

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TÜRK LİNYİT KÖMÜRLERİNİN ORGANİK KATKI MADDESİ KULLANILARAK
BRİKETLENMESİ**

BERRİN SAYGI YALÇIN

**DOKTORA TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. JALE GÜLEN**

İSTANBUL, 2017

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TÜRK LİNYİT KÖMÜRLERİNİN ORGANİK KATKI MADDESİ KULLANILARAK
BRİKETLENMESİ

Berrin SAYGI YALÇIN tarafından hazırlanan tez çalışması 21.07.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Jale GÜLEN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Jale GÜLEN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Güldem ÜSTÜN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Nil ACARALI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Selva ÇAVUŞ
İstanbul Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Burcu ÇORBACIOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi



Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün 2014-07-01-DOP02 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Linyit kömürlerinin organik katkı maddeleri ile briketlenmesini ve organik katkı maddelerine torrefaksiyon prosesi uygulanarak kömürle rekabet edebilecek nitelikte yakıtlar elde edilmesini öngeren bu çalışma 7 aşamadan oluşmaktadır. Çalışmanın ilk aşaması linyit kömürüne ve katkı maddelerine kısa analizler uygulanmasını kapsamaktadır. İkinci aşama, kömür ve katkı maddelerinin briketleme prosesine hazırlanmasını içermektedir. Üçüncü aşama linyit kömürü ve çeşitli katkı maddelerinden melez briketler üretilmesini, dördüncü aşama ise melez briketlere analizlerin yapılmasını kapsamaktadır. Beşinci aşamada analiz sonuçlarının değerlendirilmesi yapılmış, altıncı aşamada briketleme prosesinde kullanılan organik katkı maddelerine torrefaksiyon prosesi uygulanmıştır. Çalışmanın yedinci aşamasında elde edilen melez briketler ve torrefaksiyon prosesi sonucunda elde edilen ürünlerin ham linyit kömürü ile karşılaştırılması yapılmıştır. Doktora çalışmalarımda danışmanlığımı üstlenen, her daim destek ve yardımlarıyla yanımda olan, bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren, ilgi ve zamanını esirgemeyen Prof.Dr. Jale GÜLEN'e saygı ve sevgiyle teşekkür ederim. Tez izleme komitemde yer alan Prof. Dr. Güldem ÜSTÜN ve Yrd. Doç. Dr. Nil ACARALI'ya; doktora sürecim boyunca gösterdikleri anlayıştan ve önerilerden dolayı teşekkür ederim. Soma Kömür İşletmeleri A.Ş. çalışanlarına, hammadde olarak kullandığım kömürün temini konusundaki desteklerinden ve anlayışlarından dolayı teşekkür ederim. Çalışmalarım boyunca yardımını ve ilgisini eksik etmeyen, sahip olduğu engin tecrübeleri paylaşan ve her koşulda üzerimdeki desteğini sürdüren çalışma arkadaşlarım S. Ezgi ÇELİK, A. Bilal ÖZTÜRK, H. İrem ÖZGÜNDÜZ ve M. Enes ORUÇ'a, deneysel çalışmalarımın yanı sıra her konuda ve her koşulda destek olmaya devam eden, dostluğunu esirgemeyen öğrencim Burak GÜLEŞ'e ve kuzenim Gülşah KADIOĞLUN'a teşekkürlerimi sunarım. Bugünlere gelmemde büyük pay sahibi olan, hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen AİLEME en derin sevgilerimle teşekkür ederim.

Bu çalışmayı hayatımın her anında yanımda olan ve hiçbir konuda fedakarlıktan kaçınmayan canım annem Şaziye SAYGI'ya, canım babam Muzaffer SAYGI'ya, canım eşim Aykut YALÇIN'a, canım kardeşlerim Zeynep SAYGI IŞIK ve Mustafa IŞIK'a ithaf ediyorum.

Temmuz, 2017

Berrin SAYGI YALÇIN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	xiv
KISALTMA LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvi
ÇİZELGE LİSTESİ	xix
ÖZET	xxii
ABSTRACT.....	xxiv
BÖLÜM 1	
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	3
BÖLÜM 2	
ENERJİ NEDİR?.....	4
2.1 ENERJİ KAYNAKLARI	4
2.1.1 Birincil ve İkincil Enerji Kaynakları:	4
2.1.2 Yenilenemeyen Enerji Kaynakları	7
2.1.2.1 Petrol	7
2.1.2.2 Doğalgaz	8
2.1.2.3 Nükleer Enerji.....	10
2.1.2.4 Kömür.....	10
2.1.3 Yenilenebilir Enerji Kaynakları	12
2.1.3.1 Güneş Enerjisi.....	14
2.1.3.2 Rüzgar Enerjisi	14
2.1.3.3 Jeotermal Enerji	15
2.1.3.4 Hidrolik Enerji.....	16
2.1.3.5 Deniz ve Okyanus Enerjisi	16
2.1.3.6 Biyokütle Enerjisi.....	17
2.2 DÜNYA'DA ve TÜRKİYE'DE ENERJİ	18

BÖLÜM 3

KÖMÜR.....	23
3.1 Kömür Hakkında Genel Bilgi	23
3.2 Kömürün Kullanım Alanları	25
3.3 Kömürün Zenginleştirme Yöntemleri	25
3.3.1 Fiziksel Yöntemler.....	26
3.3.1.1 Gravite ayırma yöntemi	26
3.3.1.2 Manyetik ayırma yöntemi	26
3.3.2 Kimyasal Ayırma (Liçing) Yöntemi	27
3.3.3 Fizikokimyasal Ayırma Yöntemleri.....	27
3.3.3.1 Flotasyon	27
3.3.3.2 Yağ aglomerasyonu	28
3.3.4 Biyolojik Zenginleştirme Yöntemleri	29

BÖLÜM 4

4 KÖMÜRÜN BRİKETLENMESİ.....	30
4.1 Briketlemede Kullanılan Yöntemler	31
4.2 Briketlemeye Etki Eden Faktörler	32
4.2.1 Kömürün Doğası ve Özellikleri.....	33
4.2.2 Briketleme Sıcaklığı.....	34
4.2.3 Briketleme Basıncı ve Süresi.....	34
4.2.4 Tanecik Boyutu	35
4.2.5 Nem Miktarı.....	36
4.2.6 Bağlayıcı Özellikleri ve Miktarı.....	36
4.2.7 Briketlerin Geometrik Şekli.....	37
4.3 Briketlerde Aranılan Özellikler	37
4.3.1 Mekanik sağlamlık	38
4.3.2 Suya Dayanım	38
4.3.3 Yanma Özellikleri	38

BÖLÜM 5

BİYOKÜTLE	40
5.1 Biyokütlenin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	41
5.2 Enerji Üretimi için Biyokütle	43
5.3 Enerji Kaynağı Olarak Biyokütle Kullanımının Dezavantajları	43
5.4 Biyokütle İyileştirme Yöntemleri.....	44
5.4.1 Kimyasal Ön İşlemler	45
5.4.2 Mekanik Ön İşlemler.....	45
5.4.3 Isıl Ön İşlemler	45
5.4.4 Biyolojik Ön İşlemler	46
5.5 Biyokütle Dönüşüm Prosesleri	46
5.5.1 Termokimyasal Dönüşüm Prosesleri	47
5.5.1.1 Doğrudan yakma	48
5.5.1.2 Torrefaksiyon	49
5.5.1.3 Piroliz.....	49

5.5.1.4	Gazlaştırma	50
5.5.1.5	Sıvılaştırma	51
5.5.2	Biyokimyasal Dönüşüm Prosesleri	51
5.5.2.1	Özümseme	52
5.5.2.2	Fermantasyon	52
5.5.2.3	Hidroliz	52
5.5.3	Fiziksel Dönüşüm Prosesleri	53

BÖLÜM 6

KÖMÜRÜN BİYOKÜTLE İLE BRİKETLENMESİ ÇALIŞMALARI	54
---	----

BÖLÜM 7

TORREFAKSİYON (BİYOKÖMÜRLEŞTİRME)	62
7.1 Torrefaksiyon Prosesi Sonucunda Elde Edilen Ürünlerin Kullanım Alanları ..	63
7.2 Torrefaksiyon Prosesinin Diğer Termokimyasal Proseslerden Farkı	64
7.3 Torrefaksiyon Prosesin Ana Basamakları	66
7.4 Torrefaksiyonu Etkileyen Parametreler	68
7.4.1 Sıcaklık	68
7.4.2 Merkez Çekirdek Sıcaklığı	68
7.4.3 Kalma Zamanı	69
7.4.4 Biyokütle Tipi	70
7.4.5 Tanecik Boyutu	70
7.5 Torrefaksiyon Uygulanmış Biyokütlenin Fiziksel Özellikleri	71
7.5.1 Hacim ve Yoğunluk	71
7.5.2 Öğütülebilirlik	72
7.5.2.1 Torrefaksiyon parametrelerinin öğütülebilirliğe etkisi	72
7.5.3 Torrefaksiyon Prosesi Sonucunda Oluşan Ürünlerin Hidrofobikliği ..	72
7.5.3.1 Torrefaksiyon prosesi sonucunda biyokütle nasıl hidrofobik özellik kazanır	73
7.5.4 Torrefaksiyon İşlemi Uygulanmış Biyokütle Tozlarının Patlama Olasılığı	73
7.5.5 Torrefaksiyon İşlemi Uygulanmış Biyokütlenin Briketlenmesi	74
7.6 Literatürde Torrefaksiyon Prosesi İle İlgili Yapılan Çalışmalar	75

BÖLÜM 8

DENEYSEL TASARIM	78
8.1 Cevap Yüzeyleri	78
8.1.1 Cevap Yüzeyi Tasarımları:	79
8.1.1.1 Dönersel Tasarımlar Ve Özellikleri:	79
8.2 Merkezi Kompozit Tasarım	79

BÖLÜM 9

DENEYSEL ÇALIŞMALAR	83
9.1 Deneylerde Kullanılan Hammadde ve Katkı Maddeleri	83
9.2 Kömür ve Katkı Maddelerine Uygulanan Ön İşlemler	85

9.3 Kömür ve Katkı Maddelerinin Karakterizasyonu	86
9.3.1 Kömür ve Katkı Maddelerinin Nem Miktarı Analizi	86
9.3.2 Kömür ve Katkı Maddelerinin Kül Miktarları Analizleri	87
9.3.3 Kömür ve Katkı Maddelerinin Uçucu Madde Miktarlarının Belirlenmesi	88
9.3.4 Kömür ve Katkı Maddelerinin Isıl Değer Analizleri	89
9.3.5 Katkı Maddelerinin Ekstraktif Madde Analizi	89
9.3.5.1 Katkı maddelerinin hemiselüloz miktarının belirlenmesi	90
9.3.5.2 Lignin Miktarlarının belirlenmesi	90
9.4 Kömürün Briketlenmesi Prosesi	91
9.5 Briketlerin Karakterizasyonu	92
9.5.1 Briketlere Uygulanan Kimyasal Testler	92
9.5.2 Briketlere Uygulanan Fiziksel Testler	93
9.5.2.1 Briketlerin Shatter İndeksinin (Düşme Sağlamlığının) Belirlenmesi	93
9.5.2.2 Briketlerin Suya Dayanımının Belirlenmesi	93
9.6 Biyokütlelere Torrefaksiyon Prosesinin Uygulanması	93
9.7 Torrefaksiyon Sonucunda Elde Edilen Ürünlerin Karakterizasyonu	94
9.7.1 Kütle Verimliliğinin Belirlenmesi	94
9.7.2 Enerji Verimliliğinin Belirlenmesi	94

BÖLÜM 10

DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	95
10.1 Kömürün ve Katkı Maddelerinin Nem Miktarının Belirlenmesi Çalışmaları	95
10.2 Kömür ve Katkı Maddelerinin Kül Miktarlarının Belirlenmesi Çalışmaları	96
10.3 Kömür ve Katkı Maddelerinin Uçucu Madde Miktarlarının Belirlenmesi Çalışmaları	96
10.4 Kömür ve Katkı Maddelerinin Isıl Değerlerinin Belirlenmesi Çalışmaları	97
10.5 Briketleme Çalışmalarında Kullanılan Katkı Maddelerinin Ekstraktif Madde, Hemiselüloz ve Lignin İçeriklerinin Belirlenmesi	98
10.5.1 Katkı Maddelerinin Ekstraktif Madde Analizi	98
10.5.2 Katkı Maddelerinin Hemiselüloz Miktarının Belirlenmesi	99
10.5.3 Katkı Maddelerinin Lignin Miktarlarının Belirlenmesi	99
10.6 Briketleme Denemeleri İçin Ön Deneme Çalışmaları	100
10.7 Kömürün Farklı Katkı Maddeleri ve Bağlayıcı Madde Kullanılarak Briketlenmesi	102
10.7.1 Linyit Kömürünün Çay Atığı Kullanılarak Briketlenmesi	103
10.7.1.1 Çay Atığıyla Yapılan Çalışmaların Shatter İndeksi Sonuçları	105
10.7.1.2 Çay Atığıyla Yapılan Çalışmaların Shatter İndeksi Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi	107
10.7.1.3 Çay Atığıyla Yapılan Briketlerin Shatter İndeksi Üzerine Deneysel Parametrelerin, Etkilerinin İncelenmesi	108
10.7.1.4 Çay Atığıyla Yapılan Çalışmaların Briketlerin Nem Miktarı Yüzdesine Etkisi	109
10.7.1.5 Çay Atığıyla Yapılan Briketleme Çalışmalarının Nem Miktarı Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi	110

10.7.1.6	Çay Atığıyla Yapılan Briketleme Çalışmalarında Deneysel Parametrelerin Briketlerin Nem Miktarı Yüzdesi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi	110
10.7.1.7	Çay Atığıyla Yapılan Çalışmaların % Kül Miktarı Sonuçları	112
10.7.1.8	Çay Atığı Kullanılarak Elde Edilen Briketlerin %Kül Miktarı Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi	113
10.7.1.9	Çay Atığı İle Yapılan Briketleme Çalışmalarında Deneysel Parametrelerin Briketlerin %Kül Miktarı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi.....	113
10.7.1.10	Çay Atığıyla Yapılan Çalışmaların Isıl Değer Verileri.....	116
10.7.1.11	Çay Atığıyla Yapılan Briketleme Çalışmaların Isıl Değer Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi.....	117
10.7.1.12	Çay Atığıyla Yapılan Briketleme Çalışmalarında Deneysel Parametrelerin Briketlerin Isıl Değeri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi	117
10.7.1.13	Çay Atığıyla Yapılan Çalışmaların Genel Değerlendirilmesi ...	119
10.7.2	Linyit Kömürünün Fındık Kabuğu Kullanılarak Briketlenmesi	121
10.7.2.1	Fındık Kabuğu ile Yapılan Çalışmaların Shatter İndeksi Sonuçları....	123
10.7.2.2	Fındık Kabuğu ile Yapılan Çalışmaların Shatter İndeksi Verilerinin matematiksel modelinin belirlenmesi.....	125
10.7.2.3	Deneysel Parametrelerin Briketlerin Shatter İndeksi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi	125
10.7.2.4	Fındık Kabuğu ile yapılan çalışmaların, briketlerin nem miktarı yüzdesine etkisi	127
10.7.2.5	Fındık Kabuğu ile Yapılan Çalışmaların Nem Miktarı Yüzdesinin Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi	128
10.7.2.6	Fındık Kabuğu ile Yapılan Briketleme Çalışmalarında Deneysel Parametrelerin Briketlerin Nem Miktarı Yüzdesi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi	129
10.7.2.7	Fındık Kabuğu ile Yapılan Çalışmaların % Kül Miktarı Sonuçları	130
10.7.2.8	Fındık Kabuğu Kullanılarak Elde Edilen Briketlerin %Kül Miktarı Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi	131
10.7.2.9	Fındık Kabuğu İle Yapılan Briketleme Çalışmalarında Deneysel Parametrelerin Briketlerin %Kül Miktarı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi.....	132
10.7.2.10	Fındık Kabuğu ile Yapılan Çalışmaların Isıl Değer Verileri	134
10.7.2.11	Fındık Kabuğu ile Yapılan Briketleme Çalışmaların Isıl Değer Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi.....	136
10.7.2.12	Fındık Kabuğu ile Yapılan Briketleme Çalışmalarında Deneysel Parametrelerin Briketlerin Isıl Değeri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi	136
10.7.2.13	Fındık Kabuğu ile Yapılan Çalışmaların Genel Değerlendirilmesi.	138
10.7.3	Kömürün Sığır Kuruğu Bitkisi Kullanılarak Briketlenmesi.....	140

10.7.3.1	Sığır Kuruğu Bitkisi ile Yapılan Çalışmaların Shatter İndeksi Sonuçları	142
10.7.3.2	Sığır Kuruğu Bitkisi ile Yapılan Çalışmaların Shatter İndeksi Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi	143
10.7.3.3	Deneysel Parametrelerin Sığır Kuruğu Bitkisi ile Yapılan Briketlerin Shatter İndeksi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi.....	144
10.7.3.4	Sığır Kuruğu Bitkisi ile Yapılan Çalışmaların Briketlerin Nem Miktarı Yüzdesine Etkisi.....	145
10.7.3.5	Sığır Kuruğu Bitkisi İle Yapılan Briketleme Çalışmaların Nem Miktarı Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi.....	147
10.7.3.6	Sığır Kuruğu Bitkisi ile Yapılan Briketleme Çalışmalarında Deneysel Parametrelerin Briketlerin Nem Miktarı Yüzdesi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi	147
10.7.3.7	Sığır Kuruğu Bitkisi ile Yapılan Çalışmaların % Kül Miktarı Sonuçları	148
10.7.3.8	Sığır Kuruğu Bitkisi Kullanılarak Elde Edilen Briketlerin %Kül Miktarı Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi.....	149
10.7.3.9	Sığır Kuruğu Bitkisi ile Yapılan Briketleme Çalışmalarında Deneysel Parametrelerin Briketlerin %Kül Miktarı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi	150
10.7.3.10	Sığır Kuruğu Bitkisi ile Yapılan Çalışmaların Isıl Değer Verileri.....	152
10.7.3.11	Sığır Kuruğu Bitkisi ile Yapılan Briketleme Çalışmalarının Isıl Değer Miktarı Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi	153
10.7.3.12	Sığır Kuruğu Bitkisi ile Yapılan Briketleme Çalışmalarında Deneysel Parametrelerin Briketlerin Isıl Değeri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi.....	154
10.7.3.13	Sığır Kuruğu Bitkisi ile Yapılan Çalışmaların Genel Değerlendirilmesi	155
10.7.4	Linyit Kömürünün Geven Bitkisi Kullanılarak Briketlenmesi.....	157
10.7.4.1	Geven Bitkisi ile Yapılan Çalışmaların Shatter İndeksi Sonuçları	159
10.7.4.2	Geven Bitkisi İle Yapılan Çalışmaların Shatter İndeksi Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi	161
10.7.4.3	Deneysel Parametrelerin Briketlerin Shatter İndeksi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi	161
10.7.4.4	Geven Bitkisi ile Yapılan Çalışmaların, Briketlerin Nem Miktarı Yüzdesine Etkisi	163
10.7.4.5	Geven Bitkisi ile Yapılan Çalışmaların Nem Miktarı Yüzdesinin Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi	164
10.7.4.6	Geven Bitkisi ile Yapılan Briketleme Çalışmalarında Deneysel Parametrelerin Briketlerin Nem Miktarı Yüzdesi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi	165
10.7.4.7	Geven ile yapılan çalışmaların % kül miktarı sonuçları	166
10.7.4.8	Geven Bitkisi Kullanılarak Elde Edilen Briketlerin %Kül Miktarı Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi	167

10.7.4.9	Geven Bitkisi ile Yapılan Briketleme Çalışmalarında Deneysel Parametrelerin Briketlerin Nem Miktarı Yüzdesi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi	168
10.7.4.10	Geven Bitkisi ile Yapılan Çalışmaların Isıl Değer Verileri.....	170
10.7.4.11	Geven Bitkisi ile Yapılan Briketleme Çalışmaların Isıl Değer Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi.....	171
10.7.4.12	Geven Bitkisi ile Yapılan Briketleme Çalışmalarında Deneysel Parametrelerin Briketlerin Isıl Değeri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi	171
10.7.4.13	Geven Bitkisi ile Yapılan Çalışmaların Genel Değerlendirilmesi ..	173
10.7.5	Briketlerin Suya Dayanım Analizi Sonuçları	175
10.7.6	Briketleme Çalışmalarının Genel Değerlendirilmesi	176
10.8	Katkı Maddelerine Torrefaksiyon Prosesi Uygulanmasının Ön Denemeleri ..	178
10.8.1	Torrefaksiyon Prosesi için Tanecik Boyutunun Belirlenmesi	179
10.8.2	Torrefaksiyon Prosesi için Sıcaklık Parametresinin Belirlenmesi....	180
10.8.3	Torrefaksiyon Prosesi için Kalma Zamanının Belirlenmesi	181
10.9	Katkı Maddelerine Torrefaksiyon Prosesinin Uygulanması	181
10.9.1	Elma Dalına Torrefaksiyon Prosesinin Uygulanması	182
10.9.1.1	Elma Dalı Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Kütle Verimi Sonuçları	183
10.9.1.2	Elma Dalı Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde Deneysel Parametrelerin Kütle Verimi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi.....	184
10.9.1.3	Elma Dalı Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Isıl Değer Verileri.....	186
10.9.1.4	Elma Dalı Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde Deneysel Parametrelerin, Isıl Değer Üzerine Etkilerinin İncelenmesi.....	187
10.9.1.5	Elma Dalı Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Enerji Verimliliği Verileri	190
10.9.1.6	Elma Dalı Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde Deneysel Parametrelerin Enerji Verimliliği Üzerine Etkilerinin İncelenmesi.....	191
10.9.1.7	Elma Dalına Uygulanan Torrefaksiyon Denemelerinin Genel Değerlendirilmesi	193
10.9.2	Çay Atığına Torrefaksiyon Prosesinin Uygulanması	194
10.9.2.1	Çay Atığı Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Kütle Verimi Sonuçları	195
10.9.2.2	Çay Atığı Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde Deneysel Parametrelerin Kütle Verimi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi.....	196
10.9.2.3	Çay Atığı Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Isıl Değer Verileri.....	198

10.9.2.4	Çay Atığı Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde Deneysel Parametrelerin Isıl Değeri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi.....	199
10.9.2.5	Çay Atığı Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Enerji Verimliliği Verileri	202
10.9.2.6	Çay Atığı Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde Deneysel Parametrelerin Enerji Verimliliği Üzerine Etkilerinin İncelenmesi.....	203
10.9.2.7	Çay Atığına Uygulanan Torrefaksiyon Denemelerinin Genel Değerlendirilmesi	204
10.9.3	Fındık Kabuğuna Torrefaksiyon Prosesinin Uygulanması	205
10.9.3.1	Fındık Kabuğu Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Kütle Verimi Sonuçları	206
10.9.3.2	Fındık Kabuğu Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde Deneysel Parametrelerin Kütle Verimi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi	207
10.9.3.3	Fındık Kabuğu Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Isıl Değer Verileri	209
10.9.3.4	Fındık Kabuğu Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde Deneysel Parametrelerin Isıl Değeri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi.....	210
10.9.3.5	Fındık Kabuğu Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Enerji Verimliliği Verileri.....	212
10.9.3.6	Fındık Kabuğu Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde Deneysel Parametrelerin Enerji Verimliliği Üzerine Etkilerinin İncelenmesi	213
10.9.3.7	Fındık Kabuğuna Uygulanan Torrefaksiyon Denemelerinin Genel Değerlendirilmesi	215
10.9.4	Sığır kuruğu Bitkisine Torrefaksiyon Prosesinin Uygulanması	216
10.9.4.1	Sığır kuruğu Bitkisi Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Kütle Verimliliği Sonuçları	217
10.9.4.2	Sığır Kuruğu Bitkisi Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde Deneysel Parametrelerin Kütle Verimi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi	218
10.9.4.3	Sığır Kuruğu Bitkisi Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Isıl Değer Verileri	220
10.9.4.4	Sığır Kuruğu Bitkisi Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde Deneysel Parametrelerin Isıl Değeri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi	221
10.9.4.5	Sığır Kuruğu Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Enerji Verimliliği Verileri.....	223
10.9.4.6	Sığır Kuruğu Bitkisi Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde Deneysel Parametrelerin Enerji Verimliliği Üzerine Etkilerinin İncelenmesi	224
10.9.4.7	Sığır Kuruğuna Uygulanan Torrefaksiyon Denemelerinin Genel Değerlendirilmesi	226

10.9.5	Geven Bitkisine Torrefaksiyon Prosesinin Uygulanması	227
10.9.5.1	Geven Bitkisi Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Kütle Verimi Sonuçları	228
10.9.5.2	Geven Bitkisi Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde Deneysel Parametrelerin Kütle Verimi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi	229
10.9.5.3	Geven Bitkisi Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Isıl Değer Verileri	232
10.9.5.4	Geven Bitkisi Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde Deneysel Parametrelerin, Isıl Değer Üzerine Etkilerinin İncelenmesi.....	233
10.9.5.5	Geven Bitkisi Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Enerji Verimliliği Verileri	235
10.9.5.6	Geven Bitkisi Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde Deneysel Parametrelerin Enerji Verimliliği Üzerine Etkilerinin İncelenmesi	236
10.9.5.7	Geven Bitkisine Uygulanan Torrefaksiyon Denemelerinin Genel Değerlendirilmesi	238
10.9.6	Katkı Maddelerine Uygulanan Torrefaksiyon Prosesinin Genel Değerlendirilmesi	239
BÖLÜM 11		
SONUÇ VE ÖNERİLER		242
11.1	Sonuçlar	242
11.2	Öneriler	247
KAYNAKLAR		249
ÖZGEÇMİŞ		260

SİMGE LİSTESİ

Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
C	Karbon
CaO	Kalsiyumoksit
CH ₄	Metan
CO	Karbonmonoksit
CO ₂	Karbon Dioksit
H	Hidrojen
h	Saat
NOX	Azot oksit
SiO ₂	Silisyum oksit
°C	Santigrat derece
µm	Mikrometre

KISALTMA LİSTESİ

APP	Ataktik polipropilen
ASTM	American Society for Testing and Materials
A.Ş.	Anonim Şirketi
CCC	Çevrelenmiş tasarım
CCF	Yüz merkezli tasarım
CCI	İçe çizilmiş tasarım
cm ²	Santimetre kare
g	Gram
GW	Gigawatt
Kg	Kilogram
kW	Kilowatt
MPa	Megapascal
MTEP	Milyon Ton Eşdeğer Petrol
MW	Megawatt
OECD	Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü
PVA	Polivinil alkol
TAPPI	Technical Association of the Pulp and Paper Industry
TEP	Ton eşdeğer petrol
TGA	Termogravimetrik Analiz
TKİ	Türkiye Kömür İşletmeleri
TWh	Terawatt saat

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Birincil ve ikincil Enerji Kaynakları	5
Şekil 2.2 Dünyada 2014 yılı birincil enerji kullanımı	6
Şekil 2.3 Enerji kaynaklarının yıllara göre kullanımı	6
Şekil 2.4 Türkiye’de 2014 yılı birincil enerji kullanımı	6
Şekil 2.5 2014 Yılı bölgelere göre dünya ispatlanmış petrol rezervi	8
Şekil 2.6 2014 yılı dünya ispatlanmış doğal gaz rezervleri dağılımı	9
Şekil 2.7 Bölgeler itibari ile Dünya kömür rezervi dağılımı.....	11
Şekil 2.8 Yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları	12
Şekil 2.9 2015 Jeotermal enerji ülke kapasiteleri	16
Şekil 2.10 2005-2015 Biyoenerji üretim verileri	18
Şekil 2.11 1971-2014 yılları arası toplam global enerji ihtiyacı.....	19
Şekil 3.1 Bitkilerden kömür oluşum prosesi	24
Şekil 4.1 Briketleme prosesi çeşitleri.....	31
Şekil 5.1 Biyokütlenin biyoenerjiye dönüşüm prosesi.....	40
Şekil 7.1 Torrefaksiyon prosesi.....	62
Şekil 7.2 Torrefaksiyon Ürünleri	63
Şekil 7.3 Sıcaklıkla biyokütlenin ana bileşeninde meydana gelen bozunmalar	67
Şekil 7.4 Merkez sıcaklık ve kütle kaybı ilişkisi	69
Şekil 7.5 Kalma zamanının verimlilik üzerine etkileri	70
Şekil 9.1 IKA A11 Basic öğütme cihazı	85
Şekil 9.2 Elek Sarsma cihazı	85
Şekil 9.3 Kül analizinde kullanılan kül fırını.....	87
Şekil 9.4 IKA C-4000 Marka Model Kalorimetre Cihazı	89
Şekil 9.5 (a) Pres makinesi (b) Pres makinesi kalıpları.....	91
Şekil 9.6 Briketleme işlemi sonrasında elde edilen briket örnekleri	92
Şekil 10.1 Kömür ve katkı maddelerinin % nem miktarları	95
Şekil 10.2 Kömür ve katkı maddelerinin % kül miktarları	96
Şekil 10.3 Kömür ve katkı maddelerinin % uçucu madde miktarları	97
Şekil 10.4 Kömür ve katkı maddelerinin ısı değerleri (Mj/Kg).....	97
Şekil 10.5 Katkı maddelerinin % ekstraktif madde miktarları	98
Şekil 10.6 Katkı maddelerinin % Hemiselüloz miktarı	99
Şekil 10.7 Katkı maddelerinin % lignin içerikleri	100

Şekil 10.8	90°C ve oda sıcaklığında farklı nem yüzdeleri için Shatter indeksi sonuçları	102
Şekil 10.9	Çay atığı katkı maddesi için briketleme parametrelerinin Shatter indeksine etkisi	108
Şekil 10.10	Çay atığı katkı maddesi için briketleme parametrelerinin % nem miktarı üzerine etkisi	111
Şekil 10.11	Çay atığı katkı maddesi için briketleme parametrelerinin % kül miktarı üzerine etkisi	114
Şekil 10.12	Çay atığı katkı maddesi için briketleme çalışmalarının ısı değeri üzerine etkisi	118
Şekil 10.13	Fındık kabuğu katkı maddesi için briketleme parametrelerinin Shatter indeksine etkisi.....	126
Şekil 10.14	Fındık kabuğu katkı maddesi için briketleme parametrelerinin % nem miktarı üzerine etkisi.....	129
Şekil 10.15	Fındık kabuğu katkı maddesi için briketleme parametrelerinin % kül miktarı üzerine etkisi	133
Şekil 10.16	Fındık kabuğu katkı maddesi için briketleme parametrelerinin ısı değeri üzerine etkisi	137
Şekil 10.17	Sığır kuruğu katkı maddesi için briketleme parametrelerinin Shatter indeksine etkisi.....	144
Şekil 10.18	Sığır kuruğu katkı maddesi için briketleme parametrelerinin % nem miktarı üzerine etkisi	148
Şekil 10.19	Sığır kuruğu katkı maddesi için briketleme parametrelerinin % kül miktarı üzerine etkisi	151
Şekil 10.20	Sığır kuruğu bitkisi katkı maddesi için briketleme parametrelerinin ısı değeri üzerine etkisi	154
Şekil 10.21	Geven bitkisi için briketleme parametrelerinin shatter indeksine etkisi .	162
Şekil 10.22	Geven bitkisi katkı maddesi için briketleme parametrelerinin % nem miktarı üzerine etkisi.....	165
Şekil 10.23	Geven katkı maddesi için briketleme parametrelerinin % kül miktarı üzerine etkisi	168
Şekil 10.24	Geven bitkisi katkı maddesi için briketleme parametrelerinin ısı değeri üzerine etkisi	172
Şekil 10.25	Tanecik boyutunun incelenmesi.....	179
Şekil 10.26	Sıcaklık değerinin incelenmesi.....	180
Şekil 10.27	Kalma zamanının incelenmesi	181
Şekil 10.28	Elma dalı için proses parametrelerinin kütle verimi üzerine etkileri	185
Şekil 10.29	Elma dalı için proses parametrelerinin ısı değeri üzerine etkileri	188
Şekil 10.30	Elma dalı için proses parametrelerinin enerji verimliliği üzerine etkileri .	191
Şekil 10.31	Çay atığı için proses parametrelerinin kütle verimi üzerine etkileri	197
Şekil 10.32	Çay atığı için proses parametrelerinin ısı değeri üzerine etkileri	200
Şekil 10.33	Çay atığı için proses parametrelerinin enerji verimliliği üzerine etkileri..	203
Şekil 10.34	Fındık kabuğu için proses parametrelerinin kütle verimi üzerine etkileri	208
Şekil 10.35	Fındık kabuğu için proses parametrelerinin ısı değeri üzerine etkileri	211
Şekil 10.36	Fındık kabuğu için proses parametrelerinin enerji verimliliği üzerine etkileri	214

Şekil 10.37	Sığır kuruğu bitkisi için proses parametrelerinin kütle verimi üzerine etkileri	219
Şekil 10.38	Sığır kuruğu için proses parametrelerinin ısı değeri üzerine etkileri	222
Şekil 10.39	Sığır kuruğu bitkisi için proses parametrelerinin enerji verimliliği üzerine etkileri	225
Şekil 10.40	Geven bitkisi için proses parametrelerinin kütle verimi üzerine etkileri .	230
Şekil 10.41	Geven bitkisi için proses parametrelerinin ısı değeri üzerine etkileri	233
Şekil 10.42	Geven için proses parametrelerinin enerji verimliliği üzerine etkileri	237



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Ham petrolün ağırlıkça yüzde bileşimi 7
Çizelge 2.2	Doğal gazın kimyasal bileşimi..... 9
Çizelge 2.3	Kömür türlerinin çeşitli özellikleri 11
Çizelge 2.4	2013 yılında enerji arzı en yüksek olan ilk on ülke..... 20
Çizelge 2.5	Türkiye’ye ait 2015 yılı birincil kaynak rezervleri 21
Çizelge 2.6	Türkiye’de enerji üretimi..... 22
Çizelge 3.1	Oluşumuna göre farklı kömür tiplerinin özellikleri 25
Çizelge 4.1	Yakıt amaçlı üretilen kömür briketlerinin sahip olması gereken fiziksel ve kimyasal özellikler 37
Çizelge 5.1	Farklı biyokütle türlerinin selüloz, hemiselüloz, lignin içeriği 41
Çizelge 5.2	Biyokütle dönüşüm prosesleri..... 47
Çizelge 5.3	Termokimyasal proseslerin karşılaştırılması 48
Çizelge 7.1	Torrefaksiyon uygulanmış biyokütle özellikleri..... 65
Çizelge 7.2	Briketlenmiş biyokütle, briketlenmemiş biyokütle ve kömürün kıyaslanması 74
Çizelge 10.1	Briketleme ön deneme çalışmaları verileri 101
Çizelge 10.2	Deney parametreleri ve değerleri..... 103
Çizelge 10.3	Katkı maddesi olarak çay atığı kullanılarak yapılan deney planı..... 104
Çizelge 10.4	Çay atığı briketleme çalışmaları deney sonuçları 105
Çizelge 10.5	Çay atığı Shatter indeksi Anova analiz sonuçları..... 106
Çizelge 10.6	Çay atığı kullanılarak elde edilen briketlerin nem miktarı verilerinin Anova analizi sonuçları 110
Çizelge 10.7	Çay atığı kullanılarak elde edilen briketlerin kül miktarı verilerinin Anova analizi sonuçları 113
Çizelge 10.8	Çay atığı kullanılarak elde edilen briketlerin ısı değeri verilerinin Anova analizi sonuçları 116
Çizelge 10.9	Çay atığı katkı maddesi için çözümleme şartları 119
Çizelge 10.10	Çay atığı için deney parametrelerinin çözümlenmesi 120
Çizelge 10.11	Katkı maddesi olarak fındık kabuğu kullanılarak yapılan deney planı.. 122
Çizelge 10.12	Fındık kabuğu briketleme çalışmaları deney sonuçları 123
Çizelge 10.13	Fındık kabuğu Shatter indeksi Anova analiz sonuçları..... 124
Çizelge 10.14	Fındık kabuğu kullanılarak elde edilen briketlerin nem miktarı verilerinin Anova analizi sonuçları 128

Çizelge 10.15	Fındık kabuğu kullanılarak elde edilen briketlerin kül miktarı verilerinin Anova analizi sonuçları	131
Çizelge 10.16	Fındık kabuğu kullanılarak elde edilen briketlerin ısı değeri verilerinin Anova analizi sonuçları	135
Çizelge 10.17	Fındık kabuğu katkı maddesi için çözümleme şartları	138
Çizelge 10.18	Fındık kabuğu için deney parametrelerinin çözümü	139
Çizelge 10.19	Katkı maddesi olarak sığır kuruğu bitkisi kullanılarak yapılan deney planı	141
Çizelge 10.20	Sığır kuruğu bitkisi briketleme çalışmaları deney sonuçları	142
Çizelge 10.21	Sığır kuruğu bitkisi Shatter indeksi Anova analiz sonuçları	143
Çizelge 10.22	Sığır kuruğu bitkisi kullanılarak elde edilen briketlerin nem miktarı verilerinin Anova analizi sonuçları	146
Çizelge 10.23	Sığır kuruğu kullanılarak elde edilen briketlerin kül miktarı verilerinin Anova analizi sonuçları	149
Çizelge 10.24	Sığır kuruğu bitkisi kullanılarak elde edilen briketlerin ısı değeri verilerinin Anova analizi sonuçları	153
Çizelge 10.25	Sığır kuruğu katkı maddesi için çözümleme şartları	156
Çizelge 10.26	Sığır kuruğu bitkisi için deney parametrelerinin çözümü	156
Çizelge 10.27	Katkı maddesi olarak geven bitkisi kullanılarak yapılan deney planı	158
Çizelge 10.28	Geven bitkisi briketleme çalışmaları deney sonuçları	159
Çizelge 10.29	Geven bitkisi Shatter indeksi Anova analiz sonuçları	160
Çizelge 10.30	Geven bitkisi kullanılarak elde edilen briketlerin nem miktarı verilerinin Anova analizi sonuçları	164
Çizelge 10.31	Geven bitkisi kullanılarak elde edilen briketlerin kül miktarı verilerinin Anova analizi sonuçları	167
Çizelge 10.32	Geven bitkisi kullanılarak elde edilen briketlerin ısı değeri verilerinin Anova analizi sonuçları	170
Çizelge 10.33	Geven bitkisi katkı maddesi için çözümleme şartları	173
Çizelge 10.34	Geven bitkisi için deney parametrelerinin çözümü	174
Çizelge 10.35	Farklı katkı maddeleri için suya dayanım testi sonuçları	175
Çizelge 10.36	Farklı katkı maddeleri için en iyi briketleme parametreleri ve deney çıktıları	176
Çizelge 10.37	Torrefaksiyon prosesi ön denemeleri için deney planı	178
Çizelge 10.38	Torrefaksiyon ön deneme sonuçları	179
Çizelge 10.39	Torrefaksiyon prosesi deney parametreleri ve seviyeleri	182
Çizelge 10.40	Elma sapı biyokütlesine torrefaksiyon uygulanması sonucu elde edilen veriler	183
Çizelge 10.41	Torrefaksiyon uygulanan elma dallarının kütle verimliliğinin Anova analizi	184
Çizelge 10.42	Elma dalı kullanılarak yapılan torrefaksiyon ürünlerinin ısı değeri verilerinin Anova analizi sonuçları	187
Çizelge 10.43	Elma dalı kullanılarak yapılan torrefaksiyon ürünlerinin enerji verimliliği verilerinin Anova analizi sonuçları	190
Çizelge 10.44	Elma dalı biyokütlesi için çözümleme şartları	193

Çizelge 10.45	Çay atığı biyokütlesine torrefaksiyon uygulanması sonucu elde edilen veriler.....	195
Çizelge 10.46	Torrefaksiyon uygulanan çay atıklarının kütle verimliliğinin Anova analizi	196
Çizelge 10.47	Çay atığı kullanılarak yapılan torrefaksiyon ürünlerinin ısı değer verilerinin Anova analizi sonuçları.....	199
Çizelge 10.48	Çay atığı kullanılarak yapılan torrefaksiyon ürünlerinin enerji verimliliği verilerinin Anova analizi sonuçları.....	202
Çizelge 10.49	Çay atığı biyokütlesi için çözümleme şartları.....	205
Çizelge 10.50	Fındık kabuğu biyokütlesine torrefaksiyon uygulanması sonucu elde edilen veriler.....	206
Çizelge 10.51	Torrefaksiyon uygulanan fındık kabuğunun kütle verimliliğinin Anova analizi.....	206
Çizelge 10.52	Fındık kabuğu kullanılarak yapılan torrefaksiyon ürünlerinin ısı değer verilerinin Anova analizi sonuçları.....	210
Çizelge 10.53	Fındık kabuğu kullanılarak yapılan torrefaksiyon ürünlerinin enerji verimliliği verilerinin Anova analizi sonuçları	213
Çizelge 10.54	Fındık kabuğu biyokütlesi için çözümleme şartları.....	216
Çizelge 10.55	Sığır kuruğu biyokütlesine torrefaksiyon uygulanması sonucu elde edilen veriler.....	217
Çizelge 10.56	Torrefaksiyon uygulanan sığır kuruğu bitkisinin kütle verimliliğinin Anova analizi.....	218
Çizelge 10.57	Sığır kuruğu bitkisi kullanılarak yapılan torrefaksiyon ürünlerinin ısı değer verilerinin Anova analizi sonuçları	221
Çizelge 10.58	Sığır kuruğu bitkisi kullanılarak yapılan torrefaksiyon ürünlerinin enerji verimliliği verilerinin Anova analizi sonuçları	224
Çizelge 10.59	Sığır kuruğu biyokütlesi için çözümleme şartları	227
Çizelge 10.60	Geven biyokütlesine torrefaksiyon uygulanması sonucu elde edilen veriler.....	228
Çizelge 10.61	Torrefaksiyon uygulanan geven bitkisinin kütle verimliliğinin Anova analizi.....	229
Çizelge 10.62	Geven bitkisi kullanılarak yapılan torrefaksiyon ürünlerinin ısı değer verilerinin Anova analizi sonuçları.....	232
Çizelge 10.63	Geven bitkisi kullanılarak yapılan torrefaksiyon ürünlerinin enerji verimliliği verilerinin Anova analizi sonuçları	236
Çizelge 10.64	Geven biyokütlesi için çözümleme şartları	239
Çizelge 10.65	Farklı katkı maddeleri için en iyi torrefaksiyon parametreleri ve deney çıktıları	240

TÜRK LİNYİT KÖMÜRLERİNİN ORGANİK KATKI MADDESİ KULLANILARAK BRİKETLENMESİ

Berrin SAYGI YALÇIN

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Jale GÜLEN

Bu çalışmada, Manisa Soma bölgesinden temin edilen 0-5 mm parçacık boyutundaki linyit kömürü, farklı sıkıştırma basınçlarında (5-25MPa), farklı türde (çay atığı, fındık kabuğu, sığır kuruğu ve geven bitkileri) ve farklı oranlarda (%0-%100) katkı maddeleri ve bağlayıcı kullanılarak briketlenmiştir. Elde edilen melez briketlere, kimyasal analizler ve fiziksel dayanım testleri yapılarak briketlerin karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Buna ek olarak kullanılan katkı maddelerine torrefaksiyon prosesi uygulanarak elde edilen ürünlerin ve briketlerin orijinal kömürle kıyaslanması yapılmıştır.

Briketleme prosesinde kullanılan farklı tanecik boyutlarının, sıkıştırma basınçlarının, katkı maddelerinin ve bu maddelerin karışımdaki oranlarının değiştirilmesinin briketlerin kimyasal ve fiziksel dayanım sonuçları üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Yapılan denemeler sonucunda sıkıştırma basıncı ve tanecik boyutu parametrelerinin briketlerin kül ve ısı değeri üzerinde önemli etkileri olmadığı; kül miktarı üzerinde en önemli parametrenin katkı maddesi miktarı olduğu tespit edilmiştir. Her bir katkı maddesi için ayrı ayrı elde edilen melez briketlerin kül miktarlarının, ham kömüre kıyasla önemli ölçüde azaldığı ve briketlerin kül miktarlarının azalması üzerinde briketleme prosesinde reçine bağlayıcısının hidrolizi için kullanılan asetik asit çözeltisinin önemli etkileri olduğu belirlenmiştir. Parametrelerin ısı değeri üzerine etkileri incelendiğinde kül miktarında da olduğu gibi tanecik boyutu ve sıkıştırma basıncının briketlerin ısı değeri üzerinde etkisinin olmadığı, artan katkı maddesi miktarının briketlerin ısı değerlerinde azalmaya

sebeple belirlenmiştir. Bu sebeple briketleme çalışmalarında her bir katkı maddesi için optimum katkı maddesi miktarının %25 olduğu sonucuna ulaşılmıştır. En yüksek ısı değere çay atığı katkı maddesi kullanılması sonucu ulaşılmıştır ve bu değerin ham linyit kömürünün ısı değerinden %6 oranında düşük olduğu belirlenmiştir.

Briketlere yapılan fiziksel testler sonucunda her bir katkı maddesi için artan katkı maddesi miktarının briketlerin Shatter indeksi üzerinde önemli olumlu etkilere sebep olduğu gözlemlenmiştir. Katkı maddeli briketleme sonucunda en iyi Shatter indeksi değerine sahip olan briketlerin sığır kuruğu ve geven bitkisi kullanılarak yapılan denemeler sonucunda elde edilebileceği ortaya konmuştur. Suyu dayanımı en yüksek olan briketin fındık kabuğu olduğu (>72 saat) bunu sırasıyla çay atığı (24 saat), geven (24 saat) ve sığır kuruğunun (1 saat) takip ettiği tespit edilmiştir.

Katkı maddelerine uygulanan torrefaksiyon (biyokmürleştirme) prosesi sonucunda elde edilen ürün üzerinde en etkili parametrenin sıcaklık olduğu belirlenmiştir. Torrefaksiyon denemeleri sonucunda elde edilen ürünlerin, ısı değerlerinin proses sıcaklığı ve kalma süresine bağlı olarak linyit kömürü ile rekabet edebilecek seviyeye ulaştığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Linyit kömürü, Briketleme, Torrefaksiyon, Çay atığı, Fındık kabuğu, Sığır kuruğu, Geven, Elma dalı

BRIQUETTING OF TURKISH LIGNITE COAL WITH USING ORGANIC ADDITIVES

Berrin SAYGI YALÇIN

Department of Chemical Engineering

PhD. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Jale GÜLEN

In this study, lignite coal (1-5 mm particle size and provided from Soma, western region of Turkey) was briquetted with different kinds of additives (tea waste, nutshell, verbascum and astragalus). Additives were used in different ratios (0-100 % w/w) and compression pressures varied from 5 to 25 MPa. For characterisation, chemical analysis (ash, calorific value and moisture amounts) and physical tests (shatter index and resistance to water) were applied to hybrid briquettes. In addition, torrefaction process was applied to additives and torrefied samples were compared to coal.

It is concluded that; particle size of additives, compression pressure, additive types and ratios of additive amounts affected the chemical and physical properties of briquettes. However, compression pressure and particle size had not a remarkable effect on ash contents and calorific values.

Most effective parameter on ash content was additive amounts. Compared to coal, hybrid briquettes had lower ash contents. Acetic acid was used for hydrolyse resin binders and usage of acetic acid have an effect on this decrease of ash contents.

When the effect of each parameter on calorific value is compared, it can be said that; although particle size and compression pressure are not effective on calorific value, there is an inversely proportional to relationship between additive amount and calorific value. This result showed that, optimum additive amount is 25 % for each type of

additive. Maximum calorific value is obtained by using tea waste as additive and this result is found to be 6% lower than lignite coal.

Physical tests showed that, increasing additive amount made positive effect on Shatter index results. The best Shatter index values obtained by using verbascum and astragalus as additive. Water resistance tests gave the best results for the briquettes that have hazelnut shell (>72 hours) and sequenced as tea waste (24 hours), astragalus (24 hours) and verbascum (1 hour).

During the torrefaction process of additives, temperature has found to be the most effective parameter. Calorific values of these samples are found to be comparable with lignite coal, depending on the residence time and process temperature.

Keywords: Lignite coal, Briquetting, Torrefaction, Tea waste, Hazelnut shell, Verbascum, Astragalus, Apple tree branch



1.1 Literatür Özeti

Global kapsamda bakıldığında ülkelerin gelişmişlik düzeyi ekonomik ve sosyal seviyeleriyle doğrudan ilişkilidir ve bu doğrultuda en önemli faktörlerden biride ülkelerin yıllık enerji üretimi ve tüketimindeki verileridir. Enerjiye olan ihtiyaç başta sanayileşmenin hızla artması, nüfus artışı ve kentsel gelişim gibi etkenlerden dolayı her geçen gün artmaktadır. Dünyada enerji gereksinimin yaklaşık %87' si fosil yakıtlardan (kömür, petrol, doğalgaz) geri kalanı ise diğer kaynaklardan (hidrolik, nükleer, yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları vs.) karşılanmaktadır.

Dünya üzerinde yaygın olarak bulunan ve fosil yakıtlar içinde ton eşdeğer petrol (TEP) olarak en büyük rezerve sahip olan kömür, sanayi devriminde en etkili unsurlardan biri olmuş ve günümüzde de önemini hiç kaybetmemiştir. Günümüzde daha çok enerji kaynağı olarak tüketilen kömür, gelişmiş ülkelerde, özellikle kimya sanayiinde, boyadan ilaca, gübreden plastiğe kadar birçok alanda önemli bir hammadde olarak kullanılmaktadır. Evsel ve endüstriyel yakıt olarak kullanılan kömürlerin kaliteleri, çevre koruma ve hava kirliliği nedeni ile büyük önem taşımaktadır. Sürdürülebilir kalkınma doğrultusunda, enerjide kömür kullanımı her geçen gün artmakta ve kömürün temiz bir yakıt olarak kullanılmasına ve kömüre eşdeğer yakıtlar üretilmesine ilişkin birçok çalışma yapılmaktadır.

Günümüzde bir çok yakma sisteminde ve enerji üretiminde kömür kullanılmasına rağmen son yıllarda kömürden kaynaklanan emisyon gazlarının azaltılmasına yönelik baskılar ve hükümet politikaları, mevcut kömür yakma santrallerinde kullanıma uygun,

kömürle benzer özelliklere ve maliyete sahip, temiz enerji türlerinin geliştirilmesinin önemini arttırmıştır. Bunun sonucu olarak yenilenebilir enerji kaynaklarına ve özellikle biyokütleyle olan ilgi büyük ölçüde arttırmıştır. Bunun sebebi biyokütle kullanımının diğer enerji kaynaklarına kıyasla emisyon gazlarını nispeten azaltmanın en hızlı ve düşük maliyetli yol olarak görülmesidir. Biyokütle kullanılmasının diğer bir avantajı ise biyokütle kullanımının hava şartlarından etkilenmemesi ve günün her saatinde kullanılabilir olmasıdır.

Bilindiği üzere biyokütlenin doğrudan yakma sistemlerinde kullanılması, biyokütlenin yüksek oksijen içeriği, düşük ısı değeri, hidrofilikliğin yüksek olmasından kaynaklı yüksek nem absorplama kapasitesi ve homojen olmayan bileşimi gibi dezavantajlarından dolayı elverişsizdir.

Bu sebeple kömürün ve biyokütlenin yukarıda ifade edilen dezavantajlarını ortadan kaldırarak yeni enerji kaynakları geliştirmenin bir yolu biyokütle-kömür karışımli melez yakıtlar üretmek, bir diğeri ise biyokütlenin özelliklerini kömürle yarışır hale getirmektir. Bu kapsamda bu çalışmada, Soma kömür işletmesinden temin edilen linyit kömürüne Karadeniz, Doğu Anadolu bölgelerinden temin edilen çay, fındık gibi bitki atıkları ile sığır kuruğı ve geven bitkileri kullanılarak biyokütle-kömür karışımlarının briketlemesi çalışması yapılmış, ayrıca briketleme çalışmasında kullanılan biyokütlelere torrefaksiyon (biyokömür üretimi) prosesi uygulanarak her iki proses sonucunda elde edilen ürünlerin karakterizasyonu çalışmaları yapılmış, klasik veya modern yakma sistemlerinde kullanılması en uygun olan yakıtın belirlenmesi üzerine araştırmalar yapılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Yıllarca ülkemizde enerji alanında dışa bağımlılığın azaltılması yönünde atılan adımlardan yola çıkılarak, bu çalışmada, milli yakıtımız olan linyit kömürlerinin daha verimli ve sürdürülebilir olarak kullanılmasının yanı sıra bir yenilenebilir enerji kaynağı olan biyokütle kullanılarak linyit kömürüyle rekabet edebilecek yeni bir melez yakıt üretimi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, Manisa/Soma'da bulunan Soma Kömür İşletmeleri A.Ş.'den temin edilen Soma linyit toz kömürünün fiziksel ve kimyasal analizlileri (nem, uçucu madde, kül, sabit karbon içeriği ve ısı değeri) yapılarak linyit kömürünün kalitesi belirlenmiştir. Karakterizasyonu yapılan linyit kömürüne farklı katkı maddeleri eklenerek

bir deneysel tasarım metodu olan Merkezi Birleşik Tasarım (Central Compozite Design) yöntemi kullanılarak bir deney planı tasarlanmıştır. Elde edilen deney planı doğrultusunda kömür-biyokütle karışımı briketler üretilmiştir. Bu deneysel tasarım metoduyla sıkıştırma basıncı, katkı madde miktarı, tanecik boyutu ve katkı maddesinin cinsi gibi işlem parametrelerinin, kömür-biyokütle briketlerinin üzerine etkileri incelenmiştir. Elde edilen briketlerin nem, kül, kükürt miktarı, ısı değeri gibi özellikleri belirlenerek, briketlerin bu özelliklerinin önceden analizi yapılan orijinal linyit kömürüyle karşılaştırılması yapılmıştır. Briketleme çalışmalarında katkı maddeleriyle birlikte reçine ajanı bağlayıcı madde olarak kullanılmış, briketlerin mekanik sağlamlıkları ve suya dayanımları üzerine bu katkı maddelerinin ve reçinenin etkileri belirlenmiştir. Ayrıca briketlerde kullanılan katkı maddelerine termokimyasal bir proses olan torrefaksiyon işlemi uygulanması sonucu elde edilen yeni ürün özelliklerinin linyit kömür ile karşılaştırması yapılarak linyit kömürüne alternatif, çevre dostu, inovatif, yenilebilir ve sürdürülebilir bir ürün eldesi amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Linyit toz kömürlerinin, zararlı çevresel etkilerinin en aza indirgenmesi ve daha verimli yeni bir melez enerji kaynağı olarak kullanılması amacıyla, bu çalışmada linyit kömürünün organik katkı maddeleri kullanılarak günlük yakma sistemlerine uygun bir yakıt haline getirilmesi için briketlenmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda öncelikle briketlerin parçalanmaya karşı direncini arttırmak amacıyla organik katkı maddeleri ve bağlayıcı kullanarak, bu katkı maddeleri ve bağlayıcının miktarlarındaki ve tanecik boyutundaki değişimin briketleme verimini nasıl etkilediği araştırılmıştır.

Bu çalışmada, ikinci olarak dayanıklı ve kaliteli briket üretimine yardımcı olan katkı maddeleri ve bağlayıcı çalışmalarının yanı sıra briketleme prosesinde kullanılan katkı maddelerinin karbon yoğunluğunu artırmak için, katkı maddelerine ilave torrefaksiyon prosesi uygulanarak linyit kömürüne alternatif yeni bir yakıt üretimi amaçlanmış ve bu kapsamda işlem parametreleri, pratikte uygulanabilecek seviyelerde özenle seçilerek deney tasarımları yapılmıştır.

BÖLÜM 2

ENERJİ NEDİR?

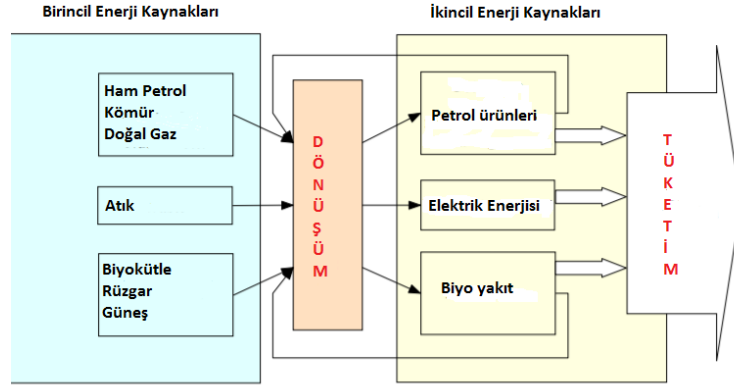
Enerji bilimdeki en temel kavramlardan biridir ve enerjinin en basit tanımı, bir sistemin iş yapabilme kapasitesi olarak yapılır. Enerji; hareket, ısı, ışık, elektrik, kimyasal, nükleer enerji ve yer çekimi gibi çeşitli biçimlerde oluşabilmektedir ve bu enerji çeşitleri uygun yöntemlerle birbirlerine dönüştürülebilmektedirler. Dünyanın en önemli enerji kaynağı güneştir ve enerji kaynaklarının çoğu enerjisini güneşten doğrudan ya da dolaylı olarak güneşten alırlar [1]. Örneğin bitkiler güneşten aldıkları enerjiyi, fotosentez sırasında enerjice zengin organik bileşikler (lipid, karbonhidrat, protein) sentezlemek için kimyasal potansiyel enerji olarak depolarlar ve bu bitkiler enerji üretiminde biyokütle enerjisi olarak kullanılırlar.

2.1 ENERJİ KAYNAKLARI

Günümüzde değişik yöntemlerle enerji elde edilen kaynaklar enerji kaynakları olarak adlandırılmaktadırlar. Kullanım şekillerine göre enerji kaynakları yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları olarak sınıflandırılırken; dönüştürülebilirliklerine göre enerji kaynakları birincil ve ikincil enerji kaynakları olarak sınıflandırılmaktadırlar [2]

2.1.1 Birincil ve İkincil Enerji Kaynakları:

Birincil enerji kaynakları doğrudan çevreden elde edilebilen, kömür, doğal gaz, biyokütle, güneş ışığı, rüzgâr, petrol gibi kaynaklardır. İkincil enerji kaynakları ise birincil enerji kaynaklarının dönüştürülmesiyle elde edilen, petrol alt türevleri, elektrik ve biyoyakıt gibi enerji kaynaklarıdır (Şekil 2.1) [3].



Şekil 2.1 Birincil ve ikincil Enerji Kaynakları [4].

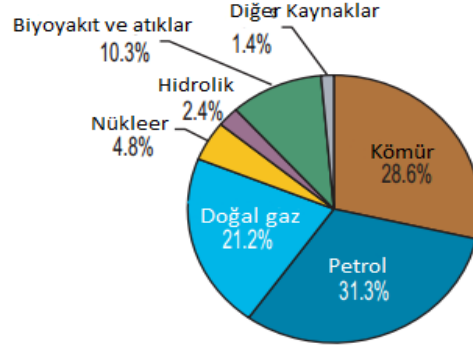
Birincil enerji kaynakları genellikle doğrudan olarak kullanılamazlar ve bu kaynaklar ancak propan, bütan, motorin, benzin, kerosen, fuel oil gibi yakıtlara ve elektrik gibi ikincil enerjiye dönüştürülerek kullanılabilirler [5],[6].

Birincil enerji kaynakları üç ana grup altında incelenmektedirler:

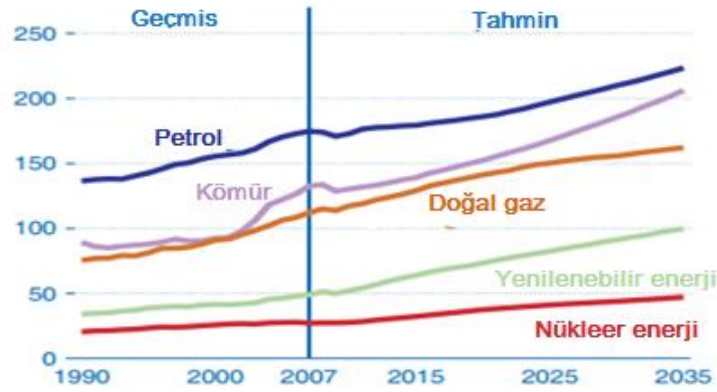
1. Yenilenemeyen enerji kaynakları: Kömür, doğal gaz nükleer yakıtlar, ham petrol
2. Yenilenebilen enerji kaynakları: Hidroelektrik, biyokütle, solar enerji, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji ve dalga enerjisi
3. Atıklar

İkincil enerji kaynakları, çevreden doğrudan elde edilebilen birincil enerji kaynaklarının veya diğer ikincil enerji kaynaklarının elektrik, hava gazı, kok, ısı gibi daha cazip ve kullanılabilir formlara dönüştürülmesiyle elde edilirler. İkincil enerjinin birincil enerjiye göre en ayırt edici özelliği enerjinin dönüşüm sürecidir. Birincil enerjiden, ikincil enerji elde edilirken verimlilik yani dönüşüm kayıpları oluşmakta bu da ikincil kaynakların birincil kaynaklara göre daha pahalı olmasına sebep olmaktadır [4].

Dünya enerji arzının karşılanmasında kullanılan kaynakların yüzde dağılımı Şekil 2. 2’de verilmiş olup [7], Dünya’da enerji ihtiyacının yaklaşık % 81 i petrol, kömür ve doğal gaz gibi birincil enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. 2035 yılına kadar bu enerji kaynaklarının, enerji üretiminde baskın rol oynayacağı düşünülmektedir. Enerji kaynaklarına olan ve olacak olan talebin yıllara göre dağılımı Şekil 2.3’de verilmiş olup buradan da önümüzdeki yıllarda fosil yakıtların, enerji ihtiyacının karşılanmasında en önemli yakıt olma özelliğini koruyacağı görülmektedir.

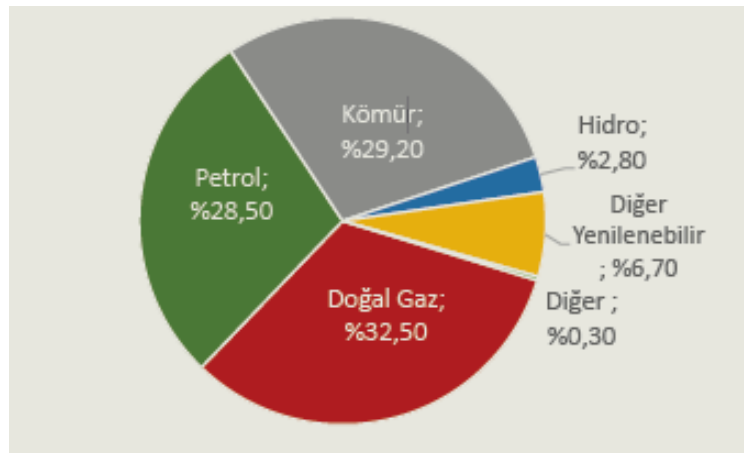


Şekil 2.2 Dünyada 2014 yılı birincil enerji kullanımı [7]



Şekil 2.3 Enerji kaynaklarının yıllara göre kullanımı

Şekil 2.4'ten de görüldüğü gibi 2014 yılında Dünya'da olduğu gibi Türkiye'de de enerji arzının karşılanmasında en önemli role sahip olan enerji kaynakları birincil enerji kaynaklarıdır ve enerji ihtiyacının karşılanmasında en büyük paya sahip olan enerji kaynakları doğal gaz ve kömürdür. Bu enerji kaynaklarını petrol ve yenilenebilir enerji kaynakları takip etmektedir.



Şekil 2.4 Türkiye'de 2014 yılı birincil enerji kullanımı

2.1.2 Yenilenemeyen Enerji Kaynakları

Yenilenemeyen enerji kaynakları ya da fosil yakıtlar, canlı organizmaların atıklarının yer kabuğundaki ısı ve basınca milyonlarca yıl boyunca maruz kalmasıyla oluşan enerji kaynaklarıdır. Oluşması tüketilmesinden daha uzun zaman aldığından ve bu sebeple rezervleri sınırlı olduğundan bu kaynaklar yenilenemeyen enerji kaynakları olarak adlandırılmaktadırlar. Başlıca yenilenemeyen enerji kaynakları petrol, doğal gaz, nükleer enerji ve kömürden oluşmaktadır [8],[9],[10].

2.1.2.1 Petrol

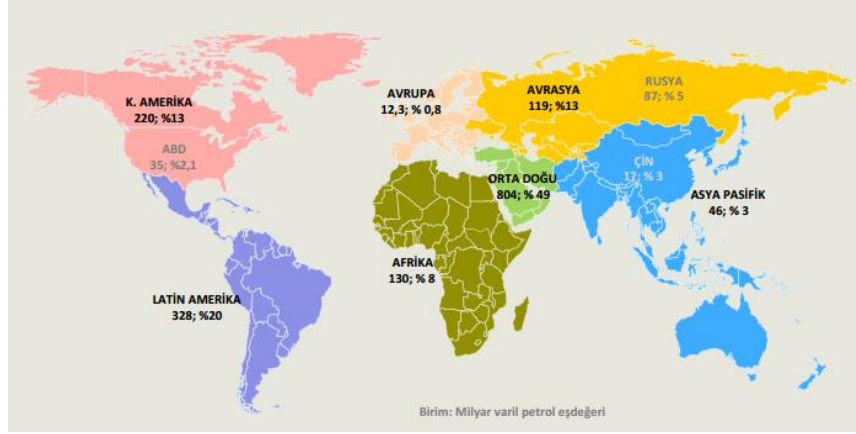
Petrol, doğal olarak oluşan binlerce farklı organik hidrokarbon molekülü içeren ve bileşimi yaklaşık olarak %83-87 oranında karbon, %10-14 oranında hidrojen, %0,5-6 oranında kükürtten oluşan yanıcı bir sıvıdır (Çizelge 2.1). Ham petrolün hidrokarbon içeriği çoğunlukla alkan, sikloalkan ve diğer aromatik hidrokarbonlardan oluşmaktadır.

Çizelge 2.1 Ham petrolün ağırlıkça yüzde bileşimi

Element	Yüzde Miktarı (%)
Karbon	83-87
Hidrojen	10-14
Azot	0,1-2
Oksijen	0,1-1,5
Kükürt	0,5-6
Metaller	<0,1

Günümüzde dünyada toplam enerji arzı %31,3'lük en büyük pay ile petrolden karşılanmaktadır ve petrolün yaklaşık %99'dan fazlası ulaşım sektörünün temel enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır [7],[8]. Şekil 1. 3'den de görüldüğü gibi petrolün birincil enerji tüketimi içindeki payını uzun yıllar koruyacağı öngörülmektedir.

2014 yılı verilerine göre Dünya petrol rezerv miktarı 1,65 trilyon varil olarak belirlenmiştir. Dünya petrol rezervlerinde en büyük paya sahip olan bölge Orta Doğu'dur ve Orta Doğu'yu sırasıyla Orta ve Güney Amerika, Kuzey Amerika, Afrika, Avrasya, Asya, Okyanusya ve Avrupa takip etmektedir [11]. Şekil 2. 5'te 2014 yılı Dünya'da ispatlanmış petrol rezervlerinin bölgelere göre yüzdesel dağılımı verilmiştir.



Şekil 2.5 2014 Yılı bölgelere göre dünya ispatlanmış petrol rezervi [12].

Türkiye’de ise petrol rezervi miktarı 2014 yılı itibari ile 312 milyon varil olarak belirlenmiş ve mevcut üretim/tüketim trendleri dikkate alındığında, üretilebilir ham petrol rezervinin yaklaşık 17 yıllık ömrü bulunduğu öngörülmüştür.

2.1.2.2 Doğalgaz

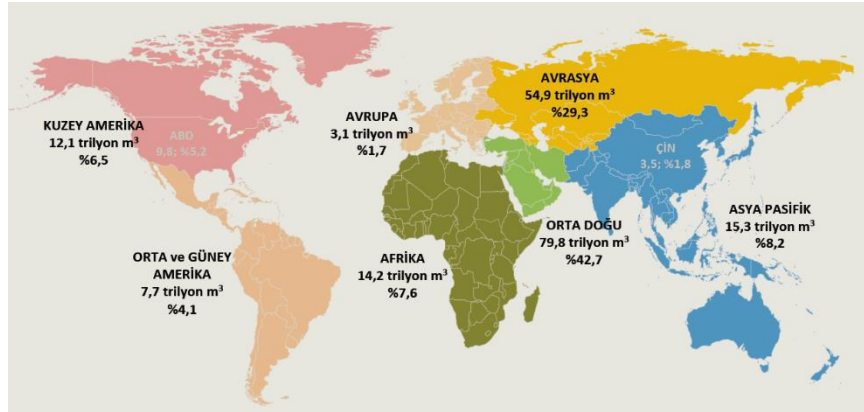
Doğal gaz, doğada kendiliğinden oluşan, gaz fazında yanıcı bir fosil yakıttır [13]. Çizelge 2. 2’de doğal gazın bileşimine ait veriler verilmiştir. Çizelge 2. 2’den de açıkça görüldüğü gibi doğal gazın %87-96’sı gibi büyük bir kısmı metan gazından oluşmaktadır. Doğal gazın yanması sonucu açığa çıkan karbon dioksit miktarı kömüre oranla %45, petrole oranla ise yaklaşık %30 daha azdır. Doğal gazın kömüre ve petrole göre daha temiz bir yakıt olması doğal gazı daha cazip hale getirmektedir.

Küresel kapsamda enerji arzının yaklaşık %21,2’lik kısmı doğal gazdan karşılanmaktadır ve doğal gazın büyük bir bölümü elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Uluslar Arası Enerji Ajansının verilerine göre 2030 yılına kadar doğal gazdan elde edilen enerji miktarının %67’den daha fazla büyüyeceği öngörülmektedir [7].

Çizelge 2.2 Doğal gazın kimyasal bileşimi.

Bileşen	Bileşim	Aralık
Metan	95,2	87,0-96,0
Etan	2,2	1,5-5,1
Propan	0,2	0,1-1,5
Butan, N Bütan	0,03	0,01-0,3
İzo-Pentan, N-Pentan, Hekzan	0,01	0,001-0,14
Azot	1,3	0,7-0,56
Karbondioksit	0,7	0,1-1,0
Oksijen	0,02	0,01-0,1
Hidrojen	Eser Miktarda	0,01-0,02
Özgöl Ağırlık	0,58	0,57-0,62
Isıl Değer (Mj/M ³), Kuru Bazda	37,8	36,0-40,2

2014 yılında Dünya geneli doğal gaz rezervleri 187,1 trilyon m³ olarak belirlenmiştir. Dünya doğal gaz rezervlerinde en büyük paya sahip olan bölge petrolde de olduğu gibi Orta Doğu'dur ve Orta Doğu'yu sırayla Avrasya, Asya Pasifik, Afrika, Kuzey Amerika ve Avrupa takip etmektedir [11]. Şekil 2. 6'da 2014 yılı Dünya'da ispatlanmış doğal gaz rezervlerinin bölgelere göre yüzdesel dağılımı verilmiştir.



Şekil 2.6 2014 yılı dünya ispatlanmış doğal gaz rezervleri dağılımı [14].

2016 yılı sonu itibari ile Türkiye'de üretilebilir doğal gaz rezervinin 18,7 milyar m³ olduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra önemli bir doğal gaz çeşidi olan metan hidratların Türkiye'de arama ve rezerv belirleme çalışmaları devam etmektedir. Yapılan rezerv belirleme çalışmalarında Karadeniz, Ege ve Marmara Denizinde önemli metan hidrat

rezervlerine rastlanmıştır. Fakat bu enerji kaynağının çıkarılması için yeterli teknolojik alt yapı bulunmadığından henüz enerji kaynağı olarak kullanılamamaktadır.

2.1.2.3 Nükleer Enerji

Nükleer enerji günümüzde bilinen en temiz enerjilerden biridir ve iki yöntemle elde edilebilmektedir. Bunlardan birincisi iki küçük atom çekirdeğinin birleşmesi sonucu yani füzyon yoluyla elde edilen enerji, ikincisi ise bir büyük atom çekirdeğinin parçalanması yani fisyonlanması yoluyla elde edilen enerjidir. En önemli avantajlarından birincisi, bu enerjinin oluşumu sırasında çevreye herhangi bir zararlı gaz salınmamasıdır ve bu sebeple temiz enerji türleri arasında yer almaktadır. İkinci avantajı ise kısa sürede yüksek miktarlarda enerji elde edilebiliyor olmasıdır. Bunun yanı sıra nükleer enerji iki büyük önemli dezavantaja sahiptir. Bunlardan birincisi nükleer enerji eldesi sonrasında açığa çıkan radyoaktif atıkların bertaraf edilmesi, ikincisi ise yüksek güvenlik standartlarına rağmen çok riskli bir teknoloji olmasıdır.

Nükleer enerjinin günümüzde en çok kullanılan ana yakıtı uranyumdur ve uranyum kullanılarak elde edilen enerjinin büyük bir kısmı elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. Günümüzde Dünya elektrik ihtiyacının %13'ü nükleer enerjiden karşılanmaktadır [15] ve Dünya genelinde 31 ülkede 437 adet nükleer reaktör bulunmaktadır. Nükleer enerji üretiminde, nükleer reaktör sayısı bakımından Amerika (104 adet reaktör), elektrik üretiminde nükleer enerjinin payı bakımından ise Fransa birinci sırada yer almaktadır. Ülkemizde henüz yapımı tamamlanmış nükleer santral bulunmamakta ancak planlama aşamasındadır.

2.1.2.4 Kömür

Kömür elementel bileşimi karbon, hidrojen, oksijen, azot ve kükürt olan fosil bir yakıttır ve oluşumu yüzyıllar almaktadır [16],[17]. Kömürden elde edilen enerjinin büyük bir kısmı elektrik ve ticari amaçlı ısı üretiminde kullanılmaktadır. Bu kullanım alanlarını sırasıyla demir çelik endüstrisi diğer sanayi sektörleri ve evsel ısınma amaçlı kullanım takip etmektedir. Günümüzde dünyada enerji arzının yaklaşık %27'lik kısmı, ikinci en büyük pay ile kömürden karşılanmaktadır ve kömürün dünya enerji arzının

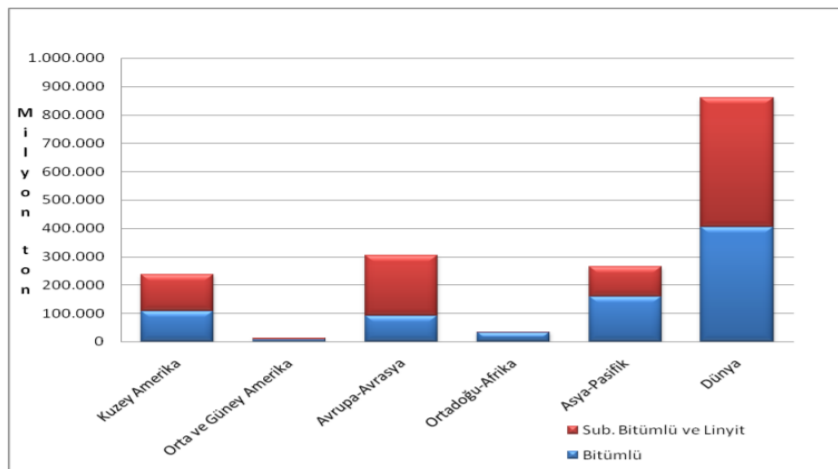
karşılanmasındaki belirleyici konumunu en azından önümüzdeki 25 yıl içerisinde de arttırarak sürdüreceğini öngörmektedir [18].

Kömür, bulunduğu bölgeye ve türüne göre farklı bileşim ve enerji içeriğine sahiptir. Çizelge 2. 3'te çeşitli kömür türlerinin bazı tipik özellikleri verilmiştir [19].

Çizelge 2.3 Kömür türlerinin çeşitli özellikleri

	Antrasit Kömür	Bitümlü kömür	Linyit Kömürü
Sabit Karbon (%)	80,5-85,7	44,9-85,7	31,4
Nem (%)	2,7-16,3	2,2-15,9	39
Yığın Yoğunluğu (lb/ft3)	50-58	42-57	40-54
Kül (%)	9,7-20,2	3,3-11,7	3,3-11,7
Kükürt (%)	0,6-0,77	0,7-4,0	0,4

Türkiye Kömür İşletmeleri Müdürlüğü'nün (TKİ) 2015 yılı sektör raporunada Dünya genelinde toplam kömür rezervinin 891 milyar ton olduğu ve bu rezerv toplamının yaklaşık 403 milyar tonunun antrasit-bitümlü kömür (taş kömürü), 488 milyar tonunu ise linyit kömürünün oluşturduğu belirtilmiştir. Dünya kömür rezervleri coğrafi olarak hemen hemen dünyanın bütün bölgelerinde 100'den fazla ülkeye yayılmış olmakla birlikte en yüksek miktarda kömür rezervine sahip ülkeler sırasıyla ABD, Rusya, Çin, Avustralya ve Hindistan'dır. Şekil 2.7'de bölgeler itibari ile Dünya kömür rezervi dağılımı verilmiştir [20].



Şekil 2.7 Bölgeler itibari ile Dünya kömür rezervi dağılımı

Türkiye’de ise toplam kömür rezervi toplam 17 milyar ton ’dur ve toplam kömür rezervinin sadece 1,3 milyar tonu taş kömürü, geri kalan rezervler ise linyit kömürüdür [18].

Bu çalışmada yenilenemeyen bir enerji kaynağı olan linyit kömürünün iyileştirme çalışması amaçlandığından ilerleyen bölümlerde kömür hakkında daha ayrıntılı bilgi verilecektir.

2.1.3 Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji, doğal kaynaklardan sürekli veya tekrarlanabilir olarak temin edilebilen enerjidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarını, güneş enerjisi, jeotermal enerji, rüzgar enerjisi, gelgit enerjisi, hidrolik enerji ve biyokütle enerjisi oluşturmaktadır (Şekil 2.8). Bu enerji kaynaklarının en önemli özellikleri sürekli ve kısa zamanda tekrar üretilibilmeleri yani sürdürülebilir olmaları, fosil yakıtların aksine çevre dostu olmaları ve tükenme riski taşımamalarıdır [21].



Şekil 2.8 Yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları

Gün geçtikçe artan enerji ihtiyacıyla birlikte, enerji kaynağı olarak fosil yakıtlara olan talep artmakta, bunun yanı sıra fosil yakıt rezervleri her geçen gün azalmaktadır. Fosil yakıtlara olan talebin artması, fosil yakıt rezervlerin azalması fosil yakıtların fiyatlarında artışa ve yüksek miktarda fosil yakıt kullanımı sonucu oluşan emisyon gazları önemli ölçüde çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Bu sebeplerden dolayı enerji ihtiyacının karşılanmasında yenilenebilir enerji (biyoenerji) kaynaklarının önemi ve bu kaynaklara

olan yönelim her geçen gün artmaktadır. Enerji ihtiyacının karşılanmasında özellikle biyokütle, güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları, enerjinin sürdürülebilir, daha ekonomik ve çevre dostu olarak elde edilmesine olanak sağlamaktadır [5].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının sahip olduğu en büyük dezavantaj, bu kaynakların kullanılacağı bölgeye, amaca ve mevsime göre farklı performans göstermesidir, örneğin güneş enerjisini enerji kaynağı olarak kullanan güneş panelleri, daha çok güneş alan bölgelerde ve yaz mevsiminde iyi performans gösterirken [22], rüzgar enerjisini enerji kaynağı olarak kullanan rüzgar türbinleri, deniz kıyısı gibi bol rüzgar alan bölgelerde ve sonbahar, kış gibi rüzgarın çok olduğu mevsimlerde daha iyi performans göstermektedirler.

Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının aksine biyokütle, yılın her mevsiminde dünyanın her bölgesinde üretilebilmektedir ve bu sebeple biyokütle, yenilenebilir enerji kaynakları içinde en önemli enerji kaynağı olarak görülmektedir. Ayrıca diğer enerji türlerine kıyasla biyokütlenin; nakliyesinin kolay olması, sanayiye uygulanabilir olması ve karbon nötr özellikte olması biyokütleyi daha da cazip hale getirmektedir [23]. Dahası biyokütle kaynaklarının enerji üretiminde kullanımı, tarım sektörünün gelişmesine, ülkeler için gerekli enerjinin yerli kaynaklardan üretilmesine olanak sağlamakta ve bu sayede diğer ülkelere politik ve ekonomik bağımlılığın azalmasına sebep olmaktadır [24].

Günümüzde Dünya’da enerji arzının yaklaşık %12’si yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmaktadır ve Şekil 2. 3’den de görüldüğü gibi enerji arzının karşılanmasında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı 1990 yılından bu güne sürekli olarak artış göstermektedir.

Türkiye’de ise enerji arzının yaklaşık %10’luk kısmı yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Türkiye’de en çok kullanılan yenilenebilir enerji kaynağı hidrolik enerji olup, bunu biyokütle, rüzgar, güneş gibi diğer yenilenebilir enerji kaynakları takip etmektedir.

2.1.3.1 Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, güneşin radyasyonundan elde edilen enerjidir yani güneşin çekirdeğinde yüksek basınç ve sıcaklıkta hidrojen gazının helyum gazına dönüşmesi sırasında ortaya çıkan radyasyon enerjisidir. Güneş enerjisi dünya üzerinde bulunan tüm enerji kaynaklarının ana kaynağı olmasına rağmen kendisi de başlıbaşına yenilenebilen enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Güneş enerjisinden enerji üretimi 1970 yılların sonunda başlamış ve son yıllarda gelişen teknolojiyle birlikte kullanımı ivme kazanmıştır.

Günümüzde güneşten enerji elde etmede kullanılan en yaygın teknoloji güneş pilleridir [25],[26],[27] ve 2015 yılı itibari ile global kapsamda kurulu güneş pili kapasitesi 2014 yılına kıyasla %25 oranında artarak 227 GW (gigawatt)'a yükselmiştir. Global kapsamda güneş enerjisinden enerji üreten ülkelerin başında Almanya ve İtalya gelmektedir ve bunları sırasıyla Çin, Japonya ve ABD takip etmektedir.

Türkiye güneş enerjisi potansiyeli yüksek olan ülkeler arasında yer almasına rağmen, 2015 yılı sonu itibari ile güneş enerjisinden enerji elde edilmesi amaçlı toplam kurulu güneş enerjisi gücü sadece 248,8 Megawatt (MW) olarak belirlenmiştir [28],[29].

2.1.3.2 Rüzgar Enerjisi

Güneşin dünya yüzeyindeki bölgeleri farklı oranlarda ısıtmasından kaynaklı hava hareketleri rüzgârı oluşturmaktadır ve rüzgârların oluşma şekline bakıldığında, diğer yenilenebilir enerji kaynakları gibi rüzgâr enerjisinin de ana kaynağının güneş olduğu görülmektedir.

Rüzgârın, enerji kaynağı olarak kullanımı yüz yıllar öncesinde yel değirmenleri ile başlamış ve günümüze, yel değirmenlerine kıyasla daha verimli bir teknoloji olan rüzgâr türbinleri ile taşınmıştır [30],[31]. Rüzgâr türbinlerinden elde edilen enerjinin büyük bir kısmı elektrik üretiminde kullanılmaktadır. 2015 yılında rüzgâr türbinleri kurulu gücü 428 GW'a ulaşmış ve global kapsamda bakıldığında 2015 yılı sonu itibari ile bir önceki yıla kıyasla rüzgârdan elde edilen enerji %17 oranında artmıştır. Bu artış diğer bütün yenilenebilir enerji türlerindeki kapasite artışının üzerindedir [32],[33].

Türkiye, OECD (Ekonomik Kalkınma Ve İşbirliği Örgütü) ülkeleri arasında en yüksek rüzgâr enerjisi potansiyeline sahip ülke olmasına rağmen hali hazırda Türkiye, toplam kurulu

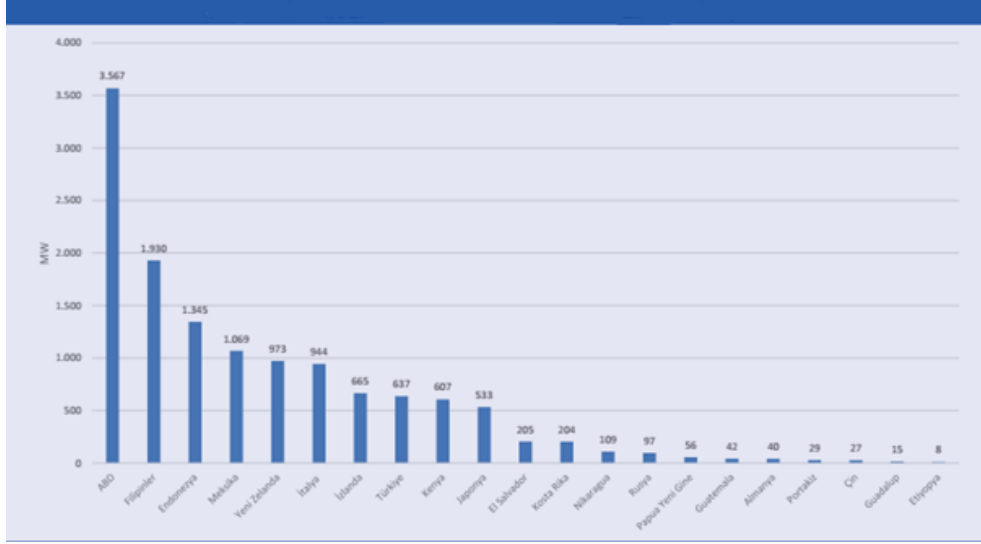
güç kapasitesi açısından bu ülkelerin çok gerisindedir. 2016 yılı sonu itibari ile Türkiye’de rüzgar enerjisi kurulu güç kapasitesi 6081 MW seviyelerindedir, bu kapasitenin 2023 yılı itibari ile 20 bin MW yükseltilmesi hedeflenmektedir [34].

2.1.3.3 Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji, yer kabuğunun altındaki volkanik olaylarla ve minerallerin radyoaktif bozunması sırasında oluşan termal enerjidir [35]. Jeotermal enerjinin en önemli özellikleri yenilenebilen, düşük maliyetli, çevre dostu ve sürdürülebilir bir enerji türü olmasıdır. Günümüzde jeotermal enerji, elektrik üretimi, ısıtma sistemleri, biyogaz prosesleri, biyodizel üretimi, tarım, sulama gibi birçok alanda kullanılabiliyor olmasına rağmen [36],[37], dünya enerji ihtiyacının sadece %1’in altında bir kısmı jeotermal enerjiden sağlanabilmektedir.

Jeotermal enerji kapasiteleri açısından bakıldığında, Dünya’da en yüksek jeotermal enerji kapasitesine sahip olan ülke ABD’dir ve onu Filipinler, Endonezya, Meksika takip etmektedir (Şekil 2.8). 2015 yılında jeotermal enerji kullanılarak enerji üreten tesislerin kapasitesinde yaklaşık 315 MW’lık bir artış gerçekleşmiş ve bu sayede toplam jeotermal enerji kapasitesi yaklaşık 13,2 GW’a yükselmiştir.

Türkiye, jeotermal enerji kapasitesi açısından dünyada sekizinci sırada yer almaktadır ve 2015 yılı itibari ile jeotermal enerjide en yüksek kapasite artışını gerçekleştiren ülke konumundadır [34]. 2015 yılında dünya genelinde gerçekleşen kapasite artışının neredeyse yarısı kadarı Türkiye’de gerçekleşmiş olup, 2015 yılı sonu itibari ile Türkiye’deki kurulu güç 637 MW seviyesine ulaşmıştır.



Şekil2.9 2015 Jeotermal enerji ülke kapasiteleri [38].

2.1.3.4 Hidrolik Enerji

Hidrolik enerji; suyun akışı sırasında kazandığı gücün elektrik enerjisine dönüştürülmesi sonucu elde edilen düşük maliyetli, çevre dostu, yenilenebilen bir enerji türüdür. Diğer enerji kaynaklarından hidrolik enerjiyi ayıran en önemli fark yakıtın elimine edilmesi yani yakıtın yanma özelliği olmamasıdır ve bu sebeple bu tesisler hava kirliliği ve ısı kirliliği oluşturmamaktadır [34].

Dünyanın en eski hidroelektrik santrali 1878 yılında İngiltere'nin Northumberland bölgesinde kurulmuştur ve günümüzde küresel kapsamda hidrolik enerjiden elektrik üreten tesislerin toplam kapasitesi 1064 GW'a ulaşmıştır [29].

Türkiye, hidrolik enerji bakımından yüksek potansiyele sahip bir ülkedir ve hidrolik enerjinin diğer yenilenebilen enerji kaynaklarına göre daha düşük maliyetle elde edilebiliyor olmasından kaynaklı, Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretimindeki en büyük pay hidrolik enerji kaynaklarına aittir. 2016 yılı sonu itibari ile Türkiye'de hidrolik enerji kurulu gücü 26.681 MW'tır.

2.1.3.5 Deniz ve Okyanus Enerjisi

Okyanus ve denizlerden enerji eldesi 3 kısımda incelenir. Bunlar dalga, okyanus ısısı ve gel-git enerjisidir. Dalga enerjisi, denizler üzerinde esen rüzgarların meydana getirdiği dalgalardan elde edilen enerjidir. Bu enerji türü üzerinde çalışmalar 1970'li yıllarda

Japonya’da başlamıştır. Günümüzde dalga enerjisinin daha verimli kullanılabilmesi amacıyla yeni teknolojiler geliştirilmesi üzerine çalışmalar devam etmektedir.

Okyanusların güneşten depoladığı ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren sistemler okyanus ısısı enerji sistemleri ve bu yöntemle elde edilen enerji ise okyanus ısısı enerjisi olarak adlandırılmaktadır.

Gel-git enerjisi ay, güneş ve dünya arasındaki çekim kuvvetlerinin sonucu sularda meydana gelen gel-git hareketinden kaynaklanan enerji olarak adlandırılmaktadır [39]. Dünyanın ilk ticari gel-git istasyonu 2007 yılında İrlanda’daki Strangford Lough’a kurulmuştur.

2015 yılı itibari ile küresel kapsamda deniz ve okyanuslardan elde edilen enerji miktarının 530 MW olduğu belirlenmiştir [29]. Ülkemizde bu enerji türlerinden yararlanılması amaçlı birçok çalışma yapılmakta fakat henüz kurulu bir santral bulunmamaktadır.

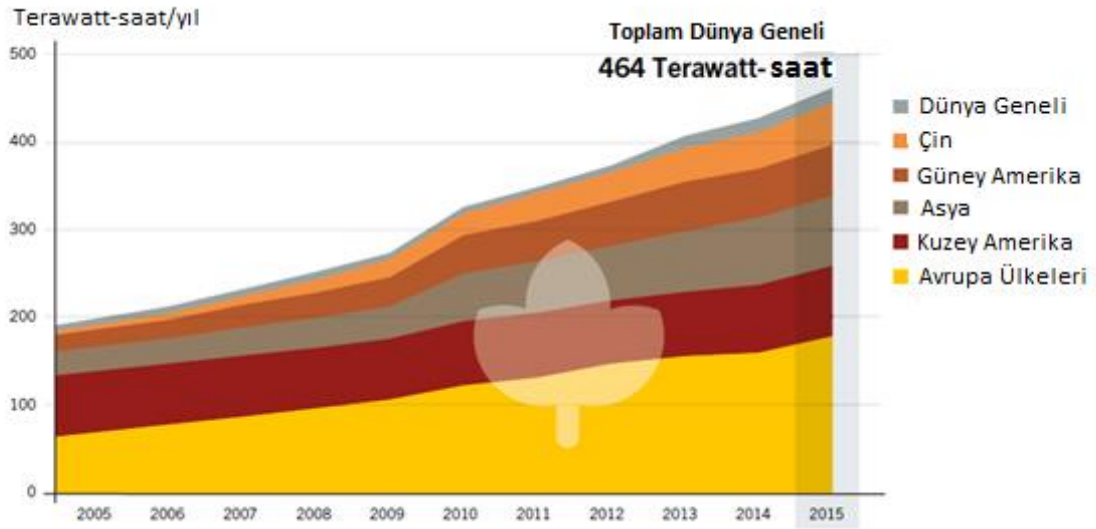
2.1.3.6 Biyokütle Enerjisi

Biyoenerji veya biyokütle enerjisi, tarımsal kökenli organik maddelerin (tahıllar, mahsul atıkları, bitkisel yağlar, şeker mahsulleri vb.) ve hayvanların (gübre) atıklarından elde edilen enerjidir. Tüm yenilenebilir enerji kaynaklarında olduğu gibi biyokütlenin de ana enerji kaynağı güneştir yani biyokütle fotosentez sırasında güneşten aldığı enerjiyi kimyasal bağlarda depolamaktadır [8], [39],[40],[41],[42].

Biyokütle insanlar tarafından pişirme ve ısınma amaçlı kullanılan ilk enerji kaynağıdır ve hemen hemen tüm insanlık tarihi boyunca enerji kaynağı olarak kullanılmıştır. Biyokütlenin enerji kaynağı olarak kullanılmasının en önemli avantajları fosil yakıtlara kıyasla yenilenebilir, sürdürülebilir, çevre dostu ve ekonomik bir yakıt türü olmasıdır. Biyokütlenin enerji kaynağı olarak kullanılmasının avantajlarının yanı sıra, bilinçsizce kullanımı sonucu bitki örtüsünün ve ormanların yok olma riski ve biyokütlenin birim hacim başına enerji yoğunluğunun düşük olması gibi dezavantajları da bulunmaktadır.

Biyokütle enerjisi günümüzde enerji ihtiyacının karşılanmasında yakıt türleri arasında %10,3’lük payla 4. sırada yer almaktadır. 2013 verilerine göre biyokütleden elde edilen enerji 464 TWh (Terawatt saat)’dir ve dünya geneline bakıldığında biyokütleden enerji üretiminde ABD yüzde 46 ile birinci, Brezilya ise yüzde 24 ile ikinci sıradadır (Şekil 2.10)

[43]. Uluslararası Enerji Ajansı verilerine göre 2050 yılında biyoenerji üretiminin bugünkü üretimin üç katına çıkacağı öngörülmektedir.



Şekil 2.10 2005-2015 Biyoenerji üretim verileri [29].

Ülkemizde ise biyokütle enerjisi potansiyeli yüksek olmasına karşılık enerji üretiminde, biyokütlenin diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre kullanımı daha geri plandadır. 2016 yılsonu itibarıyla Türkiye'nin biyokütle enerjisi kurulu gücü yaklaşık 467 MW seviyelerinde bulunmaktadır ve 2023 yılı itibarı ile bu değerin 2 bin MW'a çıkarılması hedeflenmektedir.

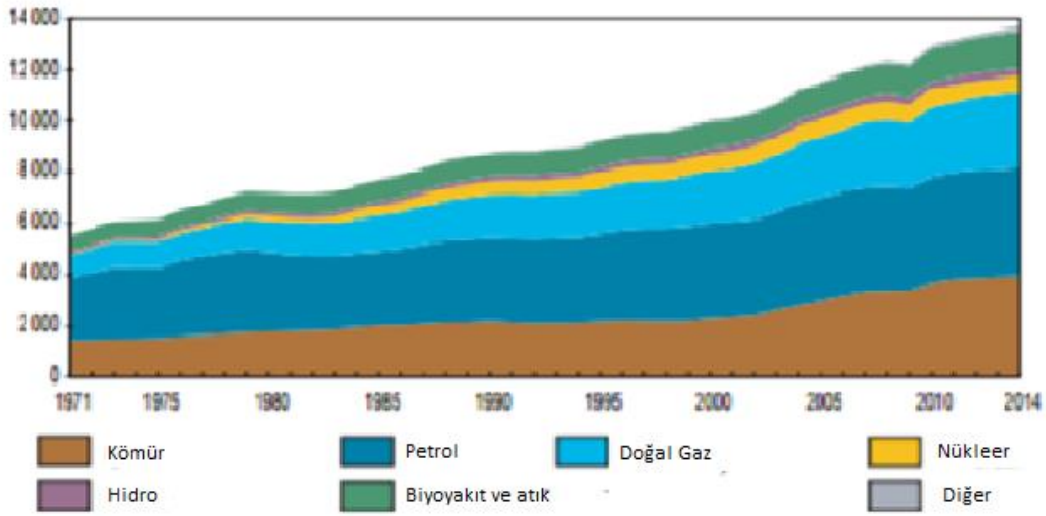
Bu çalışmada yenilenemeyen bir enerji kaynağı olan linyit kömürünün iyileştirme çalışmasında katkı maddesi olarak biyokütle kullanımı amaçlandığından ilerleyen bölümlerde biyokütle hakkında daha ayrıntılı bilgi verilecektir.

2.2 DÜNYA'DA ve TÜRKİYE'DE ENERJİ

Global kapsamda enerji ihtiyacı teknolojik gelişmeler, sanayileşme ve nüfus artışına paralel olarak her geçen gün artmaktadır. 1973 yılında toplam enerji ihtiyacı 6.101 MTEP (milyon ton eşdeğer petrol) iken 2014 yılında yaklaşık %124 oranında artarak 13,699 MTEP'e ulaşmıştır (Şekil 2.11). Uluslararası enerji ajansının verilerine göre bu oranın her yıl yaklaşık %1,5'lik bir artış göstererek 2035 yılında 18.700 MTEP'e ulaşacağı düşünülmektedir.

Son yıllarda yenilenebilir yakıtlar enerji ihtiyacını karşılamada büyük ivme göstermiş olmasına rağmen global kapsamda enerji ihtiyacının karşılanmasında petrol, kömür ve

doğal gaz gibi yenilenemeyen fosil yakıtlar baskın rol oynamaktadır. Enerji ihtiyacının yaklaşık %80'i bu yakıtlardan ve geri kalan yaklaşık %20'lik kısmı ise yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansının verilerine göre 2035 yılında da enerji ihtiyacının karşılanmasında fosil yakıtların en önemli enerji kaynağı olacağı ve petrol kaynaklarının ömrünün azalması sebebiyle mevcut petrol rezervleri baz alındığında enerji arzının karşılanmasında birinci sırada olan petrolün yerini kömürün alacağı tahmin edilmektedir.



Şekil 2.11 1971-2014 yılları arası toplam global enerji ihtiyacı

Ülkeler kapsamında bakıldığında 2013 yılında Çin enerji arzı en yüksek olan ülkedir ve Çin'i sırasıyla Amerika, Hindistan, Rusya ve Japonya izlemektedir (Çizelge 2. 4). Çizelge 2. 4'den de açıkça görüldüğü gibi ülkelerin enerji arzını karşıladığı enerji kaynağı çeşitleri ülkelere göre farklılık göstermektedir. Çin ve Hindistan'da enerji arzının büyük bir kısmı kömürden karşılanırken, ABD'de petrolden ve Rusya'da ise doğal gazdan karşılanmaktadır. Enerji arzının en yüksek olduğu ilk 10 ülke arasında enerji talebinin yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılandığı ülke ise Brezilya'dır.

Çizelge 2.4 2013 yılında enerji arzı en yüksek olan ilk on ülke

	Ülke	Toplam	Kömür	Petrol	Doğal Gaz	Nükleer	Yenilenebilir	Yenilenemeyen %
1	Çin	126	84,8	20,3	5,88	1,22	13,8	11%
2	USA	91,4	18,1	32,7	25,5	8,97	6,15	6,72%
3	Hindistan	32,4	14,3	7,37	1,86	0,37	8,55	26,40%
4	Rusya	30,7	4,54	6,7	16,5	1,9	0,97	3,18%
5	Japonya	19	5,08	8,48	4,45	0,1	0,93	4,89%
6	Brezilya	12,1	0,69	5,1	1,34	0,16	4,86	40%
7	Kore	11	3,26	4,04	1,99	1,51	0,23	2,09%
8	Kanada	10,8	0,73	3,28	3,64	1,12	2,01	18,60%
9	İran	9,59	0,05	3,95	5,45	0,06	0,08	0,80%
10	Endonezya	8,93	1,32	3,21	1,37	0	3,04	34%
	Toplam	352	133	95,1	68,1	15,4	40,7	11,50%

Türkiye gelişen sanayi ve ekonomideki kalkınma sonucu dünyanın önemli tüketicileri arasında 21. sırada bulunmaktadır. 1973-2015 yılları arasında Türkiye’deki enerji ihtiyacı yaklaşık 4,5 kat artarak 24,4 MTEP’den 129,7 MTEP’e yükselmiştir ve sadece son on iki yılda elektrik enerjisi tüketimi 2 kat artmıştır. 2014 yılında Türkiye’de enerji arzının karşılanmasında doğal gaz %32,5 ile birinci sırada yer alırken, kömür %29,2 ile ikinci sırada, petrol ise %28,5 ile üçüncü sırada yer almıştır (Şekil 2.4). Yani son yıllarda Türkiye’de enerji talebinin yaklaşık %90’ı fosil yakıtlardan, geri kalan %10’luk kısmı ise yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmıştır [44].

Ülkemizdeki enerji ihtiyacının 2015 yılında sadece yaklaşık %25’lik kısmı yerli enerji kaynaklarından sağlanırken, geri kalan %75’lik kısmı Rusya, Irak, İran, Azerbaycan gibi komşu ülkelerden ithal edilmiştir ve 2015 yılında son on yılın en yüksek enerji kaynağı ithalatı gerçekleşmiştir.

Yerli enerjinin %51’lik kısmı fosil yakıtlardan, geri kalan kısmı ise yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmiştir. Fosil yakıtlardan elde edilen enerjinin %81,8’i kömürden özellikle linyit kömüründen, %16,2’lik kısmı petrolden ve %3’lük kısmı ise doğal gazdan elde edilmiştir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin %36,6'lık pay ile en büyük kısmı hidrolik enerjiden, %30,2'lik kısmı jeotermal kaynaklardan, %20,6'lık kısmı biyokütle kaynaklarından, %6,35'i rüzgâr enerjisinden ve %6,25'i güneş enerjisinden üretilmiştir [44].

Türkiye'ye ait 2015 yılı birincil kaynak rezervleri Çizelge 2. 5'de verilmiştir. Çizelge 2. 5'den de açıkça görüldüğü gibi Türkiye'de potansiyeli en yüksek milli enerji kaynakları linyit kömürü ve hidrolik enerji kaynaklarıdır. Petrol ve doğal gaz kaynağı ise yok denecek kadar azdır [45]. Bu sebeple Türkiye'nin enerji arzında dışa bağımlılığının azaltılmasında en önemli role linyit kömürü ve hidrolik enerji kaynakları sahiptir ve enerji sektöründe dışa bağımlılığın azaltılmasında bu kaynakların en verimli şekilde kullanılması gerekmektedir.

Çizelge 2.5 Türkiye'ye ait 2015 yılı birincil kaynak rezervleri

KAYNAKLAR	GÖRÜNÜR	MUHEMEL	MÜMKÜN	TOPLAM
Taşkömürü (Milyon Ton)	506,5	425	368,4	1.308,5
Linyit (Milyon Ton)				
Elbistan	4.845,5			4.845,5
Diğer	9.146,0	768,9	4,5	9.919,4
Toplam	13.991,5	768,9	4,5	14.764,9
Asfaltit (Milyon Ton)	82			82
Bitümler (Milyon Ton)	1.641,4			1.641,4
Hidrolik				
GWh/Yıl	59.245,8			59.245,8
MW	22.748,9			22.748,9
Ham Petrol (Milyon Varil)	7.167			7.167
Doğalgaz (Milyar m ³)	23,2			23,2
Nükleer Kaynaklar (Ton)				
Uranyum	9.129			9.129
Toryum	380.000			380.000

Türkiye'ye ait yenilenebilir enerji kaynak potansiyelleri, bu enerji kaynaklarından enerji üretimi için Türkiye'de bulunan kurulu güç miktarları ve bu enerji türleri kullanılarak elde edilen elektrik enerjisi miktarları Çizelge 2. 6'de verilmiştir. Çizelgeden de görüldüğü gibi en yüksek kurulu güce ve elektrik enerjisi üretimine sahip yenilenebilir enerji kaynağı hidrolik enerji sistemleri iken en düşük kurulu güce sahip yenilenebilir enerji kaynakları ise güneş ve biyokütle kaynaklarıdır. Türkiye bir tarım ülkesidir ve çizelgeden de açıkça görüldüğü gibi yaklaşık 20 MTEP biyokütle enerji potansiyeline sahip olmasına rağmen, biyokütle kaynaklarından enerji üretimi için elde edilen enerji miktarı çok azdır. Oysaki

Türkiye, 2015 yılı verilerine göre enerji arzının yaklaşık %15'ini biyokütle enerjisinden elde edebilme potansiyeline sahiptir [45].

Çizelge 2.6 Türkiye’de enerji üretimi

	HİDROLİK	RÜZGAR	GÜNEŞ	BİYOKÜTLE	JEOTERMAL
Kurulu Güç (MW)	25.867,8	4.503,2	248,8	362,4	623,9
Elektrik Üretimi (GWh)	67.1453,8	11.652,5	194	1.758,2	3.424,0
Isı (Bin TEP)	-	-	795	-	4,99
2023 Hedefi (MW)	36000	20000	5000	1000	1000
Potansiyel	160 TWh/yıl	48000 MW	1500 kWh/m ² -yıl	20 Milyon TEP	31500 MWt 2000 MW

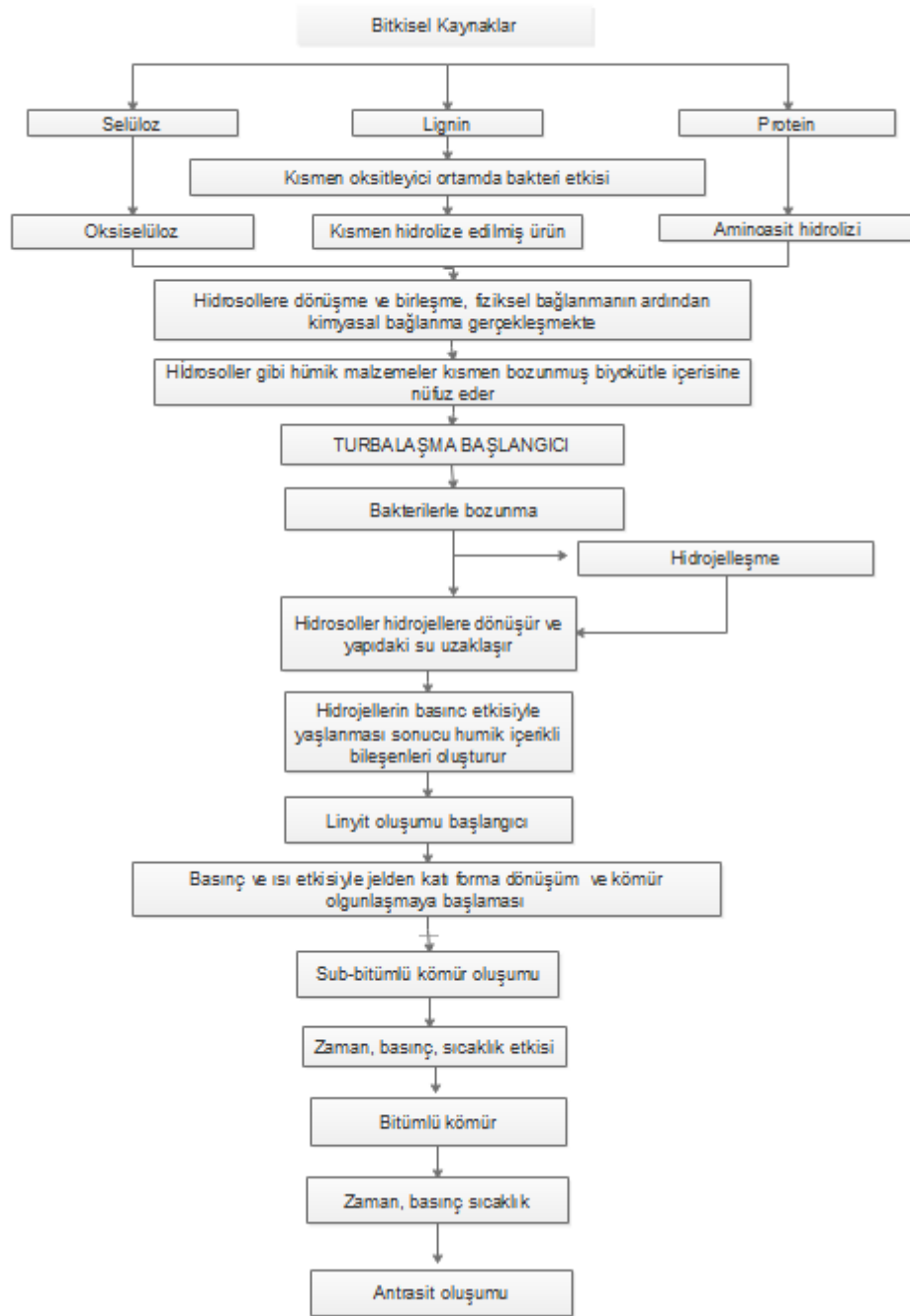
3.1 Kömür Hakkında Genel Bilgi

Kömür organik ve inorganik maddelerden oluşan, kimyasal ve fiziksel yönden heterojen yapıya sahip yanıcı bir sedimenter kayadır. Kömürün başlıca organik bileşenlerini karbon, hidrojen, oksijen, düşük miktarlarda bulunan kükürt ve azot oluşturmakta, inorganik bileşenlerini ise kömür külünü oluşturan SiO_2 , Al_2O_3 , CaO gibi bileşikler oluşturmaktadır.

Kömür, bitki atıklarının yeraltında kaya tabakaları arasında uzunca bir süre kimyasal, fiziksel, mekanik ve termal etkilere maruz kalması sonucu tabakalar halinde oluşmakta ve kömürleşme oranı ve bileşimi olduğu bölgenin bitki örtüsü türüne, jeolojik yapısına, oluşma zamanına ve üzerinde bulunan basınca bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Kömürleşme süreci, turbalaşma ile başlar ve karbonlaşma miktarının artışı sonucu antrasit kömüre dönüşmesiyle son bulur [46]. Turba bir kömür olmamakla birlikte bozunmakta olan organik maddelerden oluşan kömür oluşumunun ilk basamağını oluşturan aşamadır.

Turba → Linyit → Alt bitümlü kömür → Bitümlü kömür → Antrasit

Bitkilerden kömür oluşumu şematik olarak Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 Bitkilerden kömür oluşum prosesi

Kömürleşme sürecinde linyitten antrasit kömüre doğru gidildikçe kömürün yapısında bulunan karbon içeriği ve buna bağlı olarak ısı değeri artarken, nem ve uçucu madde miktarı giderek azalmaktadır [47],[48]. Örneğin otsu bitkilerin ve odunların karbon içeriği yaklaşık %50 iken bu oran turba içinde %60, linyitte %70, alt bitümlü kömürde %75, bitümlü kömürde %80-90 ve antrasitte %90'ın üzerine çıkmaktadır[47], [49], [50], [51].

Karbon içeriğindeki bu değişiklik karbonizasyon olarak adlandırılır. Her bir kömür tipine ait karbon, hidrojen, oksijen, nem yüzdeleri, C/H oranları ve ısı değerleri Çizelge 3.1’de verilmiş olup, buradan da görüldüğü üzere enerji verimliliği en yüksek olan kömür antrasit, en düşük olan kömür ise linyittir.

Çizelge 3.1 Oluşumuna göre farklı kömür tiplerinin özellikleri

Bileşim (ağırlıkça %)						
Çeşit	C %	Hidrojen %	Oksijen %	C/H oranı	Isıl Değer (Mj/Kg)	% Nem
Bitki	49	7	55	1,7	-	-
Turba	60	6	34	1,2	7-9,3	50-95
Linyit	70	5	25	0,9	14,6-19,3	45-60
Sub-Bitümlü Kömür	75	5	20	0,8	19,3-26,7	16-36
Bitümlü Kömür	85	5	10	0,7	26,7-32,5	1-25
Antrasit Kömür	94	3	3	0,4	>32,5	0,5-3

3.2 Kömürün Kullanım Alanları

Yanıcı olması sebebiyle kömür çok eski tarihlerden beri yakacak olarak kullanılmış ve günümüzde de hala kullanılmaya devam etmektedir. Kömür çok geniş bir kullanım alanına sahip enerji kaynağıdır ve kullanım alanları kabaca üç ana başlık altında toplanmıştır. Bunlardan birincisi elektrik üretimi amacıyla kullanılması, ikincisi sanayide kullanılması ve son olarak üçüncüsü ise ısıtma amaçlı kullanılmasıdır. Bu alanlar içerisinde kömürün en çok kullanıldığı alan elektrik üretimidir ve enerji kaynakları arasında elektrik üretiminde en çok kullanılan kaynak kömürdür. Günümüzde Dünya kömür üretiminin yaklaşık %69’luk kısmı elektrik ve ticari ısı üretim amacıyla kullanılmaktadır. Kömürün sanayi kullanımındaki payı yaklaşık %28, ısınma sektöründeki payı ise yaklaşık %2,8’dir [52]. Geri kalan %0,2’lik kısım ise gübre ve kimyasal hammadde olarak kullanılmaktadır. Kömürün en çok kullanıldığı sanayi kuruluşları çimento, demir-çelik, şeker ve tuğla fabrikalarıdır.

3.3 Kömürün Zenginleştirme Yöntemleri

Kömürün zenginleştirilmesi işlemlerine, maden sahası veya kömür hazırlama tesisinden çıkan ürünün fiziksel ve/veya kimyasal özellikleri, kömürün ekonomik bir şekilde kullanım için uygun olmadığı zaman ihtiyaç duyulur. Zenginleştirme işlemi genellikle 50

mm altındaki linyit kömürü gibi karbon içeriği düşük, kül, kükürt, nem içeriği yüksek kömür tozları için uygulanmaktadır [53]. Zenginleştirme işleminin 50 mm tanecik boyutunun altındaki kömürlere yapılmasının sebebi, tanecik boyutu küçüldükçe kömürün nem tutma kapasitesinin artması ve buna bağlı olarak kömür hazırlama ve işleme proseslerini zorlaştırması ve ayrıca artan nem miktarının kömürün enerji verimliliğini azaltmasıdır [54].

Kömürün zenginleştirme teknolojileri, fiziksel, kimyasal, fiziko kimyasal ve biyolojik zenginleştirme teknolojilerini içermektedir. Fiziksel yöntemler gravite ayırma ve manyetik ayırma yöntemleridir. Kimyasal yöntemler asidik ya da bazik ortamda yapılan ayırma (liçing) işlemlerini içermekte, fizikokimyasal zenginleştirme yöntemleri ise flotasyon ve yağ toplama teknolojilerini içermektedir, son olarak biyolojik zenginleştirme yöntemleri bakteriler kullanılarak yapılan zenginleştirme teknolojilerini içermektedir [55].

3.3.1 Fiziksel Yöntemler

3.3.1.1 Gravite ayırma yöntemi

Gravite ayırma yöntemi yaş ve kuru ayırma yöntemleri olmak üzere iki ana başlık altında incelenmektedir. Gravite ayırma yönteminde, kömür içindeki istenilmeyen bileşenlerin ve kömürün özgül ağırlık farkından yararlanılarak ayırma işlemi gerçekleştirilir. Proses süresince herhangi bir kimyasal ve ısı işlem gerekmediğinden proses çevre dostudur ve işletme maliyeti diğer zenginleştirme yöntemlerine göre daha düşüktür [56].

Yaş gravite ayırma yönteminde, ağır ortam ayırıcı, ağır medya siklon,, çalkalama tablası, spiral ayırıcı, çoklu gravite ayırıcı, Knelson konsantratörü ve Falcon konsantratörü gibi çeşitli prosesler kullanılmaktadır. Ayırma ortamını oluşturulabilmesi için çoğunlukla havanın kullanıldığı kuru gravity ayırma yönteminde ise hava jigi hava masaları ve kuru titreşim akışkan yatak prosesleri kullanılmaktadır [55].

3.3.1.2 Manyetik ayırma yöntemi

Manyetik ayırma kömür ve gang partikülleri arasındaki manyetizma farkından yararlanılarak yapılan ayırma yöntemidir. Proseste ayırma işlemi kuru numunelere

yapılabildiğinden, kömür zenginleştirmede kömürün kurutma işlemi manyetik ayırmadan önce yapılmalıdır. Bu proseste toz kömür güçlü bir manyetik alandan geçirilmektedir. Bu işlem sırasında manyetik özellikleri kömürden farklı olan maddeler manyetik alana doğru yönelerek kömürden ayrılmaktadır. Bu yöntemin en önemli dezavantajı hammaddenin 6 mm partikül büyüklüğünün altında beslenmesi gerekliliğidir [57].

3.3.2 Kimyasal Ayırma (Liçing) Yöntemi

Kimyasal ayırma yöntemi, kömürde bulunan kül ve kükürt gibi istenilmeyen bileşenlerin kömürden uzaklaştırılmasında en çok kullanılan yöntemdir. Bu proseste kömür asit veya alkali bir çözücü ile muamele edilir ve kömürün içerisinde bulunan kükürt bu çözeltiyle ekstrakte edilir yani kömürden ayrıştırılır. Proseste kullanılan asidik ya da alkali çözücü kömürün içinde bulunan kükürtün türüne göre değişiklik gösterir [58]. Derişik asit ve alkali çözeltileri güçlü oksitleme yeteneklerinden dolayı kömürün karbon içeriğinde bozunmalara sebep olmakta ve dolayısıyla ısıl değerini azaltmaktadır. Aynı zamanda bu tip çözeltiler çevresel sorunlara sebep olmaktadır, bu sebeple bu tip sistemlerde seyreltik asit ve alkali çözeltiler kullanılmaktadır [59].

3.3.3 Fizikokimyasal Ayırma Yöntemleri

3.3.3.1 Flotasyon

Flotasyon, kömürden kül ve kükürt ayırma amaçlı kullanılan etkili yöntemlerden bir tanesidir. Flotasyonla, yüzey aktif maddeler ve köpürücüler gibi ajanlar kullanılarak zenginleştirme işlemi yapılır ve genellikle 0,5 mm altındaki kömür tozlarına uygulanır [55]. Kömür doğada bulunan organik hidrofobik malzemelerden bir tanesidir. Kömürün hidrofobikliği, kömürün kömürleşme derecesine ve bünyesinde bulunan oksijen fonksiyonel grubun varlığına göre değişiklik göstermektedir. Hidrofobikliği en yüksek olan kömür antrasit iken en düşük olan kömür linyittir. Kömürün yapısında bulunan kil, kuvars, kalsit, dolomit, pirit, klorit gibi maddeler ise hidrofilik yapıdadır. Kömürün hidrofobik yapıda olması kömürün suda yüzdürülmesini sağlamakta ve böylece

flotasyonla yapısındaki hidrofilik yapıdaki istenilmeyen bileşenlerin ayırmasını kolaylaştırmaktadır [60].

Prensip olarak flotasyon işleminde, ünite içerisine flotasyon ajanları eklendikten sonra flotasyon uygulanacak hidrofobik ve hidrofilik tanelerden oluşan malzeme flotasyon ünitesi içerisine bırakılır. Çözelti içerisine hava kabarcıkları gönderilir. Bu hava kabarcıkları sayesinde sistemde bulunan hidrofobik taneler yukarı doğru yükselen hava kabarcıklarına yapışır ve bu kabarcık-tane formu köpük şeklinde çözelti yüzeyinde toplanırlar. Tane yüklü köpük flotasyon hücresi üzerinden taşarak başka bir kaba gönderilir. Hidrofilik taneler ise hava kabarcıklarına yapışamadıklarından hücre içerisinde kalır ve hücrenin alt tarafından dışarıya atılır [61].

Kömürlerin flotasyon verimi, çözelti pH'ı, flotasyon ajanı miktarı ve cinsi, flotasyon süresi, kömür tanecik boyutu, sisteme gönderilen havanın akış hızı gibi birçok parametreye bağlı olarak değişiklik gösterir [62],[63].

3.3.3.2 Yağ aglomerasyonu

Yağ aglomerasyonu flotasyona alternatif olarak geliştirilmiş bir zenginleştirme yöntemidir ve flotasyonla ayrılamayan çok küçük tanecik boyutlarındaki kömürün kazanılmasına olanak sağlar. Bu proseste kömür taneciklerinin hidrofobik özelliğinden yararlanılarak taneciklerin bir arada tutulmasını sağlayan pentan, heptan, n-hekzan, gaz yağı, mazot, diğer petrol türevleri ve bitkisel yağlar gibi bir bağlayıcı yardımıyla kömür bünyesinde bulunan safsızlıkların giderimi işlemi yapılır [64],[65].

Flotasyonla kazanılamayan çok ince yapıdaki partiküllerin kazanılmasına olanak sağlaması, verimin flotasyona göre yüksek olması ve aynı zamanda kömürün neminin de giderilmesini sağlaması yağ aglomerizasyonunun en önemli avantajlarıdır. Flotasyona göre en önemli dezavantajı ise yüksek miktarda bağlayıcıya ihtiyaç duyulmasından kaynaklı pahalı bir yöntem olmasıdır [66].

Yağ aglomerasyonu prosesinin prensibi, hidrofobik özellikteki kömür partiküllerinin üzerine aglomerasyon ajanının kaplanarak kömür taneciklerini bir arada tutunabilmesi için bir köprü görevi görmesi sağlanarak kömür taneciklerinin aglomerat yapısının oluşmasıdır. Bu yapı hidrofobik taneciklerin kümelenerek dağılmaya karşı dayanıklı daha

büyük partikül boyutuna ulaşmasına olanak sağlar ve böylelikle eleme gibi basit bir yöntemle aglomere olmayan hidrofilik yapıdaki küçük tanecik boyutundaki safsızlıkların kömürden uzaklaştırılmasını kolaylaştırır [54],[66].

3.3.4 Biyolojik Zenginleştirme Yöntemleri

Biyolojik zenginleştirme yöntemi fiziksel ve kimyasal kömür zenginleştirme yöntemlerine kıyasla enerji maliyeti ve işletme maliyeti düşük olan bir yöntemdir. Bunlara ek olarak kömürün ısıl değerinde herhangi bir azalmaya sebep olmaması ve kömürün bünyesinde bulunan ve fiziksel yöntemlerle ayrıştırılamayan kükürtün giderimine olanak sağlaması diğer yöntemlere göre bu yöntemi cazip kılmaktadır. Diğer yöntemlere kıyasla en önemli dezavantajı proses süresinin uzun olmasıdır.

Prosesin prensibi kömür içerisinde bulunan safsızlıkların özellikle organik ve inorganik halde bulunan kükürt bakteriler yardımıyla suda çözünebilen forma dönüştürülerek kömür içinden uzaklaştırılmasıdır. Yapılan çalışmalar doğrultusunda bu yöntem kullanılarak kömürün yapısında bulunan inorganik kükürdün %90 seviyelerinde giderebilmek mümkün iken, organik kükürt giderim verimi oldukça düşüktür. Kömür içerisindeki inorganik kükürdün giderilmesinde farklı grup mikroorganizma kullanılmaktadır. Bunlardan bir grup mikroorganizma oda sıcaklığında (18-40°C) kükürt giderimi yaparken diğer grup mikro organizmalar termofilik özelliktedir yani yüksek sıcaklıklarda (60-90°C) etkindirler. Oda sıcaklığında etkin olan mikroorganizmalar Ferrobacillus ferrooxidanları (Thiobacillus ferrooxidanları), Thiobacillus thiooxidans ve diğer ilgili thiyonik mikroorganizmalardır. Yüksek sıcaklıkta etkin olan mikroorganizmalar ise Sulfolobus acidocaldarius, Sulfovacillus thermosulfidooxidans, Sulfolobus brierlegi ve Sulfolobus sulfaticus mikroorganizmalarıdır [67].

KÖMÜRÜN BRİKETLENMESİ

Dünya kömür rezervlerinin nerdeyse yarısı linyit gibi düşük kaliteli kömürdür ve gelişmekte olan ülkelerde enerji ihtiyacının karşılanmasında birincil enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır [68].

Bilindiği üzere kömürün fiziksel ve kimyasal özellikleri linyitten antrasit kömüre doğru gidildikçe artmaktadır ve linyitler kömür türleri arasında ısı değeri en düşük, nem, kül, kükürt ve oksijen içeriği en yüksek olan türdür. Nem içeriğinin yüksek olması linyitlerin ısı değeri azalmasına, yüksek CO₂ emisyon gazının salınmasına ve taşıma maliyetlerinin artmasına sebep olmaktadır [69],[70]. Ayrıca yapılarının kırılgan olması sebebiyle linyit kömürleri ocaktan çıkarıldığı andan tüketiciye ulaşana kadar depolama ve nakliye sırasında büyük oranda tozlaşmaktadır. Tozlaşan kömürler, kömürün yanmasıyla soba ve kalorifer kazanlarındaki ızgaralardan yanmadan geçerek ve baca gazları ile sürüklenerek çevreyi kirletmekte, yanma verimini düşürmekte ve yenilenemeyen bir enerji kaynağı kaybına sebep olmaktadır. Linyitlerin çıkarılmasından yakılmasına kadar geçen süre içerisinde toplam kayıp % 60'a kadar çıkmaktadır [71].

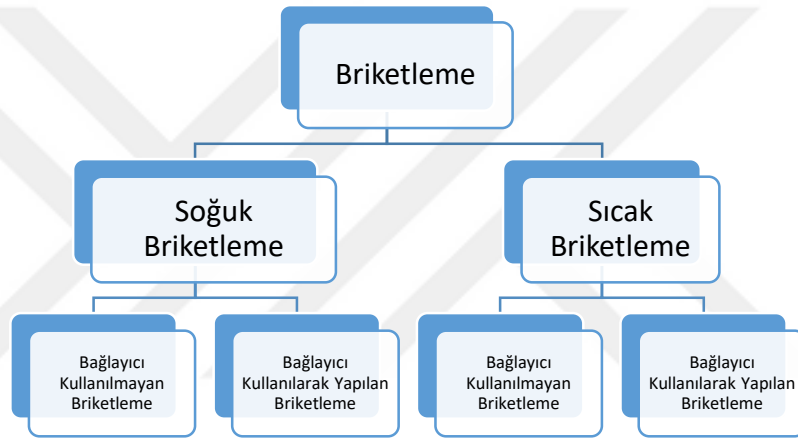
Linyitlerin kullanımıyla ilgili olumsuz etkileri gidermenin, linyit kömürlerinin daha verimli ve çevre dostu hale getirmenin en iyi ve en ucuz yolu briketleme prosesisidir.

Briketleme kömür tozlarının uygun ortam şartlarında ısıtılarak ve/ veya çeşitli katkı maddeleri kullanılarak bir kalıp içerisinde preslenmesi sonucu sağlam ve kaliteli yakıt haline dönüştürülmesidir [72],[73]. İşlemdeki yüksek basınç ve bağlayıcı, nakliye, depolama ve yanma esnasında ayrışmanın olmamasını sağlamak için kömür

partiküllerinin birbirine yapışarak bağlanmasına sebep olur. Bağlayıcılar kömürün yanması sırasında oluşan emisyon gazlarını düşürmekte ve böylelikle dumansız daha temiz yakıtlar elde edilmesine olanak sağlamasının yanı sıra tutuşma sıcaklığını düşürerek ve ısı değeri arttırarak briketlere daha iyi termal verimlilik sağlamaktadır.

4.1 Briketlemede Kullanılan Yöntemler

Briketleme çalışmaları sıcak briketleme ve soğuk briketleme olmak üzere iki ana başlık altında incelenmektedir. Her iki briketleme yöntemi kendi içinde bağlayıcı kullanılarak yapılan briketleme bağlayıcısız briketleme olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır (Şekil 4.1) [74].



Şekil 4.1 Briketleme prosesi çeşitleri

Soğuk briketleme yöntemi, yaklaşık 170 yıl önce kömür üretimi yapan Avrupa ülkelerinde tozlaşan linyit kömürlerinin ev yakıtı olarak değerlendirilmesi amacıyla geliştirilmiş bir yöntemdir. İlk briketleme tesisi 1842 yılında Fransa’da kurulmuştur ve Fransa’daki tesisi İngiltere ve Almanya’da kurulan briketleme tesisleri takip etmiştir. Bu yöntemde ocaktan çıkarılan toz kömürler hiçbir ön işlemten geçirilmeden bağlayıcı madde eklenerek ya da eklenmeden belirli bir baskılama basıncı altında briketlenmektedir [75].

Sıcak briketleme yöntemi 1956 yılında Birleşik Krallık ’ta çıkarılan Temiz Hava Yasası sonrası ortaya çıkmış bir yöntemdir. Bu yasaya göre bazı kontrol bölgelerinde sadece dumansız yakıtların kullanılmasına izin verilmekteydi bu sebeple dumansız yakıtlara olan talebin karşılanması amacıyla kömür içindeki uçucu bileşenlerin uzaklaştırılarak bu yasaya uygun yakıt üretilmesi planlanmıştır [76]. Bu yöntemde kömür belirli sıcaklığa

ısıtılmakta içerisindeki uçucu bileşenler uzaklaştırıldıktan sonra bağlayıcı madde eklenerek ya da eklenmeden briketlenmektedir. Isıtma sırasında kömürün içeriğindeki bitüm yumuşamakta ve bağlayıcılık özelliği kazanarak daha sağlam yapıda briketler üretilmesine olanak sağlamaktadır.

Sıcak briketleme ve soğuk briketleme proseslerinden her biri katkı maddesi eklenmeden yapılan briketleme yöntemi ve katkı maddesi eklenerek yapılan briketleme yöntemi olmak üzere iki ana başlık altında incelenmektedir. Daha önce bahsedildiği gibi katkı maddesi eklenmeden yapılan briketleme yönteminde kömür numuneleri ısıtıldıktan sonra ya da herhangi bir ısıtma işlemine maruz bırakılmadan doğrudan olarak briketlemenin yapıldığı yöntemdir. Bağlayıcı madde kullanılarak yapılan briketleme yöntemi ise briketlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini arttırmak amacıyla kömüre çeşitli bağlayıcı maddeleri eklenerek yapılan işlemdir.

Kömür briketlemede kullanılan en bilenen bağlayıcı maddeler kömür katranı, zift, petrol atıkları nişasta, humik asit, sentetik organik polimerler (örneğin PVC) [77], ataktik polipropilen (APP) [78], plastik atıkları [79], kâğıt fabrikası atıkları [80], melas [81], biyokütle gibi organik maddeler, kireç, kil, seramik gibi inorganik malzemelerdir.

Son yıllarda kömür briketleme prosesinde en çok kullanılan bağlayıcı biyokütledir. Bunun sebebi biyokütlelerin bileşiminde bulunan selüloz, hemiselüloz ve lignin maddelerinin çok iyi bağlayıcılık özelliği göstermeleridir. Genel olarak biyokütleler bağlayıcı olarak üç şekilde kullanılmaktadır. Bunlardan ilki kâğıt fabrikalarında kâğıt hamurunun hazırlanması sırasında açığa çıkan, kâğıt fabrikası atıkları seyreltilerek bağlayıcı olarak kullanılmaktadır, ikincisi biyokütle bünyesinde bulunan selüloz, hemiselüloz ve lignin hidrolize edilerek bağlayıcı olarak kullanılmasıdır [82],[83],[84] ve son olarak üçüncüsü ise biyokütlenin öğütülerek doğrudan olarak bağlayıcı olarak kullanılmasıdır [83],[85], [86], [87], [88].

4.2 Briketlemeye Etki Eden Faktörler

Kömürün briketlenmesi prosesinde elde edilecek olan ürünlerin kalitesine etki eden parametreler yedi başlık altında incelenmektedir. Bunlar başlıca kömürün doğası ve

özellikleri, briketleme sıcaklığı, briketleme basıncı ve süresi, tanecik boyutu, nem miktarı, kullanılan bağlayıcının özellikleri ve miktarı, briketlerin geometrik şeklidir.

4.2.1 Kömürün Doğası ve Özellikleri

Kömür heterojendir ve olağan üstü karmaşık yapıya sahiptir bu sebeple kömürün fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi oldukça zordur. Kömürün bu özelliklerini en iyi anlamayı sağlayan yöntemlerden bir tanesi yapısında bulunan maseral grupların belirlenmesidir. Maseraller kömürün mikroskobik olarak tanımlanan organik bileşenleri olup kömürün kömürleşme derecesini ve diğer tüm özelliklerini belirleyen farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahiptir [89]. Kömürlerde bulunan bazı maseral gruplar oldukça dayanaksızdır ve kömürlerin basınç altında kolayca kırılıp, tozlaşmasına sebep olmaktadır bu sebeple bu tür maseraller içeren kömürlerin briketlenmesi mekanik dayanımı iyi briketlerin elde edilmesine olanak sağlamamaktadır.

Kömürün rezerv bölgesi de kömürün briketlenmesine etki etmektedir. Kömür rezervinin bulunduğu bölgeye göre kömürün içinde bulunan kil ve kum gibi safsızlık oluşturan mineral miktarları ve kül miktarı değişiklik göstermekte ve briketleme sırasında bu safsızlıklar briket yapısında mikroskobik gözeneklerin oluşmasına dolayısıyla briket dayanımının azalmasına sebep olmaktadır [90]. Ayrıca kömürün yapısında bulunan kil su ile temas ettiğinde şişerek briket dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir.

Kömür tipi (linyit, antrasit vs.) üretilen briketlerin sağlamlığı açısından çok önemlidir. Kömürlerin plastik ve elastik özellikleri kömür tipine göre farklı özellik göstermekte, briketlemede uygulanan basınç kalkınca kömür tiplerinin farklı genleşmesi sonucu briketlerin çatlamasına veya dağılmasına sebep olmaktadır. Yumuşak linyitlerin briketlenme özellikleri diğer kömür tiplerine oranla çok daha iyidir. Ancak, kül ve kil içerikleri daha yüksek olduğundan briketleme özellikleri azalmaktadır. Antrasit ve taş kömürünün, linyit kömürüne oranla briketlenebilmesi çok daha zordur ve briketleme sisteminde, bilhassa kırma esnasında, önemli ölçüde aşınmalara neden olmaktadır [91].

Özellikle katkı maddesiz briketlemede kömürün yapısal özellikleri çok önemlidir. Bir kömürün katkı maddesiz briketlenebilmesi için, yumuşak linyit yapısında olup plastik özellik göstermesi, sıkıştırma sırasında sertlik kazanması ve fazla iç sürtünme

göstermemesi, mümkün olduğu kadar homojen bir yapı ve bileşime sahip olması gerekmektedir.

4.2.2 Briketleme Sıcaklığı

Briketleme prosesinde artan sıcaklık kömürün yapısında bulunan bağlayıcılık özelliği taşıyan maddelerin ve bağlayıcıların etkinliğini arttırarak briketlerin sağlamlığı üzerinde pozitif etki yapmaktadır. Ayrıca yüksek sıcaklıklar kömürün ve bağlayıcı maddelerin yapısında bulunan termoplastik parçacıkların plastik deformasyona uğrayarak kömür partikülleri arasında kalıcı bağ oluşumunu sağlamaktadır. 300°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda özellikle bağlayıcı maddelerinin yapılarında meydana gelen bozunmalar bağlayıcılık etkisini azaltmaktadır ve bu sebeple bu bozunmaları engellemek amacıyla briketleme sıcaklığı 300°C ile sınırlandırılmıştır [92],[93].

Briketlemede sıcaklığın bir diğer etkisi ise ısıtma sırasında kömürde bağlayıcı maddelerin bünyesinde bulunan uçucu bileşenlerin uzaklaşmasına ve briketlerin ısı değeri artmasına sebep olmaktadır. Briketleme için optimum sıcaklıkların üzerindeki sıcaklıklarda briketleme prosesinin maliyetlerinin artmasının yanı sıra briketlerin hem mukavemetleri azalmakta hem de briketler çok hızlı bir şekilde yanmaktadır [94],[95].

Briketleme işleminde hammaddenin sıcaklığı doğrudan ya da dolaylı ısıtma sistemleri kullanılarak arttırılmaktadır. Doğrudan ısıtma sistemleri sürtünmeli, akışkan yataklı ısıtma ve ya buhar koşullandırma sistemleriyle yapılırken, dolaylı ısıtma sıcak yağ dolaşimli ısı değiştiriciler ve elektrik dirençli bant ısıtıcı sistemleri kullanılarak yapılmaktadır [93].

4.2.3 Briketleme Basıncı ve Süresi

Briketleme prosesinde üretilecek olan briket özelliklerine etki eden en önemli parametrelerden bir tanesi briketleme basıncıdır. Basınç, presleme sonucunda oluşan küçük partiküllerin büyük partiküllü kömür taneciklerinin arasına girerek sıkışmasını sağlamanın yanı sıra moleküller arasında bağlar oluşturarak partiküller arasındaki mesafeyi azaltmakta ve böylelikle briketlerin parçalanmaya karşı dayanımını arttırmaktadır. Ayrıca briketleme basıncı arttıkça briketlerin yüzey alanı azalmakta ve

buna bağlı olarak briketlerin nem tutma kapasitesi azalmaktadır [96]. Belli bir noktadan sonra briketleme basıncını arttırmanın briketler üzerinde herhangi bir anlamlı bir etki oluşturmamaktadır. Bu sebeple optimum değerin üzerindeki briketleme basınçları maliyetin artmasından başka briketlere hiç bir olumlu yada olumsuz etki yapmamaktadır [97].

Briketleme sırasında, briketleme prosesinin bir kısım özellikleri briketleme basıncı üzerinde etkilidir. Bunlar presleme sıcaklığı, presleme süresi ve presleme yapılacak olan kalıbın çapı ve uzunluğudur. Presleme işleminde sıcak briketlenme yapılması daha düşük basınçlarda daha iyi yoğunluk ve daha iyi kaliteye sahip briketler elde edilmesine olanak sağlar. Presleme süresi arttıkça briketlerin kalite ve yanma hızları iyileşmekte ve bekleme süresi optimum bir değerin üzerine çıktığında herhangi bir etki gözlemlenmemektedir. Pres kalıbının çapı ve uzunluğu arttıkça briketlerin yüzey alanı artacağından, birim alan başına düşen basınç azalmakta ve bu sebeple pres kalıbının boyutları arttıkça daha yüksek basınçlarda çalışmak gerekmektedir [97].

4.2.4 Tanecik Boyutu

Briketlemede tanecik büyüklüğü arttıkça briketlerde oluşan boşlukların artmasına, briketlerin homojenliğinin azalmasına ve briketlerin bu boşluklardan kırılmasına ve çatlamasına sebep olmaktadır. Ayrıca büyük tanecik boyutları yüksek briketleme basıncı gerektirmekte ve bu sebeple maliyetin artmasına neden olmaktadır [93].

Tanecik boyutu küçüldükçe, serbest yüzey enerjisi arttığından, üretilen briketler daha dayanıklı olmaktadır. Ayrıca küçük tanecik boyutları briketlerin tutuşma sıcaklığını düşürmekte ve yanma sonrasında yanmamış maddelerin içeriğinde azalmalara sebep olmakla birlikte daha temiz bir yakıt üretmeye olanak sağlamaktadır. Fakat küçük tanecik boyutları kırma ve öğütme maliyetini arttırmakta ve az miktarda NO emisyonunda artışa sebep olmaktadır. Bu nedenle, farklı parçacık boyutlarından oluşan bir karışım kullanmak, parçacıklar arası bağların daha kuvvetli olmasını sağlamakta ve daha iyi kalitede briket üretimine olanak sağlamaktadır. Briketlemede kömürün cinsine göre tanecik boyutunun 0 ile 6 mm arasında olması gerekmektedir [93],[98].

4.2.5 Nem Miktarı

Briktleme prosesinde nem, parçacıklar arasındaki temas alanını arttırarak Van Der Walls kuvvetlerinin geliştirilmesine yardımcı olur ve bağlayıcı görevi görür. Ayrıca kömürün ve bağlayıcı maddelerin yapısında bulunan suda çözünebilen maddelerin aktive olup bağlayıcılıklarının artmasını sağlar [97].

Diğer taraftan, kömürün ve bağlayıcıların bileşiminde bulunan hidrofobik maddelerin yüzeyinde oluşan su birikimi presleme sırasında heterojen sıkışmaya sebep olmakta ve dolayısıyla daha düşük brikt mukavemetine sebep olmaktadır [98]. Üstelik brikt oluşumu sırasında eklenen su miktarı, kömür briktlerinin kuruma süresini ve kurutma mekanizmasını etkilemekte, dolayısıyla, kurutma işlemi için gereken ekstra çaba nedeniyle ürünün maliyeti arttırmaktadır. Yukarıda bahsedilen avantajlar ve dezavantajlar ışığında yapılan çalışmalarda kömürün briktlenmesi için optimum nem oranı %10-18 olarak belirlenmiş ve bu değerin üzerinde yada altındaki değerde brikt özelliklerinin tutarlı olmadığı belirlenmiştir [99].

4.2.6 Bağlayıcı Özellikleri ve Miktarı

Briktlerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için kullanılan bağlayıcılar sıvı ya da katı fazda olabilirler ve kömür partikülleri arasında köprü veya film tabaka oluşturarak partiküller arasındaki bağların kimyasal ya da fiziksel olarak oluşmasına olanak sağlarlar. Genellikle bağlayıcı olarak seçilen maddelerin brikt kalitesini arttırmanın yanı sıra ekonomik ve çevre dostu özellik taşımaları gerekmektedir [93].

Bağlayıcılar kullanılan bağlayıcının türüne ve miktarına bağlı olarak briktlerin mekanik dayanımı, ısı değeri, kül miktarı, kükürt miktarı, uçucu madde miktarı ve yanma verimi (tutuşma sıcaklığı, yanma süresi vs.) gibi özellikleri üzerinde önemli derecede etkilidir.

Bağlayıcılar organik ve inorganik bağlayıcılar olmak üzere iki gruba ayrılırlar. İnorganik bağlayıcılar briktleme işleminde toplam kütlenin %0,5-5 oranında kullanılırken, organik bağlayıcılar inorganik bağlayıcılarla aynı verimi sağlayabilmek amacıyla %20 ve ya daha fazla miktarda kullanılabilir [93], [97]. İnorganik bağlayıcılara kıyasla organik bağlayıcılar briktlerin tutuşma sıcaklığının, kül, kükürt miktarının düşmesi ve ısı

değerinin yükselmesi açısından daha iyi performansa sahiptirler ve ayrıca inorganik bağlayıcılara göre daha ekonomik ve çevre dostudurlar [100]. Bunun yanı sıra organik bağlayıcılar kullanılarak yapılan briketlerin inorganik bağlayıcılara göre mekanik sağlamlığı daha düşük, uçucu madde miktarları daha yüksektir.

4.2.7 Briketlerin Geometrik Şekli

Briketler şeklini, kullanılan pres kabının şeklinden alır. Kare, dikdörtgen gibi köşeli şekillerde yapılan briketlerin sürtünme ile ufalanma olasılığı daha fazla olduğundan, genel olarak silindir, yumurta ya da yastık şekillerindeki briketler tercih edilmektedir. Düşük çap ve uzunluğa sahip briketlerde aktivasyon enerjisi yükseldiğinden yanma verimliliği azalmaktadır [101].

4.3 Briketlerde Aranılan Özellikler

Türkiye’de Türk Standartları Enstitüsü tarafından, 1996 yılında, katı fosil yakıtlardan, katkı maddeli veya katkısız olarak hazırlanan, yakıtlar için bir standart (TS 12055, 1996) hazırlanmıştır ve bu standart briket üretimini de kapsamaktadır. Bu amaç doğrultusunda hazırlanan standarda göre, kömür briketlerinin sahip olması gereken fiziksel ve kimyasal özellikler, Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Özellik	Sınıf 1	Sınıf 2	
Alt ısı değeri ¹⁾ (kcal/kg), en az	5000	4000	
Baca gazına geçen kükürt oranı (%), m/m, en fazla	0,8	1,0	
Düşme sağlamlığı (%) m/m, en az	90	80	
Aşınma sağlamlığı (%) m/m, en az	75	65	
Kırılma sağlamlığı	Yastık veya yumurta şeklindeki briketlerde (kgf), en az	80	60
	Tabanı düzgün geometrik şekilli briketlerde (kg/cm ²), en az	130	100
Suya dayanım ²⁾ (%), en az	70	70	
Isıl verimi (%), en az	75	75	
Duman emisyon oranı (g/kg), en fazla	8	12	
1) Bu özellik, orijinal (satışa sunulan) biket bazındadır. 2) Su geçirmeyen torbalar içerisinde satılan briketlerde bu özellik aranmaz.			

Çizelge 4.1 Yakıt amaçlı üretilen kömür briketlerinin sahip olması gereken fiziksel ve kimyasal özellikler

Bu standarda göre üretilecek briketlerde aranan özellikler mekanik sağlamlık, suya dayanım ve yanma özellikleridir.

4.3.1 Mekanik sağlamlık

Briketlerin mekanik sağlamlığı, düşme, aşınma ve kırılma sağlamlığı olmak üzere üç testle incelenmektedir. Bu üç testin her biri briketlerin taşıma, depolama, nakliye sırasında kırılma ve ufalanmaya karşı dirençlerinin ölçüsünü göstermektedir. TS12055 standardı kapsamında her bir test için olması gereken değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir ve bu standarda göre 1. ve 2. sınıf briketler için briketlerin toplam ağırlığına oranla olması gereken minimum düşme sağlamlığı değeri sırasıyla %90 ve %80 olarak, minimum aşınma sağlamlığı değeri sırasıyla %75 ve %65 olarak belirlenmiştir. Kırılma sağlamlığı briketlerin yük altında kaldıklarında, kırılmaya karşı gösterecekleri direncin göstergesi olup briketlerin geometrik şekline göre farklılıklar göstermektedir. Yumurta ve yastık şeklindeki 1. ve 2. sınıf briketler için sırasıyla 80 kg/cm² ve 60 kg/cm², tabanı düz geometrik şekilli briketler için (silindir, kare, dikdörtgen vs.) 130 kg/cm² ve 100 kg/cm² ‘dir.

4.3.2 Suya Dayanım

Briketlerin fazla nem tutması yanma özelliklerini olumsuz etkilemekte ve briketlerin şişip dağılmasına sebep olmaktadır bu sebeple briketlerin suya dayanımı önemli bir özelliktir. Briketlerin suya dayanım özelliğini belirlemek amacıyla standartlaşmış bir yöntem bulunmamaktadır. Suya dayanım testleri briketlerin su dolu bir kap içerisine daldırılarak ilk büyük parçanın ayrıldığı veya kütlenin tamamen dağıldığı süreler belirlenerek yapılır [72].

4.3.3 Yanma Özellikleri

Briketlemede yanma özelliklerinde en önemli parametre ısı değeridir. Isıl değer yakıtların yanması sırasında açığa çıkan ısıнын ölçüsüdür ve yakıtların kimyasal özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Çizelge 4.1’de de görüldüğü gibi 1. ve 2. sınıf briketler için minimum ısıl değer TS12055 standardı kapsamında sırasıyla 5000 kcal/kg ve 4000 kcal/kg olarak belirlenmiştir.

Briketlerde aranan diğ er yanma özellikleri tutuşma sıcaklığı ve kül ergime sıcaklığıdır. Briketlerin k l erime sıcaklığı yanma ortamının sıcaklığının üzerinde olması gereklidir. Bunun sebebi eriyen k l, yanma ortamındaki ızgara aralıklarını tıkayarak hava geçişini engellemekte ve yanma verimini düşürmektedir.

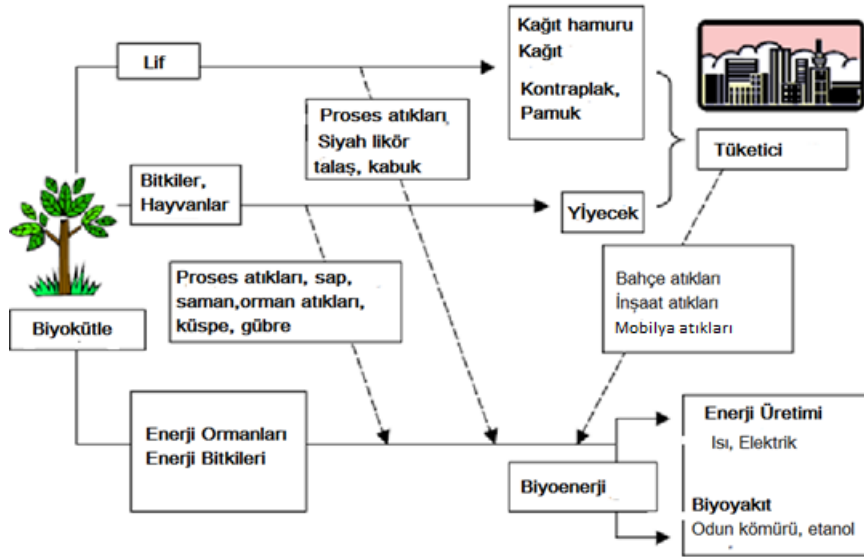


BÖLÜM 5

BIYOKÜTLE

Biyokütle, güneş enerjisini fotosentez yardımıyla kimyasal enerjiye dönüştürerek depolayan ağaçlar, otlar ve yosunlar gibi tüm bitkisel organizmalardır. Bunun dışında ısı ve kimyasal maddeler elde etmek amacıyla kullanılan hayvansal ürünler ile yakılabilen organik atıklar da biyokütle olarak adlandırılmaktadır [102].

Biyokütle enerjisi veya biyoenerji, biyokütlenin ısı, elektrik veya sıvı ve gaz yakıtlar gibi yararlı enerji türlerine dönüştürülmesi sonucu elde edilen enerjidir ve biyokütlenin biyoenerjiye dönüşüm prosesi Şekil 5.1’de verilmiştir [40].



Şekil 5.1 Biyokütlenin biyoenerjiye dönüşüm prosesi

Biyoenerji üretimi için gerekli biyokütle kaynakları doğrudan tatlı sorgum, şeker kamışı ve mısır gibi enerji bitkileri yetiştirilerek elde edilebildiği gibi budama sonucu oluşan

odunsu ve otsu bitkiler, tarımsal ve endüstriyel bitkisel atıklar, kağıt, bitkisel kentsel atıklar, talaş, çimen, gıda atıkları, hayvansal atıklar biyokütle kaynağı olarak kullanılabilirler.

Biyokütle, fosil yakıtlara alternatif olabilecek bir enerji kaynağı olmasıyla birlikte, yapısında ihmal edilebilir seviyede kükürt ve azot bulundurması nedeniyle fosil yakıtların yanması sonucu oluşan emisyon gazlarının bertaraf edilmesine olanak sağlar. Bunun yanı sıra biyokütleyi oluşturan bitkiler fotosentez sırasında atmosferdeki önemli miktarda CO₂'i absorplayarak yetişirler ve yanmaları sonucunda açığa çıkan CO₂, büyümeleri sırasında absorpladıkları CO₂'e hemen hemen eşit olduğundan fosil yakıtlara kıyasla atmosferdeki CO₂ seviyesinde önemli seviyede artışa sebep olmazlar. Bu sebeple karbon-nötr yakıt olarak adlandırılırlar [40].

5.1 Biyokütlenin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Biyokütle yapısı, yakıt veya kimyasal madde dönüşümünde kullanılacak proses tipinin seçimi için oldukça önemlidir. Biyokütle yapısında bulunan ana bileşenler lignin, selüloz ve hemiselülozdur ve bu üç polimerin yanında biyokütlenin yapısında az miktarda pektin, protein, ekstraktif madde ve kül bulunmaktadır [103]. Bitkilerin yapısında bulunan bu bileşenlerin bileşimleri bitki türüne göre değişiklik göstermektedir. Örneğin ağaçlar gibi sert biyokütlelerin selüloz içeriği diğer biyokütle türlerine kıyasla daha yüksek olmasına karşın buğday samanı gibi otsu biyokütlelerin hemiselüloz içerikleri daha yüksektir. Çizelge 5.1'de farklı biyokütle türlerinin selüloz, hemiselüloz ve lignin içerikleri verilmiştir. Aynı cins biyokütlelerin yapısında bulunan çeşitli bileşenler de biyokütlenin yaşına, yetiştiği bölgeye, yetiştiği toprak yapısı gibi yetiştirme şekillerine göre değişiklik gösterebilmektedir [104].

Çizelge 5.1 Farklı biyokütle türlerinin selüloz, hemiselüloz, lignin içeriği

	Selüloz	Hemiselüloz	Lignin
Sert Ağaçlar	40-55	24-40	18-25
Yumuşak Ağaçlar	45-50	25-35	25-35
Buğday Samanı	30	50	15
Mısır Koçanı	45	35	15
Otlar	25-40	35-50	10-30
Ağaç Dalları	45	31,4	12

Selüloz, biyokütle yapısında en fazla bulunan bileşendir ve bitkilere mekanik dayanım ve kimyasal stabilite sağlar. Selülozun kimyasal formülü ($C_6H_{10}O_5$)_n olup, fotosentez prosesi sırasında absorplanan güneş enerjisi bitkilerin hücre duvarında selüloz formunda depolanır. Selüloz atmosfer şartlarında (20°C,%60 nem) %8-14 oranında su absorplama özelliğine sahiptir yani nispeten higroskopik bir malzemedir, bununla birlikte suda çözünmez sadece su absorplayarak şişer. Selülozun düşük sıcaklıkta seyreltik asit çözeltisinde de çözünürlüğü düşük bir polimerdir ve ancak yüksek sıcaklıklarda seyreltik asit çözeltisinde çözünebilir çünkü yüksek sıcaklıklarda yapısında bulunan hidrojen bağlarını kırmak mümkündür. Selülozun sıcaklıkla bozunması 180°C'de başlar [105].

Hemiselüloz biyokütlenin yapısında en fazla bulunan ikinci polimerdir ve yapıda yaklaşık %20-50 oranında bulunur. Hemiselüloz, selüloz gibi kimyasal olarak homojen yapıda değildir, bununla birlikte selüloza göre daha düşük molekül ağırlığına sahiptir ve hidrolizi daha kolaydır. Hemiselüloz bitkilerde farklı bileşimlerde bulunmaktadır. Örneğin saman ve çimen gibi tarımsal biyokütlelerin yapısında ağırlıklı olarak ksilan yapıda bulunurken, sert ağaçların yapısında ağırlıklı olarak glukomannan yapıda bulunur. Ksilan alkali veya asidik ortamda kolaylıkla ekstrakte edilebilmektedir fakat glukomannanın ekstraksiyonu daha kuvvetli asidik veya alkali ortam gerektirir. Biyokütlenin başlıca bileşenleri arasında hemiselülozlar termo-kimyasal olarak en hassas olan bileşenlerdir [106].

Lignin biyokütlenin yapısında bulunan üçüncü önemli polimerdir. Otsu bitkiler, odunsu bitkilere göre daha düşük miktarda lignin içeriğine sahiptir. Lignin biyokütlenin hücre duvarlarında bulunur, mikrobiyolojik ve oksidatif bozunmalara karşı çok dirençli bir polimerdir. Lignin genellikle biyokütlenin diğer bileşenlerini birbirlerine bağlar ve biyokütleye suda çözünmeme özelliği sağlar. Lignin düşük molekül ağırlıklı alkollerde, asetonda, pridin ve dimetil sülfoksitte kolaylıkla ekstrakte edilebilmektedir. Bunun yanı sıra yüksek sıcaklıklarda ligninin termal yumuşaması gerçekleştiğinden, yüksek sıcaklıklardaki asidik veya alkali ortamda lignin bozunması reaksiyonu hızlanır [105],[107].

5.2 Enerji Üretimi için Biyokütle

Biyokütle dünyada yaygın olarak bulunan ve diğer yakıtlara göre düşük maliyetli olan bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Biyokütleden biyodizel, metanol, hidrojen gibi biyo yakıtların üretilmesi mümkün olduğundan biyokütle, ulaşımda ve enerji sektöründe kullanılan fosil yakıtlara alternatif bir yakıt olarak görülmektedir. Fakat biyokütlenin, lifli ve higroskopik yapıda olması ayrıca fosil yakıtlara kıyasla enerji yoğunluğunun düşük olması enerji üretimi için kullanımını kısıtlamaktadır. Ancak son yıllarda biyokütlenin fosil yakıtlarla birlikte yakma teknolojilerinin geliştirilmesi biyokütlenin enerji üretiminde kullanılmasına olanak sağlamıştır. Biyokütlenin fosil yakıtlarla birlikte yakma teknolojisinin geliştirilmesi, fosil yakıt tüketiminin ve bununla birlikte fosil yakıtlardan kaynaklı emisyon gazlarının azalması gibi olumlu sonuçlar oluşmasına olanak sağlamaktadır [108].

5.3 Enerji Kaynağı Olarak Biyokütle Kullanımının Dezavantajları

Bütün avantajlarına rağmen biyokütlenin enerji kaynağı olarak kullanılmasında bazı zorluklar bulunmaktadır. Biyokütle kömür gibi diğer fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında da yüksek oksijen içeriğine, daha düşük ısı değere ve yığın yoğunluğuna, daha yüksek higroskopik doğaya ve daha yüksek nem içeriğine sahiptir. Bu sebeple biyokütlenin enerji dönüşüm sistemlerinde kullanılmasında diğer yakıtlara kıyasla bazı teknik dezavantajlar oluşturmaktadır [109].

Biyokütlenin düşük yığın yoğunluğuna sahip olması depolama ve taşıma sorunlarına ve bu proseslerin maliyetinin artmasına sebep olmaktadır. Aynı zamanda düşük yığın yoğunluğu biyokütlenin birim hacimdeki enerji yoğunluğunu düşürmekte ve bu da enerji dönüşüm sistemlerine belirli bir miktarda enerji üretebilmek için daha yüksek hacimlerde biyokütle beslemesini gerektirmektedir [110].

Biyokütlenin yapısında bulunan yüksek oksijen içeriği biyokütlenin ısıl değerini düşmesini ve bununla birlikte yüksek miktarlarda baca gazı oluşumuna sebep olmaktadır [109].

Biyokütlenin yüksek nem içeriğine sahip olması biyokütlenin ısıl değerini düşürmesini yanı sıra yanma özelliklerini ve dolayısıyla termokimyasal dönüşüm sürecini de olumsuz

yönde etkilemektedir. Fakat yüksek nem içeriği biyokimyasal dönüşüm prosesleri için bazı avantajlar sağlamaktadır. Aynı zamanda belirli miktar nem içeriği gazlaştırma prosesi sırasında hidrojen konsantrasyonunda artışa sebep olarak bu prosesi olumlu yönde etkilemektedir. Bununla birlikte yüksek nem içeriği gazlaştırma sıcaklığının düşmesine sebep olmakta ve düşük gazlaştırma sıcaklığı daha düşük gazlaştırma verimine ve yüksek katran oluşumuna sebep olmaktadır. Öte yandan yüksek nem içeriği biyokütlenin bozunmasına sebep olarak biyokütlenin fiziksel kimyasal ve mikrobiyolojik özelliklerini etkileyerek yakıt kalitesinde düşüşe sebep olmaktadır [111], [112].

Higroskopik yapı biyokütlenin diğer bir dezavantajıdır. Enerji üretiminde kullanılmak üzere kurutma işlemi uygulanmış yüksek higroskopik özelliğe sahip biyokütle depolama sırasında atmosferdeki nemi kolayca absorplayarak tekrar nem içeriğinin artmasına sebep olur.

Biyokütlenin lifli yapısı biyokütlenin öğütülmesini zorlaştırarak öğütme maliyetini arttırır. Biyokütlenin lifli yapıda olması sadece öğütme maliyetini arttırmakla kalmaz bunun yanında partiküllerin akma özelliğinin azalmasına sebep olarak, yakma sistemlerinde zorluklar oluşmasına sebep olmaktadır [112], [113].

5.4 Biyokütle İyileştirme Yöntemleri

Biyokütlenin enerji sistemlerinde kullanılmasında ortaya çıkan dezavantajlarının, biyokütleye bazı ön işlemler uygulanarak bertaraf edilmesi mümkündür. Biyokütleye uygulanan ön işlemler, biyokütlenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin iyileştirilmesini sağlayarak, mevcut enerji sistemlerinde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca ön işlemler sonrasında uygulanacak olan biyokütle dönüşüm proseslerini kolaylaştırmakta, ekonomik ve çevresel katkılar sağlamaktadır. Biyokütle iyileştirme yöntemleri dört ana başlık altında incelenmektedir. Bunlar;

- a) Kimyasal ön işlemler
- b) Mekanik ön işlemler
- c) Termal ön işlemler
- d) Biyolojik ön işlemlerdir [105], [114].

5.4.1 Kimyasal Ön İşlemler

Kimyasal ön işlemlerin ana amacı biyokütlenin yapısında bulunan lignin ve hemiselülozun biyolojik olarak parçalanabilirliğini arttırmaktır. Biyokütleyle uygulanan en bilinen ön işlemler, katalizörlü buhar patlaması, asit veya alkali çözeltilerle muamele, organik çözücülerle, pH kontrollü sıcak su ve iyonik sıvılarla bekletme işlemlerini kapsamaktadır. Biyokütleyle yapılan kimyasal ön işlemler biyokütlenin şişerek yüzey alanının genişlemesine, yapısında bulunan polimerlerin polimerizasyon derecesinin düşmesine ve selülozun kristalin yapısının bozunarak daha kolay parçalanabilir hale gelmesine olanak sağlayarak enerji üretim proseslerinde biyokütleden daha verimli enerji üretimine yardımcı olmaktadır. Biyokütleyle kimyasal ön işlem genellikle biyokütlenin sıvılaştırılması, gazlaştırılması proseslerinden önce uygulanmaktadır. Ayrıca yapılan kimyasal ön işlemler biyokütlenin yapısında bulunan bağlayıcılık özelliği taşıyan yapıların ortaya çıkmasını sağlayarak, biyokütle peletleme prosesinde daha sağlam peletler üretilmesine olanak sağlamaktadır [108], [115].

5.4.2 Mekanik Ön İşlemler

Biyokütleyle uygulanan mekanik ön işlemler biyokütlenin sadece fiziksel yapısında değişimlere sebep olmaktadır. En bilinen mekanik ön işlemler kırma, parçalama ve öğütmedir. Kırma, parçalama, öğütme işlemleri sırasında genellikle biyokütlenin yüzey/hacim oranı artmakta ve böylelikle biyokütlenin nakliyesinin ve depolanmasının daha kolay olmasına olanak sağlamaktadır. Bunun yanı sıra bu ön işlemler biyokütlenin yüzey alanını arttırarak biyokütleyle uygulanacak diğer ön işlemlerin ve biyokütle dönüşüm proseslerinin daha verimli sonuçlanmasını sağlamaktadır [105].

5.4.3 Isıl Ön İşlemler

Isıl ön işlem, biyokütlenin yapısından uçucu bileşenlerin ve nemim uzaklaşmasına olanak sağlayan bir yavaş ısıtma işlemidir ve bu işlem sonunda biyokütlenin fiziksel, yapısal ve kimyasal özelliklerinde değişimler meydana gelmektedir. En bilinen ısıl ön işlem kurutmadır. Isıl ön işlem sonrasında biyokütlenin mekanik dayanımı azalır ve lifli yapısı bozunur. Bu sayede biyokütlenin hem mekanik hem de biyolojik olarak parçalanabilirliğinin artmasına olanak sağlar ve biyokütle dönüşüm proseslerinde ürün

verimini arttırıcı yönde etki etmektedir. Ayrıca biyokütlede ısı işlem uygulanması sonucunda elde edilen ürün kömürle çalışan tesislerde kömüre alternatif bir yakıt olarak kullanılabilir hale gelmekte ve bu sayede bu tesislerde yakıt esnekliğinin artmasına sebep olmaktadır [108], [116].

5.4.4 Biyolojik Ön İşlemler

Biyolojik ön işlem, biyokütlenin enzimatik bozunma işlemi için hazır hale getirilmesi amacıyla mikroorganizma kullanılarak yapılan bir işlemdir ve bu işlem sonunda biyokütlenin kimyasal bileşiminde ve yapısında değişiklikler meydana gelmektedir. Biyolojik ön işlemde kullanılan mikroorganizmalara bakteriler ve beyaz-kahverengi yumuşak çürükçül mantarlardır. Biyolojik ön işlem, proses sırasında kimyasal kullanılmaması, daha az enerji tüketilmesi, çalışma koşullarının kolay olması ve proses sonucunda oluşan yan ürünlerin çevreye zararlı olmaması sebebiyle en çok tercih edilen yöntem olma yolunda ilerlemektedir. Bunun yanı sıra uzun proses süresine sahip olması biyolojik ön işlemin en büyük dezavantajıdır. Biyokütlede, biyolojik ön işlem genellikle biyokütlenin biyoetanol dönüşüm prosesinden önce uygulanmaktadır [108], [117].

5.5 Biyokütle Dönüşüm Prosesleri

Biyokütle yenilenebilir enerji kaynakları arasında katı, sıvı ve gaz fazda enerji üretilebilen ve günümüz teknolojisinde ulaşım sektöründe kullanılabilen tek enerji kaynağıdır. Biyokütlenin enerji yoğunluğu yüksek katı, sıvı, gaz ürünlere dönüştürülmesi, enerjinin daha verimli kullanılmasının yanı sıra elde edilen ürünlere depolama ve taşıma kolaylığı da sağlamaktadır.

Günümüzde biyokütleden enerji elde etmek için farklı teknikler ve metotlar geliştirilmiş olup, biyokütlenin kimyasal bileşiminin karmaşıklığı, geliştirilen teknolojilerin verimi ve çevresel faktörlerden kaynaklı oluşan enerji kayıpları ve dönüşüm maliyetleri sebebiyle biyokütlenin enerjisini tamamen dönüştürmek mümkün olmamaktadır.

Biyokütlenin dönüşümünde kullanılacak olan dönüşüm prosesi, elde edilecek olan enerji miktarı, kullanılacak olan teknikler ve taşıyıcı türü enerjinin kullanım yerine göre değişiklikler göstermektedir. Biyokütle dönüşüm prosesleri üç ana başlık altında

incelenmektedir ve bunlar termokimyasal, biyolojik ve fiziksel dönüşüm prosesleridir. Termokimyasal dönüşüm prosesleri doğrudan yakma, torrefaksiyon, piroliz, sıvılaştırma ve gazlaştırma proseslerini içermektedir. Biyolojik prosesler özümseme, fermentasyon ve hidroliz proseslerini ve fiziksel dönüşüm prosesleri ise yoğunlaştırma yani peletleme ve briketleme proseslerini kapsamaktadır [118], [119]. Bu prosesler sonucunda elde edilen ürünler ve kullanım alanları Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Biyokütle dönüşüm prosesleri

Biyokütle Dönüşüm Prosesi		Elde edilen Enerji
Termokimyasal	Doğrudan Yakma	Isı, elektrik
	Torrefaksiyon	Isı, elektrik, yakıt
	Piroliz	Dizel yakıt, ısı, elektrik
	Gazlaştırma	Isı, yakıt, elektrik, metanol, hidrojen, hidrokarbon
	Sıvılaştırma	Sıvı yakıt
Biyolojik	Özümseme	Biyogaz, elektrik, yakıt
	Fermentasyon	Etanol, elektrik, yakıt
	Hidroliz	Elektrik, yakıt
Fiziksel	Yoğunlaştırma	Isı, elektrik, yakıt

5.5.1 Termokimyasal Dönüşüm Prosesleri

Termokimyasal dönüşüm proseslerinde biyokütleden Çizelge 5.2’de verilmiş olan 5 farklı dönüşüm prosesi kullanılarak enerji elde edilmektedir ve Çizelge 5.3’te bu beş yöntemin karşılaştırılması ve sıcaklık çalışma aralıkları verilmiştir.

Çizelge 5.3 Termokimyasal proseslerin karşılaştırılması [102]

Proses	Sıcaklık (°C)	Basınç (MPa)	Katalizör	Kurutma
<i>Yakma</i>	700-1400	≥0,1	İhtiyaç duyulmaz	Gerekli değildir fakat verimi artırır
<i>Torrefaksiyon</i>	200-300	0,1	İhtiyaç duyulmaz	Gereklidir
<i>Piroliz</i>	300-600	0,1-0,5	İhtiyaç duyulmaz	Gereklidir
<i>Gazlaştırma</i>	500-1300	≥0,1	İhtiyaç duyulmaz	Gereklidir
<i>Sıvılaştırma</i>	250-330	5-20	Gereklidir	İhtiyaç duyulmaz

5.5.1.1 Doğrudan yakma

Doğrudan yakma, biyokütleden enerji elde etmede kullanılan en eski yöntemdir ve biyokütlenin içinde bulunan kimyasal enerjiyi ocaklar, fırınlar, kazanlar, buhar türbinleri, turbo jeneratörler gibi çeşitli ekipmanlar kullanarak ısı, mekanik enerji ve elektrik enerjisine dönüştürmeyi sağlar. Kimyasal olarak yanma biyokütle içindeki oksijen ve hidrokarbon arasındaki ekzotermik bir reaksiyondur ve reaksiyon sırasında açığa çıkan ısı enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Isı ve elektrik enerjisi biyokütleden üretilen iki temel enerji şeklidir.

Biyokütlenin doğrudan yakılması genellikle elektrik enerjisi üretim proseslerinde kullanılmaktadır. Bu proseste, biyokütle buhar elde etmek için yakıcıda yakılır ve oluşan buhar basıncı elektrik üreten jeneratöre bağlı olan türbini döndürerek elektrik enerjisi elde edilmesine olanak sağlamaktadır [120].

Yakma sistemlerinde biyokütle tek başına ya da bir fosil yakıtla birlikte yakılmaktadır fakat doğrudan yakılmasıyla elde edilen enerji değeri kömür ve petrol gibi fosil yakıtlara kıyasla oldukça düşüktür. Bu sebeple biyokütlenin enerji değerini arttırmak amacıyla biyokütle genellikle fosil yakıtlarla karıştırılıp yakılmaktadır ve bu teknoloji birlikte yakma (co-combustion) veya birlikte ateşleme (co-firing) olarak adlandırılmaktadır. Günümüzde fosil yakıtlarla birlikte yakma teknolojisi sadece fosil yakıt kullan sistemlerde emisyon gazlarını azaltmak için en hızlı ve ekonomik yöntem olduğundan yaygın olarak kullanılmaktadır [121].

5.5.1.2 Torrefaksiyon

Torrefaksiyon biyokütlenin oksijensiz ortamda yavaş yavaş 200- 300°C'ye ısıtılması işlemidir. Bu proses sonucunda biyokütlenin yapısında bulunan uçucu bileşenler uzaklaşmakta ve biyokütlenin yapısında bulunan oksijen miktarı azalırken, karbon miktarı artmaktadır. Proses sonunda başlangıç biyokütleyle kıyasla daha düşük nem ve daha yüksek enerji içeriğine sahip, biyokütlenin başlangıç ağırlığının yaklaşık %70-90'ı ağırlığında katı ürün elde edilmektedir. Bu prosesin piroliz prosesine göre en büyük farkı düşük ısıtma hızında çalışması ve piroliz kadar yüksek sıcaklıklarda çalışmamasıdır.

Torrefaksiyon işlemi doğrudan yakıt üretmek için kullanılabildiği gibi, gazlaştırma prosesi öncesi biyokütlenin enerji yoğunluğunu arttırmak için de kullanılabilmektedir [102].

Bu çalışma, kömür briketleme işleminde kullanılan katkı maddelerine torrefaksiyon prosesi uygulanması çalışmalarını da kapsadığından ilerleyen Bölüm 7'de Torrefaksiyon işlemi ile ilgili detaylı bilgi verilmiştir.

5.5.1.3 Piroliz

Piroliz oksijensiz ortamda biyokütlenin hızla 300-600°C sıcaklığa ısıtılmasıyla termal olarak bozunması işlemidir ve bu işlem sırasında biyokütlenin yapısında bulunan hidrokarbon molekülleri daha küçük moleküllere dönüşmektedir. Bu proses sonucunda sıvı, katı ve gaz fazda ürünler elde edilebilmektedir. Piroliz prosesi sonucunda elde edilen ürünlerin hangi fazda olacağı piroliz hızına bağlı olarak değişmektedir. Örneğin hızlı piroliz prosesinde çoğunlukla biyoyağ olarak biyoyağ verimi yüksek olurken, yavaş piroliz prosesinde gaz ve odun kömürü gibi katı ürünler elde edilmektedir. Biyokütlenin pirolizi yöntemi ile yüksek verimle elde edilen sıvı ürün, iyileştirme işlemleri sonunda yüksek ısı değerde, kolay depolanabilme, taşınabilir olma özellikleri ile sıvı yakıtlar için iyi bir alternatif oluşturmaktadır. Proses sonucunda elde edilen biyoyağ motorlarda, türbinlerde yakıt olarak ve rafinerilerde hammadde olarak kullanılabilmektedir [122], [109].

5.5.1.4 Gazlaştırma

Biyokütlenin yüksek sıcaklıklarda kısmi oksidasyonla yanıcı gaz haline dönüşmesi işlemine gazlaştırma denir [123]. Bu işlem sırasında biyokütle hava ortamında 500-1300°C sıcaklık aralığında yakılır. Yanma sonucunda yakıt olarak az miktarda metan ile karbon monoksit ve hidrojenden oluşan odun gazı meydana gelir. Yakıtın kimyasal bileşimine bağlı olarak yanma sonucu oluşan gazlar kükürt ve azot gibi diğer bileşikler de içerebilir. Ayrıca elde edilen gazın bileşimi gazlaştırma işlemi türüne, hammaddeye ve gazlaştırma sıcaklığına göre farklılık göstermektedir ve bu gazlar hava gazı ve sentetik gaz olmak üzere iki temel başlık altında incelenmektedir.

Hava gazı düşük sıcaklıklarda yapılan gazlaştırma işlemi sonunda elde edilir ve CO, H₂, CH₄, C_xH_y, alifatik hidrokarbonlar, benzen, toluen ve katran içerir. Sentez gazı ise 1200°C üzerindeki sıcaklıklarda katalizör varlığında üretilen gazdır bunun anı sıra sentez gazı hava gazının yüksek sıcaklıklarda katalizör varlığında tekrar termal ayrışmaya uğraması sonucunda da elde edilebilmektedir. Sentez gazında bulunan enerjini yaklaşık %50'lik kısmını H₂ ve CO gazları oluşturmakta geri kalanını ise CH₄ ve aromatik hidrokarbonlar oluşturmaktadır. Sentez gazının bileşimi fosil yakıtların gazlaştırılması sonucu elde edilen gaz bileşimiyle hemen hemen aynıdır ve bu sebeple fosil yakıtlardan üretilen gazın kullanıldığı proseslerde kolaylıkla kullanılabilir.

Gazlaştırma işlemi sonucunda elde edilen gaz ürünler ısı, buhar ya da elektrik üretmek amacıyla yakılabilmekte ve metana dönüştürülerek doğal gaz sistemlerine beslenebilmektedir. Bunlara ek olarak sentez gazı metanol, etanol ve diğer kimyasallara veya sıvı yakıtlara dönüştürülerek kullanılabilir. Gazlaştırma prosesi sonucu üretilen metanole hayvansal ve bitkisel yağlar eklenerek bu yağlar biyo dizel üretimi için rafine edilebilirler.

Gazlaştırma prosesi sonunda elde edilen gazların ticari olarak ve araştırma kapsamında en önemli kullanım alanları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Ocaklarda, kazanlarda, kurutucularda doğrudan yakma

- Dıştan yanmalı güç üreten sistemlerde: dıştan yanmalı türbinler, buhar makinaları, stirling motoru, termo-fotovoltaik hücreler
- İçten yanmalı sistemlerde: Dizel ve Otto motorları
- Kompresörler
- Hidrojen yakıt üretimi
- Yakıt hücreleri: proton değişim mebranı, katı oksit membranlar
- Kimyasal sentezi: metanol, amonyak, metan vs [124].

5.5.1.5 Sıvılaştırma

Biyokütleden uygun sıcaklık ve basınç koşullarında katalizör kullanılarak sıvı ürün elde edilmesi işlemine sıvılaştırma denir. Biyokütlenin sıvı yakıtlara dönüştürülmesinin amacı, düşük enerjili ve çok yer kaplayan biyokütleler yerine kolay depolanabilir, pompalanabilir yağların üretilmesidir [125].

Sıvılaştırma prosesi piroliz prosesi ile benzer ve farklı özelliklere sahiptir. Her iki proses için de elde edilen ürün sıvı fazdadır. Ancak bu iki prosesin uygulandığı sıcaklık ve basınç değerleri farklıdır. Genel olarak sıvılaştırma prosesi 250-330°C arasındaki sıcaklıklarda yapılırken, piroliz ise 300-600°C sıcaklıkları arasında gerçekleşmektedir. Basınç, sıvılaştırma prosesinde 5-20 MPa, piroliz prosesinde ise 0.1 -0.5 MPa arasında değişmektedir. Bir diğer farklılık ise kurutmadır. Sıvılaştırma işleminde ön kurutmaya gerek duyulmazken piroliz işleminde kurutmaya gerek duyulur. Sıvılaştırma işlemlerinde sıklıkla kullanılan katalizörler alkali hidroksitler ve karbonatlardır [126].

5.5.2 Biyokimyasal Dönüşüm Prosesleri

Biyolojik dönüşüm sistemlerinde biyokütlenin yapısında bulunan moleküller enzimler yada bakterilerle daha küçük moleküllere parçalanmaktadır. Biyolojik dönüşüm sistemleri termokimyasal dönüşüm sistemlerine göre çok daha yavaş prosesler olmasına rağmen bu proseslerin en büyük avantajı proses sırasında ekstra enerjiye ihtiyaç duyulmamasıdır. Biyokimyasal dönüşüm prosesleri üç başlık altında incelenmektedir ve bunlar özümseme, fermentasyon ve hidrolizdir.

5.5.2.1 Özümseme

Özümseme prosesinde, biyokütle bakteriler yardımıyla biyogaz denilen bir yakıt haline dönüştürülmektedir ve bu gazın bileşiminde metan, karbondioksit ve az miktarda hidrojen sülfür bulunmaktadır. Biyogaz üretim verimi kullanılan biyokütle çeşidine göre farklılık göstermektedir. Özellikle yüksek lignin içerikli hammaddeler, ligninin bakteriyel bozunmaya karşı dirençli olması sebebiyle bu proste kullanılmaya uygun değildir.

Bu proses sonrasında elde edilen ürün genellikle ısıtma sektörlerinde kullanılmasının yanı sıra prosteden elde edilen saflaştırılmış metanın elektrik üretiminde ve ulaşım sektöründe yakıt olarak kullanılabilmektedir [127].

5.5.2.2 Fermantasyon

Şekerli ve nişastalı bitkilerden etanol üretmek için kullanılan bir prostedir. Fermantasyon sonucunda elde edilen ürünler petrol kaynaklı kimyasal ürünler yerine tercih edilebilmektedir. Fermantasyon prosesinde 4 temel adım bulunmaktadır. Bunlar;

1. Fermente selüloz eldesi için mayalama işleminin yapılması
2. Selülozun ayrılması
3. Selülozün hidrolize tabi tutulması
4. Alkol elde etmek için mayalama yapılması [128],[129].

5.5.2.3 Hidroliz

Biyolojik dönüşüm proseslerinde hidroliz iki başlık altında incelenmektedir ve bunlar enzimatik ve asidik hidrolizdir. Enzimatik hidroliz prosesi genellikle selüloz içeriği yüksek olan biyokütle tiplerine uygulanır ve bu prosete enzimler kullanılarak biyokütlenin yapısında bulunan selüloz 50°C'de pH'ın yaklaşık 5 olduğu ortamda daha küçük bir molekül olan glikoza indirgenir. Enzimatik hidrolizin dezavantajı sistemdeki glikoz arttıkça enzimlerin engellenmesinden kaynaklı hidroliz işleminin yavaşlamasıdır. Asidik hidroliz prosesinde ise biyokütlenin yapısında bulunan selüloz molekülleri seyreltik yada derişik asit çözeltileri kullanılarak glikoz moleküllerine indirgenmektedir. Bu proses ekstra asit geri kazanım sistemi gerektirdiğinden enzimatik hidrolize göre daha pahalı bir yöntemdir. Prosesler sonunda elde edilen etanol yakıt olarak ulaşım sektöründe ve

kojenerasyon ünitelerinde, kimyasal ürün sektöründe asetik asit, etil asetat, etil eter gibi kimyasalların sentezinde kullanılmaktadır [119].

5.5.3 Fiziksel Dönüşüm Prosesleri

Fiziksel dönüşüm prosesleri biyokütlenin birim hacminde bulunan enerji yoğunluğunu arttırmak amacıyla yapılan mekanik kuvvet uygulanarak biyokütlenin sıkıştırılması işlemidir. En bilinen fiziksel dönüşüm yöntemi briketleme prosesidir ve briketleme yığın ve enerji yoğunluğu düşük, yanma hızı yüksek tarımsal atıkların bu negatif özelliklerini bertaraf edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada linyit kömürlerinin organik atıklarla briketlenmesi çalışması yapıldığından briketleme hakkında detaylı bilgi Bölüm 4'te verilmiştir [118].

KÖMÜRÜN BİYOKÜTLE İLE BRİKETLENMESİ ÇALIŞMALARI

2001 yılında Yaman ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada, Kütahya Seyit Ömer bölgesine ait linyit kömürünü, melas, çam kozalağı, prina, kağıt fabrikası atığı ve pamuk atıkları gibi biokütlelerle çeşitli oranlarda karıştırılarak briketlemiştir. Briketleme çalışmalarında 50-250 MPa presleme basıncı, ağırlıkça %0-30 aralığında biyokütle kullanmışlardır. Elde edilen briketlere Shatter indeksi analizi, basınç dayanımı ve suya dayanım testleri uygulanarak biyokütlenin briketler üzerinde etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda briketleme basıncı arttıkça briketlerin Shatter indeksinin, basınç ve suya dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra kullanılan tüm katkı maddelerinin briketlerin suya dayanımını artırdığı, kağıt fabrikası atığı kullanılarak elde edilen briketlerin basınç dayanımı en yüksek olan briketler olduğu sonucuna ulaşmışlardır [130].

Onuegbu ve arkadaşları 2011 yılında fil otu ve kindıra otu kullanarak Nijerya sub-bitümlü kömürlerinin briketlenmesi üzerine çalışmışlar ve bu katkı maddelerinin kömür briketlerinin tutuşma sıcaklığı ve su kaynama testine etkileri incelenmiştir. Çalışmada bağlayıcı olarak manyok bitkisinden elde edilen nişasta kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda biyokütle miktarı arttıkça kömür briketlerinin yanma özelliklerinin iyileştiği, yanma sonucunda oluşan kül miktarının azaldığı ve daha dumansız briketler elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır [131].

Guoqing ve Quingyue'nin 2000 yılında yapmış olduğu çalışmada yüksek kül ve kükürt içeriğine sahip kömür tozları odun talaşıyla briketlenmiş ve elde edilen briketlerin orijinal kömür briketlerine kıyasla yanma özellikleri ve yanma sırasında oluşturdıkları emisyon gazları miktarları karşılaştırılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda odun talaşı ve kömürün birlikte kullanılarak elde edilen briketlerin tutuşma sıcaklığının kömür briketlerine göre daha düşük, yanma verimliliklerinin daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Aynı zamanda kömürün odun talaşıyla briketlenmesinin kömür briketlerine kıyasla, briketlerin kükürt içeriğini ve CO₂ emisyonunu azalttığı gözlemlenmiştir [132].

Wilaipon'un 2008 yılında yapmış olduğu çalışmada kömür tozları Tayland'ın Phitsouluk bölgesinde yetişen mısırın atıkları kullanarak briketlenmiş ve çalışmada kömür/biyokütle oranının ve briketleme basıncının briketlerin yoğunluğu üzerine etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada hammaddeler 2mm tanecik boyutuna öğütülmüş ve biyokütle olarak kullanılan mısır atıkları kömür ile karıştırılmadan önce sodyum hidroksit çözeltisinde bekletilmiştir. Briketleme çalışmaları kömür/biyokütle oranı 1/2 ve 1/3 oranında, 4-8 MPa briketleme basıncı kullanılarak yapılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda briketleme basıncı arttıkça briketlerin yoğunluğunun arttığı gözlemlenmiştir. Aynı briketleme basıncında 1/2 kömür biyokütle karışımının kullanılmasıyla elde edilen briketlerin yoğunluğunun, kömür biyokütle karışımının 1/3 oranında kullanılmasıyla elde edilen briketlere göre daha düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır [133].

Kwong ve arkadaşlarının 2007 yılında yapmış olduğu çalışmada kömür tozları pirinç kabuğu ve bambu kullanılarak briketlenmiş ve elde edilen briketlere, kömür biyokütle oranı, nem miktarı, tanecik boyutunun etkileri incelenmiştir. Briketlerde biyokütle miktarı arttıkça briketlerin ısı değeri ve tutuşma sıcaklığının kömür briketlerine göre azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun yanında karbon monoksit (CO), karbondioksit (CO₂), azot oksitler (NO_x) ve kükürt dioksit (SO₂) içeren kirletici gaz emisyonlarının azaldığı dahası artan nem miktarının tutuşma sıcaklığını ve yanma sırasında oluşan SO₂, NO_x ve CO₂ gazlarının miktarını azaltırken CO miktarının arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Tanecik boyutunun yanma özellikleri ve emisyon gazları üzerinde önemli etkileri olmadığı gözlemlenmiştir [134].

İkelle ve arkadaşlarının 2014 yılında yapmış olduğu çalışmada farklı kompozisyonlarda kömür ve mısır koçanı briketleri elde edilmiş ve briketleme çalışmalarında bağlayıcı olarak bitüm, kükürt giderici ajan olarak ise kalsiyum oksit kullanılmıştır. Briketler mekanik olarak manuel pres kullanılarak 5MPa briketleme basıncında elde edilmiştir. Yapılan denemeler sonucunda en iyi sonuçlara %60 kömür %40 mısır koçanı kullanılması durumunda elde edilen brikette ulaşılmıştır [135].

Liu ve arkadaşlarının 2017 yılında yapmış olduğu çalışmada mısır sapları çeşitli konsantrasyonlardaki sodyum hidroksit çözeltisiyle alkalize edildikten sonra briketlenmiş ve elde edilen briketlerin bağlayıcılık özellikleri, fizikokimyasal özellikleri, mikro yapıları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Mısır koçanlarının briketlenmeden önce %1 gibi düşük konsantrasyondaki sodyum hidroksit çözeltisi ile muamele edilmesi durumunda mısır koçanının yapısında bulunan ligninin ve karbon hidratların büyük bir kısmı parçalandığı gözlemlenmiştir. Sodyum hidroksit konsantrasyonu %1'den %2'ye yükseldiğinde mısır koçanının yapısında bulunan hemiselülozun ve amorf selülozun bozunmasının hızla artmakta olduğu ve sodyum hidroksit konsantrasyonu %3'e ulaştığında yapıda bulunan hemiselülozun %40'ının bozunduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan çalışmada en yüksek bağlayıcılığı mısır koçanlarının %2'lik sodyum hidroksit çözeltisi kullanılarak ön muamele edilmesi sonucunda ulaşılmış ve bu şartlarda elde edilen briketlerde enerji dönüşümü için en iyi piroliz performansı elde edilmiştir [136].

Munir ve arkadaşlarının 2010 yılında yapmış olduğu çalışmada, biyo-kömür briketleri oluşturmak amacıyla farklı termal davranışa ve selüloz/lignin bileşimine sahip olan karite bitkisi (KB) ve pamuk sapları (PS) biyokütle hammaddesi olarak kullanılmıştır. Briketler ağırlıkça %5-15 oranında biyokütle kullanılarak yapılmış ve yapılan denemeler sonucunda optimum bileşime ağırlıkça %10 biyokütle kullanılması durumunda ulaşılmıştır. Ağırlıkça %10 biyokütle kullanılması durumunda elde edilen briketlerin kömür briketlerine kıyasla NO emisyonundaki azalma karite bitkisi ve pamuk kabuğu için sırasıyla %51 ve %60 olduğu sonucuna ulaşılmış aynı zamanda kömürün biyokütle ile briketlenmesinin yanma sırasında oluşan SO₂ miktarı ve briketlerin yanma özelliklerinin de iyileşmesine sebep olduğu belirlenmiştir [137].

Chaiklangmuang ve arkadaşlarının 2008 yılında yapmış olduğu çalışmada linyit kömürleri bağlayıcı olarak odun talaşı ve pirinç kabuğu kullanılarak briketlenmiş ve bağlayıcı olarak kullanılan hammaddeler farklı sürelerde ve sodyum hidroksit çözeltisi konsantrasyonlarında ön işlemlere tabi tutulmuştur. Briketleme çalışmaları silindirik pres kalıbında hidrolik pres kullanılarak yapılmış ve katkı maddelerine yapılan ön işlemin briket kalitesine etkisi incelenmiştir. Pirinç kabuğu kullanılarak yapılan denemelerde, pirinç kabuğunun %3'lük sodyum hidroksit çözeltisiyle 1,5 saat muamele edilmesi durumunda diğer briketlere kıyasla daha dayanıklı briketler elde edildiği gözlemlenmiştir. Odun talaşı kullanılarak yapılan denemelerde ise en iyi mekanik dayanıma sahip olan briketin odun talaşının ağırlıkça %7'lik sodyum hidroksit çözeltisi ile 1,5 saat süresince muamele edilmesi ile elde edilmiştir. Aynı zamanda biyokütlelerin sodyum hidroksit ile muamele edilmesi sonucunda elde edilen briketlerin suya dayanımlarının da arttığı gözlemlenmiş ve sonuçlar sodyum hidroksit ile muamele edilen pirinç kabuğunun ve talaşın, biyokütle-lyinyit briketleme kalitesine önemli ölçüde katkı sağladığını göstermiştir [138].

2014 yılında Lu ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada kömür briketlerinin kalitesini arttırmak amacıyla mısır saplarıyla birlikte briketlenmesi amaçlanmıştır. Mısır koçanları briketlerde kullanılmadan önce bağlayıcılık özelliğini arttırmak amacıyla sodyum hidroksit çözeltisiyle muamele edilmiştir. Yapılan denemelerin sonuçları mısır koçanı arttıkça briketlerin basma ve düşme dayanımlarının arttığını bunun yanı sıra elde edilen briketlerin suya dayanımının hiç olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu kapsamda briketlere suya dayanım özelliği kazandırmak amacıyla belli oranda polivinil alkol (PVA) eklenmiş ve PVA eklenerek elde edilen briketler, yaklaşık 24 saat boyunca suda bekletilmiş ve briketlerde herhangi bir dağılma gözlemlenmemiştir. Bunlara ek olarak PVA'nın briketlerin basma ve düşme dayanımlarını da arttırdığı gözlemlenmiştir. PVA ve mısır koçanı kullanılarak yapılan kömür briketlerinde mısır koçanı miktarı arttıkça briketlerin tutuşma sıcaklığı, ısı değeri ve kül miktarının azaldığı gözlemlenmiştir [139].

2013 yılında Haykırı Acma ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada düşük kaliteli Soma Deniz linyit kömürüne %5-20 oranlarında pirinç kabuğu ve prina ekleyerek kömür/biyokütle karışımlarının birlikte maksimum 900°C sıcaklıkta yanma denemeleri yapılmıştır. Denemelerde katkı maddesinin kömürün yanma özelliklerine etkisinin

incelenmesinin yanı sıra yanma ortamında saf oksijen ve kuru hava kullanılmasının yanma özellikleri üzerinde etkileri de araştırılmıştır. Linyit kömürüne, pirinç kabuğu ve prinaya yapılan karakterizasyon çalışmaları sonucunda bu hammaddelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin birbirlerinden oldukça farklı olduğu sonucuna ulaşılmış ve buna bağlı olarak yanma özelliklerinin de birbirinden farklı olduğu belirlenmiştir. Yapılan denemelerde yanma ortamının havasının biyokütle/kömür karışımlarının kütle kaybı hızı ve sıcaklığı, yanma verimi üzerinde önemli etkileri olduğu sonucuna ulaşılmış ve yanma ortamında oksijen kullanılması durumunda yanma veriminin daha yüksek olduğu, maksimum yanma sıcaklığının daha düşük sıcaklıklarda olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sonucunda oksijen kullanımının termal aktivitede artışa sebep olduğu öngörülmüştür. Bununla birlikte yanma ortamının yanı sıra biyokütle oranının da yanma özellikleri üzerinde önemli etkilerinin olduğu belirlenmiştir [140].

Onuegbu ve arkadaşlarının 2010 yılında yapmış oldukları çalışmada süb-bitümlü kömürün farklı oranlarda (%0-100) mızrak otu kullanılarak briketlenmesini amaçlamışlar ve briketleme çalışmalarını 5MPa sıkıştırma basıncında, bağlayıcı olarak manyok nişastası, kükürt giderici ajan olarak ise kalsiyum hidroksit kullanarak yapmışlardır. Elde edilen briketlerin kül, nem miktarı, ısı değeri, basma sağlamlığı, tutuşma süresi, yanma hızı ve emisyon gazı miktarlarını belirleyerek katkı maddesi kullanımının briketler üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yapılan denemeler sonucunda briketlerin nem miktarlarının, tutuşma sürelerinin, uçucu madde miktarlarının ve yanma sürelerinin artan katkı maddesi miktarıyla arttığı, kül miktarlarının ve ısı değerlerinin ise azaldığı sonucuna ulaşmışlardır. Evsel kullanımlar için briketlerde %50 katkı maddesi kullanımının, endüstriyel kullanımlar için ise ısı değeri daha yüksek olmasından dolayı %30 katkı maddesi kullanımının daha uygun olabileceğini öngörmüşlerdir [141].

Adekunle ve arkadaşlarının 2015 yılında yapmış oldukları çalışmada Nijerya'nın iki farklı bölgesindeki madenlerden alınan kömür numuneleri farklı bileşimlerde (0-100) odun talaşı ile karıştırılmış ve bağlayıcı olarak manyok nişastası, kükürt giderici olarak kalsiyum hidroksit kullanılarak briketlenmiştir. Her iki kömür numunesi kullanılarak elde edilen briketlere yapılan analizler sonucunda katkı maddesi miktarı arttıkça briketlerin bileşiminde bulunan azot ve oksijen miktarlarının arttığı bunun yanı sıra kükürt

miktarının azaldığı belirlenmiştir. Bunun yanı sıra artan talaş miktarının briketlerin ısıl değerini olumsuz yönde etkilediği sonucuna ulaşılmıştır [142].

Nwabue ve arkadaşları 2017 yılında sub-bitümlü kömürün, kısmi olarak farklı oranlarda karbonize edilerek öğütülmüş plastik atıklar ve biyoatıklarla (poşet su torbaları, polietilen torbalar, talaş ve mısır koçanı), bağlayıcı olarak manyok unu, laterit ve kireç taşı tozu kullanılarak briketlenmesi çalışmalarını yapmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen briketlerin porozite indeksi, briket yoğunluğu, basınç dayanımı, yanma ısıtma verimi, uçucu madde miktarı, ısıl değeri, nem ve kül miktarları ASTM ve DIN standartları kapsamında belirlenmiştir. briket karakterizasyonu sonuçlarından %20-70 kömür, %2-8 kireç taşı, %10 plastik atık, %2,5-1, monyak unu, %10-60 oranında biyokütle kullanılarak yapılan denemeler sonucunda elde edilen briketlerin orta ve yüksek kalitede briketler olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca elde edilen briketlerin mekanik olarak sağlam, yanma sırasında duman oluşturmeyen yani çevre dostu özellikte olduğu tespit edilmiştir. Bunlara ek olarak briketlerin yanması sırasında oluşan külün dağılma olmaksızın bir blok halinde kaldığı gözlemlenmiştir. Plastik atıkların, bu biyolojik kömür briketlerinin üretimine dahil edilmesiyle çevreye zararlı atıkların verimli bir şekilde kullanılarak bertaraf edilmesi sağlanmıştır [143].

Akuma ve Charles'ın 2017 yılında yapmış oldukları briketleme çalışmasında yer fıstığı atıkları ve sub-bitümlü kömür kullanmışlardır. Briketleme çalışmaları farklı oranlarda yer fıstığı kabuğu-kömür karışımına belirli miktarda bağlayıcı olarak kil/pirinç nişastası, kükürt giderici ajan olarak ise kalsiyum oksit eklenerek, elle briketleme makinesi kullanılarak yapılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda artan katkı maddesi miktarı arttıkça briketlerin yoğunluğunun, yanma süresinin, tutuşma sıcaklığının ve ısıl değerlerinin azaldığı, kül miktarının, nem miktarının ve porozite indekslerinin arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Çalışmada, diğer briketlere kıyasla en iyi yanma özelliklerine sahip olan briketin %60 kömür, %40 yerfıstığı kabuğu kullanılması durumunda elde edilebileceği ön görülmüştür. Bu briketin kül miktarı %32,5, sabit karbon miktarı %51,5, nem miktarı %7, yoğunluğu 0,71g/cm³, uçucu madde miktarı %9, porozite indeksi %48,12, ısıl değeri 12,10MJ/kg, suda kaynama testi 20 dakika, tutuşma süresi 13 dakika, yanma süresi ise 56.14 dakika olarak belirlenmiştir [144].

Ayodole'nin 2014 yılında yapmış olduğu çalışmada sub-bitümlü kömürün bağlayıcı madde olarak nişasta kullanılarak, talaş ve mısır koçanı ile briketlenmesi amaçlanmıştır. Briketleme çalışmaları tarımsal atıklara herhangi bir ön işlem uygulanmadan ve karbonizasyon işlemi uygulanarak yapılmıştır. Kullanılan hammaddelerin ve elde edilen briketlerin elementel ve kısa analizleri ASTM standartlarına uygun olarak yapılmış ve yanma sonucu salınan emisyon gazlarının miktarı (CO_2 , NO_2 ve SO_2) 20 MW'lık bir santralden 1 saatte yayılan miktar ölçülerek hesaplanmıştır. Hammaddelere yapılan kısa analizler sonucunda en yüksek sabit karbon (%42,38) ve en düşük nem içeriğine (%4,28) sahip olan hammaddenin kömür olduğu belirlenmiştir. Tarımsal atıklara karbonizasyon uygulanmadan doğrudan kullanılması sonucu elde edilen kömür-talaş, kömür- mısır koçanı briketlerinin analiz sonuçları bu briketler arasında önemli korelasyonlar olduğunu belirlemişlerdir. Tarımsal atıklara karbonizasyon işleminin uygulanması briketlerin sabit karbon değerinin yükselmesine, uçucu madde miktarını azalmasına sebep olduğu görülmüştür. Yapılan analizler sonucunda kömürün karbon içeriğinin %70,04, hidrojen içeriğinin %5,32, azot içeriğinin %2,03 ve kükürt içeriğinin %1,02 olduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra mısır koçanının %48 karbon, %5,79 hidrojen, %0,89 azot, talaşın ise %48,78 karbon, %5,79 hidrojen ve %0,89 azot içeriğine sahip olduğu belirlenmiştir. Her iki tarımsal atığın kükürt içermediği gözlemlenmiştir. Yanma analizleri sonucunda kömürün biyokütle ile briketlenmesi yanma sırasında oluşan baca gazı emisyonlarını önemli ölçüde azalttığı sonucuna ulaşılmıştır [145].

Zanjani ve arkadaşlarının 2014 yılında yapmış oldukları çalışmada bitümlü kömürün odun talaşı ve pancar küspesi ile briketlenmesi üzerine sıkıştırma basıncı ve katkı maddesi miktarının etkileri araştırılmış ve elde edilen briketlere fiziksel dayanım, suya dayanım, nem miktarı, uçucu madde miktarı, kükürt miktarı analizleri yapılarak briketlerin karakterizasyonu belirlenmiştir. Yapılan denemeler sonucunda katkı maddesi miktarı ve sıkıştırma basıncı arttıkça briketlerin basınç dayanımlarının, yoğunluklarının ve suya dayanımlarının arttığı; nem miktarlarının, ısı değerlerinin ve kül miktarlarının ise azaldığı; bunun yanı sıra briketlerin nem miktarının %5'in üzerine çıkması durumunda briketlerin basma dayanımlarının da azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca artan nem miktarının briketlerin ısı değeri üzerinde olumsuz etkiye sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda pancar küspesi ve talaşla yapılan briketler

kıyaslandığına pancar küspesi kullanılarak elde edilen briketlerin talaş kullanılarak elde edilen briketlere göre daha iyi özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir [146].

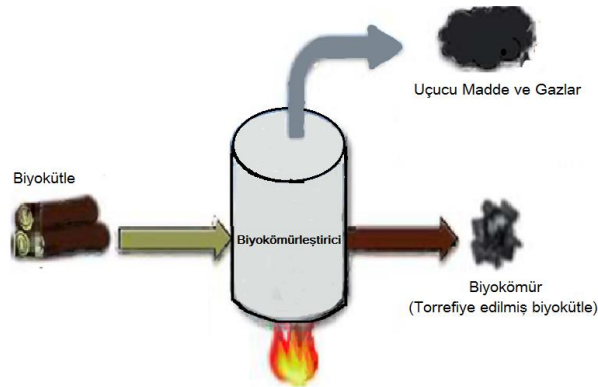
Taulbe ve arkadaşlarının 2009 yılında yapmış oldukları çalışmanın ilk kısmında kömürün katkı maddesi olarak talaşla briketlenmesi çalışmalarında en uygun bağlayıcı türü ve bileşimini belirlemeyi amaçlamışlardır. Çalışmanın ikinci kısmında ise elde edilen en iyi bağlayıcıları kullanarak kömürün talaşla briketlenmesi üzerine briketleme parametrelerinin etkisini incelemişlerdir.

Çalışmanın ilk kısmında farklı bağlayıcılar kullanarak yaklaşık 50 farklı bağlayıcı formülasyonunu üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bağlayıcı seçimi üzerine yapılan çalışmalar sonucunda kömürün talaş kullanılarak briketlenmesi çalışmalarında en uygun bağlayıcıların guar gamı, buğday nişastası ve lignosulfat/kireç karışımı olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Çalışmanın ikinci kısmında bağlacı ve talaş miktarı, tanecik boyutu, briketleme basıncı ve süresi, nem miktarı, sertleşme süresi ve sıcaklığı, talaş tipi gibi parametrelerin briket kalitesi üzerine etkilerini incelemişlerdir. Yapılan denemeler sonucunda briket kalitesi üzerinde en etkili parametrelerin bağlayıcı ve talaş miktarı, talaş tipi, sertleşme süresi ve sıcaklığı olduğu, en az etkiye sahip parametrelerin ise briketleme basıncı ve süresi olduğunu belirlemişlerdir [147].

TORREFAKSİYON (BİYOKÖMÜRLEŞTİRME)

Torrefaksiyon (biyokömürleştirme), biyokütlenin oksijensiz ortamda yavaş yavaş belirlenen sıcaklık aralığında ısıtılmasıyla gerçekleşen termokimyasal bir süreçtir ve bu proses sırasında biyokütlenin yapısında bulunan hemiselüloz bozulmakta, katı ürünün kütle ve enerji verimi maksimum seviyeye ulaşmakta, böylelikle temiz ve yakma sistemlerine uygun bir katı yakıt meydana gelmektedir. Torrefaksiyon prosesinin basit gösterimi Şekil 7. 1’de verilmiştir.

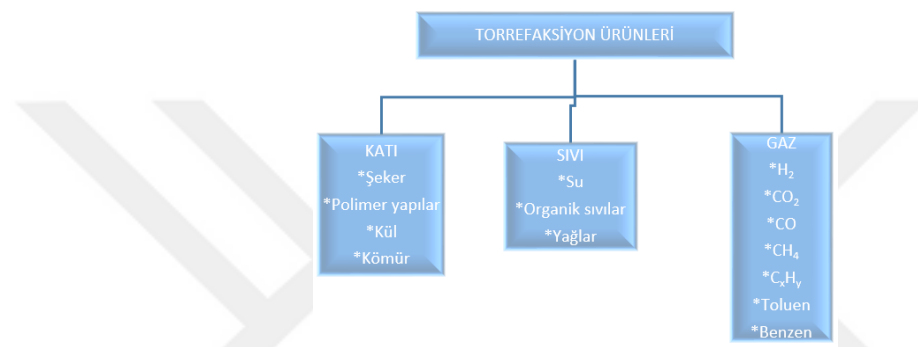


Şekil 7.1 Torrefaksiyon prosesi

Torrefaksiyon prosesi iki farklı şekilde yapılabilmektedir ve bunlardan biri ıslak torrefaksiyon prosesi diğeri ise kuru torrefaksiyon prosesi olarak adlandırılmaktadır. Islak torrefaksiyon prosesinde ısıtma (termal bozunma) işlemi yüksek basınçlı su kullanılarak yapılırken, kuru torrefaksiyon prosesinde ısıtma doğrudan sıcak inert gaz kullanılarak yapılabileceği gibi, sıcak ortama inert gaz beslenerek de yapılabilmektedir [102]. Günümüzde en çok kullanılan yöntem kuru torrefaksiyon yöntemidir.

Her iki torrefaksiyon prosesi sonucunda biyokütle yapısında bulunan uçucu gaz ve oksijen miktarı azalmakta aynı zamanda karbon miktarı artmaktadır. Bu sayede biyokütlenin karbon yoğunluğu ve enerji verimliliği orijinal hammaddeye kıyasla daha yüksek olmaktadır [102].

Torrefaksiyon prosesi sırasında katı ürünün yanı sıra sıvı ve gaz fazda da ürünler oluşmaktadır fakat katı fazda oluşan ürün miktarı kütlece sıvı ve gaz fazda oluşan ürün miktarlarından daha fazladır. Şekil 7. 2’de torrefaksiyon prosesi sırasında oluşan ürünler ve ürünlerin bileşimleri verilmiştir.



Şekil 7.2 Torrefaksiyon Ürünleri [102]

Torrefaksiyon prosesi sonucunda oluşan katı faz; şeker, polimer yapıdaki öğeler, kül ve yüksek miktarda kömürleşmiş bitki kalıntılarından, sıvı faz; su, organik sıvılar ve yağdan, gaz faz ise H₂, CO₂, CO, CH₄, C_xH_y, Toluen ve Benzen 'den oluşmaktadır [102].

7.1 Torrefaksiyon Prosesi Sonucunda Elde Edilen Ürünlerin Kullanım Alanları

Torrefaksiyon prosesi uzun yıllardan beri çay ve kahve üretiminde kullanılmaktadır. Son yıllarda biyokütlenin enerji yoğunluğunun artırılması amacıyla yapılan çalışmalarda torrefaksiyon prosesinin biyokütlenin temiz ve kaliteli enerji ürünleri elde etme üzerine önemli etkileri olduğu belirlenmiş ve bu proses sonunda elde edilen ürünler;

- a) Yakıt olarak kömür kullanan enerji santralleri kazanlarında doğrudan ya da kömürle karıştırılarak
- b) Kentsel ısıtma sistemlerinde
- c) Kimya endüstrisinde hammadde olarak
- d) Yüksek dereceli fırınlarda karbon ayak izini yani CO₂ emisyonunu azaltmak amacıyla kullanılmaya başlanmıştır.

7.2 Torrefaksiyon Prosesinin Diğer Termokimyasal Proseslerden Farkı

Torrefaksiyon prosesi genellikle karbonizasyon ve piroliz prosesleriyle karıştırılmaktadır. Bu her üç prosesin hizmet ettiği amaç aynı olmasına karşın proses şartları birbirlerinden çok farklıdır.

Piroliz, karbonizasyon ve torrefaksiyon proseslerinin tüm aşamalarında biyokütlenin termal bozunması gerçekleşmekte fakat her proses sonucunda farklı ürünler elde edilmektedir. Örneğin piroliz sonucunda oluşan sıvı ürün miktarının maksimum, katı ürün miktarı ise minimum seviyede olması sağlanırken, karbonizasyonda katı üründeki sabit karbon miktarının artması, hidrokarbon miktarının azalması sağlanmakta, torrefaksiyonda ise oksijen/karbon ve hidrojen/karbon oranının azaltılarak enerji verimliliğinin maksimum seviyeye ulaşması sağlanmaktadır.

Karbonizasyon ve torrefaksiyon prosesleri kıyaslandığında, karbonizasyon sırasında hammadde içinde bulunan uçucu bileşenlerin büyük bir kısmının uzaklaştığı buna karşın torrefaksiyonda uçucu bileşenlerin büyük bir kısmının hammadde kaldığı ve sadece enerji yoğunluğu düşük uçucu bileşenlerin ve bünye neminin uzaklaştığı görülmektedir [110].

Torrefaksiyonun ana amacı biyokütlenin karbon içeriğini arttırarak enerji yoğunluğunun yükselmesini sağlamaktır. Torrefaksiyonda olduğu gibi karbonizasyon prosesinin de amacı biyokütlenin karbon içeriğinin arttırılması olmasına karşın karbonizasyon sonucunda elde edilen ürünün enerji yoğunluğu torrefaksiyona kıyasla oldukça düşüktür. Karbonizasyon ve torrefaksiyon prosesleri sonucunda elde edilen ürünlerin özellikleri ve bu ürünlerin bitümlü kömür ile karşılaştırılmaları Çizelge 7. 1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1 Torrefaksiyon uygulanmış biyokütle özellikleri

	Ham Biyokütle	Torrefaksiyon Uygulanmış Biyokütle	Karbonizasyon Uygulanmış Biyokütle	Bitümlü Kömür
Sıcaklık		200-300	>300	
Nem %	30-60	1-5	1-5	3-20
Ucucu Madde %	70-80	55-65	10-12	28-45
Sabit Karbon %	15-25	28-35	85-87	45-60
Kütle Verimi		80%	30	
Enerji Yoğunluğu (Mj/Kg)	18	20-24	30-32	24-33
Hidrofobiklik	Higroskobik	Hidrofobik	Hidrofobik	hidrofobik

Karbonizasyon, piroliz ve torrefaksiyon proseslerini birbirinden ayıran önemli farklardan bir tanesi ısıtma hızıdır. Karbonizasyon ve torrefaksiyonda ısıtma işlemi düşük hızlarda yapılırken pirolizde sıvı ürün verimini maksimum seviyede tutmak amacıyla ısıtma yüksek hızlarda yapılmaktadır.

Karbonizasyonda, proses için gerekli enerji hammaddenin yanmasından sağlandığı için oksijene ihtiyaç duyulmakta ve bu sebeple belirli miktarda oksijen varlığında yapılmaktadır. Bunun yanı sıra torrefaksiyonda yanma gerçekleşmesi durumunda biyokütlenin enerji verimliliği düştüğünden torrefaksiyon işlemi oksijensiz ortamda yapılmaktadır.

Torrefaksiyon düşük sıcaklıklarda hammaddenin termal bozunması prensibine dayanmaktadır, 300°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda çalışılması durumunda elde edilen ürünün enerji verimliliği düşmekte ve bu sebeple proste çok kısıtlı sıcaklık aralığında (200-300°C) yüksek enerji verimliliğine sahip ürünler elde edilebilmektedir. Buna karşılık karbonizasyonda geniş çalışma sıcaklığı aralığına sahiptir ve karbonizasyon işleminin yapılması torrefaksiyona kıyasla yüksek sıcaklıklarda (300-600°C) mümkün olmaktadır. Karbonizasyon sonucunda elde edilen ürünün enerji yoğunluğu torrefaksiyona kıyasla daha yüksektir fakat proses sonucunda elde edilen katı ürün miktarı az olduğundan enerji verimliliği torrefaksiyona kıyasla çok düşüktür [102].

7.3 Torrefaksiyon Prosesin Ana Basamakları

Torrefaksiyon prosesi temelde beş ana basamakta gerçekleşmektedir ve bunlar ön ısıtma, kurutma, kurutma sonrası ısıtma, torrefaksiyon ve soğutma basamaklarını içermektedir.

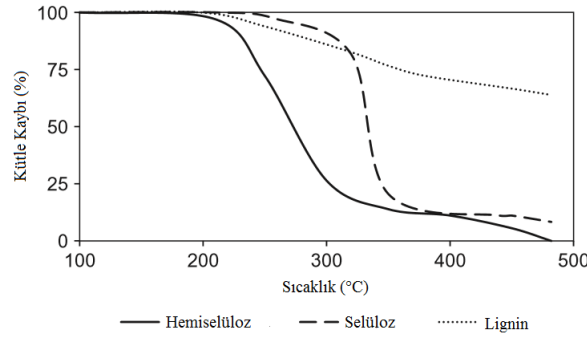
Kurutma öncesi ısıtma: Bu basamak torrefaksiyon prosesinin ilk aşamasıdır ve biyokütle oda sıcaklığından kurutma sıcaklığına (yaklaşık 100°C) yükseltilir. Bu basamakta biyokütledeki fiziksel olarak bağlanmış su uzaklaşmaya başlar ve biyokütlenin fiziksel yapısında herhangi bir değişiklik olmaz. Biyokütlenin ağırlığı azalır fakat tekrar nemlendirilmesi durumunda eski yapısını yeniden kazanabilir [110].

Kurutma: Bu aşamada biyokütle içerisinde bulunan serbest suyun yani nemin tamamen biyokütleden uzaklaşması gerçekleşir torrefaksiyon prosesinin en çok enerji gerektiren basamaklarından bir tanesidir. Biyokütlenin yapısında herhangi bir değişim gerçekleşmez ve biyokütlenin sıcaklığında, biyokütle yüzeyinde bulunan nem tamamen uzaklaşana kadar herhangi bir değişim olmaz yani bu aşama sabit sıcaklıkta gerçekleşir. Biyokütle kritik nem değerine ulaştığından itibaren sıcaklık artmaya (120-150°C), nemin evaporasyon hızı azalmaya başlar. Kurutma işlemi sonucunda biyokütle ağırlığının yaklaşık %10 unu kaybeder. Aynı zamanda sıcaklığın 120-150°C'ye ulaşmasıyla biyokütlenin yapısında bulunan ligninin yumuşaması gerçekleşir.

Kurutma Sonrası Isıtma: Bu basamak biyokütlenin kurutulduktan sonra torrefaksiyon sıcaklığına kadar ısıtıldığı sıcaklık basamağıdır ve bu sıcaklık genellikle 200°C'nin üzerindedir. Bu aşamada biyokütlenin yapısında geri dönüşü olmayan, hidrojen ve karbon bağlarının kırılması ve hemiselüloz moleküllerinin depolimerizasyonu gibi yapısal bozunmalar başlar [147]. Aynı zamanda biyokütleye fiziksel olarak bağlanmış hafif organik uçucu bileşikler biyokütleden uzaklaşır.

Torrefaksiyon: Bu aşama torrefaksiyon prosesinde sıcaklığın en yüksek olduğu bunun yanı sıra torrefaksiyonun ekzotermik bir proses olmasından kaynaklı enerji ihtiyacının diğer basamaklara göre en düşük olduğu aşamadır. Yoğunlaşabilir sıvılar ve yoğunlaşamayan gazları oluşturan çoğu moleküler arası bağların (hidrojen, C – C ve C – O) bozunması bu aşamada gerçekleşir [110].

Biyokütlenin ana polimerik bileşenleri olan hemiselüloz, selüloz ve lignin birbirinden bağımsız olarak, sinerjetik etkileşim göstermeden bozunması bu basamakta gerçekleşmektedir [148]. Torrefaksiyon işlem sırasında biyokütlenin yapısında bulunan ana bileşenlerin bozunma dereceleri ve sıcaklıkları birbirlerinden farklılık göstermektedir. Biyokütlenin ana bileşenlerinin sıcaklıkla kütlelerinde meydana gelen değişim Şekil 7. 3'te verilmiştir.



Şekil 7.3 Sıcaklıkla biyokütlenin ana bileşeninde meydana gelen bozunmalar

Torrefaksiyon prosesi sırasında biyokütlenin yapısında bulunan hemiselülozun hemen hemen hepsi uçucu maddelere ve katı ürünlere ayrışırken, lignin ve selülozun yapısında sınırlı miktarda bozunmalar meydana gelmektedir. Bunlara ek olarak torrefaksiyon sırasında hemiselülozun bozunması 225-300°C arasındaki sıcaklıklarda gerçekleşirken, selülozun bozunması 280-375°C sıcaklık aralığında, ligninin bozunması ise 250-500°C sıcaklıkları arasında gerçekleşmektedir.

Soğutma: Torrefaksiyon uygulanan biyokütle prosesi, sistemin en yüksek sıcaklığı olan torrefaksiyon sıcaklığında terk eder. Bu sıcaklık birçok torrefaksiyona uğrayan biyokütlenin tutuşma sıcaklığının üzerindedir ve soğutma iyi yapılmazsa torrefaksiyon uygulanan numune hava ile temas eder etmez yanmaya başlar. Bu sebeple torrefaksiyon prosesinden çıkan ürünün soğutulması son derece önemlidir ve soğutma sırasında oluşan ısı, kurutma ya da ön ısıtma için gerekli enerjinin bir kısmının karşılanması için kullanılabilir.

7.4 Torrefaksiyonu Etkileyen Parametreler

Torrefaksiyon prosesinde biyokütlenin enerji verimliliği çeşitli parametrelere bağlıdır. Bu parametreler sıcaklık, kalma zamanı, biyokütle tipi ve tanecik boyutudur.

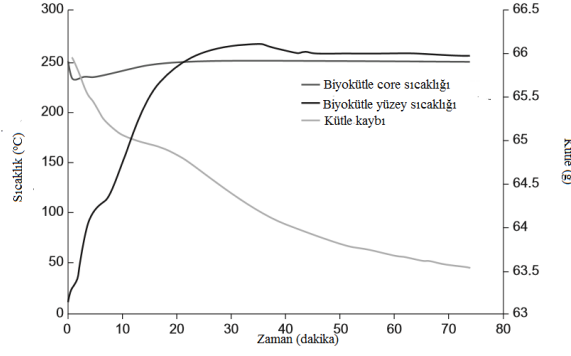
7.4.1 Sıcaklık

Torrefaksiyon prosesinde biyokütlenin termal olarak bozunması birincil olarak sıcaklığa bağlı olduğundan torrefaksiyon prosesinde en önemli parametrelerden bir tanesi sıcaklıktır. Torrefaksiyon prosesi sonunda elde edilen ürünün kütle ve enerji verimliliği proses sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir ve artan sıcaklıkla biyokütlenin enerji ve kütle verimliliği azalmaktadır. Buna karşın artan sıcaklıkla biyokütlenin yapısında bulunan karbon miktarı arttığı için, elde edilen ürünün enerji yoğunluğu artmaktadır. Bunlara ek olarak artan sıcaklık biyokütlenin yapısında bulunan oksijen ve hidrojen miktarının azalmasına sebep olmaktadır [149].

7.4.2 Merkez Çekirdek Sıcaklığı

Partikül boyutu milimetre ve santimetre boyutunda olan biyokütle parçacıklarındaki torrefaksiyon işlemi biyokütle parçacıklarının iç kısımlarında gerçekleşir. Bu sebeple termal bozunma sırasında parçacık içerisindeki sıcaklık, yüzeydeki sıcaklıktan daha büyük önem arz etmektedir.

Torrefaksiyon prosesi 270°C'nin altındaki sıcaklıklarda endotermik özellik gösterirken yüksek sıcaklıklarda şekerlerin ekzotermik olarak parçalanması sebebiyle ekzotermik eğilim göstermektedir. Fakat her durumda torrefaksiyon prosesi sırasında ısı, bir ısı kaynağından biyokütle partikülünün dış yüzeyine konveksiyonla taşınmaktadır. Isı biyokütle yüzeyinden biyokütle içerisine ise kondüksiyon ve biyokütle gözenekleri arasındaki boşluklarda konveksiyon ile taşınmaktadır. Bu sebeple biyokütlenin çekirdeği ve yüzeyi arasında negatif bir sıcaklık gradyenti oluşmaktadır. Düşük Biot sayısına sahip ince parçacıklarda partikül yüzeyi ile çekirdek arasındaki sıcaklık farkı küçük olurken, daha büyük yüzeye sahip partiküllerde ise bu fark büyümektedir. Şekil 7. 4'te büyük biyokütle partikülünün zamanla çekirdeğindeki ve yüzeyindeki sıcaklığın eş zamanlı ölçümleri ve kütle kayıpları gösterilmektedir.



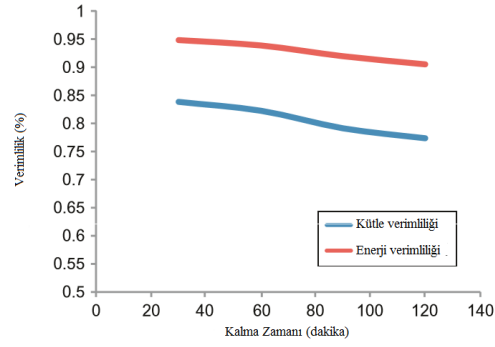
Şekil 7.4 Merkez sıcaklık ve kütle kaybı ilişkisi

Büyük bir parçacık torrefaksiyon prosesi için reaktöre girdiğinde çekirdek sıcaklığı reaktör sıcaklığından veya dış yüzey sıcaklığından daha düşüktür. Ancak reaktörden ısıyı sabit bir şekilde alır ve bir süre sonra çekirdek sıcaklığı reaktör sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklığa yükselmektedir. Bu da reaksiyonların ekzotermik eğilim verdiğini göstermektedir.

Biyokütlenin ulaşabildiği maksimum sıcaklık, biyokütleyle verilen ısıya ve kütle transferine bağlıdır ve boyut, şekil ve sıcaklıktan etkilenir. Torrefaksiyon reaksiyonu, reaktör sıcaklığından çok çekirdek sıcaklığına bağlı olduğu için, çekirdek sıcaklığı büyük önem taşımaktadır. Bu sebeple farklı büyüklükteki iki kütleyle aynı koşullarda torrefaksiyon uygulanması durumunda oluşan ürünler farklı kütle ve enerji verimliliğine sahip olabilirler.

7.4.3 Kalma Zamanı

Torrefaksiyonu etkileyen bir diğer parametre reaktörde kalma zamanıdır. Biyokütlenin reaktörde geçirdiği süre, biyokütlenin termal bozunmasını etkilemektedir. Torrefaksiyon prosesinde genellikle düşük ısıtma hızlarında çalışıldığı için reaktörde kalma süreleri pirolize göre çok daha yüksektir. Şekil 7. 5'te kalma zamanı ve verimlilik arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 7.5 Kalma zamanının verimlilik üzerine etkileri

Reaktörde kalma süresinin artması düşük kütle ve enerji verimine, yüksek enerji yoğunluğuna sebep olmaktadır.

7.4.4 Biyokütle Tipi

Torrefaksiyon üzerinde etkili olan bir parametre de biyokütle tipidir. Torrefaksiyon işlemi boyunca biyokütle yapısındaki en yüksek bozunma aralığına sahip molekül hemiselüloz yapılarıdır. Bu sebeple yüksek hemiselüloz miktarına sahip bir biyokütlenin kütle kaybı, düşük hemiselüloz içeren biyokütleyle göre daha fazla olması beklenebileceği gibi hemiselülozun yapısına da bağlı olarak kütle kaybı değişebilmektedir. Bunlara ek olarak hemiselülozun aktif kısmı olan ksilen içeriğinin farklı olması kütle verimliliğinin de farklı olmasına sebep olmaktadır. Hemiselülozun ksilen veya 4-O-metilglukuronoksilen içeriği reaksiyon sıcaklığında reaktif bir yapıda olup biyokütlenin diğer katı içeriğine göre daha hızlı bozunma gösterirler. Bu nedenle biyokütlenin kütle kaybı tek başına hemiselüloz içeriğinden ziyade ksilen içeriğine de bağlıdır [150], [151]

7.4.5 Tanecik Boyutu

Torrefaksiyon verimini etkileyen parametrelerden bir tanesi de tanecik boyutudur. Bu etki küçük boyutlarda çok görülmesine de parçacık boyutları büyüdükçe ölçülebilir düzeye gelmektedir [152].

Kütle verimi, çap sabit tutularak hacim artmasına bağlı olarak artış göstermektedir. Ancak uzunluk sabit tutulup çap arttıkça tersi bir sonuç ortaya çıkmaktadır. Bunun temel sebebi biyokütlenin çekirdek kısmına doğru gerçekleştirilen ısı transferi ve sıcaklığa bağlı olarak biyokütle içerisinde gerçekleşen reaksiyonlardır. Torrefaksiyon prosesi sırasında

enerji geçişi üç farklı mekanizmada gerçekleşmektedir ve bu üç enerji geçişinin bağlı büyüklüğü, hangi parametrenin genel torrefaksiyon prosesini etkileyebileceğini belirlemektedir.

7.5 Torrefaksiyon Uygulanmış Biyokütlenin Fiziksel zellikleri

Torrefaksiyon işlemi, biyokütlenin fiziksel yapısında çeşitli farklılıklar meydana gelmesine sebep olmaktadır. Bunlardan bazıları biyokütleyi kömürle birlikte yakma proseslerinde büyük önem taşımaktadır.

Torrefaksiyon işleminden sonra elde edilen ürünün özellikleri hacim ve yoğunluk, öğütülebilirlik, hidrofobiklik, patlama potansiyeli ve briketleme şeklinde incelenecektir.

7.5.1 Hacim ve Yoğunluk

Torrefaksiyon işlemi sırasında biyokütle içerisindeki lignin, selüloz, hemiselüloz ve nem yapıdan uzaklaştığı için biyokütlede bir kütle kaybı gerçekleşmekte ve bu kütle kaybı aynı zamanda hacim değişimini de beraberinde getirmektedir. Bu sebeple torrefaksiyon işlemindeki yoğunluk değişimini tek başına kütle verimliliği ile tanımlamak doğru olmamaktadır. Torrefaksiyonun yoğunluğa etkisinin daha iyi anlaşılması için aşağıda  yoğunluk türünden bahsedilmiştir:

1. Parçacığın gerçek yoğunluğu
2. Parçacıkların görünür yoğunluğu (biyokütle katı ve i gözenek hacmine dayalı olarak)
3. Biyokütlenin yığın yoğunluğu (paketlenmiş veya bir yüzey üzerine yığılmış parçacıkların yoğunluğu)

Çoğu lignoselülozik biyokütle için, gerçek yoğunluk 1400 kg/m^3 civarındadır. Torrefaksiyon işleminden sonra biyokütlenin gerçek yoğunluğu %5'ten daha küçük bir değerde azalırken, görünür yoğunluğun azalması çok daha gözlemlenebilir seviyededir [153]. Özellikle yığın yoğunluğuna sahip bioktlelerde artan sıcaklıkla yoğunluğun azaldığı kolaylıkla gözlemlenebilmektedir [151].

7.5.2 Öğütülebilirlik

Biyokütle genel özelliklerinden bir tanesi yüksek miktarda lif içermesidir ve bu lifli yapı partiküller arasındaki sürtünmeyi büyük ölçüde arttırarak, biyokütle yumuşaklık ve plastik özellik kazandırmaktadır.

Biyokütlenin kömür proseslerinde yakılması işleminde biyokütlenin kömüre benzer boyutlara öğütülmesi ve pnömatik olarak taşınabilmesi gerekmektedir. Biyokütlenin, plastiğimsi ve yumuşak yapısı biyokütlenin öğütülmesini zorlaştırarak buna engel olmaktadır. Bu sebeple biyokütle istenilen niceliği kazandırmak oldukça fazla enerji ve bunun yanı sıra maliyet gerektirmektedir. Örneğin; bir ton kömürün öğütülmesi için gerekli enerji miktarı 7 – 36 kW/h enerji gerektirirken, bir ton kavak ağacını öğütmek için 130 – 170 kW/h enerji gerekmektedir [154].

Torrefaksiyon prosesi biyokütlenin hücre yapılarının parçalanmasına ve paracıkların gevrek, pürüzsüz ve daha az lifli olmasına neden olur. Böylelikle biyokütle parçaları kırılğan hale gelir ve kömür yakma sistemlerinde kullanılmaya uygun olur [153].

7.5.2.1 Torrefaksiyon parametrelerinin öğütülebilirliğe etkisi

Sıcaklık, kalma zamanı, partikül boyutu gibi tüm torrefaksiyon proses parametreleri partiküllerin öğütülmesi için gereken enerjinin azaltılmasında rol oynamaktadır. Bu parametrelerin öğütülebilirlik üzerindeki büyüklüğü aşağıda sıralanmıştır;

Sıcaklık > Kalma Zamanı > Partikül Boyutu

Öğütülebilirlik üzerinde en etkili parametre sıcaklıktır. Torrefaksiyon proses sıcaklığı arttıkça oluşan ürünlerin öğütülebilirliği daha yüksek olduğundan, öğütme işlemi için gerekli enerji miktarı azalmaktadır.

7.5.3 Torrefaksiyon Prosesi Sonucunda Oluşan Ürünlerin Hidrofobikliği

Biyokütle higroskopik özelliğe sahiptir ve bu sebeple kurutmadan sonra nemli ortama bırakıldığında nem tutar ve nem yakıtta istenmeyen bir özelliktir. Bunun sebepleri:

1. Nem, yakıtın ısıl değerini düşürmekte ve bacadaki ısı kayıplarını da büyük ölçüde arttırmaktadır.

2. Biyokütlerde depolanan nem biyokütle üzerinde mantar gelişim potansiyelini arttırmaktadır.
3. Nem, yakıtın kullanımına herhangi bir katkıda bulunmazken, nakliye, taşıma ve besleme maliyetlerini arttırmaktadır.

Yukarıda sıralanan sebeplerden dolayı bir biyokütlerde nem ne kadar az olursa biyokütle nihai kullanım için o kadar uygun olmaktadır. Torrefaksiyon işlemi aşağıdaki yöntemlerle bu sorunlara çözüm getirmektedir.

1. Torrefaksiyon prosesinde ön işlem olan kurutma sırasında biyokütlerde %10-50 olan nem içeriği %1-5'e düşmektedir.
2. Torrefaksiyon işleminden sonra oluşan ürün hidrofobik özelliktedir.
3. Torrefaksiyon işleminden sonra elde edilen ürün hidrofobik özelliğinden dolayı biyolojik bozulmaya uğramadan depolamaya uygun hale gelir [110].

7.5.3.1 Torrefaksiyon prosesi sonucunda biyokütle nasıl hidrofobik özellik kazanır

Biyokütlerdeki hemiselüloz bileşeninin nem absorplama kapasitesi çok yüksektir. Bu bileşeni nem absorplama kapasitesi bakımından lignin ve selüloz takip etmektedir[155]. Torrefaksiyon prosesinde hemiselüloz, hemen hemen tamamıyla parçalanmakta ve biyokütle yapısından en yüksek nem tutma kapasitesine sahip bileşen uzaklaşmaktadır. Böylelikle biyokütlenin nem tutma kapasitesi azalmaktadır. Buna ek olarak ham biyokütle, bünyesinde su tutmak için hidrojen bağları oluşturan OH gruplarına sahiptir ve bu sebeple nemi kolayca absorplayabilmektedir. Torrefaksiyon prosesi sırasında bu OH grupları biyokütle yapısından uzaklaşmakta ve böylelikle de biyokütlenin nem tutma kapasitesi azalmaktadır.

7.5.4 Torrefaksiyon İşlemi Uygulanmış Biyokütle Tozlarının Patlama Olasılığı

Kömürde olduğu gibi özellikle kolay tutuşabilen malzemelerin taşınma ve nakliyesinde ince tozların patlaması büyük sorun teşkil etmektedir. Torrefaksiyon prosesi sonucunda elde edilen biyokütle kırılgan yapıdadır ve kullanımı sırasında kolayca tozlaşabilmektedir. Buna ek olarak, torrefaksiyon sonrasında elde edilen ürün yüksek reaktiviteye ve düşük nem içeriğine sahiptir ve bu sebeple kömürden daha kolay tutuşabilir; bu da torrefaksiyon uygulanmış biyokütlenin patlama potansiyelini artırmaktadır.

7.5.5 Torrefaksiyon İşlemi Uygulanmış Biyokütlenin Briketlenmesi

Ham biyokütle, enerji bakımından zayıf bir yakıttır. Bu sebeple, biyokütlenin nakliyesi ve depolanması birim kütle başına düşen enerji miktarı açısından pahalı olmaktadır. Bu olumsuz etkileri bertaraf etmenin ve enerji yoğunluğunu arttırmanın en kolay yolu elde edilen ürüne briketleme veya pelletleme uygulanmasıdır.

Torrefaksiyon işlemi uygulanmış bir biyokütlenin briketleme işlemi, tipik bir proste biyokütle torrefikasyon işlemine tabi tutulur, soğutulur, elde edilen biyokütle istenen boyutta öğütüldükten sonra ve basınç altında briketlenmesi prensibine dayanmaktadır. Briketleme prosesiyle ilgili ayrıntılı bilgi 4. Bölüm’de verilmiştir

Briketleme sonrası, torrefaksiyon uygulanmış ürünün, yoğunluğu, enerji yoğunluğu, hidrofobikliği artmakta ve ürün daha kolay depolanabilir ve taşınabilir hale gelmektedir. Çizelge 7.2’de ham biyokütle (BK), torrefaksiyon uygulanmış biyokütle (TBK), briketlenmiş ham biyokütle(BBK), torrefaksiyon uygulanarak briketlenmiş biyokütlenin (TBBK) bazı özellikleri verilmiş ve bu özellikler sub-bitümlü kömür verileri referans alınarak kömür ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 7.2 Briketlenmiş biyokütle, briketlenmemiş biyokütle ve kömürün kıyaslanması

	BK	BBK	TBK	TBBK	Kömür
Nemlilik (%)	35	8,5	3	3	15-25
Kütlesel Enerji Yoğunluğu (MJ/kg)	10,5	15,9	19,9	20,7	20,4
Hacimsel Enerji Yoğunluğu (GJ/m³)	5,8	9,2	4,6	16,6	26,6
Hacimsel Yoğunluk (kg/m³)	550	575	230	800	850

Çizelge 7.2’den de görüldüğü gibi briketleme işlemi nihai ürün üzerinde önemli etkilere sebep olmakta ve torrefaksiyon uygulanmış biyokütlenin briketlenmesiyle kömürle rekabet edebilir ürünler elde edilmesine olanak sağlamaktadır [156],[157].

7.6 Literatürde Torrefaksiyon Prosesi İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Chen ve arkadaşları 2011 yılında yaptıkları çalışmada biyokütle hammaddelerinin farklı sıcaklıklarda (230,260 ve 290°C), bir saat boyunca torrefaksiyon prosesi uygulanması sonucu bozunmalarını incelemişlerdir. Hammadde olarak selüloz, hemiselüloz, lignin, ksilen ve dextran kullanmışlardır. Hammaddelere uyguladıkları torrefaksiyon işlemiyle sıcaklığın, hammadde üzerindeki etkilerini incelemişler ve yapılan denemeler sonucunda 230°C'de hammaddenin yapısında bulunan nemin ve hafif uçucu bileşenlerin uzaklaştığını belirlemişlerdir. 260°C 'de hemiselülozun yapısının büyük bir kısmının bozunduğunu ve bu sıcaklıkta elde edilen ürünün çok düşük kütle verimine sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Bunlara ek olarak hammaddelerin birbirleriyle etkileşimini görmek amacıyla hammaddeleri harmanlayarak torrefaksiyon prosesine tabi tutmuşlar ve yapılan analizler sonucunda hammaddelerin herhangi bir sinerjik etki göstermediğini belirlemişlerdir [149].

Chen ve arkadaşları 2010 yılında yaptığı çalışmada dört farklı maddenin (bambu, hindistan cevizi kabuğu ve ağaç atıkları, söğüt ağacı) torrefaksiyon işlemine bağlı kütle kaybını ve lignoselülozik yapılar üzerinde torrefaksiyon işleminin etkilerini termogravimetrik analiz (TGA) yöntemi kullanarak incelemişlerdir. Hammaddeleri 60°C sıcaklıkta 24 saat süre boyunca kuruttuktan sonra iki farklı sıcaklıkta (240, 275°C) torrefaksiyon işlemi uygulamışlardır. 240°C sıcaklıkta yapılan torrefaksiyon işleminde, hemiselülozun büyük oranda bozunmaya uğradığı ancak lignin ve selülozun bu sıcaklıkta bozunmasının çok az gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir. 275°C sıcaklıkta gerçekleştirilen torrefaksiyon işlemi sırasında özellikle bambu ve söğütte hemiselülozun yanında selülozunda büyük bir kısmının parçalandığı gözlemlenmiş fakat bu sıcaklıkta çok fazla kütle kaybı olduğu için kütle veriminin düştüğü bu sebeple bu sıcaklığın yakıt üretimi için uygun bir sıcaklık olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda en iyi yakıt özelliği gösteren ürünün 1 saatten daha kısa sürelerde 240°C sıcaklıkta yapılan denemeler sonucunda elde edilebileceği ön görülmüştür [158].

Basu ve arkadaşlarının 2013 yılında yaptığı çalışmada farklı tanecik boyutunun ve çapının torrefaksiyon işlemi sonucu elde edilen ürün üzerindeki etkilerini incelenmişlerdir. Denemelerde çapları 13, 19, 25mm, uzunlukları 8-65 mm arasında değişen kavak ve meşe ağacı kullanılmış ve hammaddelere torrefaksiyon işlemi 250°C sıcaklıkta 1 saat

boyunca akışkan yatak bir reaktörde uygulanmıştır. Sonuçlar artan uzunlukla kütle ve enerji verimin arttığını ancak çaptaki artışın kütle ve enerji verimliliği üzerinde negatif etkileri olduğunu göstermiştir. Bunlara ek olarak sabit uzunlukta çap büyüdükçe parçacığın çekirdek sıcaklığının yükseldiğini ancak çap sabit bırakılmak suretiyle parçacık uzunluğu arttıkça çekirdek sıcaklığında bir değişim olmadığı sonucuna ulaşmışlardır [154].

Wang ve arkadaşlarının 2017 yılında yapmış oldukları çalışmada Norveç bölgesine ait ladin ağaçlarının kök, gövde ve kabuklarına borsal reaktörde torrefaksiyon işlemi uygulamışlardır. Yapılan çalışmada sıcaklığın ve kalma süresinin hammaddelerin öğütülebilirliği ve kimyasal özellikleri üzerinde etkileri araştırılmıştır. Kalma süresinin, sıcaklığa kıyasla elde edilen ürün üzerinde etkisinin daha az olduğunu ve elde edilen ürünlerin öğütülebilirliklerinin ham numunelere göre daha az öğütme enerjisi gerektirdiğini bunun yanında torrefaksiyon işleminin ağaç kabuklarının öğütülebilirliği üzerinde çok fazla etkiye sahip olmadığını belirlemişlerdir. 275°C sıcaklıkta yapılan torrefaksiyon işlemi sırasında gövde ve kök numunelerinin selüloz miktarındaki değişimin çok az olduğu bunun aksine ladin kabuklarının miktarının hızla azaldığını gözlemlemişlerdir [159].

Phanphanich ve Mani'nin 2011 yılında yapmış olduğu çalışmada çeşitli torrefaksiyon sıcaklıklarında çam yongalarının ve dallarının öğütülebilirliklerini, kütle ve enerji verimliliklerini incelemişlerdir. Torrefaksiyon sıcaklığı arttıkça kütle veriminin azaldığını ve 300°C de gerçekleştirilen torrefaksiyon işlemi ile kütle veriminin %50'ye düştüğünü göstermişlerdir. Aynı şekilde sıcaklık yükselmesine bağlı olarak enerji veriminin de %94 seviyelerinden %72 seviyelerine kadar düştüğünü gözlemlemişlerdir. Bunlara ek olarak torrefaksiyon prosesinin hammaddelerin öğütülebilirlikleri üzerinde olumlu etkilere sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır [155].

Uemure ve arkadaşları, 2011 yılında yaptıkları çalışmada palm yağı fabrikası atıklarına, sisteme %0-15 konsantrasyonunda oksijen besleyerek, sabit yatak boru tipi reaktörde, farklı sıcaklık ve tanecik boyutları kullanarak torrefaksiyon işlemi uygulamışlardır. Yapılan denemeler sonucunda elde edilen ürünlerin kütle veriminin artan sıcaklık ve oksijen konsantrasyonu ile azaldığını, kütle veriminin tanecik boyutundan etkilenmediğini gözlemlemişlerdir. Enerji veriminin artan sıcaklıkla ihmal edilebilecek

seviyede azaldığı sonucuna ulaşmışlar ve bunlara ek olarak oksidatif torrefaksiyon prosesinin torrefaksiyon ve oksidasyondan oluşan iki paralel tepkime ile gerçekleştiğini öngörmüşlerdir [160].

Yue ve arkadaşları 2017 yılında tatlı sorgum ve enerji sorgum bitkilerinin küspelerinin torrefaksiyon prosesi sonucunda ürün verimlerini ve kimyasal bileşimlerini belirlemek amacıyla üç farklı sıcaklıkta (250, 275 ve 300°C) 30 dakika zaman zarfında bu hammaddelere torrefaksiyon işlemi uygulamışlardır. Yapılan denemeler sonucunda katı ürün veriminin tatlı sorgum küspesi için %43-65 arasında, enerji sorgum küspesi için %51-70 arasında değişiklik gösterdiğini belirlemişlerdir. Bunun yanı sıra torrefaksiyon işlemi uygulanmış sorgum küspelerinin enerji yoğunluklarının 1,4 ila 1,6 kat arttığı ve proses sonucunda oluşan sıvı ürünlerin büyük bir kısmını suyun yanı sıra asetik asidin oluşturduğunu gözlemlemişlerdir [161].

Chen ve arkadaşlarının 2017 yılında yapmış oldukları çalışmada atık bambu çubuklarının katı kömür ile birlikte biyoyakıt olarak değerlendirilmesini araştırmak amacıyla inert ortamda (azot) boru tipi reaktör kullanılarak bambu atıklarına torrefaksiyon prosesi uygulamışlardır. Kömür ve odun briketlerinin karakterizasyonu belirlemek amacıyla briketlerin kısa ve elementel analizlerini yapmışlar ve bunun yanı sıra kuru bazda ısı değerlerini belirlemişlerdir. Yapılan denemeler sonucunda bambu çubuklarına 270°C sıcaklıkta 40 dakika süreyle torrefaksiyon işlemi uygulanması sonucunda elde edilen ürünün kütle veriminin %69 olduğu, ısı değeri ise 19,31 Mj/kg'dan 23,04 Mj/kg'a yükseldiğini gözlemlemişlerdir. Bunun yanı sıra torrefaksiyon işlemi uygulandıktan sonra hazırlanan bambu briketlerinin yüzey hidrofobik özelliğinin değişmesi nedeniyle depolanmasının, taşınmasının ve işlenmesinin kolaylaştığı ve biyolojik bozunmaya karşı direnç kazandığını belirlemişlerdir. Bambu atıklarına torrefaksiyon prosesi uygulanması sonucu elde edilen ürünün kömür yakma sistemlerinde kömürle birlikte yanma için alternatif bir yakıt olabileceğini öngörmüşlerdir [162].

DENEYSEL TASARIM

Deneyisel tasarım sistemlerinin amacı bir sistemin optimum parametrelerinin belirlenmesi için gerekli süre ve bütçeden tasarruf edilmesini sağlamaktır. Üretim ya da kalite kontrolde proses ya da prosesi etkileyen kaynaklarla ilgili mümkün olduğunca çok bilgi sahibi olmak gerekmektedir. Mühendislik açısından bakıldığında deneyisel çalışmalar aşağıdaki amaçlar için kullanılmaktadır.

- Tasarım süresini azaltmak / yeni ürün ya da proses geliştirmek
- Mevcut proseslerin performansını arttırmak
- Ürünlerin performansını ve güvenilirliğini arttırmak
- Ürün ve proseslerin dayanımını üst seviyede tutmak
- Sistem parametreleri ve bileşen etkilerini ayarlayarak malzeme, tasarım alternatiflerinin değerlendirilmesini gerçekleştirmek [163].

Günümüzde kullanılan birçok deneyisel tasarım yöntemi olmasına rağmen, doğrusal olmayan sistemlerin optimizasyonunda cevap yüzeyi deneyisel tasarımı en etkili tasarım yöntemidir.

8.1 Cevap Yüzeyleri

Cevap yüzeyi yöntemi, parametrelerin (bağımsız değişken) değerlerinin cevap değişkeni üzerindeki etkisini belirlemek ve parametrelerin kombinasyonları arasından cevap değişkenini maksimum ya da minimum yapan değeri bulmak için kullanılır. Yani kısaca

bu yöntem de parametrelerin tek başına ya da kombinasyonlarının cevap üzerindeki etkileri araştırılır.

Bağımsız değişkenler, deneyi yapan kişi tarafından kontrol edilebilen değerlerdir ve bu değerler genellikle gübre tipi, cinsiyet gibi nitel veya sıcaklık, gübre miktarı gibi nicel değişkenlerdir [164].

8.1.1 Cevap Yüzeyi Tasarımları:

Cevap yüzeyi yöntemi için birçok özel tasarımlar üzerinde çalışılmıştır. Bu tasarımlar diklik ve dönersellik (rotatable) özellikleri taşıdıkları takdirde cevap yüzeyi problemlerin çözümünde daha sağlıklı çözümler üretmektedirler. [165].

8.1.1.1 Dönersel Tasarımlar Ve Özellikleri:

Deneyi yapan ve tasarlayan kişiler tasarım uzayında başlangıç noktalarının ve optimum noktaların nerelerde olduğunu tasarımın başında bilemezler. Ancak merkezden belli uzaklıktaki noktalar deney noktaları olarak alınabilmektedir ve bu noktalar üç boyutlu uzayda bir küre üzerinde bulunmaktadır. Bu tür hazırlanmış tasarımlara dönersel tasarımlar denir.

Tasarımın dönersellik yapısına sahip olmasının amacı varyansın tutarlılığının sağlanmasıdır. Tasarımda dönersellik özelliği tasarım parametrelerinin seçimi için çok önemli bir katkı sağlamaktadır [166].

Merkezi kompozit tasarımlar ve Box - Behnken tasarımları dönersellik özelliğini sağlayan ve en çok kullanılan önemli tasarımlardır.

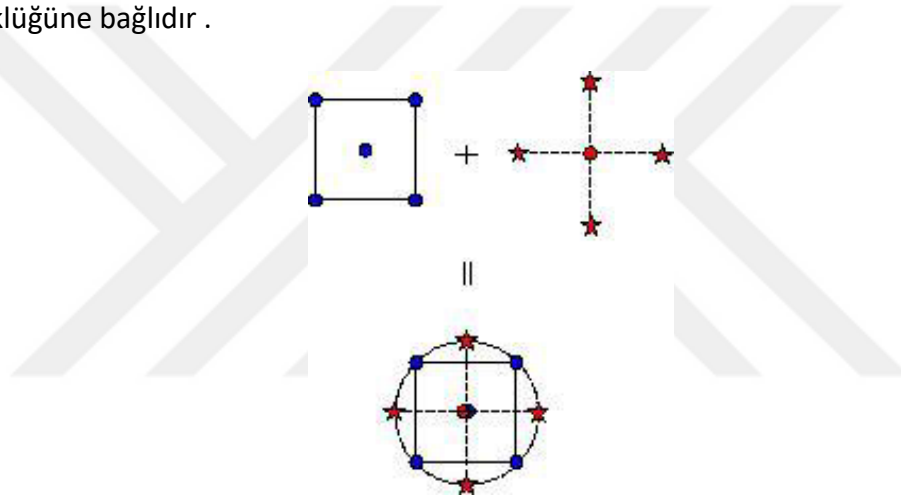
8.2 Merkezi Kompozit Tasarım

Merkezi kompozit tasarım ikinci dereceden en çok başvurulmuş tasarımlardan bir tanesidir ve merkez noktalı faktöriyel ve kesirli faktöriyel tasarımla başlayan ve eğriliği tahmin etmek için yıldız noktaları ekleyen bir deney tasarım yöntemidir. Bu tasarım ilk olarak 1951 yılında Box ve Wilson tarafından literatüre girmiştir [165], [166] .

Tasarımda kullanılan üç farklı deneme noktası bulunmaktadır. Bunlar merkez noktası, faktöriyel nokta ve yıldız noktasıdır. Tasarımda kullanılan bu üç farklı deneme noktasının

$(2k, 2^k, n_c)$ kendine özel ve önemli rolleri bulunmaktadır. Merkezi denemeler hatanın tanımlanması için gerekmektedir ve ikinci dereceden terimlerin tahmini için bilgileri sağlar. Yıldız noktaları, tasarımdaki her faktör için en yüksek ve en düşük değerleri belirtir.

Tasarım alanının merkezinden faktöriyel bir noktaya olan uzaklık her faktör için ± 1 birim ise, tasarım alanının merkezinden yıldız noktasına olan uzaklık $|a| > 1$ 'dir (Şekil 8.1). Tasarımın belli özellikleri ve faktörlerin sayısı 'a'nın kesin değerini belirler [172]. Merkezi bileşik tasarımların esneklik alanlarının bulunması a değerinin yani eksen uzunluğunun seçimine ve merkezi deneme sayısına n_c bağlıdır. Bu iki parametrenin seçimi tasarım için çok önemlidir. a değerinin seçimi, çözüm için ilgilenilen alan ile kullanılan alanın büyüklüğüne bağlıdır .



Şekil 8.1 İki faktör için merkezi bileşik tasarım üretimi

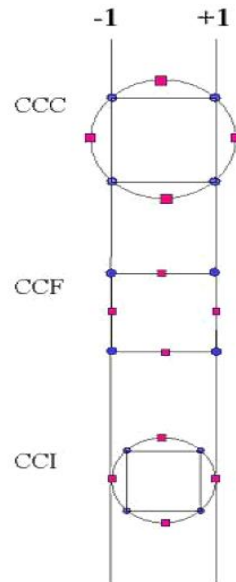
Bu tasarımın en önemli avantajı yeni bir deney tasarımına gerek duymadan, sadece yeni eksen ve merkez noktalarının eklenmesiyle yeni tasarımın elde edilmesidir. Merkezi bileşik tasarımlarında oluşturulacak model denkleminde birinci derece terimler (x), ikinci derece terimler (x^2) ve iki etkenli etkileşim terimleri ($x*y$) bulunabilmektedir. Merkezi denemeler, tasarımın eğiminin bulunması için bilgileri sağlamaktadır. Eğer sistemde bir eğim söz konusu olursa, ilave eksen noktaları ikinci dereceden terimlerin daha etkin bir biçimde tahmin edilmesini sağlar.

Merkezi kompozit tasarımın, çevrelenmiş tasarım (CCC), içe çizilmiş tasarım (CCI) ve yüz merkezli tasarım (CCF) olmak üzere üç farklı tipi bulunmaktadır ve bu tasarım tiplerine ait özellikler Çizelge 8,1'de verilmiştir.

Çizelge 8.1 Merkezi kompozit tasarım tipleri [172]

Merkezi kompozit tasarım tipi	Terminoloji	Yorumlar
Çevrelenmiş tasarım	CCC	CCC tasarım, merkez bileşik tasarımın orijinal halidir. Yıldız noktalar, merkezden a kadar uzaklıkta, istenilen tasarım özelliklerine ve tasarım faktör sayısına bağlı belirlenen noktalar. Yıldız noktalar tüm faktörler için yeni ekstrem noktalar belirler. Bu deney tasarımı için 5 seviye gerekmektedir.
İçe çizilmiş tasarım	CCI	Bir CCI tasarımı, her faktörle birlikte ölçeklendirilmiş ve CCC tasarımının "a" ya bölünmesi ile elde edilmiş bir tasarımdır. Bu deney tasarımı da her bir faktör için 5 seviye gerektirmektedir.
Yüz merkezli tasarım	CCF	Bu tasarımda yıldız noktalar faktöriyel boşluktaki her bir yüzeyin merkezindedir, yani $a = \pm 1$ 'dir. Bu deney tasarımı için her bir faktörden 3 seviye gerekmektedir.

Şekil 8.2'de 3 farklı merkezi bileşik tasarım tipinin 2 faktörlü tasarımının görsel hali verilmiştir ve Şekil 8.2'den en kapsamlı prosese sahip olan tasarım yönteminin CCC olduğu ve en dar kapsamlı tasarım yönteminin ise CCI olduğu görülmektedir. CCC ve CCI tasarımları dönebilen tasarımlardır. CCC tasarımında, tasarım noktaları, faktöriyel kare alanında sınırlanmış bir daireyi tanımlamaktadır. Bunun yanı sıra CCC tasarım noktaları, üç faktör için faktöriyel küpün çevresindeki bir daireyi tanımlamaktadır [167].



Şekil 8.2 Merkezi kompozit tasarımın 3 tipinin karşılaştırılması

Bu çalışmada briketleme ve torrefaksiyon denemelerinin deneysel tasarımı, Design Expert yazılım programı kullanılarak merkezi kompozit tasarım yöntemi ile yapılmış ve bu kapsamda yapılacak denemeler için gerekli deney planı oluşturulmuştur.



DENEYSEL ÇALIŞMALAR

9.1 Deneylerde Kullanılan Hammadde ve Katkı Maddeleri

Bu çalışmanın ilk aşamasında, düşük ısı değere, yüksek kül, kükürt ve nem içeriğine sahip linyit kömürünün, katkı maddesi olarak farklı biyokütleler (çay atığı, fındık kabuğu, sığır kuruğu ve geven bitkisi) ve bağlayıcı madde (ağaç reçinesi) kullanılarak bu özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla briketleme denemeleri yapılmıştır.

Briketleme denemelerinde kullanılan linyit kömürü Manisa'nın Soma İlçesinde bulunan Soma Kömür A.Ş.'nin Eynez maden sahasından temin edilmiştir.

Çalışmada biyokütle olarak kullanılan çay atıkları, Giresun'un Tirebolu ilçesinde bulunan ÇAYKUR'a ait çay fabrikasından, fındık kabuğu, yine Giresun'un Tirebolu ilçesinden, sığır kuruğu ve geven bitkisi Erzurum'dan temin edilmiştir.

Briketleme çalışmalarında katkı maddesi olarak biyokütle kullanılmasının sebebi biyokütlelerin her birinin kül miktarının linyit kömürüne kıyasla daha düşük, ısı değerlerinin ve bağlayıcılık özelliklerinin ise diğer biyokütlere kıyasla nispeten daha yüksek olmasıdır.

Bu çalışmada çay atığı ve fındık kabuğunun katkı maddesi olarak kullanılmasının sebebi çay ve fındık üretimi sonrasında oluşan enerji içeriği yüksek bu atıkların doğrudan yakma sistemlerinde kullanılması sırasında çok hızlı yanmaları sonucunda enerjinin büyük bir kısmının baca gazlarıyla dışarı atılmasıdır. Buna ek olarak bu atıkların düşük dökme

yoğunluğuna sahip olmalarından kaynaklı depolama ve taşıma maliyetlerinin yüksek olmasıdır.

Briketleme çalışmalarında sığır kuruğu ve geven bitkisinin kullanılmasının sebebi ise bu bitkilerin Türkiye’de oldukça fazla miktarda yetişmesi ve bunun yanı sıra bu bitkilerin bir kısmının halk tarafından yakacak olarak kullanılmasına rağmen büyük bir kısmının anız olarak yakılarak bertaraf edilmesi ve ayrıca enerji bitkisi olarak kullanılması üzerinde herhangi bir çalışma bulunmamasıdır.

Briketleme çalışmalarında bağlayıcı madde olarak reçine kullanılmasının sebebi reçinenin doğal bir bağlayıcı olması ve yüzey aktif madde olarak geniş bir kullanım aralığının bulunmasıdır. Bunun yanı sıra reçinenin karbon ve hidrojen içeriğinin yüksek olmasının elde edilen briketler üzerinde olumlu etkilere sebep olacağı düşünülmektedir. Ayrıca kolay tutuşabilir özellikte olmasının briketlerin yanma özelliklerine, yüksek hidrofobik yapıda olmasının ise briketlerin suya dayanımı üzerine ve yüksek bağlayıcılık özelliğine sahip olması sebebiyle briketlerin fiziksel sağlamlığı üzerinde önemli katkılarda bulunacağı ön görülmüştür.

Briketleme çalışmalarında reçine Merck Marka %99’luk asetik asit çözeltisinde hidroliz edilerek kullanılmıştır. Bunun sebebi reçinenin asetik asit içerisinde çözünebilme özelliğine sahip olmasının yanı sıra asetik asidin biyokütlelerin yapısında bulunan ve bağlayıcılık özelliği yüksek olan hemiselüloz, lignin gibi polimerlerin yapısının bozularak bağlayıcılık özelliklerinin artmasını sağlamasıdır. Bu sayede asetik asit kullanımının elde edilen briketlerin fiziksel dayanımları üzerinde etkili olacağı ön görülmektedir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise briketleme çalışmalarında kullanılan biyokütleler ve bunlara ek olarak elma dallarına torrefaksiyon işlemi uygulanmıştır.

Torrefaksiyon prosesi sırasında diğer biyokütlelerin yanı sıra kullanılan elma dalları Isparta bölgesinden temin edilmiştir. Briketleme çalışmalarında kullanılan biyokütlelere ek olarak torrefaksiyon çalışmasında elma dallarının kullanılmasının bir sebebi torrefaksiyon prosesinin otsu biyokütlelerin yanı sıra odunsu biyokütlelere etkisini belirlemektir. Bunun yanı sıra diğer bir sebebi ise elma ağaçlarının budanması sonucunda Isparta bölgesinde büyük miktarda elma dalı atığı oluşması ve oluşan bu atıkların büyük bir kısmının köy meydanlarında anız olarak yakılarak enerji içeriği yüksek bir biyokütle

türünün bilinçsiz olarak kullanılmamasıdır. Ayrıca yapılan literatür taramalarında birçok odunsu biyokütle torrefaksiyon prosesinin uygulanmasına rağmen elma saplarına yapılmış herhangi bir torrefaksiyon prosesinin bulunmadığı belirlenmiştir..

9.2 Kömür ve Katkı Maddelerine Uygulanan Ön İşlemler

Türkiye'nin belli bölgelerinden temin edilen kömür ve biyokütleler denemelerden önce çeşitli ön işlemlerden geçirilmiştir ve bu ön işlemler öğütme ve kullanılan tüm maddelerin farklı tanecik boyutlarında fraksiyonlarına ayrılmasını kapsamaktadır. Ön işlemler kapsamında yapılan öğütme işlemi IKA A11 Basic marka model öğütme cihazı (Şekil 9.1) kullanılarak yapılmış ve denemelerde kullanılan tüm maddeler 1- 5 mm tanecik boyutu arasına öğütülmüştür. Fraksiyonlara ayırma işlemi ise FRITSCH marka (Şekil 9.2) elek sarsma cihazı kullanılarak farklı çaplardaki uygun elekler kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 9.1 IKA A11 Basic öğütme cihazı



Şekil 9.2 Elek Sarsma cihazı

Öğütülüp, elenerek fraksiyonlarına ayrılan kömür ve biyokütlelerin karakterizasyonları yapılarak briketleme ve torrefaksiyon proseslerinde kullanılmıştır.

9.3 Kömür ve Katkı Maddelerinin Karakterizasyonu

Hammadde ve katkı maddelerinin briketleme işleminden önce karakterizasyonlarının yapılması amacıyla hammaddenin ve katkı maddelerinin nem miktarı, kül miktarı, uçucu madde miktarı, ısı değeri analizi, lignin, hemiselüloz değerleri belirlenmiştir.

9.3.1 Kömür ve Katkı Maddelerinin Nem Miktarı Analizi

Linyit kömürün nem analizi ASTM D 3173-87 standardına göre yapılmış olup bu standart kapsamında 250 µm altındaki 1 gram linyit kömürü numunesi 105°C sıcaklıkta 1 saat 5 dakika bekletilmiş, bu süre sonunda oda sıcaklığına gelinceye kadar desikatörde bekletilerek soğutulmuş ve tartım alınmıştır [168]. Bu işleme linyit kömürü numunesi sabit tartıma gelinceye kadar devam edilmiştir. Linyit kömürünün % nem miktarı eşitlik 9.1 kullanılarak belirlenmiştir.

$$\% Nem = \frac{W1-W2}{W1} * 100 \quad (9.1)$$

Eşitlikte kullanılan kısaltmaların açıklamaları aşağıda verilmiştir.

W1= Başlangıç linyit kömürü miktarını (g)

W2= Nemi uzaklaştırılmış linyit kömürü miktarını (g)

Katkı maddelerinin nem analizi ise ASTM D 4442-16 standardı kapsamında yapılmış olup , bu standart kapsamında 250 µm tanecik boyutu altına öğütülmüş 1 gr katkı maddesi numunesi 103±2°C etüvde 3 saat bekletilmiştir. Etüvden alınan numune oda sıcaklığına kadar soğutulup tartımı alındıktan sonra numune tekrar aynı sıcaklıktaki etüvde 1 saat 5 dakika bekletilmiştir. Numune oda sıcaklığına soğutulduktan sonra tekrar tartımı alınmış ve numune sabit tartıma gelinceye kadar bu işleme devam edilmiştir [169]. Analiz sonucunda katkı maddelerinin nem miktarları eşitlik 9.2 kullanılarak belirlenmiştir.

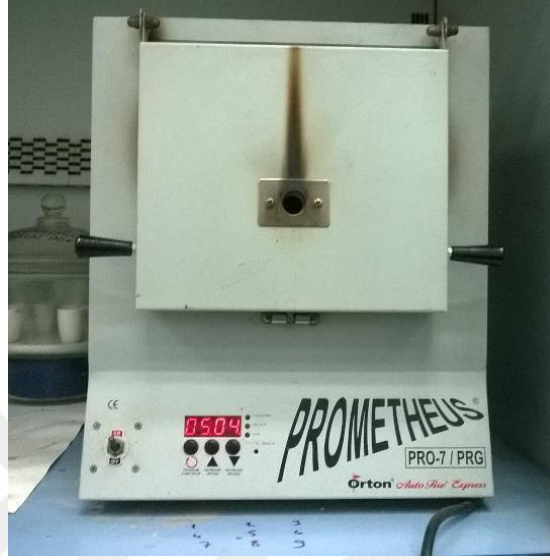
$$\% Nem = \frac{w1-w2}{w1} * 100 \quad (9.2)$$

w1= Başlangıç katkı maddesi miktarı (g)

w2= Nemi uzaklaştırılmış katkı maddesi miktarı (g)

9.3.2 Kömür ve Katkı Maddelerinin Kül Miktarları Analizleri

Kömürün kül miktarının belirlenmesi ASTM D3174-12, hammaddelerin kül analizi ise ASTM-D1102-84 standardı kapsamında Prometheus PRO- 7 marka model (Şekil 9.3) kül fırını kullanılarak yapılmıştır [170],[171].



Şekil 9.3 Kül analizinde kullanılan kül fırını

ASTM D3174-12 standardı kapsamında linyit kömürünün kül miktarı belirleme çalışmalarında 0,25 mm'ye elenmiş ve sabit tartıma kadar kurutulmuş 1 gram linyit kömürü numunesi fırın soğuk iken kroze içerisinde fırına konulmuştur. İlk adımda fırın sıcaklığının 1 saatte 500°C'ye ulaşması sağlanmış ikinci adımda 500°C'de olan fırın sıcaklığı 1 saatte bu sıcaklıktan 750°C'ye yükseltilmiş ve son olarak 750°C olan fırın sıcaklığı 1 saatte 950°C'ye yükseltilmiş ve linyit kömürü bu sıcaklıkta 4 saat yakılmıştır. Yakma işlemi sonrasında fırından alınan numune desikatörde oda sıcaklığına kadar soğutulmuş ve tartım alınmıştır. Linyit kömürünün kül miktarı yüzdesi eşitlik 9.3 kullanılarak belirlenmiştir [170]

$$\% \text{ Kül} = \frac{W_3 - W_4}{W_5} * 100 \quad (9.3)$$

W_3 = Kül analizi öncesi kroze+numune miktarı (g)

W_4 =Kül analizi sonrası kroze+numune miktarı (g)

W_5 = Başlangıç kömür numunesi miktarı (g)

ASTM-D1102-84 standardı kapsamında katkı maddelerinin kül miktarının belirlenmesi çalışmalarında 425µm tanecik boyutunda sabit tartıma kadar kurutulmuş katkı maddeleri kullanılmıştır. 2 gram katkı maddesi yaklaşık 6 saat boyunca 600°C kül fırında bekletilmiş, bu süre sonunda oda sıcaklığına kadar desikatörde soğutulup tartım alınmıştır. Numune 600°C’de 30 dakika tekrar yakılmış, desikatörde soğutulmuş ve tartım alınmıştır. Bu işlem numune sabit tartıma gelene kadar tekrarlanmıştır. Analiz sonucunda elde edilen katkı maddelerinin kül miktarı eşitlik 9.4 kullanılarak belirlenmiştir.

$$\% \text{ Kül} = \frac{w_3 - w_4}{w_5} * 100 \quad (9.4)$$

w_3 = Kül analizi öncesi kroze+numune miktarı (g)

w_4 =Kül analizi sonrası kroze+numune miktarı (g)

w_5 = Başlangıç katkı maddesi miktarı (g)

9.3.3 Kömür ve Katkı Maddelerinin Uçucu Madde Miktarlarının Belirlenmesi

Kömürün uçucu madde miktarının belirlenmesi ASTM D5142-02a standardı kapsamında, katkı maddelerinin uçucu madde analizi ise ASTM E872-82 standardı kapsamında yapılmıştır [172], [173]. Bu standartlar kapsamında nemi uzaklaştırılmış 1 g numune tartımı alınmış kroze konulur, içerisinde numune bulunan kroze, 950°C’ye ısıtılmış inert atmosferdeki (azot) fırın içerisine yerleştirilir ve 7 dakika bu sıcaklıkta bekletilir. Fırından alınan numune desikatörde soğutulur ve tartım alınır. Analiz sonucunda uçucu madde miktarı eşitlik 9.5 kullanılarak belirlenir.

$$\% \text{ Uçucu Madde} = \frac{W_6 - W_7}{W_8} * 100 \quad (9.5)$$

W_6 =Başlangıç kroze+numune tartımı(g)

W_7 =Analiz sonrası kroze+numune tartımı (g)

W_8 =Başlangıç numune miktarı (g)

9.3.4 Kömür ve Katkı Maddelerinin Isıl Değer Analizleri

Kömürün ve katkı maddelerinin ısı değer analizleri İKA C 4000 marka model adyabatik kalorimetre bombası (Şekil 9.4) kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 9.4 İKA C-4000 Marka Model Kalorimetre Cihazı

İKA C4000 marka kalorimetre bombası kullanılarak yapılan ısı değer analizlerinde 1 g numune kullanılmıştır. Analiz sonrasında ısı değer eşitlik 9.6 kullanılarak belirlenmiştir.

$$Q = \frac{C*(\Delta T) - (Q_f)}{W_9} \quad (9.6)$$

Q=numunelerin ısı değeri (J/g)

C=Kalorimetre sisteminin ısı kapasitesi (J/K)

ΔT =Cihazın ilk ve ikici sinyali arasındaki sıcaklık farkı (K)

Qf=Diğer tüm enerjilerin toplamı (J)

W₉=Numune miktarı (g)

9.3.5 Katkı Maddelerinin Ekstraktif Madde Analizi

Katkı maddelerinin ekstraktif madde analizi TAPPI T 204cm-97 standardı kapsamında yapılmıştır. Bu standart kapsamında ekstraktif madde analizinde 3 farklı çözücü kullanılabilir. Bunlar diklorometan, aseton ve etanol/benzen çözücüleridir. Bu çözücüler içerisinde etanol/benzen karışımı, düşük molekül ağırlıklı karbonhidrat ve polifenoller çözme kapasitesinden dolayı en iyi sonucu vermektedir. Bu sebeple bu çalışmada ekstraktif madde analizleri 2:1 etanol/benzen karışımı kullanılarak yapılmıştır.

Bu standarda göre kurutulmuş biyokütle örneği üzerine etanol/benzen karışımı eklenerek örnek 4-5 saat soxhlet ekstraksiyonuna tabi tutulmuştur. Ekstraksiyon sonrasında kalan kalıntı havada kurutulduktan sonra sabit tartıma gelinceye kadar $105\pm5^{\circ}\text{C}$ 'de etüvde kurutulmuştur. Numune desikatörde soğutularak tartım alınmış ve ekstraktif madde yüzdesi 9.7 numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır [174].

$$\text{Ekstraktif madde yüzdesi}(\text{wt}\%, d) = \frac{G_0 - G_1}{G_0} * 100 \quad (9.7)$$

G_0 =Başlangıç numune miktarı (g)

G_1 = Ekstraktif madde analizi sonrası kurutulmuş numune miktarı (g)

9.3.5.1 Katkı maddelerinin hemiselüloz miktarının belirlenmesi

Katkı maddelerinin hemiselüloz analizi Shiguang Li ve arkadaşlarının (2003) yapmış olduğu çalışmadaki yöntem kullanılarak yapılmıştır [175]. Bu kapsamda ekstraktif madde analizinden kalan kalıntı balona konulmuş, üzerine NaOH çözeltisi (20g/L) konularak. 3,5 saat boyuna geri soğutucu altında kaynatılmıştır ve çözelti süzölmüştür. Na^+ iyonu kalmayınca kadar kalıntı yıkanmış ve sabit tartıma gelinceye kadar kurutulmuştur. Desikatörde oda sıcaklığına soğutulmuş ve tartım alınmıştır. Hemiselüloz miktarı 9.8 numaralı denklik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Hemiselüloz yüzdesi}(\text{wt}\%, d) = \frac{G_1 - G_2}{G_0} * 100 \quad (9.8)$$

G_0 = başlangıç numune miktarı (g)

G_1 =Ekstraktif madde analizinden sonra kalan kalıntı (g)

G_2 =Hemiselüloz analizinden sonra kalan kalıntı (g)

9.3.5.2 Lignin Miktarlarının belirlenmesi

Katkı maddelerinin lignin analizi Shiguang Li ve arkadaşlarının (2003) yapmış olduğu çalışmadaki yöntem kullanılarak yapılmıştır [180]. Bu yöntemle göre 15 ml %72'lik H_2SO_4 çözeltisi ekstraktif madde analizinden kalan 1 g kalıntının üzerine eklenir, 1 dakika karıştırılır. Karışım $18-20^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 2 saat bekletilir. H_2SO_4 çözeltisinin konsantrasyonu %3 'e düşürülecek şekilde karışımın üzerine saf su eklenir. 4 saat geri soğutucu altında kaynatılır. Numune süzgeç kâğıdından süzülerek 500 ml sıcak saf su kullanılarak yıkanır.

Sabit tartıma gelinceye kadar kurutulur, desikatörde soğutulduktan sonra tartım alınır. Lignin miktarı eşitlik 9.9 kullanılarak hesaplanır [175].

$$\text{Lignin yüzdesi (wt\%, d)} = \frac{G_4(1-A_1)}{G_3} * 100 \quad (9.9)$$

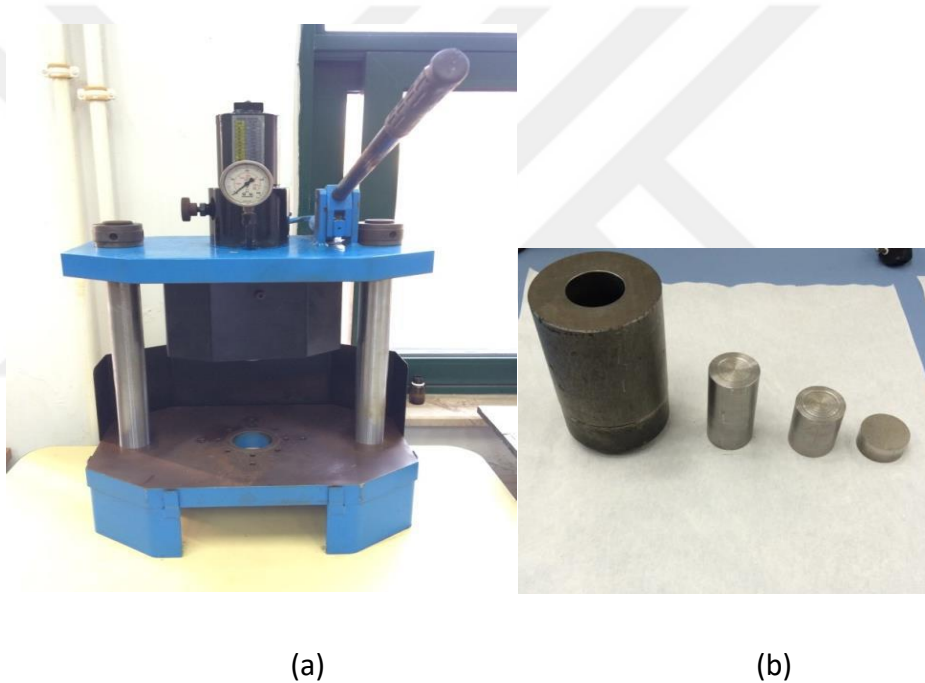
G_3 = Lignin analizinde kullanılan başlangıç numune miktarı (g)

G_4 = Lignin analizi sonucunda kalan kalıntı miktarı (g)

A_1 =Ekstraktif madde miktarı

9.4 Kömürün Briketlenmesi Prosesi

Briketleme çalışmalarında Hakverdi CNC & Torna firması tarafından üretilmiş manuel hidrolik pres ve 40 mm çapında silindirik pres kalıbı kullanılmıştır (Şekil 9.5 a ve b).



Şekil 9.5 (a) Pres makinesi (b) Pres makinesi kalıpları

Briketleme çalışmalarında izlenen deneysel işlem basamakları detaylı olarak sırasıyla aşağıda verilmiştir.

- **Kömür-Biyokütle karışımının hazırlanması:** Farklı oranlarda (0-100) linyit kömürü ve biyokütle atıkları içeren 18,2 g karışım ile, briketleme işlemi prosesinde bağlayıcı olarak kullanılan 1,2 gram reçine, 0,6 g asetik asit ile çözüldükten sonra karıştırılmıştır. Bu sayede her briketin toplam kütlesinin 20 g olması sağlanmıştır. Elde edilen karışım yaklaşık 15 dakika boyunca karıştırılarak bağlayıcının ve biyokütlenin kömür ile

homojen olarak karışması sağlanmıştır. Aynı zamanda bu süre zarfında asetik asitin biyokütlenin yapısında bulunan polimer özellikli yapıların bağlayıcı özellik kazanmasına olanak sağlanmıştır.

- **Briketleme İşlemi:** Kömürün, katkı maddelerinin ve bağlayıcının karıştırma işlemi sonrasında briketleme aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada bulamaç halindeki karışım doğrudan olarak kalıp içerisine dökülerek pres içerisine yerleştirilmiştir. Hidrolik preste kalıba farklı presleme basınçları (5-25MPa) uygulanmış ve silindirik şekilde briketler elde edilmiştir (Şekil 9.6).



Şekil 9.6 Briketleme işlemi sonrasında elde edilen briket örnekleri

- **Briketlerin Kurutulması:** Briketleme işlemi sonrasında elde edilen briketler 48 saat boyunca atmosferik şartlarda kurutulmuştur.

Kurutma işleminden sonra elde edilen briketlerin karakterizasyonunun belirlenmesi amacıyla briketlere kimyasal ve fiziksel analizler uygulanmıştır.

9.5 Briketlerin Karakterizasyonu

9.5.1 Briketlere Uygulanan Kimyasal Testler

Briketleme çalışmaları sonrasında elde edilen briketler nem miktarı, kül miktarı ve ısı değeri analizleri yapılmıştır. %100 kömür ve farklı oranlarda kömür biyokütle karışımı içeren briketlerin kimyasal analizleri Bölüm 9.3'te verilmiş olan kömüre ve katkı maddelerine uygulanan karakterizasyonu çalışmaları kapsamında kömüre uygulanan standartlar kullanılarak yapılırken, %100 biyokütle içeren briketlerin kimyasal analizleri katkı maddelerine uygulanan standartlar kullanılarak yapılmıştır.

9.5.2 Briketlere Uygulanan Fiziksel Testler

9.5.2.1 Briketlerin Shatter İndeksinin (Düşme Sağlamlığının) Belirlenmesi

Briketlerin Shatter İndeksi testi briketlerin fiziksel dayanımını belirlemede kullanılan etkili yöntemdir ve briketlere uygulanan Shatter İndeksi testi Tembe ve arkadaşlarının 2014 yılında yapmış olduğu çalışmadaki yöntem kullanılarak yapılmıştır. Bu yöntem doğrultusunda elde edilen kömür biyokütle karışımı briketlerin ağırlıkları belirlendikten sonra 2 m yükseklikten düz bir levha üzerine bırakılmış ve analiz sonucunda elde edilen briketler elek analizine tabi tutulmuştur. Elek analizi sonucunda 40 mm'lik elek üzerinde kalan briket kütlesi belirlenmiştir. Briketlerin Shatter İndeksi eşitlik 9.10 ve 9.11 kullanılarak belirlenmiştir [176].

$$\text{Ağırlık kaybı}(wt\%, d) = \frac{A_2 - A_3}{A_2} * 100 \quad (9.10)$$

$$\text{Shatter İndeksi} = 100 - \% \text{Ağırlık kaybı} \quad (9.11)$$

A_2 =Shatter İndeksi öncesi briket kütlesi (g)

A_3 =Shatter İndeksi sonrası briket kütlesi (g)

9.5.2.2 Briketlerin Suya Dayanımının Belirlenmesi

Briketlerin suya dayanımını her bir briket numunesi içerisinde 100 ml su bulunan bir kap içerisine bırakılmaları ve suda dağılmaları arasındaki sürenin belirlenmesi ile bulunmuştur.

9.6 Biyokütlelere Torrefaksiyon Prosesinin Uygulanması

Ön işlem uygulanmış katkı maddelerine torrefaksiyon işlemi Şekil 9.3'te verilmiş olan Prometheus PRO- 7 marka model kül fırını kullanılarak yapılmıştır. Katkı maddelerine torrefaksiyon prosesi, farklı sıcaklık değerlerinde (150-350°C), tanecik boyutlarında (1-5 mm) ve kalma süreleri (10-50 dk) kullanarak inert ortamda uygulanmıştır. İnert ortam, fırın kapağı üzerinde bulunan boşluktan fırın içerisine azot gazı gönderilerek sağlanmıştır.

Torrefaksiyon prosesi sonrasında elde edilen ürünlerin ısı değerleri, kütle ve enerji verimlilikleri belirlenmiştir. Elde edilen ürünlerin ısı değerleri Bölüm 9.3 te verilmiş olan katkı maddelerinin ısı değer analizinde kullanılan yöntem kapsamında yapılmıştır.

9.7 Torrefaksiyon Sonucunda Elde Edilen Ürünlerin Karakterizasyonu

9.7.1 Kütle Verimliliğinin Belirlenmesi

Kütle verimi, torrefaksiyon işlemi sonucunda oluşan katı ürün veriminin bir ölçüsüdür. Torrefaksiyon işlemi sonucunda elde edilen ürünün kütle verimliliği üç farklı şekilde belirlenebilmektedir. Bunlar kurutulmamış ham kütle baz alınarak hesaplanan kütle verimliliği, kuru bazda kütle verimliliği ve kuru-külsüz kütle baz alınarak belirlenen kütle verimliliği hesabıdır. Her bir yöntemin temeli torrefaksiyon işlemi sonucunda elde edilen ürün kütlesinin, orijinal ürün kütlesine oranlanmasına dayanmaktadır ve bu yöntemlerin içerisinde en pratik yöntem kurutulmamış ham kütle baz alınarak kütle verimliliği hesabıdır.

Bu çalışmada torrefaksiyon işlemi sonrasında elde edilen ürünlere, kurutulmamış ham kütle baz alınarak, kütle verimliliği hesabı, eşitlik 9.12 kullanılarak yapılmıştır.

$$\text{Kütle verimliliği}(wt\%, d) = \frac{\text{Torrefaksiyon işlemi sonrası ürün kütlesi}}{\text{Torrefaksiyon işlemi öncesi ham ürün kütlesi}} * 100 \quad (9.12)$$

9.7.2 Enerji Verimliliğinin Belirlenmesi

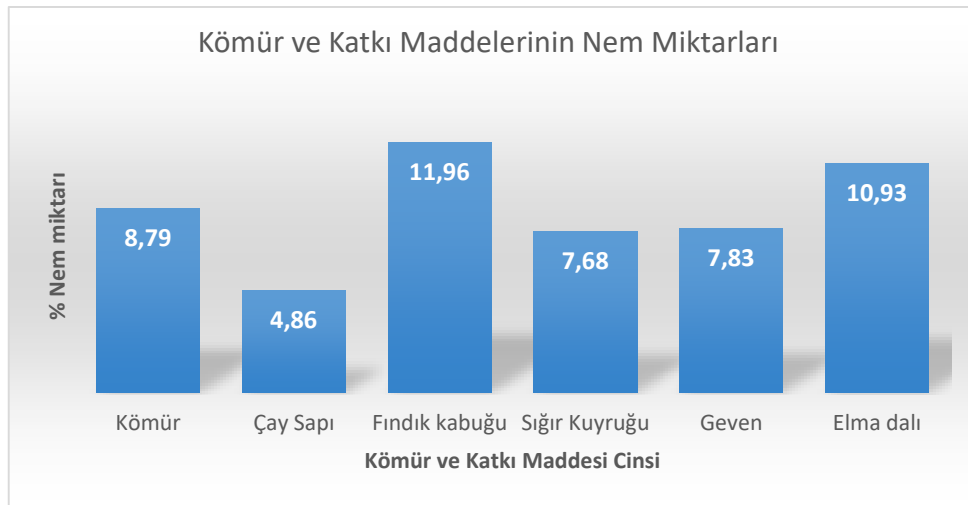
Torrefaksiyon işleminden sonra, enerji bakımından zengin bileşenler biyokütle içinde kalırken, zayıf bileşenler uzaklaşmaktadır ve bu biyokütlenin toplam enerji içeriğinde bir miktar azalmaya yol açmaktadır ve bunun yanı sıra biyokütlenin enerji yoğunluğunda artışa sebep olmaktadır. Enerji verimliliği, ham biyokütlenin enerjisinin torrefaksiyon işlemi sonrasında elde edilen ürünün enerjisine oranını vermektedir ve eşitlik 9.13 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\text{Enerji verimliliği}(wt\%, d) = \frac{\text{Torrefiye Biyokütle Ağırlığı} * \text{Kalorifik Değeri}}{\text{Ham Biyokütle Ağırlığı} * \text{Ham Biyokütle Kalorifik Değeri}} * 100 \quad (9.13)$$

DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

10.1 Kömürün ve Katkı Maddelerinin Nem Miktarının Belirlenmesi Çalışmaları

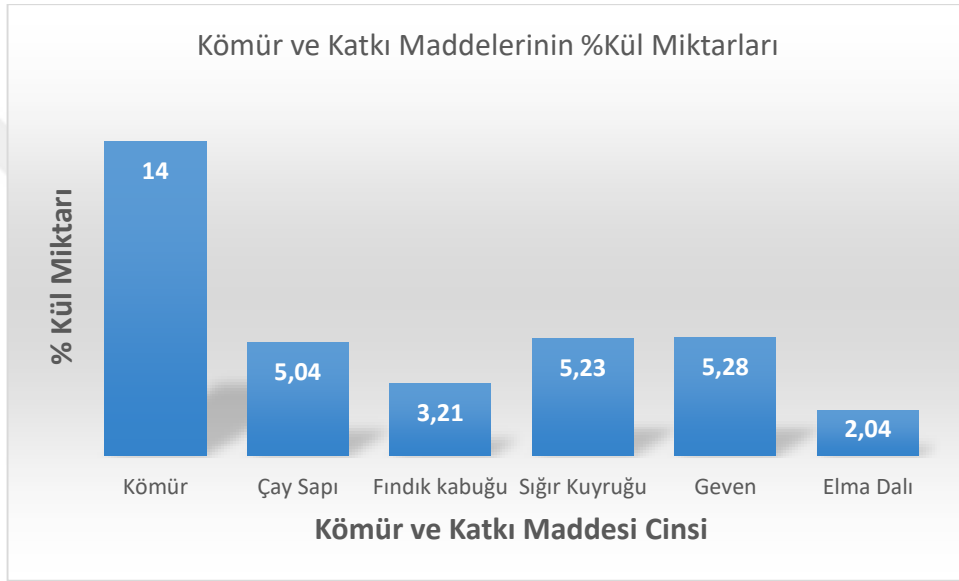
Kömürün nem analizi ASTM D 3173-87 standardına göre katkı maddelerinin nem analizi ise ASTM D 4442-07 standardı kapsamında yapılmış olup yapılan analizler sonucunda kömür, çay atığı, fındık kabuğu, sığır kuruğu bitkisi, geven bitkisi ve elma dalının nem miktarları sırasıyla %8,787, %4,86, %11,96, %7,68 ve %7,83, 10,93 olarak belirlenmiş ve bu verilere ait grafik Şekil 10.1’de verilmiştir. Grafikten de açıkça görüldüğü gibi en düşük nem miktarı çay atığının en yüksek nem miktarına ise fındık kabuğunun sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 10.1 Kömür ve katkı maddelerinin % nem miktarları

10.2 Kömür ve Katkı Maddelerinin Kül Miktarlarının Belirlenmesi Çalışmaları

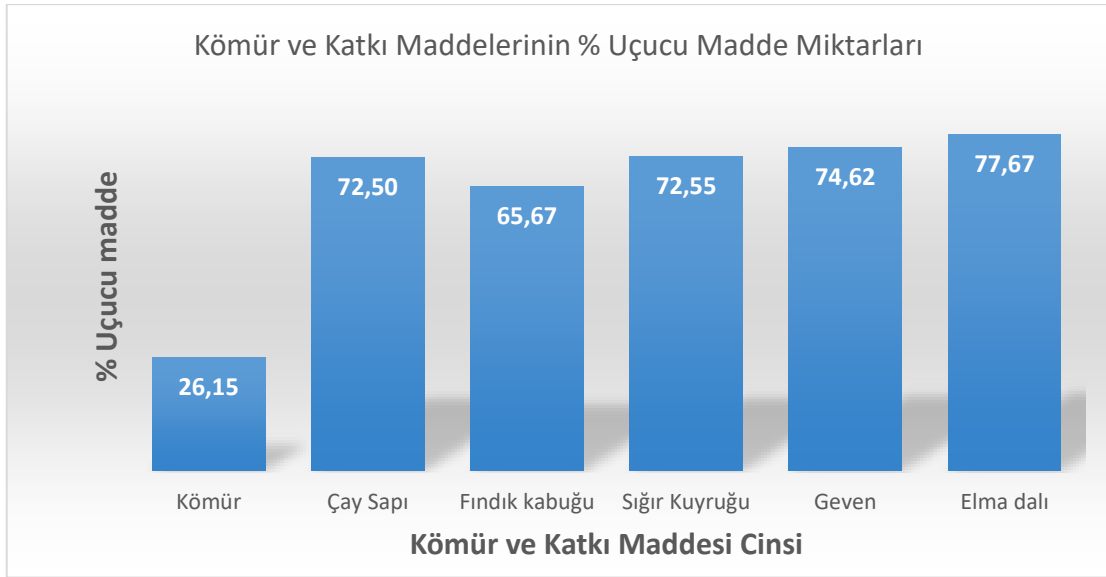
Kömürün kül miktarının belirlenmesi ASTM D3174-12, hammaddelerin kül analizi ASTM-D1102-84 standardı kapsamında yapılmış olup, kömür, çay atığı, fındık kabuğu, sığır kuruğu, geven bitkisi ve elma dalının %kül miktarları sırasıyla %14, %5,4, %3,21, %5,23,%5,28 ve %2,04 olarak belirlenmiştir. Yapılan analiz sonuçları Şekil 10.2’de verilmiş olup, deneyde kullanılan maddeler içinde en yüksek kül değerine sahip olan maddenin kömür en düşük kül değerine sahip olan maddenin ise elma dalı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 10.2 Kömür ve katkı maddelerinin % kül miktarları

10.3 Kömür ve Katkı Maddelerinin Uçucu Madde Miktarlarının Belirlenmesi Çalışmaları

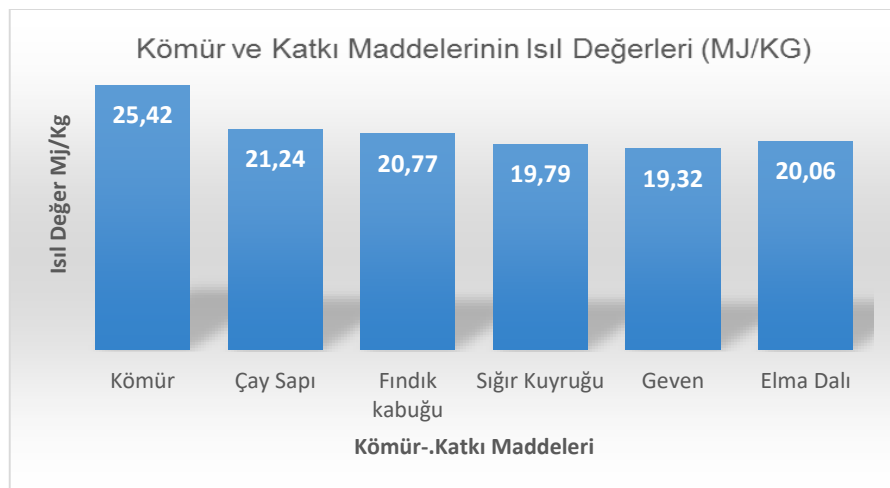
Kömürün uçucu madde miktarının belirlenmesi ASTM D5142-02a, katkı maddelerinin ise ASTM E872-82 standardına göre yapılmıştır. Yapılan deneylerde kömür, çay atığı, fındık kabuğu, sığır kuruğu, geven bitkisi ve elma dalının %uçucu madde miktarları sırasıyla %26,15, %72,5, %65,67, %72,55, %74,62 ve %77,665 olarak belirlenmiştir. Kömüre ve katkı maddelerinin uçucu madde yüzdesine karşı grafiği Şekil 10.3’de verilmiş olup grafikten de açıkça görüldüğü gibi en düşük uçucu madde miktarına kömür en yüksek uçucu madde miktarına ise elma dalının sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 10.3 Kömür ve katkı maddelerinin % uçucu madde miktarları

10.4 Kömür ve Katkı Maddelerinin Isıl Değerlerinin Belirlenmesi Çalışmaları

Kömürün ve katkı maddelerinin ısı değer analizleri İKA C 4000 marka model kalorimetre bombası kullanılarak yapılmıştır. Bu cihaz kullanılarak yapılan hesaplamalarda kömürün, çay atığının, fındık kabuğunun, sığır kuyruğu, geven bitkisi ve elma dalının ısı değerleri sırasıyla 25,42Mj/KG, 21,24Mj/Kg, 20,77Mj/Kg, 19,73 Mj/Kg, 19,32 Mj/Kg ve 20,06 Mj/Kg olarak belirlenmiştir. Kullanılan kömür ve katkı maddelerine karşı ısı değer grafiği Şekil 10.4’de verilmiş ve grafikten de görüldüğü gibi en yüksek ısı değere sahip katkı maddesinin çay atığı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



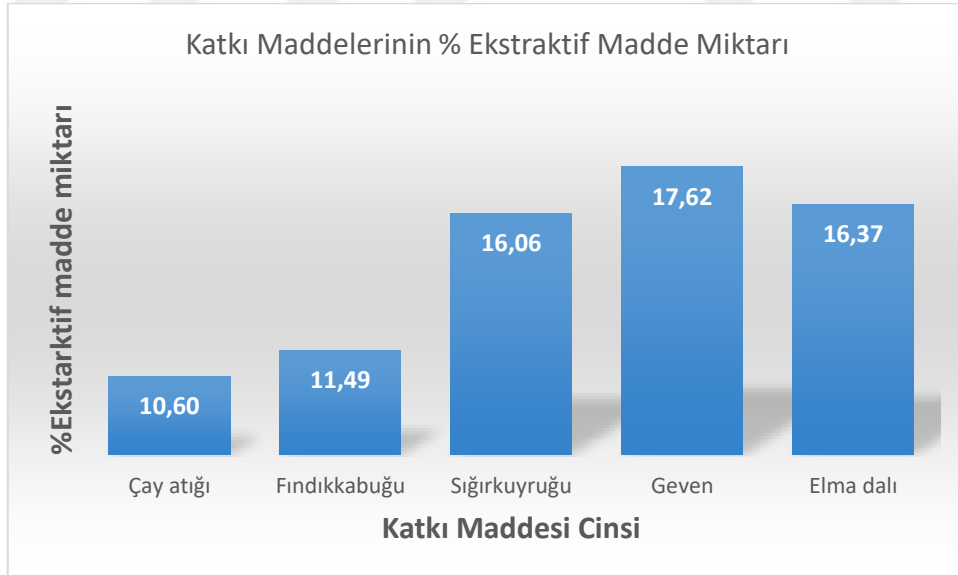
Şekil 10.4 Kömür ve katkı maddelerinin ısı değerleri (Mj/Kg)

10.5 Briketleme Çalışmalarında Kullanılan Katkı Maddelerinin Ekstraktif Madde, Hemiselüloz ve Lignin İçeriklerinin Belirlenmesi

Katkı maddelerinin içerisinde bulunan ekstraktif madde, hemiselüloz ve lignin bağlayıcılık özellik taşımakta ve briketleme sırasında partiküller arasında oluşan kovalent bağların, Van Der Waals bağlarının, hidrojen bağlarının ve elektrostatik kuvvetlerin daha da güçlenmesini sağlayarak briketlerin sağlamlığı üzerinde önemli etkiler oluşturmaktadırlar.

10.5.1 Katkı Maddelerinin Ekstraktif Madde Analizi

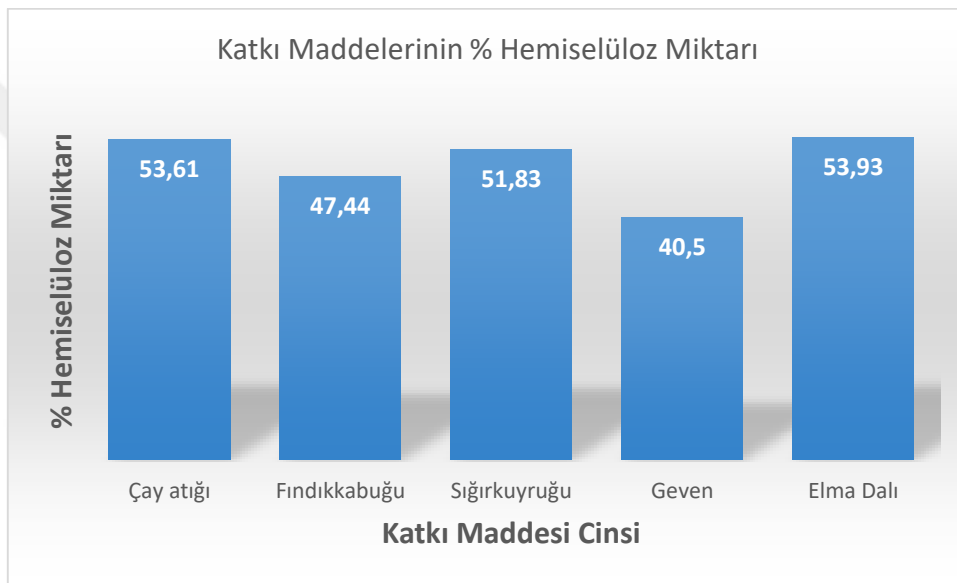
Katkı maddelerinin ekstraktif madde analizi TAPPI T 204cm-97 standardı kapsamında yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 10.5’de grafik edilmiştir ve çay atığının, fındık kabuğunun, sığır kuruğu bitkisi, geven bitkisi ve elma dalının ekstraktif madde miktarları sırasıyla %10,6, %11,485, %16,055, %17,62, %16,37 olarak belirlenmiştir. Grafikten de açıkça görüldüğü gibi en yüksek ekstraktif madde içeren katkı maddesinin geven bitkisi, en düşük ekstraktif madde içeren katkı maddesinin ise çay atığı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 10.5 Katkı maddelerinin % ekstraktif madde miktarları

10.5.2 Katkı Maddelerinin Hemiselüloz Miktarının Belirlenmesi

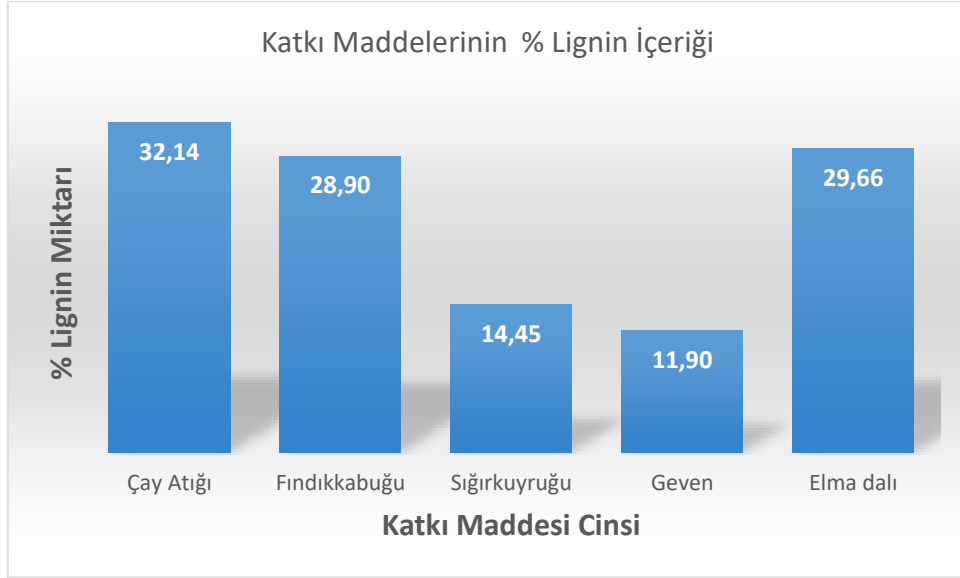
Katkı maddelerinin hemiselüloz analizi Shiguang Li ve arkadaşlarının (2003) yapmış olduğu çalışmadaki yöntem kullanılarak yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda çay atığının, fındık kabuğunun, sığır kuruğu bitkisi, geven bitkisi velma dalının hemiselüloz miktarları sırasıyla %53,61, %47,44, %51,83, %40,5, %53,93 olarak belirlenmiştir. Katkı maddesi türüne karşılık hemiselüloz yüzdesi grafiği Şekil 10.6'da verilmiş olup, şekilden de açıkça görüldüğü gibi yapılan analizler sonucunda en yüksek hemiselüloz içeriğine sahip olan katkı maddesinin elma dalının, en düşük hemiselüloz içeriğine sahip olan katkı maddesinin ise geven bitkisi olduğu belirlenmiştir.



Şekil 10.6 Katkı maddelerinin % Hemiselüloz miktarı

10.5.3 Katkı Maddelerinin Lignin Miktarlarının Belirlenmesi

Katkı maddelerinin lignin analizi Shiguang Li ve arkadaşlarının (2003) yapmış olduğu çalışmadaki yöntem kullanılarak yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda katkı maddelerinin lignin miktarları çay atığı, fındık kabuğu, sığır kuruğu bitkisi, geven bitkisi ve elma dalı için sırasıyla %32,135, %28,9, %14,45, %11,9, %29,659 olarak bulunmuştur (Şekil 10.7). Grafikten de görüldüğü gibi en yüksek lignin içeriğine sahip katkı maddesinin çay atığı en düşük lignin içeriğine sahip katkı maddesinin ise geven bitkisi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 10.7 Katkı maddelerinin % lignin içerikleri

10.6 Briketleme Denemeleri İçin Ön Deneme Çalışmaları

Briketlemede kullanılacak bağlayıcı madde ve asetik asit miktarlarının optimum değerlerinin belirlenmesi amacıyla yapılan ön deneme çalışmaları referans katkı maddesi olarak fındık kabuğu ile farklı sıcaklık, nem, bağlayıcı madde ve asetik asit miktarı parametreleri kullanılarak yapılmıştır. Yapılan denemelerde kömür/fındık kabuğu 1:1 oranında kullanılmış ve denemeler merkezi kompozit tasarım optimizasyon programında kullanılacak olan sıkıştırma basıncı parametrelerinin orta noktası olan 15 MPa sıkıştırma basıncı kullanılarak yapılmıştır. Briketleme sıcaklığı olarak katı formda bulunan bağlayıcının yumuşama sıcaklığı olan 90°C'den başlanarak 100°C ve 110°C olmak üzere 3 seviyede yapılmıştır. Bağlayıcı madde miktarının optimum değerinin belirlenmesi amacıyla denemeler, kütlece %4, %5 ve %6 olmak üzere üç seviyede bağlayıcı madde miktarı kullanılarak yapılmıştır. Bağlayıcı reçinenin hidrolizinin sağlanması ve bu sayede reçinenin bağlayıcılık özelliğini artırmak amacıyla kullanılacak olan asetik asidin miktarının belirlenmesi amacıyla kütlece üç farklı konsantrasyonda (%2, %2,5, %3) asetik asit kullanılarak miktar belirleme çalışması yapılmıştır. Her bir örnek için denemeler 3 tekrar yapılmış ve ortalama değerleri alınmıştır.

Briketleme çalışmasını temel amacı daha sağlam yapıda yakıtlar üretmek olduğundan, yapılan denemeler sonucunda elde edilen briketkire, briketlerin mekanik sağlamlığını belirlemede en etkili yöntem olan Shatter indeksi testleri yapılarak en iyi şartlar

belirlenmiştir. Elde edilen briketlere düşme sağlamlığı (Shatter indeksi) testi uygulanması sonucu elde edilen veriler Çizelge 10.1’de verilmiştir.

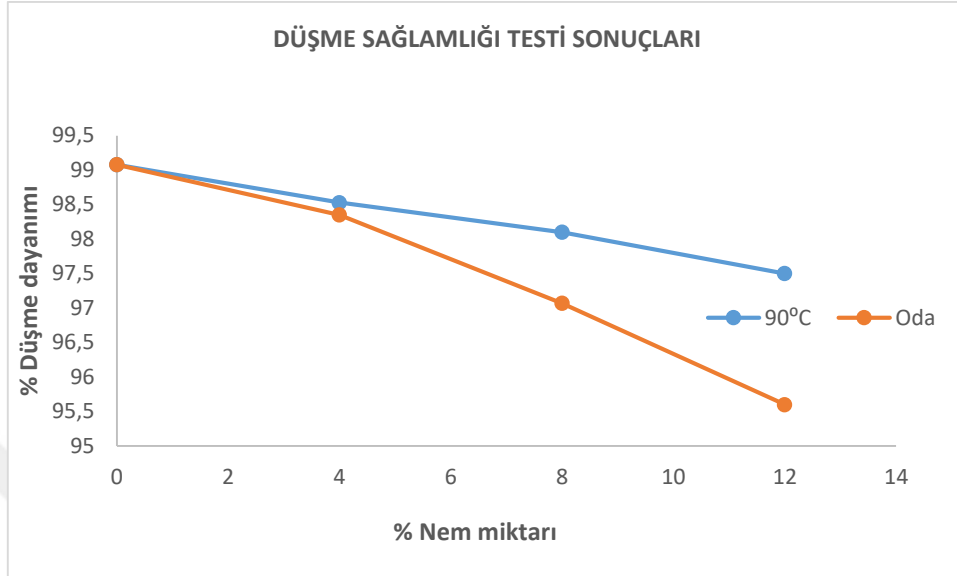
Çizelge 10.1 Briketleme ön deneme çalışmaları verileri

	1			2			3		
Sıcaklık (°C)	%2 A.A **	Bağlayıcı (%)	Shatter İndeksi *	%2,5 A.A	Bağlayıcı (%)	Shatter İndeksi	%3 A.A	Bağlayıcı (%)	Shatter İndeksi
90		4	0		4	-----		4	-----
		5	49		5	51		5	81
		6	85		6	96		6	97
100		4	0		4	-----		4	-----
		5	40		5	52		5	69
		6	55		6	74		6	95
110		4	0		4	-----		4	-----
		5	36		5	50		5	38
		6	50		6	70		6	85
*Sonuçlar Shatter düşme sağlamlığı analizi sonucunda parçalanmadan kalan briket kütlesi yüzdesidir.									
**A.A= Asetik asit									

Çizelge 10.1’de de açıkça görüldüğü gibi 1. Sette yapılan çalışmalarda, her üç sıcaklıkta da %4 bağlayıcı kullanılarak yapılan denemeler sonucu elde edilen briketlerin düşme dayanımı analizi sonucunda tamamen dağıldığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple ön deneme sayısını en aza indirmek amacıyla bu parametre diğer setlerde denenmemiştir. Yapılan ön denemelerde artan asetik asit ve bağlayıcı miktarıyla briketlerin dayanımında artış olduğu gözlemlenmiştir. %6 bağlayıcı madde %3 A.A kullanılarak 90°C sıcaklıkta yapılan ön denemelerde en yüksek briket dayanımı (%97) sonucu elde edilmiştir ve bu sebeple briketleme çalışmalarında kullanılacak bağlayıcı madde ve asetik asit miktarları sırasıyla %6 ve %3 olarak belirlenmiştir. Daha yüksek asetik asit ve bağlayıcı miktarlarının denenmeme sebebi artan bağlayıcı madde ve asetik asit miktarlarının briketleme prosesinin maliyetini yükseltmesidir.

Çizelge 10.1’de yapılan denemeler sonucunda, 3 setten her birinde artan sıcaklıkla briketlerin dayanımında ciddi derecede azalmalar meydana geldiği sonucuna ulaşılmıştır ve bunun sebebinin bağlayıcı maddenin yumuşaması gerçekleşirken, katkı maddelerinin ve kömürün yapısındaki nemin uzaklaşması olduğu düşünülmektedir. Bu sebeple denemelerin oda sıcaklığında da yapılması öngörülmüştür.

En iyi nem miktarını belirlemek amacıyla oda sıcaklığında ve 90°C sıcaklıkta farklı nem miktarlarında %6 bağlayıcı ve %3 A.A kullanılarak elde edilen briketlerin düşme sağlamlığı testi sonuçları Şekil 10.8’de verilmiştir.



Şekil 10.8 90°C ve oda sıcaklığında farklı nem yüzdeleri için Shatter indeksi sonuçları

Briketler üzerinde nem miktarının etkisini araştırmak amacıyla briket numuneleri hazırlanırken, numuneye ağırlıkça %12, %8, %4 ve %0 (%0 nem miktarında briket içinde bulunan kömür ve katkı maddelerinin bünye nemi uzaklaştırılmamış yani briketlemede kullanılan hammaddeler kurutulmamıştır) oranında su eklenmiştir. Yapılan denemeler sonucunda nem miktarı arttıkça her iki sıcaklık değeri içinde briketlerin düşme sağlamlığı dayanımlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple briketleme çalışmalarına kömür ve katkı maddelerinin bünyesinde bulunan nem miktarı haricinde, hammaddeler ekstradan nemlendirilmeden çalışılmaya karar verilmiştir.

10.7 Kömürün Farklı Katkı Maddeleri ve Bağlayıcı Madde Kullanılarak Briketlenmesi

Referans katkı maddesi olarak fındık kabuğu kullanılarak yapılan ön denemeler ışığında, briketleme çalışmasında kullanılacak olan nem miktarı, bağlayıcı miktarı, asetik asit miktarı ve briketleme sıcaklığı parametreleri sabit tutularak, briketler üzerinde katkı maddesi miktarı, katkı maddesi cinsi, tanecik boyutu, sıkıştırma basıncı parametrelerinin etkilerini belirlemek amacıyla dört farklı katkı maddesi kullanılarak briketleme çalışmaları yapılmıştır. Yapılan katkı maddeli briketleme çalışmalarında daha önce ön

denemeler sonucunda en iyi sonuçların alındığı bağlayıcı miktarı ve asetik asit miktarı sırasıyla ağırlıkça %6 ve %3 oranında kullanılmış ve briketleme çalışmaları oda sıcaklığında linyit kömürünün ve ham maddelerin bünye nemi kullanılarak yapılmıştır.

Katkı maddesi miktarı, katkı maddesi cinsi ve hammadde/katkı maddesi tanecik boyutu, presleme basıncı parametrelerinin, her katkı maddesi için optimum değerin belirlemek amacıyla deney planı, Design Expert yazılım programında, merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Deneysel tasarım yöntemi kullanılarak yapılan briketleme çalışmalarında kullanılan deney parametreleri ve bu parametrelerin değerleri Çizelge 10.2’de verilmiştir.

Çizelge 10.2 Deney parametreleri ve değerleri

Faktörler	Faktör seviyeleri				
	<i>En düşük</i>	<i>Düşük</i>	<i>Merkez</i>	<i>Yüksek</i>	<i>En Yüksek</i>
Kodlanmış faktörler	-2	-1	0	1	2
Tanecik Boyutu(mm)	1	2	3	4	5
Katkı Maddesi Miktarı (%)	0	25	50	75	100
Sıkıştırma basıncı (MPa)	5	10	15	20	25
Katkı Maddesi Cinsi	Kömür	FK	CS	GV	SK

Yapılan denemelerde her bir parametre için 5 seviye kullanılmıştır. Bu seviyeler tanecik boyutu için sırasıyla 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, katkı maddesi miktarı için %0, %25, %50, %75 ve %100, sıkıştırma basıncı için ise 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa, 20 MPa, 25 MPa değerleri kullanılmıştır. Kullanılan optimizasyon programında her bir katkı maddesi için 20 adet deney yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmış ve tüm denemeler her bir deney için 3 tekrar şeklinde yapılmış, elde edilen sonuçların ortalaması alınarak sonuçlar verilmiştir.

10.7.1 Linyit Kömürünün Çay Atığı Kullanılarak Briketlenmesi

Kömürün çay atığı kullanılarak briketlenmesi amacıyla yapılacak olan deney planı Design Expert optimizasyon yazılım programı yardımıyla merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak belirlenmiş olup, bu kapsamda belirlenmiş olan deney planı Çizelge 10.3’de verilmiştir. Merkezi kompozit tasarım kullanılarak yapılan deney planı kapsamında

briktleme çalışmaları 5 farklı seviyede tanecik boyutu, katkı maddesi miktarı, sıkıştırma basıncı parametreleri kullanılarak yapılmıştır.

Çizelge 10.3 Katkı maddesi olarak çay atığı kullanılarak yapılan deney planı

Deney Numarası	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3
	A:Tanecik Boyutu (mm)	B:% Katkı Maddesi	C: Sıkıştırma basıncı (MPa)
12	1	50	15
1	2	25	10
6	2	25	20
3	2	75	10
5	2	75	20
20	3	0	15
2	3	50	15
8	3	50	15
10	3	50	15
11	3	50	25
13	3	50	15
15	3	50	15
16	3	50	15
19	3	50	5
4	3	100	15
9	4	25	20
14	4	25	10
17	4	75	20
18	4	75	10
7	5	50	15

Çizelge 10.3'deki deney planı kullanılarak elde edilen briktlere dışme sağlamlığı testi, nem miktarı, kül miktarı ve ısıl değer analizleri yapılarak linyit kömürünün çay atığı katkı maddesi ile briktlenmesi çalışması için optimum değerler belirlenmiş ve bu değerler izelge 10.4'de verilmiştir.

Çizelge 10.4 Çay atığı briketleme çalışmaları deney sonuçları

Deney Numarası	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Cevap 1	Cevap 2	Cevap 3	Cevap 4
	A:Tanecik Boyutu (mm)	B: Katkı Maddesi %	C: Sıkıştırma basıncı MPa	Shatter %	Nem %	Kül %	Isıl değer (MJ/kg)
12	1	50	15	99,92	8,12	4,77	21,95
1	2	25	10	98,92	8,26	5,12	23,13
6	2	25	20	99,16	8,25	5,14	23,31
3	2	75	10	99,90	8,04	4,56	20,81
5	2	75	20	99,94	8,04	4,56	20,91
20	3	0	15	94,38	8,17	5,55	24,85
2	3	50	15	99,55	8,13	4,76	22,24
8	3	50	15	99,55	8,11	4,78	22,44
10	3	50	15	99,55	8,12	4,77	22,56
11	3	50	25	99,59	8,11	4,77	22,62
13	3	50	15	99,54	8,12	4,76	22,51
15	3	50	15	99,56	8,11	4,77	22,39
16	3	50	15	99,55	8,12	4,77	22,45
19	3	50	5	99,36	8,12	4,76	22,46
4	3	100	15	99,84	7,96	4,06	19,69
9	4	25	20	98,51	8,23	5,18	23,97
14	4	25	10	98,06	8,24	5,16	23,95
17	4	75	20	99,88	8,03	4,56	21,16
18	4	75	10	99,81	8,03	4,57	21,01
7	5	50	15	99,10	8,13	4,78	22,70

10.7.1.1 Çay Atığıyla Yapılan Çalışmaların Shatter İndeksi Sonuçları

Katkı maddesi olarak çay atığı kullanılarak elde edilen briketlerin Shatter indeksi sonuçları Çizelge 10.4'te verilmiş olup, elde edilen verilere Design Expert optimizasyon programı kullanılarak yapılan Anova analiz sonuçları Çizelge 10.5'te verilmiştir. Anova analizi sonucunda elde edilen R^2 değerinden briketlerin deney parametreleriyle Shatter indeksi değerlerinin değişiminin %99,44 doğrulukta kuadratik yani ikinci dereceden modele uyduğu belirlenmiştir.

Çizelge 10.5 Çay atığı Shatter indeksi Anova analiz sonuçları

Cevap 1						
	SHATTER İNDEKSİ					
Tepki Yüzeyi Kuadratik Model için ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karaler toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri	
Kaynak					Prob > F	
Model	4,49	7	0,64	290,02	<0,0001	Önemli
A-Tanecik boyutu	0,68	1	0,68	306,51	<0,0001	
B-Katkı maddesi miktarı	3,4	1	3,40	1536,48	< 0,0001	
C-Sıkıştırma basıncı	0,096	1	0,096	43,34	< 0,0001	
AB	0,23	1	0,23	106,13	<0,0001	
BC	0,042	1	0,042	19,06	0,001	
B ²	0,70	1	0,70	314,03	<0,0001	
C ²	0,008	1	0,008	3,64	0,083	
Artık	0,024	11	0,002			
Uyum Eksikliği	0,024	6	0,004	99,96	<0,0001	Önemli
Hata	0,0002	5	4,03*10 ⁻⁵			
Standart Sapma	0,047		R ²	0,9944		

Yapılan Anova analizi sonucunda elde edilen modelin p-değerinin 0,001'den küçük olması söz konusu değişkenler arasında anlamlı bir ilişki olduğunu göstermektedir. Ayrıca deneysel parametrelerin p-değerleri, bu parametrelerin Shatter indeksi üzerinde ne kadar etkili olduğunun da bir göstergesidir ve p-değerinin ne kadar küçük ise o parametrenin etkisinin elde edilen ürün üzerinde o kadar yüksek olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Çizelge 10.5'te verilen Anova analizi sonuçlarına göre çay atığının linyit kömürüyle karıştırılarak briketlenmesi sonucu elde edilen briketlerin Shatter indeksi üzerinde en etkili parametrelerin tanecik boyutu (A), katkı maddesi miktarı (B), sıkıştırma basıncı (C), tanecik boyutu ve katkı maddesi miktarı arasındaki etkileşim (AB) ve katkı maddesi miktarı ve sıkıştırma basıncı arasındaki etkileşim (BC) olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra katkı maddesi miktarının ve sıkıştırma basıncının shatter indeksi üzerinde üssel bir etkiye sahip olduğu ve bu değerlerdeki herhangi bir değişimin sonuç üzerinde bu değerin

karesi şeklinde yansıyacağı görülmektedir. Parametrelerin p-değerleri ayrı ayrı incelendiğinde, A, B, C AB, ve B² parametrelerinin p-değerlerinin <0,0001'den küçük olduğu, BC ve C² parametrelerinin ise p değerinin 0,001 ve 0,083 olduğu ve p-değerleri göz önüne alındığında A, B, C, AB ve B² parametrelerinin BC ve C² parametrelerine kıyasla Shatter indexi üzerinde daha etkili parametreler olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

A, B, C, AB ve B² parametrelerinin p-değerleri birbirlerine eşit olduğundan bu parametreler içerisinde en etkili parametrenin hangisi olduğunu belirlemek amacıyla Anova analizi sonucunda elde edilen F değerlerine bakıldığında, en yüksek F değerine sahip olan parametrenin B parametresi olduğu görülmektedir. Bu sebeple yapılan Anova analizi sonucunda linyit kömürünün çay atığı katkı maddesi kullanılarak yapılan briketlenmesi çalışmalarında Shatter indeksi üzerinde en yüksek etkiye sahip olan parametrenin B olduğu ve bunu sırasıyla B², A, AB ve C parametrelerinin takip ettiği sonucuna ulaşılmıştır.

10.7.1.2 Çay Atığıyla Yapılan Çalışmaların Shatter İndeksi Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi

Design Expert optimizasyon programı kullanılarak linyit kömürünün çay atıkları ile briketlenmesi sonucu elde edilen Shatter indeksi verilerinin matematiksel modeli eşitlik 10.1'de verilmiştir.

$$\text{SHATTER 1} = +98,18343$$

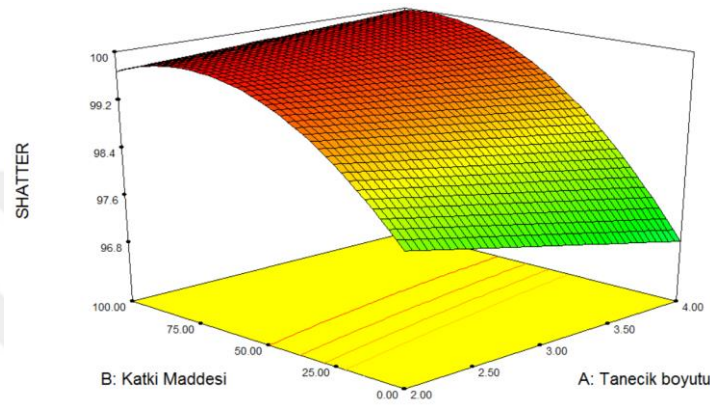
$$\begin{aligned} & -0,54869*TB \\ & +0,05044*KM \\ & +0,065583*PB \\ & +6,86*10^{-3}*TB*KM \\ & -5,81*10^{-4}*KM*PB \\ & -3,77*10^{-4}*KM^2 \\ & -7,01*10^{-4}*PB^2 \end{aligned} \quad (10.1)$$

Eşitlik 10.1'deki TB tanecik boyutunu, KM Katkı maddesi miktarını ve PB sıkıştırma basıncı parametresini temsil etmektedir.

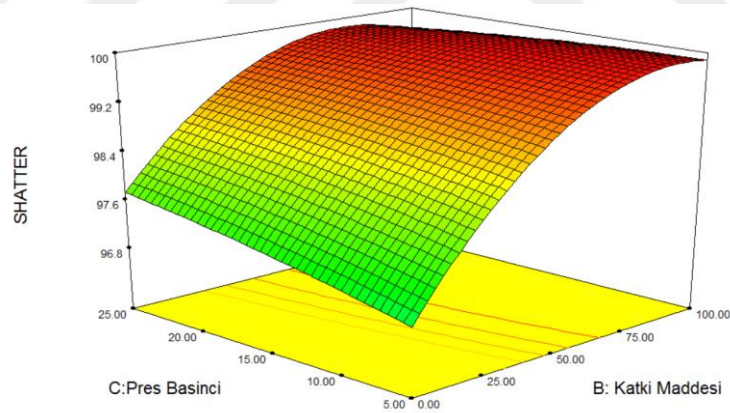
10.7.1.3 Çay Atığıyla Yapılan Briketlerin Shatter İndeksi Üzerine Deneysel

Parametrelerin, Etkilerinin İncelenmesi

Linyit kömürüne çeşitli oranlarda çay atığı eklenerek yapılan briketleme çalışmalarında merkezi birleşik tasarım optimizasyon programı kullanılarak yapılan denemeler sonucunda elde edilen Shatter indeksi verileri Design Expert yazılım programı kullanılarak katkı maddesi miktarı, sıkıştırma basıncı ve tanecik boyutu değerlerine karşılık Shatter indeksi değişimi Şekil 10.9’da grafik edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 10.9 Çay atığı katkı maddesi için briketleme parametrelerinin Shatter indeksine etkisi

Şekil 10.9 a ve b’deki grafiklerde katkı maddesi miktarı, tanecik boyutu ve sıkıştırma basıncı parametreleriyle Shatter indeksi değişimi verilmiştir ve şekillerden açıkça görüldüğü gibi katkı maddesi miktarı arttıkça ve tanecik boyutu azaldıkça briketlerin Shatter indeksi değeri yani düşme dayanımları artmaktadır.

Çay atığının bileşiminde, lignin, hemiselüloz ve selüloz polimerleri bulunmakta ve bu polimerler ekstra bağlayıcı özellik göstermektedir. Briketlerdeki katkı maddesi miktarı arttıkça toplam briket kütlelerinde bulunan bu polimerlerin yüzde bileşimi artmaktadır ve bu sayede briketlerde tanecikler arasındaki bağların daha da güçlenmesine sebep olmaktadır. Böylelikle briketlerin düşme dayanımlarını olumlu yönde etkilemektedir.

Şekil 10. 9 a'da artan tanecik boyutuyla briketlerin Shatter indeksinin olumsuz yönde etkilendiği görülmektedir. Bunun sebebinin, artan tanecik boyutları ile briketlerin boşluk hacminin artması ve daha kırılkan yapıda briketler elde edilmesi olduğu düşünülmektedir.

Yapılan briketleme çalışmalarında, en yüksek Shatter indeksi değerine Çizelge 10. 4'te verilmiş olan 12 numaralı deney parametreleri yani 1 mm tanecik boyutu, 15 MPa sıkıştırma basıncı ve %50 katkı maddesi kullanılması durumunda ulaşılmıştır ve bu parametreler kullanılarak elde edilen Shatter değeri %99,92 olarak belirlenmiştir. En düşük Shatter indeksi değerine ise beklenildiği gibi hiç katkı maddesi kullanılmadan 3 mm tanecik boyutlu linyit kömürü ve 15 MPa sıkıştırma basıncı kullanılması durumunda ulaşılmıştır ve bu parametreler kullanılarak elde edilen Shatter indeksi değeri %94,38'dir.

10.7.1.4 Çay Atığıyla Yapılan Çalışmaların Briketlerin Nem Miktarı Yüzdesine Etkisi

Linyit kömürünün katkı maddesi olarak çay atığı kullanılarak briketlenmesi sonucu oluşan briketlerin nem miktarı analizleri sonucunda elde edilen veriler Çizelge 10. 4'te verilmiş olup, elde edilen verilere Design Expert programı kullanılarak yapılan Anova analiz sonuçları Çizelge 10. 6'da verilmiştir. Denemeler sonucunda elde edilen verilere uygulanan Anova analizi sonuçları, briketlerin deneysel parametrelere bağlı olarak nem miktarı değişiminin %96,60 doğrulukta lineer modele uyduğunu göstermektedir.

Yapılan Anova analizi sonucunda deneysel parametrelerin her birinin p-değerleri ayrı ayrı incelendiğinde, tanecik boyutu, katkı maddesi miktarı ve sıkıştırma basıncı parametrelerinin p-değerleri sırasıyla 0,768, <0,0001 ve 0,474 olarak belirlenmiştir. Bunun sonucunda briketlerin nem yüzdesi üzerinde tanecik boyutu ve sıkıştırma basıncının, katkı maddesi miktarı kadar etkili olmadığı yani en etkili parametrenin katkı maddesi miktarı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 10.6 Çay atığı kullanılarak elde edilen briketlerin nem miktarı verilerinin Anova analizi sonuçları

Cevap 2						
Tepki Yüzeyi Lineer Model İçin ANOVA	NEM %					
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karaler toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri Prob > F	
Kaynak						
Model	0,12	3	0,039	142,15	< 0,0001	Önemli
A-Tanecik boyutu	0,00002	1	0,00002	0,090	0,768	
B-Katkı maddesi	0,12	1	0,12	425,82	< 0,0001	
C-Sıkıştırma basıncı	0,0002	1	0,0002	0,54	0,474	
Artık	0,0041	15	0,00027			
Uyum Eksikliği	0,0039	10	0,00039	12,57	0,006	Önemli
Hata	0,00016	5	0,000003			
Düzeltilmiş Toplam	0,12	18				
Standart Sapma	0,016		R²	0,9660		

10.7.1.5 Çay Atığıyla Yapılan Briketleme Çalışmalarının Nem Miktarı Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi

Linyit kömürünün çay atığı katkı maddesi kullanılarak yapılan briketleme çalışmaları sonucu elde edilen briketlerin nem miktarı yüzdesi verilerinin matematiksel modeli Design Expert optimizasyon programı yardımıyla belirlenmiş ve model denklem eşitlik 10.2' de verilmiştir.

$$\text{NEM \% 1} = +8.34117$$

$$-1.23438 \cdot 10^{-3} \cdot \text{TB}$$

$$-3.95885 \cdot 10^{-3} \cdot \text{KM}$$

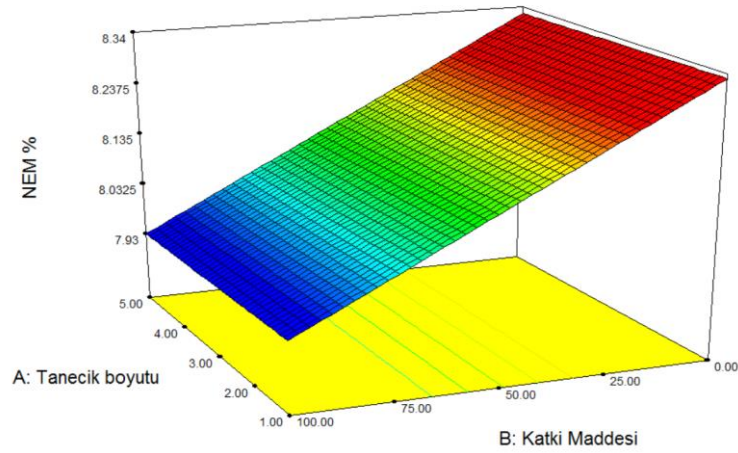
$$-6.04625 \cdot 10^{-4} \cdot \text{PB}$$

(10.2)

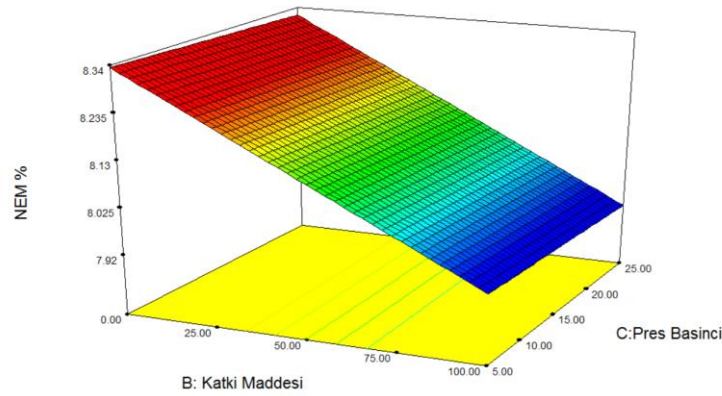
10.7.1.6 Çay Atığıyla Yapılan Briketleme Çalışmalarında Deneysel Parametrelerin Briketlerin Nem Miktarı Yüzdesi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Linyit kömürüne çeşitli oranlarda çay atığı eklenerek yapılan briketleme çalışmalarında, merkezi birleşik tasarım optimizasyon programı kullanılarak yapılan denemeler sonucunda elde edilen nem miktarı yüzdesi verileri Design Expert programı kullanılarak grafik edilmiştir. Şekil 10.10'da elde edilen briketlerin katkı maddesi miktarı, sıkıştırma

basıncı ve tanecik boyutu değerlerine karşılık Shatter indeksi değişimi grafikleri verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 10.10 Çay atığı katkı maddesi için briketleme parametrelerinin % nem miktarı üzerine etkisi

Şekil 10.10 a ve b’de açıkça görüldüğü gibi tanecik boyutu ve sıkıştırma basıncıyla briketlerin nem miktarında herhangi bir değişiklik gözlemlenmemektedir. Bunun yanı sıra katkı maddesi miktarı arttıkça briketlerin nem miktarı azalmaktadır. Bunun sebebinin çay atığının nem miktarının, linyit kömürünün nem miktarından düşük olması olduğu düşünülmektedir. Yapılan denemeler sonucunda elde edilen briketlerin nem yüzdeleri Çizelge 10. 4’te verilmiş olup en düşük nem değerine 4 numaralı deney parametreleri yani 3 mm tanecik boyutu, 15 MPa sıkıştırma basıncı ve %100 katkı maddesi kullanılması durumunda ulaşılmıştır. Bu parametreler kullanılarak elde edilen briketlerin nem miktarı %7,96 olarak belirlenmiştir.

10.7.1.7 ay Atığıyla Yapılan alışmaların % Kül Miktarı Sonuçları

Briketlemede aranan en önemli özelliklerden bir tanesi briketlerin yanması sonucu oluşan kl miktarıdır ve kl evre kirliliğine sebep olduğundan, briketlerde kül miktarının düşük olması istenir. Bu kapsamda linyit kömürünün çay atığı kullanılarak yapılan briketleme çalışmalarında, katkı maddesi miktarı, tanecik boyutu ve sıkıştırma basıncının briketlerin kül miktarı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak, izelge 10. 3'te verilmiş olan deney planı kapsamında elde edilen briketlerin kül miktarları ASTM D 3174-12 standardına uygun olarak belirlenmiş (izelge 10. 4) ve elde edilen verilerin Anova analizi sonuçları izelge 10. 7'de verilmiştir. Anova analizi sonucunda elde edilen briketlerin kül miktarının, tanecik boyutu, sıkıştırma basıncı ve katkı maddesi miktarıyla değişiminin R^2 değeri baz alınarak %95,75 doğrulukta lineer yani birinci dereceden modele uyduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Yapılan Anova analizi sonucunda deneysel parametrelerin her birinin p-değeri izelge 10. 7'de verilmiş olup, her parametre için p- değeri sonuçları ayrı ayrı incelendiğinde tanecik boyutu, katkı maddesi miktarı ve sıkıştırma basıncı parametrelerinin p-değerleri sırasıyla 0,635, <0,0001 ve 0,851 olarak belirlenmiştir. p-değeri verilerine göre briketlerin kül miktarı üzerinde, tanecik boyutu ve sıkıştırma basıncının etkisinin, katkı maddesinin etkisinin yanında ihmal edilebilir seviyede olduğu yani briketlerin kül miktarı üzerinde en etkili parametrenin katkı maddesi miktarı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 10.7 Çay atığı kullanılarak elde edilen briketlerin kül miktarı verilerinin Anova analizi sonuçları

Cevap 3	% KÜL MİKTARI					
Tepki Yüzeyi Lineer Model İçin ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karalar toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri Prob > F	
Kaynak						
Model	1,20	3	0,40	112,60	<0,0001	önemli
A-Tanecik boyutu	0,0008	1	0,0008	0,23	0,635	
B-Katkı maddesi	1,20	1	1,20	337,53	<0,0001	
C-Sıkıştırma basıncı	0,00013	1	0,0001	0,037	0,851	
Artık	0,053	15	0,0035			
Uyum Eksikliği	0,053	10	0,005	111,51	<0,0001	önemli
Hata	0,0002	5	0,00005			
Düzeltilmiş Toplam	1,251	18				
Standart Sapma	0,060		R ²	0,9575		

10.7.1.8 Çay Atığı Kullanılarak Elde Edilen Briketlerin %Kül Miktarı Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi

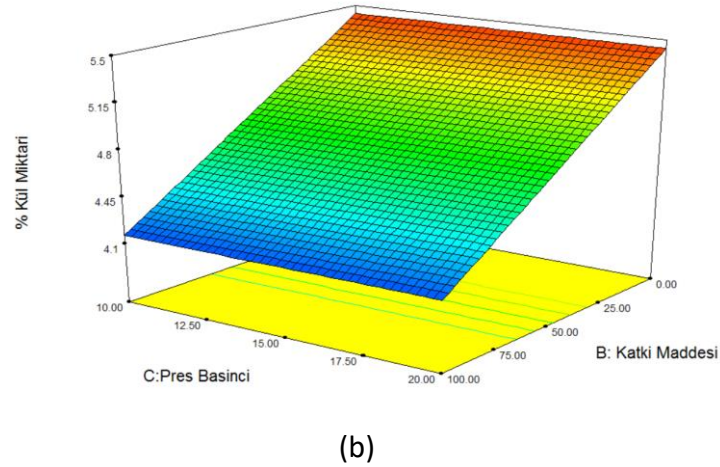
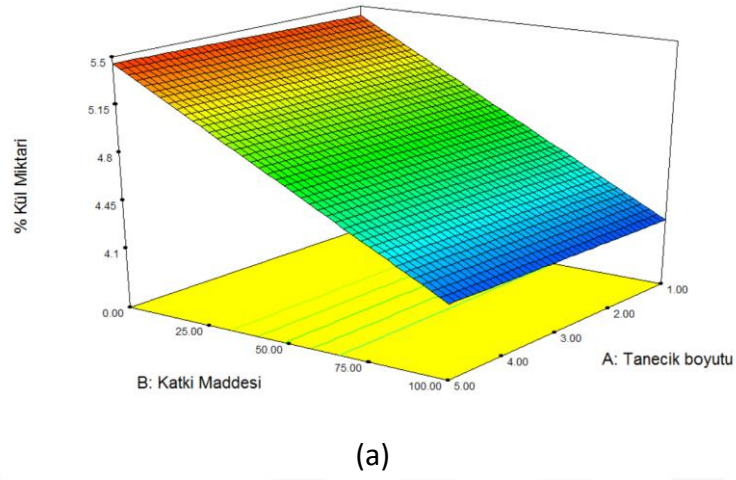
Merkezi birleşik tasarım kullanılarak, katkı maddesi olarak çay atığı kullanılması sonucu elde edilen briketlerin kül miktarı yüzdesinin deney parametreleriyle değişiminin matematiksel modeli Design Expert programı kullanılarak belirlenmiş ve elde edilen model eşitlik 10. 3’de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \%KÜL MİKTARI 1 = & +5,40767 \\ & +7,20694 \cdot 10^{-3} \cdot TB \\ & -0,012746 \cdot KM \\ & +5,69887 \cdot 10^{-4} \cdot PB \end{aligned} \quad (10.3)$$

10.7.1.9 Çay Atığı İle Yapılan Briketleme Çalışmalarında Deneysel Parametrelerin Briketlerin %Kül Miktarı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Merkezi birleşik tasarım yöntemi kullanılarak, linyit kömürüne çeşitli oranlarda çay atığı eklenerek yapılan briketleme çalışmaları sonucunda elde edilen briketlerin kül miktarı yüzdesi verileri Design Expert programı kullanılarak Şekil 10.11’te grafik edilmiştir. Şekil

10.11 a ve b’de verilen grafikler briketlerin katkı maddesi miktarı, sıkıştırma basıncı ve tanecik boyutu değerlerine karşılık kül miktarı yüzdesi değişimini vermektedir.



Şekil 10.11 Çay atığı katkı maddesi için briketleme parametrelerinin % kül miktarı üzerine etkisi

Şekil 10.11 a ve b’den tanecik boyutu ve sıkıştırma basıncı parametrelerinin briketlerin kül miktarı üzerinde önemli etkileri olmadığı açıkça görülmektedir ve bu parametreler değiştikçe briketlerin kül miktarlarında önemli değişiklikler gözlemlenmemiştir. Örneğin Çizelge 10.4’te verilmiş olan briketlerin kül yüzdeleri verilerine göre, katkı maddesi miktarının ve tanecik boyutunun sırasıyla %50 ve 3 mm değerlerinde değerinde sabit tutularak, Çizelge 10. 4’te sırasıyla 19, 2 ve 11 deney numaralarıyla verilen, 5 MPa, 15 MPa ve 25 MPa briketleme basınçlarında yapılan denemeler sonucunda elde edilen kül miktarları sırasıyla %4,76, %4,76 ve %4,77 olarak belirlenmiştir. Ayrıca tanecik boyutunun briketler üzerinde etkisinin araştırılması amacıyla yapılan denemelerde sıkıştırma basıncı 15 MPa değerinde ve katkı maddesi miktarı %50 değerinde sabit

tutularak briketleme çalışmaları yapılmış ve 1 mm, 3 mm, 5 mm tanecik boyutlarında yapılan denemeler sonucunda kül miktarı yüzdeleri sırasıyla % 4,77, %ve %4,77 ve %4,78 olarak belirlenmiştir. Bu sebeple briketlerin kül miktarı üzerinde en etkili parametrenin katkı maddesi miktarı olduğu sonucuna ulaşılmış ve katkı maddesi miktarı arttıķa briketlerin kül miktarı azaldığı gözlemlenmiştir. Artan katkı maddesi miktarıyla briketlerin kül miktarının azalması, çay atığı katkı maddesinin kül miktarının, linyit kömürünün kl miktarından düşük olmasından kaynaklanmaktadır ve katkı maddesi miktarı arttıķa briket bünyesinde bulunan kül miktarı yüksek olan linyit kömürü yüzdesi azalmakta, kül miktarının da buna bağlı olarak azaldığı öngörülmektedir. Çizelge 10. 4'te verilmiş olan briketlerin kl yüzdeleri verileri bunu desteklemektedir. Tanecik boyutunun ve sıkıştırma basıncının sırasıyla 3 mm ve 15 MPa'da sabit tutularak %0, %50 ve %100 katkı maddesi kullanılarak yapılan denemeler sonucunda bu katkı maddesi yüzdeleri için bulunan kl yüzdeleri sırasıyla %5,55, %4,77, %4,06 olarak bulunmuştur. Katkı maddesi miktarının %50 artması durumunda kl miktarında yaklaşık %17'lik bir azalma gözlemlenmiştir.

Yapılan denemeler sonucunda en yüksek kül içerine %100 linyit kömürü kullanılması sonucu ulaşılmış ve en düşük kül içeriğine %100 çay sapı kullanılması sonucunda ulaşılmıştır. Bu denemelere ait deney parametreleri izelge 10.4'te verilmiş olup en yüksek ve düşük kül yüzdesi sırasıyla %5,55 ve %4,06 olarak belirlenmiştir.

Linyit kömürüne ve çay atığına yapılan kısa analizler sonucunda elde edilen kül miktarları değerleri şekil 10. 2'de verilmiş olup bu değerler sırasıyla %14 ve %5,4 olarak belirlenmiştir. Linyit kömürünün ve çay atığı katkı maddesinin kısa analiz sonuçları baz alınarak, %50 katkı maddesi ve %50 linyit kömürü kullanılması durumunda elde edilen briketlerin stokiometrik olarak kl yüzdeleri yaklaşık %9,7 olması gerekirken bu şartlarda elde edilen briketlerin kül miktarının bu değerin yaklaşık 2 kat altında olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bunun sebebinin briketleme çalışmalarında kullanılan asetik asidin (CH_3COOH) briketlerin kl içeriğinde bulunan Al_2O_3 , CaO ve Fe_2O_3 gibi bileşiklerle reaksiyon vererek asetatlı bileşikler ve su oluşturması sonucu külün yapısında değişikliklere sebep olarak, kül miktarının azaltması sebep olduğu düşünülmektedir. Bu bileşiklerin asetik asit ile verdiği reaksiyonlar aşağıda verilmiştir.



10.7.1.10 Çay Atığıyla Yapılan Çalışmaların Isıl Değer Verileri

Linyit kömürünün, çay atığı katkı maddesi kullanılarak farklı tanecik boyutu, katkı maddesi miktarı ve sıkıştırma basıncı parametrelerinde, merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak belirlenen deney planı çerçevesinde yapılan briketleme çalışmaları sonucunda elde edilen briketlerin ısı değer verileri Çizelge 10. 4'te verilmiştir. Bu verilere yapılan Anova analizi sonuçları Çizelge 10. 8'de verilmiş olup, Anova analizi sonucunda elde edilen R^2 değeri baz alınarak, briketlerin tanecik boyutu, katkı maddesi miktarı ve sıkıştırma basıncı parametreleriyle ısı değer değişimlerinin %98,32 doğrulukta lineer modele uyduğu belirlenmiştir.

Çizelge 10.8 Çay atığı kullanılarak elde edilen briketlerin ısı değer verilerinin Anova analizi sonuçları

Cevap 4	ISIL DEĞER (Mj/Kg)					
Tepki Yüzeyi Lineer Model İçin ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karalar toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri Prob > F	
Kaynak						
Model	21,22	3	7,07	291,79	< 0,0001	Önemli
A-Tanecik boyutu	0,73	1	0,73	29,98	< 0,0001	
B-Katkı maddesi	20,46	1	20,46	843,97	< 0,0001	
C-Sıkıştırma basıncı	0,035	1	0,035	1,43	0,250	
Artık	0,36	15	0,024			
Uyum Eksikliği	0,30	10	0,030	2,34	0,1796	Önemli
Hata	0,064	5	0,013			
Düzeltilmiş Toplam	21,58	18				
Standart Sapma	0,16		R^2	0,9832		

Deneysel parametrelerin ısı değeri üzerine etkilerini belirlemek amacıyla yapılan Anova analizi sonucunda elde edilen ve Çizelge 10. 8' de verilen modelin p-değerinin 0,0001'den küçük olması deneysel parametrelerle ısı değeri değişiminin lineer modele uyduğunun diğer bir kanıtıdır. Deneysel parametrelerin her birinin p-değerleri ayrı ayrı incelendiğinde, tanecik boyutu, katkı maddesi miktarı ve sıkıştırma basıncı parametrelerinin p-değerleri sırasıyla <0,0001, <0,0001 ve 0,250 olarak belirlenmiştir. Merkezi kompozit tasarım kullanılarak yapılan deney planı doğrultusunda elde edilen briketlerin ısı değeri üzerinde etkili olan parametrelerin tanecik boyutu ve katkı maddesi miktarı olduğu bunun yanı sıra sıkıştırma basıncının briketlerin ısı değeri üzerinde herhangi bir etkiye sahip olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Parametrelerin F-değerlerine bakıldığında ise en büyük F değerine sahip olan parametrenin katkı maddesi miktarı olduğu Çizelge 10. 8'den açıkça görülmekte ve bu da briketlerin ısı değeri üzerinde en etkili parametrenin katkı maddesi miktarı olduğunu göstermektedir.

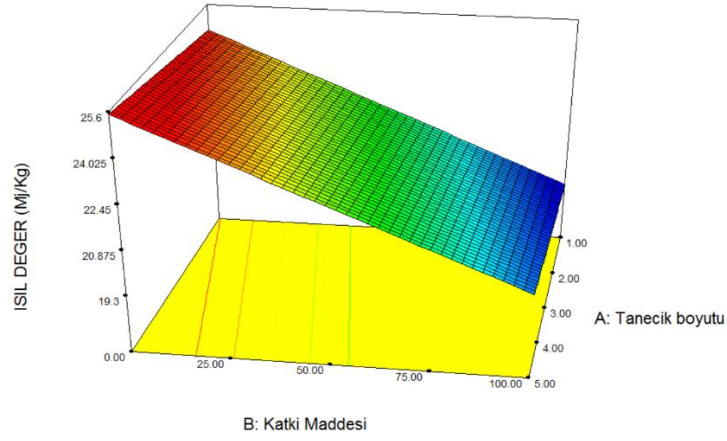
10.7.1.11 Çay Atığıyla Yapılan Briketleme Çalışmaların Isıl Değer Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi

Merkezi birleşik tasarım kullanılarak elde edilen briketlerin ısı değeri verilerinin deney parametreleriyle değişiminin matematiksel modeli eşitlik 10. 4'de verilmiştir.

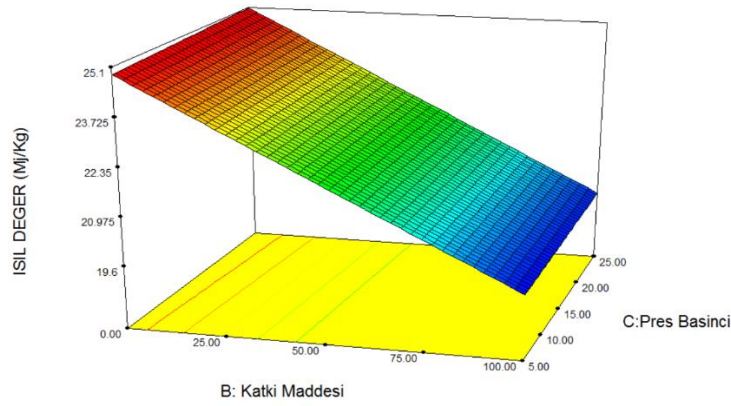
$$\begin{aligned} \text{ISIL DEĞER(Mj/Kg) 1= } & +24,21808 \\ & +0,21311*TB \\ & - 0,052691*KM \\ & +9,3202*10^{-3}*PB \end{aligned} \quad (10.4)$$

10.7.1.12 Çay Atığıyla Yapılan Briketleme Çalışmalarında Deneysel Parametrelerin Briketlerin Isıl Değeri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Katkı maddesi olarak çay atığı kullanılarak linyit kömürü briketleme çalışmalarında merkezi birleşik tasarım optimizasyon programı kullanılarak elde edilen briketlerin ısı değeri üzerine, tanecik boyutu, sıkıştırma basıncı ve katkı maddesi miktarı parametrelerinin etkileri Şekil 10.12'de grafik edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 10.12 Çay atığı katkı maddesi için briketleme çalışmalarının ısı değeri üzerine etkisi

Briketlerde aranan önemli özelliklerden bir tanesi ısı değeridir. Şekil 10.12 a ve b'den açıkça görülmektedir ki çay atığı katkı maddesi kullanılarak elde edilen briketlerde tanecik boyutu arttıkça ısı değeri artarken, artan katkı maddesi miktarı ısı değerinin azalmasına sebep olmaktadır. Katkı maddesi arttıkça briketlerin ısı değerinin azalma sebebi, çay atığı katkı maddesinin ısı değerinin linyit kömürünün ısı değerinden düşük olmasıdır ve katkı maddesi miktarı arttıkça briket bünyesinde bulunan ısı değeri düşük bileşenler yüzdesi arttığından ısı değeri bu doğrultuda azalmaktadır. Bunun yanı sıra sıkıştırma basıncı parametresi briketlerin ısı değeri üzerinde her hangi bir etkiye sebep olmamaktadır.

Yapılan analizler sonucunda en yüksek ısı değere %100 linyit kömürü kullanılması durumunda, en düşük ısı değere ise %100 çay atığı kullanılması durumunda ulaşılmıştır ve bu briketlere ait ısı değeri miktarları sırasıyla 24,85 MJ/Kg ve 19,69 MJ/Kg olarak

belirlenmiştir. Katkı maddeli briketler içerisinde en yüksek ısı değere sahip olan briket Çizelge 10. 4'te verilmiş olan 9 numaralı deney parametreleri yani 4 mm tanecik boyutu, %25 katkı maddesi miktarı ve 20 MPa sıkıştırma basıncı kullanılması sonucu elde edilmiştir. Bu briketin sahip olduğu ısı değeri 23,97 Mj/Kg olarak belirlenmiştir. %100 kömür ve %100 çay atığı kullanılması durumunda elde edilen briketler ile katkı maddesi ve linyit kömürünün bir arada kullanılması sonucu en yüksek ısı değere sahip olan briket kıyaslandığında, %100 linyit kömürü briketine göre ısı değerinde %3'lük bir azalma, %100 çay atığı briketine göre ise ısı değerinde yaklaşık %21,4'lik bir artış olduğu gözlemlenmiştir.

10.7.1.13 Çay Atığıyla Yapılan Çalışmaların Genel Değerlendirilmesi

Bağlayıcı olarak ağırlıkça %6 reçine, katkı maddesi olarak çay atığı ve ağırlıkça %3 asetik asit ile yapılacak olan briketleme çalışmaları için optimum katkı maddesi miktarı, sıkıştırma basıncı ve tanecik boyutunun belirlenmesi amacıyla merkezi kompozit tasarım optimizasyon programı kullanılarak deney planı oluşturulmuştur. Bu deney planı doğrultusunda elde edilen verilerin, tüm parametreler göz önünde bulundurularak Design Expert programı yardımıyla çözümlemesi yapılmıştır. Tüm parametreler ve analiz sonuçları için yapılan çözümleme aralıkları Çizelge 10. 9'da verilmiştir.

Çizelge 10.9 Çay atığı katkı maddesi için çözümleme şartları

KISITLAMALAR				
İsim	Hedef	Alt Limit	Üst Limit	Önem
Tanecik boyutu (mm)	analiz aralığında	2	4	3
Katkı maddesimiktari %	analiz aralığında	25	75	3
Sıkıştırma basıncı (MPa)	analiz aralığında	10	20	3
Shatter indeksi (%)	analiz aralığında	98	99,94	5
Kül miktarı (%)	analiz aralığında	4,9	5,2	5
Isıl değer (Mj/Kg)	analiz aralığında	23	23,965	5

Çizelge 10.9'da verilen çözümleme şartları sonucunda elde edilen optimum deney parametreleri ve bu parametreler kullanılarak üretilen briketlere ait Shatter indeksi, % nem miktarı, %kül miktarı ve ısı değeri analizi sonuçları Çizelge 10.10'da verilmiştir.

Çizelge 10.10'dan da görüldüğü gibi en iyi briketleme sonuçlarına, 4 mm ve 2 mm tanecik boyutu, %25 katkı maddesi, 10 MPa ve 20 MPa sıkıştırma basıncı kullanılması sonucunda elde edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 10.10 Çay atığı için deney parametrelerinin çözümlenmesi

Deney No	Tanecik Boyutu (mm)	Katkı Maddesi (%)	Sıkıştırma basıncı (MPa)	SHATTER (%)	NEM %	% Kül Miktarı	Isıl Değer (Mj/Kg)
1	2	25	10	98,89	8,23	5,11	23,42
2	4	25	10	98,14	8,23	5,12	23,85
3	2	25	20	99,20	8,23	5,11	23,51
4	4	25	20	98,44	8,23	5,13	23,94

Elde edilen optimum parametrelerde her bir briket için nem ve kül miktarı yüzdeleri hemen hemen aynıdır. Bu sebeple optimum parametrelerin belirlenmesinde en önemli deney çıktıları briketlerin Shatter indeksi değerleri ve ısı değerleridir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde en yüksek ısı değere sahip olan briketin 4 mm tanecik boyutu, %25 çay atığı ve 20 MPa sıkıştırma basıncı kullanıldığında ulaşılabildiği görülmektedir. Bunun yanı sıra en yüksek Shatter indeksi değerine sahip briket ise 2 mm tanecik boyutu %25 çay atığı ve 20 MPa sıkıştırma basıncı kullanılması durumunda elde edilebilmektedir.

Çizelge 10. 10'da 3 ve 4 nolu deney numarasıyla verilmiş olan, ayrı ayrı en iyi ısı değer ve Shatter indeksi değerine sahip her iki briketin ısı değerleri karşılaştırıldığında 4 numaralı yani 4 mm tanecik boyutu %25 katkı maddesi miktarı ve 20 MPa sıkıştırma basıncına sahip olan briketin ısı değerinin deney numarası 3 olan briketten daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra bu briketlerin Shatter indeksi değerleri karşılaştırıldığında 2 mm tanecik boyutuna, 20 MPa sıkıştırma basıncına ve %25 çay atığına sahip olan 3 numaralı briketin Shatter indeksinin 4 numaralı briketten % 0,76 daha yüksek olduğu görülmektedir ve bu değer ihmal edilebilir seviyededir. Bununla birlikte Shatter indeksi yüksek olan 3 numaralı briketin tanecik boyutu 2 mm iken 4 numaralı briketin tanecik boyutu 4 mm'dir ve tanecik boyutunun 2 mm'ye indirilmesi ekstra briketleme maliyetine sebep olacaktır. Tüm bu parametreler göz önünde bulundurularak, katkı maddesi olarak çay atığı kullanılarak yapılacak olan briketleme

alışmalarında tanecik boyutunun 4 mm kullanılmasının daha uygun olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Çözümleme sonucunda elde edilen en iyi Shatter indeksi, % nem miktarı, %kül miktarı ve ısı değere sahip olan 4 mm tanecik boyutu kullanılarak elde edilen briketlerin (izelge 10.10'da 2 ve 4 numaralı deneyler) analiz sonuçları karşılaştırıldığında her iki briketin %nem ve %kül miktarlarının hemen hemen aynı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bunun yanı sıra 4 nolu deney şartlarında elde edilen briketin Shatter indeksi ve ısı değerinin 2 numaralı deneyden sırasıyla %0,31 ve %0,38 daha yüksek olduğu görülmektedir ve bu değerler ihmal edilebilir seviyededir. Bunun yanı sıra her iki briketin sıkıştırma basınçlarına bakıldığında 4 numaralı deneyin sıkıştırma basıncının 2 numaralı deneyin sıkıştırma basıncından 2 kat fazla olduğu görülmektedir ve 4 numaralı deneyin şartları kullanılarak elde edilecek briket ekstra sıkıştırma basıncı maliyeti gerektirmektedir. Bu sebeple 2 numaralı deney parametreleri kullanılarak en iyi briket özelliklerine ulaşılabileceği öngörülmektedir.

Sonuç olarak çay atığı katkı maddesi kullanılarak yapılacak olan briketleme çalışmalarında en iyi sonuca 4 mm tanecik boyutu, %25 katkı maddesi ve 10 MPa sıkıştırma basıncı kullanılarak ulaşılabileceği düşünölmektedir. Linyit kömürünün çay atığı ile izelge 10.10'da verilen 2 numaralı deney parametreleri kullanılarak elde edilen briketin Shatter indeksi, % nem miktarı, % kül miktarı ve ısı değeri analiz sonuçları sırasıyla %98,14, %8,23, %5,12, 23,85 Mj/Kg olarak belirlenmiştir.

10.7.2 Linyit Kömürünün Fındık Kabuğu Kullanılarak Briketlenmesi

Linyit kömürünün fındık kabuğu kullanılarak briketlenmesi alışmaları Design Expert programı yardımıyla merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak 5 farklı seviyede tanecik boyutu, katkı maddesi miktarı, sıkıştırma basıncı parametreleri kullanılarak yapılmıştır. Fındık kabuğu kullanılarak yapılan denemeler için optimum parametrelerin belirlenmesi amacıyla yapılan deney planı izelge 10.11'de verilmiştir.

Çizelge 10.11 Katkı maddesi olarak fındık kabuğu kullanılarak yapılan deney planı

Deney No	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3
	A: Tanecik Boyutu (%)	B: Katkı Maddesi (%)	C: Sıkıştırma basıncı (MPa)
1	4	75	20
2	3	50	15
3	4	25	10
4	3	50	15
5	3	50	15
6	2	75	20
7	3	0	15
8	1	50	15
9	3	50	15
10	2	25	20
11	2	75	10
12	4	75	10
13	3	50	15
14	2	25	10
15	3	50	5
16	3	100	15
17	4	25	20
18	3	50	25
19	5	50	15
20	3	50	15

Çizelge 10.11’de verilen deney planı kullanılarak yapılan denemeler sonucunda elde edilen briketlerin Shatter indeksleri, nem miktarı yüzdeleri, kül miktarı yüzdeleri ve ısı değerleri belirlenmiştir ve bu değerler Çizelge 10.12’de verilmiştir.

Çizelge 10.12 Fındık kabuğu briketleme çalışmaları deney sonuçları

Deney No	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Cevap 1	Cevap 2	Cevap 3	Cevap 4
	A:Tanecik Boyutu (mm)	B: Katkı Maddesi (%)	C: Sıkıştırma basıncı (MPa)	Shatter İndeksi (%)	Nem (%)	Kül (%)	Isıl Değer (Mj/Kg)
1	3	50	15	97,70	8,42	3,10	22,56
2	4	25	10	94,93	8,27	3,97	23,69
3	4	75	20	98,78	8,58	2,36	21,22
4	4	25	20	95,51	8,27	3,99	23,84
5	3	50	15	97,70	8,41	3,16	22,57
6	2	75	20	99,70	8,59	2,26	21,27
7	3	50	15	97,67	8,45	3,04	22,23
8	2	25	20	97,84	8,28	3,99	23,21
9	3	50	5	96,75	8,48	3,09	22,42
10	3	100	15	99,81	8,64	0,68	19,84
11	3	50	25	98,10	8,41	3,10	22,26
12	4	75	10	97,66	8,58	2,35	20,77
13	5	50	15	96,38	8,42	3,08	22,24
14	3	50	15	97,69	8,43	3,10	22,38
15	3	0	15	94,38	8,17	5,55	24,86
16	1	50	15	99,06	8,39	3,09	21,76
17	2	25	10	97,37	8,27	3,97	23,20
18	3	50	15	97,71	8,40	3,10	22,56
19	3	50	15	97,69	8,44	3,11	22,41
20	2	75	10	99,44	8,58	2,39	21,13

10.7.2.1 Fındık Kabuğu ile Yapılan Çalışmaların Shatter İndeksi Sonuçları

Linyit kömürünün katkı maddesi olarak fındık kabuğu kullanılarak yapılan briketleme çalışmaları sonucunda elde edilen briketlerin Shatter indeksi sonuçları Çizelge 10.12’de verilmiş olup, elde edilen verilerin Anova analizi Design Expert programı yardımıyla yapılmış ve Anova analiz sonuçları Çizelge 10.13’de verilmiştir. Anova analizi sonucunda

elde edilen R^2 değerinden, deney parametreleri ile briketlerin Shatter indeksi değişiminin %95,69 doğrulukta lineer modele uyduğu belirlenmiştir.

Çizelge 10.13 Fındık kabuğu Shatter indeksi Anova analiz sonuçları

Cevap 1	SHATTER İNDEKSİ					
Tepki Yüzeyi Lineer Model İçin ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karalar toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri Prob > F	
Kaynak						
Model	38,94	3	12,98	118,31	< 0,0001	Önemli
A-Tanecik boyutu	10,29	1	10,29	93,78	< 0,0001	
B-Katkı maddesi	27,00	1	27,00	246,10	< 0,0001	
C-Sıkıştırma basıncı	1,65	1	1,65	15,06	0,0013	
Artık	1,76	16	0,11			
Uyum Eksikliği	1,75	11	0,16	1041,13	< 0,0001	Önemli
Hata	0,0008	5	0,00015			
Düzeltilmiş Toplam	40,69	19				
Standart Sapma	0,33		R^2	0,9569		

Çizelge 10.13 yapılan Anova analizi sonucunda deneysel parametrelerin her birinin p - değerinin 0,001 in altında olması bu parametrelerin Shatter indeksi analizinde etkili parametreler olduğunu göstermektedir. Parametrelerin p-değerleri ayrı ayrı incelendiğinde, tanecik boyutu ve katkı maddesi miktarı parametrelerinin p-değerlerinin <0,0001'den küçük olduğu, sıkıştırma basıncı parametresinin ise p değerinin 0,0013 olduğu belirlenmiştir. p-değerleri göz önüne alındığında tanecik boyutu ve katkı maddesi miktarının, denemeler sırasında kullanılan sıkıştırma basınçlarına kıyasla Shatter indeksi üzerinde daha etkili parametreler olduğu Çizelge 10.13'de açıkça görülmektedir.

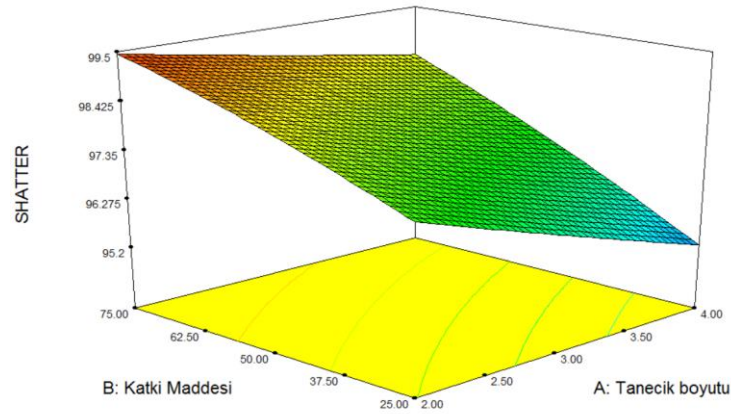
10.7.2.2 Fındık Kabuğu ile Yapılan Çalışmaların Shatter İndeksi Verilerinin matematiksel modelinin belirlenmesi

Merkezi birleşik tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak Design Expert programı yardımıyla linyit kömürünün fındık kabuğu katkı maddesi kullanılarak yapılan denemeler sonucunda elde edilen briketlerin Shatter indeksi verilerinin matematiksel modeli eşitlik 10.8' te verilmiştir.

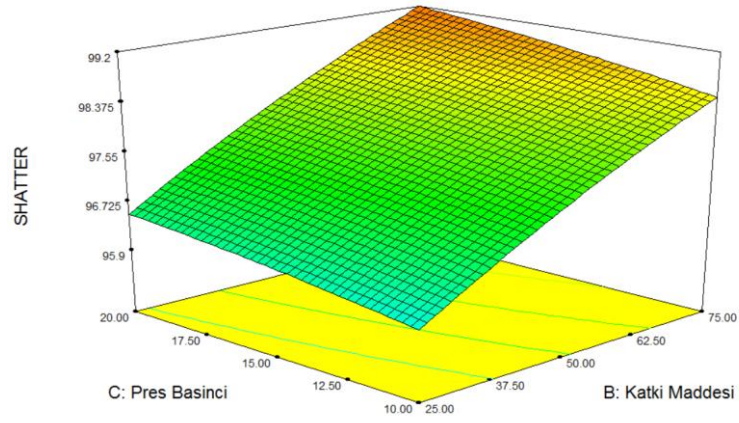
$$\begin{aligned} \text{SHATTER 2} = & +96,43665 \\ & -0,80187*TB \\ & +0,051960*KM \\ & +0,642750*PB \end{aligned} \quad (10.5)$$

10.7.2.3 Deneysel Parametrelerin Briketlerin Shatter İndeksi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Katkı maddesi olarak fındık kabuğu kullanılarak linyit kömürü briketleme çalışmalarında merkezi birleşik tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak yapılan denemeler sonucunda elde edilen veriler Design Expert programı yardımıyla grafik edilmiştir. Şekil 10.13'te elde edilen briketlerin katkı maddesi miktarı, sıkıştırma basıncı ve tanecik boyutu değerlerine karşılık Shatter indeksi değişimleri verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 10.13 Fındık kabuğu katkı maddesi için briketleme parametrelerinin Shatter indeksine etkisi

Şekil 10.13 a ve b katkı maddesi miktarı ve tanecik boyutuyla shatter indexi değişimini göstermektedir ve şekillerden açıkça görüldüğü gibi katkı maddesi miktarı arttıkça briketlerin Shatter indeksi değeri yani düşme dayanımları artmaktadır. Fındık kabuğunun bileşiminde lignin, hemiselüloz ve selüloz polimerleri bulunmakta ve bu polimer maddeler bağlayıcı özellik göstermektedir. Briketlerdeki katkı maddesi miktarı arttıkça toplam briket kütlesinde bulunan bu polimerlerin yüzde bileşimi artmaktadır. Bu polimer maddelerin yüzdesinin artması, briketleme prosesinde tanecikler arasındaki bağların daha da güçlenmesine sebep olmakta ve bu sayede briketlerin düşme dayanımlarını olumlu yönde etkilemektedir.

Şekil 10.13 a'da da görüldüğü gibi yapılan denemeler sonucunda artan tanecik boyutuyla Shatter indeksi değerinin azaldığı belirlenmiştir. Artan tanecik boyutları briketlerin boşluk hacminin artmasına sebep olmakta ve bu nedenle briketlerin kırılabilirliği artmaktadır. Sonuç olarak kömürün fındık kabuğu katkı maddesi kullanılarak yapılan briketleme çalışmalarında yüksek tanecik boyutlarında çalışmanın dezavantaj olduğu görülmektedir.

Şekil 10.13 b Shatter indeksinin katkı maddesi miktarı ve sıkıştırma basıncıyla değişimini göstermektedir ve şekilden açıkça görüldüğü gibi artan sıkıştırma basıncı Shatter indeksini olumlu yönde etkilemektedir. Tahmin edileceği gibi sıkıştırma basıncı arttıkça taneciklerin birbirine bağlanması daha da arttığından briketlerin shatter indeksi artmaktadır.

Linyit kömürünün fındık kabuğu katkı maddesi kullanılarak yapılan briketleme çalışmalarında, en yüksek Shatter indeksi değerine Çizelge 10.12’de verilmiş olan 10 numaralı deney parametreleri (3 mm tanecik boyutu, 15 MPa sıkıştırma basıncı ve %100 fındık kabuğu) kullanılması durumunda ulaşılmıştır ve bu parametreler kullanılarak elde edilen Shatter değeri %99,81 olarak belirlenmiştir. En düşük Shatter indeksi değerine ise beklenildiği gibi hiç katkı maddesi kullanılmadan 3 mm tanecik boyutlu linyit kömürü ve 15 MPa sıkıştırma basıncı kullanılması durumunda ulaşılmıştır ve bu parametreler kullanılarak elde edilen Shatter indeksi değeri %94,38’dir. Fındık kabuğu ve linyit kömürünün her ikisinin birlikte kullanıldığı denemelerde ise en yüksek Shatter indeksi değerine sahip olan briket Çizelge 10.12’de verilmiş olan 6 deney numaralı brikettir ve bu briketin Shatter indeksi değeri %99,70 olarak belirlenmiştir.

10.7.2.4 Fındık Kabuğu ile yapılan çalışmaların, briketlerin nem miktarı yüzdesine etkisi

Linyit kömürünün fındık kabuğu katkı maddesi kullanılarak yapılan denemeler sonucunda elde edilen briketlerin nem miktarı yüzdeleri Çizelge 10.12’de verilmiş olup, elde edilen verilere merkezi kompozit tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak Design Expert programı yardımıyla yapılan Anova analiz sonuçları 10.14’te verilmiştir. Anova analizi sonuçlarından briketlerin nem miktarı yüzdelerinin %96,16 doğrulukta lineer modele uyduğu belirlenmiştir.

Çizelge 10.14 Fındık kabuğu kullanılarak elde edilen briketlerin nem miktarı verilerinin Anova analizi sonuçları

Cevap 2	NEM %					
Tepki Yüzeyi Lineer Model İçin ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karaler toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri Prob > F	
Kaynak						
Model	0,30	3	0,099	133,67	< 0,0001	Önemli
A-Tanecik boyutu	0,00016	1	0,00016	0,21	0,653	
B-Katkı maddesi	0,30	1	0,30	399,67	< 0,0001	
C-Sıkıştırma basıncı	0,0008	1	0,0008	1,13	0,303	
Artık	0,012	16	0,0007			
Uyum Eksikliği	0,010	11	0,001	2,70	0,142	Önemli
Hata	0,0017	5	0,00034			
Düzeltilmiş Toplam	0,31	19				
Standart Sapma	0,027		R²	0,9616		

Linyit kömürünün fındık kabuğu katkı maddesi kullanılarak yapılan briketleme denemelerinde elde edilen briketlerin nem miktarı yüzdeleri verilerine yapılan Anova analizi sonucunda model denklem ve her bir deneysel parametre için p-değerleri belirlenmiştir. Çizelge 10.14'te Model denklemin p-değerinin 0,0001'den küçük olduğu görülmektedir ve bu değer modelin doğrulunun bir göstergesidir. Deney parametrelerinin her birinin p-değerleri ayrı ayrı incelendiğinde, tanecik boyutu, katkı maddesi miktarı ve sıkıştırma basıncı parametrelerinin p-değerleri sırasıyla 0,653, <0,0001 ve 0,303 olarak belirlenmiştir. Briketlerin nem yüzdesi üzerinde, çay atığı kullanılarak elde edilen briketleme sonuçlarında da gözlemlendiği gibi, tanecik boyutu ve sıkıştırma basıncının etkili olmadığı, en etkili parametrenin katkı maddesi miktarı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

10.7.2.5 Fındık Kabuğu ile Yapılan Çalışmaların Nem Miktarı Yüzdesinin Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi

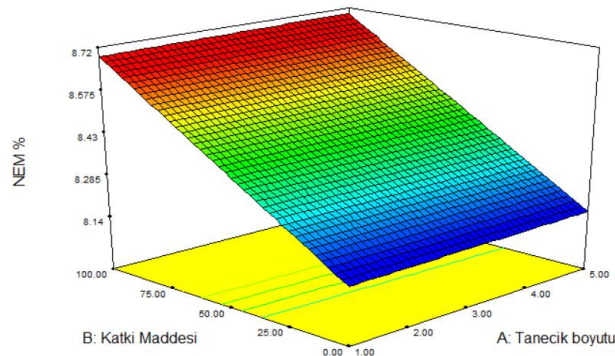
Merkezi birleşik tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak Design Expert programı yardımıyla linyit kömürünün fındık kabuğu katkı maddesi kullanılması sonucu yapılan

denemeler sonucunda elde edilen briketlerin nem yüzdeleri verilerinin matematiksel modeli eşitlik 10.6'da verilmiştir.

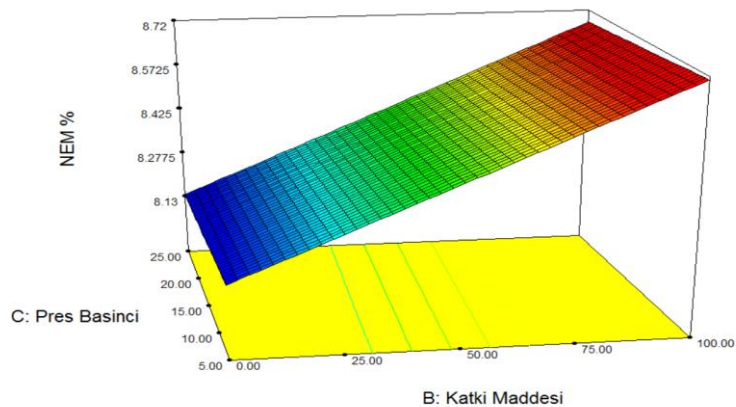
$$\begin{aligned} \text{NEM\% 2} = & +8,16314 \\ & +(3,125 \cdot 10^{-3} \cdot \text{TB}) \\ & +(5.45 \cdot 10^{-3} \cdot \text{KM}) \\ & -(1.45 \cdot 10^{-3} \cdot \text{PB}) \end{aligned} \quad (10.6)$$

10.7.2.6 Fındık Kabuğu ile Yapılan Briketleme Çalışmalarında Deneysel Parametrelerin Briketlerin Nem Miktarı Yüzdesi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Katkı maddesi olarak fındık kabuğu kullanılarak linyit kömürü briketleme çalışmalarında merkezi birleşik tasarım optimizasyon programı kullanılarak elde edilen briketlerin, briketleme parametrelerinin nem miktarına karşı grafiği Design Expert programı kullanılarak grafik edilmiş ve elde edilen grafikler Şekil 10.14'te verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 10.14 Fındık kabuğu katkı maddesi için briketleme parametrelerinin % nem miktarı üzerine etkisi

Şekil 10.14 a ve b’den açıkça görüldüğü gibi artan tanecik boyutu ve sıkıştırma basıncıyla briketlerin nem miktarında önemli bir değişiklik gözlemlenmemektedir. Bunun yanında grafiklerden görüldüğü üzere katkı maddesi miktarı arttıkça briketlerin nem miktarı artmaktadır ve buna fındık kabuğunun nem miktarının linyit kömürünün nem miktarından yüksek olmasının sebep olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 10.11’de verilen deney sistemi kapsamında yapılan briketleme çalışmaları sonucunda elde edilen briketlerin nem yüzdeleri Çizelge 10.12’de verilmiş olup en yüksek nem yüzdesine 10 numaralı deney yani %100 fındık kabuğu, 3 mm tanecik boyutu ve 15 MPa sıkıştırma basıncı kullanılması durumunda ulaşılmıştır. Bu parametreler kullanılarak elde edilen briketin nem yüzdesi değeri %8,64 olarak belirlenmiştir. En düşük nem içeriğine sahip olan briket ise, %100 linyit kömürü, 3 mm tanecik boyutu ve 15 MPa sıkıştırma basıncı kullanılması durumunda elde edilmiştir. Fındık kabuğunun ve linyit kömürünün her ikisinin birlikte bulunduğu briketlerde ise en yüksek ve en düşük nem miktarlarına sırasıyla Çizelge 10.12’de verilmiş olan 6 ve 2 numaralı deney parametreleri kullanılması sonucunda ulaşılmıştır. Briketleme çalışmaları sonucunda edilen en yüksek ve en düşük nem miktarı sırasıyla %8,59 ve %8,27 olarak belirlenmiştir.

10.7.2.7 Fındık Kabuğu ile Yapılan Çalışmaların % Kül Miktarı Sonuçları

Katkı maddesi olarak fındık kabuğu kullanılarak elde edilen briketlerin kül miktarı yüzdeleri Çizelge 10.12’de verilmiş olup, elde edilen verilere merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak Design Expert programı yardımıyla yapılan Anova analiz sonuçları Çizelge 10.15’te verilmiştir. Anova analizi sonuçlarından briketlerin deneysel parametrelerle kül yüzde değişimlerinin %96,14 doğrulukta lineer modele uyduğu belirlenmiştir.

Çizelge 10.15 Fındık kabuğu kullanılarak elde edilen briketlerin kül miktarı verilerinin Anova analizi sonuçları

Cevap 3	% KÜL MİKTARI					
Tepki Yüzeyi Lineer Model İçin ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karalar toplamı - Tip III]						
Kaynak	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri Prob > F	
Model	16,59	3	5,53	132,93	< 0,0001	önemli
A-Tanecik boyutu	0,00012	1	0,00012	0,0029	0,9577	
B-Katkı maddesi	16,59	1	16,59	398,78	< 0,0001	
C-Sıkıştırma basıncı	0,00024	1	0,00024	0,0057	0,9404	
Artık	0,67	16	0,042			
Uyum Eksikliği	0,66	11	0,060	40,53	0,0004	önemli
Hata	0,0074	5	0,0015			
Düzeltilmiş Toplam	17,26	19				
Standart Sapma	0,20		R ²	0,9614		

Deneyssel parametrelerin kül miktarı üzerine etkilerini belirlemek amacıyla yapılan Anova analizi sonucunda deneyssel parametrelerin her birinin p-değerleri ayrı ayrı incelendiğinde, tanecik boyutu, katkı maddesi miktarı ve sıkıştırma basıncı parametrelerinin p değerleri sırasıyla 0,9577, <0,0001 ve 0,9404 olarak belirlenmiştir. Merkezi kompozit tasarım kullanılarak yapılan deney planı doğrultusunda elde edilen briketlerin kül miktarı yüzdesi üzerinde tanecik boyutu ve sıkıştırma basıncının etkili olmadığı, katkı maddesi miktarının ise briketlerin kül yüzdesini önemli ölçüde etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Buna ek olarak Anova analizi sonucunda elde edilen modelin p-değerinin 0,001'den küçük olması modelin doğrulunun bir ispatıdır.

10.7.2.8 Fındık Kabuğu Kullanılarak Elde Edilen Briketlerin %Kül Miktarı Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi

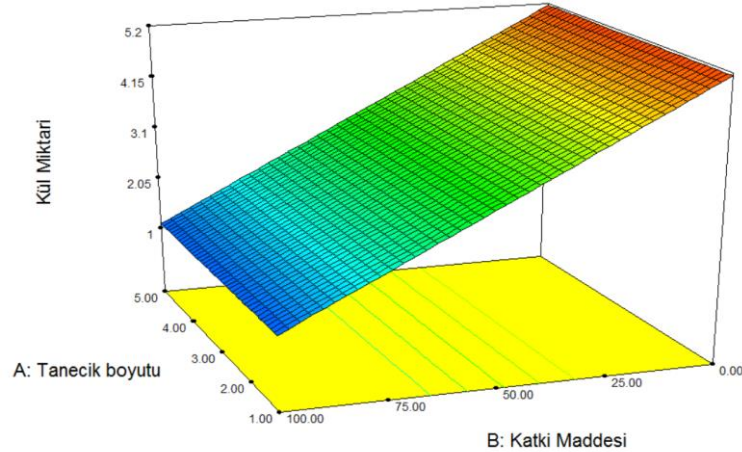
Merkezi birleşik tasarım kullanılarak elde edilen briketlerin kül miktarı yüzdesinin deney parametreleriyle değişiminin matematiksel modeli Design Expert programı kullanılarak belirlenmiş ve model denklem eşitlik 10.7'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
\%K\ddot{U}L \text{ MİKTARI } 2 = & +5,16297 \\
& +(2,75 \cdot 10^{-3} \cdot TB) \\
& -(0,040735 \cdot KM) \\
& -(7,75 \cdot 10^{-4} \cdot PB)
\end{aligned}
\tag{10.7}$$

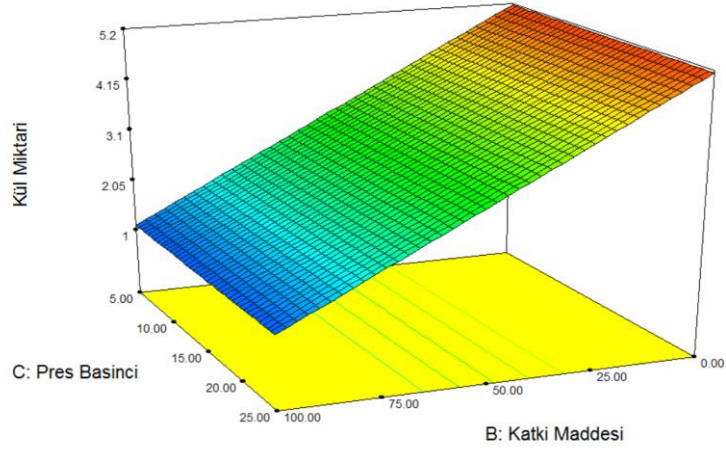
Matematiksel modelde her bir parametrenin katsayısı parametrelerin kül miktarı üzerinde etki değeri göstermektedir. Matematiksel modelden de görülebileceği gibi tanecik boyutu ve sıkıştırma basıncının katsayısı, katkı maddesinin katsayısı yanında ihmal edilebilecek seviyede küçüktür ve buradan da kül miktarı üzerinde en etkili parametrenin katkı maddesi miktarı olduğu açıkça görülmektedir.

10.7.2.9 Fındık Kabuğu İle Yapılan Briketleme Çalışmalarında Deneysel Parametrelerin Briketlerin %Kül Miktarı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Katkı maddesi olarak fındık kabuğu kullanılarak linyit kömürü briketleme çalışmalarında merkezi birleşik tasarım optimizasyon programı kullanılarak elde edilen briketlere, tanecik boyutu, sıkıştırma basıncı ve katkı maddesi miktarının kül miktarı yüzdeleri üzerinde etkileri Şekil 10.15'te grafik edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 10.15 Fındık kabuğu katkı maddesi için briketleme parametrelerinin % kül miktarı üzerine etkisi

Şekil 10.15 a ve b’den açıkça görüldüğü gibi tanecik boyutu ve sıkıştırma basıncı parametrelerinin briketlerin kül miktarı üzerinde önemli etkileri bulunmamaktadır yani bu parametrelerdeki değişim briketlerin kül miktarında önemli ölçüde değişimlere sebep olmamaktadır. Çizelge 10.12’de verilmiş olan kül miktarı yüzdelere bakıldığında katkı maddesi ve tanecik boyutu parametreleri sabit tutularak, sıkıştırma basıncının ise 5 MPa, 15 MPa ve 25 MPa (Deney No: 9, 7, 11) değerleri kullanılarak yapılan briketleme çalışmaları sonucunda elde edilen kül miktarı yüzdeleri sırasıyla %3,09, %3,04 ve %3,1 olarak belirlenmiştir. Yapılan Anova analizi sonucunda artan sıkıştırma basıncının briketlerin kül miktarı üzerinde etkili parametre olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Briketlerin kül miktarına tanecik boyutunun etkisinin belirlenmesi amacıyla yapılan denemelerde sıkıştırma basıncı ve katkı maddesi miktarı sabit tutularak 1 mm, 3 mm ve 5 mm (Deney No: 16, 14, 13) tanecik boyutundaki numunelerle denemeler yapılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda elde edilen briketlerin kül yüzdeleri sırasıyla %3,09, %3,10 ve %3,08 olarak belirlenmiştir. Farklı tanecik boyutları kullanılarak elde edilen briketlerin kül miktarı yüzdelерinin hemen hemen aynı değerde olması tanecik boyutunun da kül miktarı üzerinde etkili bir parametre olmadığına göstergesidir ve bu durum Şekil 10.15 a’da açıkça görülmektedir.

Yapılan denemeler sonucunda katkı maddesi miktarı arttıkça briketlerin kül miktarının azaldığı gözlemlenmiş ve briketlerin kül miktarı üzerinde en etkili parametrenin katkı

maddesi miktarı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Katkı maddesi miktarı arttıkça briketlerin kül miktarının azalmasının sebebinin fındık kabuğu katkı maddesinin kül miktarının linyit kömürünün kül miktarından düşük olması olduğu düşünülmektedir. Şekil 10.15 a ve b'den de katkı maddesi miktarı arttıkça briketlerin kül miktarındaki azalma açıkça görülmektedir.

Çizelge 10.12'de verilmiş olan briketlerin kül yüzdeleri verileri bunu desteklemektedir. Tanecik boyutunun ve sıkıştırma basıncının sırasıyla 3 mm ve 15 MPa'da sabit tutularak %0, %50 ve %100 fındık kabuğu katkı maddesi kullanılarak yapılan denemeler sonucunda bu katkı maddesi yüzdeleri için bulunan kül yüzdeleri sırasıyla %5,55, %3,04 ve %0,68 olarak belirlenmiş ve katkı maddesi miktarının %50 artması durumunda linyit kömürü briketine oranla kül miktarında yaklaşık %45'lik bir azalma gözlemlenmiştir.

Linyit kömürüne ve fındık kabuğuna yapılan kısa analizler sonucunda elde edilen kül miktarları değerleri Şekil 10.15' te verilmiş olup bu değerler sırasıyla %14 ve %3,21 olarak belirlenmiştir. Linyit kömürünün ve fındık kabuğunun kısa analiz sonuçları baz alınarak, %50 katkı maddesi ve %50 linyit kömürü kullanılması sonucu, briketlerin kül yüzdeleri stokiometrik olarak yaklaşık %8,61 olması gerekirken bu şartlarda elde edilen briketlerin kül miktarının bu değerin yaklaşık 2,83 kat altında olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bunun sebebinin briketleme çalışmalarında kullanılan asetik asidin (CH_3COOH) briketlerin kül içeriğinde bulunan Al_2O_3 , CaO ve Fe_2O_3 gibi bileşiklerle reaksiyon vererek asetatlı bileşikler ve su oluşturması sonucu külün yapısında değişikliklere yol açarak, kül miktarının azalması yönünde etki etmesi olduğu düşünülmektedir. Bu bileşiklerin asetik asit ile verdiği reaksiyonlar 10.7.1.9 numaralı bölümde verilmiştir.

10.7.2.10 Fındık Kabuğu ile Yapılan Çalışmaların Isıl Değer Verileri

Katkı maddesi olarak fındık kabuğu kullanılarak elde edilen briketlerin ısı değerleri Çizelge 10.12'de verilmiş olup, elde edilen verilere merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak yapılan Anova analiz sonuçları Çizelge 10.16'da verilmiştir. Anova analizi sonuçlarından briketlerin deneysel parametrelerle ısı değer değişimlerinin %96,64 doğrulukta lineer modele uyduğu belirlenmiştir.

Çizelge 10.16 Fındık kabuğu kullanılarak elde edilen briketlerin ısı değeri verilerinin Anova analizi sonuçları

Cevap 4	ISIL DEĞER (Mj/Kg)					
Tepki Yüzeyi Lineer Model İçin ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karalar toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri	
Kaynak					Prob > F	
Model	24,16	3	8,05	153,40	< 0,0001	önemli
A-Tanecik boyutu	0,18	1	0,18	3,34	0,0863	
B-Katkı maddesi	23,97	1	23,97	456,63	< 0,0001	
C-Sıkıştırma basıncı	0,012	1	0,012	0,22	0,6430	
Artık	0,84	16	0,053			
Uyum Eksikliği	0,75	11	0,068	3,66	0,0817	önemli
Hata	0,093	5	0,019			
Düzeltilmiş Toplam	25	19				
Standart Sapma	0,23		R²	0,9664		

Deneysel parametrelerin ısı değeri üzerine etkilerini belirlemek amacıyla yapılan Anova analizi sonucunda Çizelge 10.16'da verilen model denklemin p-değeri incelendiğinde, modelin p-değerinin 0,0001'den düşük olduğu görülmektedir. p- değerini 0,0001'den küçük olması modelin anlamlılığını ve elde edilen modelin verilerle uyumunu göstermektedir. Bunun yanı sıra Çizelge 10.16'da verilen tanecik boyutu, katkı maddesi miktarı ve sıkıştırma basıncı parametrelerinin p-değerlerine bakıldığında bu parametrelerin p-değerlerinin sırasıyla 0,0863, <0,0001 ve 0,6430 olduğu belirlenmiş ve merkezi kompozit tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak yapılan deney planı doğrultusunda fındık kabuğu katkı maddesi kullanılarak elde edilen briketlerin ısı değeri üzerinde, nem ve kül yüzdesi miktarında da olduğu gibi tanecik boyutu ve sıkıştırma basıncının önemli etkilerinin olmadığı, katkı maddesi miktarının ise briketlerin ısı değerini önemli ölçüde etkilediği sonucuna ulaşılmıştır.

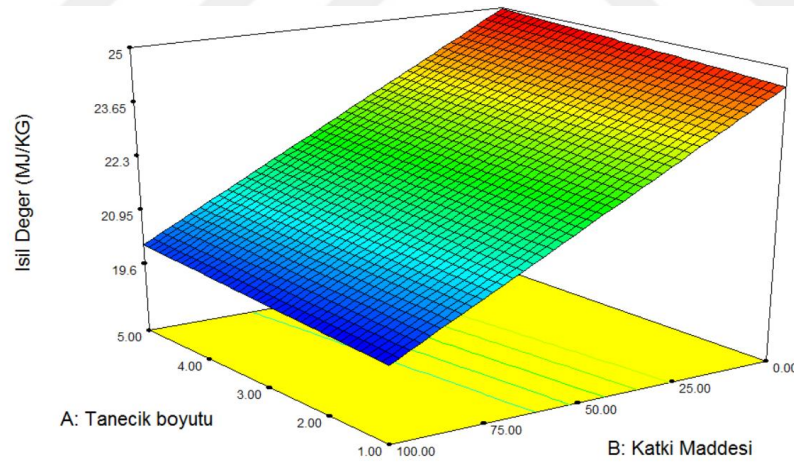
10.7.2.11 Fındık Kabuğu ile Yapılan Briketleme Çalışmaların Isıl Değer Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi

Fındık kabuğu katkı maddeli briketleme çalışmaları için merkezi birleşik tasarım kullanılarak belirlenen deney planı doğrultusunda elde edilen briketlerin ısı değer verilerinin deney parametreleriyle değişiminin matematiksel modeli eşitlik 10.8’de verilmiştir.

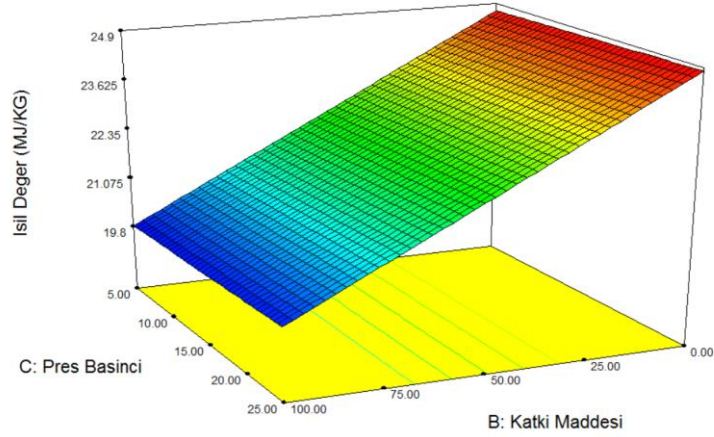
$$\begin{aligned} \text{ISIL DEĞER(Mj/Kg)} &= +24,37318 \\ &+0,10469* TB \\ &-0,048963* KM \\ &+5,4125*10^{-4}*PB \end{aligned} \quad (10.8)$$

10.7.2.12 Fındık Kabuğu ile Yapılan Briketleme Çalışmalarında Deneysel Parametrelerin Briketlerin Isıl Değeri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Fındık kabuğu katkı maddesi kullanılarak, linyit kömürünün katkı maddeli briketleme çalışmalarında merkezi birleşik tasarım optimizasyon programı kullanılarak elde edilen briketlerin ısı değeri üzerine, tanecik boyutu, sıkıştırma basıncı ve katkı maddesi miktarı parametrelerinin etkileri Şekil 10.16’da grafik edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 10.16 Fındık kabuğu katkı maddesi için briketleme parametrelerinin ısı değeri üzerine etkisi

Şekil 10.16 a ve b’den tanecik boyutu ve sıkıştırma basıncının fındık kabuğu katkı maddesi kullanılarak elde edilen briketlerin ısı değeri üzerinde etkili olmadığı açıkça görülmektedir. Bunun yanı sıra katkı maddesi miktarı arttıkça briketlerin ısı değeri azalmaktadır. Bunun sebebi kullanılan katkı maddesinin ısı değerinin linyit kömürünün ısı değerinden düşük olmasıdır ve katkı maddesi miktarı arttıkça briket bünyesinde bulunan ısı değeri düşük bileşen yüzdesi arttığından ısı değeri miktarı da bununla orantılı olarak azalmaktadır.

Yapılan analizler sonucunda en yüksek ısı değere %100 linyit kömürü kullanılması durumunda, en düşük ısı değere ise %100 fındık kabuğu kullanılması sonucunda ulaşılmıştır ve bu briketlere ait ısı değeri miktarları sırasıyla 24,86 Mj/Kg ve 19,84 Mj/Kg olarak belirlenmiştir. Katkı maddeli briketler içerisinde en yüksek ısı değere sahip olan briket Çizelge 10.12’te verilmiş olan 4 numaralı deney parametreleri yani 4 mm tanecik boyutu, %25 katkı maddesi miktarı ve 20 MPa sıkıştırma basıncı kullanılması sonucu elde edilmiştir. Bu parametreler kullanılarak elde edilen briketin sahip olduğu ısı değeri 23,84 Mj/Kg olarak belirlenmiştir. %100 kömür kullanılması durumunda elde edilen briketler ile fındık kabuğu ve kömürün bir arada kullanılması sonucu en yüksek ısı değere sahip olan briket (Çizelge 10.12 Deney No:4) kıyaslandığında, %100 linyit kömürü briketine göre ısı değerinde %4’lük bir azalma olduğu sonucuna ulaşılmıştır. %100 çay atığı ile Çizelge 10.12’de verilen ısı değeri en yüksek olan 4 numaralı deney kıyaslandığında ise

%100 fındık kabuğu briketine göre ise ısı değeri yaklaşık %20,2'lik bir artış olduğu gözlemlenmiştir.

10.7.2.13 Fındık Kabuğu ile Yapılan Çalışmaların Genel Değerlendirilmesi

Linyit kömürünün katkı maddesi olarak fındık kabuğu ile briketlenmesi çalışmalarında optimum tanecik boyutu, katkı maddesi miktarı, sıkıştırma basıncı parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılan deney planı, Design Expert programı yardımıyla merkezi kompozit tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Belirlenen deney planı çerçevesinde elde edilen briketlere Shatter İndeksi, %nem miktarı, %kül miktarı ve ısı değeri analizleri yapılmış ve elde edilen verilerin yine Design Expert programı kullanılarak çözümümleri yapılmıştır. Tüm parametreler ve analiz sonuçları için yapılan çözümleme aralıkları Çizelge 10.17'de verilmiştir.

Çizelge 10.17 Fındık kabuğu katkı maddesi için çözümleme şartları

KISITLAMALAR				
İsim	Hedef	Alt Limit	Üst Limit	Önem
Tanecik boyutu	analiz aralığında	2	4	3
Katkı maddesi miktarı (%)	analiz aralığında	25	75	3
Sıkıştırma basıncı (MPa)	analiz aralığında	50	250	3
Shatter indeksi (%)	analiz aralığında	94,377	99,807	5
Kül miktarı (%)	analiz aralığında	8,165	8,637	5
Nem miktarı (%)	analiz aralığında	4	4,2	5
Isıl değer (Mj/Kg)	analiz aralığında	23,2	24,855	5

Çizelge 10.17'de verilen çözümleme şartları sonucunda elde edilen optimum deney parametreleri ve bu parametreler kullanılarak üretilen briketlere ait Shatter İndeksi, %nem miktarı, %kül miktarı ve ısı değeri analizi sonuçları Çizelge 10.18'de verilmiştir. Çizelge 10.18'den de görüldüğü gibi en iyi briketleme sonuçlarına çay atığı kullanılarak yapılan briketleme çalışmalarında da olduğu gibi 4 mm ve 2 mm tanecik boyutu, %25 katkı maddesi, 10 MPa ve 20 MPa sıkıştırma basıncı kullanılması sonucunda elde edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 10.18 Fındık kabuğu için deney parametrelerinin çözülmesi

	Tanecik Boyutu (mm)	%Katki Maddesi	Pres Basıncı (MPa)	SHATTER	NEM %	% Kül Miktarı	Isıl Değer (Mj/Kg)
1	2	25	10	96,77	8,29	4,14	23,41
2	4	25	10	95,17	8,30	4,15	23,62
3	2	25	20	97,42	8,28	4,14	23,47
4	4	25	20	95,81	8,28	4,14	23,68

Çizelge 10.18’den de görüldüğü gibi çözümleme sonucunda elde edilen optimum parametrelerde her deney sistemi için nem miktarı ve kül miktarı hemen hemen aynıdır. Bu sebeple optimum parametrelerin belirlenmesinde en önemli deney çıktıları briketlerin Shatter indeksi değerleri ve ısı değerleridir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde en yüksek ısı değere 4 mm tanecik boyutu kullanıldığında ulaşılabilmektedir. Bunun yanı sıra en yüksek Shatter indeksi değeri 2 mm tanecik boyutu kullanılması durumunda elde edilebilmektedir.

Çözümleme sonucunda elde edilen optimum parametreler kullanılarak elde edilen 4 mm ve 2 mm tanecik boyutuna ve en yüksek Shatter indeksi değerine sahip briketler kıyaslandığında 2 mm tanecik boyutu kullanılarak elde edilen briketin Shatter indeksinin 4 mm tanecik boyutu kullanılarak elde edilen briketten yaklaşık % 1,7 oranında daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra linyit kömürünün ve özellikle lifli yapısından dolayı katkı maddelerinin öğütülerek küçük tanecik boyutlarına indirilmesinin ekstra briketleme maliyetine sebep olduğu bilinmektedir. Bu sebeple katkı maddesi olarak fındık kabuğu kullanılarak yapılacak olan briketleme çalışmalarında tanecik boyutunun 4 mm kullanılmasının daha uygun olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Çözümleme sonucunda elde edilen en iyi Shatter indeksi ve ısı değere sahip olan 4 mm tanecik boyutu kullanılarak elde edilen briketlerin (Çizelge 10.18’de 2 ve 4 numaralı deneyler) analiz sonuçları karşılaştırıldığında, 4 numaralı deney şartlarında elde edilen briketin Shatter indeksi ve ısı değerinin, 2 numaralı deneyden yaklaşık %0,6 oranında daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra her iki briketin sıkıştırma basınçlarına bakıldığında 4 numaralı deneyin sıkıştırma basıncının 2 numaralı deneyin sıkıştırma basıncından 2 kat fazla olduğu görülmektedir ve 4 numaralı deneyin şartları

kullanılarak elde edilecek briket ekstra sıkıştırma basıncı maliyeti gerektirmektedir. Bu sebeple 2 numaralı deney parametreleri kullanılarak en iyi briket özelliklerine ulaşılabileceği öngörülmektedir.

Sonuç olarak fındık kabuğu katkı maddesi kullanılarak yapılacak olan briketleme çalışmalarında en iyi sonuca 4 mm tanecik boyutu, %25 katkı maddesi ve 10 MPa sıkıştırma basıncı kullanılarak ulaşılabileceği düşünülmektedir. Linyit kömürünün katkı maddesi olarak fındık kabuğu kullanılarak briketlenmesi çalışmalarında, 4 mm tanecik boyutu, %25 katkı maddesi ve 10 MPa sıkıştırma basıncı kullanılarak elde edilen briketin Shatter indeksi, % nem miktarı, % kül miktarı ve ısı değeri analiz sonuçları sırasıyla %95,17, %8,30, %4,15, 23,62 Mj/Kg olarak bulunmuştur.

10.7.3 Kömürün Sığır Kuruğu Bitkisi Kullanılarak Briketlenmesi

Kömürün sığır kuruğu bitkisi kullanılarak briketlenmesi amacıyla yapılacak olan deney planı Design Expert optimizasyon yazılım programı yardımıyla merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak belirlenmiş olup, bu kapsamda belirlenmiş olan deney planı Çizelge 10.19'da verilmiştir.

Çizelge 10.19 Katkı maddesi olarak sığır kuruğu bitkisi kullanılarak yapılan deney planı

Deney Numarası	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3
	A: Tanecik Boyutu (mm)	B: %Katkı Maddesi	C: Sıkıştırma basıncı (MPa)
6	1	50	15
3	2	25	20
5	2	75	10
9	2	25	10
15	2	75	20
1	3	100	15
2	3	50	15
10	3	50	15
12	3	50	15
13	3	50	5
14	3	0	15
17	3	50	15
18	3	50	15
19	3	50	15
20	3	50	25
4	4	25	20
8	4	75	20
11	4	25	10
16	4	75	20
7	5	50	15

Çizelge 10.19'daki deney planı kullanılarak elde edilen briketlere düşme sağlamlığı testi, nem miktarı, kül miktarı ve ısı değeri analizleri yapılmıştır. Linyit kömürünün sığır kuruğu bitkisi katkı maddesi ile briketlenmesi çalışması sonucunda elde edilen briketlere yapılan analiz sonuçları Çizelge 10.20'de verilmiştir.

Çizelge 10.20 Sığır kuyruğu bitkisi briketleme çalışmaları deney sonuçları

Deney Numarası	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Cevap 1	Cevap 2	Cevap 3	Cevap 4
	A:Tanecik Boyutu (mm)	B: Katkı Maddesi %	C: Sıkıştırma basıncı MPa	Shatter %	Nem %	Kül %	Isıl değer (MJ/kg)
6	1	50	15	99,91	8,04	4,49	21,56
3	2	25	20	99,68	8,08	5,12	23,10
5	2	75	10	99,86	7,95	3,78	20,25
9	2	25	10	99,08	8,09	5,08	23,08
15	2	75	20	99,96	7,95	3,49	20,24
1	3	100	15	99,97	7,89	3,08	19,61
2	3	50	15	99,37	8,07	4,51	21,81
10	3	50	15	99,34	8,03	4,62	21,81
12	3	50	15	99,34	8,04	4,55	21,86
13	3	50	5	99,15	8,03	4,51	21,85
14	3	0	15	94,38	8,17	5,55	24,85
17	3	50	15	99,37	8,04	4,54	21,62
18	3	50	15	99,35	8,03	4,65	21,70
19	3	50	15	99,36	8,04	4,50	21,70
20	3	50	25	99,58	8,04	4,98	21,84
4	4	25	20	98,92	8,07	5,28	23,06
8	4	75	20	99,48	7,97	3,83	20,57
11	4	25	10	98,75	8,09	5,20	23,15
16	4	75	10	99,19	7,95	3,80	20,13
7	5	50	15	98,77	8,08	4,38	21,95

10.7.3.1 Sığır Kuruğu Bitkisi ile Yapılan Çalışmaların Shatter İndeksi Sonuçları

Katkı maddesi olarak sığır kuruğu bitkisi kullanılarak elde edilen briketlerin Shatter indeksi sonuçları Çizelge 10.20’de verilmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda Design Expert optimizasyon programı kullanılarak yapılan Anova analiz sonuçları Çizelge 10.21’de verilmiştir. Verilere yapılan Anova analizi sonucunda elde edilen R^2 değeri, sığır kuruğu bitkisi ile yapılan briketlerin Shatter indeksi değerlerinin değişiminin %96,46 doğrulukta lineer modele uyduğunu göstermektedir.

Çizelge 10.21 Sığır kuyruğu bitkisi Shatter indeksi Anova analiz sonuçları

Cevap 1						
	SHATTER İNDEKSİ					
Tepki Yüzeyi Lineer Model için ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karalar toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri	
Kaynak					Prob > F	
Model	2,42	3	0,81	136,07	< 0,0001	Önemli
A-Tanecik boyutu	1,29	1	1,29	217,26	< 0,0001	
B-Katkı maddesi miktarı	0,87	1	0,87	147,67	< 0,0001	
C-Sıkıştırma basıncı	0,26	1	0,26	43,29	< 0,0001	
Artık	0,089	15	0,0059			
Uyum Eksikliği	0,087	10	0,0087	28,38	0,0009	Önemli
Hata	0,0015	5	0,0003			
Standart Sapma	0,077		R ²	0,9646		

Yapılan Anova analizi sonucunda elde edilen modelin p-değerinin 0,001'den küçük olması modelin uyumluluğunun diğer bir göstergesidir. Deneysel parametrelerin p-değerlerine bakıldığında ise sığır kuruğu bitkisinin linyit kömürüyle karıştırılarak briketlenmesi sonucu elde edilen briketlerin Shatter indeksi üzerinde tanecik boyutu (A), katkı maddesi miktarı (B), sıkıştırma basıncı (C) parametrelerinin her birinin önemli etkiye sahip olduğu görülmektedir.

10.7.3.2 Sığır Kuruğu Bitkisi ile Yapılan Çalışmaların Shatter İndeksi Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi

Linyit kömürünün sığır kuruğu bitkisi ile briketlenmesi sonucu elde edilen Shatter indeksi verilerinin matematiksel modeli eşitlik 10.8'de verilmiştir

$$\text{SHATTER 3} = +99,28659$$

$$-0,28350 \cdot \text{TB}$$

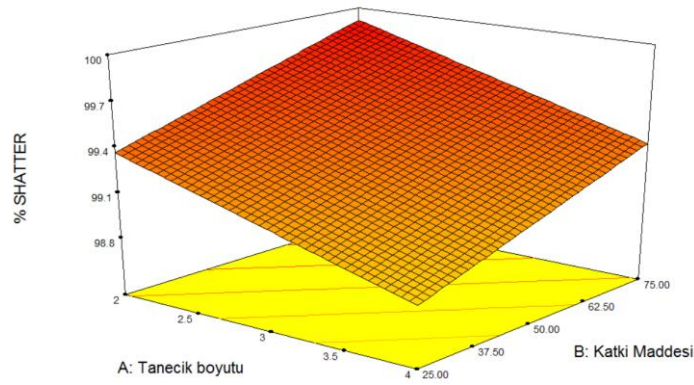
$$+0,010891 \cdot \text{KM}$$

$$+0,025310 \cdot \text{PB}$$

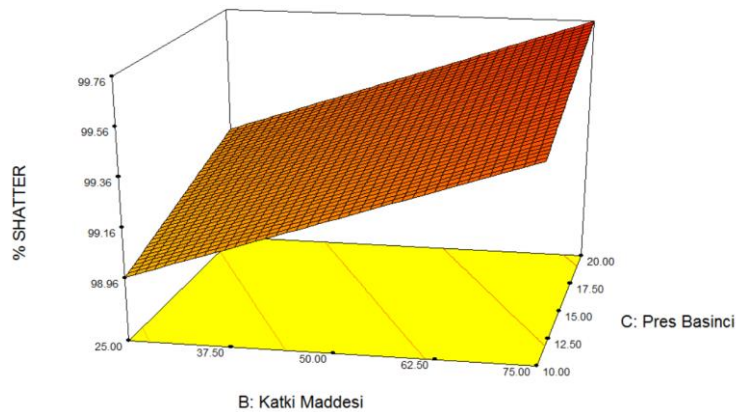
(10.8)

10.7.3.3 Deneysel Parametrelerin Sığır Kuruğu Bitkisi ile Yapılan Briketlerin Shatter İndeksi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Linyit kömürüne çeşitli oranlarda sığır kuruğu bitkisi eklenerek yapılan briketleme çalışmalarında merkezi birleşik tasarım optimizasyon programı kullanılarak elde edilen deney planı doğrultusunda belirlenen Shatter indeksi verileri Design Expert yazılım programı kullanılarak grafik edilmiştir. Şekil 10.17’de elde edilen briketlerin katkı maddesi miktarı, sıkıştırma basıncı ve tanecik boyutu değerlerine karşılık shatter indeksi değişimi grafikleri verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 10.17 Sığır kuruğu katkı maddesi için briketleme parametrelerinin Shatter indeksine etkisi

Şekil 10.17 a ve b'deki grafiklerde katkı maddesi miktarı, tanecik boyutu ve sıkıştırma basıncı parametreleriyle Shatter indeksi değişimi verilmiştir ve şekillerden katkı maddesi miktarı arttıkça briketlerin Shatter indeksi değeri yani düşme dayanımlarının arttığı açıkça görülmektedir. Bunun sebebinin katkı maddesi miktarı arttıkça, briket içeriğindeki katkı maddesinin yapısında bulunan polimer özellikli (lignin, hemiselüloz ve selüloz) yapıların miktarının artması ve bunun sonucu tanecikler arasındaki bağların daha da güçlenmesi olduğu düşünülmektedir. Böylelikle artan katkı maddesi miktarı briketlerin düşme dayanımlarını olumlu yönde etkilemektedir.

Şekil 10.17 a'dan, diğer katkı maddelerinde de olduğu gibi tanecik boyutundaki artışın, sığır kuruğu kullanılarak elde edilen briketlerin Shatter indeksi üzerinde olumsuz etkiye sahip olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, daha öncede bahsedildiği gibi artan tanecik boyutlarının briketlerin boşluk hacminin artmasına neden olmasıdır ve bu sebeple daha kırılğan yapıda briketler elde edilmektedir.

Sığır kuruğu katkı maddesi kullanılarak yapılan briketleme çalışmalarında, en yüksek shatter indeksi değerine 1 mm tanecik boyutu, 15 MPa sıkıştırma basıncı ve %50 katkı maddesi kullanılması durumunda ulaşılmıştır ve bu parametreler kullanılarak elde edilen Shatter değeri %99,91 olarak belirlenmiştir. En düşük Shatter indeksi değerine ise beklenildiği gibi hiç katkı maddesi kullanılmadan 3 mm tanecik boyutlu linyit kömürü ve 15 MPa sıkıştırma basıncı kullanılması durumunda ulaşılmıştır ve bu parametreler kullanılarak elde edilen Shatter indeksi değeri %94,38'dir. Yapılan denemeler sonucunda sığır kuruğu bitkisi katkı maddesi kullanılması durumunda Shatter indeksi değerinin %100 kömür kullanılarak elde edilen briketeye göre yaklaşık %6 oranında arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

10.7.3.4 Sığır Kuruğu Bitkisi ile Yapılan Çalışmaların Briketlerin Nem Miktarı Yüzdesine Etkisi

Linyit kömürünün katkı maddesi olarak sığır kuruğu bitkisi kullanılarak briketlenmesi sonucu oluşan briketlerin nem miktarı analizleri sonucunda elde edilen veriler Çizelge 10.20'de verilmiş olup, elde edilen verilere Design Expert programı kullanılarak yapılan Anova analiz sonuçları Çizelge 10.22'de verilmiştir. Denemeler sonucunda elde edilen verilere uygulanan Anova analizi sonuçları, briketlerin deneysel parametrelere bağlı

olarak nem miktarı değişiminin %93,11'lik doğrulukta lineer modele uyduğunu göstermektedir.

Çizelge 10.22 Sığır kuruğu bitkisi kullanılarak elde edilen briketlerin nem miktarı verilerinin Anova analizi sonuçları

Cevap 2	% NEM					
Tepki Yüzeyi Lineer Model İçin ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karalar toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri	
Kaynak					Prob > F	
Model	0,056	3	0,019	67,62	< 0,0001	Önemli
A-Tanecik boyutu	0,0006	1	0,0006	2,28	0,1517	
B-Katkı maddesi	0,055	1	0,055	200,54	< 0,0001	
C-Sıkıştırma basıncı	$9 \cdot 10^{-6}$	1	$9 \cdot 10^{-6}$	0,033	0,8586	
Artık	0,004	15	0,000273986			
Uyum Eksikliği	0,003	10	0,0003	1,68	0,2943	Önemli
Hata	0,0009	5	0,00018			
Düzeltilmiş Toplam	0,06	18				
Standart Sapma	0,017		R²	0,9311		

Sığır kuruğu katkı maddesi kullanılarak elde edilen briketlerin nem analizi verilerine yapılan yapılan Anova analizi sonucunda deneysel parametrelerin her birinin p-değerleri ayrı ayrı incelendiğinde, tanecik boyutu, katkı maddesi miktarı ve sıkıştırma basıncı parametrelerinin p-değerleri sırasıyla 0,1517, <0,0001 ve 0,8586 olarak belirlenmiştir. Briketlerin nem yüzdesi üzerinde tanecik boyutu ve sıkıştırma basıncının, katkı maddesi miktarı kadar etkili olmadığı yani en etkili parametrenin katkı maddesi miktarı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca yapılan Anova analizi sonucunda modelin p-değeri belirlenmiş ve bu değerin 0.0001'den küçük olduğu tespit edilmiştir. Modelin p-değerinin 0,0001'den küçük olması modelin doğruluğunun verilerle uyumunun bir göstergesidir.

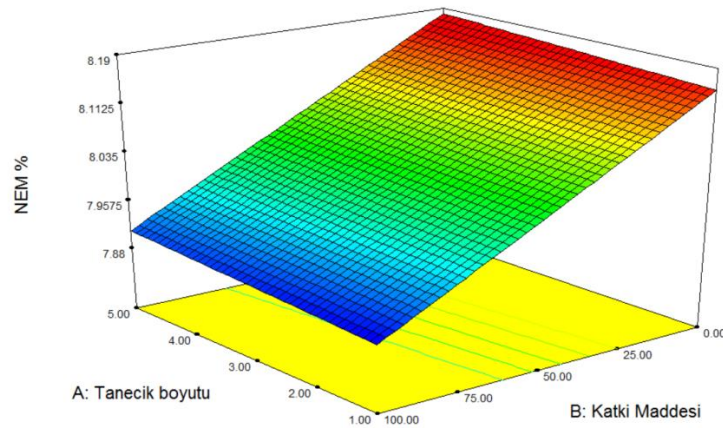
10.7.3.5 Sığır Kuruğu Bitkisi İle Yapılan Briketleme Çalışmaların Nem Miktarı Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi

Linyit kömürünün sığır kuruğu katkı maddesi kullanılarak yapılan briketleme çalışmaları sonucu elde edilen briketlerin nem miktarı yüzdesi verilerinin matematiksel modeli Design Expert optimizasyon programı yardımıyla belirlenmiş ve model denklem eşitlik 10.10'da verilmiştir.

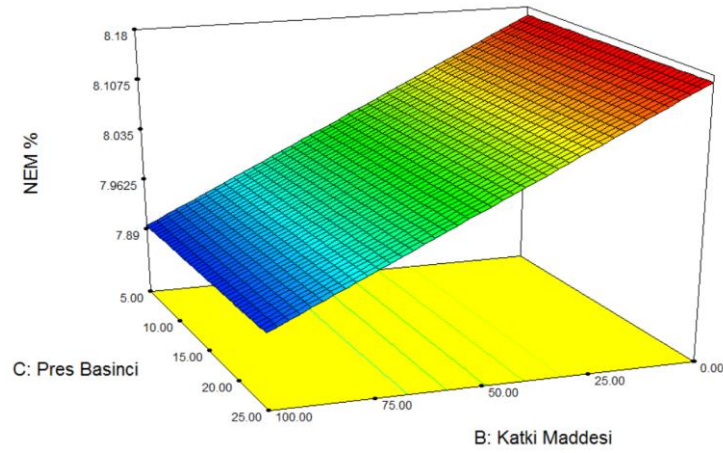
$$\begin{aligned} \% \text{ NEM } 3 = & +8,14814 \\ & +6,25 \cdot 10^{-3} \cdot \text{TB} \\ & -2,73071 \cdot 10^{-3} \cdot \text{KM} \\ & +1,5 \cdot 10^{-4} \cdot \text{PB} \end{aligned} \quad (10.10)$$

10.7.3.6 Sığır Kuruğu Bitkisi ile Yapılan Briketleme Çalışmalarında Deneysel Parametrelerin Briketlerin Nem Miktarı Yüzdesi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Linyit kömürüne çeşitli oranlarda sığır kuruğu katkı maddesi eklenerek yapılan briketleme çalışmaları sonucunda elde edilen nem miktarı yüzdesi verileri Design Expert programı kullanılarak grafik edilmiştir. Şekil 10.18'de elde edilen briketlerin katkı maddesi miktarı, sıkıştırma basıncı ve tanecik boyutu değerlerine karşılık shatter indeksi değişimi grafikleri verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 10.18 Sığır kuruğu katkı maddesi için briketleme parametrelerinin % nem miktarı üzerine etkisi

Şekil 10.18 a ve b’de açıkça görüldüğü gibi tanecik boyutu ve sıkıştırma basıncı parametrelerindeki değişim briketlerin nem miktarında herhangi bir değişikliğe sebep olmamaktadır. Bunun yanı sıra fındık kabuğu katkı maddesinin aksine briketlerdeki sığır kuruğu katkı maddesi yüzdesi arttıkça briketlerin nem miktarı azaldığı gözlemlenmektedir. Bunun sebebinin sığır kuruğu katkı maddesinin nem miktarının, linyit kömürünün nem miktarından düşük olmasıdır.

10.7.3.7 Sığır Kuruğu Bitkisi ile Yapılan Çalışmaların % Kül Miktarı Sonuçları

Briketlerde aranan en önemli özelliklerden bir tanesi yanma sonucu oluşan kül miktarıdır. Yanma sonucu oluşan külün bertaraf edilmesi zor ve çevre kirliliğine sebep olmasından kaynaklı briket yapısında bulunan kül miktarının düşük olması istenmektedir. Bu amaçla bu çalışmada linyit kömürüne kıyasla düşük kül miktarına sahip sığır kuruğu katkı maddesi kullanılarak briketlerin kül yüzdesi değişimi incelenmiştir. Farklı tanecik boyutu, katkı maddesi, sıkıştırma basıncı kullanılarak yapılan deneyler sonucunda elde edilen briketlerin kül miktarı ASTM D 3174-12 standardına uygun olarak belirlenmiş ve elde edilen verilere Anova analizi yapılmıştır. Verilerin Anova analizi sonuçları Çizelge 10.23’te verilmiştir.

Çizelge 10.23 Sığır kuruğu kullanılarak elde edilen briketlerin kül miktarı verilerinin Anova analizi sonuçları

Cevap 3	% KÜL MİKTARI					
Tepki Yüzeyi Kuadratik Model için ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karaler toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri Prob > F	
Kaynak						
Model	6,20	3	2,07	87,47	< 0,0001	önemli
A-Tanecik boyutu	0,11	1	0,011	0,47	0,5034	
B-Katkı maddesi	6,14	1	6,14	260,12	< 0,0001	
C-Sıkıştırma basıncı	0,043	1	0,043	1,82	0,1977	
Artık	0,35	15	0,024			
Uyum Eksikliği	0,34	10	0,034	8,98	0,0129	önemli
Hata	0,019	5	0,00038			
Standart Sapma	0,15		R ²	0,9459		

Sığır kuruğu katkı maddesi kullanılarak yapılan linyit kömürü briketleme çalışmaları sonucunda belirlenen kül yüzdesi analizi sonucu elde edilen verilerin Anova analizi sonucunda, briketlerin kül miktarının, tanecik boyutu, sıkıştırma basıncı ve katkı maddesi miktarıyla değişiminin R² değeri baz alınarak %94,59 doğrulukta lineer modele uyduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan Anova analizi sonucunda deneysel parametrelerin her birinin p-değeri ayrı ayrı incelendiğinde tanecik boyutu, katkı maddesi miktarı ve sıkıştırma basıncı parametrelerinin p-değerleri sırasıyla 0,5034, < 0,0001, 0,1977 olarak belirlenmiştir. p-değeri verilerine göre briketlerin kül miktarı üzerinde, tanecik boyutu ve sıkıştırma basıncının etkisinin, katkı maddesinin miktarının etkisinin yanında ihmal edilebilir seviyede olduğu yani briketlerin kül miktarı üzerinde en etkili parametrenin katkı maddesi miktarı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

10.7.3.8 Sığır Kuruğu Bitkisi Kullanılarak Elde Edilen Briketlerin %Kül Miktarı Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi

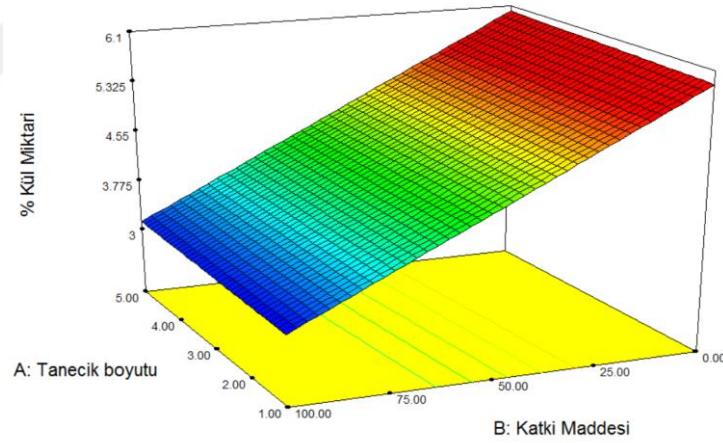
Merkezi birleşik tasarım kullanılarak, katkı maddesi olarak sığır kuruğu kullanılması sonucu elde edilen briketlerin kül miktarı yüzdesinin deney parametreleriyle değişiminin

matematiksel modeli Design Expert programı kullanılarak belirlenmiş ve elde edilen model eşitlik 10.11’de verilmiştir.

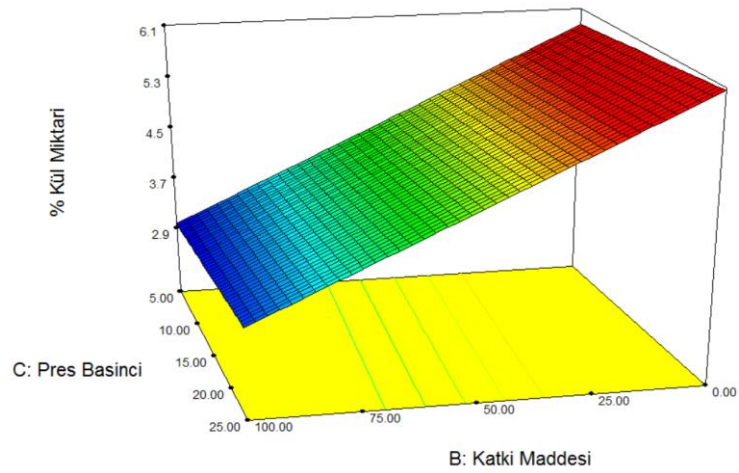
$$\begin{aligned}\%KÜL MİKTARI\ 3 = & +5,72681 \\ & +0,026344*TB \\ & -0,028877*KM \\ & +0,010359*PB\end{aligned}\quad (10.11)$$

10.7.3.9 Sığır Kuruğu Bitkisi ile Yapılan Briketleme Çalışmalarında Deneysel Parametrelerin Briketlerin %Kül Miktarı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Merkezi birleşik tasarım yöntemi kullanılarak, linyit kömürüne çeşitli oranlarda sığır kuruğu bitkisi eklenerek yapılan briketleme çalışmaları sonucunda elde edilen briketlerin kül miktarı yüzdesi verileri Design Ekspert programı kullanılarak Şekil 10.19’de grafik edilmiştir. Şekil 10.19 a ve b’de verilen grafikler briketlerin katkı maddesi miktarı, sıkıştırma basıncı ve tanecik boyutu değerlerine karşılık kül miktarı yüzdesi değişimini vermektedir.



(a)



(b)

Şekil 10.19 Sığır kuruğu katkı maddesi için briketleme parametrelerinin % kül miktarı üzerine etkisi

Briketleme denemeleri sonucu elde edilen veriler kullanılarak çizilen grafiklerden (Şekil 10.19 a ve b) sıkıştırma basıncı ve tanecik boyutu parametrelerinin katkı maddesi parametresine kıyasla parametresindeki briketlerin kül miktarında önemli bir değişime sebep olamadığı açıkça görülmektedir.

Briketlerin kül yüzdeleri üzerine sıkıştırma basıncının etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan, katkı maddesi miktarının ve tanecik boyutunun sırasıyla %50 ve 3 mm değerlerinde değerinde sabit tutularak, 5 MPa, 15 MPa ve 25 MPa briketleme basınçlarında yapılan denemeler sonucunda elde edilen kül miktarları sırasıyla %4,51, %4,54 ve %4,98 olarak belirlenmiştir. Buradan da sıkıştırma basıncının briketlerin kül miktarında önemli değişikliklere sebep olmadığı açıkça görülmektedir.

Şekil 10.19 a'dan tanecik boyutu arttıkça briketlerin kül miktarında herhangi bir değişiklik olmadığı açıkça görülmektedir. Briketlere tanecik boyutunun etkisini incelemek için yapılan denemelerde 1 mm, 3 mm ve 5 mm tanecik boyutları kullanılması durumunda elde edilen kül miktarı yüzdeleri sırasıyla %4,49, %4,54 ve %4,38 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerdende tanecik boyutunun kül miktarı üzerinde önemli etkileri olmadığı açıkça görülmektedir.

Şekil 19 b'den artan katkı maddesi miktarıyla briketlerin kül miktarının azaldığı görülmektedir ve bu azalış sığır kuruğu katkı maddesinin kül miktarının, linyit kömürünün

kül miktarından düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Katkı maddesi miktarı arttıkça briket bünyesinde bulunan kül miktarı yüksek olan linyit kömürü yüzdesi azalmakta, kül miktarı da buna bağlı olarak azaldığı öngörülmektedir.

Yapılan denemeler sonucunda en yüksek kül içeriğine %100 linyit kömürü kullanılması sonucu ulaşılmış ve en düşük kül içeriğine %100 sığır kuruğu kullanılması sonucunda ulaşılmıştır. Linyit kömürüne ve sığır kuruğuna yapılan kısa analizler sonucunda elde edilen kül miktarları değerleri sırasıyla %14 ve %5,23 olarak belirlenmiştir. Linyit kömürünün ve çay atığı katkı maddesinin kısa analiz sonuçları baz alınarak, %50 katkı maddesi ve %50 linyit kömürü kullanılması durumunda elde edilen briketlerin stokiometrik olarak kül yüzdeleri yaklaşık %9,61 olması gerekirken bu şartlarda elde edilen briketlerin kül miktarının bu değerin yaklaşık 2 kat altında olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bunun sebebinin briketleme çalışmalarında kullanılan asetik asidin (CH_3COOH) briketlerin kül içeriğinde bulunan Al_2O_3 , CaO ve Fe_2O_3 gibi bileşiklerle reaksiyon vererek asetatlı bileşikler ve su oluşturması sonucu külün yapısında değişikliklere sebep olarak, kül miktarının azalmasına sebep olduğu düşünülmektedir.

10.7.3.10 Sığır Kuruğu Bitkisi ile Yapılan Çalışmaların Isıl Değer Verileri

Linyit kömürünün, sığır kuruğu bitkisi katkı maddesi kullanılarak farklı tanecik boyutu, katkı maddesi miktarı ve sıkıştırma basıncı parametrelerinde, merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak belirlenen deney planı çerçevesinde yapılan briketleme çalışmaları sonucunda elde edilen briketlerin ısı değer verilerine yapılan Anova analizi sonuçları Çizelge 10.24'te verilmiştir. Anova analizi sonucunda elde edilen R^2 değeri baz alınarak, briketlerin tanecik boyutu, katkı maddesi miktarı ve sıkıştırma basıncı parametreleriyle ısı değer değişimlerinin %97,61 doğrulukta lineer modele uyduğu belirlenmiştir.

Çizelge 10.24 Sığır kuruğu bitkisi kullanılarak elde edilen briketlerin ısı değer verilerinin Anova analizi sonuçları

Cevap 4	ISIL DEĞER (Mj/Kg)					
Tepki Yüzeyi Lineer Model İçin ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karalar toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri Prob > F	
Kaynak						
Model	19,71	3	6,57	203,99	< 0,0001	Önemli
A-Tanecik boyutu	0,065	1	0,065	2,02	0,1761	
B-Katkı maddesi	19,64	1	19,64	609,72	< 0,0001	
C-Sıkıştırma basıncı	0,007	1	0,007	0,23	0,6404	
Artık	0,48	15	0,032			
Uyum Eksikliği	0,44	10	0,044	5,41	0,0382	Önemli
Hata	0,041	5	0,0082			
Standart Sapma	0,18		R ²	0,9761		

Deneysel parametrelerin ısı değer üzerine etkilerini belirlemek amacıyla yapılan Anova analizi sonucunda Çizelge 10.24'ten de açıkça görüldüğü gibi modelin p-değerinin 0,0001'den küçük olması deneysel parametrelerle ısı değer değişiminin lineer modele uyduğunun diğer bir kanıtıdır. Deneysel parametrelerin her birinin p-değerleri ayrı ayrı incelendiğinde, tanecik boyutu, katkı maddesi miktarı ve sıkıştırma basıncı parametrelerinin p-değerleri sırasıyla 0,1761, <0,0001 ve 0,6404 olarak belirlenmiştir. Buradan merkezi kompozit tasarım kullanılarak yapılan deney planı doğrultusunda elde edilen briketlerin ısı değeri üzerinde en etkili olan parametrenin katkı maddesi miktarı olduğu bunun yanı sıra tanecik boyutu ve sıkıştırma basıncının briketlerin ısı değeri üzerinde herhangi bir etkiye sahip olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

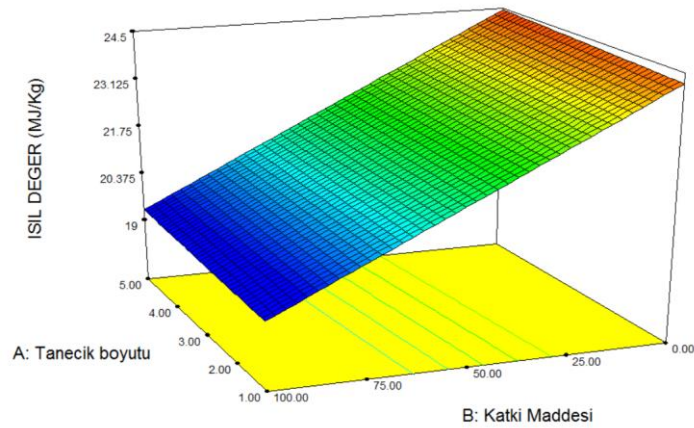
10.7.3.11 Sığır Kuruğu Bitkisi ile Yapılan Briketleme Çalışmalarının Isıl Değer Miktarı Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi

Merkezi birleşik tasarım kullanılarak elde edilen briketlerin ısı değer verilerinin deney parametreleriyle değişiminin matematiksel modeli eşitlik 10.12'de verilmiştir.

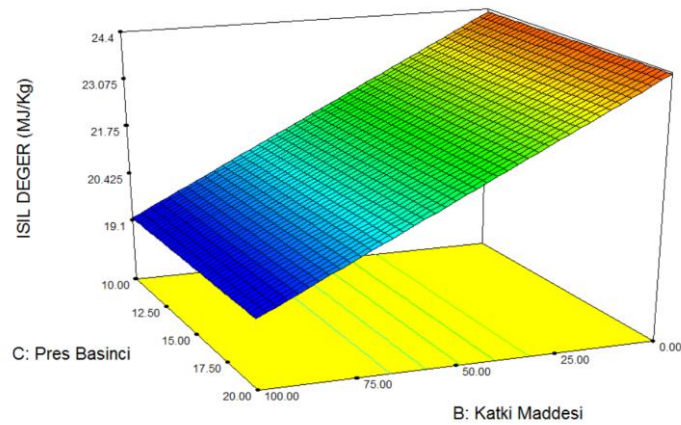
$$\begin{aligned}
 \text{ISIL DEGER (MJ/KG)} = & +24,08798 \\
 & +0,063698 * TB \\
 & -0,051625 * KM \\
 & +4.27843 * 10^{-3} * PB
 \end{aligned}
 \tag{10.12}$$

10.7.3.12 Sığır Kuruğu Bitkisi ile Yapılan Briketleme Çalışmalarında Deneysel Parametrelerin Briketlerin Isıl Değeri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Katkı maddesi olarak sığır kuruğu bitkisi kullanılarak linyit kömürü briketleme çalışmalarında merkezi birleşik tasarım optimizasyon programı kullanılarak elde edilen briketlerin ısı değeri üzerine, tanecik boyutu, sıkıştırma basıncı ve katkı maddesi miktarı parametrelerinin etkileri Şekil 10.20’de grafik edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 10.20 Sığır kuruğu bitkisi katkı maddesi için briketleme parametrelerinin ısı değeri üzerine etkisi

Briketlerde aranan önemli özelliklerden bir tanesi ısı değeri. Şekil 10.20 a ve b'den açıkça görülmektedir ki sığır kuruğu katkı maddesi kullanılarak elde edilen briketlerde tanecik boyutu arttıkça ısı değeri artarken, artan katkı maddesi miktarı ısı değerini azaltmasına sebep olmaktadır. Katkı maddesi arttıkça briketlerin ısı değerinin azalma sebebi, sığır kuruğu katkı maddesinin ısı değerinin linyit kömürünün ısı değerinden düşük olmasıdır ve katkı maddesi miktarı arttıkça briket bünyesinde bulunan ısı değeri düşük bileşenler yüzdesi arttığından ısı değerinde bu doğrultuda azalmaktadır. Bunun yanı sıra sıkıştırma basıncı ve tanecik boyutu parametrelerinin briketlerin ısı değeri üzerinde her hangi bir etkiye sebep olmamaktadır.

Yapılan analizler sonucunda en yüksek ısı değere %100 linyit kömürü kullanılması durumunda, en düşük ısı değere ise %100 sığır kuruğu bitkisi kullanılması durumunda ulaşılmıştır ve bu briketlere ait ısı değeri miktarları sırasıyla 24,85 Mj/Kg ve 19,61 Mj/Kg olarak belirlenmiştir. Katkı maddeli briketler içerisinde en yüksek ısı değere sahip olan briket 4 mm tanecik boyutu, %25 katkı maddesi miktarı ve 10 MPa sıkıştırma basıncı kullanılması sonucu elde edilmiş olup, bu briketin sahip olduğu ısı değeri 23,15 Mj/Kg olarak belirlenmiştir. %100 kömür ve %100 sığır kuruğu kullanılması durumunda elde edilen briketler ile melez briketler kıyaslandığında, %100 linyit kömürü briketine göre ısı değerinde %6'lık bir azalma, %100 çay atığı briketine göre ise ısı değerinde yaklaşık %18'lik bir artış olduğu gözlemlenmiştir.

10.7.3.13 Sığır Kuruğu Bitkisi ile Yapılan Çalışmaların Genel Değerlendirilmesi

Bağlayıcı olarak ağırlıkça % 6 reçine, katkı maddesi olarak sığır kuruğu bitkisi ve ağırlıkça %3 asetik asit ile yapılacak olan briketleme çalışmaları için optimum katkı maddesi miktarı, sıkıştırma basıncı ve tanecik boyutunun belirlenmesi amacıyla merkezi kompozit tasarım optimizasyon programı kullanılarak deney planı oluşturulmuştur. Bu deney planı doğrultusunda elde edilen verilerin, tüm parametreler göz önünde bulundurularak Design Expert programı yardımıyla çözümlemesi yapılmıştır. Tüm parametreler ve analiz sonuçları için yapılan çözümleme aralıkları Çizelge 10.25'te verilmiştir.

Çizelge 10.25 Sığır kuruğu katkı maddesi için çözümleme şartları

KISITLAMALAR				
İsim	Hedef	Alt Limit	Üst Limit	Önem
Tanecik boyutu (mm)	Analiz aralığında	2	4	3
Katkı maddesi miktarı (%)	analiz aralığında	25	75	3
Sıkıştırma basıncı (MPa)	analiz aralığında	10	20	3
Shatter indeksi (%)	analiz aralığında	98,745	99,937	5
Kül miktarı (%)	analiz aralığında	3,07938	6,2187	5
Isıl değer (Mj/Kg)	analiz aralığında	19,6	23,146	5

Çizelge 10.25’de verilen çözümleme şartları sonucunda elde edilen optimum deney parametreleri ve bu parametreler kullanılarak üretilen briketlere ait Shatter İndeksi, % nem miktarı, %kül miktarı ve ısııl değer analizi sonuçları Çizelge 10.26’da verilmiştir. Çizelge 10.26’dan da görüldüğü gibi en iyi briketleme sonuçlarına 4 mm ve 2 mm tanecik boyutu, %25 katkı maddesi, 10 MPa ve 20 MPa sıkıştırma basıncı kullanılması sonucunda elde edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 10.26 Sığır kuruğu bitkisi için deney parametrelerinin çözümlemesi

Deney No	Tanecik Boyutu (mm)	Katkı Maddesi (%)	Sıkıştırma Basıncı (MPa)	SHATTER (%)	NEM %	% Kül Miktarı	Isıl Değer (Mj/Kg)
1	2	25	10	99,08	8,09	5,08	23,08
2	4	25	10	98,75	8,09	5,20	23,15
3	2	25	20	99,68	8,08	5,12	23,10
4	4	25	20	98,92	8,09	5,28	23,06

Linyit kömürünün sığır kuruğu kullanılarak yapılan briketleme çalışmaları sonrasında elde edilen optimum parametrelerde her bir briket için nem ve kül miktarı yüzdeleri hemen hemen aynıdır. Bu sebeple optimum parametrelerin belirlenmesinde en önemli deney çıktıları briketlerin Shatter indeksi değerleri ve ısııl değerleridir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde en yüksek ısııl değere sahip olan briketin 4 mm tanecik boyutu, %25 çay atığı ve 10 MPa sıkıştırma basıncı kullanıldığında ulaşılabildiği görülmektedir. Bunun yanı sıra en yüksek shatter indeksi değerine sahip briket ise 2 mm

tanecik boyutu %25 çay atığı ve 20 MPa sıkıştırma basıncı kullanılması durumunda elde edilebilmektedir.

Çizelge 6.26’de verilmiş olan 2 numaralı deney yapılan denemeler sonucunda en yüksek ısı değere sahip olan briketin verilerini vermekte, 3 numaralı deney ise en iyi Shatter indeksine sahip olan briketin verilerini vermektedir. Her iki deneyin Shatter indeksleri karşılaştırıldığında 3 numaralı deneyin Shatter indeksinin 2 numaralı deneyin Shatter indeksinden %0,94 daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu değer ihmal edilebilir seviyededir. Bu sebeple sığır kuruğu kullanılarak yapılan briketleme denemeleri sonucunda en iyi briketleme parametrelerine sahip olan briketin 4 mm tanecik boyutuna %25 katkı maddesi miktarına ve 10 MPa sıkıştırma basıncına sahip olan briket olduğu öngörülmüştür. Bu briketleme parametreleri kullanılarak elde edilen briketin Shatter indeksi, % nem miktarı, % kül miktarı ve ısı değeri analiz sonuçları sırasıyla 98,745, %8,09, % 5,20, 23,15 Mj/Kg olarak belirlenmiştir.

10.7.4 Linyit Kömürünün Geven Bitkisi Kullanılarak Briketlenmesi

Linyit kömürünün geven bitkisi kullanılarak briketlenmesi çalışmaları Design Expert programı yardımıyla merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak 5 farklı seviyede tanecik boyutu, katkı maddesi miktarı, sıkıştırma basıncı parametreleri kullanılarak yapılmıştır. Fındık kabuğu kullanılarak yapılan denemeler için optimum parametrelerin belirlenmesi amacıyla yapılan deney planı Çizelge 10.27’de verilmiştir.

Çizelge 10.27 Katkı maddesi olarak geven bitkisi kullanılarak yapılan deney planı

STD	Run	Factor 1	Factor 2	Factor 3
		A:Tanecik Boyutu	B: Katkı Maddesi	C: Sıkıştırma basıncı
9	10	1	50	15
7	5	2	75	20
3	12	2	75	10
5	18	2	25	20
1	20	2	25	10
11	1	3	0	15
16	3	3	50	15
12	4	3	100	15
18	9	3	50	15
13	11	3	50	5
20	13	3	50	15
17	14	3	50	15
15	16	3	50	15
19	17	3	50	15
14	19	3	50	25
6	2	4	25	20
8	6	4	75	20
2	8	4	25	10

Çizelge 10.27’da verilen deney planı kullanılarak yapılan denemeler sonucunda elde edilen briketlerin Shatter indeksleri, nem miktarı yüzdeleri, kül miktarı yüzdeleri ve ısıt değerleri belirlenmiştir ve bu değerler Çizelge 10.28’de verilmiştir.

Çizelge 10.28 Geven bitkisi briketleme çalışmaları deney sonuçları

Deney No	Faktör 1 A:Tanecik Boyutu (mm)	Faktör 2 B: Katkı Maddesi (%)	Faktör 3 C: Sıkıştırma basıncı (MPa)	Cevap 1 Shatter (%)	Cevap 2 Nem (%)	Cevap 3 Kül (%)	Cevap 4 Isıl değer (Mj/Kg)
10	1	50	15	99,89	8,14	4,52	21,30
5	2	75	20	99,98	8,05	3,86	20,23
12	2	75	10	99,73	8,05	3,87	20,25
18	2	25	20	99,52	8,18	5,13	23,07
20	2	25	10	99,39	8,19	5,03	23,08
1	3	0	15	94,38	8,17	5,55	24,85
3	3	50	15	99,38	8,17	4,57	21,70
4	3	100	15	99,99	7,99	3,09	19,46
9	3	50	15	99,39	8,13	4,65	21,65
11	3	50	5	99,15	8,13	4,52	21,42
13	3	50	15	99,38	8,13	4,58	21,85
14	3	50	15	99,38	8,14	4,57	21,42
16	3	50	15	99,38	8,13	4,68	21,55
17	3	50	15	99,39	8,14	4,53	21,48
19	3	50	25	99,60	8,14	4,19	21,77
2	4	25	20	98,47	8,17	5,31	23,04
6	4	75	20	99,89	8,07	3,90	20,31
8	4	25	10	98,25	8,19	5,40	23,01
15	4	75	10	99,58	8,05	3,90	20,07
7	5	50	15	98,87	8,18	4,64	21,88

10.7.4.1 Geven Bitkisi ile Yapılan Çalışmaların Shatter İndeksi Sonuçları

Linyit kömürünün katkı maddesi olarak geven bitkisi kullanılarak yapılan briketleme çalışmaları sonucunda elde edilen briketlerin Shatter indeksi sonucunda elde edilen verilerin Anova analizi Design Expert programı yardımıyla yapılmış ve Anova analiz sonuçları Çizelge 10.29’da verilmiştir. Anova analizi sonucunda elde edilen R^2 değerinden, deney parametreleri ile briketlerin Shatter indexi değişiminin %99,63 doğrulukta kuadratik yani ikinci dereceden modele uyduğu belirlenmiştir.

Çizelge 10.29 Geven bitkisi Shatter indeksi Anova analiz sonuçları

Cevap 1	SHATTER İNDEKSİ					
Tepki Yüzeyi Kuadratik Model için ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karaler toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri Prob > F	
Kaynak						
Model	3,88	6	0,65	448,18	< 0,0001	Önemli
A-Tanecik boyutu	1,24	1	1,24	858,36	< 0,0001	
B-Katkı maddesi miktarı	1,71	1	1,71	1189,31	< 0,0001	
C-Sıkıştırma basıncı	0,20	1	0,20	140,35	< 0,0001	
AB	0,47	1	0,47	329,46	< 0,0001	
BC	0,006	1	0,006	4,16	0,0640	
B²	0,042	1	0,042	28,91	0,0002	
Artık	0,017	12	0,00144			
Uyum Eksikliği	0,017	7	0,0024	163,04	< 0,0001	Önemli
Hata	7,5*10 ⁻⁵	5	1,5*10 ⁻⁵			
Standart Sapma	0,038		R ²	0,9963		

Geven bitkisinin Shatter indeksi verilerine yapılan Anova analizi sonucunda elde edilen modelin p-değerinin 0,001'den küçük olması söz konusu değişkenler arasında anlamlı bir ilişki olduğunu göstermektedir. Ayrıca deneysel parametrelerin ve bu parametrelerin sinerjetik etkilerin p-değerlerinin 0,1'den küçük olması bu parametrelerin geven bitkisiyle elde edilen briketlerin Shatter indeksi üzerinde önemli parametreler olduğunu göstermektedir.

Çizelge 10.29'da verilen Anova analizi sonuçlarına göre geven bitkisinin linyit kömürüyle karıştırılarak briketlenmesi sonucu elde edilen briketlerin Shatter indeksi üzerinde etkili parametrelerin tanecik boyutu (A), katkı maddesi miktarı (B), sıkıştırma basıncı (C), tanecik boyutu ve katkı maddesi miktarı arasındaki etkileşim (AB), katkı maddesi miktarı ve sıkıştırma basıncı arasındaki etkileşim (BC), olduğu görülmektedir.

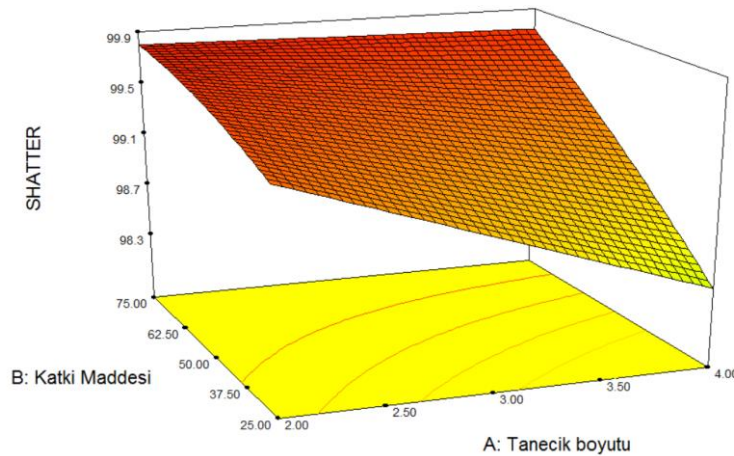
10.7.4.2 Geven Bitkisi İle Yapılan Çalışmaların Shatter İndeksi Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi

Merkezi birleşik tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak Design Expert programı yardımıyla linyit kömürünün geven bitkisi katkı maddesi kullanılması sonucu yapılan denemeler sonucunda elde edilen briketlerin Shatter indeksi verilerinin matematiksel modeli eşitlik 10.13' te verilmiştir.

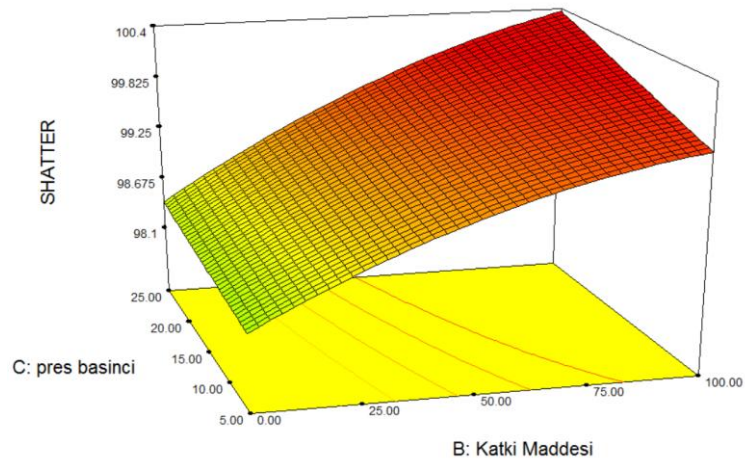
$$\begin{aligned} \text{SHATTER 4} = & +100,41205 \\ & - 0,76531 * TB \\ & - 5,87784 * 10^{-3} * KM \\ & + 0,011537 * PB \\ & + 9,74500 * 10^{-3} * TB * KM \\ & + 2,19000 * 10^{-4} * KM * PB \\ & - 9,21055 * 10^{-5} * KM^2 \end{aligned} \quad (10.13)$$

10.7.4.3 Deneyisel Parametrelerin Briketlerin Shatter İndeksi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Katkı maddesi olarak geven bitkisi kullanılarak linyit kömürü briketleme çalışmalarında yapılan denemeler sonucunda elde edilen veriler Design Expert programı kullanılarak katkı maddesi miktarı, sıkıştırma basıncı ve tanecik boyutu değerlerine karşılık Shatter indeksi değişimleri Şekil 10.21'de grafik edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 10.21 Geven bitkisi için briketleme parametrelerinin shatter indeksine etkisi

Şekil 10.21 a ve b katkı maddesi miktarı, tanecik boyutu ve sıkıştırma basıncıyla geven bitkisi kullanılarak elde edilen melez briketlerin Shatter indeksi değişimini göstermektedir. Şekillerden açıkça görüldüğü gibi katkı maddesi miktarı arttıkça briketlerin Shatter indeksi değeri yani düşme dayanımları artmaktadır. Geven bitkisinin bileşiminde lignin, hemiselüloz ve selüloz polimerleri bulunmakta ve bu polimer maddeler bağlayıcı özellik göstermektedir. Briketlerdeki katkı maddesi miktarı arttıkça toplam briket kütlelerinde bulunan bu polimerlerin yüzde bileşimi artmaktadır. Bu polimer maddelerin yüzdesinin artması, briketleme prosesinde tanecikler arasındaki bağların daha da güçlenmesine sebep olmakta ve bu sayede briketlerin düşme dayanımlarını olumlu yönde etkilemektedir.

Şekil 10.21 a'da da görüldüğü gibi yapılan denemeler sonucunda artan tanecik boyutuyla Shatter indeksi değeri azaldığı belirlenmiştir. Bunun sebebinin artan tanecik boyutlarının briketlerin boşluk hacminin artmasına sebep olmakta ve bu nedenle briketlerin kırılabilirliği artmaktadır. Sonuç olarak kömürün geven bitkisinin katkı maddesi kullanılarak yapılan briketleme çalışmalarında yüksek tanecik boyutlarında çalışmanın dezavantaj olduğu görülmektedir.

Şekil 10.21 b Shatter indeksi katkı maddesi miktarı ve sıkıştırma basıncıyla değişimini göstermektedir ve şekilden açıkça görüldüğü gibi artan sıkıştırma basıncı Shatter indeksini olumlu yönde etkilemektedir. Tahmin edileceği gibi sıkıştırma basıncı arttıkça

taneciklerin birbirine bağlanması daha da arttığından briketlerin Shatter indeksi artmaktadır.

Linyit kömürünün geven bitkisi katkı maddesi kullanılarak yapılan briketleme çalışmalarında, en yüksek Shatter indeksi değerine %100 geven bitkisi kullanılarak, en düşük değere ise %100 kömür kullanılması sonucu elde edilen briketleme işlemi sonucunda ulaşılmıştır. Geven bitkisi ve kömür kullanılarak yapılan melez briketleme çalışmalarında en yüksek Shatter İndeksine sahip olan briketin 2 mm tanecik boyutu, %75 katkı maddesi miktarı ve 20 MPa sıkıştırma basıncı kullanılması sonucunda ulaşılmıştır. Bu parametreler kullanılarak elde edilen Shatter İndeksi değeri %99,98 olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra yapılan denemeler sonucunda en düşük Shatter İndeksine sahip olan melez briketin 4 mm tanecik boyutu,%25 katkı maddesi miktarı ve 10 MPa sıkıştırma basıncı kullanılması sonucunda elde edilen briket olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu briketin Shatter indeksi değeri %98,25 olarak belirlenmiştir.

10.7.4.4 Geven Bitkisi ile Yapılan Çalışmaların, Briketlerin Nem Miktarı Yüzdesine Etkisi

Linyit kömürünün geven bitkisi katkı maddesi kullanılarak yapılan denemeler sonucunda elde edilen briketlerin nem miktarı yüzdeleri verilerinin merkezi kompozit tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak yapılan Anova analiz sonuçları Çizelge 10.30'da verilmiştir. Anova analizi sonuçlarından briketlerin nem miktarı yüzdelerinin %93,12 doğrulukta lineer modele uyduğu belirlenmiştir.

Çizelge 10.30 Geven bitkisi kullanılarak elde edilen briketlerin nem miktarı verilerinin Anova analizi sonuçları

Cevap 2	% NEM					
Tepki Yüzeyi Lineer Model İçin ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karalar toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri Prob > F	
Kaynak						
Model	0,056	3	0,019	67,62	< 0,0001	Önemli
A-Tanecik boyutu	0,0006	1	0,0006	2,28	0,1517	
B-Katkı maddesi	0,055	1	0,055	200,54	< 0,0001	
C-Sıkıştırma basıncı	9*10 ⁻⁶	1	0,000009	0,033	0,8586	
Artık	0,004	15	0,00026			
Uyum Eksikliği	0,003	10	0,0003	1,68	0,2943	Önemli
Hata	0,0009	5	0,00018			
Standart Sapma	0,017		R ²	0,9312		

Linyit kömürünün geven bitkisi katkı maddesi kullanılarak yapılan briketleme denemelerinde elde edilen briketlerin nem miktarı yüzdeleri verilerine yapılan Anova analizi sonucunda model denklem ve her bir deneysel parametre için p-değerleri belirlenmiştir. Çizelge 10.30’da Model denklemin p-değerinin 0,0001’den küçük olduğu görülmektedir ve bu değer modelin doğrulunun bir göstergesidir. Deney parametrelerinin her birinin p-değerleri ayrı ayrı incelendiğinde, tanecik boyutu, katkı maddesi miktarı ve sıkıştırma basıncı parametrelerinin p-değerleri sırasıyla 0,1517, <0,0001 ve 0,8586 olarak belirlenmiştir. Briketlerin nem yüzdesi üzerinde, çay atığı ve fındık kabuğu kullanılarak elde edilen briketleme sonuçlarında da gözlemlendiği gibi, tanecik boyutu ve sıkıştırma basıncının katkı maddesi miktarı kadar etkili olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

10.7.4.5 Geven Bitkisi ile Yapılan Çalışmaların Nem Miktarı Yüzdesinin Verilerinin

Matematiksel Modelinin Belirlenmesi

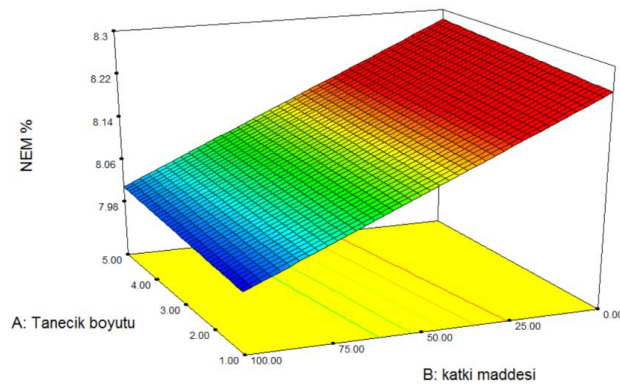
Merkezi birleşik tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak Design Expert programı yardımıyla linyit kömürünün geven bitkisi katkı maddesi kullanılması sonucu yapılan

denemeler sonucunda elde edilen briketlerin nem yüzdeleri verilerinin matematiksel modeli eşitlik 10.14’de verilmiştir.

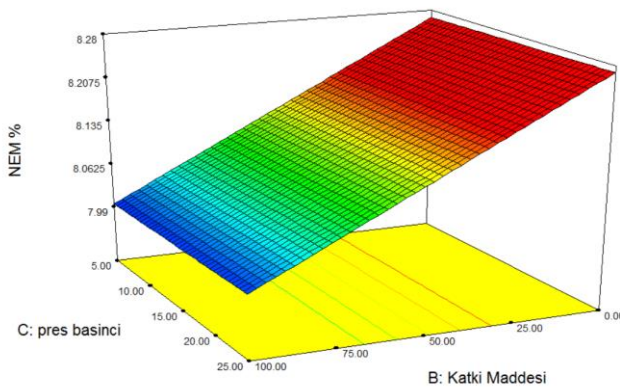
$$\begin{aligned} \text{NEM \% 4} = & +8,24814 \\ & +6.25000 \cdot 10^{-3} \cdot \text{TB} \\ & -2,73071 \cdot 10^{-3} \cdot \text{KM} \\ & +1,50000 \cdot 10^{-4} \cdot \text{PB} \end{aligned} \quad (10.14)$$

10.7.4.6 Geven Bitkisi ile Yapılan Briketleme Çalışmalarında Deneysel Parametrelerin Briketlerin Nem Miktarı Yüzdesi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Katkı maddesi olarak geven bitkisi kullanılarak linyit kömürü briketleme çalışmalarında merkezi birleşik tasarım optimizasyon programı kullanılarak elde edilen briketlerin, briketleme parametrelerinin nem miktarına karşı grafiği Design Expert programı kullanılarak grafik edilmiş ve elde edilen grafikler Şekil 10.22’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 10.22 Geven bitkisi katkı maddesi için briketleme parametrelerinin % nem miktarı üzerine etkisi

Şekil 10.22 a ve b de açıkça görüldüğü gibi artan tanecik boyutu ve sıkıştırma basıncıyla briketlerin nem miktarında önemli bir değişiklik olmadığı gözlemlenmemektedir. Bunun yanında grafiklerden görüldüğü üzere katkı maddesi miktarı arttıkça briketlerin nem miktarı azalmaktadır ve buna geven bitkisinin nem miktarının linyit kömürünün nem miktarından düşük olmasının sebep olduğu düşünülmektedir.

Merkezi kompozit tasarım optimizasyon yöntemi kapsamında yapılan melez briketleme çalışmaları sonucunda en yüksek nem değerine 4 mm tanecik boyutu, %25 katkı maddesi miktarı ve 10 MPa sıkıştırma basıncı kullanılması durumunda en düşük nem içeriğine ise 4 mm tanecik boyutu %75 katkı maddesi miktarı ve 10 MPa sıkıştırma basıncı kullanılması sonucunda elde edilen briketlerde ulaşılmıştır. Bu parametreler kullanılarak elde edilen briket içinen düşük ve en yüksek nem yüzdesi değerleri sırasıyla %8,19 ve %8,05 olarak belirlenmiştir.

10.7.4.7 Geven ile yapılan çalışmaların % kül miktarı sonuçları

Katkı maddesi olarak geven bitkisi kullanılarak elde edilen briketlerin kül miktarı yüzdeleri verilerine merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak Design Expert programı yardımıyla yapılan Anova analizi yapılmıştır ve yapılan Anova analizi sonuçları Çizelge 10.31’de verilmiştir. Anova analizi sonuçlarından briketlerin deneysel parametrelerle kül yüzde değişimlerinin %98,78 doğrulukta kuadratik yani ikinci dereceden modele uyduğu belirlenmiştir.

Çizelge 10.31 Geven bitkisi kullanılarak elde edilen briketlerin kül miktarı verilerinin Anova analizi sonuçları

Cevap 3	% KÜL MİKTARI					
Tepki Yüzeyi						
Kuadratik Model için ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karalar toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri Prob > F	
Kaynak						
Model	5,66	4	1,41	121,12	<0,0001	önemli
A-Tanecik boyutu	0,045	1	0,045	3,81	0,0712	
B-Katkı maddesi mik.	5,56	1	5,56	475,77	<0,0001	
C-Sıkıştırma basıncı	0,027	1	0,027	2,35	0,1477	
AB	0,030	1	0,030	2,55	0,1329	
Artık	0,16	14	0,012			
Uyum Eksikliği	0,15	9	0,016	4,90	0,0475	önemli
Hata	0,017	5	0,0033			
Standart Sapma	0,11	R²	0,9878			

Deneysel parametrelerin kül miktarı üzerine etkilerini belirlemek amacıyla yapılan Anova analizi sonucunda geven bitkisi kullanılarak elde edilen briketlerin kül miktarı üzerinde en etkili parametrelerin tanecik boyutu, katkı maddesi miktarı, sıkıştırma basıncı ve tanecik boyutu ile katkı maddesi arasındaki sinerjetik etkinin olduğu belirlenmiştir. Geven bitkisi kullanılarak elde edilen briketlerin kül miktarı analiz sonuçlarında parametrelerin p-değerlerine bakıldığında diğer parametrelere kıyasla en etkili parametrenin katkı maddesi miktarı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Buna ek olarak Anova analizi sonucunda elde edilen modelin p-değerinin 0,001'den küçük olması modelin doğrulunun bir ispatıdır.

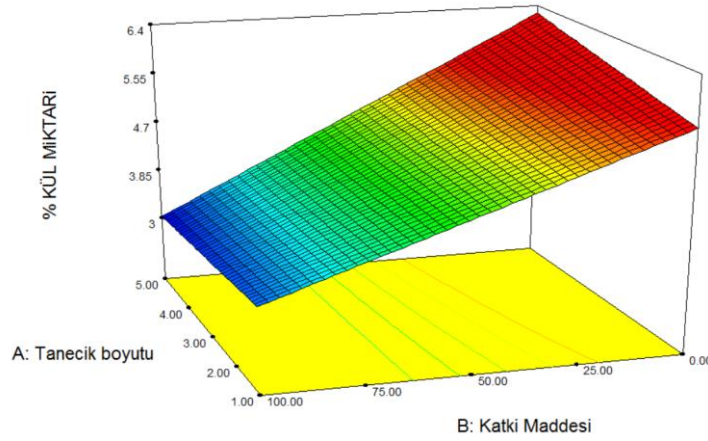
10.7.4.8 Geven Bitkisi Kullanılarak Elde Edilen Briketlerin %Kül Miktarı Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi

Merkezi birleşik tasarım kullanılarak elde edilen briketlerin kül miktarı yüzdesinin deney parametreleriyle değişiminin matematiksel modeli Design Expert programı kullanılarak belirlenmiş ve model denklem eşitlik 10.15'da verilmiştir.

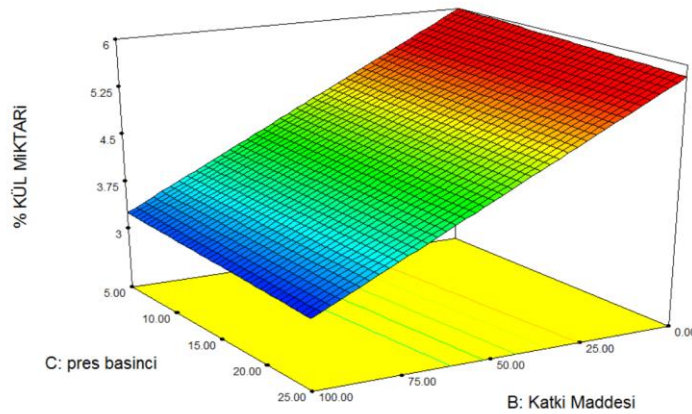
$$\begin{aligned}
 \% \text{ KÜL MİKTARI} = & +5,51430 \\
 & +0,17469*TB \\
 & -0,020147*KM \\
 & -8,28051*10^{-3}*PB \\
 & -2,43870*10^{-3}*TB*KM
 \end{aligned}
 \tag{10.15}$$

10.7.4.9 Geven Bitkisi ile Yapılan Briketleme Çalışmalarında Deneysel Parametrelerin Briketlerin Nem Miktarı Yüzdesi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Katkı maddesi olarak geven bitkisi kullanılarak linyit kömürü briketleme çalışmalarında merkezi birleşik tasarım optimizasyon programı ile elde edilen briketlere, tanecik boyutu, sıkıştırma basıncı ve katkı maddesi miktarının kül miktarı yüzdeleri üzerinde etkileri Şekil 10.23'te grafik edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 10.23 Geven katkı maddesi için briketleme parametrelerinin % kül miktarı üzerine etkisi

Şekil 10.23 a ve b’den açıkça görüldüğü gibi tanecik boyutu ve sıkıştırma basıncı parametrelerinin geven bitkisi kullanılarak elde edilen melez briketlerin kül miktarı üzerinde önemli etkileri bulunmamaktadır yani bu parametrelerdeki değişim briketlerin kül miktarında önemli ölçüde değişimlere sebep olmamaktadır. Çizelge 10.28’de verilmiş olan kül miktarı yüzdelerine bakıldığında katkı maddesi ve tanecik boyutu parametreleri sabit tutularak, sıkıştırma basıncının ise 5 MPa ve 15MPa (Deney No: 11, 13) değerleri kullanılarak yapılan briketleme çalışmaları sonucunda elde edilen kül miktarı yüzdeleri; sırasıyla %4,52 ve %4,57 olarak belirlenmiştir. Yapılan denemeler sonucunda elde edilen bu verilerden artan sıkıştırma basıncının briketlerin kül miktarı üzerinde etkili parametre olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Briketlerin kül miktarına tanecik boyutunun etkisinin belirlenmesi amacıyla yapılan denemelerde sıkıştırma basıncı ve katkı maddesi miktarı sabit tutularak 1mm, 3mm ve 5mm (Deney No: 10, 16, 7) tanecik boyutundaki numunelerle denemeler yapılmış ve yapılan denemeler sonucunda elde edilen briketlerin kül yüzdeleri sırasıyla %4,52, %4,68 ve %4,64 olarak belirlenmiştir. Farklı tanecik boyutları kullanılarak elde edilen briketlerin kül miktarı yüzdelerinin birbirine çok yakın değerler olması tanecik boyutunun da kül miktarı üzerinde etkili bir parametre olmadığına göstergesidir ve bu durum Şekil 10.23 a’da açıkça görülmektedir.

Yapılan denemeler sonucunda katkı maddesi miktarı arttıkça briketlerin kül miktarının azaldığı gözlemlenmiş ve briketlerin kül miktarı üzerinde en etkili parametrenin katkı maddesi miktarı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Katkı maddesi miktarı arttıkça briketlerin kül miktarının azalma sebebinin geven bitkisi katkı maddesinin kül miktarının linyit kömürünün kül miktarından düşük olması olduğu düşünülmektedir. Şekil 10.23 a ve b’den de katkı maddesi miktarı arttıkça briketlerin kül miktarındaki azalma açıkça görülmektedir. Çizelge 10.31’de verilmiş olan briketlerin kül yüzdeleri verileri bunu desteklemektedir. Tanecik boyutunun ve sıkıştırma basıncının sırasıyla 3 mm ve 15 MPa’da sabit tutularak %0, %50 ve %100 fındık kabuğu katkı maddesi kullanılarak yapılan denemeler sonucunda bu katkı maddesi yüzdeleri için bulunan kül yüzdeleri sırasıyla %5,55, %4,68 ve %3,09 olarak belirlenmiş ve katkı maddesi miktarının %50 artması durumunda linyit kömürü briketine oranla kül miktarında yaklaşık %15’lik bir azalma gözlemlenmiştir.

Linyit kömürüne ve geven bitkisine yapılan kısa analizler sonucunda elde edilen kül miktarları değerleri Şekil 10.2 de verilmiş olup bu değerleri sırasıyla %14 ve %5,28 olarak belirlenmiştir. Linyit kömürünün ve geven bitkisinin kısa analiz sonuçları baz alınarak, %50 katkı maddesi ve %50 linyit kömürü kullanılması sonucu, briketlerin kül yüzdeleri stokiometrik olarak yaklaşık %9,64 olması gerekirken bu şartlarda elde edilen briketlerin kül miktarının bu değer yaklaşık 1,8 kat altında olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bunun sebebinin briketleme çalışmalarında kullanılan asetik asidin (CH_3COOH) briketlerin kül içeriğinde bulunan Al_2O_3 , CaO ve Fe_2O_3 gibi bileşiklerle reaksiyon vererek asetatlı bileşikler ve su oluşturması sonucu külün yapısında değişikliklere yol açarak, kül miktarının azalması yönünde etki etmesi olduğu düşünülmektedir.

10.7.4.10 Geven Bitkisi ile Yapılan Çalışmaların Isıl Değer Verileri

Katkı maddesi olarak geven bitkisi kullanılarak elde edilen briketlerin ısı değerleri Çizelge 10.28’da verilmiş olup, elde edilen verilere merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak yapılan Anova analiz sonuçları Çizelge 10.32’da verilmiştir. Anova analizi sonuçlarından briketlerin deneysel parametrelerle ısı değer değişimlerinin %97,26 doğrulukta lineer modele uyduğu belirlenmiştir.

Çizelge 10.32 Geven bitkisi kullanılarak elde edilen briketlerin ısı değer verilerinin Anova analizi sonuçları

ISIL DEĞER (Mj/Kg)						
Cevap 4						
Tepki Yüzeyi Lineer Model için ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karalar toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri Prob > F	
Kaynak						
Model	20,30	3	6,77	177,24	<0,0001	Önemli
A-Tanecik boyutu	0,058	1	0,058	1,52	0,2366	
B-Katkı maddesi	20,18	1	20,18	528,64	<0,0001	
C-Sıkıştırma basıncı	0,059	1	0,059	1,54	0,2331	
Artık	0,57	15	0,038			
Uyum Eksikliği	0,45	10	0,045	1,86	0,2561	Önemli
Hata	0,12	5	0,024			
Standart Sapma	0,20		R^2	0,97256		

Deneyisel parametrelerin ısı değeri üzerine etkilerini belirlemek amacıyla yapılan Anova analizi sonucunda Çizelge 10.32'da verilen model denklemin p-değeri incelendiğinde, modelin p- değerinin 0,0001'den düşük olduğu görülmektedir. p-değerinin 0,0001'den küçük olması modelin anlamlılığını ve elde edilen modelin verilerle uyumunu göstermektedir. Bunun yanı sıra Çizelge 10.32'da verilen tanecik boyutu, katkı maddesi miktarı ve sıkıştırma basıncı parametrelerinin p-değerlerine bakıldığında bu parametrelerin p-değerlerinin sırasıyla 0,2366, <0,0001 ve 0,2331 olduğu belirlenmiş ve merkezi kompozit tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak yapılan deney planı doğrultusunda geven bitkisi katkı maddesi kullanılarak elde edilen briketlerin ısı değeri üzerinde, nem ve kül yüzdesi miktarında da olduğu gibi tanecik boyutu ve sıkıştırma basıncının önemli etkilerinin olmadığı, katkı maddesi miktarının ise briketlerin ısı değerini önemli ölçüde etkilediği sonucuna ulaşılmıştır.

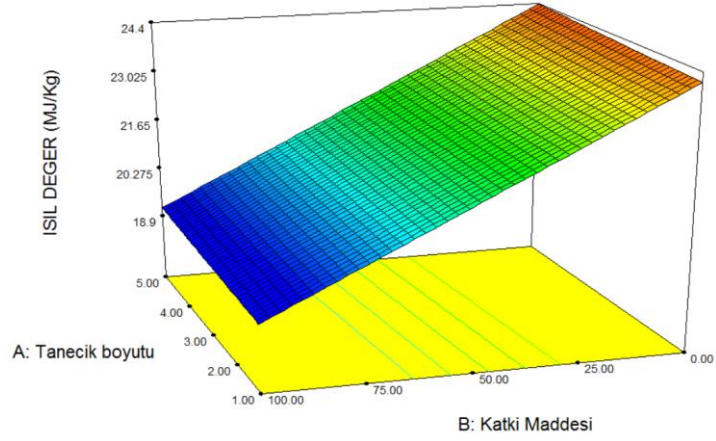
10.7.4.11 Geven Bitkisi ile Yapılan Briketleme Çalışmaların Isıl Değer Verilerinin Matematiksel Modelinin Belirlenmesi

Geven bitkisi katkı maddeli briketleme çalışmaları için merkezi birleşik tasarım kullanılarak belirlenen deney planı doğrultusunda elde edilen briketlerin ısı değeri verilerinin deney parametreleriyle değişiminin matematiksel modeli eşitlik 10.16'da verilmiştir.

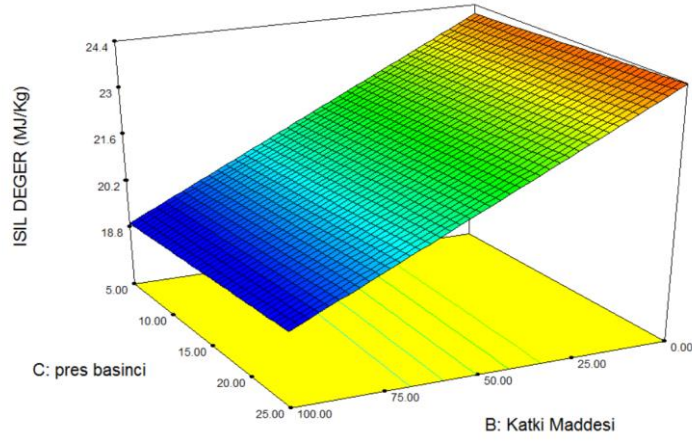
$$\begin{aligned} \text{ISIL DEĞER (MJ/KG) 4= } & +23,89173 \\ & +0,060213*TB \\ & -0,052332*KM \\ & +0,012138*PB \end{aligned} \quad (10.16)$$

10.7.4.12 Geven Bitkisi ile Yapılan Briketleme Çalışmalarında Deneyisel Parametrelerin Briketlerin Isıl Değeri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Geven bitkisi katkı maddesi kullanılarak, linyit kömürünün katkı maddeli briketleme çalışmalarında merkezi birleşik tasarım optimizasyon programı kullanılarak elde edilen briketlerin ısı değeri üzerine, tanecik boyutu, sıkıştırma basıncı ve katkı maddesi miktarı parametrelerinin etkileri Şekil 10.24'de grafik edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 10.24 Geven bitkisi katkı maddesi için briketleme parametrelerinin ısı değeri üzerine etkisi

Şekil 10.24 a ve b’den tanecik boyutu ve sıkıştırma basıncının geven bitkisi katkı maddesi kullanılarak elde edilen briketlerin ısı değeri üzerinde etkili olmadığı açıkça görülmektedir. Bunun yanı sıra katkı maddesi miktarı arttıkça briketlerin ısı değeri azalmaktadır. Bunun sebebi kullanılan katkı maddesinin ısı değerinin linyit kömürünün ısı değerinden düşük olmasıdır ve katkı maddesi miktarı arttıkça briket bünyesinde bulunan ısı değeri düşük bileşen yüzdesi arttığından kül miktarı da bununla orantılı olarak azalmaktadır.

Yapılan analizler sonucunda en yüksek ısı değere %100 linyit kömürü kullanılması durumunda, en düşük ısı değere ise %100 geven bitkisi kullanılması sonucunda

ulaşılmıştır ve bu briketlere ait ısı değeri miktarları sırasıyla 24,85 Mj/Kg ve 19,46 Mj/Kg olarak belirlenmiştir. Melez briketler içerisinde en yüksek ısı değere sahip olan briketlere 2 mm ve 4 mm tanecik boyutu, 10 ve 20 MPa sıkıştırma basıncı %25 katkı maddesi kullanılması sonucu ulaşılmıştır. En yüksek ısı değere sahip olan briketler Çizelge 10.28’de verilmiş olan 2, 8, 18 ve 20 numaralı deneylerdir ve bu deney numaralı briketlerin ısı değeri miktarları sırasıyla 23,04 Mj/Kg, 23,01 Mj/Kg, 23,07 Mj/Kg ve 23,08 Mj/Kg olarak belirlenmiştir. %100 kömür kullanılması durumunda elde edilen briketler ile geven bitkisi kullanılarak elde edilen en yüksek ısı değere sahip melez briketler kıyaslandığında, %100 linyit kömürü briketine göre ısı değerinde yaklaşık %7’lik bir azalma olduğu sonucuna ulaşılmıştır. %100 geven bitkisi kullanılan briketlerle en yüksek ısı değere sahip melez briketler kıyaslandığında ise %100 geven briketine göre ısı değerinde yaklaşık %18,5’lik bir artış olduğu gözlemlenmiştir.

10.7.4.13 Geven Bitkisi ile Yapılan Çalışmaların Genel Değerlendirilmesi

Linyit kömürünün katkı maddesi olarak geven bitkisi ile briketlenmesi çalışmalarında optimum tanecik boyutu, katkı maddesi miktarı, sıkıştırma basıncı parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılacak olan deney planı, Design Expert programı yardımıyla merkezi kompozit tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Belirlenen deney planı çerçevesinde elde edilen briketlere Shatter İndeksi, %nem miktarı, %kül miktarı ve ısı değeri analizleri yapılmış ve elde edilen verilerin yine Design Expert programı kullanılarak çözümlemesi yapılmıştır. Tüm parametreler ve analiz sonuçları için yapılan çözümleme aralıkları Çizelge 10.33’te verilmiştir.

Çizelge 10.33 Geven bitkisi katkı maddesi için çözümleme şartları

KISITLAMALAR				
İsim	Hedef	Alt Limit	Üst Limit	Önem
Tanecik boyutu	analiz aralığında	2	4	3
% Katkı maddesi miktarı	analiz aralığında	25	75	3
Sıkıştırma basıncı (MPa)	analiz aralığında	5	25	3
Shatter indeksi %	analiz aralığında	98.253	99,997	5
Kül miktarı %	analiz aralığında	3,088	5,396	5
Nem miktarı %	analiz aralığında	7,99	8,193	5
Isı değeri (Mj/Kg)	analiz aralığında	19	23,076	5

Çizelge 10.33'te verilen çözümleme şartları sonucunda elde edilen optimum deney parametreleri ve bu parametreler kullanılarak üretilen briketlere ait Shatter İndeksi, % nem miktarı, %kül miktarı ve ısı değeri analizi sonuçları Çizelge 10.34 'de verilmiştir. Çizelge 10.34'den de görüldüğü gibi en iyi briketleme sonuçlarına fındık kabuğu, çay atığı ve sığır kuruğu kullanılarak yapılan briketleme çalışmalarında da olduğu gibi 4 mm ve 2 mm tanecik boyutu, %25 katkı maddesi, 10 MPa ve 20 MPa sıkıştırma basıncı kullanılması sonucunda elde edilebileceği belirlenmiştir.

Çizelge 10.34 Geven bitkisi için deney parametrelerinin çözümü

	Tanecik Boyutu	Katkı Maddesi	Pres Basıncı	SHATTER	NEM %	% Kül Miktarı	Isıl Değer (Mj/Kg)
1	2	25	10	99,39	8,19	5,03	23,08
2	4	25	10	98,25	8,19	5,40	23,01
3	2	25	20	99,52	8,18	5,13	23,07
4	4	25	20	98,47	8,19	5,31	23,04

Çizelge 10.34'ten de görüldüğü gibi çözümleme sonucunda elde edilen optimum parametrelerde her deney sistemi için nem miktarı, kül miktarı ve ısı değerleri hemen hemen aynıdır. Bu sebeple optimum parametrelerin belirlenmesinde en önemli deney çıktıları briketlerin Shatter indeksi değerleridir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde en yüksek Shatter indeksi değeri 2 mm tanecik boyutu 20 MPa sıkıştırma basıncı kullanılması durumunda edilebilmektedir.

Katkı maddelerinin ve linyit kömürünün öğütülerek küçük tanecik boyutlarına indirilmesinin zor ve ekstra briketleme maliyetine sebep olması göz önünde bulundurularak 2 mm tanecik boyutu 20 MPa sıkıştırma basıncı parametreleri kullanılarak elde edilen briket (3 numaralı deney) ile 4 mm tanecik boyutu 20 MPa sıkıştırma basıncı kullanılarak elde edilen briketin (4 numaralı deney) Shatter indeksleri kıyaslandığında, 3 numaralı deneyin Shatter indeksinin 4 numaralı deneyin Shatter indeksinden %1,05 daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu ihmal edilebilir bir farktır ve bu sebeple 4 mm tanecik boyutunda çalışmanın daha uygun ve ekonomik olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Çözümleme sonucunda en iyi deney çıktılarına sahip 4 mm tanecik boyutu kullanılarak elde edilen briketler karşılaştırıldığında 20 MPa sıkıştırma basıncı kullanılması sonucu elde edilen deney çıktıları ile 10 MPa sıkıştırma basıncı kullanılması sonucu elde edilen briketlerin deney çıktıları arasında önemli bir fark olmadığı görülmektedir. Bunun yanı sıra yüksek sıkıştırma basıncı ekstra briketleme maliyetine sebep olmaktadır. Bu sebeple 10 MPa sıkıştırma basıncında çalışmanın daha uygun olacağı öngörülmektedir.

Sonuç olarak tüm bu proses parametreleri göz önünde bulundurulduğunda geven bitkisi katkı maddesi kullanılarak yapılacak olan briketleme çalışmalarında en iyi sonuca 4 mm tanecik boyutu, %25 katkı maddesi ve 10 MPa sıkıştırma basıncı kullanılarak ulaşılabileceği düşünülmektedir. Linyit kömürünün katkı maddesi olarak geven bitkisi kullanılarak briketlenmesi çalışmalarında, 4 mm tanecik boyutu, %25 katkı maddesi ve 10 MPa sıkıştırma basıncı kullanılarak elde edilen briketin Shatter indeksi, % nem miktarı, % kül miktarı ve ısı değeri analiz sonuçları sırasıyla %98,25, %8,19, %5,31, 23,04 MJ/Kg olarak bulunmuştur.

10.7.5 Briketlerin Suya Dayanım Analizi Sonuçları

Çay atığı, fındık kabuğu, sığır kuruğu ve geven katkı maddeleri kullanılarak linyit kömürünün briketlenmesi çalışmaları sonucunda her bir katkı maddesi için belirlenmiş olan optimum parametreler kullanılarak yapılan suya dayanım testi sonucunda elde edilen veriler Çizelge 10.35'te verilmiştir.

Çizelge 10.35 Farklı katkı maddeleri için suya dayanım testi sonuçları

	Katkı Maddesi Cinsi	Tanecik Boyutu (mm)	% Katkı Maddesi Miktarı	Pres Basıncı (MPa)	Suya Dayanım Testi
1	Çay Atığı	4	25	10	24 saat
2	Fındık kabuğu	4	25	10	72 saat
3	Sığır kuruğu	4	25	10	1saat
4	Geven	4	25	10	24 saat

Her bir katkı maddesi için Çizelge 10.35'de verilen parametreler kullanılarak elde edilen briketlere suya dayanım testi yapılmıştır. Yapılan suya dayanım testi sonucunda linyit

kömürünün fındık kabuğu ile briketlenmesi sonucu elde edilen brikette 72 saat sonunda herhangi bir dağılma gözlemlenmemiştir ve suya dayanımı en yüksek olan briketin fındık kabuğu kullanılarak elde edilen briket olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Linyit kömürünün çay atığı ve geven bitkisi kullanılarak yapılan briketleme çalışmaları sonucunda elde edilen briketlere yapılan suya dayanım testi sonucunda her iki briketinde yaklaşık 3 saat sonunda su absorplayarak şişmeye başladığı fakat briketlerin 24 saatin sonunda dağıldığı belirlenmiştir. Katkı maddesi olarak sığır kuruğu kullanılarak optimum deney şartlarında elde edilen briketlere yapılan suya dayanım testi sonucunda linyit kömürü sığır kuruğu melez briketinin 10 dakika sonunda su absorplayarak şişmeye başladığı ancak briketin 1 saat sonunda dağıldığı tespit edilmiş ve suya dayanımı en az olan melez briketin sığır kuruğu katkı maddesi kullanılması sonucu elde edilen briket olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

10.7.6 Briketleme Çalışmalarının Genel Değerlendirilmesi

Linyit kömürünün çay atığı, fındık kabuğu, sığır kuruğu ve geven biyokütlelerinin katkı maddesi olarak kullanılması ile farklı tanecik boyutu, sıkıştırma basıncı ve katkı maddesi miktarları kullanılarak yapılan denemeler sonucunda, her bir katkı maddesi için en iyi briketleme parametreleri ve bu parametreler kullanılarak elde edilen briketlerin Shatter indeksi, % nem miktarı, % kül miktarı ve ısı değeri analizi sonuçları Çizelge 10.36’te verilmiştir.

Çizelge 10.36 Farklı katkı maddeleri için en iyi briketleme parametreleri ve deney çıktıları

	Katkı Maddesi cinsi	Tanecik Boyutu (mm)	%Katkı Maddesi	Sıkıştırma Basıncı (MPa)	Shatter İndeksi	%Nem	% Kül Miktarı	Isıl Değer (Mj/Kg)
1	Çay Atığı	4	25	10	98,22	8,23	5,13	23,83
2	Fındık kabuğu	4	25	10	95,17	8,30	4,15	23,62
3	Sığır kuruğu	4	25	10	98,75	8,09	5,20	23,15
4	Geven	4	25	10	98,25	8,19	5,40	23,01

Briketleme alışmaları sonucunda her bir katkı maddesi için ayrı ayrı yapılan denemeler sonucunda elde edilen veriler izelge 10.36 da verilmiş olup, tüm katkı maddeleri için optimum tanecik boyutu 4 mm, katkı maddesi miktarı %25, sıkıştırma basıncı 10 MPa olarak belirlenmiştir.

Briketleme alışmaları sonucunda, her bir katkı maddesi için belirlenen optimum deney parametreleri kullanılarak elde edilen briketlerin deney ıktıları karşılaştırıldığında en iyi ısı değere sahip olan katkı maddesinin çay atığı olduğu, çay atığını sırasıyla fındık kabuğu, sığır kuruğu ve gevenin takip ettiği sonucuna ulaşılmıştır. En yüksek ısı değere sahip olan çay atığı katkı maddesi kullanılarak elde edilen briketin ısı değerinin izelge 10.36'daki ısı değer verileri kullanılarak, fındık kabuğu, sığır kuruğu ve geven kullanılarak elde edilen briketlerden sırasıyla %0,89, %2,97 ve %3,60 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir

Farklı katkı maddeleri kullanılarak optimum deney parametrelerinde elde edilen briketlerin kül miktarları karşılaştırıldığında en düşük kül miktarına sahip olan briket, fındık kabuğu katkı maddesi kullanılması sonucunda elde edilmiş olup bunu sırasıyla çay atığı, sığır kuyruğu bitkisi ve geven bitkisinin takip ettiği sonucuna ulaşılmıştır. En yüksek kül miktarına sahip olan geven bitkisi kullanılarak elde edilen briketin kül miktarının, en düşük kül miktarına sahip olan fındık kabuğu kullanılarak elde edilen briketten yaklaşık %30 daha fazla kl içeriğine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Farklı katkı maddeleri kullanılarak elde edilen briketlerin nem miktarları kıyaslandığında, her bir katkı maddesi için briketlerin nem miktarının yaklaşık %8-8,2 aralığında olduğu belirlenmiş ve en yüksek nem miktarına sahip briket fındık kabuğu katkı maddesi, en düşük nem miktarına sahip briket ise çay atığı katkı maddesi kullanılması sonucunda ulaşılmıştır.

Briketlerin Shatter indeksleri karşılaştırıldığında en yüksek Shatter indeksine sahip olan briket sığır kuruğu katkı maddesi kullanılması sonucu ulaşıldığı, en düşük Shatter indeksine sahip olan briketin ise fındık kabuğu kullanılarak elde edilen briket olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

10.8 Katkı Maddelerine Torrefaksiyon Prosesi Uygulanmasının Ön Denemeleri

Torrefaksiyon prosesinde kullanılacak sıcaklık, tanecik boyutu ve kalma süresi aralıklarının belirlenmesi amacıyla yapılan ön deneme çalışmaları referans katkı maddesi olarak diğer katkı maddelerinden farklı yapıda olması sebebiyle odunsu atık olan elma dalları kullanılarak yapılmıştır. Denemelerde her bir proses parametresi için üç farklı seviye kullanılmış ve ön denemeler için yapılan deney planı Çizelge 10.37’de verilmiştir.

Çizelge 10.37 Torrefaksiyon süreci ön denemeleri için deney planı

	Tanecik Boyutunun Belirlenmesi	Sıcaklığın Belirlenmesi	Zamanın Belirlenmesi
1	350°C 250µm 60 dk	250°C 1000µm 60 dk	250°C 1000µm 30dk
2	350°C 500µm 60 dk	300°C 1000µm 60 dk	250°C 1000µm 60dk
3	350°C 1000µm 60 dk	350°C 1000µm 60 dk	250°C 1000µm 90dk

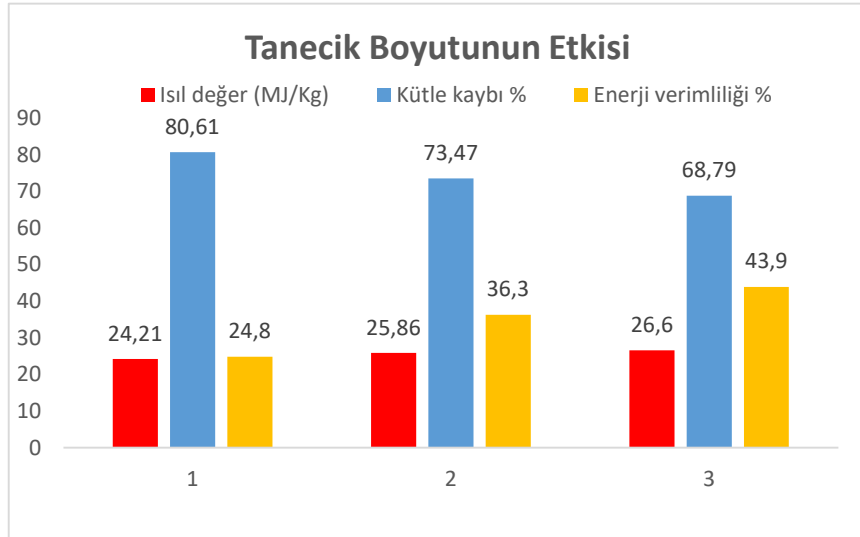
Çizelge 10.37’de verilen deney planı kullanılarak yapılan denemelerde merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak elde edilecek deney planının merkez noktalarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda tanecik boyutunun belirlenmesi amacıyla denemeler, sıcaklık ve zaman değerleri, torrefaksiyon süreci için maksimum sıcaklık ve zaman değeri olan 350°C ve 60 dk’da sabit tutularak farklı tanecik boyutlarında (250µm, 500µm ve 1mm) yapılmıştır. Tanecik boyutunun belirlenmesi amacıyla yapılan denemeler sonucunda elde edilen en iyi parametre sıcaklık değerinin belirlenmesi denemelerinde kullanılmıştır ve bu kapsamda sıcaklık değerinin belirlenmesi amacıyla yapılan denemeler, tanecik boyutu ve kalma süresi sabit tutularak farklı sıcaklık değerlerinde (250°C, 300°C, 350°C) yapılmıştır. Sıcaklık değerinin belirlenmesi amacıyla yapılan denemeler sonucunda en iyi verilere sahip sıcaklık değeri belirlenmiştir. Tanecik boyutunun ve sıcaklık değerinin belirlenmesi amacıyla yapılan denemelerde belirlenen en iyi tanecik boyutu ve sıcaklık değeri sabit tutularak, kalma süresinin belirlenmesi amacıyla farklı kalma süreleri (30dk, 60dk, 90dk) kullanılarak denemeler yapılmıştır. Torrefaksiyon süreci için yapılan denemelerin her biri üç tekrar şeklinde yapılarak sonuçların ortalaması kullanılmıştır ve yapılan denemeler sonucunda elde edilen ısı değeri, kütle kaybı ve enerji verimliliği değerleri Çizelge 10.38’te verilmiştir.

Çizelge 10.38 Torrefaksiyon ön deneme sonuçları

	Proses Şartları	Isıl Değer (MJ/Kg)	% Kütle Kaybı	% Enerji Verimliliği
	Tanecik Boyutunun Etkisi			
1	350°C 250µm 60 dk.	24,21	80,61	24,8
2	350°C 500µm 60 dk.	25,86	73,47	36,3
3	350°C 1000µm 60 dk.	26,6	68,79	43,9
	Sıcaklığın Etkisi			
1	250°C 1000µm 60 dk.	25,57	52,95	63,6
2	300°C 1000µm 60 dk.	25,25	73,7	35
3	350°C 1000µm 60 dk.	26,6	68,79	43,9
	Zamanın Etkisi			
1	250°C 1000µm 30dk	25,98	49,16	69,83
2	250°C 1000µm 60dk	25,57	52,95	63,6
3	250°C 1000µm 90dk	23,93	55,87	55,8

10.8.1 Torrefaksiyon Prosesi için Tanecik Boyutunun Belirlenmesi

Çizelge 10.38’de verilen ön deneme sonuçları verileri, tanecik boyutunun ısı değer, kütle kaybı ve enerji verimliliği üzerine etkilerini belirlemek amacıyla grafik edilmiş ve elde edilen grafik Şekil 10.25’de verilmiştir.

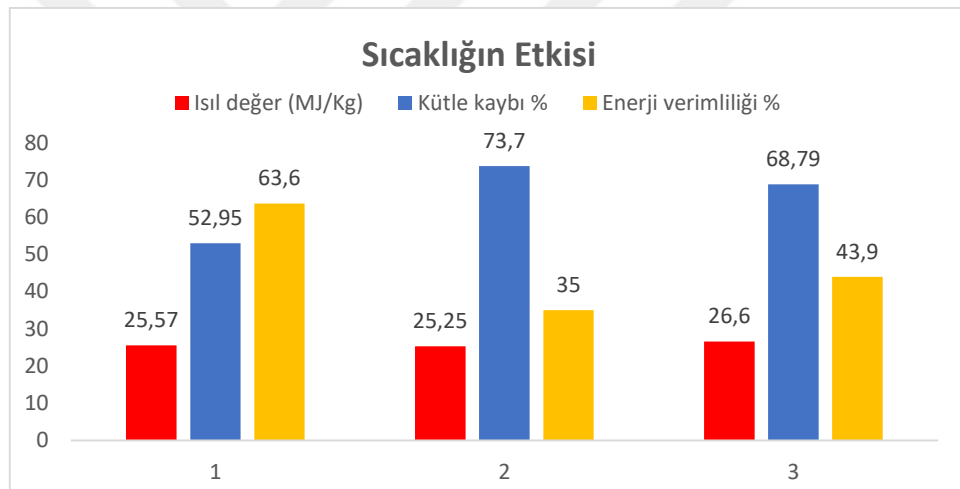


Şekil 10.25 Tanecik boyutunun incelenmesi

Şekil 10.25 her bir tanecik boyutu için ısıl değer, kütle kaybı ve enerji verimliliği değişimlerini vermektedir. Grafikte 1, 2, 3 ile simgelenen kısımlar sırasıyla 350°C sıcaklık ve 60 dk kalma süresi için 250 µm, 500 µm ve 1 mm tanecik boyutu değerlerini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi 350°C, 60 dk deney şartlarında tanecik boyutu arttıkça enerji verimliliği ve ısıl değer arttığı kütle kaybının ise azaldığı gözlemlenmiştir. Tanecik boyutunun belirlenmesi amacıyla yapılan ön denemelerde en iyi sonuç 1 mm tanecik boyutu kullanılarak yapılan çalışmalar sonucunda elde edilmiştir.

10.8.2 Torrefaksiyon Prosesi için Sıcaklık Parametresinin Belirlenmesi

Torrefaksiyon prosesi için sıcaklık parametresinin belirlenmesi amacıyla yapılan ön denemeler sonucunda elde edilen, Çizelge 10.38’de verilmiş olan ısıl değer, kütle kaybı ve enerji verimliliği verileri Şekil 10.26’da grafik edilmiştir.

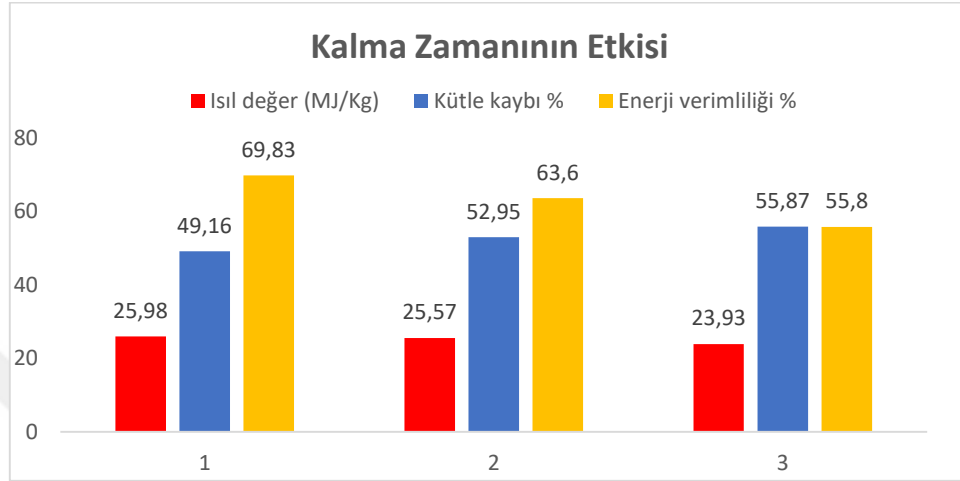


Şekil 10.26 Sıcaklık değerinin incelenmesi

Şekil 10.26 her bir sıcaklık değeri için ısıl değer, kütle kaybı ve enerji verimliliği değişimlerini vermektedir. Grafikte 1, 2, 3 ile simgelenen kısımlar sırasıyla 1 mm tanecik boyutu ve 60 dk kalma süresi için 250°C, 300°C ve 350°C sıcaklık değerlerini göstermektedir. Şekil 10.20’den de görüldüğü gibi tanecik boyutunun ve kalma zamanının 1 mm tanecik boyutu ve 60 dk deney şartlarında sabit tutulmasıyla, sıcaklık değeri arttıkça ısıl değerin artmasına karşılık enerji verimliliğinin, kütle kaybındaki yüksek miktardaki azalmaya bağlı olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple yapılan ön denemelerde en iyi sonuç 250°C sıcaklık kullanılarak yapılan çalışma sonucunda elde edilmiştir.

10.8.3 Torrefaksiyon Prosesi İçin Kalma Zamanının Belirlenmesi

Torrefaksiyon prosesi için kalma zamanı parametresinin belirlenmesi amacıyla yapılan ön denemeler sonucunda elde edilen ısı değeri, kütle kaybı ve enerji verimliliği değerleri Şekil 10.27’de grafik edilmiştir.



Şekil 10.27 Kalma zamanının incelenmesi

Şekil 10.27 her bir kalma zamanı değeri için ısı değeri, kütle kaybı ve enerji verimliliği değişimlerini vermektedir. Grafikte 1, 2, 3 ile simgelenen kısımlar sırasıyla 1 mm tanecik boyutu ve 250°C sıcaklık değeri için 30, 60, 90 dakika kalma süresi değerlerini göstermektedir. Şekil 10.27’den de görüldüğü gibi 1 mm tanecik boyutu ve 250°C sıcaklıkta, kalma süresi arttıkça kütle kaybının arttığı enerji verimliliğinin ve ısı değerinin ise azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu sebeple yapılan ön denemelerde en iyi sonuç 30 dakika kalma süresi kullanılarak yapılan çalışmalar sonucunda elde edilmiştir.

10.9 Katkı Maddelerine Torrefaksiyon Prosesinin Uygulanması

Referans biyokütle olarak elma dalı kullanılarak yapılan torrefaksiyon işlemi ön denemeleri ışığında, katkı maddelerine uygulanacak olan torrefaksiyon prosesi için yapılması planlanan deney planında merkez nokta olarak kullanılacak olan tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma süresi değerleri sırasıyla 1 mm, 250°C ve 30 dakika olarak belirlenmiştir. Ancak tanecik boyutunun belirlenmesi amacıyla yapılan ön denemelerde kullanılan en yüksek tanecik boyutu olan 1 mm değerinde en iyi sonuçlar elde edildiği için, bu değer üzerindeki tanecik boyutlarının taranması amacıyla merkezi kompozit

tasarım yöntemi kullanılarak elde edilecek deney planında merkez noktada tanecik boyutu için 3 mm değeri kullanılmıştır.

Katkı maddelerine torrefaksiyon prosesinin uygulanması amacıyla yapılan deney planı, Design Expert yazılım programında, merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Katkı maddelerine torrefaksiyon prosesi uygulanması amacıyla kullanılan parametreler ve seviyeleri Çizelge 10.39’da verilmiştir.

Çizelge 10.39 Torrefaksiyon prosesi deney parametreleri ve seviyeleri

Faktörler	Faktör seviyeleri				
	<i>En düşük</i>	<i>Düşük</i>	<i>Merkez</i>	<i>Yüksek</i>	<i>En Yüksek</i>
Kodlanmış faktörler	-2	-1	0	1	2
Tanecik Boyutu(mm)	1	2	3	4	5
Sıcaklık (°C)	150	200	250	300	350
Kalma zamanı (dk)	10	20	30	40	50

Yapılan deneysel planlamada her bir parametre için 5 seviye kullanılmıştır. Bu seviyeler tanecik boyutu için sırasıyla 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, sıcaklık değeri için 150°C, 200°C, 250°C, 300°C ve 350°C, kalma zamanı için ise 10 dk., 20 dk., 30 dk., 40dk ve 50 dk.’dır. Kullanılan optimizasyon programında her bir katkı maddesi için 20 adet deney yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmış ve tüm denemeler her bir deney için 3 tekrar şeklinde yapılmış, elde edilen sonuçların ortalaması alınarak sonuçlar verilmiştir.

10.9.1 Elma Dalına Torrefaksiyon Prosesinin Uygulanması

Elma dalı biyokütlesine torrefaksiyon prosesi uygulanması çalışmalarının deney planı, Design Expert programı yardımıyla merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Deney planında tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametreleri ile elma dalı biyokütlesinin ısı değeri, kütle ve enerji verimliliği değerlerinin değişimi incelenmiştir. Bu kapsamda yapılmış olan deney planı ve çıktıları Çizelge 10.40’da verilmiştir.

Çizelge 10.40 Elma sapı biyokütlesine torrefaksiyon uygulanması sonucu elde edilen veriler

Deney numarası	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Cevap 1	Cevap 2	Cevap 3
	A:Tanecik Boyutu (mm)	B: Sıcaklık (°C)	C: Kalma zamanı (dk)	Kütle verimliliği (%)	Isıl Değer (MJ/KG)	Enerji verimliliği (%)
1	3	250	30	63,52	21,80	69,04
2	3	250	50	61,04	23,59	71,76
3	2	300	20	40,95	24,29	49,59
4	2	200	20	88,18	19,74	86,78
5	1	250	30	51,75	22,77	58,73
6	4	200	40	87,46	20,09	87,60
7	3	250	30	63,27	22,08	69,62
8	3	250	10	86,65	19,27	83,23
9	2	300	40	33,87	25,43	42,93
10	4	200	20	88,76	18,96	83,87
11	3	250	30	63,10	21,80	68,56
12	2	200	40	86,62	20,13	86,92
13	5	250	30	65,60	21,80	74,02
14	4	300	40	36,41	25,03	45,43
15	3	350	30	28,97	25,80	37,26
16	3	150	30	92,27	18,91	86,99
17	3	250	30	62,10	21,84	67,63
18	3	250	30	63,75	21,62	68,70
19	4	300	20	43,25	24,69	53,22
20	3	250	30	63,51	21,85	68,46

10.9.1.1 Elma Dalı Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Kütle Verimi Sonuçları

Elma dalı kullanılarak yapılan torrefaksiyon denemeleri sonucunda elde edilen ürünlerin, kütle verimliliği analizi sonucunda elde edilen verilerin Anova analizi Design Expert programı yardımıyla yapılmış ve Anova analiz sonuçları Çizelge 10.41’de verilmiştir. Anova analizi sonucunda elde edilen R^2 değerinden, deney parametreleri ile torrefaksiyon uygulanmış elma dallarının kütle verimi değişiminin %94,55 doğrulukta kuadratik yani ikinci dereceden modele uyduğu belirlenmiştir.

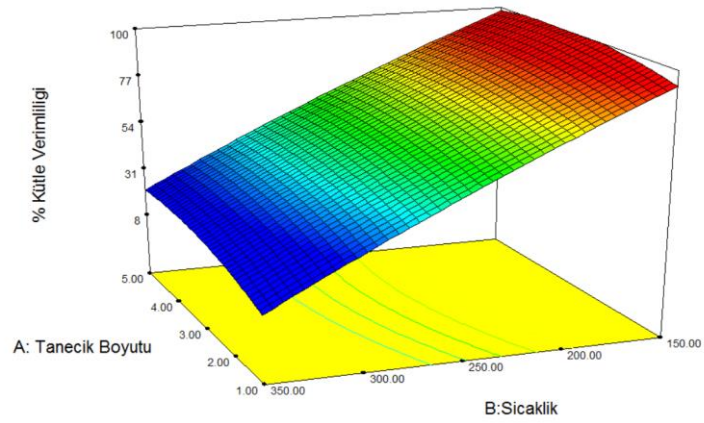
Çizelge 10.41 Torrefaksiyon uygulanan elma dallarının kütle verimliliğinin Anova analizi

Cevap 1	% KÜTLE VERİMLİLİĞİ					
Tepki Yüzeyi Kuadratik Model için ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karalar toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri Prob > F	
Kaynak						
Model	7180,05	9	797,78	19,27	<0,0001	Önemli
A-Tanecik boyutu	72,07	1	72,07	1,74	0,2164	
B-Sıcaklık	6527,15	1	6527,15	157,65	<0,0001	
C-Kalma Zamanı	289,11	1	289,11	6,98	0,0246	
C²	166,95	1	166,95	4,03	0,0724	
Artık	414,03	1	41,40			
Uyum Eksikliği	412,31	10	82,46	239,44	<0,0001	Önemli
Hata	1,72	5	0,34			
Standart Sapma	6,43		R²	0,9455		

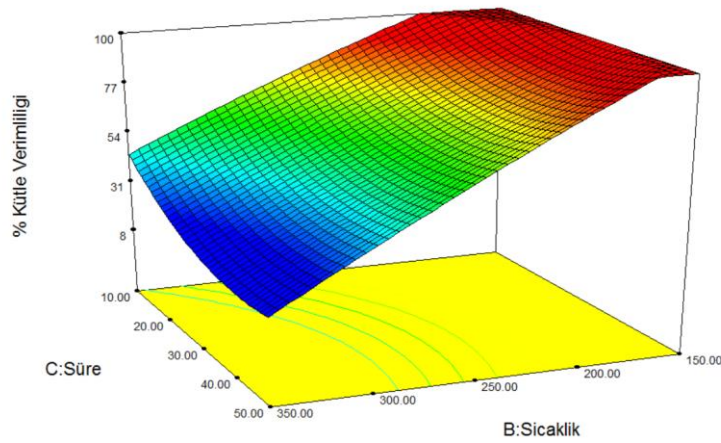
Çizelge 10.41’de verilen Anova analizi sonucunda elde edilen p-değerlerinden, elma dallarının torrefaksiyon prosesi üzerinde en etkili parametrenin sıcaklık olduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra sıcaklık kadar etkili olmasa da kalma süresinin ve kalma süresinin (C²) üssel değişiminin torrefaksiyon prosesi uygulanması sırasında elma dallarının kütle verimi üzerinde etkileri olduğu tespit edilmiştir.

10.9.1.2 Elma Dalı Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde Deneysel Parametrelerin Kütle Verimi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Elma dalı biyokütlesi kullanılarak yapılan torrefaksiyon prosesi sonrasında elde edilen ürünün kütle verimliliği verilerinin grafikleri Şekil 10.28’de verilmiş olup bu grafiklerden elma dalı biyokütlesinin kütle verimliliği üzerine tanecik boyutu, sıcaklık, kalma süresi gibi proses parametrelerinin etkisi açıkça görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 10.28 Elma dalı için proses parametrelerinin kütle verimi üzerine etkileri

Şekil 10.28 a ve b’den de görüldüğü gibi artan sıcaklık değeri ile elma dallarına torrefaksiyon prosesinin uygulanması sonrasında elde edilen ürünlerinin kütle verimliliğinde ciddi derecede azalmalar gözlemlenmiştir. Örneğin Çizelge 10.40’ta sıcaklığın elma dalının kütle verimliliği üzerinde etkilerini belirlemek için yapılmış olan 7, 15 ve 16 numaralı denemelerde sıcaklığın 150°C’den, 250°C’ye çıkması durumunda kütle verimini %92,27’den %63,23’ya, 350°C’ye çıkması durumunda ise %28,97 düştüğü görülmektedir. Buradan da artan sıcaklıkla kütle verimindeki azalma açıkça görülmektedir ve bunun sebebinin artan sıcaklıkla biyokütlenin yapısında bulunan nem ve uçucu maddelerin uzaklaşmasının yanı sıra hemiselülozun da termokimyasal bozunmasından kaynaklı kütle kayıplarının olduğu düşünülmektedir.

Şekil 10.28 a'da tanecik boyutunun kütle verimi üzerindeki etkisi verilmiştir ve Şekil 10.20'den tanecik boyutundaki değişimin, elma saplarının torrefaksiyon prosesi üzerinde sıcaklık kadar önemli değişimlere sebep olmadığı görülmektedir. Tanecik boyutunun, elma dalının kütle verimliliği üzerine etkilerini belirlemek amacıyla yapılan ve Çizelge 10.40'ta verilen 5, 7 ve 13 deney numaralı deneylerin kütle verimliliği sonuçları incelendiğinde; tanecik boyutunun 1 mm'den 3 mm'ye çıkması durumunda kütle verimliliğinin %51,75'den %63,27'ye, 5 mm'ye çıkması durumunda ise %65,60'a yükseldiği gözlemlenmiştir. Artan tanecik boyutunun briketlerin kütle verimliliğini arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Şekil 10.28 b'de kalma zamanının, elma dallarına torrefaksiyon işlemi uygulanması sonrasında elde edilen ürün üzerindeki etkileri verilmiştir ve kalma süresi arttıkça torrefaksiyon ürünlerinin kütle verimliliğinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge 10.40'ta 8, 2 ve 7 numaralı deneyler kalma süresinin, kütle verimliliği üzerinde etkilerinin belirlenmesi amacıyla yapılmış denemelerdir. Bu deney numaralı denemeler baz alındığında, kalma süresinin 10 dakikadan 30 dakikaya çıkması durumunda kütle verimliliğinin %86,65'den %63,27'ye düştüğü, 50 dakikaya çıkması durumunda ise %61,04'e düştüğü görülmektedir. Buradan kalma zamanın 30 dakikaya kadar kütle verimliliğini önemli ölçüde azalttığı ve bu dakikadan sonra kütle verimliliğindeki azalmanın yavaşladığı belirlenmiştir.

Yapılan denemeler sonucunda en yüksek kütle verimi değerine 3 mm tanecik boyutu, 150°C sıcaklık ve 30 dk. kalma zamanı şartlarında, en düşük kütle verimi değerine ise 3 mm tanecik boyutu, 350°C ve 30 dk. kalma zamanı sonucunda ulaşılmıştır. En yüksek ve en düşük kütle verimlilikleri sırasıyla %92,27 ve %28,97 olarak belirlenmiştir.

10.9.1.3 Elma Dalı Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Isıl Değer Verileri

Elma dalı kullanılarak yapılan torrefaksiyon denemeleri sonucunda elde edilen ürünlerin ısı değerleri Çizelge 10.40'ta verilmiş olup, elde edilen verilere merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak yapılan Anova analiz sonuçları Çizelge 10.42'de verilmiştir. Anova analizi sonuçlarından torrefaksiyon uygulanmış elma dallarının ısı değer değişimlerinin %93,59 doğrulukta kuadratik yani ikinci dereceden modele uyduğu

belirlenmiştir. Modelin p-değerinin 0,0001'den küçük olması modelin doğruluğunun göstergesidir.

Çizelge 10.42 Elma dalı kullanılarak yapılan torrefaksiyon ürünlerinin ısı değerlerinin Anova analizi sonuçları

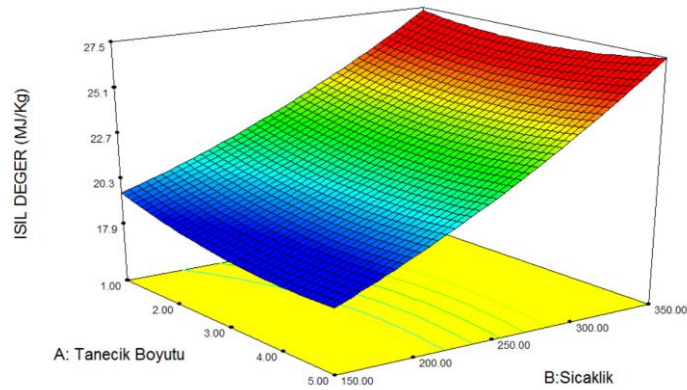
Cevap 2	ISIL DEĞER (MJ/KG)					
Tepki Yüzeyi Kuadratik Model için ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karaler toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri Prob > F	
Kaynak						
Model	83,93	9	9,33	16,22	<0,0001	Önemli
A-Tanecik boyutu	0,48	1	0,48	0,83	0,3842	
B-Sıcaklık	73,50	1	73,50	127,89	<0,0001	
C-Kalma Zamanı	8,47	1	8,47	14,74	0,0033	
B²	0,65	1	0,65	1,14	0,3115	
C²	0,13	1	0,13	0,23	0,6441	
Artık	5,75	10	0,57			
Uyum Eksikliği	5,64	5	1,13	51,68	0,0003	Önemli
Hata	0,11	5	0,02			
Standart Sapma	0,76		R²	0,9359		

DeneySEL parametrelerin ısı değer üzerine etkilerini belirlemek amacıyla yapılan Anova analizi sonucunda elde edilen ve Çizelge 10.42'de verilen tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametrelerinin p-değerlerine bakıldığında bu parametrelerin p-değerlerinin sırasıyla 0,3842, <0,0001 ve 0,0033 olduğu belirlenmiş ve merkezi kompozit tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak yapılan deney planı doğrultusunda elde edilen torrefaksiyon uygulanmış ürünlerin ısı değeri üzerinde, en etkili parametrenin sıcaklık olduğu tespit edilmiştir. Sıcaklık kadar olmasa da ısı değeri üzerinde kalma zamanının da etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

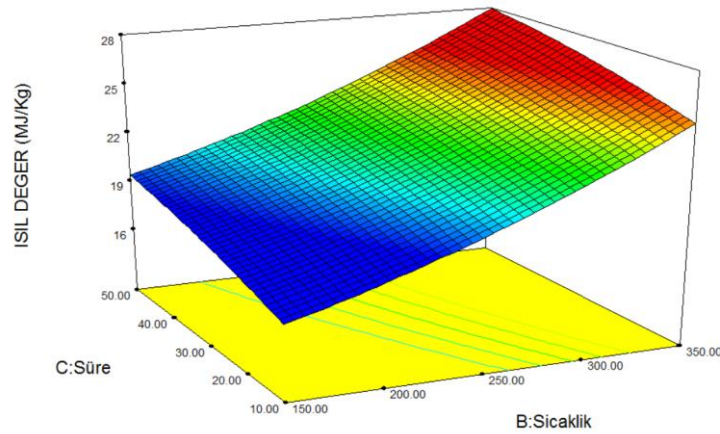
10.9.1.4 Elma Dalı Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde DeneySEL Parametrelerin, Isıl Değer Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Elma dalı kullanılarak yapılan torrefaksiyon işlemi uygulanması denemelerinde, merkezi birleşik tasarım optimizasyon programı kullanılarak elde edilen torrefaksiyon ürünlerinin

ısı değeri üzerine, tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametrelerinin etkileri Şekil 10.29’da grafik edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 10.29 Elma dalı için proses parametrelerinin ısı değeri üzerine etkileri

Torrefaksiyon prosesi sonucunda elde edilen ürünlerde aranan önemli özelliklerden bir tanesi ısı değeridir. Şekil 10.29 a ve b’den açıkça görülmektedir ki elma dalı kullanılarak elde edilen ürünlerin ısı değeri, artan sıcaklık ve kalma zamanıyla artarken, tanecik boyutu arttıkça azalmaktadır. Artan sıcaklık ve kalma zamanı biyokütlenin yapısında bulunan enerji içeriği düşük bileşenlerin, biyokütlenin yapısından daha fazla miktarda uzaklaşmasına ve böylelikle biyokütlenin karbon yoğunluğunun artmasına sebep olmaktadır. Biyokütlenin karbon yoğunluğunun artmasına bağlı olarak ürünün ısı değeri de artmaktadır. Artan tanecik boyutu ile ısı değerinin azalmasının sebebi ise yüksek tanecik boyutlarında çekirdek sıcaklığının düşük tanecik boyutlarına göre daha düşük

olması ve bu sebeple yapıda bulunan zayıf enerji içerikli bileşenlerin yapıda kalarak ısı değeri azaltmasıdır.

Isıl değeri üzerinde tanecik boyutunun etkisinin belirlenmesi amacıyla 1 mm, 3 mm, 5 mm tanecik boyutları kullanılarak, sıcaklık ve kalma süresi 250°C sıcaklıkta ve 30 dakikada sabit tutularak yapılmıştır. Bu denemelere ait deney numaraları Çizelge 10.40'ta sırasıyla 5, 7, 13 olarak verilmiştir. Bu denemeler sonucunda elde edilen ısı değeri verileri sırasıyla 22,77 MJ/KG, 22,08 MJ/KG ve 21,80 MJ/KG olarak belirlenmiştir ve elde edilen verilerden de artan tanecik boyutu ile ısı değeri azaldığı açıkça görülmektedir.

Isıl değeri üzerine sıcaklığın etkisinin incelenmesi amacıyla denemeler, 150°C, 250°C, 350°C sıcaklıklarda, 3 mm tanecik boyutu ve 30 dakika kalma süresi kullanılarak yapılmıştır. Bu denemelere ait deney numaraları Çizelge 10.40'de sırasıyla 16, 7 ve 15 olarak verilmiştir. Bu denemeler sonucunda elde edilen ısı değeri verileri sırasıyla 18,91 MJ/KG, 22,08 MJ/KG, 25,80 MJ/KG olarak belirlenmiş ve buradan da artan sıcaklıkla ısı değeri üzerindeki artış açıkça görülmektedir.

Kalma zamanının ısı değeri üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla denemeler, 10 dk., 30dk., ve 50dk. kalma sürelerinde 3 mm tanecik boyutu ve 250°C sıcaklık kullanılarak yapılmıştır. Bu denemelere ait deney numaraları Çizelge 10.40'ta sırasıyla 8, 7 ve 2 olarak verilmiştir. Bu denemeler sonucunda elde edilen ısı değeri verileri sırasıyla 19,27 MJ/KG, 22,08 MJ/KG, 23,59 MJ/KG olarak belirlenmiş ve buradan da artan tanecik boyutu ile ısı değeri üzerindeki artış açıkça görülmektedir.

Farklı sıcaklık ve kalma süreleri kullanılarak yapılan denemeler sonucunda elde edilen ısı değeri verilerindeki artışlar karşılaştırıldığında, artan sıcaklıkla ısı değeri verilerindeki artışın; artan kalma zamanıyla ısı değeri üzerindeki artıştan daha yüksek olduğu görülmekte ve buradan sıcaklığın ısı değeri üzerinde daha etkili olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Yapılan analizler sonucunda en yüksek ısı değeri 3 mm tanecik boyutu 350°C sıcaklık ve 30 dakika kalma süresi uygulanması sonucu ulaşılmış ve bu parametreler kullanılarak elde edilen ısı değeri 25,80 MJ/KG olarak belirlenmiştir. En düşük ısı değeri ise 3 mm tanecik boyutu 150°C sıcaklık ve 30 dk. kalma süresi uygulanması sonucunda ulaşılmıştır ve bu parametreler kullanılarak belirlenen ısı değeri 18,91 MJ/KG olarak belirlenmiştir.

10.9.1.5 Elma Dalı Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Enerji Verimliliği Verileri

Elma dalı kullanılarak yapılan torrefaksiyon denemeleri sonucunda elde edilen ürünlerin enerji verimliliği değerleri Çizelge 10.40'ta verilmiş olup, elde edilen verilere merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak yapılan Anova analiz sonuçları Çizelge 10.43'te verilmiştir. Anova analizi sonuçlarından torrefaksiyon uygulanmış elma dallarının enerji verimliliği değişimlerinin %94,56 doğrulukta kuadratik yani ikinci dereceden modele uyduğu belirlenmiştir. Modelin p-değerinin 0,0001'den küçük olması modelin doğruluğunun göstergesidir.

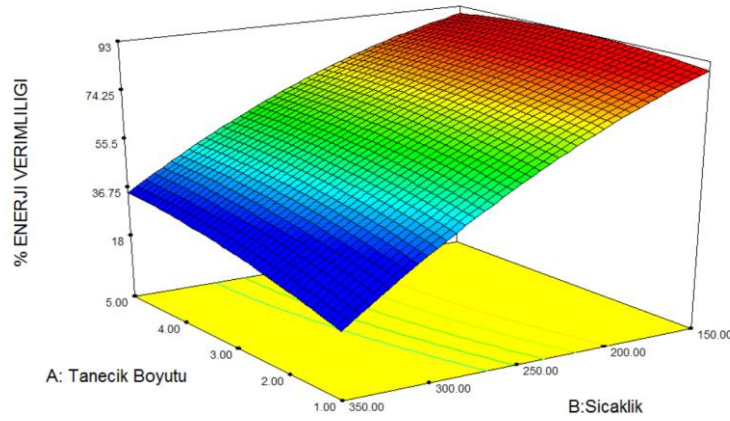
Çizelge 10.43 Elma dalı kullanılarak yapılan torrefaksiyon ürünlerinin enerji verimliliği verilerinin Anova analizi sonuçları

Cevap 3						
Tepki Yüzeyi Kuadratik Model için ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karalar toplamı - Tip III]						
% ENERJİ VERİMLİLİĞİ						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri Prob > F	
Kaynak						
Model	4465,58	9	496,18	19,31	<0,0001	Önemli
A-Tanecik boyutu	74,30	1	74,30	2,89	0,1199	
B-Sıcaklık	4016,15	1	4016,15	156,31	<0,0001	
C-Kalma Zamanı	70,14	1	70,14	2,73	0,1295	
C ²	103,23	1	103,23	4,02	0,0728	
Artık	256,94	10	25,69			
Uyum Eksikliği	254,62	5	50,92	109,90	<0,0001	Önemli
Hata	2,32	5	0,46			
Standart Sapma	5,07		R ²	0,9456		

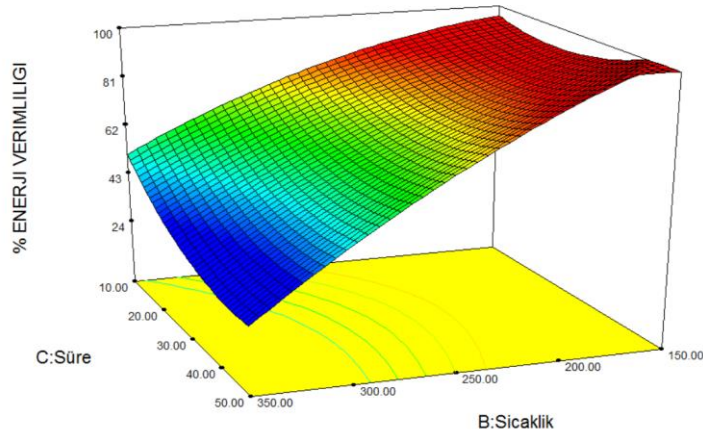
DeneySEL parametrelerin enerji verimliliği üzerine etkilerini belirlemek amacıyla yapılan Anova analizi sonucunda elde edilen ve Çizelge 10.43'te verilen tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametrelerinin p-değerlerine bakıldığında bu parametrelerin p-değerlerinin sırasıyla 0,1199, <0,0001 ve 0,1295 olduğu belirlenmiş ve merkezi kompozit tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak yapılan deney planı doğrultusunda elde edilen torrefaksiyon uygulanmış ürünlerin enerji verimliliği üzerinde, en etkili parametrenin sıcaklık olduğu tespit edilmiştir.

10.9.1.6 Elma Dalı Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde Deneysel Parametrelerin Enerji Verimliliği Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Elma dalı kullanılarak yapılan torrefaksiyon işlemi uygulanması denemelerinde merkezi birleşik tasarım optimizasyon programı kullanılarak elde edilen torrefaksiyon ürünlerinin enerji verimliliği üzerine, tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametrelerinin etkileri Şekil 10.30'da grafik edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 10.30 Elma dalı için proses parametrelerinin enerji verimliliği üzerine etkileri

Şekil 10.30 a ve b'den elma dalına torrefaksiyon uygulanması sonucu elde edilen ürünlerin enerji verimliliği, artan sıcaklık ve kalma zamanıyla azalmakta, tanecik boyutu arttıkça enerji verimliliği artmaktadır. Kalma zamanı ve sıcaklıkla enerji veriminin azalmasının sebebinin, artan sıcaklıkla elma dallarına torrefaksiyon prosesi uygulanması

sonucu oluşan kütle kaybının, ısıl değerde oluşan artıştan yüksek olmasıdır. Artan tanecik boyutu ile enerji verimliliğinin artmasının sebebinin ise sıcaklık ve kalma zamanındaki artışla; düşük tanecik boyutlarında oluşan kütle kaybının yüksek tanecik boyutlarında oluşan kütle kaybindan daha yüksek olması olduğu düşünülmektedir.

Enerji verimliliği üzerinde tanecik boyutunun etkisinin belirlenmesi amacıyla denemeler 1 mm, 3 mm, 5 mm tanecik boyutları kullanılarak, sıcaklık ve kalma süresi 250°C ve 30 dakikada sabit tutularak yapılmıştır. Bu denemelere ait deney numaraları izelge 10.40'ta sırasıyla 5, 7, 13 olarak verilmiştir. Bu denemeler sonucunda elde edilen ısıl değer verileri sırasıyla %58,73, %69,62, %74,02 olarak belirlenmiştir. Elde edilen verilerden artan tanecik boyutu ile enerji verimliliğinin arttığı ve 3 mm tanecik boyutundan sonraki tanecik boyutu değerlerinde, tanecik boyutunun etkisinin giderek azaldığı açıkça görülmektedir.

Enerji verimliliği üzerine sıcaklığın etkisinin incelenmesi amacıyla denemeler 150°C, 250°C ve 350°C sıcaklıkta 3 mm tanecik boyutu ve 30 dakika kalma süresi kullanılarak yapılmıştır. Bu denemelere ait deney numaraları izelge 10.40'ta sırasıyla 16, 7 ve 15 olarak verilmiştir. Bu denemeler sonucunda elde edilen enerji verimliliği verileri sırasıyla %86,99, %69,62 ve %37,26 olarak belirlenmiştir ve buradan da artan sıcaklıkla enerji verimliliğindeki azalış açıkça görülmektedir.

Kalma zamanının enerji verimliliği üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla denemeler 10 dk., 30dk., ve 50dk. kalma sürelerinde 3 mm tanecik boyutu ve 250°C sıcaklık kullanılarak yapılmıştır. Bu denemelere ait deney numaraları izelge 10.40'ta sırasıyla 8, 7 ve 2 olarak verilmiştir. Bu denemeler sonucunda elde edilen enerji verimliliği verileri sırasıyla %83,23, %69,62 ve %71,76 olarak belirlenmiştir ve buradan da 10. ve 30. dakikalarda artan kalma zamanı ile enerji verimliliği üzerindeki azalış açıkça görülmektedir. 50. dakikada enerji verimliliğindeki artışın sebebi 30. dakikadan sonra oluşan kütle kaybı hızındaki azalıştır.

Farklı sıcaklık ve kalma süreleri kullanılarak yapılan denemeler sonucunda elde edilen enerji verimliliği verilerindeki azalış oranları karşılaştırıldığında, artan sıcaklıkla enerji verimliliği verilerindeki azalışın; artan kalma zamanıyla enerji verimliliği verilerindeki azalışından daha yüksek olduğu görülmektedir. Buradan sıcaklığın elma dallarına

torrefaksiyon işlemi uygulanması sonucunda elde edilen ürünlerin enerji verimliliği üzerinde daha etkili olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Yapılan analizler sonucunda en yüksek enerji verimliliğine 4 mm tanecik boyutu 200°C sıcaklık ve 40 dakika kalma süresi uygulanması sonucu ulaşılmış ve bu parametreler kullanılarak elde edilen enerji verimliliği değeri %87,60 olarak belirlenmiştir. En düşük enerji verimliliği değerine ise 3 mm tanecik boyutu 350°C sıcaklık ve 30 dk. kalma süresi uygulanması sonucunda ulaşılmıştır ve bu parametreler kullanılarak belirlenen enerji verimliliği %37,26 olarak belirlenmiştir.

10.9.1.7 Elma Dalına Uygulanan Torrefaksiyon Denemelerinin Genel Değerlendirilmesi

Elma dallarına torrefaksiyon prosesinin uygulanması çalışmalarında optimum tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılan denemelerin deney planı Design Expert programı yardımıyla merkezi kompozit tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Belirlenen deney planı çerçevesinde elde edilen torrefaksiyon uygulanmış ürünlerin kütle verimliliği, ısı değeri ve enerji verimlilikleri belirlenmiş ve deney çıktılarının çözümlenmesi yine Design Expert programı kullanılarak yapılmıştır. Tüm parametreler ve analiz sonuçları için yapılan çözümleme aralıkları Çizelge 10.44’de verilmiştir.

Çizelge 10.44 Elma dalı biyokütlesi için çözümleme şartları

KISITLAMALAR				
İsim	Hedef	Alt Limit	Üst Limit	Önem
Tanecik boyutu	analiz aralığında	2	4	3
Sıcaklık	analiz aralığında	200	300	3
Kalma süresi	analiz aralığında	20	40	3
Kütle verimliliği	analiz aralığında	28,96566	92,26911	5
Isıl değer (MJ/KG)	analiz aralığında	18,91382	25,8023	5
Enerji verimliliği	analiz aralığında	37,25276	86,98659	3

Çizelge 10.44’de verilen çözümleme şartları sonucunda elma dalı biyokütlesine torrefaksiyon işlemi uygulanması sonucu elde edilen optimum deney parametreleri, 3 mm tanecik boyutu 250°C sıcaklık ve 30 dk kalma süresi olarak belirlenmiştir. Bu

optimum değerler kullanarak elde edilen kütle verimliliği, ısıl değer ve enerji verimliliği verileri sırasıyla %63,27, 22,08 MJ/KG ve %69,62 olarak belirlenmiştir.

10.9.2 ay Atığına Torrefaksiyon Prosesinin Uygulanması

ay atığı biyokütlesine torrefaksiyon prosesi uygulanması çalışmalarının deney planı Design Expert programı yardımıyla merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanarak yapılmıştır. Deney planında tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametreleri ile çay atığı biyokütlesinin ısıl değer, kütle ve enerji verimliliği değerlerinin değişimi incelenmiştir. Bu kapsamda yapılmış olan deney planı ve ıktıları izelge 10.45’de verilmiştir.



Çizelge 10.45 Çay atığı biyokütlesine torrefaksiyon uygulanması sonucu elde edilen veriler

Deney numarası	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Cevap 1	Cevap 2	Cevap 3
	A:Tanecik Boyutu (mm)	B: Sıcaklık (°C)	C: Kalma zamanı (dk)	Kütle verimliliği (%)	Isıl Değer (MJ/KG)	Enerji verimliliği (%)
1	4	200	20	84,85	21,38	85,40
2	5	250	30	70,61	23,42	79,37
3	4	300	40	51,69	25,49	62,02
4	2	200	40	82,80	21,64	84,37
5	3	250	30	74,66	23,33	82,01
6	3	250	30	73,37	23,33	80,59
7	2	300	20	71,13	25,06	83,91
8	3	250	10	88,07	21,16	87,72
9	3	250	30	73,37	23,37	81,67
10	4	200	40	78,01	21,63	79,43
11	3	350	30	54,73	26,79	69,03
12	3	250	30	74,32	23,39	81,83
13	2	300	40	42,80	26,54	53,47
14	2	200	20	87,56	21,39	88,17
15	3	250	30	74,46	23,34	81,80
16	1	250	30	76,91	23,23	84,13
17	4	300	20	76,94	25,08	90,86
18	3	250	30	74,36	23,31	81,60
19	3	150	30	92,24	20,35	88,37
20	3	250	50	60,67	24,43	69,77

10.9.2.1 Çay Atığı Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Kütle Verimi Sonuçları

Çay atığı kullanılarak yapılan torrefaksiyon denemeleri sonucunda elde edilen ürünlerin kütle verimliliği analizi sonucunda belirlenen verilerin Anova analizi Design Expert programı yardımıyla yapılmış ve Anova analiz sonuçları Çizelge 10.46'a verilmiştir. Anova analizi sonucunda elde edilen R^2 değerinden, deney parametreleri ile torrefaksiyon uygulanmış çay atıklarının kütle verimi değişiminin, %97,71 doğrulukta kuadratik yani ikinci dereceden modele uyduğu belirlenmiştir.

Çizelge 10.46 Torrefaksiyon uygulanan çay atıklarının kütle verimliliğinin Anova analizi

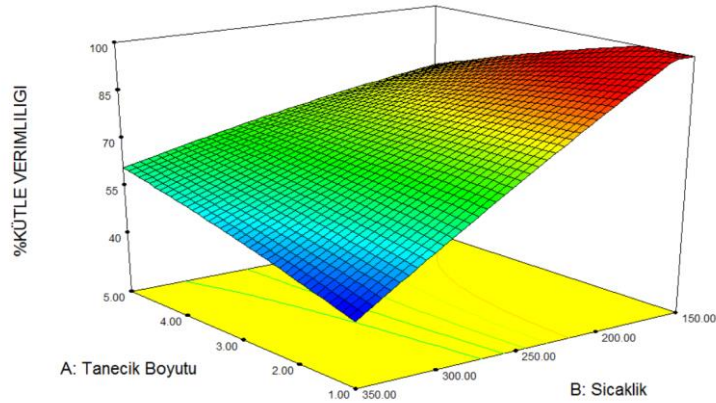
Cevap 1	% KÜTLE VERİMLİLİĞİ					
Tepki Yüzeyi Kuadratik Model için ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karaler toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri Prob > F	
Kaynak						
Model	2904,56	9	322,723	47,34	<0,0001	Önemli
A-Tanecik boyutu	1,83	1	1,83	0,27	0,6154	
B-Sıcaklık	1716,08	1	1716,08	251,73	<0,0001	
C-Kalma Zamanı	899,90	1	899,90	132,01	<0,0001	
AB	61,56	1	61,56	9,03	0,0132	
BC	220,35	1	220,35	32,32	0,0002	
Artık	68,17	10	6,82			
Uyum Eksikliği	67,18	5	13,44	67,47	0,0001	Önemli
Hata	1,00	5	0,20			
Standart Sapma	2,61		R²	0,9771		

Çizelge 10.46’da verilen Anova analizi sonucunda elde edilen p-değerlerinden, çay atığı katkı maddesinin torrefaksiyon prosesi üzerinde, en etkili parametrelerin sıcaklık ve kalma zamanı olduğu belirlenmiştir. Her iki parametreninde p-değerleri aynı olduğundan Çizelge 10.46’da verilen F değerlerine bakıldığında sıcaklık parametresinin F değerinin kalma zamanı parametresinin F değerinden daha yüksek olduğu görülmektedir ve bu F değeri verisi, sıcaklığın, çay atığının torrefaksiyon prosesi üzerinde kalma zamanından daha etkili olduğunun bir göstergesidir. Bunun yanı sıra Çizelge 10.46’dan çay atığının torrefaksiyon prosesi üzerinde, AB (tanecik boyutu ve sıcaklık arasındaki etkileşim) ve BC (sıcaklık ve kalma zamanı arasındaki etkileşim) parametrelerinin sıcaklık ve kalma zamanı parametreleri kadar olmasada etkilerinin bulunduğu açıkça görülmektedir.

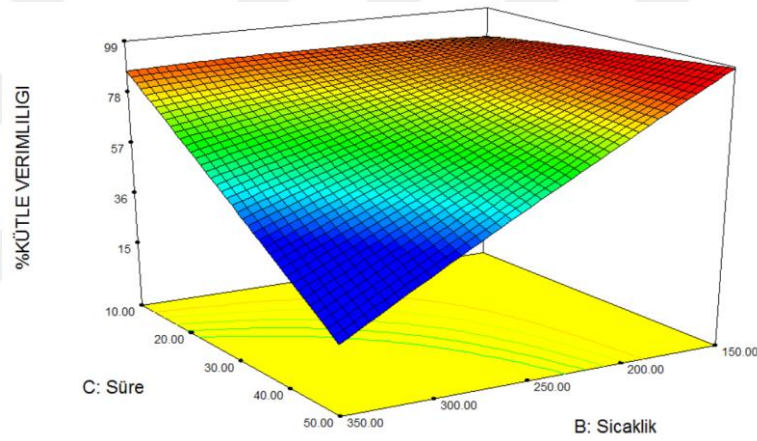
10.9.2.2 Çay Atığı Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde Deneysel Parametrelerin Kütle Verimi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Çay atığı biyokütlesi kullanılarak yapılan torrefaksiyon prosesi sonrasında elde edilen ürünün kütle verimliliği verilerinin grafikleri Şekil 10.31’de verilmiş olup bu grafiklerden

ay atığı biyokütlesinin kütle verimliliği üzerine tanecik boyutu, sıcaklık, kalma süresi gibi proses parametrelerinin etkisi açıkça görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 10.31 ay atığı için proses parametrelerinin kütle verimi üzerine etkileri

Şekil 10.31 a ve b’den de görüldüğü gibi çay atıklarına yüksek sıcaklıklarda torrefaksiyon uygulanması sonrasında elde edilen ürünün kütle verimliliğinde ciddi derecede azalma gözlemlenmektedir. Örneğin izelge 10.45’de sıcaklığın, çay atıklarının kütle verimliliği üzerinde etkilerini belirlemek için yapılmış olan 19, 6 ve 11 numaralı denemelerde, sıcaklığın 150 C’den, 250 C’ye çıkması durumunda kütle verimini %92,24’den %73,37’ye, 350 C’ye çıkması durumunda ise %54,73’e düştüğü görülmektedir. Buradan da artan sıcaklıkla kütle verimindeki azalma açıkça görülmektedir ve bunun sebebinin, artan sıcaklıkla biyokütlenin yapısında bulunan nem ve uçucu maddelerin

uzaklaşmasının yanı sıra hemiselülozun termokimyasal bozunmasından kaynaklı kütle kayıplarının olduğu düşünülmektedir.

Şekil 10.31 a’da tanecik boyutunun kütle verimi üzerindeki etkisi verilmiştir ve şekilden, tanecik boyutundaki değişimin, çay atığının torrefaksiyon prosesi üzerinde tanecik boyutunun sıcaklık kadar önemli değişimlere sebep olmadığı görülmektedir.

Şekil 10.31 b’de kalma zamanının, çay atığına torrefaksiyon işlemi uygulanması sonrasında elde edilen ürün kütle verimi üzerindeki etkileri verilmiştir ve kalma süresi arttıkça torrefaksiyon ürünlerinin kütle verimliliğinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge 10.45’te 8, 6 ve 20 numaralı deneyler kalma zamanının kütle verimliliği üzerinde etkilerinin belirlenmesi amacıyla yapılmış denemelerdir. Bu deney numaralı denemeler baz alındığında kalma süresinin 10 dakikadan 30 dakikaya çıkması durumunda kütle verimliliğinin %88,07’den, %73,37’ye düştüğü, 50 dakikaya çıkması durumunda ise %60,67’ye düştüğü görülmektedir.

Yapılan denemeler sonucunda en yüksek kütle verimi değerine 3 mm tanecik boyutu, 150°C sıcaklık ve 30 dk. kalma süresi şartlarında, en düşük kütle verimi değerine ise 2 mm tanecik boyutu, 300°C sıcaklık ve 40 dk. kalma süresi sonucuna ulaşılmıştır. En yüksek ve en düşük kütle verimlilikleri sırasıyla %92,24 ve %42,80 olarak belirlenmiştir.

10.9.2.3 Çay Atığı Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Isıl Değer Verileri

Çay atığı kullanılarak yapılan torrefaksiyon denemeleri sonucunda elde edilen ürünlerin ısı değerleri Çizelge 10.45’te verilmiş olup, elde edilen verilere merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak yapılan Anova analiz sonuçları Çizelge 10.47’de verilmiştir. Anova analizi sonuçlarından torrefaksiyon uygulanmış çay atıklarının ısı değer değişimlerinin %94,33 doğrulukta lineer yani birinci dereceden modele uyduğu belirlenmiştir. Modelin p-değerinin 0,0001’den küçük olması modelin doğruluğunun göstergesidir.

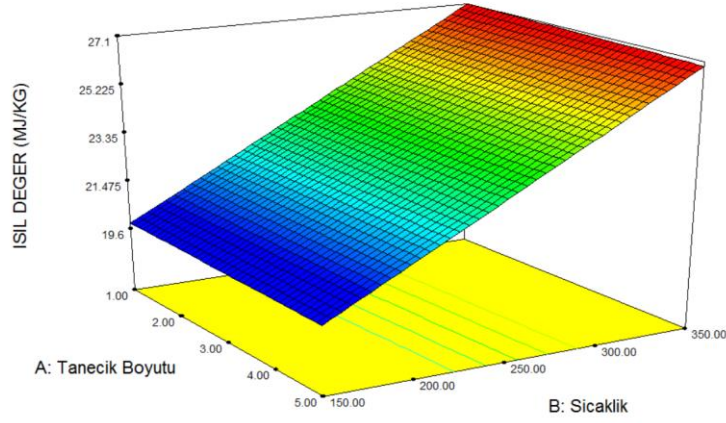
Çizelge 10.47 Çay atığı kullanılarak yapılan torrefaksiyon ürünlerinin ısı değeri verilerinin Anova analizi sonuçları

Cevap 2	ISIL DEĞER (MJ/KG)					
Tepki Yüzeyi Lineer Model için ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karalar toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri Prob > F	
Kaynak						
Model	57,63	3	19,21	88,75	<0,0001	Önemli
A-Tanecik boyutu	0,028	1	0,028	0,13	0,7228	
B-Sıcaklık	52,61	1	52,61	243,06	<0,0001	
C-Kalma Zamanı	4,99	1	4,99	23,05	0,0002	
Artık	3,46	16	0,22			
Uyum Eksikliği	3,46	11	0,31	377,06	<0,0001	Önemli
Hata	0,004	5	0,00083			
Standart Sapma	0,47		R²	0,9433		

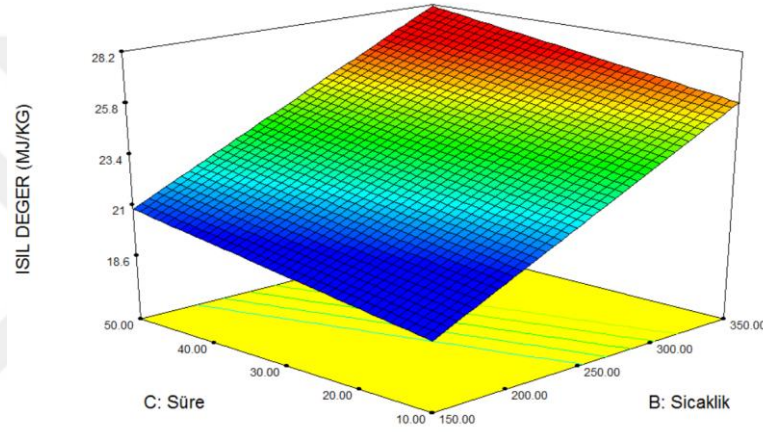
DeneySEL parametrelerin ısı değeri üzerine etkilerini belirlemek amacıyla yapılan Anova analizi sonucunda elde edilen ve Çizelge 10.47'de verilen tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametrelerinin p-değerlerine bakıldığında bu parametrelerin p-değerlerinin sırasıyla 0,7228, <0,0001 ve 0,0002 olduğu belirlenmiş ve merkezi kompozit tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak yapılan deney planı doğrultusunda elde edilen torrefaksiyon uygulanmış ürünlerin ısı değeri üzerinde, en etkili parametrenin sıcaklık olduğu tespit edilmiştir. Sıcaklık kadar olmasa da ısı değeri üzerinde kalma zamanının da etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

10.9.2.4 Çay Atığı Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde DeneySEL Parametrelerin Isıl Değeri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Çay atığı kullanılarak yapılan torrefaksiyon işlemi uygulanması denemelerinde merkezi birleşik tasarım optimizasyon programı kullanılarak elde edilen torrefaksiyon ürünlerinin ısı değeri üzerine, tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametrelerinin etkileri Şekil 10.32'de grafik edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 10.32 Çay atığı için proses parametrelerinin ısı değeri üzerine etkileri

Torrefaksiyon prosesi sonucunda elde edilen ürünlerde aranan önemli özelliklerden bir tanesi ısı değeri. Şekil 10.32 a ve b'den açıkça görülmektedir ki çay atığı kullanılarak elde edilen ürünlerin ısı değeri, artan sıcaklık ve kalma zamanıyla artmaktadır ve tanecik boyutunun ısı değeri üzerinde önemli bir etkisi bulunmamaktadır. Artan sıcaklık ve kalma zamanı biyokütlenin yapısında bulunan enerji içeriği düşük bileşenlerin, biyokütlenin yapısından daha fazla miktarda uzaklaşmasına ve böylelikle biyokütlenin karbon yoğunluğunun artmasına sebep olmaktadır. Biyokütlenin karbon yoğunluğunun artmasına bağlı olarak ürünün ısı değeri de artmaktadır.

Isı değeri üzerinde tanecik boyutunun etkisinin belirlenmesi amacıyla 1 mm, 3 mm, 5 mm tanecik boyutları kullanılarak, sıcaklık ve kalma süresi 250°C ve 30 dakikada sabit

tutularak yapılmıştır. Bu denemelere ait deney numaraları Çizelge 10.45'te sırasıyla 16, 6, 2 olarak verilmiştir. Bu denemeler sonucunda elde edilen ısı değerleri verileri sırasıyla 23,23 MJ/KG, 23,33 MJ/KG ve 23,42 MJ/KG olarak belirlenmiştir ve tanecik boyutunun, sıcaklık ve kalma zamanının yanında ısı değeri üzerinde önemli bir etkiye sahip olamadığı belirlenmiştir.

Isı değeri üzerine sıcaklığın etkisinin incelenmesi amacıyla denemeler, 150°C, 250°C, 350°C'de 3 mm tanecik boyutu ve 30 dakika kalma süresi kullanılarak yapılmıştır. Bu denemelere ait deney numaraları Çizelge 10.45'te sırasıyla 19, 12 ve 11 olarak verilmiştir. Bu denemeler sonucunda elde edilen ısı değeri verileri sırasıyla 20,35 MJ/KG, 23,39 MJ/KG, 26,79 MJ/KG olarak belirlenmiştir. Yapılan denemeler sonucunda elde edilen verilerden artan sıcaklıkla ısı değeri üzerindeki artış açıkça görülmektedir.

Kalma zamanının ısı değeri üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan denemeler 10 dk., 30dk., ve 50dk. kalma sürelerinde 3 mm tanecik boyutu ve 250°C sıcaklık kullanılarak yapılmıştır. Bu denemelere ait deney numaraları Çizelge 10.45'te sırasıyla 8, 6 ve 20 olarak verilmiştir. Bu denemeler sonucunda elde edilen ısı değeri verileri sırasıyla 21,16 MJ/KG, 23,33 MJ/KG, 24,43 MJ/KG olarak belirlenmiştir ve elde edilen verilerden artan tanecik boyutu ile ısı değeri üzerindeki artış açıkça görülmektedir.

Farklı sıcaklık ve kalma süreleri kullanılarak yapılan denemeler sonucunda elde edilen ısı değeri verilerindeki artışlar karşılaştırıldığında, artan sıcaklıkla ısı değeri verilerindeki artışın; artan kalma zamanıyla ısı değeri üzerindeki artıştan daha yüksek olduğu görülmekte ve buradan sıcaklığın ısı değeri üzerinde daha etkili olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Yapılan analizler sonucunda en yüksek ısı değeri 3 mm tanecik boyutu 350°C sıcaklık ve 30 dakika kalma süresi uygulanması sonucu ulaşılmış ve bu parametreler kullanılarak elde edilen ısı değeri 26,79 MJ/KG olarak belirlenmiştir. En düşük ısı değeri ise 3 mm tanecik boyutu 150°C sıcaklık ve 30 dk. kalma süresi uygulanması sonucunda ulaşılmıştır ve bu parametreler kullanılarak belirlenen ısı değeri 20,35 MJ/Kg olarak belirlenmiştir.

10.9.2.5 Çay Atığı Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Enerji Verimliliği Verileri

Çay atığı kullanılarak yapılan torrefaksiyon denemeleri sonucunda elde edilen ürünlerin enerji verimliliği değerleri Çizelge 10.45'te verilmiş olup, elde edilen verilere merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak yapılan Anova analiz sonuçları Çizelge 10.48'de verilmiştir. Anova analizi sonuçlarından torrefaksiyon uygulanmış çay atığının enerji verimliliği değişimlerinin %93,49 doğrulukta kuadratik yani ikinci dereceden modele uyduğu belirlenmiştir. Modelin p-değerinin 0,0001'den küçük olması modelin doğruluğunun göstergesidir.

Çizelge 10.48 Çay atığı kullanılarak yapılan torrefaksiyon ürünlerinin enerji verimliliği verilerinin Anova analizi sonuçları

Cevap 3	% ENERJİ VERİMLİLİĞİ					
Tepki Yüzeyi						
Kuadratik Model için ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karalar toplamı - Tip III]						
Kaynak	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri Prob > F	
Model	1554,94	9	172,77	15,96	<0,0001	Önemli
A-Tanecik boyutu	0,19	1	0,19	0,017	0,8981	
B-Sıcaklık	460,11	1	460,11	42,49	<0,0001	
C-Kalma Zamanı	688,31	1	688,31	63,56	<0,0001	
AB	67,38	1	67,38	6,22	0,0317	
BC	306,39	1	306,39	28,29	0,0003	
Artık	108,29	10	10,83			
Uyum Eksikliği	107,01	5	21,40	83,57	<0,0001	Önemli
Hata	1,28	5	0,26			
Standart sapma	3,29068		R ²	0,9349		

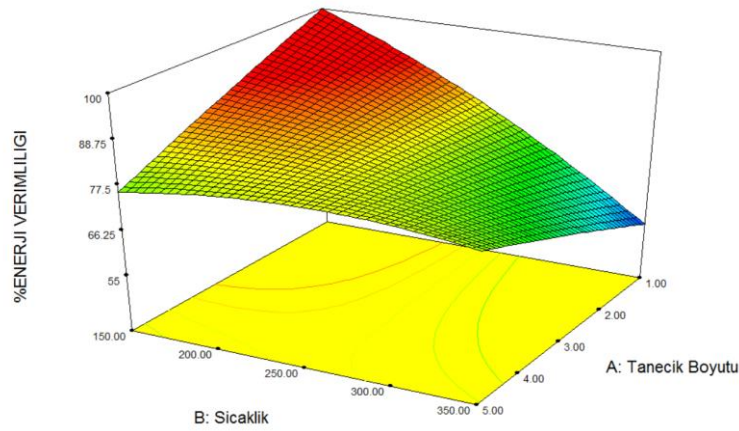
DeneySEL parametrelerin enerji verimliliği üzerine etkilerini belirlemek amacıyla yapılan Anova analizi sonucunda elde edilen ve Çizelge 10.48'de verilen tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametrelerinin p-değerlerine bakıldığında bu parametrelerin p-değerlerinin sırasıyla 0,8981, <0,0001 ve < 0,0001 olduğu belirlenmiş ve merkezi kompozit tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak yapılan deney planı doğrultusunda

elde edilen torrefaksiyon uygulanmış ürünlerin ısı değeri üzerinde, en etkili parametrelerin sıcaklık ve kalma zamanı olduğu tespit edilmiştir.

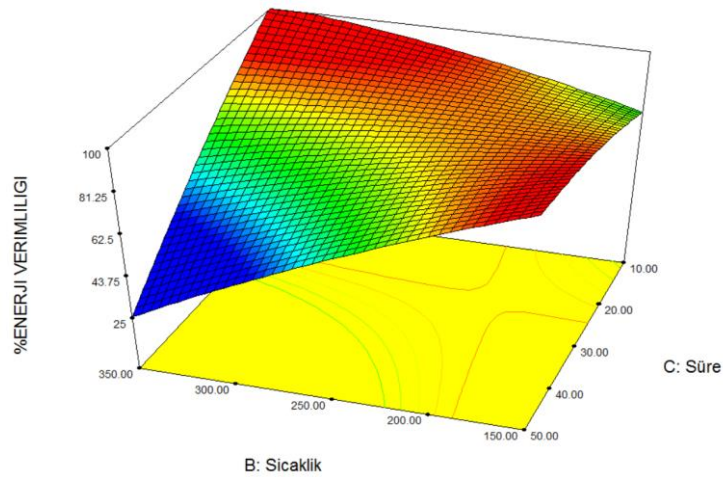
10.9.2.6 Çay Atığı Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde Deneysel

Parametrelerin Enerji Verimliliği Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Çay atığı kullanılarak yapılan torrefaksiyon işlemi uygulanması denemelerinde merkezi birleşik tasarım optimizasyon programı kullanılarak elde edilen torrefaksiyon ürünlerinin enerji verimliliği üzerine, tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametrelerinin etkileri Şekil 10.33'te grafik edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 10.33 Çay atığı için proses parametrelerinin enerji verimliliği üzerine etkileri

Şekil 10.33 a ve b’den açıkça görülmektedir ki çay atığı kullanılarak elde edilen ürünlerin enerji verimliliği, artan sıcaklık ve kalma zamanıyla azalmakta, tanecik boyutu arttıkça enerji verimliliği artmaktadır. Kalma zamanı ve sıcaklıkla enerji veriminin azalmasının sebebinin artan sıcaklıkla çay atıklarına torrefaksiyon prosesi uygulanması sonucu oluşan kütle kaybının, ısıl değerinde oluşan artıştan yüksek olmasıdır. Artan tanecik boyutu ile enerji verimliliğinin artmasının sebebinin ise sıcaklık ve kalma zamanındaki artışla; düşük tanecik boyutlarında oluşan kütle kaybının yüksek tanecik boyutlarında oluşan kütle kaybindan daha düşük olması olduğu düşünülmektedir.

Enerji verimliliği üzerine sıcaklığın etkisinin incelenmesi amacıyla denemeler 150°C, 250°C, 350°C’de 3 mm tanecik boyutu ve 30 dakika kalma süresi kullanılarak yapılmıştır. Bu denemelere ait deney numaraları Çizelge 10.45’te sırasıyla 19, 6 ve 11 olarak verilmiştir. Bu denemeler sonucunda elde edilen enerji verimliliği verileri sırasıyla %88,37, %80,59 ve %69,03, olarak belirlenmiştir ve elde edilen verilerden artan sıcaklıkla enerji verimliliğindeki azalış açıkça görülmektedir.

Kalma zamanının enerji verimliliği üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla denemeler 10 dk., 30dk., ve 50dk. kalma sürelerinde 3 mm tanecik boyutu ve 250°C sıcaklık kullanılarak yapılmıştır. Bu denemelere ait deney numaraları Çizelge 10.45’de sırasıyla 8, 6 ve 20 olarak verilmiştir. Bu denemeler sonucunda elde edilen enerji verimliliği verileri sırasıyla %87,72, %80,59 ve %69,78 olarak belirlenmiştir ve elde edilen verilerden artan kalma zamanı ile enerji verimliliği üzerindeki azalış açıkça görülmektedir.

Yapılan analizler sonucunda en yüksek enerji verimliliğine 4 mm tanecik boyutu 300°C sıcaklık ve 20 dakika kalma süresi uygulanması sonucu ulaşılmış ve bu parametreler kullanılarak elde edilen enerji verimliliği değeri %90,86 olarak belirlenmiştir. En düşük enerji verimliliği değerine ise 2 mm tanecik boyutu 300°C sıcaklık ve 40 dk. kalma süresi uygulanması sonucunda ulaşılmıştır ve bu parametreler kullanılarak belirlenen enerji verimliliği %53,46 olarak belirlenmiştir.

10.9.2.7 Çay Atığına Uygulanan Torrefaksiyon Denemelerinin Genel Değerlendirilmesi

Çay atıklarına torrefaksiyon prosesinin uygulanması çalışmalarında optimum tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılan

denemelerin deney planı Design Expert programı yardımıyla merkezi kompozit tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Belirlenen deney planı çerçevesinde elde edilen torrefaksiyon uygulanmış ürünlerin kütle verimliliği, ısıl değeri ve enerji verimlilikleri belirlenmiş ve elde edilen veriler yine Design Expert programı kullanılarak çözümlenmesi yapılmıştır. Tüm parametreler ve analiz sonuçları için yapılan çözümlenme aralıkları Çizelge 10.49’da verilmiştir.

Çizelge 10.49 Çay atığı biyokütlesi için çözümlenme şartları

KISITLAMALAR				
İsim	Hedef	Alt Limit	Üst Limit	Önem
Tanecik boyutu	analiz aralığında	2	4	3
Sıcaklık	analiz aralığında	200	300	3
Kalma süresi	analiz aralığında	20	40	3
Kütle verimliliği	analiz aralığında	42,80	92,24	5
Isıl değer (MJ/KG)	analiz aralığında	20,35	26,79	5
Enerji verimliliği	analiz aralığında	53,47	90,86	3

Çizelge 10.49’da verilen çözümlenme şartları sonucunda çay atığı biyokütlesine torrefaksiyon işlemi uygulanması sonucu elde edilen optimum deney parametreleri 4 mm tanecik boyutu 300°C sıcaklık ve 20 dk kalma süresi olarak belirlenmiştir. Bu optimum değerler kullanılarak elde edilen kütle verimliliği, ısıl değer ve enerji verimliliği verileri sırasıyla %77,76, 24,60 MJ/Kg ve %89,65 olarak belirlenmiştir.

10.9.3 Fındık Kabuğuna Torrefaksiyon Prosesinin Uygulanması

Fındık kabuğu biyokütlesine torrefaksiyon prosesi uygulanması çalışmalarının deney planı Design Expert programı yardımıyla merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Deney planında tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametreleri ile fındık kabuğu biyokütlesinin ısıl değer, kütle ve enerji verimliliği değerlerinin değişimi incelenmiştir. Bu kapsamda yapılmış olan deney planı ve çıktıları Çizelge 10.50’de verilmiştir.

Çizelge 10.50 Fındık kabuğu biyokütlesine torrefaksiyon uygulanması sonucu elde edilen veriler

Deney numarası	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Cevap 1	Cevap 2	Cevap 3
	A:Tanecik Boyutu (mm)	B: Sıcaklık (°C)	C: Kalma zamanı (dk)	Kütle verimliliği (%)	Isıl Değer (MJ/KG)	Enerji verimliliği (%)
1	4	300	20	54,94	24,18	63,97
2	2	300	20	50,13	24,66	59,51
3	2	200	20	90,96	19,99	87,53
4	3	250	30	73,96	22,26	79,27
5	1	250	30	64,91	23,23	72,61
6	3	250	30	74,28	22,45	80,29
7	4	200	20	91,55	20,08	88,50
8	3	250	10	91,07	19,56	85,75
9	3	250	30	74,23	22,87	82,80
10	3	250	50	72,17	23,83	81,73
11	3	150	30	92,24	19,35	85,93
12	2	300	40	33,80	26,54	43,18
13	5	250	30	76,61	21,02	77,53
14	3	250	30	74,32	22,39	80,10
15	3	350	30	30,73	26,89	39,78
16	3	250	30	74,66	22,23	79,91
17	4	200	40	91,13	21,36	93,71
18	3	250	30	74,46	22,24	79,71
19	4	300	40	46,89	25,49	57,54
20	2	200	40	90,31	20,64	89,76

10.9.3.1 Fındık Kabuğu Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Kütle Verimi Sonuçları

Fındık kabuğu kullanılarak yapılan torrefaksiyon denemeleri sonucunda elde edilen ürünlerin kütle verimliliği analizi sonucunda belirlenen verilerin Anova analizi Design Expert programı yardımıyla yapılmış ve Anova analiz sonuçları Çizelge 10.51’de verilmiştir. Anova analizi sonucunda elde edilen R^2 değerinden, deney parametreleri ile torrefaksiyon uygulanmış fındıkkabuklarının kütle verimi değişiminin, %96,25 doğrulukta kuadratik yani ikinci dereceden modele uyduğu belirlenmiştir.

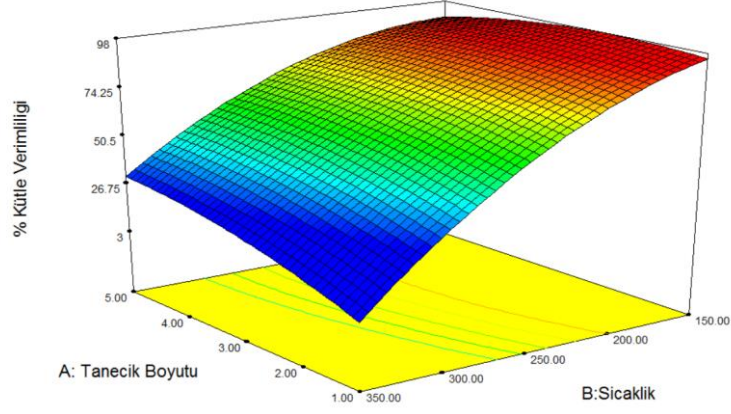
Çizelge 10.51 Torrefaksiyon uygulanan fındık kabuğunun kütle verimliliğinin Anova analizi

Cevap 1	% KÜTLE VERİMLİLİĞİ					
Tepki Yüzeyi Kuadratik Model için ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karaler toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri Prob > F	
Kaynak						
Model	6611,85	9	734,65	28,51	<0,0001	Önemli
A-Tanecik boyutu	113,95	1	113,95	4,42	0,0618	
B-Sıcaklık	5671,16	1	5671,16	220,11	<0,0001	
C-Kalma Zamanı	250,08	1	250,08	9,71	0,0110	
B²	310,08	1	310,08	12,03	0,0060	
Artık	257,65	10	25,77			
Uyum Eksikliği	257,38	5	51,48	958,48	<0,0001	Önemli
Hata	0,27	5	0,054			
Standart Sapma	5,08		R²	0,9625		

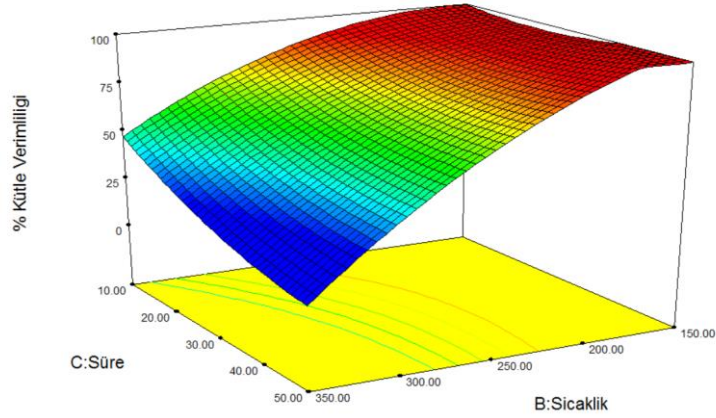
Çizelge 10.51’de verilen Anova analizi sonucunda elde edilen p-değerlerinden, fındık kabuğunun torrefaksiyon prosesi üzerinde elma dallarına yapılan denemelerde de olduğu gibi en etkili parametrenin sıcaklık olduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra sıcaklık kadar etkili olmasa da kalma süresinin, sıcaklığın üssel değişiminin (B²) torrefaksiyon prosesi uygulanması sırasında fındık kabuğunun kütle verimi üzerinde etkileri olduğu tespit edilmiştir.

10.9.3.2 Fındık Kabuğu Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde Deneysel Parametrelerin Kütle Verimi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Fındık kabuğu biyokütlesi kullanılarak yapılan torrefaksiyon prosesi sonrasında elde edilen ürünün kütle verimliliği verilerinin grafikleri Şekil 10.34’de verilmiş olup bu grafiklerden fındık kabuğu biyokütlesinin kütle verimliliği üzerine tanecik boyutu, sıcaklık, kalma süresi gibi proses parametrelerinin etkisi açıkça görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 10.34 Fındık kabuğu için proses parametrelerinin kütle verimi üzerine etkileri

Şekil 10.34 a ve b’den de görüldüğü gibi artan sıcaklık değeri ile fındık kabuğuna torrefaksiyon prosesinin uygulanması sonrasında elde edilen ürünlerinin kütle verimliliğinde ciddi derecede azalmalar gözlemlenmiştir. Örneğin Çizelge 10.50’de sıcaklığın fındık kabuğunun kütle verimliliği üzerinde etkilerini belirlemek için yapılmış olan 11, 6 ve 15 numaralı denemelerde sıcaklığın 150°C’den, 250°C’ye çıkması durumunda kütle verimini %92,24’den %74,28’e, 350°C’ye çıkması durumunda ise %30,73’e düştüğü görülmektedir. Buradan da artan sıcaklıkla kütle verimindeki azalma açıkça görülmektedir.

Şekil 10.34 a’da tanecik boyutunun kütle verimi üzerindeki etkisi verilmiştir ve Şekil 10.34’den tanecik boyutundaki değişimin, fındık kabuklarının torrefaksiyon prosesi üzerinde sıcaklık kadar önemli değişimlere sebep olmadığı görülmektedir. Tanecik

boyutunun, fındık kabuğu kütle verimliliği üzerine etkilerini belirlemek amacıyla yapılan ve Çizelge 10.50’de verilen 5, 6 ve 13 deney numaralı deneylerin kütle verimliliği sonuçları incelendiğinde; tanecik boyutunun 1 mm’den 3 mm’ye çıkması durumunda kütle verimliliğinin %64,91’den %74,28’e, 5 mm’ye çıkması durumunda ise %76,61’e yükseldiği gözlemlenmiştir. Artan tanecik boyutunun briketlerin kütle verimliliğini arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Şekil 10.34 b’de kalma zamanının, fındık kabuğuna torrefaksiyon işlemi uygulanması sonrasında elde edilen ürün üzerindeki etkileri verilmiştir ve kalma süresi arttıkça torrefaksiyon ürünlerinin kütle verimliliğinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge 10.50’de 8, 6 ve 10 numaralı deneyler kalma süresinin, kütle verimliliği üzerinde etkilerinin belirlenmesi amacıyla yapılmış denemelerdir. Bu deney numaralı denemeler baz alındığında, kalma süresinin 10 dakikadan 30 dakikaya çıkması durumunda kütle verimliliğinin %91,07’den %74,28’e düştüğü, 50 dakikaya çıkması durumunda ise %72,17’e düştüğü görülmektedir. Buradan kalma zamanın 30 dakikaya kadar kütle verimliliğini önemli ölçüde azalttığı ve bu dakikadan sonra kütle verimliliğindeki azalmanın yavaşladığı belirlenmiştir.

Yapılan denemeler sonucunda en yüksek kütle verimi değerine 3 mm tanecik boyutu, 150°C sıcaklık ve 30 dk. kalma zamanı şartlarında, en düşük kütle verimi değerine ise 3 mm tanecik boyutu, 350°C ve 30 dk. kalma zamanı sonucunda ulaşılmıştır. En yüksek ve en düşük kütle verimlilikleri sırasıyla %92,24 ve %30,73 olarak belirlenmiştir.

10.9.3.3 Fındık Kabuğu Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Isıl Değer Verileri

Fındık kabuğu kullanılarak yapılan torrefaksiyon denemeleri sonucunda elde edilen ürünlerin ısı değerleri Çizelge 10.51’de verilmiş olup, elde edilen verilere merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak yapılan Anova analiz sonuçları Çizelge 10.52’de verilmiştir. Anova analizi sonuçlarından torrefaksiyon uygulanmış fındık kabuğunun ısı değer değişimlerinin %95,50 doğrulukta kuadratik yani ikinci dereceden modele uyduğu belirlenmiştir. Modelin p-değerinin 0,0001’den küçük olması modelin doğruluğunun göstergesidir.

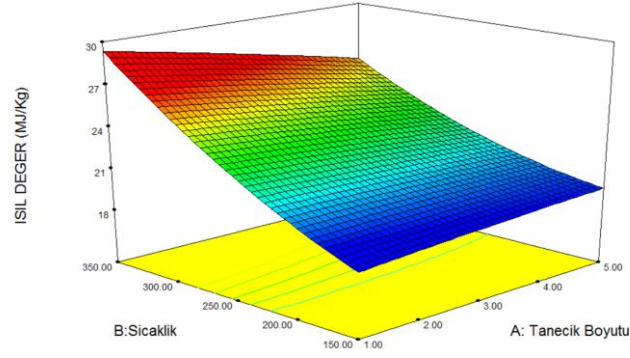
Çizelge 10.52 Fındık kabuğu kullanılarak yapılan torrefaksiyon ürünlerinin ısı değeri verilerinin Anova analizi sonuçları

Cevap 2	ISIL DEĞER (MJ/KG)					
Tepki Yüzeyi Lineer Model için ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karalar toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri Prob > F	
Kaynak						
Model	88,12	9	9,79	23,57	<0,0001	Önemli
A-Tanecik boyutu	1,65	1	1,65	3,98	0,0741	
B-Sıcaklık	71,75	1	71,75	172,68	<0,0001	
C-Kalma Zamanı	11,67	1	11,67	28,09	0,0003	
B²	1,30	1	1,30	3,12	0,1078	
Artık	4,16	10	0,42			
Uyum Eksikliği	3,86	5	0,77	13,05	0,0068	Önemli
Hata	0,30	5	0,059			
Standart Sapma	0,64		R²	0,95497		

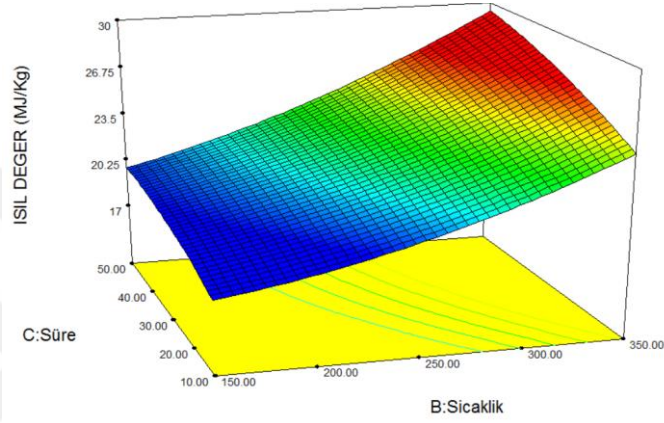
DeneySEL parametrelerin ısı değeri üzerine etkilerini belirlemek amacıyla yapılan Anova analizi sonucunda elde edilen ve Çizelge 10.52'de verilen tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametrelerinin p-değerlerine bakıldığında bu parametrelerin p-değerlerinin sırasıyla 0,0741, < 0,0001 ve 0,0003 olduğu belirlenmiş ve merkezi kompozit tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak yapılan deney planı doğrultusunda elde edilen torrefaksiyon uygulanmış ürünlerin ısı değeri üzerinde, en etkili parametrenin sıcaklık olduğu tespit edilmiştir. Sıcaklık kadar olmasa da ısı değeri üzerinde kalma zamanının da etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

10.9.3.4 Fındık Kabuğu Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde DeneySEL Parametrelerin Isıl Değeri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Fındık kabuğu kullanılarak yapılan torrefaksiyon işlemi uygulanması denemelerinde merkezi birleşik tasarım optimizasyon programı kullanılarak elde edilen torrefaksiyon ürünlerinin ısı değeri üzerine, tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametrelerinin etkileri Şekil 10.35'de grafik edilmiştir



(a)



(b)

Şekil 10.35 Fındık kabuğu için proses parametrelerinin ısı değeri üzerine etkileri

Şekil 10.35 a ve b’den açıkça görülmektedir ki fındık kabuğu kullanılarak elde edilen ürünlerin ısı değeri, artan sıcaklık ve kalma zamanıyla artmaktadır ve tanecik boyutunun ısı değeri üzerinde önemli bir etkisi bulunmamaktadır. Artan sıcaklık ve kalma zamanı biyokütlenin yapısında bulunan enerji içeriği düşük bileşenlerin, biyokütlenin yapısından daha fazla miktarda uzaklaşmasına ve böylelikle biyokütlenin karbon yoğunluğunun artmasına sebep olmaktadır. Biyokütlenin karbon yoğunluğunun artmasına bağlı olarak ürünün ısı değeri de artmaktadır.

Isıl değeri üzerinde tanecik boyutunun etkisinin belirlenmesi amacıyla denemeler 1 mm, 3 mm, 5 mm tanecik boyutları kullanılarak, sıcaklık ve kalma süresi 250°C ve 30 dakikada sabit tutularak yapılmıştır. Bu denemelere ait deney numaraları Çizelge 10.50’de sırasıyla 5, 6, 13 olarak verilmiştir. Bu denemeler sonucunda elde edilen ısı değeri verileri sırasıyla 23,23 MJ/KG, 22,45 MJ/KG ve 21,02 MJ/KG olarak belirlenmiştir. Tanecik boyutunun, sıcaklık ve kalma zamanının yanında ısı değeri üzerinde önemli bir etkiye

sahip olamdığı bunun yanı sıra tanecik boyutu arttıkça çok düşük miktarda da olsa ısı değerinde azalma olduğu belirlenmiştir.

Isıl değer üzerine sıcaklığın etkisinin incelenmesi amacıyla denemeler 150°C, 250°C, 350°C'de 3 mm tanecik boyutu ve 30 dakika kalma süresi kullanılarak yapılmıştır. Bu denemelere ait deney numaraları Çizelge 10.50'de sırasıyla 11, 6 ve 15 olarak verilmiştir. Bu denemeler sonucunda elde edilen ısı değer verileri sırasıyla 19,35 MJ/KG, 22,45 MJ/KG, 26,89 MJ/KG olarak belirlenmiştir ve elde edilen verilerden artan sıcaklıkla ısı değer üzerindeki artış açıkça görülmektedir.

Kalma zamanının ısı değer üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla denemeler 10 dk., 30dk., ve 50dk. kalma sürelerinde 3 mm tanecik boyutu ve 250°C sıcaklık kullanılarak yapılmıştır. Bu denemelere ait deney numaraları Çizelge 10.50'de sırasıyla 8, 6 ve 13 olarak verilmiştir. Bu denemeler sonucunda elde edilen ısı değer verileri sırasıyla 19,56 MJ/KG, 22,45 MJ/KG, 21,02 MJ/KG olarak belirlenmiş ve elde edilen verilerden artan tanecik boyutu ile ısı değer üzerindeki artış açıkça görülmektedir.

Yapılan analizler sonucunda en yüksek ısı değere 3 mm tanecik boyutu 350°C sıcaklık ve 30 dakika kalma süresi uygulanması sonucu ulaşılmış ve bu parametreler kullanılarak elde edilen ısı değer 26,89 MJ/KG olarak belirlenmiştir. En düşük ısı değere ise 3 mm tanecik boyutu 150°C sıcaklık ve 30 dk. kalma süresi uygulanması sonucunda ulaşılmıştır ve bu parametreler kullanılarak belirlenen ısı değer 19,56 MJ/KG olarak belirlenmiştir.

10.9.3.5 Fındık Kabuğu Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Enerji Verimliliği Verileri

Fındık kabuğu kullanılarak yapılan torrefaksiyon denemeleri sonucunda elde edilen ürünlerin enerji verimliliği değerleri Çizelge 10.50'de verilmiş olup, elde edilen verilere merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak yapılan Anova analiz sonuçları Çizelge 10.53'de verilmiştir. Anova analizi sonuçlarından torrefaksiyon uygulanmış elma dallarının enerji verimliliği değişimlerinin %95,97 doğrulukta kuadratik yani ikinci dereceden modele uyduğu belirlenmiştir. Modelin p-değerinin 0,0001'den küçük olması modelin doğruluğunun göstergesidir.

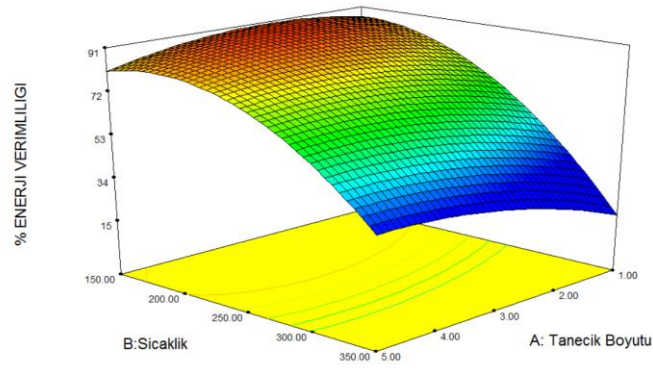
Çizelge 10.53 Fındık kabuğu kullanılarak yapılan torrefaksiyon ürünlerinin enerji verimliliği verilerinin Anova analizi sonuçları

Cevap 3	% ENERJİ VERİMLİLİĞİ					
Tepki Yüzeyi						
Kuadratik Model için ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karalar toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri	
Kaynak					Prob > F	
Model	4121,41	9	457,93	26,48	<0,0001	Önemli
A-Tanecik boyutu	70,43	1	70,43	4,07	0,0712	
B-Sıcaklık	3237,87	1	3237,87	187,20	<0,0001	
C-Kalma Zamanı	28,16	1	28,16	1,63	0,2308	
BC	114,00	1	114,00	6,59	0,0280	
B²	524,43	1	524,43	30,32	0,0003	
Artık	172,96	10	17,30			
Uyum Eksikliği	169,44	5	33,89	48,05	0,0003	Önemli
Hata	3,53	5	0,71			
Standart sapma	4,16		R²	0,9597		

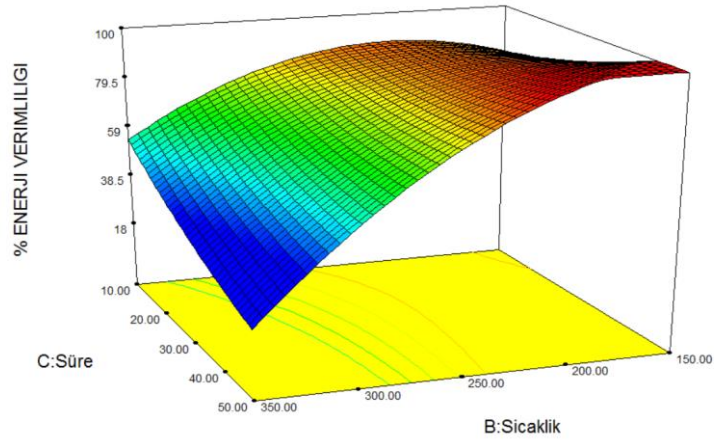
DeneySEL parametrelerin enerji verimliliği üzerine etkilerini belirlemek amacıyla yapılan Anova analizi sonucunda elde edilen ve Çizelge 10.53'de verilen tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametrelerinin p-değerlerine bakıldığında bu parametrelerin p-değerlerinin sırasıyla 0,0712, <0,0001 ve 0,2308 olduğu belirlenmiş ve merkezi kompozit tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak yapılan deney planı doğrultusunda elde edilen torrefaksiyon uygulanmış ürünlerin ısı değeri üzerinde, en etkili parametrelerin sıcaklık ve kalma zamanı olduğu tespit edilmiştir.

10.9.3.6 Fındık Kabuğu Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde DeneySEL Parametrelerin Enerji Verimliliği Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Fındık kabuğu kullanılarak yapılan torrefaksiyon işlemi uygulanması denemelerinde merkezi birleşik tasarım optimizasyon programı kullanılarak elde edilen torrefaksiyon ürünlerinin enerji verimliliği üzerine, tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametrelerinin etkileri Şekil 10.36'de grafik edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 10.36 Fındık kabuğu için proses parametrelerinin enerji verimliliği üzerine etkileri

Şekil 10.36 a ve b'den açıkça görülmektedir ki fındık kabuğu kullanılarak elde edilen ürünlerin enerji verimliliği, artan sıcaklık ve kalma zamanıyla azalmakta, tanecik boyutu arttıkça enerji verimliliği artmaktadır. Kalma zamanı ve sıcaklıkla enerji veriminin azalmasının sebebinin artan sıcaklıkla çay atıklarına torrefaksiyon prosesi uygulanması sonucu oluşan kütle kaybının, ısıl değerde oluşan artıştan yüksek olmasıdır. Artan tanecik boyutu ile enerji verimliliğinin artmasının sebebinin ise sıcaklık ve kalma zamanındaki artışla; düşük tanecik boyutlarında oluşan kütle kaybının yüksek tanecik boyutlarında oluşan kütle kaybindan daha düşük olması olduğu düşünülmektedir.

Enerji verimliliği üzerine sıcaklığın etkisinin incelenmesi amacıyla denemeler 150°C, 250°C, 350°C'de 3 mm tanecik boyutu ve 30 dakika kalma süresi kullanılarak yapılmıştır. Bu denemelere ait deney numaraları Çizelge 10.50'de sırasıyla 11, 6 ve 15 olarak verilmiştir. Bu denemeler sonucunda elde edilen enerji verimliliği verileri sırasıyla

%85,93, %80,29 ve %39,78, olarak belirlenmiştir ve elde edilen verilerden artan sıcaklıkla enerji verimliliğindeki azalış açıkça görülmektedir.

Kalma zamanının enerji verimliliği üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla denemeler 10 dk., 30dk., ve 50dk. kalma sürelerinde 3 mm tanecik boyutu ve 250°C sıcaklık kullanılarak yapılmıştır. Bu denemelere ait deney numaraları Çizelge 10.50’de sırasıyla 8, 6 ve 10 olarak verilmiştir. Bu denemeler sonucunda elde edilen enerji verimliliği verileri sırasıyla %85,75, %80,29 ve %81,73 olarak belirlenmiştir ve elde edilen verilerden artan kalma zamanı ile enerji verimliliği üzerindeki azalış açıkça görülmektedir.

Yapılan analizler sonucunda en yüksek enerji verimliliğine 4 mm tanecik boyutu 200°C sıcaklık ve 40 dakika kalma süresi uygulanması sonucu ulaşılmış ve bu parametreler kullanılarak elde edilen enerji verimliliği değeri %93,71 olarak belirlenmiştir. En düşük enerji verimliliği değerine ise 2 mm tanecik boyutu 300°C sıcaklık ve 40 dk. kalma süresi uygulanması sonucunda ulaşılmıştır ve bu parametreler kullanılarak belirlenen enerji verimliliği %43,18 olarak belirlenmiştir.

10.9.3.7 Fındık Kabuğuna Uygulanan Torrefaksiyon Denemelerinin Genel Değerlendirilmesi

Fındık kabuklarına torrefaksiyon prosesinin uygulanması çalışmalarında optimum tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılan denemelerin deney planı Design Expert programı yardımıyla merkezi kompozit tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Belirlenen deney planı çerçevesinde elde edilen torrefaksiyon uygulanmış ürünlerin kütle verimliliği, ısı değeri ve enerji verimlilikleri belirlenmiş ve elde edilen veriler yine Design Expert programı kullanılarak çözümlenmesi yapılmıştır. Tüm parametreler ve analiz sonuçları için yapılan çözümleme aralıkları Çizelge 10.54’te verilmiştir.

Çizelge 10.54 Fındık kabuğu biyokütlesi için çözümleme şartları

KISITLAMALAR				
İsim	Hedef	Alt Limit	Üst Limit	Önem
Tanecik boyutu	analiz aralığında	2	4	3
Sıcaklık	analiz aralığında	200	300	3
Kalma süresi	analiz aralığında	20	40	3
Kütle verimliliği	analiz aralığında	30	92,24	5
Isıl değer (MJ/KG)	analiz aralığında	19,35	26,89	5
Enerji verimliliği	analiz aralığında	60	93,71	3

Çizelge 10.54’de verilen çözümleme şartları sonucunda fındık kabuğu biyokütlesine torrefaksiyon işlemi uygulanması için elde edilen optimum deney parametreleri 3 mm tanecik boyutu 250°C sıcaklık ve 30 dk kalma süresi olarak belirlenmiştir. Bu optimum değerler kullanılarak elde edilen kütle verimliliği, ısıl değer ve enerji verimliliği verileri sırasıyla %73,71, 22,51 MJ/KG ve %79,69 olarak belirlenmiştir.

10.9.4 Sığır kuruğu Bitkisine Torrefaksiyon Prosesinin Uygulanması

Sığır kuruğu biyokütlesine torrefaksiyon prosesi uygulanması çalışmalarının deney planı Design Expert programı yardımıyla merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Deney planında tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametreleri ile torrefaksiyon prosesi sonrasında sığır kuruğu biyokütlesi kullanılarak elde edilen ürünün ısıl değer, kütle ve enerji verimliliği değerlerinin değişimi incelenmiştir. Bu kapsamda yapılmış olan deney planı ve çıktıları Çizelge 10.55’de verilmiştir.

Çizelge 10.55 Sığır kuruğu biyokütlesine torrefaksiyon uygulanması sonucu elde edilen veriler

Deney numarası	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Cevap 1	Cevap 2	Cevap 3
	A: Tanecik Boyutu (mm)	B: Sıcaklık (°C)	C: Kalma zamanı (dk)	Kütle verimliliği (%)	Isıl Değer (MJ/KG)	Enerji verimliliği (%)
1	1	250	30	60,21	22,39	68,12
2	2	300	40	42,39	25,54	54,70
3	2	200	40	86,34	19,82	86,45
4	2	200	20	91,85	19,29	89,53
5	2	300	20	49,80	23,63	59,48
6	3	250	30	68,90	21,16	73,66
7	3	250	30	68,95	21,18	73,79
8	3	250	10	85,63	18,80	81,33
9	3	250	50	61,04	22,87	70,54
10	3	250	30	68,81	21,11	73,39
11	3	250	30	68,26	21,03	72,54
12	3	150	30	96,98	18,65	91,41
13	3	250	30	68,95	21,16	73,73
14	3	350	30	36,04	25,85	47,08
15	3	250	30	68,56	21,06	72,95
16	4	200	20	92,28	19,04	88,80
17	4	300	40	53,49	24,53	66,29
18	4	200	40	91,74	19,53	90,53
19	4	300	20	52,40	23,30	61,69
20	5	250	30	74,42	20,22	76,04

10.9.4.1 Sığır kuruğu Bitkisi Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Kütle Verimliliği Sonuçları

Sığır kuruğu bitkisi kullanılarak yapılan torrefaksiyon denemeleri sonucunda elde edilen ürünlerin kütle verimliliği analizi sonucunda belirlenen verilerin Anova analizi Design Expert programı yardımıyla yapılmış ve Anova analiz sonuçları Çizelge 10.56'de verilmiştir. Anova analizi sonucunda elde edilen R^2 değerinden, deney parametreleri ile torrefaksiyon uygulanmış sığır kuyruğu bitkilerinin kütle verimi değişiminin, %96,41 doğrulukta kuadratik yani ikinci dereceden modele uyduğu belirlenmiştir.

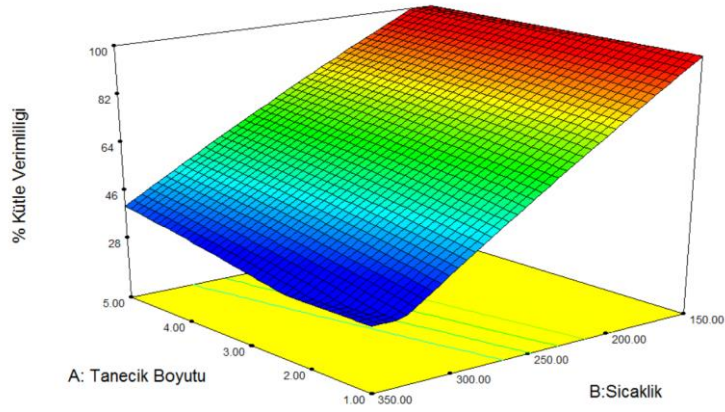
Çizelge 10.56 Torrefaksiyon uygulanan sığır kuruğu bitkisinin kütle verimliliğinin Anova analizi

Cevap 1	% KÜTLE VERİMLİLİĞİ					
Tepki Yüzeyi Kuadratik Model için ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karaler toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri Prob > F	
Kaynak						
Model	5580,61	9	620,07	29,80	<0,0001	Önemli
A-Tanecik boyutu	143,75	1	143,75	6,91	0,0252	
B-Sıcaklık	5112,26	1	5112,26	245,68	<0,0001	
C-Kalma Zamanı	236,97	1	236,97	11,39	0,0071	
C²	38,97	1	38,97	1,87	0,2011	
Artık	208,08	10	20,81			
Uyum Eksikliği	207,70	5	41,54	538,97	<0,0001	Önemli
Hata	0,39	5	0,077			
Standart Sapma	4,56		R²	0,9640		

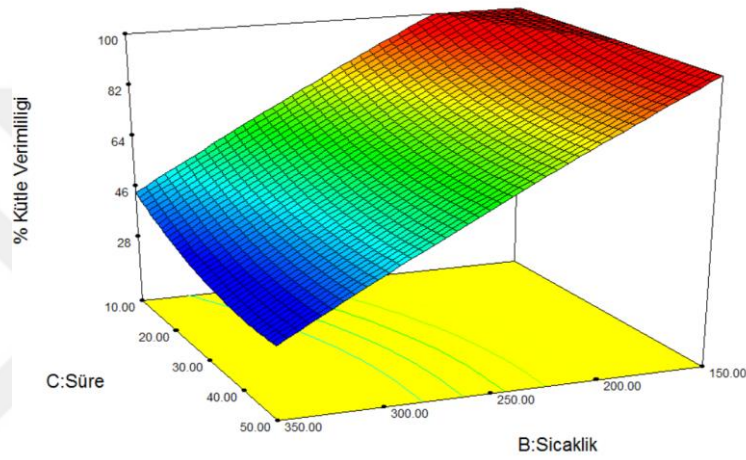
Çizelge 10.56’de verilen Anova analizi sonucunda elde edilen p-değerlerinden, sığır kuruğu bitkisinin torrefaksiyon prosesi sonucu elde edilen kütle verimliliği verilerine yapılan Anova analizi sonucunda, elma dalı, çay atığı ve fındık kabuğunda da olduğu gibi en etkili parametrenin sıcaklık olduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra sıcaklık kadar etkili olmasa da kalma süresinin torrefaksiyon prosesi uygulanması sırasında sığır kuruğu bitkisinin kütle verimi üzerinde etkisi olduğu tespit edilmiştir.

10.9.4.2 Sığır Kuruğu Bitkisi Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde DeneySEL Parametrelerin Kütle Verimi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Sığır kuruğu biyokütlesi kullanılarak yapılan torrefaksiyon prosesi sonrasında elde edilen ürünün kütle verimliliği verilerinin grafikleri Şekil 10.37’de verilmiş olup bu grafiklerden sığır kuruğu biyokütlesinin kütle verimliliği üzerine tanecik boyutu, sıcaklık, kalma süresi gibi proses parametrelerinin etkisi açıkça görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 10.37 Sığır kuruğu bitkisi için proses parametrelerinin kütle verimi üzerine etkileri Şekil 10.37 a ve b’den de görüldüğü gibi artan sıcaklık değeri ile sığır kuruğu bitkisine torrefaksiyon prosesinin uygulanması sonrasında elde edilen ürünlerinin kütle verimliliğinde ciddi derecede azalmalar gözlemlenmiştir. Örneğin Çizelge 10.55’de sıcaklığın sığır kuruğu bitkisinin kütle verimliliği üzerinde etkilerini belirlemek için yapılmış olan 14, 15 ve 16 numaralı denemelerde sıcaklığın 150°C’den, 250°C’ye çıkması durumunda kütle verimini %96,98’dan %68,95’ye, 350°C’ye çıkması durumunda ise %36,04’e düştüğü görülmektedir. Elde edilen verilerden de artan sıcaklıkla kütle verimindeki azalma açıkça görülmektedir.

Şekil 10.37 a’da tanecik boyutunun kütle verimi üzerindeki etkisi verilmiştir ve Şekil 10.37’den tanecik boyutundaki değişimin, sığır kuruğu bitkisinin torrefaksiyon prosesi üzerinde sıcaklık kadar önemli değişimlere sebep olmadığı görülmektedir. Tanecik

boyutunun, sığır kuruğu bitkisinin kütle verimliliği üzerine etkilerini belirlemek amacıyla yapılan ve Çizelge 10.55’de verilen 1, 15 ve 20 deney numaralı deneylerin kütle verimliliği sonuçları incelendiğinde; tanecik boyutunun 1 mm’den 3 mm’ye çıkması durumunda kütle verimliliğinin %60,21’den %68,56’ya, 5 mm’ye çıkması durumunda ise %74,42’ye yükseldiği gözlemlenmiştir. Artan tanecik boyutunun briketlerin kütle verimliliğini arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Şekil 10.37 b’de kalma zamanının, sığır kuruğu bitkisine torrefaksiyon işlemi uygulanması sonrasında elde edilen ürün üzerindeki etkileri verilmiştir ve kalma süresi arttıkça torrefaksiyon ürünlerinin kütle verimliliğinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge 10.55’de 8, 15 ve 9 numaralı deneyler kalma zamanının, kütle verimliliği üzerinde etkilerinin belirlenmesi amacıyla yapılmış denemelerdir. Bu deney numaralı denemeler baz alındığında, kalma süresinin 10 dakikadan 30 dakikaya çıkması durumunda kütle verimliliğinin %85,63’den %68,56’ya düştüğü, 50 dakikaya çıkması durumunda ise %61,04’e düştüğü görülmektedir. Buradan kalma zamanın 30 dakikaya kadar kütle verimliliğini önemli ölçüde azalttığı ve bu dakikadan sonra kütle verimliliğindeki azalmanın yavaşladığı belirlenmiştir.

Yapılan denemeler sonucunda en yüksek kütle verimi değerine 3 mm tanecik boyutu, 150°C sıcaklık ve 30 dk. kalma zamanı şartlarında, en düşük kütle verimi değerine ise 3 mm tanecik boyutu, 350°C ve 30 dk. kalma zamanı sonucunda ulaşılmıştır. En yüksek ve en düşük kütle verimlilikleri sırasıyla %96,98 ve %36,04 olarak belirlenmiştir.

10.9.4.3 Sığır Kuruğu Bitkisi Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Isıl Değer Verileri

Sığır kuruğu bitkisi kullanılarak yapılan torrefaksiyon denemeleri sonucunda elde edilen ürünlerin ısıl değerleri Çizelge 10.55’de verilmiş olup, elde edilen verilere merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak yapılan Anova analiz sonuçları Çizelge 10.57’de verilmiştir. Anova analizi sonuçlarından torrefaksiyon uygulanmış fındık kabuğunun ısıl değer değişimlerinin % 95,71 doğrulukta kuadratik yani ikinci dereceden modele uyduğu belirlenmiştir. Modelin p-değerinin 0,0001’den küçük olması modelin doğruluğunun göstergesidir.

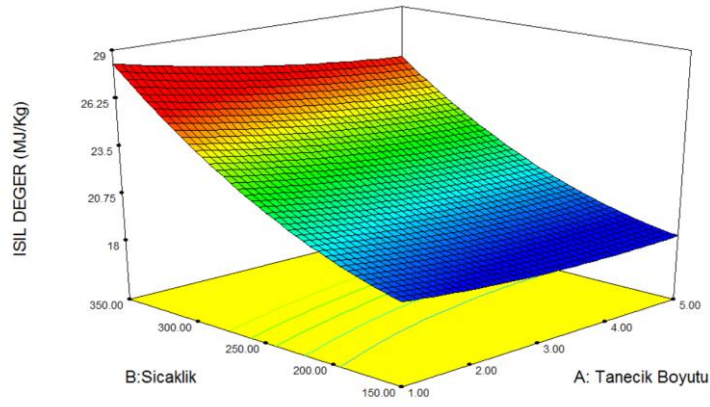
Çizelge 10.57 Sığır kuruğu bitkisi kullanılarak yapılan torrefaksiyon ürünlerinin ısı değeri verilerinin Anova analizi sonuçları

Cevap 2	ISIL DEĞER (MJ/KG)					
Tepki Yüzeyi Lineer Model için ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karalar toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri Prob > F	
Kaynak						
Model	86,56	9	9,62	24,80	<0,0001	Önemli
A-Tanecik boyutu	2,42	1	2,42	6,24	0,0315	
B-Sıcaklık	71,02	1	71,02	183,13	<0,0001	
C-Kalma Zamanı	9,45	1	9,45	24,37	0,0006	
B²	2,67	1	2,67	6,88	0,0255	
Artık	3,88	10	0,39			
Uyum Eksikliği	3,86	5	0,77	212,06	<0,0001	Önemli
Hata	0,018	5	0,0036			
Standart Sapma	0,62		R²	0,9571		

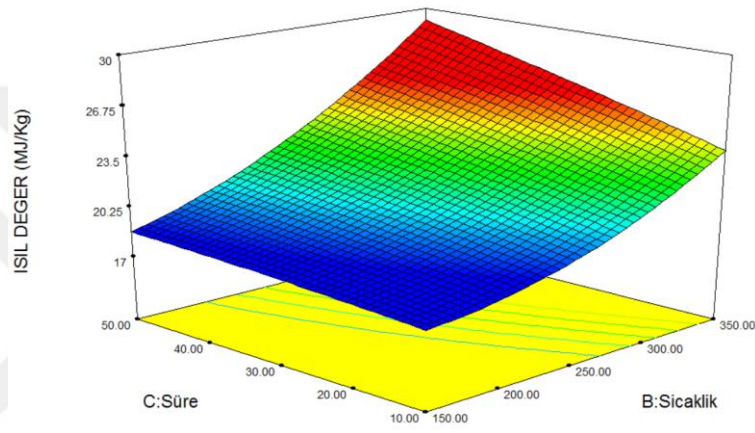
DeneySEL parametrelerin ısı değeri üzerine etkilerini belirlemek amacıyla yapılan Anova analizi sonucunda elde edilen ve Çizelge 10.57'de verilen tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametrelerinin p-değerlerine bakıldığında bu parametrelerin p-değerlerinin sırasıyla 0,0315, < 0,0001 ve 0,0006 olduğu belirlenmiş ve merkezi kompozit tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak yapılan deney planı doğrultusunda elde edilen torrefaksiyon uygulanmış ürünlerin ısı değeri üzerinde, en etkili parametrenin sıcaklık olduğu tespit edilmiştir. Sıcaklık kadar olmasa da ısı değeri üzerinde kalma zamanının da etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

10.9.4.4 Sığır Kuruğu Bitkisi Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde DeneySEL Parametrelerin Isıl Değeri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Sığır kuruğu bitkisi kullanılarak yapılan torrefaksiyon işlemi uygulanması denemelerinde merkezi birleşik tasarım optimizasyon programı kullanılarak elde edilen torrefaksiyon ürünlerinin ısı değeri üzerine, tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametrelerinin etkileri Şekil 10.38'de grafik edilmiştir



(a)



(b)

Şekil 10.38 Sığır kuyruğu için proses parametrelerinin ısı değeri üzerine etkileri

Şekil 10.38 a ve b’den açıkça görülmektedir ki sığır kuyruğu bitkisi kullanılarak elde edilen ürünlerin ısı değeri, artan sıcaklık ve kalma zamanıyla artmaktadır ve tanecik boyutunun ısı değeri üzerinde önemli bir etkisi bulunmamaktadır. Artan sıcaklık ve kalma zamanı biyokütlenin yapısında bulunan enerji içeriği düşük bileşenlerin, biyokütlenin yapısından daha fazla miktarda uzaklaşmasına ve böylelikle biyokütlenin karbon yoğunluğunun artmasına sebep olmaktadır. Biyokütlenin karbon yoğunluğunun artmasına bağlı olarak ürünün ısı değeri de artmaktadır.

Isıl değeri üzerinde tanecik boyutunun etkisinin belirlenmesi amacıyla 1 mm, 3 mm, 5 mm tanecik boyutları kullanılarak, sıcaklık ve kalma süresi 250°C ve 30 dakikada sabit tutularak yapılmıştır. Bu denemelere ait deney numaraları Çizelge 10.55’de sırasıyla 1, 6, 20 olarak verilmiştir. Bu denemeler sonucunda elde edilen ısı değeri verileri sırasıyla

22,39 MJ/KG, 21,16 MJ/KG ve 20,22 MJ/KG olarak belirlenmiştir. Tanecik boyutunun, sıcaklık ve kalma zamanının yanında ısı değeri üzerinde önemli bir etkiye sahip olamdığı bunun yanı sıra tanecik boyutu arttıkça çok düşük miktarda da olsa ısı değeri azalma olduğu belirlenmiştir.

Isı değeri üzerine sıcaklığın etkisinin incelenmesi amacıyla denemeler 150°C, 250°C, 350°C'de 3 mm tanecik boyutu ve 30 dakika kalma süresi kullanılarak yapılmıştır. Bu denemelere ait deney numaraları Çizelge 10.55'de sırasıyla 12, 6 ve 14 olarak verilmiştir. Bu denemeler sonucunda elde edilen ısı değeri verileri sırasıyla 18,65 MJ/KG, 21,16 MJ/KG, 25,85 MJ/KG olarak belirlenmiş ve elde edilen verilerden de artan sıcaklıkla ısı değeri üzerindeki artış açıkça görülmektedir.

Kalma zamanının ısı değeri üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan denemeler 10 dk., 30dk., ve 50dk. kalma sürelerinde 3 mm tanecik boyutu ve 250°C sıcaklık kullanılarak yapılmıştır. Bu denemelere ait deney numaraları Çizelge 10.55'de sırasıyla 8, 6 ve 9 olarak verilmiştir. Bu denemeler sonucunda elde edilen ısı değeri verileri sırasıyla 18,98 MJ/KG, 21,16 MJ/KG, 22,87 MJ/KG olarak belirlenmiş ve buradan da artan tanecik boyutu ile ısı değeri üzerindeki artış açıkça görülmektedir.

Yapılan analizler sonucunda en yüksek ısı değeri 3 mm tanecik boyutu 350°C sıcaklık ve 30 dakika kalma süresi uygulanması sonucu ulaşılmış ve bu parametreler kullanılarak elde edilen ısı değeri 25,85 MJ/KG olarak belirlenmiştir. En düşük ısı değeri ise 3 mm tanecik boyutu 150°C sıcaklık ve 30 dk. kalma süresi uygulanması sonucunda ulaşılmıştır ve bu parametreler kullanılarak elde edilen ürünün ısı değeri 18,65 MJ/KG olarak belirlenmiştir.

10.9.4.5 Sığır Kuruğu Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Enerji Verimliliği Verileri

Sığır kuruğu bitkisi kullanılarak yapılan torrefaksiyon denemeleri sonucunda elde edilen ürünlerin enerji verimliliği değerleri Çizelge 10.55'de verilmiş olup, elde edilen verilere merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak yapılan Anova analizi sonuçları Çizelge 10.58'de verilmiştir. Anova analizi sonuçlarından torrefaksiyon uygulanmış sığır kuruğu bitkilerinin enerji verimliliği değişimlerinin %96,99 doğrulukta kuadratik yani ikinci

dereceden modele uyduğu belirlenmiştir. Modelin p-değerinin 0,0001'den k olması modelin doğruluğunun göstergesidir.

Çizelge 10.58 Sığır kuruğu bitkisi kullanılarak yapılan torrefaksiyon ürünlerinin enerji verimliliği verilerinin Anova analizi sonuçları

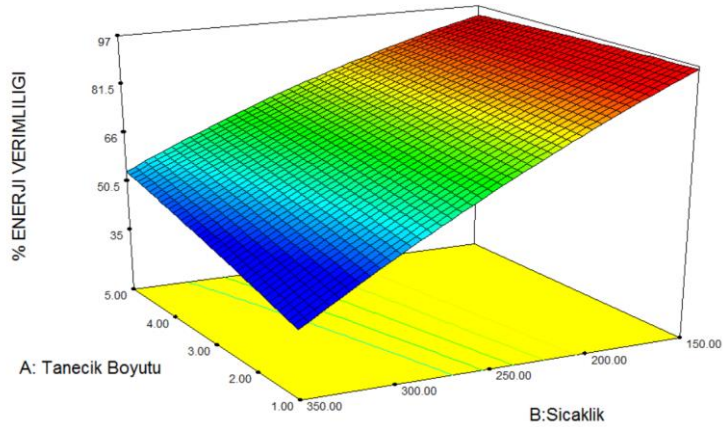
Cevap 3	% ENERJİ VERİMLİLİğİ					
Tepki Yüzeyi Kuadratik Model için ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karalar toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri Prob > F	
Kaynak						
Model	2731,29	9	303,48	35,80	<0,0001	nemli
A-Tanecik boyutu	68,01	1	68,01	8,02	0,0178	
B-Sıcaklık	2545,70	1	2545,70	300,31	<0,0001	
C-Kalma Zamanı	33,36	1	33,36	3,94	0,0754	
B²	17,75	1	17,75	2,09	0,1785	
Artık	84,80	10	8,48			
Uyum Eksikliği	83,52	5	16,70	66,88	0,0001	nemli
Hata	1,25	5	0,25			
Standart Sapma	2,90		R²	0,9699		

Deneyssel parametrelerin enerji verimliliği üzerine etkilerini belirlemek amacıyla yapılan Anova analizi sonucunda elde edilen ve izelge 10.58'de verilen tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametrelerinin p-değerlerine bakıldığında bu parametrelerin p-değerlerinin sırasıyla 0,0178, <0,0001 ve 0,0754 olduğu belirlenmiş ve merkezi kompozit tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak yapılan deney planı doğrultusunda elde edilen torrefaksiyon uygulanmış ürünlerin ısı değeri üzerinde, en etkili parametrelerin sıcaklık ve kalma zamanı olduğu tespit edilmiştir.

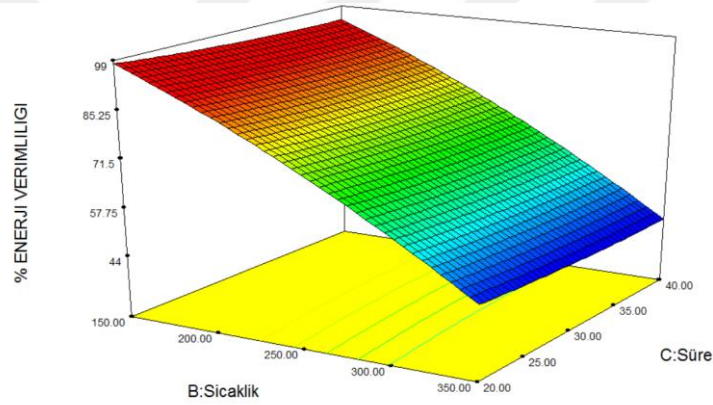
10.9.4.6 Sığır Kuruğu Bitkisi Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde Deneyssel Parametrelerin Enerji Verimliliği zerine Etkilerinin İncelenmesi

Sığır kuruğu bitkisi kullanılarak yapılan torrefaksiyon işlemi uygulanması denemelerinde merkezi birleşik tasarım optimizasyon programı kullanılarak elde edilen torrefaksiyon

ürünlerinin enerji verimliliği üzerine, tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametrelerinin etkileri Şekil 10.39’da grafik edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 10.39 Sığır kuruğu bitkisi için proses parametrelerinin enerji verimliliği üzerine etkileri

Şekil 10.39 a ve b’den açıkça görülmektedir ki sığır kuruğu bitkisi kullanılarak elde edilen ürünlerin enerji verimliliği, artan sıcaklık ve kalma zamanıyla azalmakta, tanecik boyutu arttıkça enerji verimliliği artmaktadır. Kalma zamanı ve sıcaklıkla enerji veriminin azalmasının sebebinin artan sıcaklıkla sığır kuruğu bitkisine torrefaksiyon prosesi uygulanması sonucu oluşan kütle kaybının, ısıl değerde oluşan artıştan yüksek olmasıdır. Artan tanecik boyutu ile enerji verimliliğinin artmasının sebebinin ise sıcaklık ve kalma zamanındaki artışla; düşük tanecik boyutlarında oluşan kütle kaybının yüksek tanecik boyutlarında oluşan kütle kaybından daha düşük olması olduğu düşünülmektedir.

Enerji verimliliği üzerine sıcaklığın etkisinin incelenmesi amacıyla denemeler 150°C, 250°C, 350°C’de 3 mm tanecik boyutu ve 30 dakika kalma süresi kullanılarak yapılmıştır. Bu denemelere ait deney numaraları Çizelge 10.55’de sırasıyla 12, 6 ve 14 olarak verilmiştir. Bu denemeler sonucunda elde edilen enerji verimliliği verileri sırasıyla %91,91, %73,66 ve %47,08 olarak belirlenmiştir ve elde edilen verilerden artan sıcaklıkla enerji verimliliğindeki azalış açıkça görülmektedir.

Kalma zamanının enerji verimliliği üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla denemeler 10 dk., 30dk., ve 50dk. kalma sürelerinde 3 mm tanecik boyutu ve 250°C sıcaklık kullanılarak yapılmıştır. Bu denemelere ait deney numaraları Çizelge 10.55’de sırasıyla 8, 6 ve 9 olarak verilmiştir. Bu denemeler sonucunda elde edilen enerji verimliliği verileri sırasıyla %81,33, %73,66 ve %70,54 olarak belirlenmiştir ve elde edilen verilerden artan kalma zamanı ile enerji verimliliği üzerindeki azalış açıkça görülmektedir.

Yapılan analizler sonucunda en yüksek enerji verimliliğine 3 mm tanecik boyutu 150°C sıcaklık ve 30 dakika kalma süresi uygulanması sonucu ulaşılmış ve bu parametreler kullanılarak elde edilen enerji verimliliği değeri %91,41 olarak belirlenmiştir. En düşük enerji verimliliği değerine ise 3 mm tanecik boyutu 350°C sıcaklık ve 30 dk. kalma süresi uygulanması sonucunda ulaşılmıştır ve bu parametreler kullanılarak belirlenen enerji verimliliği değeri %47,08 olarak belirlenmiştir.

10.9.4.7 Sığır Kuruğuna Uygulanan Torrefaksiyon Denemelerinin Genel Değerlendirilmesi

Sığır kuruğu bitkisine torrefaksiyon prosesinin uygulanması çalışmalarında optimum tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılan denemelerin deney planı Design Expert programı yardımıyla merkezi kompozit tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Belirlenen deney planı çerçevesinde elde edilen torrefaksiyon uygulanmış ürünlerin kütle verimliliği, ısı değeri ve enerji verimlilikleri belirlenmiş ve elde edilen verilerin yine Design Expert programı kullanılarak çözümlenmesi yapılmıştır. Tüm parametreler ve analiz sonuçları için yapılan çözümlene aralıkları Çizelge 10.59’da verilmiştir.

Çizelge 10.59 Sığır kuruğu biyokütlesi için çözümleme şartları

KISITLAMALAR				
İsim	Hedef	Alt Limit	Üst Limit	Önem
Tanecik boyutu	analiz aralığında	2	4	3
Sıcaklık (°C)	analiz aralığında	200	300	3
Kalma süresi (dk)	analiz aralığında	20	40	3
Kütle verimliliği (%)	analiz aralığında	36,04	96,98	5
Isıl değer (MJ/KG)	analiz aralığında	18,65	25,85	5
Enerji verimliliği (%)	analiz aralığında	47,08	91,41	3

Çizelge 10.59’da verilen çözümleme şartları sonucunda sığır kuruğu biyokütlesine torrefaksiyon işlemi uygulanması sonrasında elde edilen optimum deney parametreleri 3 mm tanecik boyutu 250°C sıcaklık ve 30 dk kalma süresi olarak belirlenmiştir. Bu optimum değerler kullanılarak elde edilen kütle verimliliği, ısıl değer ve enerji verimliliği verileri sırasıyla %68,93, 21,20 MJ/Kg ve %73,71 olarak belirlenmiştir.

10.9.5 Geven Bitkisine Torrefaksiyon Prosesinin Uygulanması

Geven biyokütlesine torrefaksiyon prosesi uygulanması çalışmalarının deney planı, Design Expert programı yardımıyla merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Deney planında tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametreleri ile geven biyokütlesinin ısıl değer, kütle ve enerji verimliliği değerlerinin değişimi incelenmiştir. Bu kapsamda yapılmış olan deney planı ve çıktıları Çizelge 10.60’da verilmiştir.

Çizelge 10.60 Geven biyokütlesine torrefaksiyon uygulanması sonucu elde edilen veriler

Deney numarası	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Cevap 1	Cevap 2	Cevap 3
	A: Tanecik Boyutu (mm)	B: Sıcaklık (°C)	C: Kalma zamanı (dk)	Kütle verimliliği (%)	Isıl Değer (MJ/KG)	Enerji verimliliği (%)
1	1	250	30	70,64	21,88	79,98
2	2	300	20	57,51	23,09	68,74
3	2	200	40	90,99	19,56	92,14
4	2	200	20	91,34	18,84	89,08
5	2	300	40	50,51	24,95	65,23
6	3	250	10	94,69	18,56	90,97
7	3	250	50	75,37	22,37	87,26
8	3	250	30	78,84	20,84	85,03
9	3	250	30	78,52	20,76	84,37
10	3	250	30	78,56	20,75	84,39
11	3	250	30	78,63	20,84	84,80
12	3	250	30	78,28	20,72	83,95
13	3	350	30	38,62	25,25	50,48
14	3	250	30	79,02	20,72	84,75
15	3	150	30	96,12	17,96	89,33
16	4	200	40	91,59	21,09	99,96
17	4	300	40	55,29	23,95	68,55
18	4	300	20	65,23	22,63	76,41
19	4	200	20	93,95	18,64	90,62
20	5	250	30	82,77	19,77	84,69

10.9.5.1 Geven Bitkisi Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Kütle Verimi Sonuçları

Geven bitkisi kullanılarak yapılan torrefaksiyon denemeleri sonucunda elde edilen ürünlerin, kütle verimliliği analizi sonucunda elde edilen verilerin Anova analizi Design Expert programı yardımıyla yapılmış ve Anova analiz sonuçları Çizelge 10.60'da verilmiştir. Anova analizi sonucunda elde edilen R^2 değerinden, deney parametreleri ile torrefaksiyon uygulanmış geven bitkilerinin kütle verimi değişiminin %98,15 doğrulukta kuadratik yani ikinci dereceden modele uyduğu belirlenmiştir.

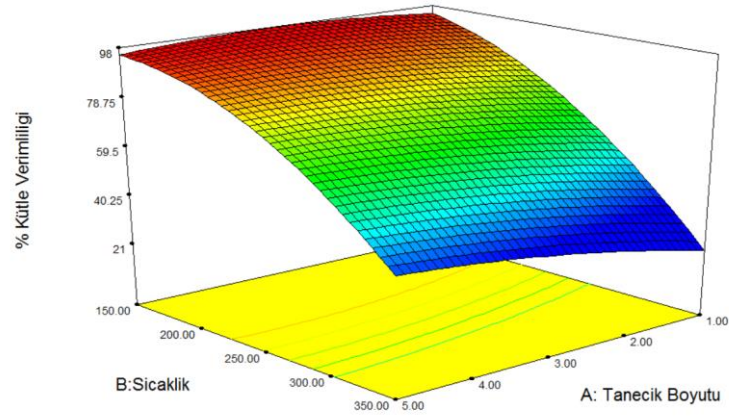
Çizelge 10.61 Torrefaksiyon uygulanan geven bitkisinin kütle verimliliğinin Anova analizi

Cevap 1	% KÜTLE VERİMLİLİĞİ					
Tepki Yüzeyi						
Kuadratik Model için ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karaler toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri	
Kaynak					Prob > F	
Model	4738,40	9	526,49	58,87	<0,0001	Önemli
A-Tanecik boyutu	99,88	1	99,88	11,17	0,0075	
B-Sıcaklık	4042,10	1	4042,10	451,98	<0,0001	
C-Kalma Zamanı	212,34	1	212,34	23,74	0,0006	
B²	231,74	1	231,74	25,91	0,0005	
C²	47,91	1	47,91	5,36	0,0432	
Artık	89,43	10	8,94			
Uyum Eksikliği	89,10	5	17,82	270,10		Önemli
Hata	0,33	5	0,066		<0,0001	
Standart Sapma	2,9905		R²	0,9815		

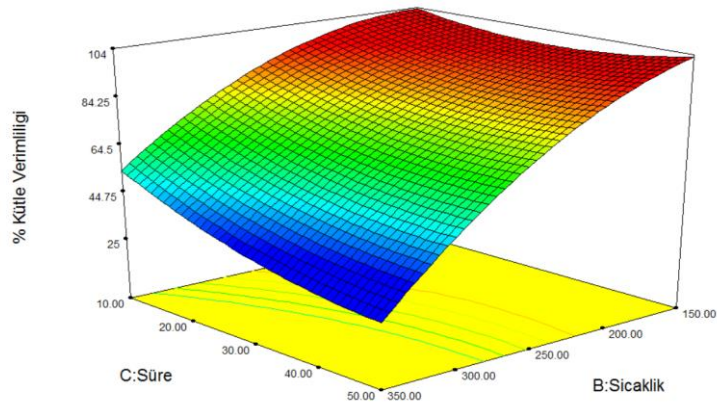
Çizelge 10.61’de verilen Anova analizi sonucunda elde edilen p-değerlerinden, geven bitkisine torrefaksiyon prosesi uygulanması üzerinde en etkili parametrenin sıcaklık olduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra sıcaklık kadar etkili olmasa da kalma süresinin, sıcaklık (B²) ve kalma süresinin (C²) üssel değişiminin torrefaksiyon prosesi uygulanması sırasında geven bitkisinin kütle verimi üzerinde etkileri olduğu tespit edilmiştir.

10.9.5.2 Geven Bitkisi Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde Deneysel Parametrelerin Kütle Verimi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Geven biyokütlesi kullanılarak yapılan torrefaksiyon prosesi sonrasında elde edilen ürünün kütle verimliliği verilerinin grafikleri Şekil 10.40’da verilmiş olup bu grafiklerden geven biyokütlesinin kütle verimliliği üzerine tanecik boyutu, sıcaklık, kalma zamanı gibi proses parametrelerinin etkisi açıkça görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 10.40 Geven bitkisi için proses parametrelerinin kütle verimi üzerine etkileri

Şekil 10.40 a ve b’den de görüldüğü gibi artan sıcaklık değeri ile geven bitkisine torrefaksiyon prosesinin uygulanması sonrasında elde edilen ürünlerinin kütle verimliliğinde ciddi derecede azalmalar gözlemlenmiştir. Örneğin Çizelge 10.60’da sıcaklığın geven bitkisinin kütle verimliliği üzerinde etkilerini belirlemek için yapılmış olan 15, 1 ve 13 numaralı denemelerde sıcaklığın 150°C’den, 250°C’ye çıkması durumunda kütle verimini %96,12’den %70,64’e, 350°C’ye çıkması durumunda ise %38,62’ye düştüğü görülmektedir. Buradan da artan sıcaklıkla kütle verimindeki azalma açıkça görülmektedir ve bunun sebebinin artan sıcaklıkla biyokütlenin yapısında bulunan nem ve uçucu maddelerin uzaklaşmasının yanı sıra hemiselülozun da termokimyasal bozunmasından kaynaklı kütle kayıplarının olduğu düşünülmektedir.

Şekil 10.40 a'da tanecik boyutunun kütle verimi üzerindeki etkisi verilmiştir ve Şekil 10.40'dan torrefaksiyon prosesi sırasında geven bitkisi üzerinde tanecik boyutu parametresinin, sıcaklık parametresi kadar önemli değişimlere sebep olmadığı görülmektedir. Tanecik boyutunun, geven bitkisinin kütle verimliliği üzerine etkilerini belirlemek amacıyla yapılan ve Çizelge 10.40'ta verilen 1, 8 ve 20 deney numaralı deneylerin kütle verimliliği sonuçları incelendiğinde; tanecik boyutunun 1 mm'den 3 mm'ye çıkması durumunda kütle verimliliğinin %70,64'ten %78,84'e yükseldiği belirlenmiştir. Bunun yanı sıra tanecik boyutunun, 5 mm'ye çıkması durumunda ise torrefaksiyon işlemi uygulanmış geven bitkisinin kütle veriminin %82,77'ye yükseldiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak artan tanecik boyutu ile geven bitkisine torrefaksiyon işlemi uygulanması sonucunda oluşan ürünün kütle verimliliğinin arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Şekil 10.40 b'de kalma zamanının, geven bitkisine torrefaksiyon işlemi uygulanması sonrasında elde edilen ürün üzerindeki etkileri verilmiştir ve kalma süresi arttıkça torrefaksiyon ürünlerinin kütle verimliliğinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Çizelge 10.40'ta 6, 8 ve 7 numaralı deneyler sırasıyla 10 dakika, 30 dakika ve 50 dakika kalma sürelerinin, geven bitkisine torrefaksiyon işlemi uygulanması sonucunda elde edilen ürünün kütle verimliliği üzerinde etkilerinin belirlenmesi amacıyla yapılmış denemelerdir. Bu deney numaralı denemeler baz alındığında, kalma süresinin 10 dakikadan 30 dakikaya çıkması durumunda kütle verimliliğinin %94,69'dan %78,84'e düştüğü, 50 dakikaya çıkması durumunda ise %75,37'ye düştüğü görülmektedir. Buradan kalma zamanın 30 dakikaya kadar kütle verimliliğini önemli ölçüde azalttığı ve bu dakikadan sonra kütle verimliliğindeki azalmanın yavaşladığı belirlenmiştir.

Yapılan denemeler sonucunda en yüksek kütle verimi değerine 3 mm tanecik boyutu, 150°C sıcaklık ve 30 dk. kalma zamanı şartlarında, en düşük kütle verimi değerine ise 3 mm tanecik boyutu, 350°C ve 30 dk. kalma zamanı sonucunda ulaşılmıştır. En yüksek ve en düşük kütle verimlilikleri sırasıyla %96,12 ve %38,62 olarak belirlenmiştir.

10.9.5.3 Geven Bitkisi Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Isıl Değer Verileri

Geven bitkisi kullanılarak yapılan torrefaksiyon denemeleri sonucunda elde edilen ürünlerin ısı değerleri Çizelge 10.60'de verilmiş olup, elde edilen verilere merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak yapılan Anova analiz sonuçları Çizelge 10.62'de verilmiştir. Anova analizi sonuçlarından torrefaksiyon uygulanmış geven bitkisinin ısı değer değişimlerinin %95,03 doğrulukta kuadratik yani ikinci dereceden modele uyduğu belirlenmiştir. Modelin p-değerinin 0,0001'den küçük olması modelin doğruluğunun göstergesidir.

Çizelge 10.62 Geven bitkisi kullanılarak yapılan torrefaksiyon ürünlerinin ısı değer verilerinin Anova analizi sonuçları

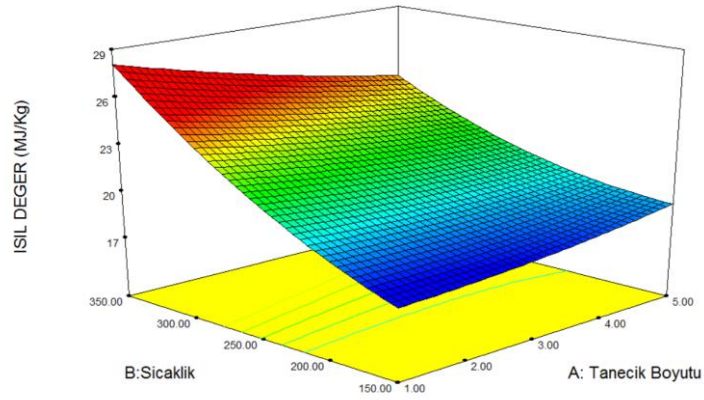
Cevap 2	ISIL DEĞER (MJ/KG)					
Tepki Yüzeyi Kuadratik Model için ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karalar toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri Prob > F	
Kaynak						
Model	76,91	9	8,55	21,23	<0,0001	Önemli
A-Tanecik boyutu	1,18	1	1,18	2,94	0,1171	
B-Sıcaklık	60,41	1	60,41	150,09	<0,0001	
C-Kalma Zamanı	12,18	1	12,18	30,26	0,0003	
B²	1,84	1	1,84	4,56	0,0584	
Artık	4,03	10	0,40			
Uyum Eksikliği	4,01	5	0,80	282,57	<0,0001	Önemli
Hata	0,014	5	0,0028			
Standart Sapma	0,63		R²	0,9503		

Deneysel parametrelerin ısı değer üzerine etkilerini belirlemek amacıyla yapılan Anova analizi sonucunda elde edilen ve Çizelge 10.62'de verilen tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametrelerinin p-değerlerine bakıldığında bu parametrelerin p-değerlerinin sırasıyla 0,1171, <0,0001 ve 0,0003 olduğu belirlenmiş ve merkezi kompozit tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak yapılan deney planı doğrultusunda elde edilen torrefaksiyon uygulanmış ürünlerin ısı değeri üzerinde, en etkili parametrenin

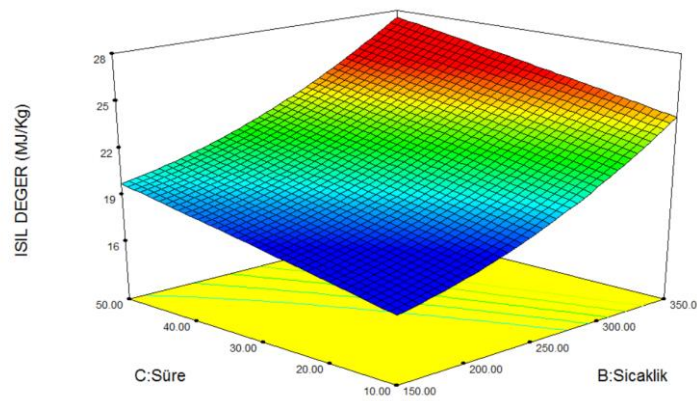
sıcaklık olduğu tespit edilmiştir. Sıcaklık kadar olmasa da ısı değeri üzerinde kalma zamanının da etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bunun yanında sıcaklığın üssel değişiminin p- değerinin 0,001'in altında olması bu değerinde torrefaksiyon işlemi sonucunda elde edilecek ürün üzerinde etkisinin olduğunu göstermektedir.

10.9.5.4 Geven Bitkisi Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde Deneysel Parametrelerin, Isıl Değer Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Geven bitkisi kullanılarak yapılan torrefaksiyon işlemi uygulanması denemelerinde, merkezi birleşik tasarım optimizasyon programı kullanılarak elde edilen torrefaksiyon ürünlerinin ısı değeri üzerine, tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametrelerinin etkileri Şekil 10.41'de grafik edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 10.41 Geven bitkisi için proses parametrelerinin ısı değeri üzerine etkileri

Torrefaksiyon prosesi sonucunda elde edilen ürünlerde aranan önemli özelliklerden bir tanesi ısı değeri. Şekil 10.41 a ve b'den açıkça görülmektedir ki geven bitkisi kullanılarak elde edilen ürünlerin ısı değeri, artan sıcaklık ve kalma zamanıyla artarken, tanecik boyutu arttıkça azalmaktadır. Artan sıcaklık ve kalma zamanı biyokütlenin yapısında bulunan enerji içeriği düşük bileşenlerin, biyokütlenin yapısından daha fazla miktarda uzaklaşmasına ve böylelikle biyokütlenin karbon yoğunluğunun artmasına sebep olmaktadır. Biyokütlenin karbon yoğunluğunun artmasına bağlı olarak ürünün ısı değeri de artmaktadır. Artan tanecik boyutu ile ısı değerinin azalmasının sebebi ise yüksek tanecik boyutlarında, çekirdek sıcaklığının, düşük tanecik boyutlarına göre daha düşük olması ve bu sebeple yapıda bulunan zayıf enerji içerikli bileşenlerin yapıda kalarak ısı değeri azaltmasıdır.

Isı değeri üzerinde tanecik boyutunun etkisinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneyler 1 mm, 3 mm, 5 mm tanecik boyutları kullanılarak, sıcaklık ve kalma zamanı 250°C sıcaklıkta ve 30 dakikada sabit tutularak yapılmıştır. Bu deneylere ait deney numaraları Çizelge 10.60'da sırasıyla 1, 8, ve 20 olarak verilmiştir. Bu deneyler sonucunda elde edilen ısı değeri verileri sırasıyla 21,88 MJ/KG, 20,84 MJ/KG ve 19,77 MJ/KG olarak belirlenmiştir ve elde edilen verilerden de artan tanecik boyutu ile ısı değerinin azaldığı açıkça görülmektedir.

Isı değeri üzerine sıcaklığın etkisinin incelenmesi amacıyla deneyler, 150°C, 250°C, 350°C sıcaklıklarda, 3 mm tanecik boyutu ve 30 dakika kalma süresi kullanılarak yapılmıştır. Bu deneylere ait deney numaraları Çizelge 10.60'da sırasıyla 15, 8 ve 13 olarak verilmiştir. Bu deneyler sonucunda elde edilen ısı değeri verileri sırasıyla 17,96 MJ/KG, 20,84 MJ/KG, ve 25,25 MJ/KG olarak belirlenmiş ve buradan da artan sıcaklıkla ısı değeri üzerindeki artış açıkça görülmektedir.

Kalma zamanının ısı değeri üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla deneyler, 10 dk., 30dk., ve 50dk. kalma sürelerinde 3 mm tanecik boyutu ve 250°C sıcaklık kullanılarak yapılmıştır. Bu deneylere ait deney numaraları Çizelge 10.60'ta sırasıyla 6, 8 ve 7 olarak verilmiştir. Bu deneyler sonucunda elde edilen ısı değeri verileri sırasıyla 18,56 MJ/KG, 20,84 MJ/KG, 22,37 MJ/KG olarak belirlenmiş ve buradan da artan tanecik boyutu ile ısı değeri üzerindeki artış açıkça görülmektedir.

Farklı sıcaklık ve kalma süreleri kullanılarak yapılan denemeler sonucunda elde edilen ısı değer verilerindeki artışlar karşılaştırıldığında, artan sıcaklıkla ısı değer verilerindeki artışın; artan kalma zamanıyla ısı değerindeki artıştan daha yüksek olduğu görülmekte ve buradan sıcaklığın ısı değer üzerinde daha etkili olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Yapılan analizler sonucunda en yüksek ısı değere 3 mm tanecik boyutu 350°C sıcaklık ve 30 dakika kalma süresi uygulanması sonucu ulaşılmış ve bu parametreler kullanılarak elde edilen ısı değeri 25,25 MJ/KG olarak belirlenmiştir. En düşük ısı değere ise 3 mm tanecik boyutu 150°C sıcaklık ve 30 dk. kalma süresi uygulanması sonucunda ulaşılmıştır ve bu parametreler kullanılarak belirlenen ısı değeri 17,96 MJ/KG olarak belirlenmiştir.

10.9.5.5 Geven Bitkisi Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinin Enerji Verimliliği Verileri

Geven bitkisi kullanılarak yapılan torrefaksiyon denemeleri sonucunda elde edilen ürünlerin enerji verimliliği değerleri Çizelge 10.60'ta verilmiş olup, elde edilen verilere merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılarak yapılan Anova analiz sonuçları Çizelge 10.61'de verilmiştir. Anova analizi sonuçlarından torrefaksiyon uygulanmış geven bitkisinin enerji verimliliği değişimlerinin %98,30 doğrulukta kuadratik yani ikinci dereceden modele uyduğu belirlenmiştir. Modelin p-değerinin 0,0001'den küçük olması modelin doğruluğunun göstergesidir.

Çizelge 10.63 Geven bitkisi kullanılarak yapılan torrefaksiyon ürünlerinin enerji verimliliği verilerinin Anova analizi sonuçları

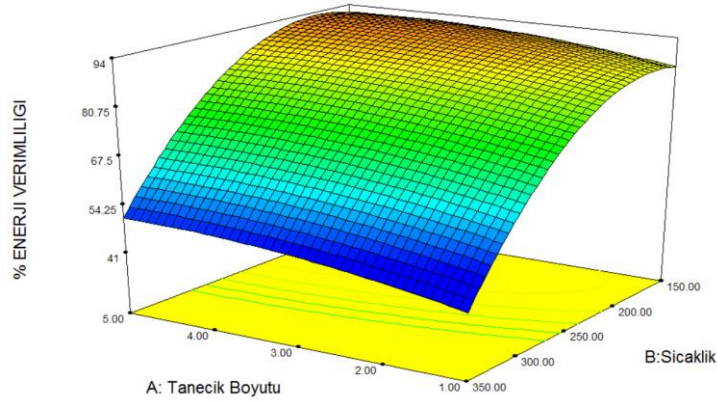
Cevap 3	% ENERJİ VERİMLİLİĞİ					
Tepki Yüzeyi Kuadratik Model için ANOVA						
Varyans Tablosu analizi [Kısmi karaler toplamı - Tip III]						
	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F Değeri	p-değeri Prob > F	
Kaynak						
Model	2384,35	9	264,93	64,21	<0,0001	Önemli
A-Tanecik boyutu	55,46	1	55,46	13,44	0,0043	
B-Sıcaklık	1818,58	1	1818,58	440,77	<0,0001	
C-Kalma Zamanı	2,56	1	2,56	0,62	0,4490	
B²	339,25	1	339,25	82,22	<0,0001	
C²	32,07	1	32,07	7,77	0,0192	
Artık	41,26	10	4,13			
Uyum Eksikliği	40,50	5	8,10	53,51	0,0002	Önemli
Hata	0,76	5	0,15			
Standart Sapma	2,03		R²	0,9830		

Deneyssel parametrelerin enerji verimliliği üzerine etkilerini belirlemek amacıyla yapılan Anova analizi sonucunda elde edilen ve Çizelge 10.63'de verilen tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametrelerinin p-değerlerine bakıldığında bu parametrelerin p-değerlerinin sırasıyla 0,0043, <0,0001 ve 0,4490 olduğu belirlenmiş ve merkezi kompozit tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak yapılan deney planı doğrultusunda elde edilen torrefaksiyon uygulanmış ürünlerin ısı değeri üzerinde, en etkili parametrenin sıcaklık ve sıcaklığın üssel değişimi olduğu tespit edilmiştir. Bunların yanı sıra enerji verimliliği üzerinde etkili olan diğer parametreler kalma zamanı (C), kalma zamanının üssel (C²) değişimi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

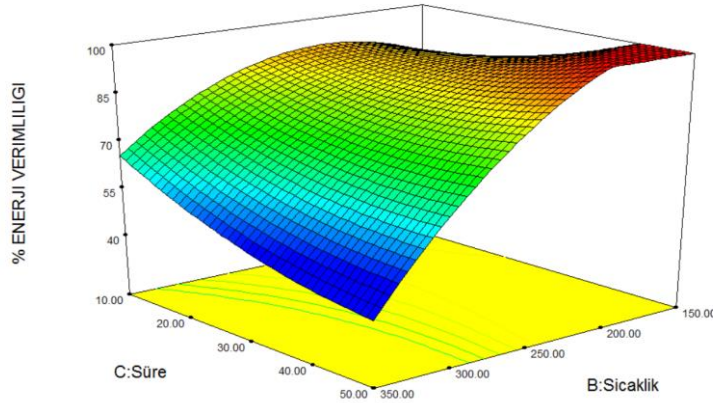
10.9.5.6 Geven Bitkisi Kullanılarak Yapılan Torrefaksiyon Denemelerinde Deneyssel Parametrelerin Enerji Verimliliği Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Geven bitkisi kullanılarak yapılan torrefaksiyon işlemi uygulanması denemelerinde, merkezi birleşik tasarım optimizasyon programı kullanılarak elde edilen torrefaksiyon

ürünlerinin enerji verimliliği üzerine, tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametrelerinin etkileri Şekil 10.42’de grafik edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 10.42 Geven için proses parametrelerinin enerji verimliliği üzerine etkileri

Şekil 10.42 a ve b’den geven bitkisine torrefaksiyon uygulanması sonucu elde edilen ürünlerin enerji verimliliği, artan sıcaklık ve kalma zamanıyla azalmakta, tanecik boyutu arttıkça enerji verimliliği artmaktadır. Kalma zamanı ve sıcaklıkla enerji veriminin azalmasının sebebinin, artan sıcaklıkla geven bitkisine torrefaksiyon prosesi uygulanması sonucu oluşan kütle kaybının, ısıl değerde oluşan artıştan yüksek olmasıdır. Artan tanecik boyutu ile enerji verimliliğinin artmasının sebebinin ise sıcaklık ve kalma zamanındaki artışla; düşük tanecik boyutlarında oluşan kütle kaybının yüksek tanecik boyutlarında oluşan kütle kaybindan daha yüksek olması olduğu düşünülmektedir.

Enerji verimliliği üzerinde tanecik boyutunun etkisinin belirlenmesi amacıyla denemeler 1 mm, 3 mm, 5 mm tanecik boyutları kullanılarak, sıcaklık ve kalma süresi 250°C ve 30 dakikada sabit tutularak yapılmıştır. Bu denemelere ait deney numaraları Çizelge 10.60'te sırasıyla 1, 8, 20 olarak verilmiştir. Bu denemeler sonucunda elde edilen ısı değer verileri sırasıyla %79,98, %85,03, %84,69 olarak belirlenmiştir. Elde edilen verilerden artan tanecik boyutu ile enerji verimliliğinin arttığı ve 3 mm tanecik boyutundan sonraki tanecik boyutu değerlerinde enerji verimliliğinin azaldığı gözlemlenmektedir.

Enerji verimliliği üzerine sıcaklığın etkisinin incelenmesi amacıyla denemeler 150°C, 250°C ve 350°C sıcaklıkta 3 mm tanecik boyutu ve 30 dakika kalma süresi kullanılarak yapılmıştır. Bu denemelere ait deney numaraları Çizelge 10.60'de sırasıyla 15, 8 ve 13 olarak verilmiştir. Bu denemeler sonucunda elde edilen enerji verimliliği verileri sırasıyla %89,33, %85,32 ve %50,48 olarak belirlenmiştir ve buradan da artan sıcaklıkla enerji verimliliğindeki azalış açıkça görülmektedir.

Kalma zamanının enerji verimliliği üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla denemeler 10 dk., 30dk., ve 50dk. kalma sürelerinde 3 mm tanecik boyutu ve 250°C sıcaklık kullanılarak yapılmıştır. Bu denemelere ait deney numaraları Çizelge 10.60'te sırasıyla 6, 8 ve 7 olarak verilmiştir. Bu denemeler sonucunda elde edilen enerji verimliliği verileri sırasıyla %90,97, %85,03 ve %87,26 olarak belirlenmiştir.

Yapılan analizler sonucunda en yüksek enerji verimliliğine 4 mm tanecik boyutu 200°C sıcaklık ve 40 dakika kalma süresi uygulanması sonucu ulaşılmış ve bu parametreler kullanılarak elde edilen enerji verimliliği değeri %99,96 olarak belirlenmiştir. En düşük enerji verimliliği değerine ise 3 mm tanecik boyutu 350°C sıcaklık ve 30 dk. kalma süresi uygulanması sonucunda ulaşılmıştır ve bu parametreler kullanılarak belirlenen enerji verimliliği %50,48 olarak belirlenmiştir.

10.9.5.7 Geven Bitkisine Uygulanan Torrefaksiyon Denemelerinin Genel Değerlendirilmesi

Geven bitkisine torrefaksiyon prosesinin uygulanması çalışmalarında optimum tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma zamanı parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılan

denemelerin deney planı Design Expert programı yardımıyla merkezi kompozit tasarım optimizasyon yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Belirlenen deney planı çerçevesinde elde edilen torrefaksiyon uygulanmış ürünlerin kütle verimliliği, ısı değeri ve enerji verimlilikleri belirlenmiş ve deney çıktılarının çözümümlenmesi yine Design Expert programı kullanılarak yapılmıştır. Tüm parametreler ve analiz sonuçları için yapılan çözümleme aralıkları Çizelge 10.64’de verilmiştir.

Çizelge 10.64 Geven biyokütlesi için çözümleme şartları

KISITLAMALAR				
İsim	Hedef	Alt Limit	Üst Limit	Önem
Tanecik boyutu	analiz aralığında	2	4	3
Sıcaklık	analiz aralığında	200	300	3
Kalma süresi	analiz aralığında	20	40	3
Kütle verimliliği	analiz aralığında	38,62	96,12	5
Isıl değer (MJ/KG)	analiz aralığında	17,96	25,25	5
Enerji verimliliği	analiz aralığında	50,48	99,96	3

Çizelge 10.64’de verilen çözümleme şartları sonucunda geven biyokütlesine torrefaksiyon işlemi uygulanması için elde edilen optimum deney parametreleri, 3 mm tanecik boyutu 250°C sıcaklık ve 30 dk kalma süresi olarak belirlenmiştir. Bu optimum değerler kullanılarak elde edilen kütle verimliliği, ısı değeri ve enerji verimliliği verileri sırasıyla %78,21, 20,89 MJ/Kg ve %84,52 olarak belirlenmiştir.

10.9.6 Katkı Maddelerine Uygulanan Torrefaksiyon Prosesinin Genel Değerlendirilmesi

Elma dalı, çay atığı, fındık kabuğu, sığır kuruğu ve geven katkı maddelerine, farklı sıcaklık, tanecik boyutu, kalma zamanı parametreleri kullanılarak yapılan torrefaksiyon prosesi sonucunda, her bir katkı maddesi için en iyi torrefaksiyon parametreleri ve bu parametreler kullanılarak elde edilen ürünlerin kütle verimliliği, ısı değerleri, enerji verimlilikleri verileri Çizelge 10,65’te verilmiştir.

Çizelge 10.65 Farklı katkı maddeleri için en iyi torrefaksiyon parametreleri ve deney çıktıları

Katkı maddesi cinsi	A: Tanecik Boyutu (mm)	B: Sıcaklık (°C)	C: Kalma zamanı (dk)	Kütle verimliliği (%)	Isıl Değer (Mj/Kg)	Enerji verimliliği (%)
Elma dalı	3	250	30	63,27	22,08	69,62
Çay atığı	4	300	20	77,76	24,60	89,65
Fındık kabuğu	3	250	30	73,71	22,51	79,69
Sığır kuruğu	3	250	30	68,93	21,20	73,71
Geven	3	250	30	78,21	20,89	84,52

Katkı maddelerine uygulanan torrefaksiyon işlemi sonucunda, Çizelge 10.65’den de görüldüğü gibi çay atığı hariç tüm katkı maddeleri için optimum tanecik boyutu 3 mm, sıcaklık 250°C, ve kalma süresi 30 dk. olarak belirlenmiştir. Çay atığı için ise optimum torrefaksiyon koşulları 4 mm tanecik boyutu, 300°C sıcaklık ve 20 dk. Kalma süresi olarak belirlenmiştir.

Çay atığının optimum proses parametrelerinin diğer katkı maddelerinden düşük çıkmasının sebebinin, çay işleme prosesi sırasında çay atıklarının yaklaşık 90-100°C sıcaklığa maruz kalması sonucu bünyesinde bulunan nemi ve uçucu bileşenleri kaybetmesi ve buna bağlı olarak düşük sıcaklıklarda karbon yoğunluğunda herhangi bir değişim olmaması olduğu düşünülmektedir.

Torrefaksiyon çalışmaları sonucunda, her bir katkı maddesi için belirlenen optimum deney parametreleri kullanılarak elde edilen briketlerin deney çıktıları karşılaştırıldığında en iyi ısı değere sahip olan katkı maddesinin briketleme prosesinde de olduğu gibi çay atığı olduğu, çay atığını sırasıyla fındık kabuğu, elma dalı, sığır kuruğu ve gevenin takip ettiği sonucuna ulaşılmıştır. Çay atığına torrefaksiyon prosesi uygulanması sonucunda elde edilen ürünün ısı değerinin ham çay atığına göre yaklaşık %15 oranında arttığı belirlenmiştir ve bu ürünün ısı değerinin ham linyit kömüründen % 3,25 oranında daha düşük ısı değere sahip olduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra optimum torrefaksiyon prosesi parametreleri kullanılarak elde edilen çay atığı ürününün ısı değerinin, optimum proses parametreleri ve çay sapı katkı maddesi kullanılarak elde edilen melez briketlerden yaklaşık %3,17 oranında daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Elma dalı, fındık kabuğu, sığır kuruğu bitkisi ve geven bitkisine torrefaksiyon prosesi uygulanması sonucunda bu biyokütlelerinde, her bir ham biyokütlenin ısı değerine kıyasla ısı değerlerinde belli bir miktar artış gözlemlenmiş ve her bir katkı maddesi için bu artış oranı sırasıyla %10,04, %8,34, %7,44 ve %8,15 olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra çay atığı katkı maddesi dışındaki katkı maddelerine torrefaksiyon prosesi uygulanması sonucunda elde edilen ürünlerin ısı değerlerinin, her bir katkı maddesi için optimum briketleme koşullarında elde edilen briketlerin ısı değerlerinden daha düşük olduğu belirlenmiştir.



SONUÇ VE ÖNERİLER

11.1 Sonuçlar

Manisa'nın Soma bölgesine ait linyit kömürlerinin bağlayıcı olarak %6 reçine ve %3 Asetik asit kullanılarak farklı türde (çay atığı, fındık kabuğu, sığır kuyruğu, geven) ve oranlarda (%0-100) organik katkı maddeleri ile farklı tanecik boyutu (1-5 mm) ve pres basıncı (5-25 MPa) parametrelerinde briketlenme performansı araştırılmış ve bu çalışmanın sonunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Katkı maddelerine ve kömüre yapılan nem analizleri sonucunda kömürün nem miktarının çay atığı, sığır kuyruğu ve geven bitkisinden daha yüksek, fındık kabuğu katkı maddesinden ise daha düşük olduğu belirlenmiştir.
- Kömüre ve katkı maddelerine yapılan kül miktarı, ısı değeri ve uçucu madde miktarı analizleri sonucunda kömürün kül ve ısı değeri miktarının denemelerde kullanılan tüm katkı maddelerinden daha yüksek, uçucu madde miktarının ise daha düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Katkı maddelerine yapılan ekstraktif madde, hemiselüloz ve lignin miktarı analizleri sonucunda en yüksek ekstraktif madde içeriğine sahip olan katkı maddesinin geven bitkisi, en düşük ekstraktif madde içeriğine sahip olan katkı maddesinin ise çay atığı olduğu belirlenmiştir. Bunun aksine en yüksek hemiselüloz ve lignin içeriğine sahip olan katkı maddesinin çay atığı, en düşük hemiselüloz ve lignin içeriğine sahip olan katkı maddesinin geven olduğu tespit edilmiştir.

- Briketleme prosesi için referans katkı maddesi olarak fındık kabuğu kullanılarak yapılan ön denemelerde briketleme prosesi için bağlayıcı miktarı kütlece %6, bağlayıcıyı hirolize etmek için gerekli asetik asit miktarı ise kütlece %3 olarak belirlenmiş ve briketleme prosesinin oda sıcaklığında kömürün ve katkı maddelerinin bünye nemi kullanılarak briketlenmesi sonucu daha verimli ürünler elde edileceği sonucuna ulaşılmıştır.
- Briketleme denemelerinde tanecik boyutu, pres basıncı, kullanılan katkı maddesi türü ve bu katkı maddesi türlerinin briket içindeki oranlarının, briketlerin kimyasal ve fiziksel özellikleri üzerinde önemli etkilere sahip olduğu tespit edilmiştir.
- Briketleme çalışmaları sonucunda her bir katkı maddesi için optimum deney parametreleri 4mm tanecik boyutu, %25 katkı maddesi miktarı ve 10 MPa presleme basıncı olarak belirlenmiştir.
- Briketleme denemelerinde kullanılan farklı tanecik boyutları ve sıkıştırma basınçlarının briketlerin shatter indeksi değeri üzerinde önemli etkilere sebep olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan denemelerde tanecik boyutu arttıkça briketlerin Shatter indeksi değerlerinin azaldığı bunun tam tersine sıkıştırma basıncı arttıkça Shatter indeksi değerinin arttığı gözlemlenmiştir.
- Briketleme sırasında kullanılan katkı maddelerinin Shatter indeksi üzerine etkileri incelendiğinde, en yüksek Shatter indeksine sahip olan briketlere, briketleme prosesinde katkı maddesi olarak sığır kuruğu bitkisi kullanılması sonucunda ulaşıldığı en düşük Shatter indeksine sahip olan briketlere ise fındık kabuğu kullanılması sonucunda ulaşıldığı belirlenmiştir. Sığır kuruğu, geven, çay atığı ve fındık kabuğu katkı maddeleri kullanılarak her bir katkı maddesi için belirlenen optimum briketleme parametreleri ile yapılan denemeler sonucunda Shatter indeksi değerleri sırasıyla %98,745, %98,253, %98,216, %95,171 olarak belirlenmiştir.
- Briketlere yapılan Shatter indeksi analizlerinin aksine, her bir katkı maddesi için belirlenen optimum deney parametreleri kullanılarak elde edilen briketlere yapılan suya dayanım testi sonucunda; suya dayanımı en yüksek olan briket fındık kabuğu, suya dayanımı en düşük olan briket ise sığır kuruğu katkı maddesi

kullanılması sonucu elde edilmiştir. Suya dayanım testleri sonucunda fındık kabuğu, çay atığı, geven ve sığır kuruğunun sırasıyla suya dayanım süreleri 72 saat, 24 saat, 24 saat ve 1 saat olarak tespit edilmiştir.

- Briketleme sırasında bağlayıcı olarak kullanılan reçinenin katkı maddeleri ve kömürün birbirine daha iyi bağlanmasını sağlayarak briketlerin mekanik dayanımlarının iyileşmesine olumlu yönde katkıda bulunduğu tespit edilmiştir.
- Briketlerin nem miktarı değerlerinin, kullanılan katkı maddesi türüne ve miktarına göre değişiklikler gösterdiği, farklı tanecik boyutu ve pres basıncının briketlerin nem miktarları üzerinde etkili olmadığı saptanmıştır. Briketlere yapılan nem miktarı analizleri sonucunda her bir katkı maddesi için belirlenen optimum briketleme parametreleri değerlerinde briketlerin nem miktarlarının yaklaşık %8-8,2 aralığında değişiklik gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.
- Briketleme çalışmalarında kullanılan katkı maddelerinin türü ve miktarının briketlerin bünyesinde bulunan kül miktarı üzerinde önemli değişimlere sebep olduğu, sıkıştırma basıncı ve tanecik boyutu parametrelerinin briketlerin kül miktarı üzerinde etkili olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Kullanılan katkı maddelerinin, linyit kömürünün bünyesinde yüksek oranda bulunan ve linyit kömürünün yanması sonucu atık olarak birikerek çevreye zararlı etkileri bulunan kül içeriğini azaltıcı yönde etki ettikleri belirlenmiştir. Briketleme çalışmaları sonucunda artan katkı maddesi miktarının briketlerin kül miktarını önemli ölçüde azalttığı bunun yanı sıra briketlerin ısı değerini olumsuz yönde etkilediği sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda en yüksek kül içeriğine sahip olan brikete geven bitkisi, en düşük kül içeriğine sahip olan brikete ise sığır kuruğu bitkisi katkı maddesi kullanılması sonucu ulaşılmıştır. Optimum briketleme parametreleri kullanılarak yapılan briketleme denemeleri sonucunda sığır kuruğu bitkisi, fındık kabuğu, çay atığı ve geven bitkisi için kül miktarları sırasıyla %3,968, %4,148, %5,125, %5,397 olarak belirlenmiştir.
- Yapılan denemelerde katkı maddelerinin yanı sıra kullanılan asetik asitlin kömürün yanması sonucu oluşan külün yapısında bulunan Al_2O_3 , CaO ve Fe_2O_3 gibi bileşiklerle reaksiyon vererek asetatlı bileşikler ve su oluşturması sonucu

külün yapısında değişikliklere yol açtığı ve bu sayede kül miktarının azalması yönünde etki ettiği öngörülmüştür.

- Briketleme parametrelerinin ısı değer üzerine etkisini belirlemek amacıyla yapılan denemeler sonucunda ısı değer üzerinde en etkili parametrelerin katkı maddesi miktarı ve türü olduğu, presleme basıncı ve tanecik boyutunun briketlerin ısı değeri üzerinde önemli etkilere sahip olmadığı tespit edilmiştir.
- Briketleme çalışmaları sonucunda, her bir katkı maddesi için belirlenen optimum deney parametreleri kullanılarak elde edilen briketlerin ısı değerleri karşılaştırıldığında en iyi ısı değere sahip olan katkı maddesinin çay atığı olduğu, çay atığını sırasıyla fındık kabuğu, sığır kuruğu ve gevenin takip ettiği sonucuna ulaşılmıştır. En yüksek ısı değere sahip olan çay atığı katkı maddesi kullanılarak elde edilen briketin ısı değerinin, fındık kabuğu, sığır kuruğu ve geven kullanılarak elde edilen briketlerden sırasıyla %0,89, %2,97 ve %3,60 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- Linyit kömürünün katkı maddeleri ile briketleme çalışmaları sonucunda tek başına briketlenmesi mümkün olmayan linyit kömürlerinin, katkı maddesi ve bağlayıcı madde olarak reçine kullanılması sonucunda ham linyit kömürüne kıyasla Shatter indeksi değerinin yaklaşık %95 oranında arttığı belirlenmiştir. Bunun yanı sıra sadece asetik asit çözeltisinin kullanılarak hidroliz edilen reçine bağlayıcısı ve %100 kömür kullanılarak elde edilen kömür briketi ile sığır kuruğu, geven, çay atığı ve fındık kabuğu katkı maddeleri ve reçine bağlayıcısı kullanılarak optimum deney parametrelerinde yapılan briketleme çalışmaları sonucunda elde edilen Shatter indeksi değerleri kıyaslandığında her bir katkı maddesi için sırasıyla Shatter indeksi değerindeki artışın %4,63, %4,11, %4,06 ve %0,8 olduğu sonucuna ulaşılmıştır. bu değerler göz önünde bulundurularak briketleme prosesinde katkı maddelerinden ziyade Shatter indeksi değerinin artmasında asetik asitte hidroliz edilmiş reçine bağlayıcısının daha yüksek etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.
- Linyit kömürünün çay atığı, fındık kabuğu, sığır kuruğu ve geven bitkisi kullanılarak yapılan briketleme çalışmaları sonucunda elde edilen briketlerin nem miktarı değerleri ham linyit kömürü ile karşılaştırıldığında; elde edilen briketler

ile linyit kömürünün nem miktarlarının hemen hemen aynı olduğu tespit edilmiştir.

- Linyit kömürünün farklı katkı maddeleri kullanılarak optimum deney parametrelerinde yapılan briketleme çalışmaları sonucunda elde edilen briketler ile linyit kömürü kullanılarak elde edilen briketin kül miktarı kıyaslandığında sığır kuruğu bitkisi, fındık kabuğu, çay atığı ve geven bitkisi için sırasıyla kül miktarındaki azalmanın %28,45, %25,21, %7,59 ve %2,67 olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Optimum deney koşullarında elde edilen briketlerin kül miktarı ham linyit kömürü ile kıyaslandığında ise bu değerlerin yaklaşık 10 kat daha yüksek olduğu belirlenmiş ve briketlemede denemelerinde katkı maddelerinin yanı sıra kullanılan asetik asidin kül miktarında önemli derecede azalmaya sebep olduğu öngörülmüştür.
- Katkı maddeli briketleme çalışmalarının linyit kömürünün ısı değerleri üzerinde etkisi incelendiğinde %100 kömür ve reçine bağlayıcısı kullanılarak elde edilen briketin ısı değerinde ham linyit kömürüne kıyasla %2,23 düşüş olduğu tespit edilmiştir. Isıl değerdeki bu azalmaya briketleme prosesinde kullanılan reçine bağlayıcısının ve/veya asetik asidin sebep olduğu düşünülmektedir. Farklı katkı maddeleri kullanılarak optimum deney koşullarında yapılan briketleme çalışmalarında elde edilen briketlerin ısı değeri ile ham kömür ve bağlayıcı madde kullanılarak briketlenmiş kömür kıyaslandığında ise briketlerin ısı değerinde ham kömür ve briketlenmiş kömür için sırasıyla %9,51-6,23 ve %7,44-4,1 oranlarında azalma olduğu belirlenmiştir.
- Yapılan denemeler sonucunda elde edilen melez briket özellikleri TS-12055-Kömür briketi –Ev ısınmasında kullanılan standardı kapsamında değerlendirildiğinde 1. sınıf yakıt standardı kapsamına girdiği sonucuna ulaşılmıştır.
- Referans biyokütle olarak elma dalı kullanılarak yapılan torrefaksiyon işlemi ön denemeleri ışığında, katkı maddelerine uygulanacak olan torrefaksiyon prosesi için yapılması planlanan deney planında merkez nokta olarak kullanılacak olan tanecik boyutu, sıcaklık ve kalma süresi değerleri sırasıyla 1 mm, 250°C ve 30 dakika olarak belirlenmiştir.

- Farklı katkı maddeleri kullanılarak yapılan torrefaksiyon denemeleri sonucunda torrefaksiyon prosesi üzerinde en etkili proses parametresinin sıcaklık ve kalma zamanı olduğu belirlenmiş, tanecik boyutu parametresinin deney çıktıları üzerinde sıcaklık ve kalma süresi kadar etkili olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.
- Torrefaksiyon denemeleri sonucunda sıcaklık ve kalma zamanı parametresi değeri arttıkça biyokütlelerin kütle ve enerji verimliliklerinin önemli derecede azaldığı, ısı değeri ise arttığı, bunun tam tersine artan tanecik boyutu ile kütle ve enerji verimliliği artarken ısı değeri azaldığı tespit edilmiştir.
- Katkı maddelerine torrefaksiyon prosesi uygulanması sonucunda en yüksek ısı değeri çay atığı kullanılması sonucunda ulaşılmış ve elde edilen ürünün ısı değerinin ham çay atığına ve kömürün çay atığı ile briketlenmesi sonucu elde edilen melez briketle kıyasla sırasıyla %15 ve %3,17 oranında daha yüksek olduğu, ham kömüre kıyasla ise %3,25 oranında daha düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Torrefaksiyon denemeleri sonucunda her bir katkı maddesinin ısı değerinde ham katkı maddesinin ısı değerine kıyasla ciddi derecede artış olduğu belirlenmiştir.
- Ham katkı maddelerinin kül ve kükürt miktarlarının linyit kömürüne kıyasla daha düşük olmasından yola çıkılarak, katkı maddelerine torrefaksiyon uygulanması sonucunda elde edilen ürünün kül ve kükürt miktarının linyit kömürüne göre daha düşük olması beklenmektedir. Ayrıca bu proses sonucunda elde edilen ürünün ısı değeri linyit kömürüyle yarışabilir seviyededir ve bu sebeple özellikle çay atığı kullanılarak yapılan torrefaksiyon işlemi sonucunda elde edilen ürünün linyit kömürüne alternatif bir yakıt olabileceği ön görülmektedir.

11.2 Öneriler

- Briketleme prosesi için reçineye alternatif yeni bağlayıcılar kullanılarak elde edilen briketlerin kimyasal ve fiziksel analizleri yapılarak reçine bağlayıcısı ile kıyaslanabilir.
- Elde edilen briketlere kükürt miktarı analizi yapılarak briketlerin kükürt miktarlarındaki değişim belirlenebilir ve briketlerin kükürt içeriklerinin ham kömür ile kıyaslanması yapılabilir.

- Briketlere yapılan kısa analiz sonuçları (%nem, %kül, %uçucu madde miktarı) TGA analizi ile desteklenebilir. Ayrıca briketlere termogravimetrik analizler uygulanarak briketlerin ısı davranışları incelenebilir.
- Briketler farklı şekillerde kalıplar kullanılarak (yastık, ymurta, dikdörtgen) üretilebilir ve farklı şekilde üretilen briketlerin yanma özellikleri incelenebilir.
- Torrefaksiyon prosesi uygulanarak elde edilen katkı maddeleri linyit kömürüyle briketlenerek, ham biyokütle ve torrefaksiyon uygulanmış biyokütle kullanılarak elde edilen briketlerin özellikleri karşılaştırılabilir.
- Linyit kömürüne ısı ön işlemler uygulanarak karbon içeriği arttırıldıktan sonra briketleme çalışmalarında kullanılabilir ve elde edilen briketlerle bu briketlerin özellikleri karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Varınca K.B ve Varank G., (2005). "Güneş Kaynaklı Farklı Enerji Üretim Sistemlerinde Çevresel Etkilerin Kıyaslanması Ve Çözüm Önerileri", Güneş Enerjisi Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi, Temmuz 2005, Mersin.
- [2] Koç, E., ve Şenel, M. C. (2013). "Dünyada ve Türkiyede Enerji Durumu".Muhendis ve Makina, 54(639):1–4
- [3] Taner A. C., (2011). "Nükleer Enerji Santralleri, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Geleceği ve Enerji Kaynak Çeşitliliği", Fizik Mühendisleri Odası Dergisi
- [4] Global Energy Assessment, (2012). Chapter:1:Energy Primer, 99150
- [5] Øvergaard S., (2008). "Issue paper: definition of primary and secondary energy" Statistics Norway, Oslo
- [6] DOE/EIA, (2010). International energy outlook.
- [7] IEA, (2016). Key World Energy Statistics
- [8] Demirel, Y. (2012). "Energy: Production, Conversion, Storage, Conservation, and Coupling. Green Energy and Technology" First Edition, Springer, USA.
- [9] Adıyaman, Ç. (2012). Türkiye'nin Yenilenebilir Enerji Politikaları, Yüksek Lisans Tezi,Niğde üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstütüsü, Niğde.
- [10] Avcı, Ö. (2009). "Türkiye - Avrupa Birliği Enerji Üretim ve Tüketiminin Karşılaştırılmalı Olarak Değerlendirilmesi". Yüksek Lisans Tezi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [11] TP, (2017). Ham petrol ve doğal gaz sektör raporu, Ankara
- [12] IEA, (2014). MediumTerm Oil Market Report, France
- [13] Melton, B. M., Hudson, A., ve Ladislaw, S., The Natural Gas Value Chain, https://csisprod.s3.amazonaws.com/s3fspublic/legacy_files/files/publication/NaturalGas_101.pdf, Mayıs 2017
- [14] BP, (2015). BP Statistical Review of World Energy, London, UK.
- [15] IEA, (2012). World Energy Outlook, Paris, France.
- [16] Radovic, L. R. (1997). Chapter 7 Rest of World. Energy and Fuels in Society: Analysis

- of Bills and Media Reports, (1):114–136.
- [17] Gary J.H. ve Handwerk G.H., (2001). Petroleumrefiningtechnology, 4th Edition. MarcelDekker, New York
- [18] TKİ, (2015). 2015 Kömür (Linyit) Sektör Raporu, Ankara
- [19] Gaur S. ve Reed T., (1998). Thermal Data For Natural and Synthetic Fuels, First Edition, MarcelDekker, New York.
- [20] Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu (2014). Kömür Sektör Raporu, Ankara
- [21] Singh, A., Pant, D., Olsen, S. I. ve Nigam, P. S., (2012). “Key issues to consider in microalgae based biodiesel production”. Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research, 29 (1):687–700.
- [22] Jayakumar P., (2009). Solar Energy Resources Assessment Handbook, First Edition, Renewable Energy Corporation Network for the Asia Pacific.
- [23] Singh, A., Pant, D., ve Olsen, S. I., (2013). Life Cycle Assessment of Renewable Energy Sources, Vol 36, Springer Publishing, London
- [24] Guinée JB, Heijungs R ve van der Voet E., (2009). “A green house gas indicator for bioenergy: gometheoretical issues with practical implications”. Int J Life Cycle Assess, 14:328–339
- [25] Özcan M., (2013). Türkiye Elektrik Enerjisi Üretim Genişletme Planlamasında Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Etkileri, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [26] Çepik B., (2015). Sürdürülebilir Kalkınma Çerçevesinde Türkiyede Yenilenebilir Enerji Politikaları, Maltepe Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- [27] Çukurova Kalkınma Ajansı, (2012).Yenilenebilir Enerji Raporu, Adana.
- [28] EÜAŞ , (2016). Elektrik Üretim Sektör Raporu, Ankara
- [29] REN21, (2016). Global Status Report, France.
- [30] Tromly, K. (2001). “Renewable Energy: An Overview”. National Renewable Energy Laboratory, Golden, US.
- [31] Çukurova Kalkınma Ajansı, (2014). Yenilenebilir Enerji Raporu, Adana.
- [32] European Commission, (2012). The European Union Explained Energy, Belgium.
- [33] EÜAŞ., (2015). Elektrik üretim sektör raporu, Ankara
- [34] Karagöl E.T. ve Kavaz İ., (2017). “Dünya’da ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji.” SETAV, (197):7-28.
- [35] Kılınç, F. K. (2012). “Geothermal Energy In Turkey”, Energy and Environment., (151):1–17.
- [36] IEA., (2011). Technology Roadmap-Geothermal Heat and Power, France
- [37] GEA., (2016). 2016 Annual US&Global Geothermal Power Production Report, US.
- [38] ETKB., (2013). Dünyada ve Türkiyede Enerji Görünümü, İstanbul.

- [39] Ipcc., (2013). The World Sci. Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Switzerland.
- [40] Herzog, A. V., Lipman, T. E. ve Kammen, D. M., (2001). "Renewable energy sources", Encyclopedia of Life, 1:1–63.
- [41] Twidell, J. ve Weir, T., (2006). Renewable Energy Resources, Second Editions, Taylor and Francis, England.
- [42] Green, D. C., (2014). "Renewable Energy Sources", Home Energy Information SE-7:47–51.
- [43] World Bioenergy Association, (2014). WBA Global Bioenergy Statistics 2014, Sweden
- [44] Policies, E., ve Countries, I. E. A. (2016). Energy Policies of IEA Countries: Turkey 2016.
- [45] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2016). Mavi Kitap, Ankara
- [46] Miller, B. G. (2010). Clean Coal Engineering Technology, First Edition, Elsevier, USA.
- [47] Schobert, H.H., (1987). "Coal: The Energy Source of the Past and Future", American Chemical Society, 20:378.
- [48] Elliott, M.A., (1981). Chemistry of Coal Utilization, Second Supplementary Volume, John Wiley&Sons, Newyork
- [49] Berkowitz, N., (1979). An Introduction to Coal Technology, First Edition, Academic Press, Newyork
- [50] Singer, J.G., (1981). Combustion: Fossil Power Systems, 3 Edition, Combustion Engineering, Inc., USA.
- [51] Miller, B.G., Miller, S. F., R., Cooper J., Lapinsky, G. M. ve McLaren, R., (2003). Feasibility Analysis for Installing a Circulating Fluidized Bed Boiler for Cofiring Multiple Biofuels and Other Wastes with Coal., PennStateUniversity, U.S.
- [52] TKİ., (2015). Kömür (Linyit) Sektör Raporu, Ankara
- [53] Sanders, j., (2009a). "Advanced Coal Preparation Monograph Series", Materials Operations, 2:1-69
- [54] Osborne, D. (2013). The Coal Handbook: Towards Cleaner Production, First Edition, Woodhead Publising, UK,
- [55] Xia, W., Xie, G., ve Peng, Y., (2015). "Recent advances in beneficiation for low rank coals", Powder Technology, 277:206–221.
- [56] Falconer, A., (2003). "Gravity Separation: Old Technique/New Methods", Physical Separation in Science and Engineering, 12(1):31–48.
- [57] Langer, B., ve Bickert, G., (2010). "Dry coal preparation in Australia: vision or necessity?", Thirteenth Australian Coal Preparation Conference, 12–17 September, Mackay, 195–208.
- [58] Mukherjee, S., ve Borthakur, P. C., (2004). "Effects of alkali treatment on ash and sulphur removal from Assam coal", Fuel Processing Technology, 85: 93–101.

- [59] Manoj, B., Kunjomana, A., G., ve Chandrasekharan, K., A., (2009). "Chemical Leaching of Low Rank Coal and its Characterization using SEM / EDAX and FTIR", *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 8(10): 821–832.
- [60] Barakh, B.K., (2000). *Coal: flotation*. First Edition, Academic Press USA.
- [61] Özdemir, O., Çinku, K., Uslu, T., Kılıç, E. ve Çelik, M. S., (2013). "Flotation Behavior of Bituminous and Lignite Coals in Salty Water", *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 13(1):1–14.
- [62] Sahbaz, O., (2013). "Determining optimal conditions for lignite flotation by design of experiments and the halbach upgrading curve ", *Physicochem. Probl. Miner. Process.* 49(2):535–546.
- [63] Temel, H.A., Bozkurt, V., ve Ayhan, F.D., (2010). "Desulfurization and deashing of Adiyaman– Gölbaşı linite by flotation", *Energy Sources*, 32:727–743.
- [64] Ünal, İ., ve Aktaş, Z., (2001) "Effect of various bridging liquids on coal fines agglomeration performance", *Fuel Processing Technology*, 69:141-155.
- [65] Görgün, M., An, E. R. Ş., ve Ünal, İ. L. (2000). "Zonguldak bitümlü kömürünün yağ aglomerasyonu", *Cumhuriyet Üniversitesi Dergisi*, 1-6.
- [66] Düzyol, S., Aksu, C. A. Ö., Erişir, H. S., ve Aspir, K. (2014). "Tunçbilek linyit kömürünün yağ aglomerasyonu ile zenginleştirilmesi", *Türkiye 19. Kömür Kongresi*, 21-23 Mayıs 2014, Zonguldak, 237–352.
- [67] LE, M. (1991). *Biological Coal Desulfurization*. New Jersey Institute Of Technology Newark, New Jersey
- [68] Karthikeyan, M., Zhounghua, W. ve Mujumdar, A.S., (2009). "Low-rank coal drying technologies—current status and New developments", *Drying Technology*, 27(2):403–415.
- [69] Nishioka, M., (1994), "Molecular mobility of high-volatile bituminous coals accompanyin drying", *Fuel*, 73(1):57–62.
- [70] Bergins, C., ve Berger, S., (1999). "Dewatering of fosil fuels and suspensions of ultra fine particles by mechanical/thermalde watering", *Chemical Engineering&Technology*, 22(11):923–927.
- [71] Sa, M., Tuta, M., ve Karaduman, M. (n.d.). "Soma linyit kömürü tozlarından hava ve suya dayanıklı biriket üretimi", 237–250
- [72] Gürbüz Beker, Ü. Kural, O. ve Dağalp (1998) "Kömürün biriketlenmesi", *Kömür*, İstanbul, 149-162.
- [72] Gürbüz Beker, Ü. Kural, O. ve Dağalp (1998) "Kömürün biriketlenmesi", *Kömür*, İstanbul, 149-162.
- [73] Schinzel, W.(1981) "Chemistry of coal utilisation" Chapter 11. Briquetting. Ed. Elliot, M. A. John Wiley and sons, New York.

- [74] Mangena, S.J., de Korte, G.J., McCrindle, R.I., ve Morgan, D.L. (2004). "The amenability of some Withbank bituminous ultra fine coals to binderless briquetting", *Fuel Processing Technology* 85:1647-1662.
- [75] Kural, O., (1991). *Kömür, İTÜ Maden Fakültesi Kurtiş Matbaası, İstanbul*
- [76] Coal Tech. (n.d.). *The Economic Agglomeration of Fine Coal for Industrial and Commercial Use*, 1.
- [77] Goleczka, J., (1988). Coal briquetting process, Patent, Yayın No: US4738685, 19 Nisan 1988.
- [78] Kural, O., ve Savasçı, O. T., (1988). "APP, a new binder for briquetting lignites", *J. Fuel*, 68:404–407.
- [79] Sağlam, M., ve Yuksel, M., (1990). "Production of water-resistant briquettes from Turkish lignites using sulfite liquor binder", *J. Fuel*, 69:60–64.
- [80] Lowry, H.H. ve Elliott, A.M., (1981). *Chemistry of Coal Utilization*, First Edition, John Wiley & Sons, US.
- [81] Zhong, Q., Yang, Y., Li, Q., Xu, B. ve Jiang, T., (2017), "Coal tar pitch and molasses blend binder for production of formed coal briquettes from high volatile coal", *Fuel Processing Technology*, 157:12-19.
- [82] Kotkin, A.M., (1990). "Use of hydrolyzed lignin in the production of fuel briquettes", *J. Ugol Ukrainy*, 6:(34–39).
- [83] Jelks, J. W., (1989). Method of manufacturing a pelletized fuel, Patent, Yayın No: US 4828573, 9 Mayıs 1989.
- [84] Pera, F., (1987). Biomass-coal dust briquettes, Patent, yayın No:HU 40690, 1987
- [85] Sharma, M., K., Priyank, G. ve Sharma, N., (2015). " Biomass Briquette Production: A Propagation of Non-Convection Technology and future of pollution Free Thermal Energy Sources" *American Journal of Engineering Research*, 4(2):44-50.
- [86] Singh, R.M., Toshihiko, M., Kamide, M., Taniguchi, K. ve Deguchi, K., (2001). "Biobriquettes – An Alternative Fuel for Domestic and Industrial applications", *Nepal Journal of Science and Technology*, 3:105-114
- [87] Luo, R., (1999). "A research on the test of biomass sulfur fixation coal briquette", *Proceedings of the Second International Symposium on Clean Coal Technology*, November 1999, Beijing, P.R. China, 425–433.
- [88] Wangfang, (1996). "Characteristics of industrial coal briquettes with biomass and briquetting machine", *J. Coal Process. Compr. Util.*, (4):26–28.
- [89] Sun, Q., Li, W., Chen, H., ve Li, B., (2003). "The variation of structural characteristics of macerals during pyrolysis" *Fuel*, 82(6):669–676.
- [90] Burchill, P., Hallam, G., D., Lowe, A.J., ve Moon, N., (1994). "Studies of coals and binder systems for smokeless fuel briquettes", *Fuel Process. Tech.*, 41:63-77
- [91] Gürbüz-Beker, Ü., ve Kural, O., (1998). *Kömürün Briketlenmesi, Kömür özellikleri, teknolojisi ve Çevre İlişkileri*, First Edition, İTÜ Maden Fakültesi Kurtiş Matbaası, İstanbul.

- [92] Grover P. D., ve Mishra SK., (1996). Biomass briquetting: technology and practices, FAO, Thailand.
- [93] Kaliyan, N., ve Vance Morey, R., (2009). "Factors affecting strength and durability of densified biomass products", Biomass and Bioenergy, 33(3):337–359.
- [94] Knužan, P., (2007). "Impact of factors at biomass compacting process", 13. International conference, Senec, Slovakia,. 381-386.
- [95] Križan, P., (2007). "Research of factors influence on quality of wood briquettes", Journal Acta Montanistica Slovaca, 12(3):223-230.
- [96] Boztepe, A., (2016). Yeniköy linyitlerinin vinas bağlayıcısı kullanılarak üretilen biriketlerinin diğer bağlayıcılarla karşılaştırılması, Doktora Tezi, Y.T.U., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [97] Özge, G. S. (2010). Briquetting of coal-biomass blends, Yüksek Lisans Tezi, I.T.U., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [98] Winowski, T. S., (1995). "Factors that affect pellet quality and trouble–shooting the pelleting process", Technical Bulletin of American Soybean Association, 23–95.
- [99] Križan, P., Šooš, Ľ., ve Vukelić, Đ., (2009). "A study of impact technological parametres on the briquetting process", Facta Universitatis-Series: Working and Living Enviromental Protection, 6(1):39–47.
- [100] Zhang, X., Xu, D., Xu, Z., ve Cheng, Q., (2001). "The effect of different treatment conditions on biomass binder preparation for lignite briquette", Fuel Processing Technology, 73(3):185–196.
- [101] Altun, N. E., Hiçyılmaz, C., ve Bağcı, A. S., (2006). "Computation of instantaneous fuel consumption for the determination of combustion efficiency with special reference to coal briquette size", Energy Sources Part A, 28(5):399-411.
- [102] Basu, P., (2013). Economic Issues of Biomass Energy Conversion. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction, Second Edition, Academic Press, USA.
- [103] Bajpai, P., (2016). Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Biofuel Production, First Edition, Springer, e-book.
- [104] Chandra, R. P., Bura, R., Mabee, W. E., Berlin, A., Pan, X., ve Saddler, J. N., (2007). "Substrate pretreatment: The key to effective enzymatic hydrolysis of lignocellulosics?", Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology, 108:67–93.
- [105] Harmsen, P., Huijgen, W., López, L., ve Bakker, R. (2010)., "Literature Review of Physical and Chemical Pretreatment Processes for Lignocellulosic Biomass", Food and Biobased Research, 1–49.
- [106] Balaban, M., ve Uçar, G. (1999). "The effect of the duration of alkali treatment on the solubility of polyose", Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 23(6):667–671.

- [107] Hendriks, A. T. W. M., ve Zeeman, G., (2009). "Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass", *Bioresource Technology*, 100(1):10–18.
- [108] Nhuchhen, D., Basu, P., ve Acharya, B. (2014). "A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction", *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*, 1–56.
- [109] van der Stelt, M. J. C., Gerhauser, H., Kiel, J. H. A., ve Ptasiński, K. J., (2011). "Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review", *Biomass and Bioenergy*, 35(9):3748–3762.
- [110] Tumuluru, J. S., Sokhansanj, S., Hess, J. R., Wright, C. T., ve Boardman, R. D., (2011). "A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications", *Industrial Biotechnology*, 7(5):384–401.
- [111] Acharjee, T. C., Coronella, C. J., ve Vasquez, V. R. (2011). "Effect of thermal pretreatment on equilibrium moisture content of lignocellulosic biomass", *Bioresource Technology*, 102(7): 4849–4854.
- [112] Ratte, J., Fardet, E., Mateos, D., ve Héry, J. S., (2011). "Mathematical modelling of a continuous biomass torrefaction reactor: TORSPYDTM column", *Biomass and Bioenergy*, 35(8): 3481–3495.
- [113] Melkior, T., Jacob, S., Gerbaud, G., Hediger, S., Pape, L. L., Bonnefios, L. ve Bardet, M., (2011). "NMR Analysis of the Transformation of Wood Constituents by Torrefaction," *Fuel*, 92 (1):271-280.
- [114] Almeida, G., Brito, J. O., ve Perré, P. (2010). "Alterations in energy properties of eucalyptus wood and bark subjected to torrefaction: The potential of mass loss as a synthetic indicator", *Bioresource Technology*, 101(24): 9778–9784.
- [115] Agbor, V. B., Cicek, N., Sparling, R., Berlin, A., ve Levin, D. B., (2011). "Biomass pretreatment: Fundamentals toward application", *Biotechnology Advances*, 29(6): 675–685.
- [116] Wu, K. T., Tsai, C. J., Chen, C. S., ve Chen, H. W., (2012). "The characteristics of torrefied microalga", *Applied Energy*, 100:52–57.
- [117] Sindhu, R., Binod, P., ve Pandey, A. (2016). "Biological pretreatment of lignocellulosic biomass - An overview", *Bioresource Technology*, 199:76–82.
- [118] Tucho, G. T., (2013). "Feasible Biomass Energy Conversion Technologies In Developing Countries", *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2(6):2720–2728.
- [119] UNEP. (2013). *Technologies for Converting Waste Agricultural Biomass To Energy*, Osaka.
- [120] Tock, J.Y., Lai, C.L., Lee, K.T., Tan, K.T. ve Bahatia S., (2009), "Banana biomass as potential renewable energy resource: A Malaysian case study" *Renewable and sustainable Energy Reviews*, 14:798-805.
- [121] Basu, P., Butler, J., ve Leon, M. A. (2011). "Biomass co-firing options on the emission reduction and electricity generation costs in coal-fired power plants", *Renewable Energy*, 36(1):282–288.

- [122] Soltes, E. J., (1998), "Biomass Pyrolysis and Liquids. Thereform", In ACS Symposium Series, 376:1-7.
- [123] Iwasaki, W., (2002), "A consideration of the economic efficiency of hydrogen production from biomass", Int. J. Hydrogen Energy, 28 (9): 939-944.
- [124] Kumar, A., Kumar, N., Baredar, P., ve Shukla, A., (2015). "A review on biomass energy resources, potential, conversion and policy in India", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 45:530–539.
- [125] Boerrigter, H. ve Rauch, R. (2005). Review of applications of gases from biomass gasification, First Edition, Biomass Technology Group (BTG), Netherlands.
- [126] Artok, L. ve Schobert, H.H., (2000), " Reaction of Carboxylic Acids Under Coal Liquefaction Conditions: 1. Under nitrogen atmosphere", Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 54(1-2): 215-233.
- [127] Demirbaş, A., (2001), " Biomass Resource Facilities And Biomass Conversion Processing For Fuels And Chemicals", Energy Conversion and Management, 42(11): 1357-1378.
- [128] Srirangan,K., Akawi, L., Moo-Young, M., ve Chou, P. C., (2012), "Towards sustainable productionof clean energy carriers from biomass resources", Applied Energy 100:172–186.
- [129] Türkoğlu, M., (2010). "Gıda Sanayii Biyokütle Atıklarının Enerji Potansiyeli ve Geri Kazanımı" Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [130] Yaman, S., Şahan, M., Haykiri-Acma, H., Sesen, K., ve Küçükbayrak. S., (2001). "Fuel briquettes from biomass – lignite blends". Fuel Processing Technology, 72(1):1–8.
- [131] Onuegbu, T., ve Ekpunobi, U., (2011). "Comparative studies of ignition time and water boiling test of coal and biomass briquettes blend",Journal of Research, 7(2):153–159.
- [132] Lu, G. Q., Wang, Q. Y., Sakamoto, K., Kim, H., Naruse, I., Yuan, J. W., ve Sadakata, M. (2000). "Experimental study on combustion and pollutant control of biobriquette", Energy & Fuels, 14: 1133–1138.
- [133] Wilaipon, P. (2008). "Density Equation of Bio-Coal Briquettes and Quantitiy of Maize Cob in Phitsanulok", Thaland. American Journal of Applied Sciences, 5(12):1808–1811
- [134] Kwong, P. C. W., Chao, C. Y. H., Wang, J. H., Cheung, C. W., ve Kendall, G., (2007). "Co-combustion performance of coal with rice husks and bamboo",Atmospheric Environment, 41(35):7462–7472.
- [135] Ikelle, I. I., ve Ivoms, O. S. P., (2014). "Determination of the Heating Ability of Coal and Corn Cob Briquettes", IOSR Journal of Applied Chemistry (IOSR-JAC) -ISSN, 2278-5736, 7(2):77–82.
- [136] Liu, X., Wu, Z., Han, Y., ve Han, L. (2017). "Characteristic modification of alkalized corn stalk and contribution to the bonding mechanism of fuel briquette", Energy.

- [137] Munir, S., Nimmo, W., ve Gibbs, B. M., (2010). "She a meal and cotton stalk as potential fuels for co-combustion with coal", *Bioresource Technology*, 101(19):7614–7623.
- [138] Chaiklangmuang, S., Supa, S., ve Kaewpet, P., (2008). "Development of fuel briquettes from biomass-lignite blend", *Chiang Mai Journal of Science*, 35(1):43–50.
- [139] Guangjun Lu, ve Fangqin Cheng, J. L., (2014). "Enhancement of coal briquette quality through corn stalk blending and binder optimization", *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33(2):482–489.
- [140] Haykiri-Acma, H., Yaman, S., ve Kucukbayrak, S. (2013). "Co-combustion of low rank coal/waste biomass blends using dry air or oxygen". *Applied Thermal Engineering*, 50(1):251–259.
- [141] Onuegbu, T. U., Ogbu, I. M., ve Ilochi, N. O., (2010). "Enhancing the Properties of Coal Briquette Using Spear Grass (*Imperata Cylindrica*)", *Leonardo Journal of Scienc*, (17):47–58.
- [142] Adekunle, J., Ibrahim, J., ve Kucha, E., (2015). "Proximate and Ultimate Analyses of Biocoal Briquettes of Nigerian's Ogboyaga and Okaba Sub-bituminous Coal", *British Journal of Applied Science & Technology*, 7(1):114–123.
- [143] Nwabue, F. I., Unah, U., ve Itumoh, E. J. (2017). "Production and characterisation of smokeless bio-coal briquettes incorporating plastic waste materials", *Environmental Technology & Innovation*, 8:223-245.
- [144] Akuma, O., ve Charles, M. (2017). "Characteristic Analysis of Bio-coal Briquette (Coal and Groundnut Shell Admixtures)", *Svience and Technology*, 3(3):30–38.
- [145] Ayodele, J. A. (2017). Evaluation of the Fuel Properties and Thermal Efficiency of Sub-Bituminous Coal-Biomass Blends, PhD Thesis, University of Nigeria, Department of Pure and Industrial, Chemistry, Nigeria.
- [146] Gholipour Zanjani, N., Zarringhalam Moghaddam, A., ve Dorosti, S., (2014). "Physical and chemical properties of coal briquettes from biomass-bituminous blends", *Petroleum and Coal*, 56(2):188–195.
- [147] Taulbee, D., Patil, D. P., Honaker, R. Q., ve Parakh, B. K., (2009). "Briquetting Of Coal Fines And Sawdust. Part I: Binder and Briquetting-Parameter Evaluations", *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 29(1):1–22.
- [148] Bergman, P. C. A., Boersma, A. R., Zwart, R. W. R., ve Kiel, J. H. A., (2005). *Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations*, First Edition, Energy Research Centre of the Netherlands, Netherlands.
- [149] Chen, W. H., ve Kuo, P. C., (2011). "Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass", *Energy*, 36(2):803–811.
- [150] Bridgeman, T. G., Jones, J. M., Shield, I., ve Williams, P. T., (2008). "Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties", *Fuel*, 87(6):844–856.

- [151] Ciolkosz, D., ve Wallace, R., (2012). "A review of torrefaction for bioenergy feedstock production", *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 6(3):246–256.
- [152] Prins, M. J., Ptasiński, K. J., ve Janssen, F. J. J. G., (2006). "Torrefaction of wood. Part 1. Weight loss kinetics", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 77(1):28–34.
- [153] Basu, P., Rao, S., ve Dhungana, A., (2013). "An investigation into the effect of biomass particle size on its torrefaction", *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 91(3):466–474.
- [154] Basu, P., Dhungana, A., Rao, S., ve Acharya, B., (2013). "Effect of oxygen presence in torrefier", *Journal of the Energy Institute*, 86(3):171–176.
- [155] Phanphanich, M., ve Mani, S., (2011). "Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass", *Bioresource Technology*, 102(2):1246–1253.
- [156] Esteban, L. S., ve Carrasco, J. E., (2006). "Evaluation of different strategies for pulverization of forest biomasses", *Powder Technology*, 166(3):139–151.
- [157] Li, H., Liu, X., Legros, R., Bi, X. T., Lim, C. J., ve Sokhansanj, S., (2012). "Torrefaction of sawdust in a fluidized bed reactor", *Bioresource Technology*, 103(1):453–458.
- [158] Chen, W. H., ve Kuo, P. C. (2010). "A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry", *Energy*, 35(6):2580–2586.
- [159] Wang, L., Barta-rajnai, E., Skreiberg, Ø., ve Khalil, R., (2016). "Impact of Torrefaction on Woody Biomass Properties", *Energy Procedia*, 105:1–6.
- [160] Uemura, Y., Omar, W., Othman, N. A., Yusup, S., ve Tsutsui, T., (2013). "Torrefaction of oil palm EFB in the presence of oxygen", *Fuel*, 103:156–160.
- [161] Yue, Y., Singh, H., Singh, B., ve Mani, S., (2017). "Torrefaction of sorghum biomass to improve fuel properties". *Bioresource Technology*, 232:372–379.
- [162] Chen, Y.-H., Chang, C.-C., Chang, C.-Y., Yuan, M.-H., Ji, D.-R., Shie, J.-L., ve Ko, C.-H. (2017). "Production of a solid bio-fuel from waste bamboo chopsticks by torrefaction for cofiring with coal", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 126:315–322.
- [163] Telford, J., (2007). "A brief introduction to design of experiments", *Johns Hopkins Apl Technical Digest*, 27(3): 224–232.
- [164] Baş, D. ve Boyacı, İ. H., (2007). "Modelling and Optimization II: Comparison of Estimation Capabilities of response Surface Methodology with Artificial Neural Networks in a Biochemical Reaction", *Journal of food engineering*, 78:846–854.
- [165] Baş, C., (2010). *Cevap Yüzeyi Tasarımları Ve Sinir Ağları Yaklaşımı*, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [166] Myers, R. H., ve Montgomery, D.C., (2002). "Response Surface Methodology Process and Product Optimization Using Designed Experiments", John Wiley&Sons, Inc. United States of America.

- [167] Tobias, P., ve Trutna, L., (2003). Engineering Statistics Handbook,
<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>, 12 Mayıs 2017
- [168] ASTM D 3173-87, (1996). Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke
- [169] ASTM D 4442-16,(2016). Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Based Materials, West Conshohocken.
- [170] ASTM D 3174-12, (2012). Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal, West Conshohocken.
- [171] ASTM D1102-84, (2013). Standard Test Method for Ash in Wood, West Conshohocken.
- [172] ASTM D5142-02a, (2013). Standard Test Methods for Proximate Analysis of the Analysis Sample of Coal and Coke by Instrumental Procedures.
- [173] ASTM E872-82, (2013). Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. West Conshohocken.
- [174] TAPPI T 204cm-97, (2007). Solvent extractives of wood and pulp.
- [175] Li, S., Xu, S., Liu, S., Yang, C., ve Lu, Q., (2004). "Fast pyrolysis of biomass in free-fall reactor for hydrogen-rich gas". Fuel Processing Technology, 85(8):1201-1211.
- [176] Tembe, E. T., Otache, P. O., ve Ekhuemelo, D. O., (2014). "Density, Shatter index, and Combustion properties of briquettes produced from groundnut shells, rice husks and saw dust of *Daniellia oliveri*". Journal of Applied Biosciences, 82(1):7372-7378

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Berrin SAYGI YALÇIN
Doğum Tarihi ve Yeri : Giresun, 1984
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :berrinsaygi28@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Kimya Mühendisliği	Atatürk Üniversitesi	2010
Lisans	Kimya Mühendisliği	Atatürk Üniversitesi	2007
Lise	Soma Linyit Lisesi (YDAL)		2001

YAYINLARI

Makale

1. **SAYGI, B.**, & TEKİN, T. (2012). Effect of Ultrasound Energy on the Photocatalytic Activity of TiO₂. J. Chem. Soc. Pak, 34(5), 1115-1119.
2. **Saygi, B.**, & Tekin, D. (2013). Photocatalytic degradation kinetics of Reactive Black 5 (RB5) dyestuff on TiO₂ modified by pretreatment with ultrasound energy. REACTION KINETICS MECHANISMS AND CATALYSIS, 110(1), 251-258.
3. Tekin D., **Saygi B.**(2013) 'Photoelectrocatalytic decomposition of Acid Black 1 dye using TiO₂ nanotubes' Journal of Environmental Chemical Engineering 4 1 2-s2.0-84888435663
4. BEYRİBEY, B., **YALÇIN, B. S.**, AÇIKYILDIZ, S. E., ÇULCU, L., MUTLU, B., VARDAR, D. S., & SARAÇ, H. (2014). Effect of V/Mo Ratio on Structural Properties of V_xMo_(1-x)O_y Nanoparticles used as Alkaline Fuel Cell Catalyzer. Applied Mechanics and Materials, 492, 346-349.
5. Berceste Beyribey, Emre Gunay, **Berrin Saygi**, Burcu Corbacioglu and Hanifi Sarac, Effect of Telluric Acid Addition on Thermal Behavior of Cesium Dihydrogen Phosphate, Main Group Chemistry 15 (2016) 125–130, DOI 10.3233/MGC-150191
6. Beyribey, **B.**, **Saygi, B.**, Corbacioglu, B., Altin, Z., & Sarac, H. (2016). Photocatalytic Activity of V_{0.13}Mo_{0.87}O_{2.935} Mixed Oxide for Acid Black 1 Degradation. Journal of the Chemical Society of Pakistan 38(3), 504-508

Bildiri

1. YALÇIN, B. S., BEYRİBEY, B., ALTIN, Z., ÇORBACIOĞLU, B., TEKİN, T., & SARAÇ, H. (2013, Nisan). V_{0.13}Mo_{0.87}O_{2.935} Katalizörünün Acid Black 1 Boyar Maddesi Üzerindeki Fotokatalitik Etkisinin İncelenmesi. 1st International Chemistry and Chemical Engineering Conference, ABSTRACT-PROCEEDINGS. 1st International Chemistry and Chemical Engineering Conference.
2. TEKİN, T., KIZILTAŞ, H., & YALÇIN, B. S. (2013). Degradation Kinetics of Congo Red dye on Photo Reactor with nanocrystalline TiO₂ thin-film photocatalyst coated. 9th Nanoscience and Nanotechnology Conference
3. Severoğlu, A., Yalçın, B. S., Öztürk, B., Açıkyıldız, S., & Saraç, H. (2014, Kasım). Determining The Effective Parameters on Moisture Content For Solid Biomass Pellets Produced By Astragalus And Verbascum Thapsus. Venice 2014 Fifth International Symposium on Energy from Biomass and Waste
4. Açıkyıldız, S., Yalçın, B. S., & Saraç, H. (2014, Ağustos). A new approach to engineering education: evolution from pedagogy to andragogy/heutagogy.. 21st INTERNATIONAL CONGRESS OF CHEMICAL AND PROCESS ENGINEERING CHISA 2014. 21st INTERNATIONAL CONGRESS OF CHEMICAL AND PROCESS ENGINEERING CHISA 2014.

5. Beyribey, B., Günay, E., Saygi, B., Corbacioglu, B., & Sarac, H. (2015) Improving Thermal Stability of Solid Acid Electrolytes for Low Temperature Fuel Cells. International Sustainable Thermal Energy Management Conference (SUSTEM), UK.
6. Saygi Yalcin, B., Yavuz, S., Tanriseven, E., and Sarac, H., (2016) "Synthesis of Silica Aerogel by Ambient Pressure Drying Method", ICCEE 2016: 18th International Conference on Chemical and Environmental Engineering, May,19-20, Berlin, Germany
7. Saygi, B., Düzenli, F. E., and Sarac, H., (2016) "Torrefaction: A study of Turkish Apple Branch Biomass", The International Conference on Engineering and Natural Sciences (ICENS, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina between 24 - 28, May

Proje

1. Berceste Beyribey, Burcu Didem Çorbacioğlu, Zehra Altin, Bora Akin, Hanifi Saraç and **Berrin Saygi Yalçın**, Improving The Thermal Resistance Of Solid Acid Electrolyte For Fuel Cells At Around 300 °C, Yıldız Technical University, Project Number: 2013-07-01-Gep02, Istanbul / Turkey.
2. Jale GÜLEN, **Berrin Saygi YALÇIN**, Türk Linyit Kömürlerinin Organik Katkı Maddeleri Kullanılarak Briketlenmesi, Yıldız Technical University, Project Number: 2014-07-01-DOP02, Istanbul / Turkey