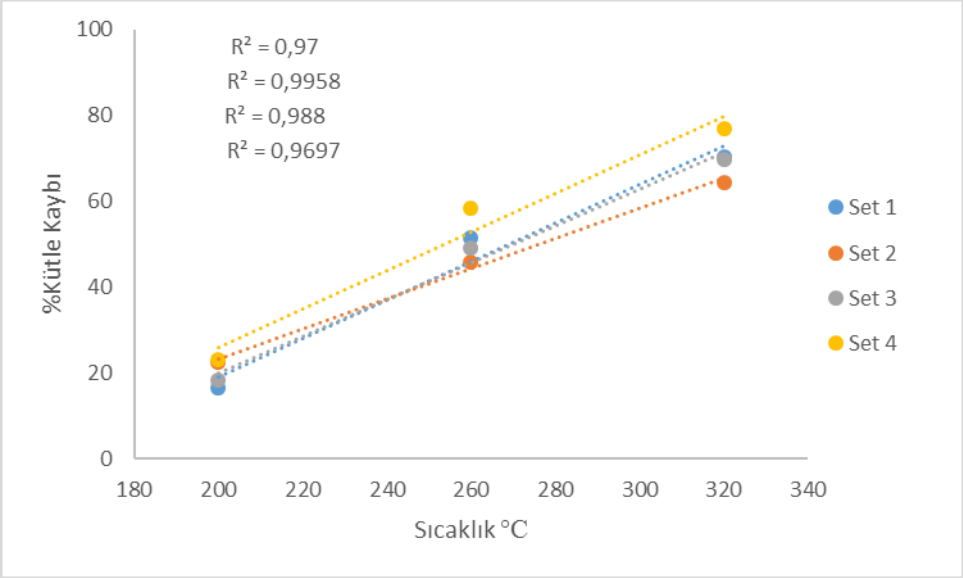
8.3.1 Torrefaksiyon Reaksiyon Sıcaklığının Biyokömür Ürünü Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Torrefaksiyon prosesi ile biyokütleden üretilen katı enerji taşıyıcı olarak kabul edilen biyokömürlerin ürün verimlilikleri design expert programı ile çözümlendirilerek incelendiğinde, en etkili proses koşulunun reaksiyon sıcaklık parametresi olduğu gözlenmiştir. Torrefaksiyon sıcaklığının üretilen biyokömürler üzerindeki etkisinin incelenebilmesi için farklı proses sıcaklıklarında ürünlere uygulanan kütle kaybı, kütle verimliliği, enerji verimliliği, enerji yoğunluğu ve ısıl değer analiz sonuçları Tablo 8.35'de değerlendirilmiştir.

Tablo 8.35 Torrefaksiyon sıcaklığının biyokömür ürün sonuçlarına etkisi

	Sıcaklık (°C)	Kütle Kaybı (%)	Kütle Verimi (%)	Enerji Verimi (%)	Enerji Yoğunluğu	Isıl Değer (MJ/kg)
SET 1	200	16,44	83,56	99,03	1,19	19,19
	260	51,59	48,41	65,02	1,34	22,45
	320	70,32	29,68	37,62	1,27	23,79
SET 2	200	22,46	77,54	78,85	1,02	19,52
	260	45,87	54,13	63,93	1,18	23,42
	320	64,55	35,45	39,71	1,12	24,79
SET 3	200	18,49	81,51	96,18	1,18	20,71
	260	49,04	50,95	64,53	1,27	22,98
	320	69,79	30,21	37,01	1,23	24,43
SET 4	200	23,14	76,86	80,62	1,05	19,56
	260	58,34	41,66	48,58	1,17	22,3
	320	77,04	22,96	26,28	1,14	23,47

Biyoyakıt ürün sonuçları incelendiğinde, proses sıcaklığındaki artışın biyokömür kütle kaybı ve enerji yoğunluğu üzerinde artırıcı bir etkiye sebep olurken, kütle verimliliği ve enerji verimliliği üzerinde ise azaltıcı etkiye sebep olduğu, biyokömür kalorifik değerini ise artırdığı belirlenmiştir. Biyokütle azot ortamında ısıtıldığında, yapıdan öncelikle nem uzaklaşmaktadır. Daha sonra ise biyokütlenin moleküler yapısında ayrışmaların başlaması ile uçucu maddeyi oluşturan bileşenler, artan torrefaksiyon sıcaklığı ile yapıdan ayrılarak gaz ve sıvı ürünleri oluştururlar. Dolayısı ile artan proses sıcaklığı, biyokütlenin yapısal bozunma hızını artırarak gaz ve sıvı ürünlerin dönüşüm hızını artırmış bu da oluşan katı ürün miktarında azalma gözlenmesine sebep olmuştur. Torrefaksiyon sıcaklığındaki artış ile biyokömürün yanı sıra sıvı ve gaz ürünlerin oluşumu Şekil 8.55'de verildiği gibi toplam kütle kaybını artırırken, katı ürün kütle verimini ise azaltmıştır.



Şekil 8.55 Torrefaksiyon reaksiyon sıcaklığının %kütle kaybı üzerine etkisi

Torrefaksiyon prosesi sırasında biyokömür kütle veriminde gözlenen bu azalış, biyokütle hücre duvarındaki depolimerizasyon ve nem kaybından dolayı oluşan termal etkilerden kaynaklanmaktadır. Çünkü bağlı nemin uzaklaşmasının yanı sıra lignoselülozik yapıdaki biyokütlenin depolimerizasyonu sonucu yapıdan CO_2, CO, asetik asit, yapıda bulunun aromatik karbon yapılar ve diğer oganik bileşiklerde uzaklaşırlar. Bu durum uçucu bileşenlerle birlikte gaz ürünlerin oluşmasını destekleyerek kütle veriminin azalmasına neden olmuştur [160-162].

Biyokütle polimerleri olarak bilinen hemiselüloz, selüloz ve lignin moleküllerinin bozunma derecesinin proses koşullarından büyük ölçüde etkilendiği bilinmektedir. 200°C proses sıcaklığında oluşan kütle kaybının büyük çoğunluğu nem kaybından oluşurken, 260-300°C sıcaklıklarda oluşan kütle kayıplarının ise çoğunlukla biyokütle yapısındaki hemiselülozun termal bozunmasına bağlayabiliriz. Çünkü 280°C üzerinde ekzotermik reaksiyon üzerinden gerçekleştiği bilinen torrefaksiyon prosesi boyunca, ısıl kararlılığı çok yüksek olmayan hemiselülozun yapısında bulunan oksijen termal bozunma ile yapıdan kısmen uzaklaşmaktadır. Biyokütlenin yapısında bulundurduğu bazı selüloz fraksiyonları da dehidrasyon, deoksijenasyon ve dehidrojenasyon reaksiyonları ile bozunurlar. Bu yüzden yapıda bulunan düşük enerji içerikli H-C ve O-C bağları azalırken, yüksek enerji içerikli C-C bağlarında ise artış meydana gelmiştir. Yapısındaki bu değişiklik, elde edilen

ürünün daha düzgün dağılımlı, daha reaktif olmasına ve enerji yoğunluğunun artmasına sebep olmuştur. Ayrıca yüksek torrefaksiyon sıcaklığında biyokütle yapısındaki üç ana polimerden biri olan lignin polimeri de hafif bir şekilde depolimerizasyona uğramıştır. Yüksek sıcaklıkta torrefaksiyon proses ile biyokütlenin yapısındaki hemiselüloz ve selülozun büyük ölçüde uzaklaştırılması, kütle veriminde önemli bir azalışa sebep olmakla beraber üretilen biyoyakıtın enerji bakımından yoğunlaşmasına sebep olmuştur [163]. Ayrıca artan reaksiyon sıcaklığı ile biyokütlenin yapısındaki su ve oksijen içerikli uçucu bileşenlerin uzaklaşması, üretilen biyokömürde oksijen içeriğinin azalmasına, karbon içeriğinin ise artmasına sebep olmuştur. Bu durum da enerji içeriğinin çoğunun korunmasına ve kalorifik değerin yükselmesine yol açmıştır [164- 166].

Sonuç olarak sıcaklık artışı ile biyokütle hala enerji içeriğinin çoğunu korunmuş, yüksek karbon içerikli, yüksek kalorifik değere sahip ve enerji yoğunluğu yüksek biyoyakıt elde edildiği gözlenmiştir. Yani torrefaksiyon sonucu biyoyakıtın enerji yoğunluğunun artması kalorifik değerini yükselmesine neden olmuş ve yakıt özelliği iyileştirilmiş biyokömür üretilmiştir [85, 120, 166].

Yüksek sıcaklıklarda torrefiye biyokömürde gözlenen kütle kaybındaki artış ile kütle verimindeki azalış, biyokütlenin makromoleküler yapısı ile de açıklanabilmektedir.

Sığır kuyruğu torrefaksiyonunu içeren 1. Set ile geven torrefaksiyonunu içeren 2. Setin %Kütle verimlilikleri incelendiğinde, %43,26 hemisellüloz içeriğine sahip olan geven için proses sıcaklığındaki artış ile kütle verimliliğinde yaklaşık %54 azalış gözlendiği, aynı şekilde %50,9 hemiselüloz içeriği bulunan sığır kuyruğu içinde kütle verimliliğinde yaklaşık %64 azalış gözlendiği belirlenmiştir.

Yüksek sıcaklıkta gerçekleşen torrefaksiyon proseslerinde kütle kaybının büyük kısmının hemiselülozun termal bozunması ile gerçekleştiği bilinmektedir. Bu yüzden hemiselüloz içeriği daha yüksek olan sığır kuyruğunda daha fazla bozunma gerçekleşmekte ve kütle verimi daha düşük değerlerde çıkmaktadır. [70, 153].

8.3.2 Torrefaksiyon Reaksiyon Süresinin Biyokömür Ürünü Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Biyokütlenin torrefaksiyonu ile üretilen biyokömürlerin ürün verimliliklerine bakıldığında, uyguladığımız torrefaksiyon prosesi üzerine etkili parametrelerden bir diğerinin ise reaksiyon süresi olduğu gözlenmiştir.

Torrefaksiyon proses süresinin üretilen biyokömürler üzerindeki etkisinin incelenebilmesi için ürünlere uygulanan kütle kaybı, kütle verimliliği, enerji verimliliği, enerji yoğunluğu ve ısıl değer analiz sonuçları Tablo 8.36'da değerlendirilmiştir.

Tablo 8.36 Torrefaksiyon proses süresinin biyokömür ürün sonuçlarına etkisi

	Proses Sıcklığı (°C)	**Proses Süresi (dk)**	**Kütle Kaybı (%)**	**Kütle Verimi (%)**	**Enerji Verimi (%)**	**Enerji Yoğunluğu**	**Isıl Değer (MJ/kg)**
1.SET	260 °C	15	53,86	46,14	61,87	1,34	21,71
		45	54,02	45,98	60,86	1,32	21,43
		75	54,34	45,66	60,40	1,34	21,77
2.SET	260 °C	15	40,10	59,90	70,62	1,18	22,63
		45	45,87	54,13	63,93	1,18	22,67
		75	47,96	52,04	57,23	1,19	23,50
3.SET	260 °C	15	49,93	50,07	63,36	1,27	22,21
		45	49,81	50,19	65,39	1,30	22,86
		75	59,79	40,21	51,30	1,28	22,39
4.SET	260 °C	15	60,55	39,45	46,82	1,19	22,13
		45	61,04	38,96	47,30	1,21	22,64
		75	62,15	37,85	46,24	1,22	22,78

Biyokütle kaynaklarının torrefaksiyon prosesi ile üretilen biyokömür sonuçları incelendiğinde, artan reaksiyon süresinin üründe kütle kaybına neden olurken, ürün kütle verimliliği ve enerji verimliliğinde ise azalışa neden olduğu belirlenmiştir. Fakat ürün verimleri üzerinde gözlenen bu etkilerin torrefaksiyon sıcaklık parametresi kadar etkili olmadığı gözlenmiştir [120]. Daha uzun reaksiyon sürelerinde gözlenen ürün kütle kaybında ki artış ve kütle veriminde meydana gelen azalış, biyokütle yapısında bulunan lignin ve selüloz moleküllerinin

bozunmasının reaksiyon süresine büyük ölçüde bağlı olması ile açıklanmaktadır. Daha düşük sıcaklık aralığında daha yüksek reaktiviteye sahip olan hemiselüloz için depolimerizasyon rejiminden devolatilizasyon rejimine geçiş süresi lignin ve selüloza kıyasla daha kısadır. Bu yüzden belirli reaksiyon süresi boyunca daha fazla devolatilizasyon meydana gelmesi ürünün kütle verimliliğinde azalışa sebep olduğu düşünülmüştür.

Proses başlangıcında kütle kaybı daha fazla iken daha uzun torrefaksiyon süresinin kütle verimliliğine çok önemli bir katkısının olmadığı belirlenmiştir. Bunun sebebi proses başlangıcında hemiselülozun daha reaktif bileşenleri ayrışırken, daha uzun proses sürelerinde ise daha az reaktif olan bileşenlerinin ayrışmasıdır [167, 168].

Ayrıca artan reaksiyon süresinin biyoyakıtın kalorifik değeri üzerine artırıcı bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebi reaksiyon süresince nem içeriğinin kaybolması, O/C veya H/C oranının ise azalması ile açıklanmıştır. Bunun sebebi, torrefaksiyon proses süresindeki artış ile biyoyakıt kül içeriği ve uçucu fraksiyonundaki değişimin çok az olmasıdır. Torrefaksiyon reaksiyon süresindeki artış ile kütle verimliliğindeki azalışı aynı zamanda biyokütle nem içeriği ve uçucu madde içeriğindeki azalış ile de açıklayabiliriz [111, 115, 160, 169].

Biyokütleye daha uzun süre torrefaksiyon prosesi uygulanması, yapıdan su, karbon monoksit, karbondioksit ve diğer uçucu bileşenleri daha fazla uzaklaştırırken, kül oranının da artmasına sebep olacağı için kütle kaybında artış, kütle veriminde ise azalış meydan getirmiştir.

Artan proses süresi ile H_2O, CO_2 ve CO oluşumundaki artış aynı zamanda biyokömür yapısında hidrojen ve oksijen içeriğinin azalmasına sabit C içeriğinin ise artmasına neden olmuş ve biyokömürdeki O/C ve H/C oranlarını da azaltıcı yönde etkilemiştir. Atomik oranlardaki bu azalış biyokömür ürünlerini daha önce bahsedilen Van Krevelen diagramından da anlaşılacağı gibi enerji içeriği bakımından kömüre yaklaştırmaktadır. Sonuç olarak katı ürün içindeki karbon içeriğinin daha uzun bekleme sürelerinde artması, bu sırada hidrojen ve oksijen içeriğinin ise azalması torefiye biyokütlenin ısıl değerini artırmıştır.

Biyokömürün kalorifik değerindeki artış ayrıca ham biyokütle numunelerinin içerdiği O-H ve C-O bağlarına kıyasla torefiye biyokütle numunelerindeki aromatik moleküllerin daha yüksek enerji içeriğine sahip C-C ve C-H bağlarına sahip olmasından kaynaklandığı da düşünülmektedir [123, 170].

Artan proses süresi ile biyokütle yapısındaki oksijenin giderilmesi ve karbon oranının yükselmesi ısıl değerin artmasına neden olurken enerji yoğunluğu yüksek ürün elde edilmesini de sağlamıştır.

Torrefaksiyon proses süresindeki artış ile enerji yoğunluğu artırılmış biyokömür ürünleri elde etmemizin diğer bir sebebi ise torrefaksiyon prosesi ile biyokütle yapısındaki makromoleküllerin ayrışmasının olduğu düşünülmektedir. Proses süresindeki artış ile selülozdan karbonil ve karboksil gruplarının ayrılması, hemiselülozdan karboksil grubunun ayrılması ve lignin molekülünden ise aromatik halka ve metoksil gruplarının ayrılması gerçekleşmekte bu da kütle kaybında artışa neden olmakta, kütle verimi ile enerji verimini ise düşürmektedir. Biyokütleden kütle kaybı gerçekleşirken kimyasal enerji kaybıda gerçekleşir. Fakat kütle kaybı enerji kaybından daha fazla olduğu ve üretilen biyokömürün kalorifik değeri de ham biyokütleye göre arttığı için ürün enerji yoğunluğu da artmıştır [123, 149].

8.3.3 Biyokütle Tanecik Boyutunun Biyokömür Ürünü Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Literatür araştırmaları torrefiye edilen ham biyokütle türününde torrefaksiyon proses sonuçları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu etkinin çoğunlukla termal işlemlerde, biyokütle partikül boyutuna bağlı olarak gerçekleşen ısı transferinden ve partikül çekirdek sıcaklığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Torrefaksiyon prosesinde kullanılan biyokütle tanecik boyutunun üretilen biyokömürler üzerindeki etkisinin incelenebilmesi için ürünlere uygulanan kütle kaybı, kütle verimliliği, enerji verimliliği, enerji yoğunluğu ve ısıl değer analiz sonuçları Tablo 8.37'de değerlendirilmiştir.

Tablo 8.37 Biyokütle tanecik boyutunun biyokömür ürün sonuçlarına etkisi

	Proses Sıcklığı (°C)	Tanecik Boyutu (mm)	Kütle Kaybı (%)	Kütle Verimi (%)	Enerji Verimi (%)	Enerji Yoğunluğu	Isıl Değer (MJ/kg)
1.SET	260 °C	1	52,19	47,81	64,75	1,35	22,36
		3	54,02	45,98	60,86	1,32	21,43
		5	55,62	44,38	59,99	1,35	22,37
2.SET	260 °C	1	44,88	55,12	54,80	1,28	21,79
		3	47,66	52,34	59,78	1,14	21,92
		5	52,88	47,12	62,08	1,32	24,38
3.SET	260 °C	1	57,37	42,63	55,40	1,3	22,21
		3	49,04	50,96	64,53	1,27	22,23
		5	48,77	51,23	68,42	1,34	25,33
4.SET	260 °C	1	58,86	41,14	56,43	1,37	23,25
		3	59,26	40,74	49,27	1,20	22,39
		5	62,45	37,55	48,91	1,31	22,79

Torrefaksiyon proseslerinde küçük tanecik boyutlu biyokütle kullanılması biyokütleden gerçekleşen kütle kayıp hızını artırmaktadır. Torrefaksiyon sırasında biyokütlede gözlenen ısı aktarımı, ortamdaki sıcak gazdan tanecik yüzeyine taşınım ile tanecik yüzeyinden iç merkeze iletim ile gerçekleşmekte ve bu ısı aktarımı sonucu tanecik yüzey sınırından partikül içine doğru sıcaklık gradyanı oluşmaktasır. Yüzey alanı daha büyük olan küçük taneciklerde bu ısı dağılımı daha homojen olduğundan, biyokütlenin termal bozunması daha hızlı gerçekleşmekte, bu durumda yüksek kütle kaybına ve düşük kütle verimine neden olmaktadır. Tanecik boyutu büyüdükçe, tanecik yüzey sınırından merkeze doğru ısı aktarımı daha yavaş olacağı için biyokütle bozunma hızı da azalır. Böylece kütle kaybı azalırken, kütle verimi artar.

Bu çalışmada, kullanılan biyokütleler için tanecik boyutunun torrefiye biyokömür ürün verimleri üzerindeki etkisi çok fazla gözlenememiştir. Fakat 3. Set çalışmasında kullanılan geven bitkisinin tanecik boyutunun azda olsa torrefaksiyon prosesi üzerinde istenilen etkiyi gösterdiği belirlenmiştir. 260 °C'de değişik tanecik boyutlarında geven için uygulanan torrefaksiyon prosesi incelendiğinde, 1 mm tanecik boyutunda %Kütle kaybının 57,37 iken, 3mm tanecik

boyutunda 49,04 ve 5 mm tanecik boyutunda ise 48,77 olduğu görülmüştür. Küçük tanecik boyutunda kütle kaybının yüksek, kütle veriminin %42,63 değeri ile düşük, enerji veriminin de %55,40 ile düşük değerde gerçekleştiği belirlenmiştir. Sonuç olarak 3. Deney setinde artan tanecik boyutu ile kütle kaybının azaldığı, kütle verimi ve enerji veriminin arttığı ve yüksek kalorifik değere sahip biyokömür örnekleri elde edildiği bulunmuştur [171, 172].

Diğer torrefaksiyon setlerinde ise artan tanecik boyutunda, kütle kaybının arttığı, ürün ve enerji verimlerinin ise azaldığı görülmüştür. Tanecik boyutundaki bu etkinin biyokütleye, eklenen organik katkı maddesinden dolayı gerçekleştiği düşünülmektedir**.**

Sonuç olarak küçük taneciklerde yüzeyden merkeze doğru sıcaklık profili daha düzgün olduğu için ısı ve kütle transferinin daha hızlı gerçekleşebildiği, bu yüzden kütle kaybının daha yüksek, kütle verimini ise daha düşük gözlendiği düşünülmektedir. Tanecik boyutu büyüdükçe ise ısı transfer direncinin artması, tanecik içerisinde sıcaklık profilinin daha düzensiz gözlenmesine neden olmuştur. Bu düzensizliğinde biyokütleden uçucu madde çıkışını etkilediği ve kütle kaybını düşürürken, kütle veriminin ise artmasına neden olduğu düşünülmüştür.

8.4 Optimum Biyokömür Ürünleri Karakterizasyon Çalışmaları

Sığır Kuyruğu ve geven bitkilerine ayrı ayrı uygulanan torrefaksiyon prosesleri için belirlenen modellere design expert programında “desirability fonksiyonu” uygulanarak her deney seti için optimum proses koşulları Tablo 8.38‘de verildiği şekilde belirlenmiştir. Deney setleri için belirlenen optimum koşullarda biyokömür numunelerinin üretimi yine torrefaksiyon prosesi ile gerçekleştirilmiştir. Her deney seti için üretilen optimum koşullardaki biyokömür numunelerinin yanma karakteristiği ve morfolojik özelliklerinin belirlenebilmesi için termogravimetrik analiz, FT-IR analizi ve SEM analizleri gerçekleştirilmiştir.

Tablo 8.38 Deney setleri için torrefaksiyon prosesi optimum koşulları

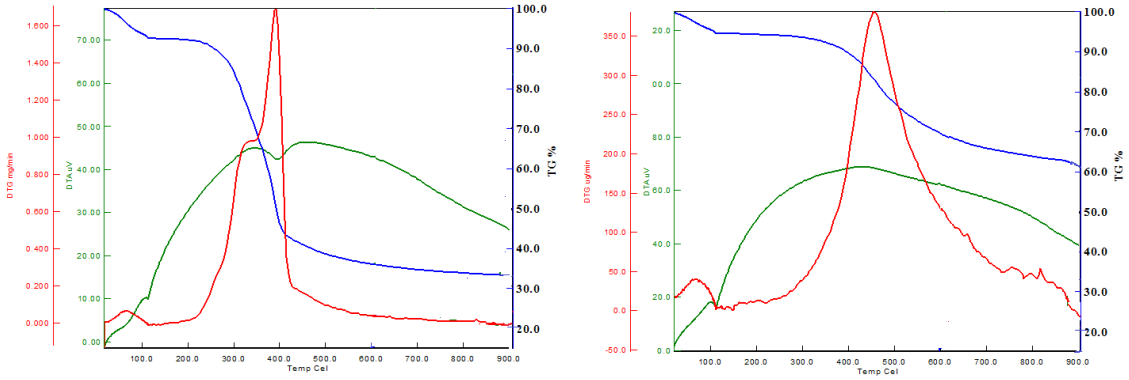
	Sıcaklık (°C)	Kalma Süresi (dk)	Tanecik Boyutu (mm)	Katkı Maddesi % (ağ/ağ)	Kütle Kaybı (%)	Kütle Verimi (%)	Enerji Verimi (%)	Enerji Yoğunluğu	Isıl Değer (MJ/kg)
1.Set (SK-	290	60	4	75	64,00	36,00	49,25	1,38	21,71
2.Set (G-KB)	290	57	4	25	60,52	39,48	53,16	1,31	22,82
3.Set (G-M)	290	60	3	75	66,39	33,66	43,74	1,30	23,26
4.Set (SK-M)	290	60	4	70	70,87	29,13	37,91	1,32	22,28

8.4.1 Termogravimetrik Analiz Sonuçları

Sığır Kuyruğu ve geven biyokütlelerinden üretilen enerji içerikleri iyileştirilmiş biyokömür numunelerinin ternal bozunma modellerinin incelenebilmesi için her deney setinde kullanılan ham biyokütle ve her deney seti için design expert programı ile belirlenen optimum koşullarda üretilen biyokömür numunelerinin termogravimetrik analizleri gerçekleştirilmiştir. Termal etki sonucu biyokütle yapısından nem, uçucu maddelerin uzaklaştırılması ve polimerik yapıda meydana gelen değişikliklerden kaynaklanan ağırlık kayıpları TG ve DTG eğrileri ile detaylı olarak incelenmiş ve Şekil 8.56-8.59'da verilmiştir.

Torrefaksiyon prosesi ile biyokütle yapısındaki polimerlerde fiziksel ve kimyasal değişiklikler gözlenmektedir. Biyokütle torrefaksiyon proseslerinde ilk önce reaktif olmayan 50-150°C sıcaklık aralığında kimyasal değişimin olmadığı fakat nem çıkışının gerçekleştiği bir ağırlık kaybı gözlenir. Aynı zamanda 150°C sonrasında lignin molekülüde yumuşamaya başlar. Bu kayıp sonrası 200°C'ye kadar biyokütleden bağıl nemin uzaklaşması devam ederken, yapıdaki hidrojen ve karbon bağları da kırılmaya başlar ve molekül ağırlığı düşük, oksijen yüzdesi yüksek uçucu maddeler uzaklaşırlar. Bu sıcaklıkta ayrıca lignoselülozik biyokütlede deformasyon ile birlikte, hemiselülozun depolimerizasyonu başlar. 200-300°C sıcaklık aralığında ise biyokütlede depolimerizasyon ve devolatilizasyon yanında karbonizasyonda başlar. Böylece hemiselülozun bozunması tamamlanırken, diğer biyokütle polimerleri olan selüloz ve ligninde kısmen bozulmalar gözlenir. Bu polimerik bozunmalardan dolayı 500°C'ye kadar

daha belirgin ve hızlı bir ağırlık kaybı meydana gelir. Bu 2. ağırlık kaybından sonra daha düşük hızda ağırlık kaybının gözlendiği ligninin parçalanmasından kaynaklanan 3. bir ağırlık kaybı daha gözlenir [61].

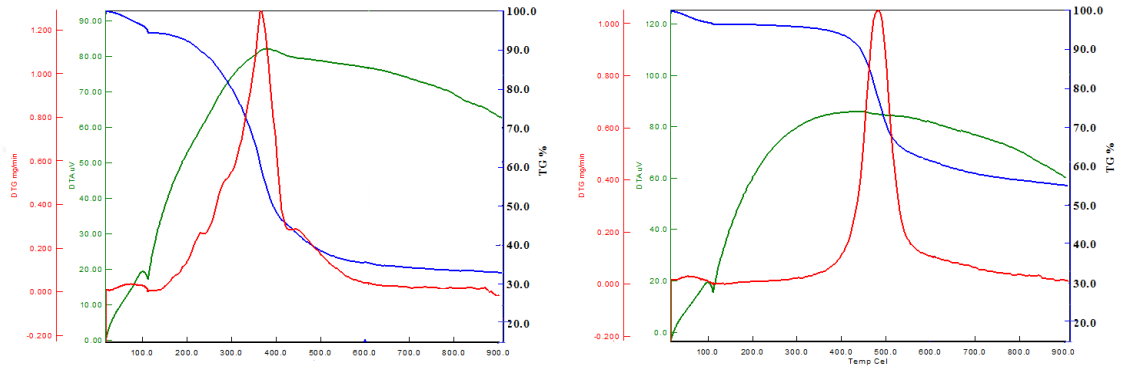


(a) (b)

Şekil 8.56 1. Deney seti ham (a) ve optimum biyokömür (b) numuneleri TGA, DTG ve DTA profilleri

1. deney setine ait TGA eğrilerinde 110°C kadar gözlenen ilk belirgin kütle kaybı yapıdan bağlı nem ve uçucu maddelerin uzaklaştığının göstergesidir. Bu kütle kaybını DTG grafiğinde ilk gözlenen küşük pik desteklemektedir. Sıcaklık arattıkça TGA eğrisinde yaklaşık 200-420°C aralığında daha belirgin bir ağırlık kaybı meydana gelmiştir. Üçüncü fakat daha küçük bir ağırlık kaybı ise 420-550°C aralığında gözlenmiştir. Literatür bilgisinden lignoselülozik biyokütlede hemiselülozun yaklaşık 220-315°C, selülozun 315-400°C ve lignin polimerinin ise 150-900°C şeklinde daha geniş bir sıcaklık aralığında bozunduğu bilinmektedir. Buna göre TGA eğrilerinde ilk gözlenen büyük ağırlık kaybının hemiselüloz ve selüloz molekülünün bozunmasından, daha yüksek sıcaklıklarda gözlenen daha küçük ağırlık kaybının ise lignin polimerinin termal bozunmasından kaynaklandığı anlaşılmıştır. 290°C olarak belirlenen optimum proses koşulunda üretilen biyokömür numunesinin TGA eğrisinde ise daha küçük bir aralıkta ağırlık kaybının meydana geldiği gözlenmiştir. Bu durum yüksek sıcaklıkta meydana gelen torrefaksiyon prosesi ile biyokütle yapısından hemiselülozun tamamen, selülozun ise büyük bir kısmının parçalandığını düşündürmektedir. Ham biyokütlenin DTG eğrisinde 310°C ve 400°C civarında gözlenen pikler sırası ile yapıdaki hemiselüloz ve selülozun termal bozunmasını göstermektedir. Bu piklerden sonra gelen küçük

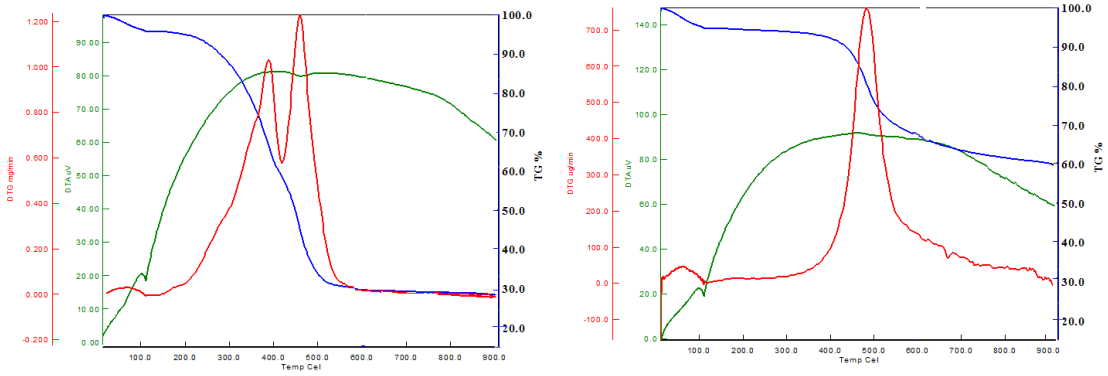
pikler ise yapıdaki lignin polimerinin parçalandığını belirtmektedir. Biyokömür numunesinin DTG eğrisinde hemiselülozdan kaynaklanan pikin kaybolduğu sadece selüloza ait pikin bulunduğu görülmüştür. Ayrıca selüloz pikini takip eden küçük piklerin gözlenmesi yapıda büyük oranda lignin molekülünün kaldığını göstermiştir. Biyokömür numunesinin DTG eğrisinde 150°C civarında gözlenen küçük pikde, torrefaksiyon sonucu gözenekli yapıya kavuşan biyokömürün, ortam nemini bu gözeneklerde tutulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [172, 173].



(a) (b)

Şekil 8.57 2. Deney seti ham (a) ve optimum biyokömür (b) numuneleri TGA, DTG ve DTA profilleri

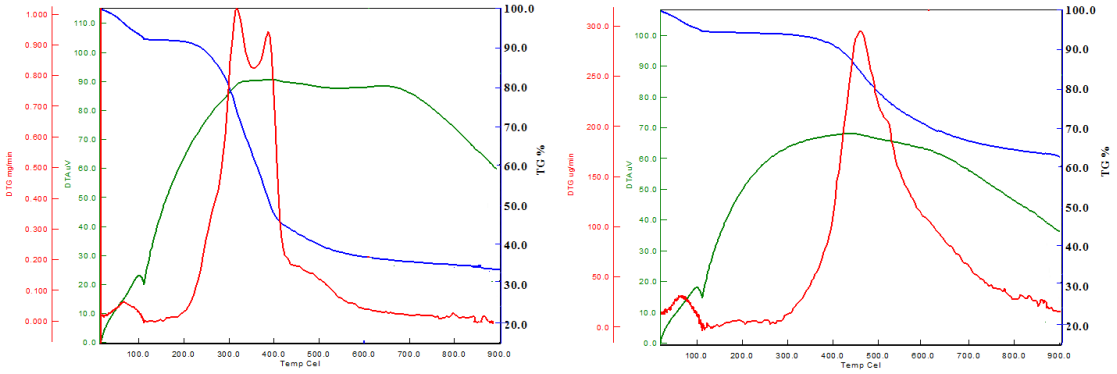
2., 3. ve 4. deney setlerine ait ham ve optimum biyokömür numuneleri TGA ve DTG eğrileri incelendiğinde de benzer yorumlar yapılabilmektedir. Deney setlerinin TGA eğrilerine bakıldığında en fazla kütle kaybının 3. sete ait ham biyokütle numunesinde gözlendiği belirlenmiştir. Bu farklılığın deney setleri koşullarından ve biyokütlelerin moleküler yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. DTG eğrilerinde 2., 3. ve 4. set için sırası ile yaklaşık 280°C, 380°C ve 320°C'de hemiselüloz, 360°C, 400°C ve 380°C civarında ise selüloz pikleri gözlenmiştir. Selüloz pikinden sonra gözlenen küçük pikler ise lignin polimerinin ısıl bozunması ile oluşan piklerdir. Lignin spesifik yapısından dolayı selüloz ve hemiselüloz moleküllerine kıyasla daha fazla termal dirence sahiptir ve daha geniş bir sıcaklık aralığında bozunur. Bu yüzden lignin molekülünün torrefaksiyon pikleri daha küçük görülmektedir [174].



(a) (b)

Şekil 8.58 3. Deney seti ham (a) ve optimum biyokömür (b) numuneleri TGA, DTG ve DTA profilleri

2. set DTG eğrisinde hemiselüloz piki çok belirgin olarak gözlenmemesine rağmen, 3. ve 4. setlerde hemiselüloz ve selüloz pikleri oldulça belirgin bir şekilde gözlenmiştir. Bu durum, 2. sette torefiye edilen biyokütle numunesinin hemiselüloz içeriğinin daha düşük olması ile açıklanabilir. Setlere ait torrefiye numunelerin DTG eğrilerinde daha önce açıklandığı gibi hemiselüloz piklerinin kaybolduğu ve farklı büyüklüklerde sadece selüloz piklerinin görüldüğü belilenmiştir. Bu farklı torrefaksiyon koşullarından dolayı biyokütlelerde farklı oranlarda gerçekleşen hemiselüloz ve selüloz bozunmasından kaynaklanmaktadır. Setlere ait torrefiye ürünlerde 100°C sıcaklık altında gözlenen DTG pikleri, biyokütlelerin termal işlem sonucu gözenekli yapıya kavuştuklarını ve bu gözeneklerin ortam nemini tuttuğunu göstermektedir.



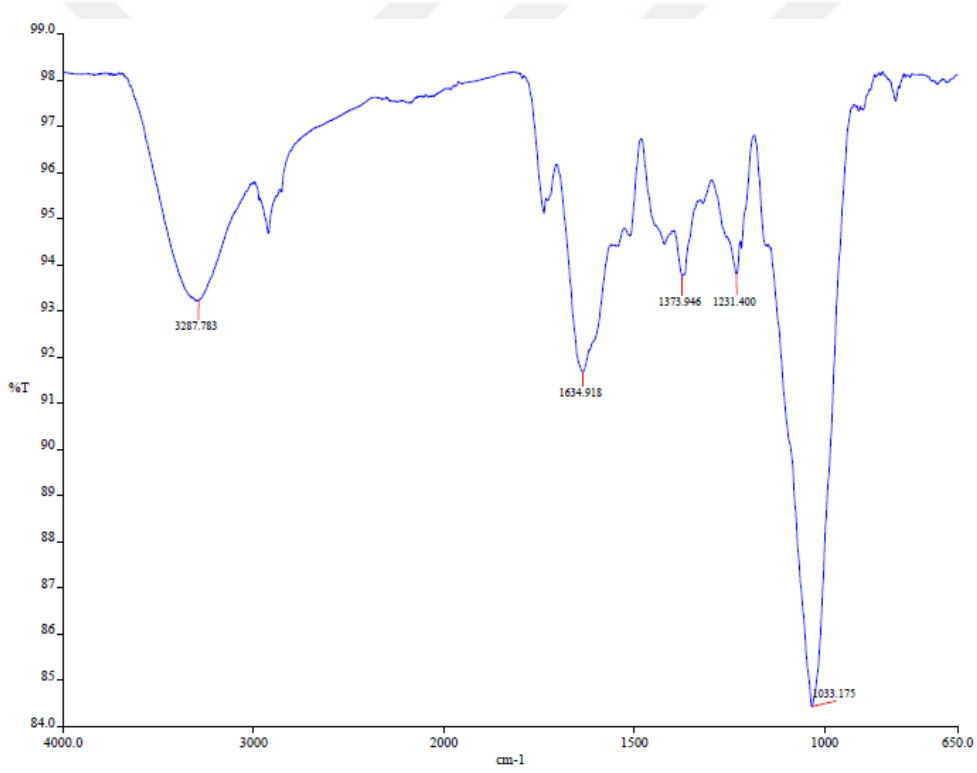
(a) (b)

Şekil 8.59 4. Deney seti ham (a) ve optimum biyokömür (b) numuneleri TGA, DTG ve DTA profilleri

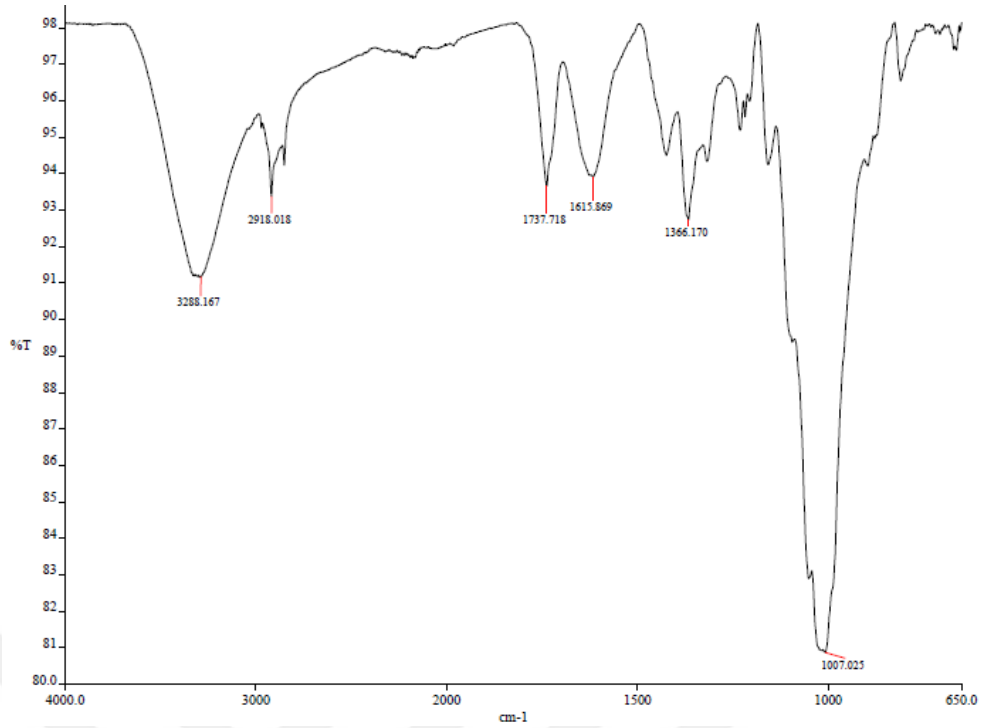
3. ve 4. set torrefiye ürünlerde bu pikin 2. sette gözlenenden daha belirgin olduğu belirlenmiştir.

8.4.2 FT-IR Analiz Sonuçları

Sığır Kuyruğu ve geven biyokütlelerine torrefaksiyon prosesi uygulanarak üretilen biyokömür ürünlerinin moleküler yapılarının açıklanabilmesi için her deney setinde kullanılan ham biyokütle ve her deney seti için design expert programı ile belirlenen optimum koşullarda torrefaksiyon prosesi ile üretilen biyokömür numunelerine FT-IR analizi uygulanmıştır. Şekil 8.60-8.65'de verilen numunelere ait spektrumlar, literatür ile karşılaştırılarak, torrefaksiyon prosesinin biyokütlede bulunan fonksiyonel gruplar üzerindeki etkileri incelenmiştir.

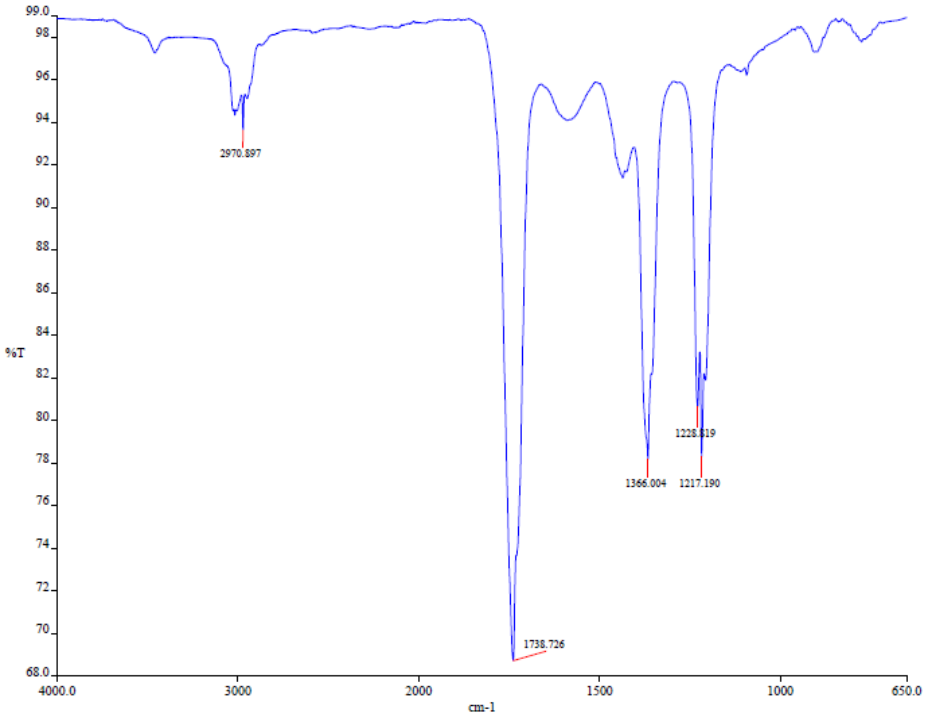


Şekil 8.60 Ham sığır kuyruğu FT-IR spektrumu



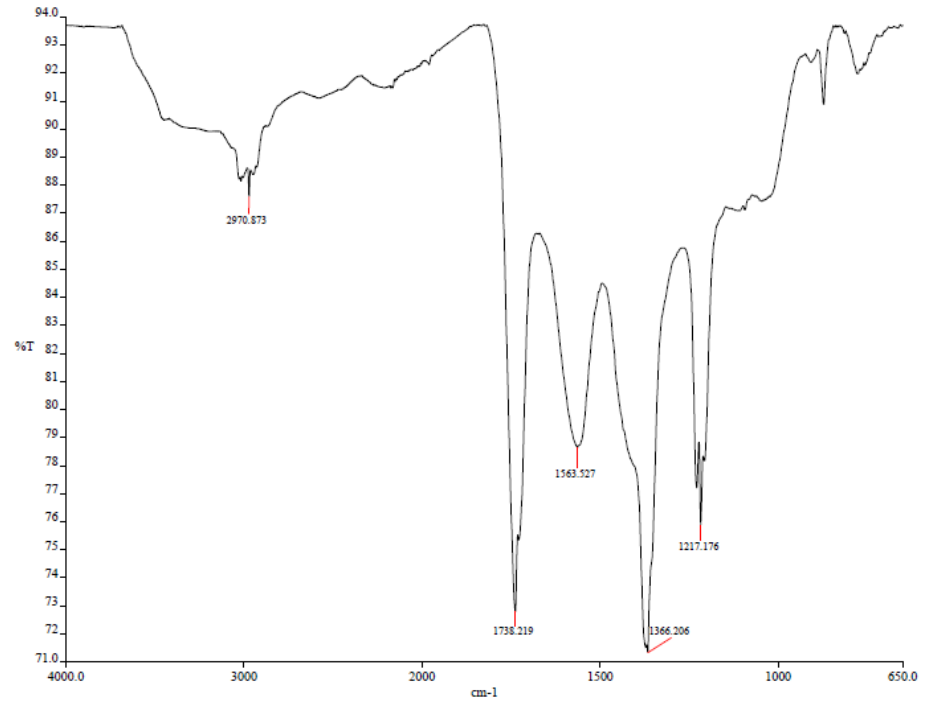
Şekil 8.61 Ham geven FT-IR spektrumu

Ham biyokütle ve torrefaksiyon prosesi ile üretilmiş biyokömür numuneleri arasındaki en büyük farkın FT-IR spektrumunda gözlenen hidroksil grubu gerilme titreşim absorbansında gözlenen azalma olduğu bilinmektedir. Ham biyokütle numunelerinin FT-IR spektrumlarında 3287 ve 3288 cm^{-1} dalga boyunda şiddeti yüksek ve geniş şekilde görülen pik molekül içi veya moleküller arası hidrojen bağlarından dolayı oluşan OH gerilme titreşimini vermektedir. Bu pik ham biyokütle numunelerinin nem içeriklerinden dolayı gözlenmektedir. Aynı zamanda kristalin selüloz molekülününde karakteristik pikidir. Her deney seti için optimum koşullarda yüksek sıcaklıkta torrefaksiyon prosesi uygulanmış biyokömür numunelerinde, sıcaklığın etkisi ile bu pikin şiddetinin azaldığı belirlenmiştir. Bu durum biyokömür numunelerinin nem içeriklerinin azaldığının göstergesidir.



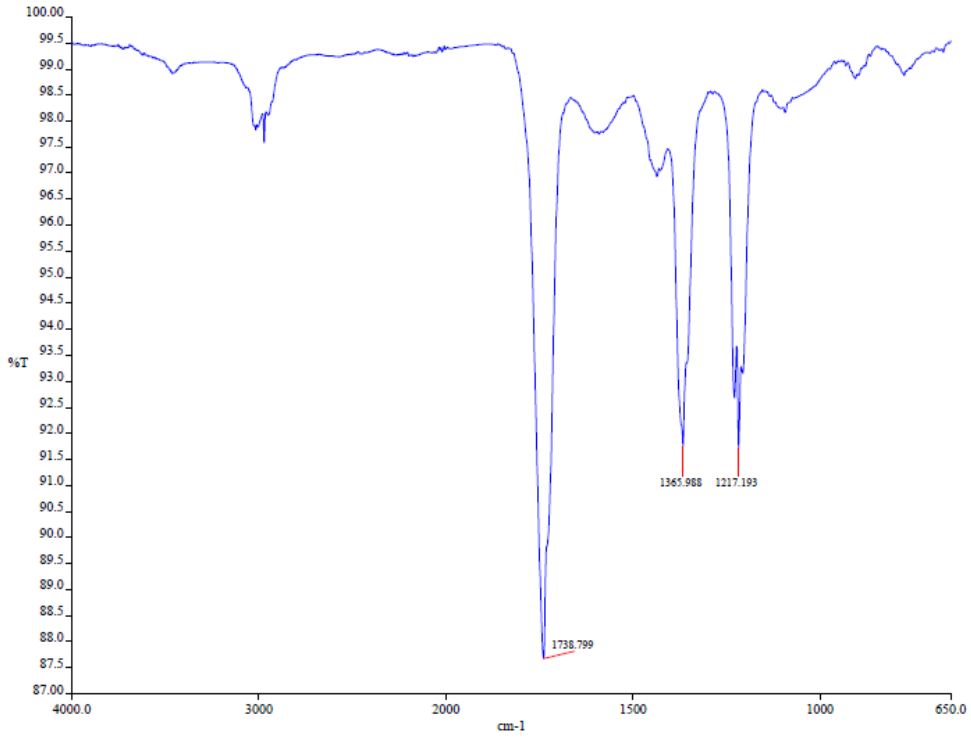
Şekil 8.62 1. Deney seti optimum biyokömür numunesi FT-IR spektrumu

Ayrıca sıcaklığın etkisi ile hemiselüloz ve selüloz moleküllerinin bozulduğunması ile hidrojen bağlarının kırıldığını ve hidroksil gruplarının azaldığını böylece biyokömürün hidrofobik özellik kazanacağını göstermektedir.

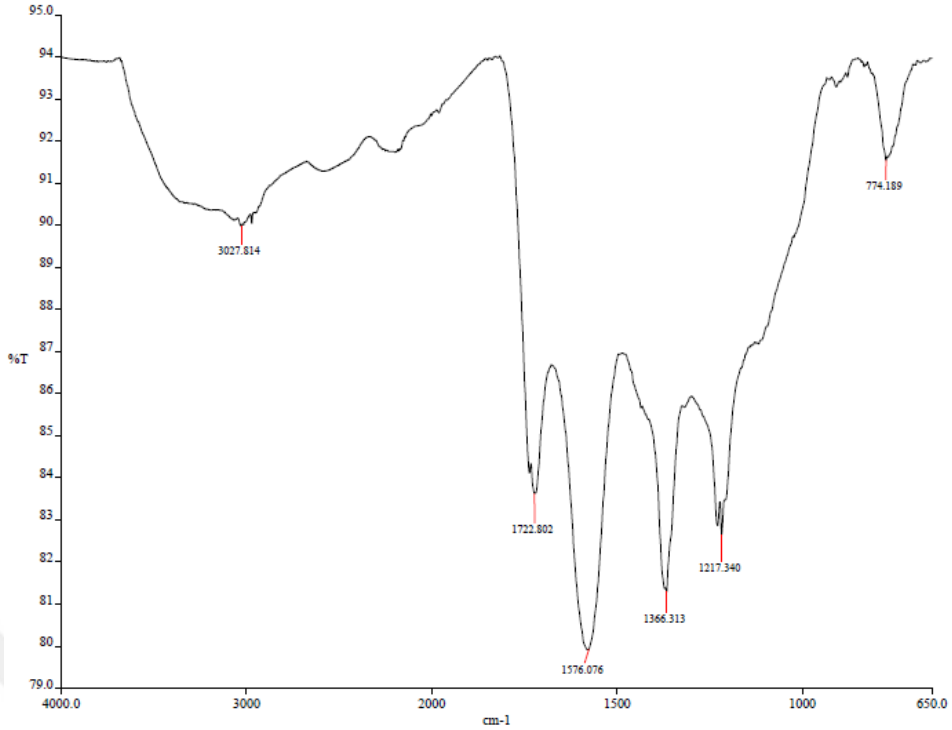


Şekil 8.63 2. Deney seti optimum biyokömür numunesi FT-IR spektrumu

Biyokütlenin spektrumunda gözlenen diğer önemli bir pik ise 2918 cm^{-1} civarında gözlenen C-H gerilme titreşim pikidir. Bu pik biyokütlede bulunan karbonil, hidrokarbon veya aromatik halka yapılarındaki CH_2 gruplarının C-H gerilim titreşimlerinden kaynaklanmaktadır. Bu pikin şiddetinin yüksek sıcaklıklarda üretilen biyokömür numunelerinde azaldığı gözlenmiştir. Yapıdaki karbonil gruplarının sıcaklıkla birlikte dekarboksilasyon reaksiyonu sonucu bozunduğu ve yapıdan CO_2 salınımının gerçekleştiği, biyokütle spektrumlarında karbonil grubu için C=O gerilmesine ait 1500- 1630 cm^{-1} bandında gözüken piklerin biyokömür numunelerinde 1700-1738 cm^{-1} aralığına kayması ile desteklenmektedir. Ayrıca ham biyokütlede 1737 cm^{-1} civarında gözlenen titreşim bantlarının hemiselülozun yapısındaki karboksilik asit gruplarının C=O gerilim titreşimlerine ait olduğuda belirlenmiştir.



Şekil 8.64 3. Deney seti optimum biyokömür numunesi FT-IR spektrumu

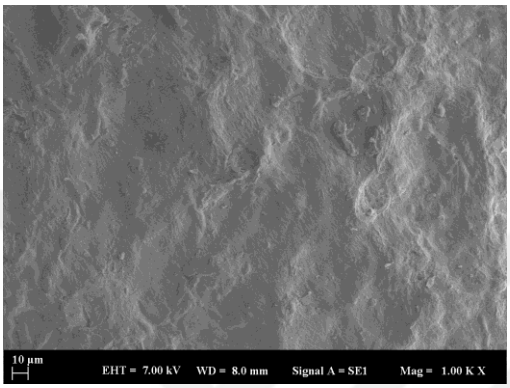


Şekil 8.65 4. Deney seti optimum biyokömür numunesi FT-IR spektrumu

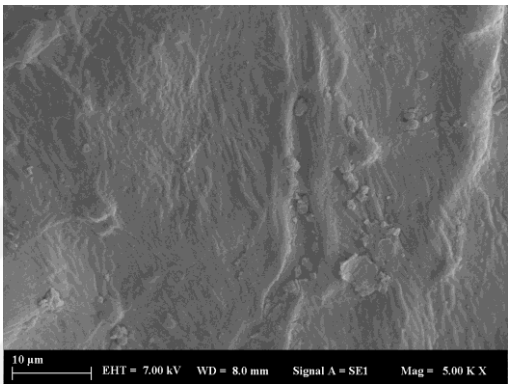
Biyokütlede 1000-1033 cm^{-1} bandında gözlenen pikler selülozdaki C-O-C glikozidik bağlarının asimetrik gerilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu piklerin şiddetinin torrefiye biyokömür numunelerinde azaldığı gözlenmiştir. Bu durum artan torrefaksiyon sıcaklığı ile biyokütle yapısındaki selüloz molekülün bozunduğunu ve miktarının azaldığını göstermektedir. Numunelerin yapısında bulunan lignin molekülüne ait bantlar ise 1200-1250 cm^{-1} civarında gözlenen aromatik halkaya bağlı C-O gerilme bandı ve 1500-1600 cm^{-1} aralığında gözlenen C=C aromatik halka titreşim bandlarıdır. Bu pikler torrefiye biyokömür numunelerinde de gözlenmiştir. Bu durum lignin molekülünün bozunma sıcaklığının geniş bir aralıkta ve yüksek sıcaklıklarda gerçekleştiğini dolayısıyla torrefiye biyokütlelerde de varlığının gözlendiğini desteklemiştir. 1400-1600 cm^{-1} aralığında gözlenen bantlar ise aromatik halkadan kaynaklanan C=C bağlarından kaynaklanmaktadır. Biyokütle ve torrefiye biyokütle numunelerinin spektrumlarında 600-1000 cm^{-1} aralığında gözlenen küçük pikler ise aromatik halkaya bağlı =CH gruplarındaki C-H titreşimlerinden kaynaklanmıştır [61, 175, 176, 177].

8.4.3 Sem Analiz Sonuçları

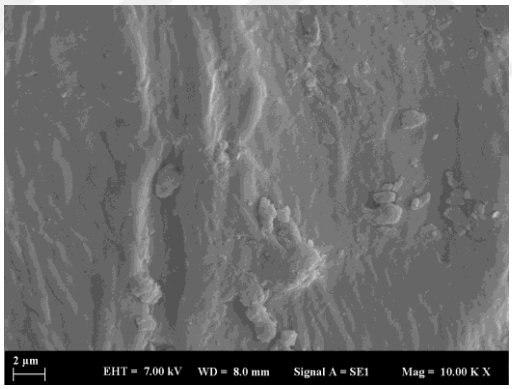
Torrefaksiyon prosesi uygulanmamış biyokütle ve torrefiye biyokütle numunelerinin makromoleküler yapılarındaki farklılıkları ve yüzey morfolojisini inceleyebilmek için sığır kuyruğu ve geven bitkilerinden optimum koşullarda torrefaksiyon prosesi ile üretilen biyokömür numunelerine SEM analizi uygulanmıştır. Ham biyokütleler ve her deney setine ait optimum koşullarda üretilmiş biyokömür numunelerinin SEM görüntüleri Şekil 8.66-8.71'de verilmiştir.



(a) 1.00 KX

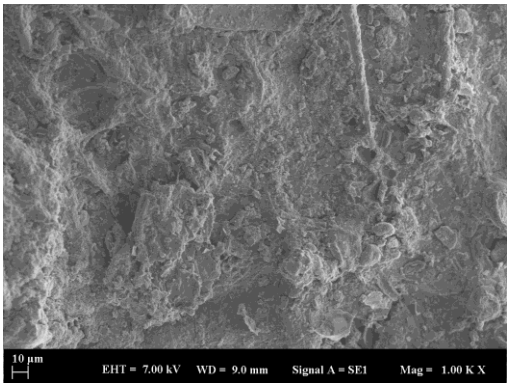


(b) 5.00 KX

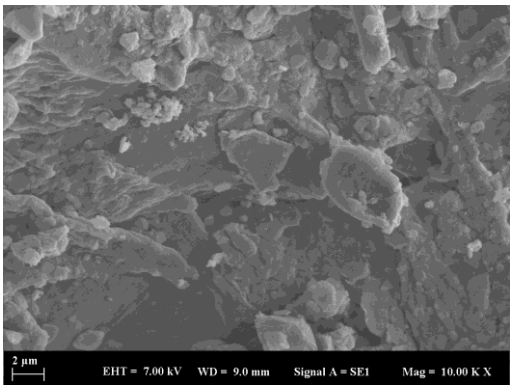


(c) 10.00 KX

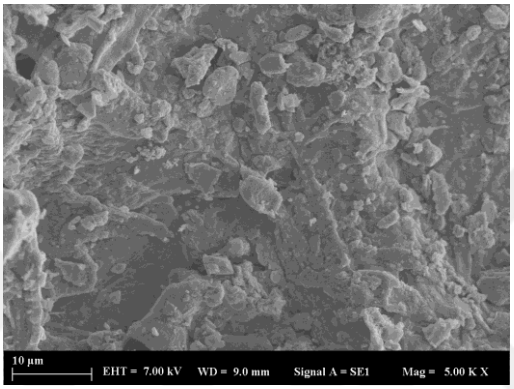
Şekil 8.66 Sığır Kuyruğu SEM görüntüsü



(a) 1.00 KX

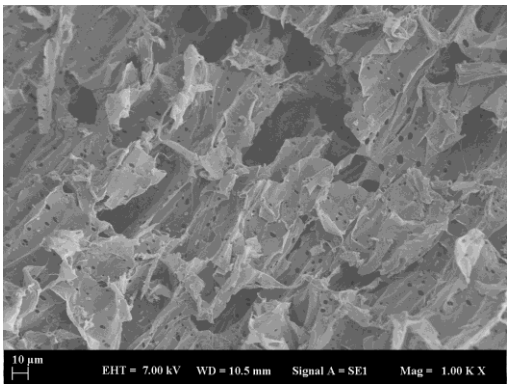


(b) 5.00 KX

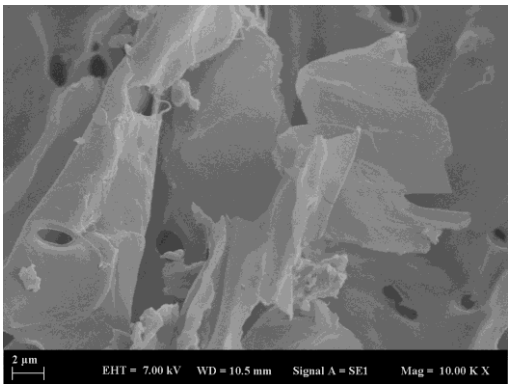


(c) 10.00 KX

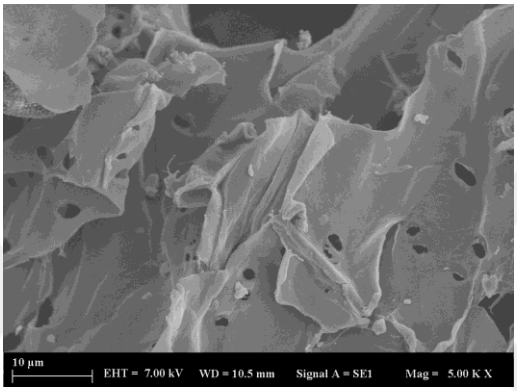
Şekil 8.67 Geven SEM görüntüsü



(a) 1.00 KX



(b) 5.00 KX

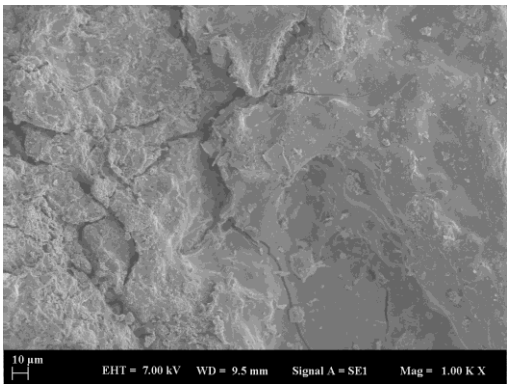


(c) 10.00 KX

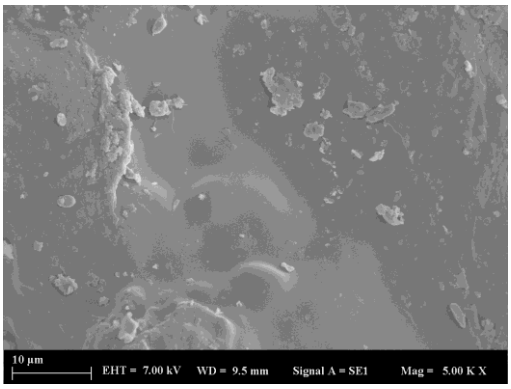
Şekil 8.68 1. Deney seti optimum biyokömür numunesi SEM görüntüsü

Biyokütle ve biyokömür numunelerinin morfolojik yapılarına bakıldığında lifli ve süngerimsi yapılar görülmektedir. Ham biyokütlelerde gözlenen bu lifler, parçacıklar arasında bağlantı oluşturduğu için biyokütlenin öğütülebilirliğini zorlaştırmaktadır.

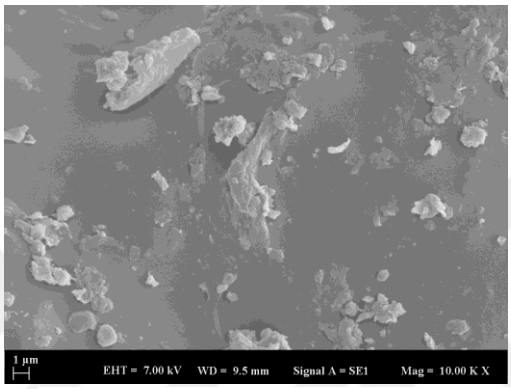
Fakat optimum biyokömür numunelerinde bu lifli yapının azaldığı görülmektedir. Bu durumun yüksek torrefaksiyon koşullarında üretilen biyokömür numunelerinde, hemiselüloz ve selüloz yapılarının bozulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



(a) 1.00 KX

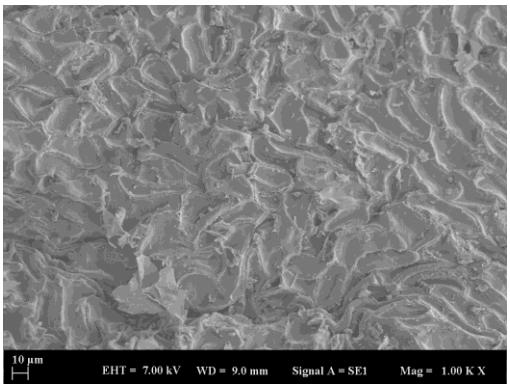


(b) 5.00 KX

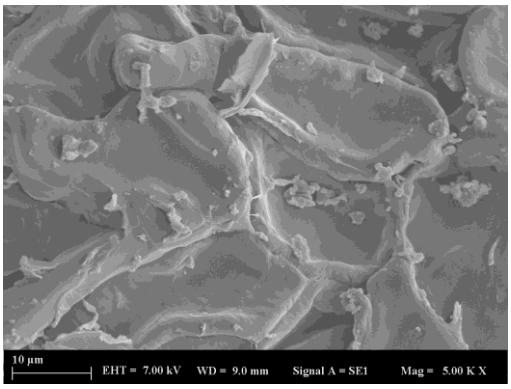


(c) 10.00 KX

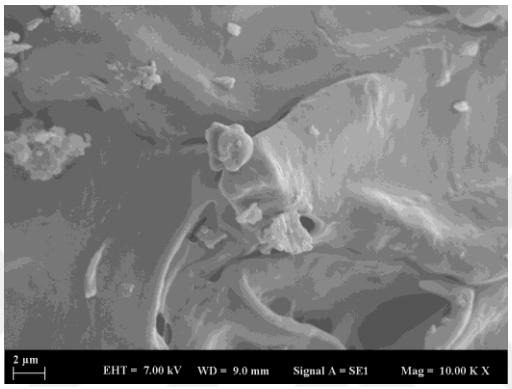
Şekil 8.69 2. Deney seti optimum biyokömür numunesi SEM görüntüsü



(a) 1.00 KX



(b) 5.00 KX

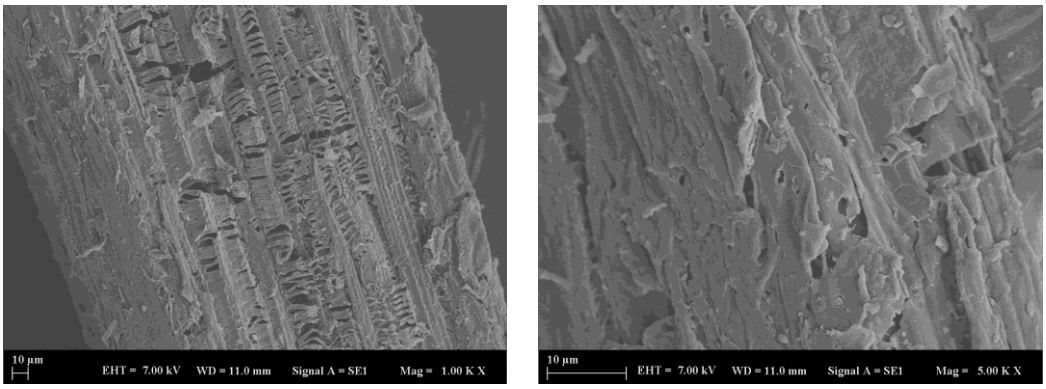


(c) 10.00 KX

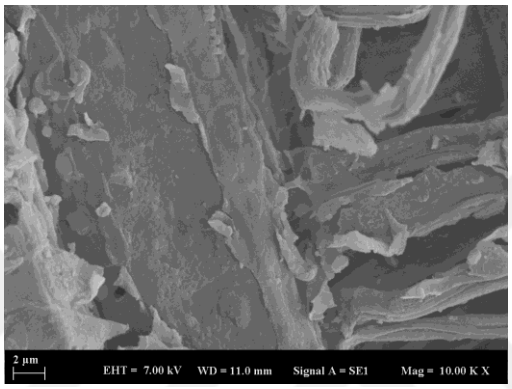
Şekil 8.70 3. Deney seti optimum biyokömür numunesi SEM görüntüsü

Torrefiye biyokömür sem görüntüleri incelendiğinde, yüksek torrefaksiyon sıcaklığı ile biyokömür numunelerinde bitişik parçacıklar arasındaki zayıf yapışmadan dolayı parçacıklar arası boşlukların oluştuğu görülmüştür. Aynı zamanda biyokömür numunelerinin, torrefaksiyon prosesi ile yapılarındaki uçucu maddelerin ve hemiselülozun büyük bir kısmını kaybetmeleride gözenekli yapı oluşmasına neden olmuştur.

Özellikle sem görüntülerinden, 1. ve 4. deney setlerinin optimum proses koşulları ile üretilen biyokömür örneklerinde gözenekli yapının oluştuğu belirlenmiştir.



(a) 1.00 KX **(b) 5.00 KX**



(c) 10.00 KX

Şekil 8.71 4. Deney seti optimum biyokömür numunesi SEM görüntüsü

1. ve 4. sete ait optimum biyokömür numunelerinin %Kütle kayıplarının sırası ile %64,0047 ve %70,8725 olarak diğer deney setlerine göre daha fazla bulunmasıda, bu setlerde uçucu madde kayıpları ve biyokütle yapısındaki makromoleküllerin daha fazla bozunması ile gözenek oluşumunun gözlenmesini desteklemiştir [142, 168, 169, 176].

8.5 Biyopelet Numuneleri Karakterizasyon Sonuçları

Sığır kuyruğu ve geven bitkileri ile ayrı ayrı oluşturulan deney setleri sonucu belirlenen optimum torrefaksiyon proses koşullarında her set için optimum biyokömür numuneleri üretilmiştir. Optimum koşullarda üretilen biyokömür numuneleri daha sonra hidrolik pres yardımı ile biyokömür peletleri (biyopelet) haline getirilmiştir. Her deney seti için hazırlanan biyopeletlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenebilmesi için karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

8.5.1 Biyopelet Numuneleri Kısa Analiz Sonuçları

Sığır kuyruğu ve geven bitkileri ile optimum koşullarda üretilen biyokömür numunelerinden elde edilen biyopeletlerin kısa analiz sonuçları Tablo 8.39'da verilmiştir.

Tablo 8.39 Optimum koşullarda üretilen biyopelet kısa analiz sonuçları

	%Nem	**%Kül**	**Üst Isıl Değer (MJ/kg)**
1.Set (SK-KB)	4,27	16,3	23,16
2.Set (G-KB)	5,75	12,57	23,69
3.Set (G-M)	3,42	13,96	23,91
4.Set (SK-M)	3,57	12,87	24,24

Design expert programı ile optimum üretim koşulları belirlenen biyokömür numunelerinin peletlenmesi ile elde edilen biyopeletlerin üst ısıl değerlerinin yaklaşık 23,16 ile 24,24 MJ/kg aralığında değiştiği belirlenmiştir.

Biyokütle numunelerine torrefasiyon prosesi uygulanması, kimyasal yapıda bozunmaların gerçekleşmesine, yapıdan karbonmonoksit, karbondioksit ve çeşitli uçucu bileşenlerin uzaklaşmasına neden olmaktadır. Biyokütlede meydana gelen bu değişikliklerde, oksijen içeriğinin azalmasına yol açarken sabit karbon miktarını ise artırmaktadır. O/C oranında gözlenen bu azalışta üretilen biyokömürlerin kalorifik değerlerini yükseltmiştir. Optimum deney setlerine ait biyokömür numunelerinin ısıl değerleri sırası ile 21,71, 22,82, 23,26 ve 22,28 MJ/kg şeklinde ölçülmüşken, bu biyokömür numunelerinden hazırlanan biyopelet örneklerinin ısıl değerlerinin ise 23,16, 23,69, 23,91 ve 24,24 MJ/kg şeklinde daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum peletleme prosesi ile birim hacimdeki enerji miktarının arttığını göstermiştir. Ayrıca düşük kül içeriğine sahip olan peletlerin kalorifik değerlerinin diğer peletlere göre daha yüksek çıkması da literatür ile uyumlu sonuç vermiştir [168, 178].

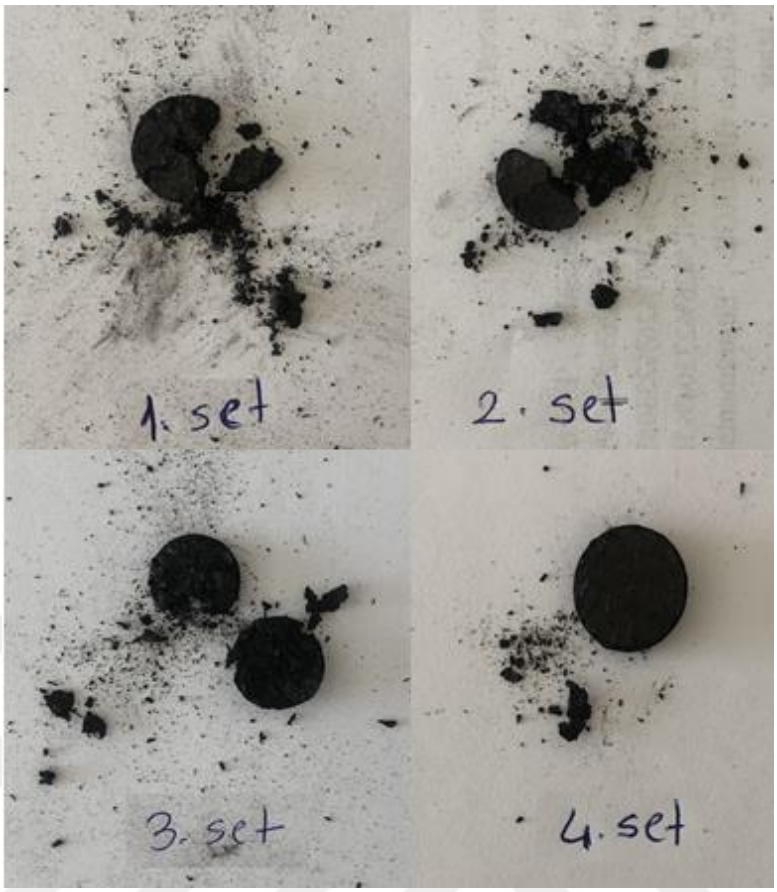
8.5.2 Biyopelet Numuneleri Düşme/Darbe Direnci Sonuçları

Peletlenmiş biyokayıtlar için mekanik dayanıklılık, taşınma veya depolanma sırasında bir bütün olarak sağlam kalabilme kabiliyetinin bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Özellikle biyoyakıt peletlerinde gözlenen düşük mekanik mukavemetin, kullanım sırasında yüksek toz emisyonuna ve yanma prosesleri sırasında besleme kazanlarında sorunlara neden olması ayrıca depolama, paketleme, nakliye ve kullanım aşamalarında patlama veya yangın riskini artırması istenmeyen durumları teşkil etmektedir. Bu gibi sorunları öngörebilmek için torrefiye biyokömürlerden üretilen biyopeletlere düşme direnci testi uygulanmış ve elek üstünde kalan peletlerde gözlenen kütle kayıplarından yararlanılarak shatter indeksleri hesaplanmıştır. Peletlerin düşme direnci sonuçları Tablo 8.40 ve Şekil 8.72'de verilmiştir.

Tablo 8.40 Biyokömür peletleri düşme direnci sonuçları

Optimum Biyokömür Numunesi	**Düşme Direnci (Shatter İndeksi) (%)**
1.Set (SK-KB)	75,40
2.Set (G-KB)	60,78
3.Set (G-M)	98,69
4.Set (SK-M)	99,24

Optimum koşullarda üretilen biyokömür numunelerinin preslenmesi ile elde edilen biyopeletler için hesaplanan düşme direnci sonuçları incelendiğinde, shatter indeks değerlerinin %60,78 ile %99,24 arasında değiştiği görülmüştür. En düşük düşme direncine sahip olan numunenin 2. deney seti koşullarında üretilen biyopelet olması, nem içeriğinin diğer peletlere göre daha yüksek olması ile açıklanabilir. Ayrıca peletleme prosesinde doğal bağlayıcı olarak kullanılan keçiboynuzu atık yüzdesinin düşük olmasıda sonuçları desteklemektedir. En yüksek düşme direncine 4. deney seti optimum biyopelet ürünlerinde ulaşılmıştır.

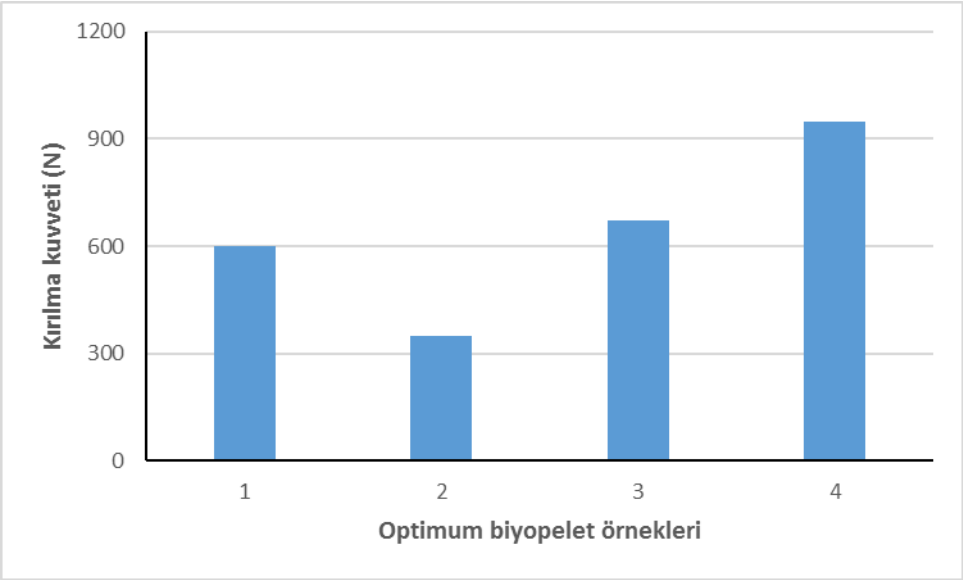


Şekil 8.72 Biyokömür peletleri düşme direnci analiz sonrası görünümleri

4. deney setinde torrefaksiyon prosesi sonucu yapıdaki hemiselüloz ve selüloz kayıpları ile gözenekli yapının oluşmasına rağmen pelet mukavemetinin yüksek olduğu gözlenmiştir.

8.5.3 Biyopelet Numuneleri Sıkıştırma Direnci Sonuçları

Biyokütle peletlerinin, üretimden nihai kullanıcıya gidene kadar tedarik zinciri boyunca kırılmadan, sağlamlığını koruyabilme kabiliyetini öngörebilmek ve üretim kalitesini anlayabilmek için sıkıştırma direnci testi uygulanmıştır. Uygulanan basınç ile biyopeletlerin kırılmadan dayanabileceği maksimum kırılma yükü belirlenmiştir. Her deney seti için optimum koşullarda torrefaksiyon prosesi ile üretilen biyokömürlerden elde edilen biyopelet örneklerine ait sıkıştırma direnci sonuçları Şekil 8.73'de verilmiştir.



Şekil 8.73 Biyokömür peletleri sıkıştırma direnci sonuçları

Analiz sonuçları incelendiğinde uygulanan kuvvet ile en kolay kırılan biyopelet örneğinin 2. deney setine ait olduğu, en dayanıklı peletin ise 4. setteki numuneler olduğu belirlenmiştir. Analizleri gerçekleştirilen biyopeletlerin üretiminde torrefiye biyokömür numunelerinin kullanılmasının genel olarak numunelerin sıkıştırma dirençleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu gözlenmiştir. Torrefaksiyon prosesi ile biyokütle yapısındaki hemiselüloz, selüloz ve lignin moleküllerinde bozunma meydana gelmiştir. Yapıdaki bozunmadan dolayı bitişik moleküller arasındaki polimer zincirlerinin hidrojen bağı ile bağlanma olasılığı azalmıştır. Aynı zamanda torrefaksiyon prosesinden dolayı özellikle hemiselülozdaki OH bağlarının yapıdan uzaklaşması, biyokömür nem içeriğinin azalmasına ve yapıda bozunmadan kalan polimerlerin camsı geçiş sıcaklığının yükselmesine neden olmuştur. Özellikle biyokütle içerisinde bulunan kimyasal bileşenlerden lignin polimerinin 140°C civarı düşük erime sıcaklığına sahip olduğu ve biyokütleye uygulanan termal işlem sırasında yumuşayarak termoset özellik kazandığı ve doğal bağlayıcı görevi yaptığı bilinmektedir. Fakat biyokömür numunelerinin 290°C sıcaklıkta torrefaksiyon prosesi ile hazırlanması, polimerik akışı kısıtlamış ve biyokömür yapısındaki parçacıklar arasında katı köprüler oluşumunu azaltmıştır. Bu yüzden yapıda kovalent ve hidrojen bağları yerine moleküller arası etkileşim kuvvetleri olan Van der Waals kuvvetleri etkin hale gelmiş ve biyopelet örneklerinin dayanıklılığını düşürmüştür. 1. sette kırılma dirençlerinin düşük

olması, yapıdaki makromoleküllerin bozunmasından dolayı oluşan gözenekli yapının dayanıklılığı düşürmesiyle de açıklanabilir [133, 176, 179].

8.5.4 Biyopelet Numuneleri Suya Dayanım Testi Sonuçları

Peletlerin kullanım öncesi depolanma ve nakliye sırasında kısa süreli yağmura veya nemli ortamlara maruz kalması, pellet kalitesini olumsuz etkileyebilmektedir. Bu gibi durumların pellet kalitesi üzerindeki etkilerinin belirlenebilmesi için kullanılan bir başka parametre ise suya dayanım testleridir. Deney setlerine ait biyokömür örneklerinin 200 mL su içerisnde gerçekleştirilen anaiz sonuçları Tablo 8.41'de verilmiştir.

Tablo 8.41 Biyokömür peletleri suya dayanım sonuçları

Optimum Biyokömür Numunesi	**Suya Dayanım Süresi**
1.Set (SK-KB)	7 gün
2.Set (G-KB)	3 gün
3.Set (G-M)	10 gün
4.Set (SK-M)	10 gün

Yüksek sıcaklıkta torrefaksiyon prosesi uygulanmış numunelerden üretilen biyopelet örneklerinin suya dayanımlarının genel olarak iyi olduğu gözlenmiştir. Torrefaksiyon prosesi ile termal etkiden dolayı biyokütle yapılarındaki hemiselüloz molekülünün büyük ölçüde bozunması, yapıdan hidroksil, karbonil ve karboksil gruplarının uzaklaşmasına neden olmuştur. Bu durum biyopeletlerin su absoplama özelliklerini azaltarak, hidrofobik karakter kazanmalarına yardımcı olmuştur. 2. deney seti ile hazırlanan biyopeletlerin suya dayanımlarının diğer peletlere göre daha düşük çıkması sıkıştırma testi ile paralellik göstermiştir. Bu biyopelette torrefaksiyon prosesi ile hemiselüloz molekülünün daha fazla bozunduğu düşünülmektedir. Ayrıca doğal bağlayıcı amacıyla kullanılan keçiboynuzu atık oranının düşük olmasının da sonuçları desteklediği görülmüştür [121, 176].

9
SONUÇ ve ÖNERİLER

9.1 Sonuçlar

Enerji elde etmek amaçlı yanma proseslerinde kullanılan biyokütlenin oluşturduğu dezavantajları gidermek, yanma özelliklerini iyileştirmek ve enerji içeriğini fosil enerji kaynaklarından olan kömüre yaklaştırabilmek için ülkemizde geniş yetiştirilebilme potansiyeli bulunan sığırkuyruğu ve geven bitkilerine torrefaksiyon prosesi uygulanmıştır. Proses koşulları literatür araştırmaları ve ön denemeler sonucu bağımsız değişkenler olarak; Proses sıcaklığı (200-320°C), proses süresi (15-75 dk), biyokütle tanecik boyutu (1-5 mm) ve organik endüstriyel atık oranı (%0-100 ağ/ağ) şeklinde belirlenmiştir. Torrefaksiyon prosesi deney planı için optimizasyon programı olana Design Expert Optimizasyon programından yararlanılmış ve Cevap Yüzey Metodu/Merkezi Kompozit Tasarımı ile oluşturulmuştur. Her biyokütle için ayrı ayrı oluşturulan deney setleri ile biyokömür örneklerinin üretimi gerçekleştirilmiş ve karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Analiz sonuçları design expert programı desirability fonksiyonu ile çözümlendirilerek optimum torrefaksiyon proses koşulları belirlenmiştir. Her deney seti için belirlenen optimum koşullar da optimum biyokömür numuneleri üretilmiştir. Tezin 2. aşamasında ise optimum biyokömür numuneleri kullanılarak yoğunlaştırılmış ürünler elde etmek için hidrolik pres yardımı ile sabit basınçta (25MPa) biyopelet örnekleri üretilmiştir. Alternatif enerji kaynakları olarak değerlendirilebileceği düşünülen biyopeletlerin yakıt karakteristik özellikleri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- Torrefaksiyon prosesi öncesi, kullanılan biyokütle ve organik atıkların kısa analiz sonuçları termogravimetrik analizden yararlanılarak elde edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre sığır kuyruğu biyokütlesinin nem ve kül içeriğinin, gevenin ise uçucu madde ve sabit karbon içeriğinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Biyokütlelerin mineral içeriklerinden dolayı yanma proseslerinde yüksek miktarda

kül açığa çıkardıkları bilindiği için yüksek kül içerikleri literatür bilgisi ile uyumlu bulunmuştur.

- Biyokütlenin yanma karakteristik özelliği sabit karbon içeriği ile ilişkilendirilerek, düşük nem ve kül içermesi ile birlikte %sabit karbon içeriği yüksek olan geven enerji bitkisinin üst ısıl değerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. %14,99 sabit karbon içeriğine sahip Geven için üst ısıl değer 18,44 MJ/kg olarak ölçülürken, sığır kuyruğu için sabit karbon içeriğinin %12,19 ve üst ısıl değerin ise 16,68 MJ/kg olduğu gözlenmiştir.
- Torrefaksiyon prosesinde kullanılan biyokütle ve endüstriyel organik atıkların kalorimetre bombası ile tayin edilen üst ısıl değerlerinin 15,86 MJ/kg ile 18,44 MJ/kg arasında değiştiği bulunmuştur.
- Torrefaksiyon prosesi sonrası üretilen biyopelet örneklerinde özellikle doğal bağlayıcı olarak işlev görmesi amaçlı biyokütle karışımlarında kullanılan keçiboynuzu ve mısır organik atık katkı maddelerinin nem ve uçucu madde içeriklerinin yüksek, kül içeriklerinin ise düşük olduğu gözlenmiştir. Mısır ve keçiboynuzu katkı maddelerinin %sabit karbon içeriklerinin de enerji bitkileri gibi yüksek çıkması, bağlayıcı özelliklerinin yanı sıra torrefaksiyon prosesi ile üretilen biyokömür numunelerinin kalorifik değerlerine katkı sağladıklarını göstermiştir.
- Torrefaksiyon prosesi uygulanan deney setlerinin kısa analiz sonuçları incelendiğinde, proses sıcaklığındaki artış sonucu biyokömür numunelerinin uçucu madde içeriklerinde azalış gözlenirken, sabit karbon içeriklerinde ve proses sonrası bıraktıkları kül miktarında ise artış olduğu belirlenmiştir. Ayrıca artan proses sıcaklığı ile birlikte biyokütle yapısından uzaklaşan uçucu madde miktarına bağlı olarak yüksek kalorifik değere sahip biyokömür üretiminin gerçekleştirildiği sonucuna varılmıştır. En yüksek kalorifik değerin 320°C de 2. deney setine ait Geven-Keçiboynuzu biyokömür numunelerinde 24,79 MJ/kg olarak, yine aynı sıcaklıkta en düşük kalorifik değerin ise 4. deney setine ait Sığır kuyruğu-Mısır biyokömür numunelerinde 23,47 MJ/kg olarak gözlendiği bulunmuştur.

- Torrefaksiyon proseslerinde sıcaklık artışı ile üretilen biyokömür numunelerinin içerdikleri sabit karbon miktarlarında 1. Set (SK-KB) için %30,7-%33,15 aralığında, 2. Set (G-KB) için %15,18-%35,06 aralığında, 3. Set (G-M) için %18,43-%38,31 aralığında ve 4. Set (SK-M) için %14,78-%49,96 aralığında artış gözlendiği belirlenmiştir. Sıcaklığa bağlı olarak en fazla sabit karbon içerikli biyokömür numunelerine 4. Set numuneleri üretim koşullarında erişildiği sonucuna varılmıştır.
- Biyokömür üretiminde yararlanılan ham biyokütle ve organik katkı maddelerine uygulanan elementel analiz sonuçları incelendiğinde karbon ve oksijen içeriklerinin birbirine yakın olduğu, hidrojen içeriklerinde ise değişkenlikler gözlendiği belirlenmiştir. Torrefaksiyon prosesi ile değişik sıcaklıklarda üretilen biyokömür numunelerinin elementel analiz sonuçları incelendiğinde ise artan proses sıcaklığı ile belirgin bir şekilde biyokömür karbon içeriğinin arttığı, oksijen içeriğinin azaldığı, hidrojen içeriğinde ise çok belirgin olmamakla beraber bir miktar azalma gözlendiği tespit edilmiştir. Biyokömür yapısındaki elementlerin oranlarında gözlenen bu değişikliklere bağlı olarak da üst ısıl değerlerinde artış gözlendiği belirlenmiştir. Yakıtlarda karbon ve hidrojen içeriklerinin yanma proseslerinde ısı üretiminin temelini oluşturduğu fakat hidrojen fazlasının da karbon oranını azalttığı ve yakıt üst ısıl değer içinde azaltıcı etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Buna bağlı olarak artan torrefaksiyon sıcaklığı ile karbon içeriğindeki artış ve oksijen içeriğindeki azalışa bağlı yakıt kalitesi artırılmış biyokömür üretiminin sağlandığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca artan torrefaksiyon sıcaklığı ile biyokütle yapısındaki hemiselülozun büyük bir kısmının selülozun ise bazı fraksiyonlarının bozunması sonucu düşük enerji içeriğine sahip H-C ve O-C bağlarında azalma, C-C bağında ise artış oluştuğu ve buna bağlı olarak düşük O/C ve H/C oranlarına sahip enerji yoğunluğu artırılmış biyokömür ürünleri üretilebildiği sonucuna varılmıştır.
- Elementel analiz sonuçlarına göre oluşturulan Van Krevelen diyagramı da, artan proses sıcaklığı ile üretilen biyokömür numunelerinin yakıt

özelliklerinde iyileşme gözlendiğini ve yakıt özelliklerinin linyit kömürü yakıt özelliklerine yaklaştığını desteklemiştir.

- Farklı proses koşullarında üretilen torrefiye biyokömür numunelerinin renklerinde de değişimler gözlenmektedir. Bu üretinen biyokömür numunelerinin renklerindeki koyulaşmanın nedeni, literatür araştırmalarından da anlaşıldığı gibi proses şartlarına bağlı olarak biyokütle yapısındaki hafif bileşenlerin buharlaştırılması ve selüloz, lignin gibi daha ağır bileşenlerin ise bozunarak yapıdan uzaklaştırılması ile açıklanabileceği düşünülmüştür.
- Biyokütle yapısına bağlı olarak değişen hemiselüloz, selüloz ve lignin oranlarının belirlenebilmesi için gerçekleştirilen makromoleküler madde analizi sonuçlarına göre, biyokütle kaynağı olarak kullanılan sığır kuyruğu bitkisinin termal açıdan daha reaktif olduğu bilinen hemiselüloz içeriği bakımından daha zengin olduğu aynı zamanda lignin içeriğinin de yüksek olduğu, katkı maddesi amaçlı kullanılan keçiboynuzu endüstriyel atığının da hemiselüloz açısından zengin olduğu görülmüştür. Lignoselülozik bitkilerin makromoleküler içeriklerinden dolayı doğal bağlayıcılık özelliği kazandığı, bu durumun da peletleme prosesini etkilediği sonucuna varılmıştır.
- Sığır kuyruğu ve geven enerji bitkileri ile endüstriyel keçiboynuzu ve mısır organik atıklarının Design Expert programı/cevap yüzey yöntemi/merkezi kompozit tasarımından yararlanılarak torrefaksiyon prosesi ile biyokömür üretimi için deney desenleri oluşturulmuştur. Tasarlanan deney koşulları ile gerçekleştirilen biyokömür üretimleri sonucu prosesi etkileyen bağımsız değişkenlerin birbirleri ve cevap yüzeyleri üzerindeki etkileri değerlendirilerek, ANOVA sonuçlarına göre, her deney setinde biyokömür üretimi için modelleme gerçekleştirilmiş ve torrefaksiyon optimum proses koşulları belirlenmiştir.
- 1.Set Sığır kuyruğu-Keçiboynuzu (SK-KB) biyokömür ürünü proses cevapları %Kütle kaybı, %Kütle verimi, %Enerji verimi için lineer model önerilmiştir. Proses cevapları için önerilen lineer model regresyon katsayıları sırası ile 0,8606, 0,8606 ve 0,8132 olarak bulunmuştur.

- Biyokömür üretimi proses cevapları üzerinde en etkili parametrenin torrefaksiyon sıcaklığı olduğu bulunmuş ve proses sıcaklığındaki artış ile biyokömür kütle kaybında artış, kütle verimi ve enerji veriminde ise azalış gözlendiği belirlenmiştir. Proses sıcaklığının yanı sıra %Enerji verimi için keçi boynuzu katkı maddesinin de etkili bir parametre olduğu ve sonuçları artırıcı yönde etkilediği gözlenmiştir.
- SK-KB torrefaksiyon prosesi için belirlenen modele design expert programında "desirability fonksiyonu" (istenebilirlik fonksiyonu) uygulanarak 1.Set biyokömür üretimi için optimum proses koşulları; 290°C proses sıcaklığı, 60 dakika proses süresi 4 mm biyokütle tanecik boyutu ve %75 keçiboynuzu katkı maddesi oranı şeklinde tespit edilmiştir. Program tarafından belirlenen optimum proses koşullarında üretilen optimum SK-KB biyokömür ürünü için kütle kaybı %64,00, kütle verimi %36,00, enerj verimi %49,25, enerji yoğunluğu 1,38 ve ısıl değer 21,71 MJ/kg olarak hesaplanmıştır.
- 2.Set Geven-Keçiboynuzu (G-KB) biyokömür ürünü proses cevapları içinde lineer model önerilmiş ve modele ait regresyon katsayıları sırası ile 0,9395, 0,9395 ve 0,8263 olarak bulunmuştur. G-KB biyokömür numunelerinin torrefaksiyon prosesi ile üretimi sırasında proses cevapları üzerinde en etkili parametrenin proses sıcaklığı olduğu tespit edilmiş ve %Kütle kaybını artırıcı yönde, %Kütle verimi ve %Enerji verimini ise azaltıcı yönde etki ettiği sonucuna varılmıştır.
- G-KB biyokömür üretimi torrefaksiyon prosesi için önerilen lineer modele design expert programında "desirability fonksiyonu" uygulanmış ve optimum proses koşulları; 290°C proses sıcaklığı, 57 dakika proses süresi 4 mm biyokütle tanecik boyutu ve %25 keçiboynuzu katkı maddesi oranı şeklinde tespit edilmiştir. Belirlenen bu optimum koşullar göz önüne alınarak üretilen optimum G-KB biyokömür numunesi için kütle kaybı %60,52, kütle verimi %39,48, enerj verimi %53,16, enerji yoğunluğu 1,31 ve ısıl değer 22,82 MJ/kg olarak hesaplanmıştır.
- 3.Set Geven-Mısır (G-M) torrefaksiyon prosesi sonucu hesaplanan %Kütle kaybı, %Kütle verimi ve %Enerji verimi proses cevapları için regresyon

katsayıları sırası ile 0,9315, 0,9315 ve 0,9262 olarak hesaplanmış ve lineer model ile açıklanabileceği tespit edilmiştir.

- 3.Set biyokömür üretiminde proses cevapları üzerinde en etkili parametrenin proses sıcaklığı olduğu ve %Kütle kaybını artırıcı, %Kütle verimi ve %Enerji verimini ise azaltıcı yönde etkilediği görülmüştür. Ayrıca sıcaklık parametresi haricinde, mısır katkı maddesi oranının da sonuçlar üzerinde etkili bir parametre olduğu ve %Kütle kaybı ile %Enerji verimini artırdığı, %Kütle verimini ise azalttığı görülmüştür. %Enerji verimi için aynı zamanda biyokütle tanecik boyutunun da artırıcı yönde etki ettiği tespit edilmiştir.
- G-M biyokömür ürünleri için kullanılan lineer modele design expert programı "desirability fonksiyonu" uygulandığında optimum torrefaksiyon proses koşulları; 290°C proses sıcaklığı, 60 dakika proses süresi 3 mm biyokütle tanecik boyutu ve %75 mısır katkı maddesi oranı olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda gerçekleştirilen torrefaksiyon prosesi ile üretilen optimum G-M biyokömür ürünü proses cevapları; %66,39 kütle kaybı, %33,66 kütle verimi, %43,74 enerji verimi, 1,30 enerji yoğunluğu ve ısıl değer 23,26 MJ/kg olarak hesaplanmıştır.
- 4.Set Sığır Kuyruğu-Mısır (SK–M) biyokömür üretimi içinde %Kütle kaybı, %Kütle verimi ve %Enerji verimi proses cevaplarının lineer model ile açıklanabileceği bulunmuş ve proses cevapları için önerilen lineer modellerin regresyon katsayıları sırası ile 0,8576, 0,8576 ve 0,8292 olarak hesaplanmıştır.
- SK-M biyokömür üretimi için torrefaksiyon prosesi üzerinde en etkili parametrenin sıcaklık olduğu, biyokömür %Kütle kaybını artırdığı, %Kütle verimi ve %Enerji verimini ise düşürdüğü bulunmuştur. Proses cevapları üzerinde etkili olduğu tespit edilen mısır katkı maddesi oranının ise %Kütle kaybını azalttığı, %Kütle verimi ve %Enerji verimini ise artırdığı sonucuna varılmıştır.
- Torrefaksiyon prosesi ile SK-M biyokömür üretimi için lineer model kullanılarak design expert programı "desirability fonksiyonu" uygulanmış ve optimum proses koşulları; 290°C proses sıcaklığı, 60 dakika proses

süresi 4 mm biyokütle tanecik boyutu ve %70 mısır katkı maddesi oranı olarak belirlenmiştir. Tespit edilen optimum proses koşullarında üretilen optimum SK-M biyokömür ürünü için proses cevapları; %70,87 kütle kaybı, %29,13 kütle verimi, %37,91enerji verimi, 1,32 enerji yoğunluğu ve ısıl değer 22,28 MJ/kg olarak bulunmuştur.

- Torrefaksiyon proses sonuçlarının proses sıcaklığından nasıl etkilediğinin incelenmesi amacı ile gerçekleştirilen analizler sonucunda; 1.Set için 200°C ve 320°C aralığında kütle kaybı, kütle verimi, enerji verimi, enerji yoğunluğu ve ısıl değerler sırası ile %16,44-70,32, %83,56-29,68, %99,03-37,62, 1,19-1,27, 19,19-23,79 MJ/kg olarak bulunmuştur. 2.Set için aynı sıcaklık aralığında bu değerler sırası ile; % 22,46-64,55, %77,54-35,45, %78,85-39,71, 1,02-1,12, 19,52-24,79 MJ/kg olarak hesaplanmıştır. 3.Set için yine aynı sıcaklık aralığında analiz sonuçları sırası ile; %18,49-69,79, %81,51-30,21, %96,18-37,01, 1,18-1,23, 20,71-24,43 MJ/kg olarak hesaplanmıştır. 4.Set için bu değerler sırası ile %23,14-77,04, %76,86-22,96, %80,62-26,28, 1,05-1,14, 19,56-23,47 MJ/kg olarak bulunmuştur.
- Proses sonuçlara bakıldığında artan proses sıcaklığı ile kütle kaybının arttığı, kütle verimi ve enerji veriminde ise azalma gözlendiği görülmüştür. Ayrıca sonuçlar incelendiğinde torrefaksiyon prosesi ile biyokütle yapısında gözlenen termal bozunma ile üretilen biyokömür ürünlerinde yüksek kütle kaybına bağlı olarak, kütle verimliliğindeki azalışın enerji verimindeki azalıştan daha fazla olması sonucu enerji yoğunluğu ve kalorifik değeri artırılmış biyoyakıt üretiminin gerçekleştirildiği sonucuna varılmıştır.
- Farklı biyokütle ve organik katkı maddeleri kullanılarak gerçekleştirilen torrefaksiyon deney setlerinde, uzun proses sürelerinin, torrefaksiyon ürün sonuçlarında sıcaklık kadar etkili bir parametre olmadığı görülmüştür. Artan reaksiyon sürelerinin üretilen biyokömür ürünü %Kütle kaybını artırdığı, %Kütle verimi ve %Enerji verimini ise azalttığı gözlenmiştir. Fakat bu etkinin proses başlangıcında daha net gözlemlendiği ve torrefaksiyon süresi uzadıkça biyokütle yapısındaki hemiselüloz yerine daha az reaktif olan bileşenlerin ayrışmaya başlamasından dolayı kütle verimine çok fazla katkıda bulunmadığı sonucuna varılmıştır.

- Torrefaksiyon prosesinde kullanılan biyokütle tanecik boyutunun, biyokömür ürün verimleri üzerindeki etkisi incelendiğinde en belirgin etkinin 3.Set G-M biyokömür ürünlerinde gözlendiği tespit edilmiştir. 260°C'de artan tanecik boyutlarına göre ürün verimleri incelendiğinde; 1 mm tanecik boyutunda %Kütle kaybı 57,37 iken 3mm tanecik boyutunda 49,04 ve 5 mm tanecik boyutunda ise 48,77 olduğu görülmüştür. Küçük tanecik boyutunda kütle verimi %42,63 iken tanecik boyutu arttıkça 5 mm tanecik boyutunda %52,23'e ulaştığı, %Enerji veriminin de %55,40 değerinden %68,42 değerine ulaştığı görülmüştür. Biyokömür ısıl değerinin ise 22,21MJ/kg değerinden 25,33MJ/kg değerine ulaştığı tespit edilerek, artan tanecik boyutu ile kütle kaybının azaldığı, kütle verimi ve enerji veriminin arttığı ve yüksek kalorifik değere sahip biyokömür örnekleri elde edildiği sonucuna varılmıştır.
- Torrefaksiyon deney setleri optimum biyokömür numuneleri TGA eğrileri incelendiğinde en yüksek kütle kaybı 3.Set G-M biyokömür ürünlerinde gözlenmiştir. Bu durumun biyokütle moleküler yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Deney setleri ile üretilen biyokömür ürünleri DTG eğrilerinden 100°C sıcaklık altında pikler gözlenmiştir. Bu durumun, biyokütlelerin termal işlem sonucu gözenekli yapıya kavuşmaları ve bu gözeneklerin ortam nemini tutmaları ile açıklanabileceği düşünülmüştür.
- Torrefaksiyon prosesi ile üretilen optimum biyokömür numuneleri FT-IR spektrumlarında 3200 cm^{-1} dalga boyu civarında düşük şiddette gözlenen OH gerilme titreşim piki, biyokömür numunelerinde hidrojen bağlarının kırılması ve hidroksil gruplarının azalması sonucu gözlenmiştir. Bu durum, biyokömürün hidrofobik özellik kazanması ile yorumlanmıştır.
- Biyokömür SEM görüntüleri incelendiğinde, yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen torrefaksiyon prosesleri sonucu biyoyakıtlardaki bitişik parçacıklar arası zayıf yapışma ile parçacıklar arasında boşlukların oluştuğu görülmüştür. Ayrıca torrefaksiyon sonucu biyokömürün yapısındaki uçucuları ve selülozu kaybetmesi de bu durumu desteklemiştir. SEM görüntüleri ile 1. ve 4.Deney setlerine ait optimum biyokömür numunelerinde daha fazla gözenekli yapının oluştuğu belirlenmiştir.

- Dört farklı deney seti için belirlenen optimum koşullarda üretimi gerçekleştirilen biyokömür numunelerinin peletlenmesi ile elde edilen biyopeletlerin ısıl değerleri sırası ile 23,16, 23,69, 23,91 ve 24,24 MJ/kg olarak bulunmuştur. Bu ısıl değerlerin optimum biyokömür numuneleri ısıl değerlerinden daha yüksek hesaplanması, peletleme prosesi ile birim hacimdeki enerji miktarının artışı ile açıklanmıştır.
- Biyopelet numunelerinin depolanma, nakliye ve kullanımları sırasında göstermeleri gereken mukavemetin test edilebilmesi için uygulanan düşme direnci analiz sonuçları incelendiğinde, her deney seti için üretilen optimum biyopelet numunelerinin shatter indeks değerleri sırası ile %75,40, %60,78, %98,69 ve %99,24 olarak bulunmuştur. Daha yüksek nem içeriğine sahip 2. Deney seti optimum koşullarında üretilen biyopelet numunesinin, diğer biyopeletlere oranla daha düşük düşme direncine sahip olduğu bulunmuştur. Nem oranının yanı sıra pelet katkı maddesi içeriğinin de az olması, peletleme prosesinde istenilen bağlayıcılık özelliğine ulaşılamadığını göstermiştir. En yüksek düşme direncine 4. deney seti optimum biyopelet ürünlerinde ulaşılmıştır.
- Her deney seti için üretilen biyopeletlerin kırılmadan dayanabileceği maksimum kırılma yükünün belirlenebilmesi için uygulanan sıkıştırma direnci sonuçları incelendiğinde; 2.Deney seti biyopelet numunesinin 350 N kırılma kuvveti ile en düşük sıkıştırma direncine sahip olduğu, en dayanıklı peletin ise 948 N kırılma kuvveti ile 4.Set biyopeletinin olduğu belirlenmiştir. 2.Deney seti biyopeletlerinin daha kırılgan olması ayrıca yüksek nem içeriğinden dolayı peletleme prosesi sırasında yapıdaki parçacıkların zayıf mekanik bağlar oluşturmasıyla da açıklanabilmektedir.
- Pelet kalitesinin belirlenebilmesi için uygulanan suya dayanım testi sonuçları 2.deney seti biyopelet ürününün suya dayanımının düşük olduğunu göstermiştir. Biyopeletlerin hazırlanmasında kullanılan biyokömür numunelerinde torrefaksiyon prosesi ile biyokütle yapısındaki hidroksil gruplarının uzaklaştırılması, hidrojen bağlarının azalmasına ve su absorplama özelliğinin azalarak hidrofobik özellik kazanmasına katkı

sağladığını göstermiştir. Torrefaksiyon prosesinin biyopelet numunelerinin suya dayanımına katkı sağladığı sonucuna varılmıştır.

- Üretilen biyopeletler için gerçekleştirilen karakterizasyon çalışmaları sonucunda 3. ve 4.Set optimum biyokömür numuneleri ile üretilen biyopeletlerin biyoyakıt amaçlı kullanıma daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

9.2 Öneriler

- Biyopelet üretiminde bağlayıcı amaçlı kullanılan organik endüstriyel atıklar, biyokömür üretimi sonrası pellet üretim aşamasında karışıma eklenerek peletleme prosesinde bağlayıcıların etkisinin daha net araştırılabilmesi sağlanabilir.
- Linyit kömürünün yakıt özelliklerini geliştirebilmek amacı ile üretilen biyokömür ürünleri linyit kömürü ile beraber peletlenebilir ve üretilen peletler, biyokömür peletler ile karakteristik yakıt özellikleri bakımından karşılaştırılabilir.
- Üretilen biyopeletlerin uzun süre depolanabilirliği ve öğütülebilirliği yakıt yanma kalitesini önemli ölçüde etkilediği için bu parametreler ayrıntılı olarak incelenebilir.
- Üretilen biyopeletlerin mekanik özelliklerinin geliştirilebilmesi için farklı bağlayıcılar ile üretim ve karakterizasyon çalışmaları denenebilir.
- Biyokömür üretiminde kullanılabilecek enerji bitkilerinin sürekliliği ve ulaşılabilirliği açısından enerji tarımı yapılarak, ekonomiye katkı sağlanabilir.
- Biyokömür üretiminde endüstriyel organik atık kullanımından yararlanılarak atık yönetimi sağlanabilir ayrıca ülkemizde yaygın olarak yetişebilen farklı enerji bitkilerinden biyokömür üretimi ve karakterizasyon çalışmaları yapılarak, fosil enerji kaynaklarının kullanımı ve enerji bakımından dış ülkelere bağlılık azaltılabilir.

KAYNAKÇA

[1] Ö. Külekçi, "Yenilenebilir enerji kaynakları arasında jeotermal enerjinin yeri ve türkiye açısından önemi," Ankara Üniversitesi Çevrebilimleri Dergisi, 1, 2, 83-91, 2009.

[2] H. Can, "Yenilenebilir enerjinin makroekonomik etkileri: Türkiye örneği," Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Tekirdağ, 2017.

[3] F. Akınerdem, "Biyoyakıtların Türkiye açısından önemi ve tarım ve enerji sektörüne etkisi," Enerji Tarımı ve Biyoyakıtlar 4. Ulusal Çalıştayı, 2014, 1-5.

[4] M. Ertaş, "Bazı artık biyokütlelerin yavaş pirolizi ve piroliz ürünlerinin karakterizasyonu," Doktora Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.

[5] Ö. Korkmaz ve A. Develi, "Türkiye'de birincil enerji kullanımı, üretimi ve gayri safi yurt içi hasıla (GSYİH) arasındaki ilişki," Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 27, 2, 1-25, 2012.

[6] E. Koç ve M. C. Şenel, "Dünyada ve Türkiye'de enerji durumu-Genel değerlendirme," Mühendis ve Makina, 54, 639, 32-44, 2013.

[7] A. Tabak, "Karabük şartlarinda fv güneş enerjisi, rüzgar enerjisi ve biyogaz hibrit enerji üretim sisteminin potansiyel araştirmasi ve sistemin optimizasyonu," Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2018.

[8] G. Kızılel, "Türkiye'deki hidroelektrik enerjisi ile diğer enerji türlerinin karşılaştırılması ve muğla ili'nin hidroelektrik enerji potansiyeli," Yüksek Lisans Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla, 2016.

[9] F. Lebe, "Türkiye'de enerji piyasası ve enerji talebi: Elektrik ve doğal gaz enerjisi için ekonometrik bir uygulama," Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Erzurum, 2012

[10] D. Kopuz, "Kömür-biyokütle karışımlarının yanma davranımlarının incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.

[11] A. Severoğlu, "Katı biyoyakıt üretimi," Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2010.

[12] E. A. Ayhan, "Enerji kaynakları, Dünya enerji güvenliği ve Orta Asya jeopolitiği çerçevesinde Türkiye 'nin enerji politikaları ve ekonomik yansımaları," Yüksek Lisans Tezi, Kafkas Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kars, 2009.

[13] Ö. Avcı, "Türkiye-Avrupa Birliği enerji üretim ve tüketiminin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi," Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2009.

[14] A. T. Çakır, "Türkiye'nin enerji potansiyeli, dağılımı, izlenilen enerji politikaları ile bu potansiyelin malatyakullanılması ve Türkiye'de enerjinin geleceği," Yüksek Lisans Tezi, Eskisehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2008.

[15] Botaş, "2015 Sektör Raporu," Ankara, 2015.

[16] TMMOB makina mühendisleri odası, "Türkiye'nin enerji görünümü oda raporu," Yayın No: MMO/691, Ankara, 2018.

[17]https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019/gas#abstract, 02.02.2020.

[18] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Dünya ve Türkiye enerji ve tabii kaynaklar görünümü, 01 Ocak 2017 itibarıyla," 2017.

[19] K. Yavuz Aslan, "Türkiye'nin enerji politikalarının, nükleer enerji tercihindeki etkisi," Adnan Menderes Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 5, 3, 38-57, 2018.

[20] https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Nukleer-Enerji, 02.02.2020.

[21] M. Er, "Konya bölgesi için alternatif biyokütle esaslı enerji sistemlerinin tekno-ekonomik değerlendirilmesi," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul, 2017.

[22] Ö. Kayın, "Binalarda enerji modellemesi, enerji performans analizi ve yenilenebilir enerji kullanımının çevre dostu yeşil bina uygulama örneği kapsamında değerlendirilmesi," Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, 2019.

[23] S. Keleş, "Hızlı piroliz yöntemi ile fındık kupulasının katalitik pirolizi ve sıvı ürünlerin karakterizasyonu," Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2009.

[24] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Türkiye ulusal yenilenebilir enerji eylem planı," 2014.

[25] C. Şahin, "Düşük sıcaklıklı jeotermal sahalarda organik rankin çevrimi (orc) ile elektrik enerjisi üretiminde Afyon Jeotermal Elektrik Üretim A.Ş. modellemesi," Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 2016.

[26] P. Yanar, "Ege bölgesi jeotermal sularında lityum, bor ve arsenik düzeylerinin incelenmesi ve bu elementlerin jeotermal sulardan seçimli olarak ayrılması," Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2015.

[27] https://www.enerji.gov.tr/tr-tr/sayfalar/jeotermal, 10.02.2020.

[28] H. Yousefi, A. Abbaspour and H. R. Seraj, "The role of geothermal energy development on CO_2 emission by 2030," Proceedings, 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, 11-13 February 2019, California.

[29] International Renewable Energy Agency (IRENA), "Geothermal power technology brief," September 2017.

[30] https://www.yenienerji.com/turkiye-yenilenebilir-enerji-potansiyeli, 10.02.2020.

[31] A. Koç, H. Yağlı, Y. Koç ve İ. Uğurlu, "Dünyada ve Türkiye'de enerji görünümünün genel değerlendirilmesi," Mühendis ve Makina, 59, 692, 86-114, 2018.

[32] M. Y. Avcılar ve G. Yenilmez, "Perakendecilerin kurumsal sürdürülebilirlik stratejileri kapsaminda yenilenebilir enerji kaynak kullanımı düzeylerine ilişkin literatür incelemesi," 8. Ulusal Lojistik ve Tedarik Zinciri Kongresi Bildiriler Kitabı, 36-52, Nisan 2019

[33]https://www.academia.edu/33767133/dünyada_ve_türkiyede_yenilenebilir_enerji, 11.02.2020.

[34] K. Kaya, M.C. Şenel ve E. Koç, "Dünyada ve Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi," Technological Applied Sciences (NWSATAS), 13, 3, 219-234, 2018.

[35] P. Karaköse, "Kıyıdan uzak tip dalga enerjisi dönüştürücüsünün deneysel olarak geliştirilmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2019.

[36] M. Sağlam ve T. S. Uyar, "Dalga enerjisi ve Türkiye'nin dalga enerjisi teknik potansiyeli," III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Bildiri Kitabı, Yeksem 2005, 19-21, Ekim 2005.

[37] F. Güngör, "İç denizlere uygun dalga enerjisi üretim sistemi," Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ordu, 2019.

[38] Ç. Duman, "Evaluation and comparison of the wave energy potential in selected coastal regions in Turkey," The Degree of Master, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Middle East Technical University, Ankara, 2010.

[39] M. Sağlam, E. Sulukan and T. S. Uyar, "Wave energy and technical potential of Turkey," Journal of Naval Science and Engineering, 6, 2, 34-50, 2010.

[40] R. Habash, "Güneş tabanlı hidrojen enerjisi," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2018.

[41] N. Kılınç, "Hidrojen enerjisinin ve hidrojen teknolojilerinin ekonomideki yeri pazar gelisimi ve pazar payı üzerine bir arastırma," Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sakarya, 2008.

[42] http://www.yegm.gov.tr/teknoloji/h_enerjisi.aspx, 17.02.2020.

[43] https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Hidrojen-Enerjisi, 17.02.2020.

[44] International Renewable Energy Agency (IRENA), "Hydrogen: A renewable energy perspective report," 2nd Hydrogen Energy Ministerial Meeting, Tokyo, September, 2019.

[45] D. Bilgin, "Dünya biyo-enerji piyasalarindaki gelişmelerin Türkiye tarım sektörü üzerindeki etkileri: Kısmi denge tarım ticaret modeli ile etki analizi,"

Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Antalya, 2010.

[46] The World Energy Council 2016, "World energy resources," 2016.

[47] S. Günay, "Türkiye'de enerji tarımı amacıyla ayçiçeği, kanola ve soya fasulyesinin yetiştirilmesi," Doğu Coğrafya Dergisi, 13, 20, 163-181, 2008.

[48] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, REN21, "Renewables 2019 global status report," 2019.

[49] Z. Yılmaz, "Türkiye'nin mevcut enerji durumu," 8. Enerji Verimliliği Forumu ve Fuarı, İstanbul, 2017.

[50] İ. Kavaz, ve E. T. Karagöl, "Dünyada ve Türkiye'de enerji verimliliği," International Congress of Energy Economy and Security, ENSCON 19, December, 2019.

[51] Türkiye Doğal Gaz Dağıtıcıları Birliği Derneği, GAZBİR, "Dünya'da ve Türkiye'de enerji durumu," 2016.

[52] T. C. Enerji Ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Yayını, "Dünya ve ülkemiz enerji ve tabii kaynaklar görünümü," Sayı:14, 2016.

[53] N. Bilim, "Türkiye'nin elektrik enerjisi üretimindeki dışa bağımlılığın azaltılması için uygulanması gereken politikalar," Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi, SUJEST, 4, 2, 145-154, 2016.

[54] H. İ. Özgündüz, N. Acaralı, H. Saraç, "Türkiye'de yetişen C4 bitkilerinden enerji üretiminin incelenmesi," 3. Anadolu Enerji Sempozyumu, Muğla, Ekim, 2015.

[55] A. Tursi, "A review on biomass: importance, chemistry, classification, and conversion," Biofuel Research Journal, 22, 962-979, 2019.

[56] J. S. Tumuluru, S. Sokhansanj, C. T. Wright, R. D. Boardman and N. A. Yancey, "A review on biomass classification and composition, co-firing issues and pretreatment methods," 2011 ASABE Annual International Meeting, August, 2011.

[57] M. Topal and E. I. Arslan, "Biyokütle enerjisi ve Türkiye," VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, UTES'2008, Aralık, 2008.

[58] M. A. P. Moreno, E. S. Manzano and A. J. P. Moreno, "Biomass as renewable energy: worldwide research trends," Sustainability, 11, 863, 2019.

[59] P. Wild, "Biomass pyrolyis for chemicals," PhD Thesis, University of Groningen, Holland, 2011.

[60] N. Akdeniz Acar, "Bir biyogaz tesisinin üretim parametrelerinin deneysel olarak incelenmesi ve optimizasyonu," Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 2019.

[61] M. N. Cahyanti, T. R. Krishna, C. Doddapaneni and T. Kikas, "Biomass torrefaction: An overview on process parameters, economic and environmental aspects and recent advancements," Bioresource Technology, 301, 122737, 2020.

[62] O. Kazaz, "Biomass Energy Potential of Turkey," MSc. Thesis, Institute of Natural and Applied Sciences, Çukurova University, Adana, 2018.

[63] T. Bayramoğlu, "Biyokütle enerjisi ve yerel ekonomik kalkınma: Tra1 bölgesi'nde (Erzurum-Erzincan-Bayburt) biyokütle potansiyeli ve ekonomik etkileri üzerine bir saha araştırması," Doktora Tezi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, 2013.

[64] https://eigm.gov.tr/tr-bTR/Sayfalar/Biyokutle, 02.03.2020.

[65] E. Sözen, G. Gündüz, D. Aydemir ve E. Güngör, "Biyokütle kullanımının enerji, çevre, sağlık ve ekonomi açısından değerlendirilmesi," Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 19, 1, 148-160, 2017.

[66] E. Kapluhan, "Enerji coğrafyası açısından bir inceleme: biyokütle enerjisinin Dünya'daki ve Türkiye'deki kullanım durumu," Marmara Coğrafya Dergisi, 30, 97-125, 2014.

[67] Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, "Hidrolik ve yenilenebilir enerji çalışma grubu biyokütle enerjisi alt çalışma grubu raporu," Aralık 2007, Ankara.

[68] S. Sharma, R. Meena, A. Sharma and P. K. Goyal, "Biomass conversion technologies for renewable energy and fuels: A review note," IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), 11, 2, 1-8, 2014.

[69] P. Adams, T. Bridgwater, A. Lea-Langton, A. Ross and I. Watson, "Biomass Conversion Technologies," Greenhouse Gas Balances of Bioenergy Systems, 107-139, 2018.

[70] B. Çabuk, "Ay çekirdeği küspesinden biyokömür eldesi ve gazlaştırılması," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir, 2019.

[71] P. McKendry, "Energy production from biomass (part 2): Conversion technologies, review paper," Bioresource Technology, 83, 47–54, 2002.

[72] S. Öztürk Tophanecioğlu, "Tarımsal atıklarda hızlı piroliz yöntemiyle sentetik sıvı yakıt eldesinde piroliz parametrelerinin etkisi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 2009.

[73] M. Ateş, "Classification and evaluation of biomass in Turkey regarding to conformity aspect of thermochemical technologies," Master of Science Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Gebze Technical University, Gebze, 2019.

[74] M. Türkoğlu, "Gıda sanayii biyokütle atıklarının enerji potansiyeli ve geri kazanımı," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2010.

[75] A. Faaij, "Modern biomass conversion Technologies," Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 11, 343–375, 2006.

[76] M. Memici, "Domates hasat atıklarından biyokömür üretimi ve tarla koşullarında karbondioksit emisyonuna etkisinin belirlenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Isparta, 2018.

[77] S. Doğan, "Kamışın (Phragmites Australis) pirolizi ve piroliz ürünlerinin değerlendirilebilirliğinin araştırılması," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, 2017.

[78] E. Bilgiç, "The comparison of effects of torrefaction and carbonization treatments on biomass," M.Sc. Thesis, Graduate School of Science Engineering and Technology, Istanbul Technical University, Istanbul, 2014.

[79] M. Pala, "Hydrothermal conversion of biomass," Master Thesis, Institute of Natural and Applied Sciences, Ege University, İzmir, 2013.

[80] A. Akgül, "Optimum determination of number, capacity and location of bioenergy power plant/s by using geographic ınformation system: a case study in bismil," Master Thesis, Graduate School of Natural & Applied Sciences, Gaziantep University, Gaziantep, 2018.

[81] İ. Üçgül ve G. Akgül, "Biyokütle teknolojisi," Yekarum Dergi, 1, 1, 3-113, 2010.

[82] Ş. Gölbaşı, "Biyokütlenin termal bozunma süreçlerindeki gaz ürünlerinin incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2009.

[83] Y. Özay, H. Ateş ve F. Taner, "Biyokütle dönüşüm süreçleri," ISEM2014 Adıyaman, 2014.

[84] F. Z. Kahya, "Investigatıon of kayseri province biomass potential and technical and economic analysis of a pilot biogas plant," Master Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Erciyes University, Kayser, 2019.

[85] P. Basu, S. Rao and A. Dhungana, "An investigation into the effect of biomass particle size on its torrefaction," The Canadian Journal of Chemical Engineering, 91, 466-479, 2013.

[86] A. Pimchuai, A. Dutta and P. Basu," Torrefaction of agriculture residue to enhance combustible properties," Energy Fuels, 24, 4638–4645, 2010,

[87] K. Srirangan, L. Akawi, M. Moo-Young and P. Chou, "Towards sustainable production of clean energy carriers from biomass resources," Applied Energy, 100, 172‑186, 2012.

[88] A. Kumar, N. Kumar, P. Baredar and A. Shukla, "A review on biomass energy resources, potential, conversion and policy in India," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 45, 530–539, 2015.

[89] N. L. Panwara, S.C. Kaushikb and S. Kotharia, "Role of renewable energy sources in environmental protection: A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 1513–1524, 2011.

[90] https://www.elektrikport.com/makale-detay/yesilden-gelen-enerji biyokutle2-bolum/8571?, 05.03.2020.

[91] N. Nacar, Koçer ve A. Ünlü, "Doğu Anadolu Bölgesinin Biyokütle Potansiyeli ve Enerji Üretimi," Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları; 175- 181, 2007,

[92] M. Yıldız, "Atık yağlardan biyodizel üretim_ve karakterizasyonu," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, 2008.

[93] G. Akgün, H. Bayındır, H. Aydın ve Z. Düz, "Hayvansal yağlardan biodizel üretimi ve teknik değerlerinin belirlenmesi üzerine bir çalışma," V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu 2009, YEKSEM'09, 131-136, Diyarbakır, 2009.

[94] P. Wild, H. Reith and E. Heeres, "Biomass pyrolysis for chemicals," Biofuels, 2, 2, 185–208, 2011.

[95] M. Meteoğlu, "Çeşitli Biyokütle Numunelerinin Yanma Özelliklerinin İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2006.

[96] P.F.H. Harmsen, W.J.J. Huijgen, L.M. Bermúdez López and R.R.C. Bakker, "Literature review of physical and chemical pretreatment processes for lignocellulosic biomass," Biosynergy Project, Energy Research Centre of The Netherlands, September, 2010.

[97] E. Tiftik, "Çay fabrikası atığının pirolizi ve piroliz ürünlerinin incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara Üniversitesi, Ankara, 2006.

[98] E. Yılmazer, "Biyokütle yarıkoku kömür karışımlarının yanma davranımlarının incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2012.

[99] A. Demirbaş, "Biomass resource facilities and biomass conversion processingfor fuels and chemicals," Energy Conversion and Management, 42, 1357-1378, 2001.

[100] A. Çalışkan Sarıkaya, "The production of quality fuels from the co-combustion of original, pyrolysed lignite and torrefied, pyrolysed, original biomass blends," ," M.Sc. Thesis, Graduate School of Science Engineering and Technology, Istanbul Technical University, Istanbul, 2017.

[101] M. Kaya, "Kayın ağacı odun peletinin torrefaksiyonu ve torrefiye peletlerin yanma davranışı," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elâzığ, 2019.

[102] M. Sezek, "Endüstri Bitkileri ve Bitki Artıklarının Biyoyakıt Olarak Kullanımı," Alınteri Zirai Bilimler Dergisi, 33, 1, 105-111, 2018.

[103] L. Zeng-Hui and S. Hong-Bo, "Comments: Main developments and trends of international energy plants," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14, 530–534, 2010.

[104] Ş. Gizlenci ve M. Acar, "Enerji bitkileri tarımı ve biyoyakıtlar (biyomotorin, biyoetanol, biyomas)," Enerji Bitkileri ve Biyoyakıtlar Sektörel Rapor, T.C. Tarım ve Köyişleri Bakanlığı Tarımsal Araştırmalar Genel Müdürlüğü Karadeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Samsun, 2008.

[105] P. Balcı ve Y. Evren, "Biyokütle enerjisi Karacabey'in kırsal kalkınması için bir potansiyel olabilir mi?" Planlama, 25, 3, 227–237, 2015.

[106] A. Şahbaz, L. Ünlü ve S. Soylu, "Enerji üretiminde kullanılan bitkilerde ekonomik kayba neden olan zararlılar," Tarım Makinaları Bilimi Dergisi, 8, 3, 287-295, 2012.

[107] N. Saraçoğlu, "Biyokütlenin enerji üretiminde değerlendirilmesi," Türkiye IV. Enerji Sempozyumu, 10-12 Aralık, 501-507, Ankara, 2003.

[108] D. Angın ve S. Şensöz, "Aspir tohumu pres küspesinin prolizinde sürükleyici gaz (N2) akış hızının etkisi ve sıvı ürün karakterizasyonu," Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 18, 4, 535-542, 2006.

[109] M. Acaroğlu ve H. Hacıseferoğulları, "Biyokütle enerjisinde briketleme ve peletlemede yeni test prosedürleri," Enerji Tarımı ve Biyoyakıtlar 4. Ulusal Çalıştayı, 2014.

[110] J. S. Tumuluru, S. Sokhansanj, J. R. Hess, C. T. Wright and R. D. Boardman, "A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications," Industrial Biotechnology, 7, 5, 384-401, 2011.

[111] J. Poudel, T. I. Ohmb and S. C. Oh, "A study on torrefaction of food waste," Fuel, 140, 275–281, 2015.

[112] M. Phanphanich and A. Mani, "Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass," Bioresource Technology, 102, 1246-1253, 2011.

[113] Y. Işık, "Farklı biyokütle numunelerinden torrefaksiyon işlemi ile kaliteli yakıt peleti üretimi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2019.

[114] D. Li, "Impact of torrefaction on grindability, hydrophobicity and fuel characteristics of biomass relevant to Hawai'i," Master of Science, The University of Hawai'i, 2015

[115] B. Acharya, I. Sule and A. Dutta, "A review on advances of torrefaction Technologies for biomass processing," Biomass Conversion and Biorefinery, 2, 349–369, 2012.

[116] M.J.C. van der Stelt, "Chemistry and reaction kinetics of biowaste torrefaction," Phd Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, Holland, 2011.

[117] D. Medic, "Investigation of torrefaction process parameters and characterization of torrefied biomass," PhD Thesis, Iowa State University, Ames, Iowa, 2012.

[118] P.C.A. Bergman, A.R. Boersma, R.W.R. Zwart and J.H.A. Kiel, "Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations: Biocoal," Technical Report, Energy Research Centre of the Netherlands, ECN-C-05-013, Netherlands, December, 2005.

[119] J. S. Tumuluru, S. Sokhansanj, C. T. Wright, J. R. Hess and R. D. Boardman, "A review on biomass torrefaction process and product properties,"

Symposium on Thermochemical Conversion, Oklahoma State University, 2011.

[120] I. O. Sule, "Torrefaction behaviour of agricultural biomass," Master of Applied Science in Engineering, The University of Guelph, 2012.

[121] B. Acharya, "Torrefaction and pelletization of different forms of biomass of Ontario," The Degree of Master, The University of Guelph, 2013.

[122] L. J. R. Nunes, J. C. de Oliveira Matias and J. P. da Silva Catalão, "Torrefaction of biomass for energy applications from fundamentals to industrial," Elsevier, 89-124, 2018.

[123] D. R. Nhuchhen, P. Basu and B. Acharya, "A comprehensive review on biomass torrefaction," International Journal of Renewable Energy & Biofuels, 2014, 2014.

[124] B. Sungur, "Biyokütle/sıvı yakıt ve biyokütle/kömür karışımlarından üretilen peletlerin kazanda yakılmasının deneysel ve sayısal incelenmesi," Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, 2019.

[125] A. Tüplek, "Odun talaşı ve tozundan pelet biyoyakıt üretilmesi ve yanma analizi," Yüksek Lisans, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, 2011.

[126] B. Çelik, "Pellet üretim tesisinin fizibilitesi: Bartın örneği," Yüksek Lisans, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın Üniversitesi, Bartın, 2011.

[127] M. Dok, "Karadeniz bölgesinin tarımsal atık potansiyeli ve bunlardan pelet yakıt olarak yararlanılması," Enerji Tarımı ve Biyoyakıtlar 4. Ulusal Çalıştayı, Samsun, 28-29 Mayıs 2014, 211-222.

[128] J. Shao, W. Cheng, Y. Zhu, W. Yang, J. Fan, H. Liu, H. Yang, and H. Chen, "Effects of combined torrefaction and pelletization on particulate matter emission from biomass pellet combustion," Energy Fuel, 33, 8777−8785, 2019.

[129] T. Aydemir, "Farklı tarımsal artıklar kullanılarak hazırlanan karışım peletlerinde kenevir sapı kullanımının pelet kalite özellikleri üzerine etkisi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, 2017.

[130] S. Karayılmazlar, N. Saraçoğlu, Y. Çabuk ve R. Kurt, "Biyokütlenin Türkiye'de enerji üretiminde değerlendirilmesi," Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 13, 19, 63-75, 2011.

[131] E. Çatak, "Yumuşak ve sert odun peletlerinden torrefaksiyonla biyokömür üretimi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elâzığ, 2019.

[132] S. Haghighat Shishvan, "Biyokütle peletleme prosesinin karakterizasyonu," Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir, 2018.

[133] S. Sokhansanj, S. Mani, X. Bi, P. Zaini and L. Tabil, "Binderless pelletization of biomass," ASAE Annual International Meeting, 2005.

[134] S. Bilgin, A. Koçer, H. Yılmaz, M. Acar ve M. Dok, "Çay fabrikası atıklarınının peletlenmesi ve pelet fiziksel özelliklerinin belirlenmesi," Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 33, 70-80, 2016.

[135] https://www.stb.org.tr/Dosyalar/Arastirmalar/pelletbiomass.pdf, 16.03.2020.

[136] W. Stelte, A. R. Sanadi, L. Shang, J. K. Holm, J. Ahrenfeldt and U. B. Henriksen, "Recent development in bipmass pelletization- a review", BioResources, 7, 3, 4451-4490, 2012.

[137] H. Yılmaz, "Bazı tarımsal artıkların peletlenmesi ve pelet fiziksel özelliklerinin belirlenmesi üzerine bir araştırma," Yüksek Lisans, Fen Bilimleri Enstitüsü, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 2014.

[138] R. Garcia, M. V. Gil, F. Rubiera and C. Pevida, "Pelletization of wood and alternative residual biomass blends for producing industrial quality pellets," Fuel, 251, 739–753, 2019.

[139] A. G. Maraver and M. Carpio, "Chapter 4: Biomass pelletization process," Transactions on State of the Art in Science and Engineering, Wıt Press, UK, 85, 53-66, 2015.

[140] C. Calderon, M. Colla, J. M. Jossart, N. Hemeleers, G. Cancian, N. Aveni and C. Caferri, "Bioenergy europe statistical report 2019," European Bioenergy Outlook 2019/ Pellet, 2019.

[141] G. Küsek, C. Güngör, H. H. Öztürk ve Ş. Akdemir, "Tarımsal artıklardan biyopelet üretimi," Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 29, 2, 137-145, 2015,

[142] A. Anukam, S. Mamphweli, O. Okoh and P. Reddy, "Influence of torrefaction on the conversion efficiency of the gasification process of sugarcane bagasse," Bioengineering, 4, 22, 2017.

[143] A. Zheng, Z. Zhao, S. Chang, Z. Huang, K. Zhao, G. Wei, F. He and H. Li, "Comparison of the effect of wet and dry torrefaction on chemical structure and pyrolysis behavior of corncobs," Bioresource Technology 176, 15–22, 2015.

[144] J. Meng, J. Park, D. Tilotta and S. Park, "The effect of torrefaction on the chemistry of fast-pyrolysis bio-oil," Bioresource Technology, 111, 439–446, 2012.

[145] TAPPI T 204cm-97, (1997). Solvent extractives of wood and pulp.

[146] S. Li, S. Xu, S. Liu, C. Yang and Q. Lu, "Fast pyrolysis of biomass in free-fall reactor for hydrogen-rich gas," Fuel Processing Technology, 85, 1201–1211, 2004.

[147] TAPPI T 222 om-02, (2002), Acid-insoluble lignin in wood and pulp.

[148] M. Chaouch, M. Pétrissans, A. Pétrissans and P. Gérardin, "Use of wood elemental composition to predict heat treatment intensity and decay resistance of different softwood and hardwood species," Polymer Degradation and Stability, 95, 2255- 2259, 2010.

[149] P. C. A. Bergman, J. H. A. Kiel, "Torrefaction for biomass upgrading," 14th European Biomass Conference & Exhibition, France, 17-21, 2005.

[150] N. Kaliyan, R. Vance Morey, "Factors affecting strength and durability of densified biomass products," Biomass and Bioenergy, 33, 337-359, 2009.

[151] A. Özyuğuran, H. Haykırı Açma, "Afşin-Elbistan linyitinin biyokütle ve bağlayıcı katkısıyla briketlenmesi," Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part: C, Tasarım ve Teknoloji, 4, 3, 103-113, 2016.

[152] A. Er, S. Özdemir, "Tavuk gübresi ve tarımsal atıkların biyoyakıt karakterlerinin incelenmesi," Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22, 2, 489-494, 2018.

[153] Y. Zhang, F. Chen, D. Chen, K. Cen, J. Zhang and X. Cao, "Upgrading of biomass pellets by torrefaction and its influence on the hydrophobicity, mechanical property, and fuel quality," Biomass Conversion and Biorefinery, published online: 18 March 2020.

[154] D. Tito Ferro, V. Vigouroux, A. Grimm and R. Zanzi, "Torrefaction of agricultural and forest residues, " Cuba Solar Conference, 12-16, 2004.

[155] W. H. Chen, Y. Q. Zhuang, S. H. Liu, T. T. Juang, and C. M. Tsai, "Product characteristics from the torrefaction of oil palm fiber pellets in inert and oxidative atmospheres," Bioresource Technology, 199, 367–374, 2016.

[156] E. Erdoğan, "Atıklardan biyokömür eldesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir, 2015.

[157] H. Akçay, A. S. Anagün, "Multi response optimization application on a manufacturing factory," Mathematical and Computational Applications, 18, 3, 531-538, 2013.

[158] İ. Eren, "Patateslerin osmotik dehidrasyonunun "response surface" metodu kullanılarak optimizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir, 2004.

[159] T. A. Mamvura, G. Danha, "Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production," Heliyon 6, e03531, 2020.

[160] N. Cellatoğlu, M. İlkan, "Effects of torrefaction on carbonization characteristics of solid olive mill residue," BioResources, 11, 3, 6286-6298, 2016.

[161] Y. Uemura, N. O. Wissam, T. Tsutsui and S. Bt Yusup, "Torrefaction of oil palm wastes," Fuel, 90, 2585–2591, 2011.

[162] M. J. C. Van der Stelt, H. Gerhauser, J. H. A. Kiel and K. J. Ptasinski, "Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review," Biomass and Bioenergy, 35, 3748-3762, 2011.

[163] W. H. Chen, J. Peng and X. T. Bi, "A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 44, 847–866, 2015.

[164] J. Hong Peng, "A study of softwood torrefaction and densification for the production of high quality wood pellets," Doctor of Philosophy Thesis, The Faculty of Graduate Studies (Chemical and Biological Engineering), The University of British Columbia, 2012.

[165] M. KopczyńskI, J. Zuwała, "Torrefacted biomass – a new fuel for the power industry," Chemik, 67, 6, 540-551, 2013.

[166] N. Deveci Duranay, N. Çaycı, "Production of solid fuel with torrefaction from agricultural wastes," Research on Engineering Structures & Materials, 5, 3, 311-320, 2019.

[167] J. Poudel, S. Cheon Oh, "Effect of torrefaction on the properties of corn stalk to enhance solid fuel qualities," Energies, 7, 5586-5600, 2014.

[168] B. Arias, C. Pevida, J. Fermoso, M. G. Plaza, F. Rubiera and J. J. Pis, "Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass," Fuel Processing Technology, 89, 169-175, 2008.

[169] H. S. Kambo, A. Dutta, "Comparative evaluation of torrefaction and hydrothermal carbonization of lignocellulosic biomass for the production of solid biofuel," Energy Conversion and Management, 105, 746-755, 2015.

[170] M. Pach, R. Zanzi and E. Björnbom, "Torrefied biomass a substitute for wood and charcoal," 6th Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization, Malaysia, 20-22 May, 2002.

[171] J. H. Peng, H. T. Bi, S. Sokhansanj and J. C. Lim, "A study of particle size effect on biomass torrefaction and densification," Energy Fuels, 26, 3826−3839, 2012.

[172] B. Bay, "Çeşitli biyokütle kaynaklarının termal davranımının incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2006.

[173] W. H. Chen, P. C. Kuo, "A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry," Energy, 35, 2580- 2586, 2010.

[174] W. H. Chen, P. C. Kuo, "Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass, Energy, 36, 803- 811, 2011.

[175] Q. Chen, J. S. Zhou, B. Liu, Q. F. Mei and Z. Y. Luo, "Influence of torrefaction pretreatment on biomass gasification technology," Chinese Science Bulletin, 56, 14, 1449–1456, 2011.

[176] W. Stelte, C. Clemons, J. K. Holm, A. R. Sanadi, J. Ahrenfeldt, L. Shang and U. B. Henriksen, "Pelletizing properties of torrefied spruce," Biomass and Bioenergy, 35, 4690- 4698, 2011.

[177] G. Toscano, A. Pizzi, E. Foppa Pedretti, G. Rossini, G. Ciceri, G. Martignon and D. Duca, "Torrefaction of tomato industry residues," Fuel, 143, 89–97, 2015.

[178] I. Gravalos, D. Kateris, P. Xyradakis, T. Gialamas, S. Loutridis, A. Augousti, A. Georgiades and Z. Tsiropoulos, "A study on calorific energy values of

biomass residue pellets for heating purposes, “Forest Engineering: Meeting The Needs of The Society and The Environment, Formec, Italy, 2010.

[179] Z. Liu, Z. Jiang, Z. Cai, B. Fei, Y. Yu and X. Liu, “Effects of carbonization conditions on properties of bamboo pellets,” Renewable Energy, 51, 1- 6, 2013.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

İletişim Bilgisi: iremozgunduz@gmail.com

Konferans Bildirileri

1. Bildiri 1

H.İ. Özgündüz and N. Acaralı, "Biomass torrefaction process containing astragalus plant and carob," ICESME-2019, Girne, Cyprus (KKTC), pp.29, 2019.

2. Bildiri 2

H.İ. Özgündüz and N. Acaralı, "Biomass obtaining high energy efficiency biofuel via torrefaction process," NEM2019, İstanbul, Turkey, 129-134, 2019.

3. Bildiri 3

H.İ. Özgündüz and N. Acaralı, "A study on endemic plants used for bioenergy in Turkey," 3rd International Conference on Advances in Mechanical Engineering, İstanbul, Turkey, 2017.

4. Bildiri 4

H.İ. Özgündüz and N. Acaralı, "The evaluation of biomass convertion processing on organic residues for bioenergy," 3rd International Conference on Advances in Mechanical Engineering, İstanbul, Turkey, 2017.

Projeler

1. Farklı Enerji Bitkileri ve Organik Atıklar Kullanılarak Elde Edilen Enerji Peletlerinde Karakteristik Özelliklerin İncelenmesi, Yürütücü: Doç.Dr. Nil ACARALI, Yıldız Teknik Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü, FDK-2019-3605, 06/05/2019-06/07/2020, Araştırmacı.