



**PELET YAKIT PRESLERİNDE ESNEK CIVATALAR
KULLANILARAK BASINÇ REGÜLASYONUNUN SAĞLANMASI**

(Yüksek Lisans Tezi)

Büşra EYRİ

Kütahya – 2021

T.C.
KÜTAHYA DUMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**PELET YAKIT PRESLERİNDE ESNEK CIVATALAR
KULLANILARAK BASINÇ REGÜLASYONUNUN SAĞLANMASI**

Danışman:
Prof. Dr. İsmet ÇELİK

Hazırlayan:
Büşra EYRİ

Kütahya – 2021

Kabul ve Onay

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğüne,

Bu çalışma, jürimiz tarafından

Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi	İmza	
	Kabul	Red
Prof. Dr. İsmet ÇELİK (Danışman)		
Prof. Dr. Taner YILMAZ		
Dr. Öğr. Üyesi Feridun KARAKOÇ		

Onay

Prof. Dr. Şahmurat ARIK

Enstitü Müdürü

Bilimsel Etik Bildirimi

Yüksek Lisans tezi olarak hazırladığım “*Pelet Yakıt Preslerinde Esnek Cıvatalar Kullanılarak Basınç Regülasyonunun Sağlanması*” adlı çalışmanın öneri aşamasından sonuçlandığı aşamaya kadar geçen süreçte bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle uyduğumu, tez içindeki tüm bilgileri bilimsel ahlak ve gelenek çerçevesinde elde ettiğimi, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığımı, bu çalışmamda doğrudan veya dolaylı olarak yaptığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu beyan ederim.

31/12/2021

Büşra EYRİ

Özgeçmiş

Lise eğitimini Ali Gral Anadolu Lisesi'nde 2013 yılında tamamlamıştır. 1 yıl Selçuk Üniversitesi Yabancı Diller Yüksekokulu'ndaki İngilizce hazırlık eğitiminin ardından Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2018 yılında mezun olmuştur. Aynı yıl Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Makine Mühendisliği A.B.D.'nda yüksek lisans eğitimine başlamıştır.

Yüksek lisans eğitimine devam ederken 2019-2020 yılları arasında çelik konstrüksiyon imalatı alanında faaliyet gösteren VMG Örengl Makine Ltd. Şti.'de ihracat mühendisi olarak görev almıştır. 2021 yılında araştırma görevlisi olarak girdiği Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Konstrüksiyon A.B.D.'nda halen akademik çalışmalarına devam etmektedir.

Yayınlar

Çam Talaşı Biyokütlesi ve Kömür Karışımlarının Pelet Yakıt Preslerinde Peletlenebilirliği
(7. Uluslararası Mühendislik Mimarlık Ve Tasarım Kongresi)

ÖZET

PELET YAKIT PRESLERİNDE ESNEK CIVATA KULLANIMI İLE BASINÇ REGÜLESYONUNUN SAĞLANMASI

EYRİ, Büşra

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İsmet ÇELİK

Aralık, 2021, 89 sayfa

Ülkemizde ve dünyada özellikle son yüzyılda artmış olan endüstriyel faaliyetler ve nüfus ile enerjiye olan talep son derece yükselmiştir. Bu artan talep doğrultusunda uzun yıllardır kullanılmakta olan fosil yakıtların rezervleri de tükenmektedir. Bunun yanı sıra fosil yakıtların çevreye olan zararları da ortadadır. Söz konusu zararların bertaraf edilmesi ve tükenen rezervlere alternatif olarak sunulan yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim de zamanla artmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olan biyokütle enerjisi son yıllarda kullanım alanı artan bir enerji kaynağıdır. Orman atıkları, tarım atıkları veya şehirlerin yeşil alanlarından elde edilmiş atıkların da değerlendirilebileceği bir yöntem olduğu için enerji sağlama özelliğinin yanında birçok atığın yakıt olarak kullanılması açısından da çevreci bir enerji kaynağıdır.

Bu çalışmada biyokütle yoğunlaştırma yöntemleri arasından yaygın olarak kullanılmakta olan peletleme yöntemi ile yoğunlaştırma yapılmıştır. Atık durumdaki kömür tozları ve biyokütle birlikte peletlenerek değerlendirilmiştir. Çalışma esnasında değişken biyokütle ve kömür tozu parametrelerine bağlı olarak sürtünme artışı ve basınç değişimleri veya kalıp deliklerinin tıkanması gibi problemlere esnek civata ile çözüm bulunması amaçlanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, peletleme prosesi esnasında sürtünme artışı durumlarında oluşan basınç değişimlerine karşı kalıp disk ve sıkıştırma ruloları arasındaki mesafe ayarlamaları, esnek civata sayesinde yapılmış, üretim prosesi iyileştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Basınç Regülasyonu, Esnek civata, Pelet, Tasarım, Uzar civata

ABSTRACT

ENSURING PRESSURE REGULATORY BY USING REDUCED SHANK BOLTS IN PELLET FUEL PRESSES

EYRİ, Büşra

Master's Thesis, Department Of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. İsmet ÇELİK

December, 2021, 89 pages

In our country and in the world, especially in the last century, the demand for energy has increased with industrial activities and population. In line with this increasing demand, the reserves of fossil fuels that have been used for many years are also running out. In addition, the harm of fossil fuels to the environment is obvious. The tendency towards renewable energy sources, which are offered as an alternative to the aforementioned damages and depleted reserves, has also increased over time. Biomass energy, which is one of the renewable energy sources, is an energy source whose usage area has increased in recent years. Since forest wastes, agricultural wastes, or wastes obtained from the green areas of cities can also be evaluated, it is an environmentally friendly energy source in terms of using many wastes as fuel as well as providing energy.

In this study, densification was made with the pelleting method, which is widely used among biomass condensation methods. Waste coal dust and biomass were pelletized together and evaluated. During the study, it is aimed to find solutions to problems such as friction increase and pressure changes, or blockage of mold holes due to variable biomass and coal dust parameters with flexible bolts. As a result of the study, the distance adjustments between the die disc and the compression rollers were made thanks to the flexible bolt, against the pressure changes that occur in cases of increased friction during the pelleting process, and the production process was improved.

Keywords: Design, Flexible bolt, Pellet, Pressure Regulation, Reduced shank bolt

ÖNSÖZ

Tez çalışmam esnasında engin bilgi ve görüşleriyle bana yön veren, her daim katkılarını esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. İsmet ÇELİK' e, hayatım boyunca yanımda olan, kararlarım saygı duyan, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen başta annem ve babam Kezban ve Şahin SÖYLER olmak üzere tüm aileme, bu süreç boyunca beni hiç yalnız bırakmayan ve her şartta bana destek veren sevgili eşim Süleyman EYRİ' ye teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xii
KISALTMALAR	xiv
SİMGELER	xv
GİRİŞ	1

BİRİNCİ BÖLÜM LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

1.1. PELETLEME YÖNTEMİ	5
1.2. BRİKETLEME YÖNTEMİ.....	7
1.3. YOĞUNLAŞTIRMA İŞLEMLERİNDE BAĞLANMA MEKANİZMASI	8
1.3.1. Katı Köprüler	8
1.3.2. Katı Partiküller Arası Çekim Kuvvetleri.....	8
1.3.3. Mekanik Kilitlenme	8
1.3.4. Adezyon ve Kohezyon Kuvvetleri	9
1.3.5. Ara Yüzey Kuvvetleri ve Kılcal Basınç	9
1.4. PELET KALİTE STANDARTLARI	9
1.4.1. Basınç Direnci.....	11
1.4.2. Dayanıklılık.....	11
1.4.3. Darbe Direnci	12
1.4.4. Su Direnci	13
1.5. PELET DAYANIMINI ETKİLEYEN DEĞİŞKENLER.....	13
1.5.1. Karışım İçeriğinin Etkileri	14
1.5.2. Nem İçeriğinin Etkileri	14
1.5.3. Tane Boyutunun Etkileri	15
1.6. PELET PRESLERİ ÜZERİNE YAPILMIŞ LİTERATÜR ÇALIŞMALARI.	16

1.7. DİĞER BİYOKÜTLE YOĞUNLAŞTIRILMASI ÜZERİNE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR	21
---	-----------

İKİNCİ BÖLÜM CIVATALAR

2.1. ÖZEL CIVATALAR	35
2.1.1. Esnek Cıvatalar	35
2.1.2. Esnek Cıvata Uluslararası Standartları.....	37
2.1.3. Esnek Cıvata Hesapları	38
2.1.4. Esnek Cıvata Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	43

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM YAPILAN ÇALIŞMA

3.1. ESNEK CIVATA HESAPLAMALARI VE SEÇİMİ.....	51
3.1.1. Maksimum Dinamik Yükün Hesaplanması	51
3.1.2. Ön Yükleme Kuvvetinin Hesaplanması.....	54
3.1.3. Cıvata ve Sıkılan Parçaların Mekanik Davranışları.....	55
3.1.3.1. Normal Cıvata ve Parça	55
3.1.3.2. Esnek Cıvata ve Parça.....	59
3.1.4. Cıvataların Dayanımının Hesaplanması.....	63
3.2. ESNEK CIVATANIN MAKİNE ÜZERİNDE UYGULANMASI	64
3.3. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI	65
3.4. KARIŞIMLARIN HAZIRLANMASI.....	67
3.5. KULLANILAN EKİPMANLAR.....	68
3.6. PELETLEME PROSESİ.....	69
3.6.1. Biyokütlenin Peletlenmesi	69
3.6.2. B90C10 Karışımının Peletlenmesi.....	71
3.6.3. B80C20 Karışımının Peletlenmesi.....	72
SONUÇ, DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER.....	74

KAYNAKÇA76
DİZİN88



TABLULAR LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 1.1. Pelet Parametreleri Ve Standartları.....	10
Tablo 3.1. Kömür Numunesi Karakteristik Bilgileri.....	64



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Peletleme Prosesi Akış Şeması.....	5
Şekil 1.2. Pelet Değirmeni Türleri. a) Halka Kalıplı Değirmen. b) Düz Kalıplı Değirmen.....	6
Şekil 1.3. Pres Kanalında Katmanlı Bir Şekilde Üretilen Pelet.....	7
Şekil 1.4. Linyoselülozik Biyokütle İç Yapısı Üzerinde Torifikasyon Etkisi.	24
Şekil 1.5. Farklı Bağlayıcılar İle Farklı Oranlarda Yapılan Karışımların Çalışma Sonuçları.	26
Şekil 1.6. Tek Vidalı Ekstrüderin Şeması.....	27
Şekil 1.7. Tek Vidalı Ekstrüderden Üretilen Peletler.	27
Şekil 1.8. Biyokütle-Linyit Karışımından Elde Edilen Peletler (Solda), Yassı Şekildeki Briketler (Sağda).	29
Şekil 1.9. Biyokütle-Kömür Tozu Karışımından Elde Edilen Örnek Peletler.....	31
Şekil 2.1. Dış Kuvvetlerin Etkisi Altında Cıvata Davranışı.	34
Şekil 2.2. Cıvataların Kullanıldığı Çeşitli Alanlar.....	35
Şekil 2.3. Farklı Çaplarda Kesitlere Sahip Olan Esnek Cıvata Türleri.....	36
Şekil 2.4. ISO 4015 Standardında Verilen Esnek Cıvata Teknik Resmi.	37
Şekil 2.5. ISO 4015 Standardında Verilen M10 Ve M20 Arası İçin Esnek Cıvata Ölçülendirme Bilgileri.	38
Şekil 2.6. a) Cıvata Dişlerine Gelen Kuvvetler b) Sürtünmeli Sıkma Durumunda Kuvvetlerin Ve Eğimin Diş Üzerinde Oluşturduğu Etki.	39
Şekil 2.7. Kuvvet-Deformasyon Grafiği.....	40
Şekil 2.8. Normal Cıvata (a) Ve Esnek Cıvata (b) Ön Gerilme Üçgenlerinin Karşılaştırılması.	43
Şekil 2.9. İnceltmiş Çapın Gerilme Üzerine Etkisi.	45
Şekil 2.10. Çalışmada Yapılan Değişikliklerin Ağ Yapısı Ve Kırılma Şekilleri.....	46
Şekil 2.11. Standart Cıvata Ve Çapı Azaltılmış Cıvata Üzerindeki Dişlerde Oluşan Gerilme Konsantrasyonları.	47
Şekil 2.12. Gerilme Genliğinin Diş Sayısına Ve Cıvata Türüne Göre Değişimi.....	48
Şekil 2.13. Rüzgar Türbini Kanat Kökü Ve Rotor Gövdesinin Esnek Cıvata İle Montajı.....	49
Şekil 3.1. İki Dairesel Cisim Arasındaki Hareket Esnasında Oluşan Hızlar.	52
Şekil 3.2. Rulmanlar Ve Gövde Cıvatalarının Yerleşimi.	54
Şekil 3.3. Cıvatanın Sıkma Tork Değerinin Hesaplanması İçin Uygulanan Yöntem.....	54

Şekil 3.4. Sıkılan Parça.	56
Şekil 3.5. Normal Cıvata Teknik Resim.	57
Şekil 3.6. Normal Cıvata Kuvvet-Uzama Grafiği.....	58
Şekil 3.7. Normal Cıvata İçin Kuvvet-Uzama Grafiğinin Farklı Bir Yaklaşım İle Çizilmiş Hali.	59
Şekil 3.8. Esnek Cıvata Ve Parça Arasına Eklenen Manşonlar.	60
Şekil 3.9. Çalışmada Kullanılan Esnek Cıvata Teknik Resmi.....	61
Şekil 3.10. Normal Cıvata Ve Esnek Cıvata Uzama Grafiği.....	62
Şekil 3.11. Normal Cıvata Ve Esnek Cıvata İçin Kuvvet-Uzama Grafiğinin Farklı Bir Yaklaşım İle Çizilmiş Hali.....	62
Şekil 3.12. Talaş Nem Ölçümleri.....	65
Şekil 3.13. Serilerek Kurutma Yapılan Atık Kömür Tozları.	65
Şekil 3.14. Çeneli Kırıcı.	66
Şekil 3.15. Çeneli Kırıcıda Öğütülmüş Kömür Tozları.	66
Şekil 3.16. Kurutma Ve Eleme İşlemleri Uygulanmış Biyokütle.....	67
Şekil 3.17. Biyokütle Ve Kömür Tozu Karışımları. a) %100 Biyokütle b) %10 Kömür Tozu İçeren Karışım c) %20 Kömür Tozu İçeren Karışım d) %30 Kömür Tozu İçeren Karışım e) %40 Kömür Tozu İçeren Karışım f) %50 Kömür Tozu İçeren Karışım.....	67
Şekil 3.18. Peletleme Makinesi Bölümleri.	68
Şekil 3.19. Biyokütlenin Peletlenme Aşamasında Görülen Renk Değişimleri. a) Çalışma Başlangıcında b) Çalışmaya Başladıktan Belirli Bir Süre Sonra.	70
Şekil 3.20. a) Optimum Pelet Üretim Sıcaklığını Gösteren Termal Kamera Çekimi. b) Bu Sıcaklıkta Üretilmiş Doğru Formda Peletler.	70
Şekil 3.21. a) Yüksek Sıcaklıkta Çalışan Disk Termal Çekimi. b) Bu Sıcaklıkta Üretilmiş Kırıntılı Peletler.	71
Şekil 3.22. a) B90C10 Karışımının Peletlenme Esnasındaki Termal Çekimi. b) B90C10 Karışımından Üretilmiş Peletler.....	72
Şekil 3.23. Normal Cıvatalar İle Çalışan Pelet Makinesinin Termal Çekimi.....	72
Şekil 3.24. a) Esnek Cıvatalar İle Düşük Devirde Çalışan Pelet Makinesinin Termal Çekimi. b) Bu Esnada Üretilen B80C20 Karışımından Elde Edilmiş Peletler.	73

KISALTMALAR

ASABE	American Society of Agricultural and Biological Engineers (Amerikan Ziraat ve Biyoloji Mühendisleri Derneği)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu)
CEN	European Committee for Standardization (Avrupa Standartlar Komitesi)
CTI	Italian Committee of Thermotechnics (İtalyan Termoteknik Komitesi)
DIN	Deutsches Institut für Normung (Alman Standartları Enstitüsü)
DIN EN	Alman Standardizasyon Enstitüsü tarafından kabul edilen Avrupa standardı
GLİ	Garp Linyit İşletmeleri
IEA	International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)
IRI	Darbe Dayanım İndeksi
ISO	International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Organizasyonu)
ITEBE	Institut Technique Européen des bioénergies (Avrupa Biyoenerji Teknik Enstitüsü)
ÖNORM	Österreichisches Normungsinstitut (Avusturya Standartlar Kurumu)
PDI	Pelet Dayanıklılık İndeksi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskop
SS	Swedish Standards Institute (İsveç Standartlar Kurumu)
TS	Türk Standartları
WRI	Suya Dayanım İndeksi

SİMGELER

F	Kuvvet
N	Newton
M	Moment
A	Alan
E	Elastisite modülü
L	Nominal ömür
C	Rulman dinamik yük katsayısı
S	Emniyet katsayısı
R_e	Akma sınırı
kCal	Kilokalori
kg	Kilogram
d	Cıvata çapı
r	Yarıçap
v	Doğrusal hız
w	Açısal hız
c	Rijitlik katsayısı
l	Boy
p	Üstel sayı
n	Devir sayısı
φ	Helis açısı
μ	Sürtünme katsayısı
α	Hatve açısı
ρ	Sürtünme açısı

δ	Deformasyon miktarı
σ	Gerilme
mm	Milimetre
μm	Mikrometre
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece





TEZ METNİ

GİRİŞ

Günümüzde enerji, insan hayatının sürekliliği, mevcut yaşam standartlarının korunması ve yükseltilmesi için gereken çok önemli bir ihtiyaçtır. Endüstriyel alanlardaki gelişmeler, devam etmekte olan değişimler ve dünya nüfusunun artışı gibi etkenler enerjiye olan talebi artırmaktadır.

Uluslararası Enerji Ajansı'nın yayımladığı rapordaki 1990 ve 2019 yılları arasındaki verilere göre, artan enerji ihtiyacı doğrultusunda erişim kolaylığı, maliyet ve yüksek enerji verimliliği gibi sebeplerden dolayı fosil yakıtlar enerji tüketiminde ilk sırada yer almaktadır (World Energy Outlook 2021, 2021). Fosil yakıtlar yüzlerce yıldır insanlığın ana enerji kaynaklarından birisidir ve şu anda birincil enerji tüketiminin % 84,3'ünü temsil etmektedir (BP Statistical Review of World Energy, 2020).

Bununla birlikte, yenilenebilir olmamaları ve yüksek karbon salınım miktarlarının küresel ısınma üzerindeki olumsuz etkilerinden dolayı dünya, yoğun karbon içeren fosil yakıtlara odaklı bir sistemden, iklim değişikliğini hafifletmek adına düşük karbonlu, yenilenebilir enerjiye dayanan bir sisteme geçiş yapmaktadır. Son 50 yılda atmosferdeki karbondioksit konsantrasyonu %30 artmıştır. Sonuç olarak, fosil yakıtların yanması nedeniyle dünyanın ortalama yüzey sıcaklığı son 100 yılda yaklaşık 0.6 °C artmıştır. Önümüzdeki 20 yıl boyunca, küresel ısınmanın her on yılda 0.2 °C artması beklenmektedir (35 Facts About Climate Change, 2020).

Günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları, daha temiz olmalarından ve kaynak yönünden kısıtlı olmamalarından dolayı fosil enerji kaynaklarının yerini alabilecek sistemleri içermektedir. Birincil enerji tüketimi 2019 yılında %1.3 artmıştır, bu sayı 2018'deki oranının yarısından azdır (%2.8). Büyüme, bu artışın dörtte üçüne katkıda bulunan yenilenebilir enerji kaynakları ve doğal gaz ile gerçekleşmiştir (BP Statistical Review of World Energy, 2020). Temiz enerji tüketiminde lider ülkelerde de büyümenin, yenilenebilir enerji kaynakları yönünde gerçekleştiği görülmektedir (World Energy Trilemma Index, 2019).

Her ne kadar fosil kaynaklara olan talep hala en üst düzeyde olsa da zaman içerisinde, insan yaşamının sürdürülmesi ve refahı için gerekli olduğundan temiz enerji kaynaklarına geçiş hızlanarak devam edecektir.

Çevreye zarar vermeyen yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi de biyokütle enerjisidir. Biyokütle; fosil olmayan, enerji içeren karbon formları olarak tanımlanır ve tüm kara veya su bazlı bitki örtüsünü veya biyokatırları, ormancılık ve tarımsal kalıntıları ve bazı endüstriyel atıkları içerir.

Biyokütle enerji kaynakları en umut verici, en çok duyulan ve en çok sübvansede edilen yenilenebilir enerji kaynakları arasındadır. Bol miktarda fosil yakıt rezervi bulunmayan bölgelerde enerji güvenliğini artırma, sıvı taşıt yakıtlarının (etanol ve biyodizel) arzını artırma ve verilen enerji birimi başına atmosfere net karbon emisyonlarını azaltma konusunda gerçek bir potansiyele sahiptirler (Field vd., 2008). İklim değişikliğinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını azaltmak için biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı kritik öneme sahiptir (Dai vd., 2012).

Bununla birlikte, yapısal heterojenlik, düzgün olmayan fiziksel özellikler, düşük enerji yoğunluğu, yüksek nem içeriği ve biyokütlenin hidrofilik yapısı; verimli ve ekonomik taşınması, işlenmesi, depolanması ve biyoenerji ürünlerine dönüştürülmesinde önemli sorunlar haline gelmiştir (Lam vd., 2012). Biyokütlenin bu özellikleri, ön işlemler uygulanmak suretiyle giderilebilmektedir. Stelte ve arkadaşları, yaptıkları araştırmalar sonucunda çeşitli biyokütle materyallerinin düşük yoğunluklara sahip olduklarını, biyokütlenin yoğunluğunu arttırmak için, kuvvet uygulanması ile hücresel yapısını deforme etmek ve böylece yoğunluğunu arttırmak için biyokütleye basıncın uygulandığı mekanik bir işlem kullanılarak peletler halinde sıkıştırılmasını önermişlerdir (Stelte vd., 2011a). Yoğunlaştırma işlemi üç başlıkta incelenebilir (Breese Jones, D. 1931; Y. Li ve Liu, 2000).

1. Peletleme
2. Briketleme
3. Ekstrüzyon

Peletleme işlemi sırasında kalıp disk kanallarında ortaya çıkan sıcaklık ve sürtünmenin kontrol edilmesi zor olduğundan, çalışma parametrelerinin peletlerin

özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak için büyük ölçekli bir pelet presi kullanmayı zorlaştırmıştır (Castellano vd., 2015; Shang vd., 2014). Bu sebeple çoğu araştırmacı laboratuvar ortamında, tekli piston-silindir ünitesi üzerinden yoğunlaştırma çalışmalarını yürütmüşler ve parametreleri belirlemeyi amaçlamışlardır. Fakat bu yöntem ile yapılan birçok çalışmanın belirlediği parametreler, pratik anlamda gerçek bir pelet pres makinesinde preslenmesi esnasında karşılaşılan parametreler ile örtüşmemektedir. Bu çalışmada, yoğunlaştırma yöntemlerinden en sık kullanılanlardan birisi olan peletleme yöntemi kullanılmıştır. Amaç literatürde çok fazla değinilmemiş özel bir cıvata türü olan esnek cıvatanın kullanılması ile, yoğunlaştırma prosesi esnasında pelet preslerinde karşılaşılan problemlere çözüm üretmektir.





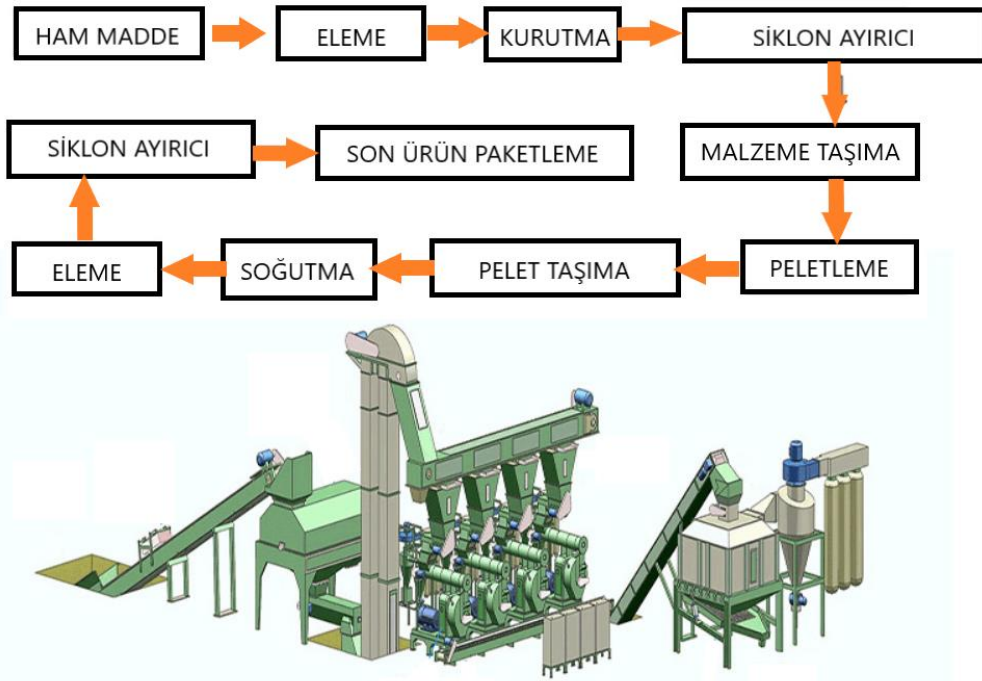
BİRİNCİ BÖLÜM
LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Biyokütlein yoğunlaştırılması için kullanılmakta olan yöntemler, peletleme prosesi esnasında ortaya çıkan mekanizmalar, bu proses üzerinde etkisi olan faktörler, pelet pres makineleri üzerine ve biyokütle yoğunlaştırma üzerine yapılmış olan çalışmalar bu bölümde verilmektedir.

1.1. PELETLEME YÖNTEMİ

Peletleme, pelet değirmeni veya peletleyici olarak da adlandırılan bir pelet presi kullanılarak gerçekleştirilir. Şekil 1.1.'de peletleme işleminin akış şeması görülmektedir.

Şekil 1.1. Peletleme Prosesi Akış Şeması.

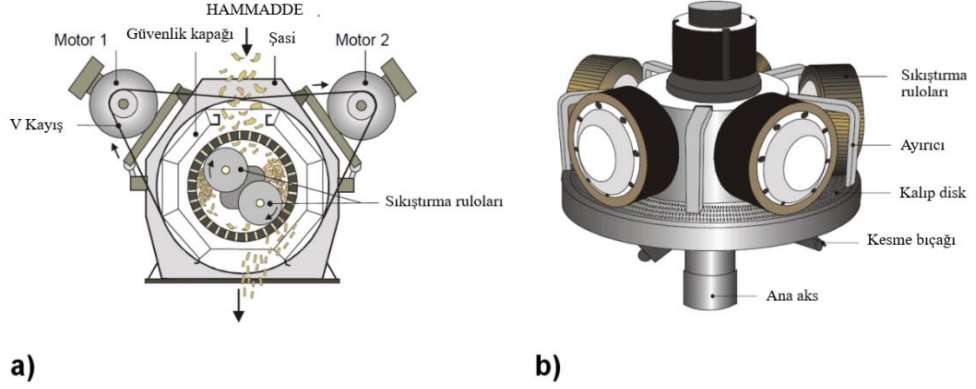


Kaynak: Pellet Plant Process Flow Chart | Gemco Energy - GEMCO Energy.

Sıkıştırma ruloları ve delikli kalıp disk, pelet presinin temel parçalarıdır. Delikli kalıp disk, Şekil 1.2.'de gösterildiği gibi bir halka (ring die) veya düz (flat die) bir kalıp şeklinde olabilir. Düz kalıp şeklinde olanların bazılarında kalıp diske, bazılarında ise sıkıştırma rulolarına dönme hareketi verilerek peletleme yapılır. Bu hareket sayesinde biyokütle parçacıkları sıkıştırma ruloları ve kalıp disk arasında sıkıştırılır ve kalıp deliklerinden geçirilmeye zorlanır. Sıkıştırma rulosu kalıp disk delikleri üzerinden her geçtiğinde, granül şeklindeki ham biyokütle Şekil 1.3.'te

gösterildiği gibi kanala bastırılır ve katmanlardan oluşan peletin bir katmanı üretilmiş olur. Burada bir bıçakla istenen uzunlukta kesilir ve ekipmanın altında toplanır (Stelte vd., 2012).

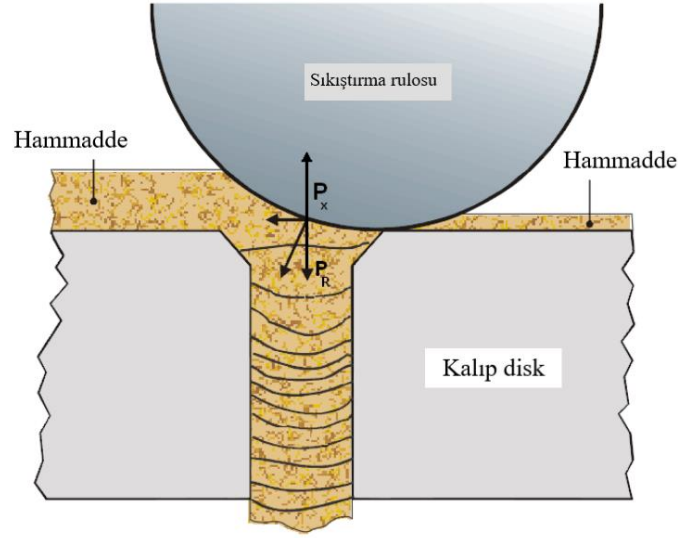
Şekil 1.2. Pelet Değirmeni Türleri. a) Halka Kalıplı Değirmen. b) Düz Kalıplı Değirmen.



Kaynak: Alakangas ve Paju, 2002.

Peletlerin mukavemetini ve dayanıklılığını önemli ölçüde etkileyen bir dizi faktör vardır. Mukavemet, peletin sıkıştırma ve darbe direncini ifade ederken, dayanıklılık bir peletin kırılabilirliği veya aşınma direnci ile ilgilidir. Dikkate alınan parametreler şunlardır: nem içeriği, parçacık boyutu, ön ısıtma / buhar şartlandırma, hammaddenin kimyasal bileşimi, bağlayıcıların eklenmesi ve proses değişkenleri. Proses değişkenleri kalıp boyutları, kalıp veya rulo dönüş devri ve silindir ile kalıp arasındaki boşluğu içerir (Wilson, 2010).

Şekil 1.3. Pres Kanalında Katmanlı Bir Şekilde Üretilen Pelet.



Kaynak: Alakangas ve Paju, 2002.

Pelet yakıtlar farklı biyokütle maddelerinin karıştırılması ile elde edilebilirler. Biyokütle içeriğine göre kullanım alanları da değişmektedir. İçeriğinde ot yoğunluğu fazla olanlar yem, odun yoğunluğu fazla olanlar ise yakıt olarak tercih edilmektedir.

1.2. BRİKETLEME YÖNTEMİ

Briketlemenin, peletlemeden temel farkı daha büyük boyutta biyokütle yakıtı üretmesidir. Briketleme yönteminde yoğunlaştırılan biyokütle materyalleri farklı şekillerdeki kalıplarda işlem görebildiğinden kare, dairesel, dikdörtgen gibi şekillerde elde edilebilmektedir.

Bu yöntem, kömür tozlarının yoğunluğunu artırmak için de kullanılır. Bu şekilde briketlemede kalıp çoğunlukla ceviz, limon şeklindedir. Ortası delik silindir şekilde, odun kütüğüne benzer briket türleri de mevcuttur. Briket yakıt üretiminde, kömür tozlarının dayanımını artırmak amacı ile organik veya inorganik bağlayıcılar eklenmektedir.

Briketleme yöntemi daha tozsuz bir yoğunlaştırma sağlaması, kömür tozu ile yapılacak çalışmalarda taşıma, depolama ve yakıttan maksimum verimi elde etme açısından önemli avantajlar sağlamaktadır.

1.3. YOĞUNLAŞTIRMA İŞLEMLERİNDE BAĞLANMA MEKANİZMASI

Yoğunlaştırılmış ürünlerin gücü ve dayanıklılığı, parçacıkları birbirine bağlayan fiziksel kuvvetlere bağlıdır. Yoğunlaştırılmış ürünlerin mukavemetini ve dayanıklılığını ölçmek için hangi testin kullanılması gerektiğini belirlemek için partikül bağlama mekanizmalarını anlamak önemlidir (Kaliyan ve Vance Morey, 2009). Rumpf, yoğunlaştırılmış ürünlerdeki birbirinden ayrı parçacıklar arasında bulunan bağlanma kuvvetlerini, beş ana gruba ayırmıştır (aktaran Pietsch, 2008).

1.3.1. Katı Köprüler

Yüksek basınçların ve sıcaklıkların uygulanmasından dolayı, moleküllerin temas noktalarında bir partikülden diğerine difüzyonu ile katı köprüler geliştirilebilir. Bazı bileşenlerin kristalleşmesi, kimyasal reaksiyon, bağlayıcıların sertleşmesi ve erimiş bileşenlerin katılaşması nedeniyle parçacıklar arasında katı köprüler de oluşabilir. Katı köprüler esas olarak yoğunlaştırılmış ürünlerin soğutulmasından/kurutulmasından sonra oluşur (Pietsch, 2008).

1.3.2. Katı Partiküller Arası Çekim Kuvvetleri

Moleküler değerlik kuvvetleri (yani serbest kimyasal bağlar), hidrojen köprüleri ve van der Waals kuvvetleri gibi kısa mesafeli kuvvetler, elektrostatik ve manyetik kuvvetler, partiküller birbirine yeterince yaklaştırılırsa katı partiküllerin birbirine yapışmasına neden olabilir (Pietsch, 2008).

1.3.3. Mekanik Kilitlenme

Basınç uygulandığı sırada, lifler, düz şekilli parçacıklar ve hacimli parçacıklar birbirine kenetlenebilir veya birbirine katlanarak birbirine kenetlenen bağlara neden olabilir (Kaliyan ve Vance Morey, 2009).

1.3.4. Adezyon ve Kohezyon Kuvvetleri

Melas ve katran gibi yüksek viskoziteli bağlayıcılar, katı köprülerinkine çok benzeyen güçlü bağlar oluşturmak için katı parçacıkların yüzeylerine yapışırken, parçacıklar arasında serbest nem gibi sıvıların varlığı, parçacıklar arasında kohezif kuvvetlerle sonuçlanır (Kaliyan ve Vance Morey, 2009).

1.3.5. Ara Yüzey Kuvvetleri ve Kılcal Basınç

Hareketsiz olan ince tutunma parçacıkları (≥ 3 nm kalınlığında), ya yüzey pürüzlülüğünü düzelterek ve parçacıklar arası temas alanını artırarak ya da parçacıklar arası mesafeyi azaltarak ve moleküller arası çekici kuvvetlerin bağlanmaya katılmasına izin vererek bitişik parçacıklar arasında güçlü bağlar oluşturabilir (Kaliyan ve Vance Morey, 2009).

1.4. PELET KALİTE STANDARTLARI

Pelet kalitesi -ısıtma kullanımı bağlamında- genel olarak biyokütlenin kimyasal, mekanik ve fiziksel özelliklerine bağlıdır (Kaliyan ve Vance Morey, 2009; Obernberger ve Thek, 2004). Katı biyoyakıtların hızla artan uluslararası ve ulusal ticareti göz önüne alındığında, katı biyoyakıtların karakterizasyonu için özlü ve kesin kriterlere ve yöntemlere duyulan ihtiyaç, alıcılar ve tüketiciler kadar tedarikçiler için de önemli hale gelmiştir (CEN/TC 335 Business Plan, 2014). Bu doğrultuda birçok Avrupa ülkesi yoğunlaştırılmış biyokütle yakıtlarının kalitesi, depolanması, taşınması ve yakılması için standartlar geliştirmiştir. Bu ülkeler ve geliştirdikleri standartlar Avusturya standardı: ÖNORM M 7135, İsveç standartları: SS 187120, Alman standartları: DIN 51731 ve DIN EN 15270, İtalyan standardı: CTI-R04 / 05, Fransız komisyonu: ITEBE ve son olarak Avrupa Standart Komitesi CEN / TC 335 olarak sıralanabilir ve bu standartlar parçacık ve yığın yoğunluğu, nem içeriği, ezilme direnci veya sertliği, parçacık sayısı, parçacık boyutu (uzunluk ve çap), kimyasal bileşim, kül içeriği ve ısıtma değeri ile ilgili parametreleri ve yönergeleri içerir (García-Maraver vd., 2011).

Bu çalışmada, daha kapsayıcı olması sebebiyle Avrupa Standart Komitesi tarafından belirlenen standartlar kullanılacaktır. Avrupa Standart Komitesi tarafından belirlenen pelet parametreleri tablo 1.1’de verilmiştir (Sungur, 2019).

Tablo 1.1. Pelet Parametreleri Ve Standartları.

Parametre	Birim	DIN 51731	DIN Plus	ÖNORM 7135	ISO17225-2		
					ENplus A1	ENplus A2	ENplus B
Çap	mm	4-12	-	4-10	6±1 ya da 8±1		
Uzunluk	mm	<50	<5xD	<5xD	3.15<L<40		
Yoğunluk	kg/m ³	1.0-1.4	>1.12	>1.12	-		
Su içeriği	%	<12	<10	<10	≤10		
Kül	%	<1.5	<0.5	<0.5	≤0.7	≤1.2	≤2.0
Alt ısııl değer	MJ/kg	17.5- 19.5	>18	>18	≥16.56		
Sülfür	%	<0.08	<0.04	<0.04	≤0.04	≤0.05	
Azot	%	<0.3	<0.3	<0.3	≤0.3	≤0.5	≤1.0
Klor	%	0.03	<0.02	<0.02	≤0.02	≤0.03	
Kum taşı	%	-	<2.3	<2.3	-		
Bağlayıcı madde	%	-	<2	<2	-		

Not: (Sungur, 2019)

Peletleme işlemi sonucunda elde edilen ürünlerin kalitesinin, tüketicinin ve mevcut pazarın gereksinimlerine cevap vermesi beklenir. Dolayısıyla üretilen peletlerin son tüketiciye ulaşana kadar geçtiği tüm süreçlerde formunu koruması gerekmektedir. Ambalajlama, taşıma ve depolama gibi aşamalarda çeşitli dış etkenlere maruz kalan peletlerin kalitesi birkaç değişken ile belirlenmektedir.

Peletlerin kalitesi maruz kaldıkları neme, basınca, aşınmaya, düşmeye bağlıdır. Ürünlerin dayanımını ölçmek amacı ile yapılan çeşitli kalite testleri mevcuttur. Mukavemet ve dayanıklılık açısından hasar miktarını önceden belirlemek, malzemenin

ve prosedürün ihtiyaçlara cevap verecek şekilde optimize edilmesine yardımcı olabilir ve ürünlerin kalitesini iyileştirmek için farklı stratejiler geliştirmeye yardımcı olabilir (Kaliyan ve Vance Morey, 2009).

Belirli bir yoğunlaştırılmış ürünü test etmek için kullanılan bir fiziksel kalite testinin (yani, basınç direnci, aşındırıcı direnç veya darbe direnci) türünün seçimi, üretim ve kullanım arasında karşılaşılan kuvvetlerin türüne bağlıdır. Bu çalışmada darbe direnci ve su direnci üzerinde durulacaktır.

1.4.1. Basınç Direnci

Basınç direnci (veya ezilme direnci/sertliği), bir peletin çatlamadan veya kırılmadan önce dayanabileceği maksimum kırma yüküdür. Bu yük, depolama sırasında alt peletlerde üst peletlerin ağırlığı nedeniyle oluşan sıkıştırma basıncını temsil eder.

Yoğunlaştırılmış ürünlerin basınç direnci, çap sıkıştırma testi ile belirlenir. Peletin alanından daha büyük yüz alanlarına sahip iki düz, paralel plaka arasına tek bir pelet yerleştirilir. Test numunesine, çatlama veya kırılma ile sonuçlanana kadar sabit bir oranda artan bir yük uygulanır. Kırılmadaki yük, kaydedilmiş bir gerilme-gerinim eğrisinden okunur. Yoğunlaştırılmış ürünlerin gerilme mukavemeti yine çap sıkıştırma testi kullanılarak belirlenebilir. Ürünler, uygulanan sıkıştırma kuvveti veya gerilmeden kaynaklanan çekme kuvvetleri nedeniyle başarısız olabilir (örneğin, silindirik bir topağın iki yarı silindire kırılması). Çekme mukavemeti, ana ürünler içindeki tüm temas noktalarında parçacıklar arasındaki yapışma kuvvetleriyle ilgilidir (D, 1931; Tabil, 1996).

Sıkıştırma direnci testi sırasında, Li ve Liu, talaş kütüklerinin, nihai kırılma meydana gelmeden önce boyutun yaklaşık 1/3'ü kadar sıkıştırıldığını (kısaltıldığını) gözlemledi (Y. Li ve Liu, 2000). Bu nedenle, sıkıştırma direnci testi, yoğunlaştırılmış ürünlerin gerçek basınç dayanımını göstermeyebilir.

1.4.2. Dayanıklılık

Dayanıklılık veya aşındırıcı direnç testi, mekanik veya pnömatik kullanımı temsil eder. Bu testler, yoğunlaştırma sürecinin ve dolayısıyla pelet kalitesinin kontrol

edilmesine yardımcı olabilir. Bu direncin ölçülmesi için birkaç test mevcuttur fakat yaygın kullanımı ve kapsayıcı sonuçları açısından tamburlu kutu yöntemleri daha çok kullanılmaktadır.

Tamburlu kutu yöntemi, pelet kalitesini pelet dayanıklılık indeksi (PDI) veya sadece yüzde dayanıklılık açısından tahmin etmek için kullanılır. Bu test, peletlerin mekanik olarak işlenmesini temsil eder ve mekanik işleme nedeniyle üretilen olası ince malzemeyi tahmin eder. Yuvarlanma sırasında, peletler, çarpma ve peletlerin birbiri üzerinde ve tamburlu kutunun duvarı üzerinde kesilmesi nedeniyle aşınır ve ince parçalar üretir. 500 g pelet 50 dev/dk hız ile 10 dakika döndürüldükten sonra peletler, pelet çapının yaklaşık 0.8 katı olan bir elek boyutu kullanılarak elenir. PDI veya dayanıklılık, yuvarlanmadan önceki ağırlığa yuvarlandıktan sonra ağırlığın oranı 100 ile çarpılarak hesaplanır (ASABE'den aktaran Kaliyan ve Vance Morey, 2009).

Aşınma direnci, kömür için tambur testinin ASTM standart yöntemi D 441-86'dan uyarlanan bir prosedür kullanılarak da test edilebilmektedir. Yoğunlaştırılmış biyokütlelerin (pelet veya briket) mekanik olarak işlenmesini simüle eden tamburlu kutu yöntemi, mekanik işlemeye bağlı ince parça/toz üretimini tahmin etmek için kullanılır. Bu yöntemde 500 gr numune kullanılır. 60 rpm'de 40 dakika döndürülür ve briketlerin birbiri üzerinde ve tambur çeperi üzerinde kesilmesi ve darbeden dolayı numuneden üretilen ince parçalar, ürün çapının yaklaşık 0,8 katı olan bir elek boyutu kullanılarak elenir. Dayanıklılık, yuvarlanmadan önceki ağırlığa yuvarlandıktan sonra ağırlığın 100 ile çarpımı olarak tahmin edilir (ASTM'den aktaran Y. Li ve Liu, 2000).

1.4.3. Darbe Direnci

Darbe direnci (düşme direnci veya kırılma direnci) testi, yoğunlaştırılmış ürünlerin (pelet veya briket) kamyonlardan zemine veya borulardan ambarlara boşaltılması sırasında karşılaşılan kuvvetleri temsil edebilmektedir. Birçok araştırmacı biyokütle peletlerinin ve briketlerinin dayanıklılığını belirlemek için bir düşme direnci testi kullanmışlardır (Al-Widyan MI, 2001; Sah vd., 1981).

Elde edilen ürünler, 1.85 m yükseklikten 4 kez metal bir plaka üzerine düşürülmüştür. Başlangıç ağırlığının yüzdesi olarak tutulan ağırlık, pelet veya briket dayanıklılığı olarak alınmıştır.

Li ve Liu, biyokütle kütüklerinin darbe direncini tahmin etmek için kömür için geliştirilen düşme kırılma testinin ASTM yöntemi D440-86'yı kullanmışlardır (Y. Li ve Liu, 2000). Ürünler 1.83 m'den beton bir zemine iki kez düşürülmüştür. Daha sonra, Richards tarafından açıklandığı gibi bir darbe direnci indeksi (IRI) hesaplanmıştır: $IRI = (100 \times N) / n$, burada N düşme sayısı ve n, N sayıdaki düşmeden sonraki toplam parça sayısıdır. Maksimum IRI değeri 200'dür. Hesaplama, orijinal ağırlığın %5'inden daha az ağırlığa sahip parçalar göz ardı edilebilir kabul edilmiştir ve Richard tarafından kabul edilebilir minimum IRI değeri 50 olarak önerilmiştir (Richards, 1990).

1.4.4. Su Direnci

Nakliye veya depolama sırasında yağmura veya yüksek neme kısa süreli maruz kalma, yoğunlaştırılmış ürünlerin kalitesini olumsuz etkileyebilir. Su direnci testi bu durumu temsilen yapılmaktadır. Lindley ve Vossoughi çalışmalarında, suya batırılan bir briket (50 mm çap x 18 mm kalınlık) tarafından emilen su yüzdesi olarak su direncini ölçtüler. Her briket 27° C'de 30 saniye süreyle suya daldırıldı (A. Lindley ve Vossoughi, 1989). Tabil, Fasina ve Sokhansanj ve diğer bazı araştırmacılar, yüksek bağıl nem ortamının peletlerin mukavemeti ve dayanıklılığı üzerindeki etkisini belirlediler. Peletleri, çeşitli bağıl nem (% 70–90) ve sıcaklık (10–40 °C) kombinasyonları için bir çevresel bölmede sakladılar (Fasina ve Sokhansanj, 1996; Tabil, 1996). Peletlerin nem içeriği farklı değerlere çıktıkça peletlerin basınç direnci ve dayanıklılığı (çoğunlukla tambur yöntemi ile) zamanla ölçülmüştür. Richards, maksimum su emiliminin benzer bir yöntem kullanarak briketlerin orijinal ağırlığının % 5'ini geçmemesi gerektiğini önerdi (Richards, 1990).

1.5. PELET DAYANIMINI ETKİLEYEN DEĞİŞKENLER

Hammadde türleri, ön hazırlık işlemleri, yoğunlaştırma yöntemleri ve ekipmanları gibi birçok faktör pelet dayanımına etki etmektedir. Bu değişkenlerin etkilerinin bilinmesi, elde edilecek ürünlerin işleme, taşıma, depolama gibi süreçlerden geçerken maruz kalacakları dış kuvvetlere karşı dağılmadan dayanım gösterebilmesi için gerekli önlemlerin alınmasında yardımcı olacaktır.

1.5.1. Karışım İçeriğinin Etkileri

Hammaddeler, karışımlarında mevcut olan yapıların değişkenlik gösteren içeriklerinden dolayı farklı fizikokimyasal özelliklere sahip olabilmektedir.

Reece yaptığı çalışmada, yonca otunun kalitesinin dayanıklılık üzerindeki etkisini araştırmıştır. Saman kalitesini sap miktarındaki farklılıklara bağlamıştır. Daha düşük dayanıklılığı (% 49,5), % 58 sap, % 19 yaprak ve 2,4 mm elekten (çoğunlukla kırık yapraklar) geçen % 23 toz içeren samanlarda elde edilmiştir. 2,4 mm elekten (çoğunlukla kırık yapraklar) geçen % 44 sap,% 41 yaprak ve % 15 toz içeren samanlar için daha yüksek dayanıklılığı (% 90'ın üzerinde) elde etmiştir (Reece, 1966).

Benzer şekilde Adapa ve arkadaşları, yonca samanını yapraklara ve gövdelere ayırarak ve farklı yaprak yüzdelerini saplara karıştırarak bunların pelet dayanıklılığı üzerindeki etkisini incelemiştir. %25-100 aralığında yaprak içeren peletlerin, pelet dayanıklılığı %43-73 olan %0 yapraklara (yani %100 saplara) göre daha yüksek pelet dayanıklılığı (%75-85) sağladığını göstermişlerdir (K. Adapa vd., 2003).

Hammaddelerin fizikokimyasal özelliklerindeki doğal değişkenlik nedeniyle, farklı biyokütle bileşenlerinin yoğunlaştırılmış ürünlerin dayanıklılığı üzerindeki etkisi, nişasta, protein, lif ve yağ gibi bileşenlerin etkisi açısından incelenebilir. Ayrıca, bileşenlerin bağlanma davranışları, hammadde türüne bakılmaksızın neredeyse benzer olacaktır (Kaliyan ve Vance Morey, 2009).

1.5.2. Nem İçeriğinin Etkileri

Yoğunlaştırma işlemi sırasında su hem bağlayıcı hem de yağlayıcı görevini üstlenmektedir. Su, parçacıklar arasındaki temas alanını artırarak van der Waals kuvvetlerinin gelişmesini sağlar (Grover ve Mishra, 1996). İçerikte nişasta, şeker, soda külü, sodyum fosfat, potasyum tuzu ve kalsiyum klorür gibi suda çözünür bileşikler bulunduğu su yoğunlaştırma işlemine yardımcı olur (A. Lindley ve Vossoughi, 1989). Nem içeriği arttıkça yoğunlaştırılan ürünlerin dayanımının da arttığını gösteren çalışmalar bulunmaktadır.

Smith ve arkadaşları, nem içeriğinin %10'dan %15'e (ağırlıkça) yükseltilmesinin buğday-saman briketlerinin dayanıklılığını %73'ten %81'e çıkardığını

göstermiştir (Smith vd., 1977). Holley, %10–20 (ağırlıkça) nem içeriğine sahip biyokütle malzemelerin rulo preste briketlenebileceğini belirtti (Holley, 1983). Turner, pelet değirmeni kalıplarının, koşullandırılmış karışımın nem içeriği %16–18 (ağırlıkça) olduğunda tıkanma eğiliminde olduğuna dikkat çekmiştir (Turner, 1995).

Köser ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, su sümbülünün nem içeriği %8-12 (ağırlıkça) olduğunda maksimum briket kalitesini elde etmişlerdir. Çok kuru (<%8 nem içeriği) ve çok ıslak (>%20 nem içeriği) su sümbülü, briketlerin yeniden genişmesi nedeniyle briketlenememiştir (Köser vd., 1982).

Kaliyan ve Morey, nem içeriğinin %10'dan %15'e (ağırlıkça) yükseltilmesinin briket dayanıklılığını %62'den %84'e çıkardığını bulmuşlardır (Kaliyan ve Vance Morey, 2005).

Kömür briketleri için nem içeriğinin artışı dayanımın azalmasına sebep olmaktadır. Komarek, alt bitümlü kömür, linyit veya turbadan (bataklık kömürü) yapılan briketlerin kırılma direncinin, nem içeriği %5'ten %30'a (ağırlıkça) yükseltildiğinde yaklaşık 4,5 kat düştüğünü bildirmiştir (Komarek, 1991).

1.5.3. Tane Boyutunun Etkileri

Partikül boyutu, pelet dayanıklılığı için önemli bir etkidir. Genel olarak, öğütme ne kadar ince olursa, dayanıklılık o kadar yüksek olur (Kaliyan ve Vance Morey, 2009). İnce partiküller genellikle büyük partiküllerden daha fazla nem tutar ve bu nedenle daha yüksek derecede şartlandırmaya tabi tutulur. Ayrıca büyük parçacıklar, peletlerde çatlaklara ve kırılmalara neden olan çatlak noktalarıdır (MacBain, 1966).

Franke ve Rey, dayanıklı peletler üretmek için 0.5-0.7 mm partikül boyutu önermişlerdir. Ayrıca 1.0 mm'den büyük partikül boyutlarının pelette kırılma noktaları olarak hareket edeceğinden de bahsetmişlerdir (Franke ve Rey, 2006). Yine de farklı partikül boyutlarından oluşan bir karışım, optimum pelet kalitesi sağlar çünkü partiküllerin karışımı, neredeyse hiç partiküller arası boşluk olmadan partiküller arası bağlanma yapacaktır (Grover ve Mishra, 1996; MacBain, 1966).

1.6. PELET PRESLERİ ÜZERİNE YAPILMIŞ LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Pelet pres makinesi üzerine yapılan; enerji tüketiminin incelendiği, verimlilik ve buna etkiyen faktörlerin araştırıldığı, makine tasarımında yapılan değişikliklerin üretime etkisinin incelendiği veya biyokütle materyallerinin peletlenmesi üzerine literatürde bulunan çalışmalar bu bölümde verilmiştir.

Pelet kalitesinin materyal türü, peletleme sıcaklığı, uygulanan basınç değerleri, nem içeriği gibi çeşitli parametrelere bağlı olması, araştırmacıları bu alandaki çalışmalar üzerine yoğunlaşmaya itmektedir. Pelet pres makinelerinde yapılan tasarımsal iyileştirmeler; elde edilecek pelet kalitesinin artışının yanı sıra enerji verimliliği, kullanılacak materyal çeşitliliğinin artması dolayısıyla yakıt kalitesinin buna bağlı olarak yükselmesi, taşıma esnasında en büyük sorunlardan birisini oluşturan pelet mekanik dayanımının artışı gibi olumlu sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

Bu bölümde pelet preslerinde karşılaşılan problemlere çözüm bulmaya yönelik enerji tüketimi, makine verimi, kalıp tasarımı, peletleme sıcaklığı ve kalıp sıcaklığı gibi farklı parametrelerin ele alındığı literatürdeki farklı tasarım çalışmaları derlenmiştir.

Araştırmacılar, pelet pres makinelerinde kullanılan materyallerin ve çeşitli işlem parametrelerinin değiştirilmesinin enerji tüketimine olan etkisini belirlemek için birtakım çalışmalar yapmışlardır. Biyokütle pelet yakıtının hazırlanmasında, kırma, eleme, kurutma, karıştırma ve peletleme dahil olmak üzere, tek başına peletleme işleminin enerji tüketiminin yaklaşık %50'sine katkıda bulunduğu birçok proses yer almaktadır (Mostafa vd., 2019). Ayrıca Cui ve arkadaşları biyokütlenin kimyasal bileşiminin; peletleme süreci ve peletleme enerji tüketimi, hasar direnci (peletleme gücü, dayanıklılık) ve hidrofobiklik dahil olmak üzere yakıt kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir (Cui vd., 2021).

Yaptıkları çalışmada Mani ve arkadaşları, mısır atıklarını öğütmek için özgül enerji tüketiminin (%12 ağırlıkça nem içeriği) 0,8, 1,6 ve 3,2 mm çekiçli değirmen elek boyutları için sırasıyla 123.5, 71.4 ve 39.7 kJkg⁻¹ olduğunu belirtirken (Mani vd., 2004) yonca atıkları kullanılan başka bir çalışmada bu sonuca paralel olarak, bir çekiçli değirmenin elek açıklığı boyutu 1,68'den 4,76 mm'ye çıkarıldığında, özgül enerji tüketimi 30,51'den 6,96 kJkg⁻¹'e düşmüştür (Ghorbani vd., 2010). Bu çalışmalardan da anlaşıldığı üzere partikül boyutunun artması enerji tüketimini düşürmektedir.

Enerji tüketimi esas olarak biyokütle malzemesini sıkıştırmak ve malzeme ile silindir arasındaki sürtünmenin üstesinden gelme esnasında gerçekleşir (Mostafa vd., 2019). Bu doğrultuda, partikül boyutundaki artışın pelet presindeki kalıp ve silindirler arasındaki öğütme işlemini artırdığından dolayı daha fazla enerji tüketimine sebep olacağını iddia eden çalışmalar da bulunmaktadır (Bergström vd., 2008; Kaliyan ve Morey, 2010; Kirsten vd., 2016). Burada dikkat edilmesi gereken partikül boyutunun aşırı büyük veya aşırı küçük olmayıp, literatürde belirtilen farklı etkilere karşı optimum düzeyde tutulması gerektiğidir. Kaliyan ve Morey büyük partiküllerin pelet üzerinde çatlak oluşumuna sebep olduğundan, kırılma noktaları oluşturabileceğine dikkat çekmişlerdir (Kaliyan ve Vance Morey, 2009). Daha küçük partikül içeriğinin peletleme basıncını artırdığı ve bu sebeple daha dayanıklı peletler elde edildiğini gösteren çalışmalar aynı zamanda aşırı küçük partikül boyutunun makinede tıkanmalara sebep olabileceğine de dikkat çekmektedirler (Kaliyan ve Vance Morey, 2009; Stelte vd., 2011b).

Enerji tüketimine etkisi olan bir diğer parametre ise biyokütle içeriği ve kullanılan bağlayıcılarıdır. Li ve arkadaşları, nemin %5 ila %20 aralığında arttığında, eklenen sudan kaynaklanan partiküller arasındaki yağlama ve yapışkanlık etkilerinden dolayı tüketilen enerjinin azaldığını bulmuşlardır. Nem içeriği %25'e yükseldiğinde enerji tüketiminin tekrar arttığını bulmuşlardır, çünkü fazladan su miktarı karbonhidrat ve proteinin materyalden dışarı çıkmasına neden olarak pelet ile kalıbın iç yüzeyi arasındaki viskoziteyi arttırarak parçacıklar arasındaki bağıl harekette bir azalmaya sebep olmaktadır (Hui Li vd., 2015).

Mišljenović ve arkadaşları melasın buğday samanı ile peletlenmesi üzerindeki etkilerini incelemiş ve melas ilavesinin düşük peletleme sıcaklıklarında enerji tüketimini azalttığını ve pelet kalitesini arttırdığını bildirmiştir (Mišljenović vd., 2016).

Ayrıca Hosseinizand ve arkadaşları, mikroalg karışımlarının ve talaşın birlikte peletlenmesinin, mikroalglerde var olan yağın peletleme enerji ihtiyacını azaltan bir yağlayıcı görevi üstlenmiş olduğunu ve bu durumun peletlerin kalıp içindeki hareketinin artmasını sağladığını ve böylece peletleme enerjisinde azalma görülürken, pelet kalitesinde iyileşme ile sonuçlandığını bildirmişlerdir (Hosseinizand vd., 2018).

Bu sonuca benzer olarak Cui de yaptığı çalışmada peletlerin fiziksel ve termal özelliklerini iyileştirmek ve üretimleri sırasında enerji tüketimini azaltmak için bir

bağlayıcı madde olarak mikroalglerin yararlılığını araştırdı. Mikroalglerin peletlerin mekanik dayanıklılığını ve yığın yoğunluğunu etkili bir şekilde artırabildiğini ve peletleme işleminin enerji tüketimini %23,5 ila %40,4 oranında önemli bir ölçüde azalttığını belirtmiştir (Cui vd., 2019). Biyokütle ile birlikte peletleme için biyobazlı olmayan malzemelerin (yerli üretim atıkları, inorganik katkı maddeleri) kullanılması da pelet yakıtının kalitesini ve enerji tüketimini değişen derecelerde iyileştirmektedir (Cui vd., 2021).

Lu ve arkadaşları peletleme işleminde biyokütlenin yanında biyobazlı olmayan daha kolay bulunabilen ve ucuz olan bentoniti peletlemişlerdir. Çalışmada bentonitin yağlayıcı bir etkiye sahip olduğunu, böylece saman peletlerinin bağlanmasını kolaylaştırdığını ve peletleme için enerji tüketimini azalttığını belirtmişlerdir (Lu vd., 2014).

Ojomo ve arkadaşları farklı nem içeriğine ve farklı partikül boyutlarına sahip mısır atığı biyoküteller ile yaptıkları çalışmada üç farklı hızda dönen kalıp ile peletleme yapmışlardır. Çalışmanın sonucunda 0,8 mm partikül boyutuna ve %10 nem içeriğine sahip biyokütleden, 150 dev/dk dönme hızında optimum peletler elde edilirken makine verimi de %74'lük bir performans ile en optimum çalışmayı sağlamıştır (Ojomo vd., 2018).

Peletleme sisteminin hızı genellikle peletleyicinin güç talebini artırır; aynı zamanda kullanılan materyalin özelliklerine de oldukça bağlıdır (Kaliyan ve Vance Morey, 2009; M. Shaw ve Tabil, 2007). Obidzinski ve arkadaşları yaptıkları çalışmada %10 patates posası içeren materyalin işlenmesi sırasında kalıp dönüş hızının 170 dev/dk'dan 270 dev/dk'ya artırılması ile, güç talebinde 3.25'ten 5.99 kW'a bir artışın gerçekleştiğini belirtmiştir (Obidzinski vd., 2019).

Pelet kalitesini ve enerji tüketimini etkileyen bir diğer önemli faktör peletleme sıcaklığıdır. Bu sıcaklık materyal ve kalıp arasındaki sürtünmeden kaynaklanmaktadır. Pelet kalıbının sıcaklığının kontrol edilmesi pelet kalitesini de doğrudan etkilemektedir. Kalıbın sıcaklığının artırılması, bağlanma proseslerini ve pelet kalitesini etkileyen doğal veya ilave bağlayıcıların bileşenlerinin yumuşatılmasına ve etkinleştirilmesine yardımcı olur (Gilbert vd., 2009; Rhén vd., 2005; Said vd., 2015). Kalıp sıcaklığı, biyokütle malzemesinin cam geçiş sıcaklığını aştığında, biyokütle yapısındaki reçine ve

lignin, peletin içinden dışına doğru hareket eder ve reçine, peletin dış yüzeyini kaplarken, lignin katmanlara bağlanır (Mostafa vd., 2019).

Kalıp sıcaklığının düşük olması durumunda ise (≈ 30 °C), ham maddede bulunan lignin ve protein bağlayıcı görevi görmemekte ve bu nedenle, düşük sıcaklıkta düşük pelet yoğunluğunu açıklayan hidrojen köprüleri, van der Waals kuvveti, mekanik kilitleme ve serbest kimyasal bağlar gibi bağlanma kuvvetlerinin kısa menzilli kuvvetlerle sınırlı kalmasıyla sonuçlanmaktadır (Liu vd., 2014).

Gilbert ve arkadaşları kalıp sıcaklığının ve basıncın pelet kalitesi üzerindeki etkisini incelemek için beş çeşit biyokütle ile çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada kalıp sıcaklığı arttıkça biyokütle içeriğinde bulunan ligninin yumuşadığını ve sıkıştırma etkisi ile partiküller arası bağlanmayı artırdığını bulmuşlardır. Ancak bu etki 100 °C'ye kadar devam etmiş, bu sıcaklığın üzerine çıkılması durumunda biyokütle içerisindeki nemin buharlaşarak peleti daha sert ve kırılğan duruma getirdiğini belirtmişlerdir (Gilbert vd., 2009).

Peletleme sıcaklığının yanı sıra pelet kalıp deliği boyutunun da nem içeriği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir (García-Maraver vd., 2011; Rhén vd., 2005; Theerarattananoon vd., 2012; Wu vd., 2011). Nem içeriği peletleme işlemi sırasında yağlayıcı görevi gördüğünden dolayı, deliklerin tasarımı; makine verimini ve tüketilen enerjiyi etkileyen bir tasarım parametresidir.

Said ve arkadaşları farklı oranlardaki nem içeriği, nişasta katkı maddesi ve farklı çap/sıkıştırma uzunluğu oranlarındaki deliklere sahip kalıplar ile yaptıkları çalışmada 50°C sıcaklık üzerinde ve altında yürüttükleri çalışmada tüm bu parametrelerin pelet üzerine etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda en iyi özellikleri; 50°C sıcaklık altında, 8mm/32mm çap/boy oranındaki deliklere sahip kalıpta peletlenen, %17 nem ve %2 nişasta katkısı içeren karışım göstermiştir. 6mm/20mm oranındaki deliklere sahip olan kalıplardan istenen özelliklerde pelet elde edilememiştir (Said vd., 2015).

Yaptıkları çalışmada Nielsen ve arkadaşları, dört farklı giriş açısı ve derinliğe sahip delik tasarımı ile peletleme yaparak, delik tasarımının uygulanan kuvvet ve dolayısıyla tüketilen enerji üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bilgisayar destekli analizler ile yapılan peletleme çalışmalarında optimum basınç sonucu, giriş açısı 40° olan ve havşa derinliği 4.1 mm boyutunda olan ikinci kalıptan elde edilmiştir.

Simülasyon sonuçları ile laboratuvar ortamında peletleme sonuçları, yalnızca giriş açısı 80° olan ve havşa derinliği 1.2 mm boyutunda olan üçüncü kalıpta tutarlılık göstermiştir (Nielsen vd., 2018).

Peletleme işlemi esnasında oluşan ısı artışlarının en önemli sebeplerinden birisi döner disk kalıbın tasarımıdır. Döner disk, yapısal dayanım ile birlikte pelet kalitesini de önemli derecede etkilemektedir.

Peletleme prosesi sırasında uygun sıkıştırma oranının kullanılmaması durumunda, peletleme basıncında aşırı yükselmeler meydana gelmekte ve bu da makinede tıkanmalara sebep olmaktadır (Çelik vd., 2018). Dolayısıyla peletleme basıncının telafi edilememesi döner kalıp disk ve sıkıştırma rulolarında çeşitli aşınma türlerinin ortaya çıkmasına veya kırılma gibi daha büyük arızaların oluşmasına sebep olmaktadır. Bu tür deformasyonlar ise pelet kalitesinde azımsanamayacak derecede düşüslere yol açmaktadır.

Makinede meydana gelen bu anlık yüksek basınç etkisini ortadan kaldırmak adına Güneş ve Çelik yaptıkları çalışmada, disk yayları kullanarak basınç regülasyonunu sağlamayı amaçlamışlardır. Yapılan çalışma sonucunda, peletleme prosesi esnasında makineye eklenen disk yaylar ile gerekli sehimi sağlayarak basınç değişimlerini karşılamayı başarmışlardır. Bunun sonucunda elde edilen pelet kalitesinde de artış gözlemlenmiştir (Güneş ve Çelik, 2017).

Paredes-Rojas ve arkadaşları iki farklı basınç değeri için (6.89 MPa ve 20 MPa) tasarladıkları radyal, sarmal ve altıgen örüntü ile oluşturdukları düz kalıp pres deliklerini sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanarak karşılaştırmışlardır. Statik analizin, kalıp tasarımında geometrinin önemli bir faktör olduğunu gösterdiğini; altıgen kalıbın radyal kalıp tasarımından 150/72 oranında daha fazla pelet üretimi sağladığını belirtmişlerdir. Bu şu anlama gelmektedir, radyal kalıba kıyasla, yapısını etkilemeden altıgen matrisin konfigürasyonu ile üretimi ikiye katlamak mümkündür. Dolayısıyla makine verimi artırılmış olacaktır. Ayrıca radyal kalıp tasarımı uygulanan basınç değerlerinde en fazla sehime uğrayan tasarım olmuştur (Paredes-Rojas vd., 2020).

Çelik ve arkadaşları her biyokütle materyali için farklı presleme parametrelerinin ortaya çıktığını belirtmişler ve bu parametreleri etkileyen en önemli etkenin kalıp olduğunu öne sürmüşlerdir. Bu doğrultuda farklı sıkıştırma oranları ile yaptıkları sonlu elemanlar analizi çalışmasında; kalıp delik uzunluğunun, kalıp giriş

delik çapının ve peletleme basıncının, delik deformasyonu üzerinde etkili olduğunu bulmuşlardır (Çelik vd., 2018).

Literatürde pelet presleri üzerine yapılan çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda, üretimi etkileyen aşınma, kırılma, tıkanma gibi problemlere çözüm bulmak amacı ile yapılmış çalışma sayısının oldukça az olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra peletleme prosesinde oluşan basınç değişimlerini konu edinen tek çalışma ise Güneş ve Çelik'in çalışmasıdır (Güneş ve Çelik, 2017). Yapılan literatür araştırması sonucu pelet preslerinde basınç regülasyonu üzerine yapılacak bir çalışmanın son derece faydalı olacağı düşünülmüştür.

1.7. DİĞER BİYOKÜTLE YOĞUNLAŞTIRILMASI ÜZERİNE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Biyokütle üç temel yöntem ile yoğunlaştırılmaktadır. Bunlar; peletleme, briketleme ve ekstrüzyon yöntemleridir. Bu bölümde yapılan diğer yoğunlaştırma çalışmaları derlenmiştir.

Biyokütle kullanımı dünyada ve ülkemizde henüz istenen seviyede değildir. Biyokütle kullanımının istenen seviyede olmamasının depolama sorunları, birim başına elde edilen enerjinin düşük olması, işlenme süreci için gerekli yatırımlar gibi farklı sebepleri vardır. Bunların yanı sıra biyokütle kullanımına olan talep, esas olarak kullanım maliyetine bağlıdır. Maliyet ise kısmen çevre vergileri, emisyon kotalı ticaret gibi bazı siyasi kararların bir sonucudur. Biyoenerji tüketim eğilimlerinin, hükümetlerce alınan siyasi kararlarla bağlantılı olduğu ileri sürülmüştür (Vinterbäck, 2004).

Kömür endüstrisi, yüksek nem içeriği ve işleme problemlerinden dolayı genellikle çok küçük boyutlu kömürü yakıt olarak değerlendirememektedir. İnce kömür ve biyokütle biçiminde önemli miktarda enerji kullanıma uygun şartlar oluşmadığından atılmaktadır ve bu alanda önemli bir atık geri kazanım sanayisi gelişmemiştir. Biyokütle ve kömürün birlikte yoğunlaştırılması atık durumdaki kömür tozlarından faydalanabilmek adına önemli bir çözüm üretmektedir. Ayrıca bu yöntem sadece atık kömür tozlarını değil, içerdiği enerji ile yakıt olarak kullanıma elverişli bitki atıklarını da değerlendirmeye imkan sağlamaktadır. Biyokütlenin doğrudan yakılması, sürekli yanma sağlamamaktadır ve sürekli yanma, biyokütle ve kömür tozları birleştirilerek

biyokütle-kömür briketleri üretilerek başarılabilir (Google Patents, US20110197501A1; US5916826A).

Ülkemizdeki linyit kömürlerinin nem, kül ve kükürt oranları yüksek iken kalorifik değerleri düşük kalmaktadır. Ayrıca mevcut nem oranları sebebiyle kırılabilirlikleri yüksek olduğundan işleme, taşıma ve depolama olanakları zorlaşmaktadır. Tüm bu süreçlerde açığa çıkan toz kömür oranları da yüksek olmaktadır. Toz kömürlerin olduğu hali ile yakılmasının zorluğunun yanı sıra, yanmadan havaya karışmaları da çevreye zarar vermektedir. Türk linyitlerinin bu olumsuz özelliklerinin azaltılması için en uygun yöntem toz kömürlerin yoğunlaştırılması olacaktır. Tüm bu sorunlara çözüm bulmak adına yapılan çalışmalar aşağıda derlenmiştir.

Yaman ve arkadaşları, Kütahya-Seyitömer bölgesinden elde edilmiş linyit ile farklı biyokütleleri (melas, çam kozalağı, zeytin atığı, talaş, kağıt fabrikası atığı ve pamuk döküntüsü) briketleyerek üretilen briketlerin mekanik dayanımına etki eden faktörleri belirlemeyi amaçlamışlardır. Yapılan çalışma kağıt fabrikası atığının varlığı, elde edilen briketlerin parçalanma endeksini arttırdığını göstermiştir. Buna paralel olarak, talaş ve kağıt fabrikası atıkları briketlerin basınç dayanımını artırmıştır. Briketlerin suya dayanıklılığının zeytin atığı, pamuk döküntüsü, çam kozalağı veya kağıt fabrikası atığı eklenerek artırılabilirliği sonucuna ulaşılmıştır (Yaman vd., 2001).

Özyüğüran ve Açma yaptıkları çalışmada, farklı oranlardaki biyokütle (findık kabuğu, ayçekirdeği kabuğu ve pirina) karışımları ile Afşin-Elbistan linyit kömürünü farklı basınçlar uygulayarak briketlemiştirler. Daha sonra karışımlarda bağlayıcı madde olarak melas, linobind ve sülfite likörü de kullanılmıştır. Söz konusu çalışmada briketlerin kırılma sağlamlığı, düşme sağlamlığı ve suya dayanıklılıklarının belirlenmesi ve karşılaştırılması amaçlanmıştır. Basıncın yüksek seviyelere çıkarılması, biyokütle ve linyit briketlerinde bahsedilen dayanımların artmasını sağlamıştır. Linyite katılan 3 farklı biyokütle numunesi de, üretilen briketlerde düşme sağlamlığını artırıcı etki göstermiştir. Bağlayıcı madde olarak eklenen melas, linobind (değiştirilmiş nişasta) ve sülfite likörü ise briketlerin suya dayanımlarını büyük ölçüde artırmıştır (Özyüğüran ve Açma, 2016).

Taulbee ve arkadaşları ince kömür tozunun ve talaşın briketlenmesi ile ilgili yaptıkları çalışmada, 50'ye yakın bağlayıcı çeşidi ile yaptıkları deneyler sonucunda

ekonomik ve teknik yönden en uygun üç bağlayıcı içeriğini elde etmeyi ve briket kalitesi üzerinde etkisi olan diğer parametreleri belirlemeyi amaçlamışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda guar zankı, buğday nişastası ve reax/kireç, kömür ve talaş briketleme için en iyi performans gösteren bağlayıcılar olarak tanımlanmıştır. Briket kalitesi üzerinde en fazla etki gösteren parametrelerin bağlayıcı konsantrasyonu, talaş konsantrasyonu, parçacık boyutu ve türü, kür sıcaklığı ve kül içeriği olduğunu belirlemişlerdir. Yine briket özellikleri üzerinde en az etkiye nem içeriği, briketleme kuvveti ve briketleme bekleme süresinin sahip olduğunu bulmuşlardır (Taulbee vd., 2009).

Yukarıdaki çalışmanın devamı olarak Patil ve arkadaşları, talaş ve/veya bağlayıcı eklenen ve eklenmeyen farklı ince ve iri taneli kömür karışımlarının parçacık boyutu dağılımının etkisini incelemek amacıyla sıkıştırma ve briketleme çalışmaları yapmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucu talaş veya bağlayıcı olmadan sıkıştırılan kömür karışımlarında, maksimum yoğunluğu yaklaşık %70 kaba taneli kömür içeren karışımlarla elde etmişlerdir. %10 talaş eklenmesi, maksimum paketleme yoğunluğunu %40-%50 kaba taneli ürüne kaydırmıştır. Bağlayıcı olmadan en yüksek basınç dayanımı %100 ince yüzdürme kömürü ile yapılan briketlerle elde edilmiştir (Patil vd., 2009).

Atay ve arkadaşları, gül yağı işlenmesinde ortaya çıkan damıtma atıkları ile linyit kömür tozunu ve kızılçam ağaç kabuğunu kullanarak 6 tane farklı karışım oranlarına sahip pelet üretmişlerdir. Peletlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen peletlerin emisyon değerlerinin belirlenmesi amacı ile peletler geleneksel kovalı tip sobada yakılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, belirtilen tüm pelet tiplerinde yanma kararlı durumda iken baca gazı emisyon değerlerinin ilgili yönetmelikte belirtilen değerlerin altında kaldığı ve elde edilen peletlerin ısınma amaçlı kullanımının çevreci olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca bu çalışma gül yağı damıtma atıklarının, linyit kömür tozunun ve kızılçam ağaç kabuğunun verimli bir şekilde geri dönüştürülebileceğini göstermiştir (Atay, Ekinci ve Umucu, 2016).

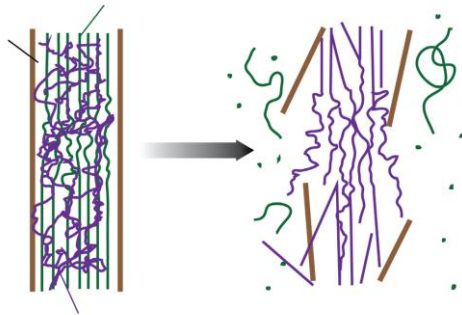
Xu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, biyoyakıt yığınlarını, biyokütle peletlerini ve peletlenmiş biyokütle-kömür karışımlarını, geleneksel tipik bir ev sobasında ve yüksek verimli bir sobada yakmışlardır. Çin'deki yerel sobalardaki biyoyakıt emisyon faktörlerini geliştirmeyi amaçladıkları çalışmada, beraber yakılan biyokütle-kömür karışımı peletlerin azalan etkilerini değerlendirip ve emisyon

faktörlerini karşılaştırıp emisyonları azaltmak için nispeten etkili biyoyakıt-soba kombinasyonunun uygunluğunu kontrol etmişlerdir. Çalışma; biyokütle peletlerinden ortaya çıkan emisyon değerlerinin yığın olandan daha düşük olduğunu, peletlenmiş biyoyakıt emisyonlarının yüksek termal verimli sobalarda daha az olduğunu ve peletlenmiş biyokütle ve kömür karışımlarının emisyon değerlerini önemli ölçüde azaltabileceğini göstermiştir (Xu vd., 2016).

Yoğunlaştırma çalışmalarında bağlayıcılar da büyük bir öneme sahiptir. Elde edilen briket veya peletlerin mekanik özelliklerinin korunması veya iyileştirilmesi farklı bağlayıcı türleri ve oranları ile mümkün olabilmektedir. Biyokütlenin yakıt ve aynı zamanda bağlayıcı olarak kullanılmasını sağlayan işleme yöntemine torifikasyon denir (Adeleke vd., 2019).

Biyokütle torifikasyonu, oksijen olmadan 200-300 ° C'de gerçekleştirilen bir ön işlemdir. Bu sıcaklık seviyesinde meydana gelen bozunma reaksiyonları, biyokütlenin tamamen kurumasına ve lifli yapısını kaybetmesine neden olur (Şekil 1.4.). Bu sayede biyokütlenin higroskopik yapısı, hidrofobik bir malzeme elde etmek için yok edilebilir. Torifikasyon, düşük kaliteli biyokütlenin tutarlı ve tekdüze fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip yüksek enerji yoğunluklu hammaddeye dönüştürülmesi için umut verici bir yöntemdir. Biyokütlenin torifikasyonu sırasında, yüksek derecede reaktif uçucu bileşiklerin bazıları biyokütleden buhar olarak çıkarılır ve daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip temiz, koyu kahverengi renkli katı biyokütle elde edilir (Bergman ve Kiel, 2005; Phanphanich ve Mani, 2011; Tumuluru vd., 2011; Van Der Stelt vd., 2011).

Şekil 1.4. Linyoselülozik Biyokütle İç Yapısı Üzerinde Torifikasyon Etkisi.

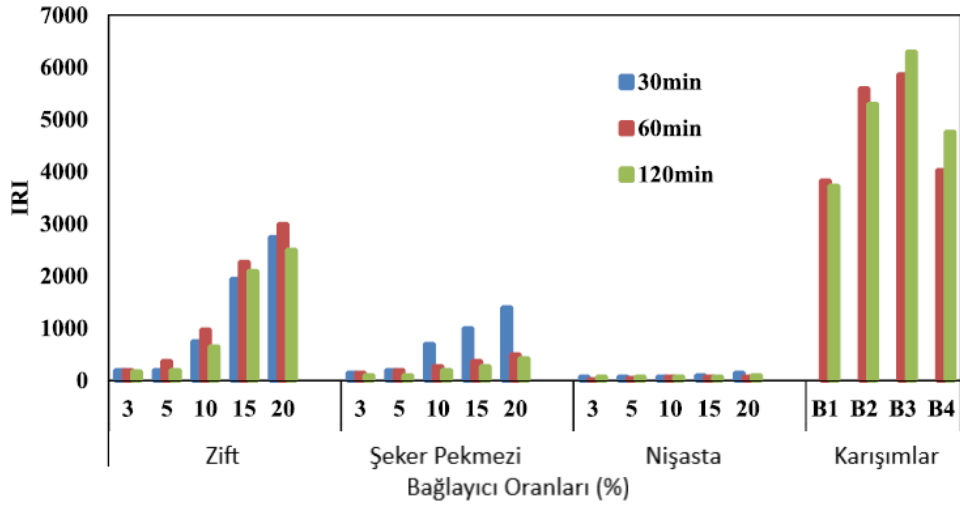


Kaynak: Sierra vd., 2008

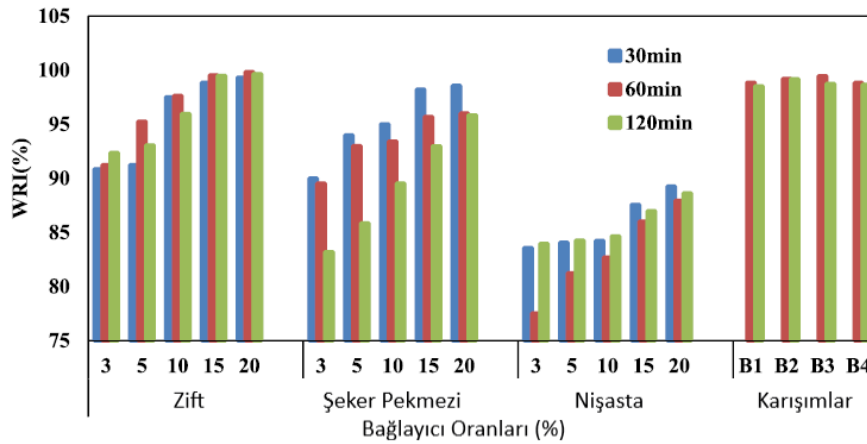
Adeleke ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, yaygın olarak bulunan organik bağlayıcılar kullanarak kömür tozu (<3 mm) ve işlem görmüş biyokütleden iyi mekanik

bütünlüğe sahip briketlerin üretimini amaçlamışlardır. Çalışmalarında Jhama kömür tozları, biyokütle (melina odunu) bağlayıcı olarak ise zift, nişasta ve şeker pekmezi kullanmışlardır. Melina odunu torifikasyon ön işleminden geçirilerek bir biyokömür elde edilmiştir. Biyokömür, torifikasyon işleminden elde edilen ürüne verilen isimdir ve ham biyokütleden daha yüksek sabit karbon, karbon ve brüt ısı değerlerine sahiptir. Bunların yanı sıra torifikasyon işlemi nem oranını da düşürmektedir. Çalışma sonucu Şekil 1.5.'te de görüldüğü üzere, %15-20 oranında tek bağlayıcıdan üretilen briketler basınç dayanımında tatmin edici sonuçlar verirken; kırılma, darbe ve suya dayanımları artmıştır. Ayrıca kömür tozları, biyokömür ve zift-şeker pekmezi karışımından (B3) (% 15) üretilen briketler ise incelenen mekanik özellikler açısından en iyi sonucu veren briketler olmuştur (Adeleke vd., 2019).

Şekil 1.5. Farklı Bağlayıcılar İle Farklı Oranlarda Yapılan Karışımların Çalışma Sonuçları.



Farklı bağlayıcılardan üretilen ve 300 C'de kürlenmiş briketlerin darbe direnci indeksi (IRI)



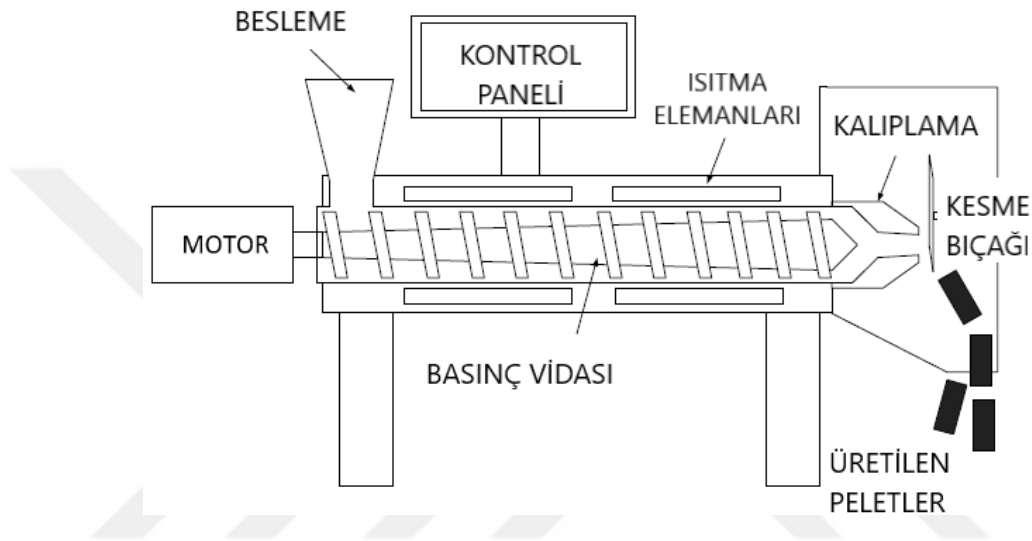
Farklı bağlayıcılardan üretilen ve 300 C'de kürlenmiş briketlerin suya dayanıklılık indeksi (WRI)

Kaynak: Adeleke vd., 2019

Rejdkak ve arkadaşları, ince taneli kömür ve biyokütleyi ekstrüzyon işlemi (Şekil 1.6.) ile sıkıştırarak yakıt üretmek için çalışmışlardır. Bu çalışmada seçilen bağlayıcının ve ekstrüzyon işlemindeki belirli parametrelerin peletler üzerindeki mekanik dayanıklılığı ve yoğunluğu üzerindeki etkisini belirlemeyi amaçlamışlardır. Araştırmada kullanılan kömür hammaddesi, yerel taş kömürü madenlerinden birisinde elde edilmiş bir yüzdürme konsantresidir. Biyokütle materyali olarak ise hidrolitik lignoselüloz (suda çözünebilen odun, tarımsal ve orman atıkları gibi) kullanılmıştır. Bazı organik ve mineral katkı maddeleri ve bunların bileşimleri de bağlayıcılar olarak kullanılmıştır. Şekil 1.7.'de elde edilen peletler verilmiştir. Çalışma sonucu en iyi

mekanik dayanıklılık, bileşimlerinde %90 ince taneli kömür ve %6 biyokütle içeren peletlerde elde edilmiştir. En olumlu fiziksel ve mekanik özelliklere sahip peletler ise buğday ve patates nişastasına dayalı bağlayıcılar ile üretilen peletler olmuştur. Mekanik dayanıklılık, basınç kuvvetinin artması ile artmıştır. Üretilen peletlerin yoğunluğu 875–950 kg/m³ aralığında ve yığın yoğunluğu yaklaşık 431–507 kg/m³ aralığında bulunmuştur (Rejdkak vd., 2020).

Şekil 1.6. Tek Vidalı Ekstrüderin Şeması.



Kaynak: Rejdkak vd., 2020.

Şekil 1.7. Tek Vidalı Ekstrüderden Üretilen Peletler.



Kaynak: Rejdkak vd., 2020.

Selüloz, yarı selüloz ve lignin gibi biyokütlerdeki bazı bileşenler, ısıtıldıklarında veya hidrolize edildiklerinde bağlanma özelliğine sahiptirler ve bu özellik biyokütleyi,

kömür briketleme işleminde doğrudan bağlayıcı olarak kullanılabilir kılmaktadır. İnorganik bağlayıcı ile karşılaştırıldığında bu tür bir bağlayıcı, briketin tutuşma noktasının düşürülmesi ve briketlerin ısınma değerinin artması gibi avantajlara sahiptir. Ek olarak, biyokütle bazlı bağlayıcının maliyeti organik bağlayıcıya göre daha düşüktür (Xianglan Zhang vd., 2001).

Zhang ve arkadaşları bu doğrultuda yaptıkları çalışmada, yerel bir linyit kömürü briketleme işleminde çeşitli kimyasal işlemlere maruz bırakılan pirinç samanının bağlayıcı olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucu, sodyum hidroksit ile işlem gören pirinç samanının, hem katı hem de likör bileşenleri bağlama kabiliyetine sahip olduğundan bir linyit briket bağlayıcı olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Ayrıca sülfürik asit ile muamele edilmiş pirinç samanının bağlayıcı olarak kullanılamaz olduğu ve yalnızca kireçle işlenmiş pirinç samanının da katı bağlama özelliğine sahip olduğu bulunmuştur. Çalışmanın sonucuna göre, farklı kimyasal etmenlerin konsantrasyonu, ısıtma süresi ve ısıtma sıcaklığı da linyit briket bağlayıcıyı etkilemektedir. Bu çalışmada briket mukavemeti, hidrofobik özellik veren pirinç samanı bazlı bağlayıcıya bentonit, kömür katranı ve/veya polipropilen amit ilave edilerek geliştirilmiştir (Xianglan Zhang vd., 2001).

Janewicz ve arkadaşları yerel bir maden ocağından çıkan linyit kömür tozları ile 19:1 oranında karıştırılmış yulaf samanı ve selüloz liflerini farklı yüzdelik oranlarda hem peletleyerek hem de yassı şekillerde yoğunlaştırarak (Şekil 1.8.) ortaya çıkan ürünlerin çeşitli özelliklerini incelemiştir. Yassı şeklindeki yoğunlaştırılmış biyokütleyle briket demeyi tercih etmişlerdir. Bu çalışmada kullanılan lifler kağıt endüstri atıklarından elde edilmiştir. Yapılan çalışma yüksek kırılma indeksine ve yüksek basınç dayanımına sahip briket ve peletler elde edilebileceğini göstermiştir. Peletlerin basınç dayanımı ve kırılma indeksi, azalan nem ve daha yüksek birim basınç ile artmıştır. Briketleme makinesinde merdanelerin dönme hızının, karışımın nem içeriğinin ve bileşiminin briketlerin basınç dayanımını belirlediği bulunmuştur. Elde edilen ürünlerin suya dayanımı düşük olduğu gözlenmiştir. Kullanılan materyallerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin külün özellikleri üzerinde etkisi olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışmada uçucu külün ana bileşeninin kalsiyum oksit olduğu ve büyük oranda alüminosilikatlar içerdiği belirtilmiş ayrıca bu tür küllerin, çimentonun bir bileşeni, beton bileşiminde bir katkı maddesi olabileceği ve zemin stabilizasyon işlemlerinde, temel güçlendirme ve yol yapımı ile bağlantılı diğer işlerde kullanılan

bağlayıcıların temel bileşeni olabileceği ifade edilmiştir. Analiz edilen kül zehirli maddeler içermemektedir ve mineral gübre veya toprak deasidifikasyon maddesi olarak kullanılabilirliğine dikkat çekilmiştir (Janewicz vd., 2019).

Şekil 1.8. Biyokütle-Linyit Karışımından Elde Edilen Peletler (Solda), Yassı Şekildeki Briketler (Sağda).



Kaynak: Janewicz vd., 2019.

Beker yaptığı çalışmada, düşük ısıl değere, yüksek nem içeriğine ve yüksek kül oranına sahip olan Kemerburgaz linyitine odunsu atıklar ekleyerek briketlemeyi böylece daha yoğun ve daha kararlı bir yakıt elde etmeyi amaçlamıştır. Çalışmada talaş, ayçiçeği kabukları, kağıt fabrikası atıkları ve melas linyit tozlarına farklı yüzdelerle eklenmiş ve farklı basınç değerlerinde briketlenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, briket dayanımını etkileyen en önemli etmenlerin odunsu atık yüzdeleri, briketleme basıncı ve linyitin nem içeriği olduğunu göstermiştir. Briketlerdeki sıkıştırma gerilmesi ve kırılma indeksi, odunsu atık yüzdeleri ile artmıştır. Sıkıştırma gerilmesi değerleri, bağlayıcı malzeme olarak melas içeren karışımların, sadece odunsu atık içerenlerden daha güçlü olduğu görülmüştür. Linyitin nem içeriğinde en tatmin edici briketler, nem içeriği % 10 ile % 12 arasında olduğunda üretilmiştir. Sadece linyit tozlarına göre elde edilen kompozit yakıtların ısıl değerlerinin daha yüksek olduğu bulunmuştur. Elde edilen briketler tüm proses boyunca önemli miktarda toz veya kırılma olmayacak dayanıma sahip olmalarının yanında temiz, kolay kullanıma sahip ve saklanabilir olduklarından briketler istenen sonucu vermiştir (Beker, 2000).

Wang ve arkadaşları farklı oranlarda karıştırdıkları pirinç kabuğu, bitümlü kömür ve antrasit yakıt peletleri üzerine yaptıkları çalışmada, peletlerin tutuşma ve yanma özelliklerini etkileyen faktörlerin ortamdaki oksijen konsantrasyonu, gaz sıcaklığı ve pirinç kabuğu karışım oranı olduğunu belirlemişlerdir. Yaptıkları

deneylerde, pirinç kabuğu oranı arttıkça ateşleme sıcaklıklarının düştüğünü ve tutuşma davranışı üzerinde karışım oranının daha fazla öneme sahip olduğunu gözlemlemiştir (Wang vd., 2020).

Atay ve arkadaşları yaptıkları çalışmada şeftali çekirdeği ve linyit kömürü belirli oranlarda karıştırarak yanma özelliklerini incelemiştir. Karışımda şeftali çekirdeği oranının artması, elde edilen peletlerde kül oranını düşürmekle beraber daha az sabit karbon içeriğinden dolayı en yüksek ısıtma değerini de düşürmüştür. Şeftali çekirdeğinin karışıma bu etkenlere dikkat edilerek eklenmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır (Atay, 2018).

Atay ve Ekinci gül yağı işlenmesinden açığa çıkan atıklar ile linyit kömürü ve çam kabuklarını peletleyerek farklı mekanik ve yanma özelliklerini incelemiştir. Hazırlanan bileşimde kömür tozu oranının artması, peletlerin aşınma ve darbe direncini azalttığı belirlenmiştir. Bunun yanı sıra peletlerde dikey ve yatay çekme dayanımlarında düşüş gözlenmiştir. Yanma özellikleri de bu şartlar altında iyileşmiştir. Gül yağı atığı ve çam kabuğu oranının karışımda artması ile nem içeriği artmış bu da gerilme dayanımlarında azalmaya sebep olmuştur (Atay ve Ekinci, 2020b).

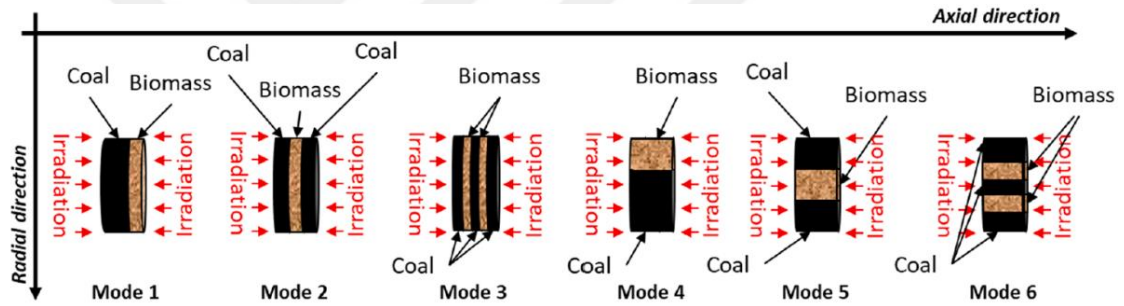
Kömür ile yapılan çalışmalara farklı ve yenilikçi bir yaklaşım geliştirerek şehir lağım çamurlarına ve yetiştirme ortamı uygun olduğu için fazlaca bulunan mikroalglerle çözüm üreten Hossain ve Morni yaptıkları çalışmada bu iki atığı bitümlü kömür ile peletlemiştir. Çalışma sonucunda %50 kömür %25 mikroalg ve %25 kanalizasyon çamuru karışım oranının en iyi yanma özelliklerine ve diğer karışım örneklerine göre daha az kül oranına sahip olmasına rağmen endüstriyel kullanıma uygun olmayacak seviyede atık kül oluşturduğu görülmüştür. Bu nedenle daha sonra yapılacak çalışmalar ile bu problemin de çözülmesini amaçlamışlardır (Hossain ve Morni, 2020).

Balraj ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, içeriği küspe, yarfıstığı kabuğu ve talaş karışımından oluşan biyokütle ve kömür tozunu peletleyerek atık biyokütlenin etkin kullanımını ve atık kömür tozu gibi yenilenemeyen kaynakların kısmen yerini almasını amaçlamışlardır. Yapılan proximate analiz sonucunda örnek boyutları küçüldükçe nem içeriğinin arttığını ve bu özelliğin de bağlayıcı olmadan peletleme yapma imkanını artırdığını gözlemlemiştir. SEM analizleri ise biyokütle oranının fazla olduğu karışımdaki çatlaklar, oyuklar ve gözeneksiz yapının yanmayı kolaylaştırdığını göstermiştir. Bu çalışmanın sonucunda biyokütle ve toz kömür atığının

harmanlanmasının, sürdürülebilir enerji ve yeşil kalkınma için umut verici olduğunu ileri sürmüşlerdir (Balraj vd., 2021).

Yaptıkları çalışmada Li ve arkadaşları kömür tozu ve biyokütleyi önceden karıştırmadan 6 farklı mod (Şekil 1.9.'da gösterilmiştir.) ile peletledikleri örneklerin sıcaklık artışını bir simülasyon yazılımı ile denetlemişlerdir. Bu 6 örnekten optimize yapıdaki örneği (mod 2) seçerek yanma davranışını ve biyokütle oranının etkisini konsantre fototermal reaktör ile analiz etmişlerdir. Yapılan analizler, biyokütle oranının artması ile tutuşma süresinin azaldığını ve SO² emisyonunu düşürdüğünü göstermiştir dolayısıyla yapılan çalışma karıştırılmamış kömür tozu ve biyokütlenin peletlenebilirliğini fakat bu durumda oluşan cürufun da arttığını göstermiştir (Li vd., 2021).

Şekil 1.9. Biyokütle-Kömür Tozu Karışımından Elde Edilen Örnek Peletler.



Kaynak: Li vd., 2021.

Li ve arkadaşları bir önceki çalışmalarının devamında farklı oranlarda önceden karıştırılmış biyokütle ve kömür karışımının peletlemişler ve biyokütle oranının etkisi ile yanma davranışlarını konsantre fototermal reaktör ile analiz etmişlerdir. Bu çalışmada, karışımdaki biyokütle oranının artmasının yanma sıcaklığını artırdığı ve NO emisyonunda -biyokütle içeriği ile bağlantılı olarak- artış gözlenmiştir. Yine bir önceki çalışmayı destekler şekilde, biyokütle oranının artışı ile cüruf oranı da artmıştır (Li vd., 2021).

Literatürde bulunan çalışmalar genel hatları ile farklı kömür çeşitleri ve biyokütle çeşitlerinin bağlayıcı ile veya bağlayıcı olmadan laboratuvar ortamında peletlenebilirliğini göstermiştir. Yapılan çalışmalarda kömür ve biyokütlenin birlikte yoğunlaştırılması sonucunda genel olarak elde edilen yakıtın, kalori değerinin ham biyokütleye oranla daha yüksek olduğu, kömüre oranla daha fazla kül oranı içerdiği ve

daha çevreci bir yakıt olmasının yanında atık durumdaki kömür ve bitkilerin tekrar kullanılabilirliğini göstermiştir. Güneş çalışmasında, sert materyallerin peletlenmesinin makine kalıp diskteki ve sıkıştırma rulolarındaki aşınmaların artmasına sebep olduğunu belirtmiştir. Ayrıca gün geçtikçe bu aşınmaların kalıp disk ve rulolar arası mesafenin azalmasına sebep olduğunu ve iki eleman arasında metal-metal sürtünmesine sebep olduğunu da belirtmiştir (Güneş, 2016).

Literatürde yapılan çalışmaların genelinin laboratuvar ölçekli olmasından dolayı bu çalışmada, gerçek bir pelet pres makinesinde biyokütle peletlenmesi esnasında karşılaşılan problemlere çözüm bulmak amaçlanmıştır. Güneş'in belirttiği, sıkıştırma ruloları ve kalıp disk arası mesafenin ayarlanması ve basınç regülasyonunun sağlanması için esnek cıvatalar kullanılmıştır. Esnek cıvata kullanılarak sağlanan basınç regülasyonunun üretim prosesine etkisi değerlendirilmiştir.

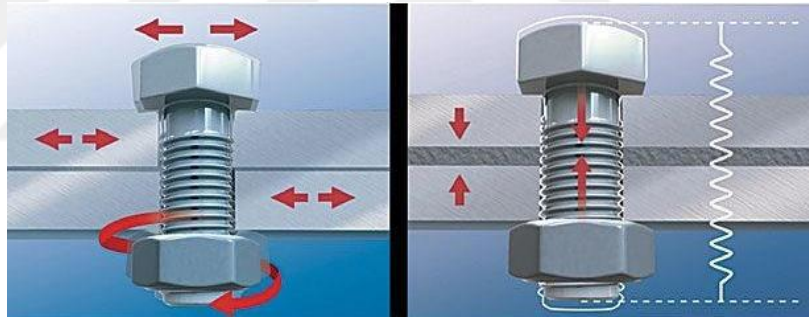


İKİNCİ BÖLÜM
CIVATALAR

Cıvatalar mekanik anlamda yapılmış en önemli buluşlardan birisidir. Birlikte çalışması gereken elemanları bağlamak için kaynak, yapıştırma, perçin, pimler, kamalar gibi farklı yöntemler uygulanmaktadır. İmalatta, mevcut tasarımın temel amaçlarından birisi bağlantı sayısını azaltmaktır. Ancak, aynı zamanda çözme işlemini kolaylaştırmak için her zaman bağlantı elemanlarına ihtiyaç duyulmaktadır (Budynas ve Nisbett, 2015). Çözülebilir bağlantı imkanı sağlamalarından dolayı cıvatalar, birçok tasarım çalışmasında çeşitli kolaylıklar sunmaktadır.

Cıvatalar enine ve boyuna kuvvet taşıyabilme kabiliyetine sahip, bağlantı noktasında uygulanan kuvvet etkisi ile yay gibi davranabilen makine elemanlarıdır (Şekil 2.1). Bunun yanı sıra farklı dayanım sınıflarında ve farklı malzemelerden elde edilebildiklerinden kullanım açısından birçok kombinasyon sağlamaktadırlar (Şekil 2.2.). Bu özellikleri dolayısıyla çözülebilir bağlantı noktalarında sıklıkla kullanılmaktadırlar.

Şekil 2.1. Dış Kuvvetlerin Etkisi Altında Cıvata Davranışı.



Kaynak: Demirsoy, 2018.

Cıvatalar standartlaştırılmış olduklarından kolay temin edilebilmektedir ve birçok alanda yaygın olarak kullanılan bağlantı elemanlarıdır. Bunlardan bazıları şunlardır:

- Makine montajlarında
- Dişli kutularında
- Yatakların ve makinelerin sabitlenmesinde
- Çelik konstrüksiyonlarda
- Aşınma veya boşluk ayarı gerektiren yerlerde

- Dairesel hareketi doğrusal harekete dönüştürmek istenen yerlerde (V. Temiz, 2015)

Şekil 2.2. Cıvataların Kullanıldığı Çeşitli Alanlar.



Kaynak: Esler, 2017; Industrial Pipe Flanges, 2020 ; Rupp, 2020

2.1. ÖZEL CIVATALAR

Verilen cıvata türlerinden farklı olarak özel durumlarda kullanılmak üzere imal edilmiş cıvatalar da bulunmaktadır. Kelebek başlı cıvata, gözlü cıvata, setskur, ayar cıvataları bunlardan yalnızca birkaçıdır. Otomotiv firmaları, elektrik-elektronik alanında faaliyet gösteren kişi veya işletmeler ve ahşap üzerine çalışan işletmeler gibi çok çeşitli alanlarda özel cıvatalar sıklıkla kullanılmaktadır.

2.1.1. Esnek Cıvatalar

Cıvata bağlantıları, havacılık, enerji ve enerji endüstrileri dahil olmak üzere endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir mühendisin bakış açısından, diğer bileşenlerle karşılaştırıldığında cıvatalı bağlantıların karakteristik bir özelliği vardır; bunların özellikleri, işlevsel nedenlerden dolayı montaja bağlıdır ve bu işlem, bağlantı elemanlarını ve birleştirilecek ara yüz parçalarını "bileşenlerden" bir "bağlantıya" dönüştürür (Junker ve Wallace, 1986). Tipik olarak, cıvatalı bağlantılar dinamik olarak yüklenir ve bu da yorulmayı birincil tasarım kriteri haline getirir. Cıvataların yorulma ömründe iyileştirme aşağıdaki üç temel olarak farklı yolla sağlanabilir.

- 1) Cıvata sertliğini en aza indirerek ve/veya birleştirilen malzeme sertliğini en üst düzeye çıkararak bağlantı sertliği faktörünü iyileştirmek.

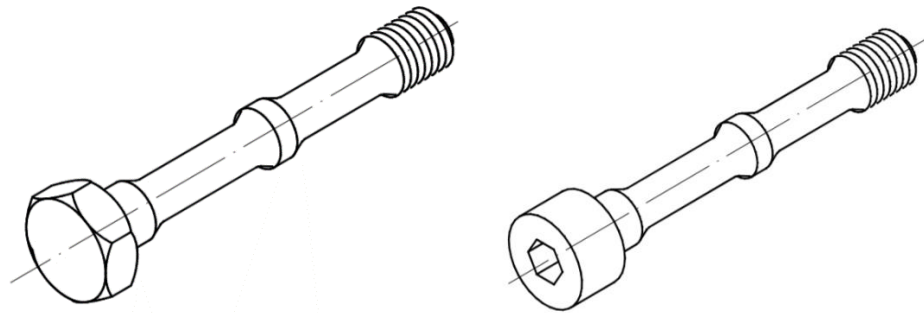
2) Somunda yapılan tasarım değişiklikleri ile diş boyunca yük dağılımının iyileştirilmesi.

3) Cıvata tasarımına şekil optimizasyonu uygulayarak cıvataadaki gerilim konsantrasyon faktörünü en aza indirmek (Pedersen, 2013).

Birinci madde, cıvata veya birleştirilen parçaların tasarım özelliklerinin değiştirilmesi ile sağlanabilmektedir. Çapı incelti miş cıvatalara esnek cıvatalar denmektedir.

Esnek cıvatalar herhangi bir şekilde bağlantıyı aksnel yönde zorlayan kuvvetlerin tesiri ile bağlantıda meydana gelmesi muhtemel fiziki değişikliklerin kalıcı olmasını önlemek için yapılır. Esnek cıvataların gövde çapı diş dibi çapının %10' u kadar incebilir (Love Jr. ve Pringle, 1956) (şekil 2.3.). Bağlantıdaki esneklik nedeniyle büyük yer değiştirmelerin olduğu ve ayrıca telafi edilecek farklı termal genleşmelerin olduğu durumlarda azaltılmış çaplı cıvatalar kullanılmalıdır (Junker ve Wallace, 1986). Gerilimle yüklenmiş geleneksel bir cıvata, şaftın enine kesit alanı dişlerdeki enine kesit alanından daha büyük olduğu için, şafttaki gerilim dişli bölümdeki gerilmeden daha azdır. şaft alanındaki bir azalma, şaft gerilimini, şaft uzamasını ve cıvata tarafından sönmölenen toplam gerinim enerjisini arttıracaktır (Love Jr. ve Pringle, 1956). Cıvataya gelen kuvvetlerin tesiri ile incelti miş olan kısımdan cıvata bir miktar uzar. Kuvvet kalkınca cıvata yine eski halini alır. Bu olay cıvata malzemesinin elastikiyetinden meydana gelir. Esnek cıvataların çözülmemesi için ayrıca bir emniyet sistemine ihtiyaç yoktur. Çok kuvvetli bir şekilde sıkılmış olmaları ve elastik olmaları bu sorunu ortadan kaldırır (Cıvata nedir?, 2020).

şekil 2.3. Farklı Çaplarda Kesitlere Sahip Olan Esnek Cıvata Türleri.



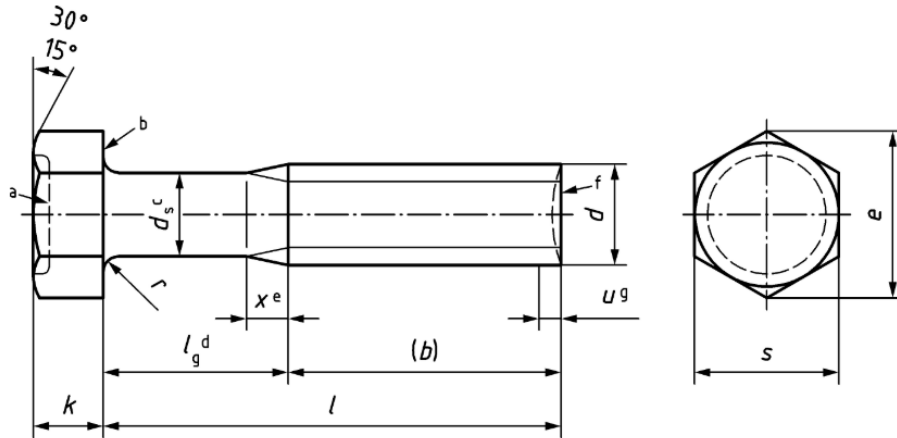
Kaynak: Kutay, 2009.

2.1.2. Esnek Cıvata Uluslararası Standartları

Dünya genelinde standartlar üretim, dağıtım, sağlık, inşaat ve daha birçok alanda tek bir dili konuşmak için oluşturulmuştur denilebilir. Standartlar sayesinde ticaret güvenilir ve kolay bir hal alırken, her tüketiciye aynı ve eşit ürün veya hizmet sunulabilmektedir. Ayrıca standartlar yolu ile dünyanın her yerinde aynı üretimi gerçekleştirmek mümkün olmakta, çevre, kalite, yönetim, verimlilik gibi konularda gelişim sağlanabilmektedir.

Esnek cıvataların, kullanım alanına ve tercihe bağlı olarak birkaç farklı standardı bulunmaktadır. Bunlar EN 24015, GB 5784, DIN EN 24015 ve ISO 4015 olarak sıralanabilir. Türk standartları enstitüsü tarafından yayımlanan standart ise EN 24015 – 1991’i esas alarak oluşturulmuş TS EN 24015 standardıdır (TS EN 24015, 1998). Bu çalışmada ISO 4015 standardı esas alınmıştır (Şekil 2.4. ve Şekil 2.5.).

Şekil 2.4. ISO 4015 Standardında Verilen Esnek Cıvata Teknik Resmi.



Kaynak: ISO, 2020.

Şekil 2.5. ISO 4015 Standardında Verilen M10 Ve M20 Arası İçin Esnek Cıvata Ölçülendirme Bilgileri.

		Dimensions in millimetres					
Thread, d		M10	M12	(M14)	M16	(M18)	M20
p^a		1,5	1,75	2	2	2,5	2,5
b	ref. b	26	30	34	38	42	46
	c	32	36	40	44	48	52
c	max.	0,6	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8
d_a	max.	11,2	13,7	15,7	17,7	20,2	22,4
d_s	\approx	8,9	10,7	12,5	14,5	16,3	18,2
d_w	min.	14,47	16,47	19,15	22,00	24,85	27,70
e	min.	17,59	19,85	22,78	26,17	29,56	32,95
	nom.	6,4	7,5	8,8	10,0	11,5	12,5
	max.	6,69	7,79	9,09	10,29	11,85	12,85
k	min.	6,11	7,21	8,51	9,71	11,15	12,15
	k_w	min.	4,28	5,05	5,96	6,80	7,81
r	min.	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8
s	nom. = max.	16,00	18,00	21,00	24,00	27,00	30,00
	min.	15,57	17,57	20,16	23,16	26,16	29,16
x	max.	3,75	4,38	5,00	5,00	6,25	6,25

Kaynak: ISO, 2020.

2.1.3. Esnek Cıvata Hesapları

Cıvataların montajı kullanıldığı alana göre ön yüklemeli veya ön yüklemesiz olarak yapılabilmektedir. Montaj esnasındaki sıkma veya çözme durumlarında oluşan kuvvetlerden yola çıkılarak, her iki durum için de gerekli olan momentler bulunabilmektedir. Bu momentler cıvatanın dayanım hesapları için son derece önem arz etmektedir. Şekil 2.6.a'da da görüldüğü üzere ön yüklemeli durumda cıvata dişleri üzerine üç kuvvet etki etmektedir.

Cıvatanın sıkılması (+) veya çözülmesi (-) durumunda gerekli olacak toplam moment hesabı verilen eşitliklerle yapılır:

$F_{\text{ön}}$ = Aksenal ön yükleme kuvveti

F_t = Teğetsel kuvvet

F_N = Normal kuvvet

F_R = Bileşke kuvvet

α = Helis açısı

μ = Sürtünme katsayısı

ρ = Sürtünme açısı

d_2 = Cıvata bölüm çapı

μ_s = Cıvata başı altı sürtünme katsayısı

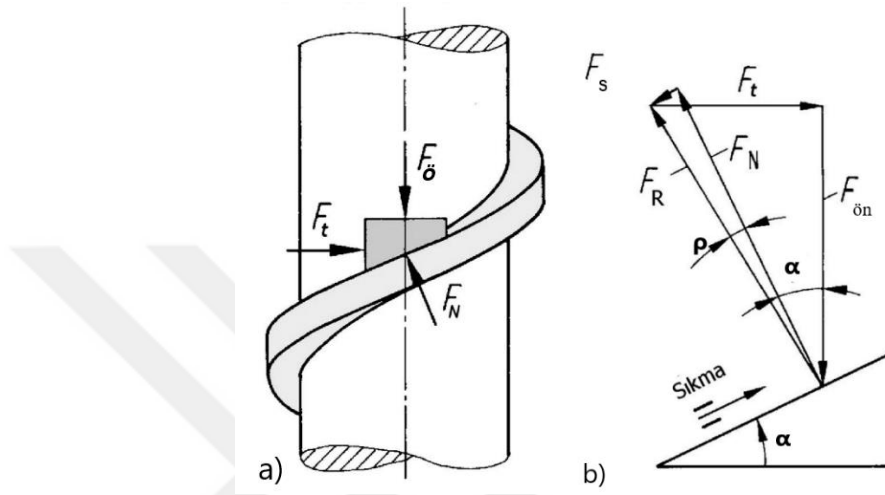
d_d = Cıvatanın geçeceği delik çapı

s = Anahtar ağız ölçüsü
sürtünme katsayısı

μ' = Diş profiline göre belirlenen

$$\rho' = \arctan \mu'$$

Şekil 2.6. a) Cıvata Dişlerine Gelen Kuvvetler b) Sürtülmeli Sıkma Durumunda Kuvvetlerin Ve Eğimin Diş Üzerinde Oluşturduğu Etki.



Kaynak: V. Temiz, 2015 'den uyarlanmıştır.

Cıvata dişleri ile somun dişleri arasındaki sürtünme momenti;

$$M_s = F_{ön} \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \tan(\alpha + \rho) \quad (2.1)$$

Cıvata başı alt yüzeyi ile sıkılan parça arasındaki sürtünme momenti;

$$M_s = F_{ön} \cdot \mu_s \cdot \left(\frac{d_d + s}{4}\right) \quad (2.2)$$

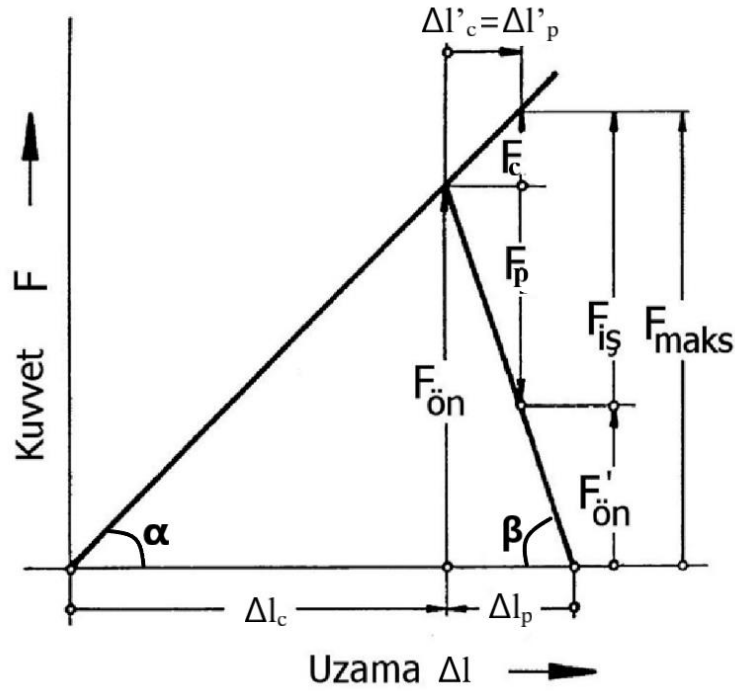
Her iki momentin toplamı sonucu nihai sıkma momenti;

$$M_{stop} = F_{ön} \cdot \left[\frac{d_2}{2} \cdot \tan(\alpha + \rho') + \mu_s \cdot \frac{d_d + s}{4}\right] \quad (2.3)$$

eşitlikleri ile hesaplanır (Şekercioğlu, 2017).

Cıvataların ve bağlı oldukları parçaların maruz kaldığı kuvvetler sonucunda oluşan uzamalarını ifade etmek için Rötcher Diyagramı (ön gerilme üçgeni) kullanılmaktadır (Şekil 2.7.).

Şekil 2.7. Kuvvet-Deformasyon Grafiği.



Kaynak: V. Temiz, 2015 'den uyarlanmıştır.

Bu diyagramdan yola çıkılarak:

α = Cıvata uzama açısı

β = Parça uzama açısı

c_c = Cıvata rijitliği

c_p = Parça rijitliği

Δl_c = Cıvata uzama miktarı

Δl_p = Parça uzama miktarı

E_c = Cıvata elastisite modülü

E_p = Parça elastisite modülü

A_c = Cıvata etkin alanı

A_p = Parça etkin alanı

l_c = Cıvata boyu

l_p = Parça boyu

d_d = Cıvata delik çapı

k = Alan hesabı düzeltme faktörü (Çelik için 0,2)

$\Delta l'_c = \Delta l'_p$ = İşletme yükü altında cıvata ve parçada gerçekleşen boy değişimi

Sıkılan parçaların geniş alana sahip olması, somun altında bir boru şeklinde olmaması durumunda geliştirilen Weiß ve Walner eşitliği;

$$A_p = \frac{\pi}{4} \left[\left(1,5 \cdot d + k \cdot \frac{l_p}{2} \right)^2 - d_d^2 \right] \quad (2.4)$$

Cıvata rijitliği;

$$\tan\alpha = c_c = \frac{F_{\text{ön}}}{\Delta l_c} = \frac{E_c \cdot A_c}{l_c} \quad (2.5)$$

Parça rijitliği;

$$\tan\beta = c_p = \frac{F_{\text{ön}}}{\Delta l_p} = \frac{E_p \cdot A_p}{l_p} \quad (2.6)$$

Rijitlik katsayısı;

$$k = \frac{c_c}{c_c + c_p} \quad (2.7)$$

Cıvataya gelen işletme kuvveti;

$$F_c = \Delta l'_c \cdot c_c = F_{i\text{ş}} \cdot k \quad (2.8)$$

Parçaya gelen işletme kuvveti;

$$F_p = \Delta l'_p \cdot c_p = F_{i\text{ş}} \cdot (1 - k) \quad (2.9)$$

Toplam işletme kuvveti;

$$F_{i\text{ş}} = F_c + F_p \quad (2.10)$$

İşletme kuvvetinin etkimesinin ardından kalan ön gerilme kuvveti;

$$F_{\text{ön}}' = F_{\text{ön}} - F_p \quad (2.11)$$

Toplam gelen kuvvet;

$$F_{\text{max}} = F_{\text{ön}} + F_c \quad (2.12)$$

İşletme etkisinde gerçekleşen uzama miktarı;

$$\Delta l' = \frac{F_{i\text{ş}}}{c_c + c_p} \quad (2.13)$$

Birlikte sıkılan parça ve manşonun toplam yaylanma rijitliği;

$$\frac{1}{c_{\text{top}}} = \frac{1}{c_p} + \frac{1}{c_m} \quad (2.14)$$

Cıvata başı ve somunun da uzadığı durum için cıvata rijitliği;

$$\frac{1}{c_c} = \frac{1}{E} \left(\frac{0,4 \cdot d}{A_1} + \frac{l_2}{A_2} + \frac{0,4 \cdot d_1}{A_2} \right) \quad (2.15)$$

eşitlikleri ile hesaplanmaktadır (Şekercioğlu, 2017).

Gelen kuvvetler zamanla değişmiyor ise (statik) sadece maksimum gerilme kontrolü, zamanla değişiyor ise (dinamik) hem maksimum gerilme hem de genlik gerilmesi kontrolü yapılmalıdır.

σ_{max} : Maksimum gerilme

A_1 : Cıvata dış dibi alanı

d_1 : Cıvata dış dibi çapı

R_e : Malzeme akma sınırı

F_G : Genlik kuvveti

σ_g : Genlik gerilmesi

σ_G : Cıvata kalitesine göre değişen sürekli mukavemet genlik değerleri

İşletme kuvveti altındaki bir cıvata için dayanım hesapları:

Maksimum gerilme kontrolü;

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A_1} = \frac{4 \cdot F_{max}}{\pi \cdot d_1^2} \leq (0,6 - 0,8) \cdot R_e \quad (2.16)$$

Genlik kuvveti;

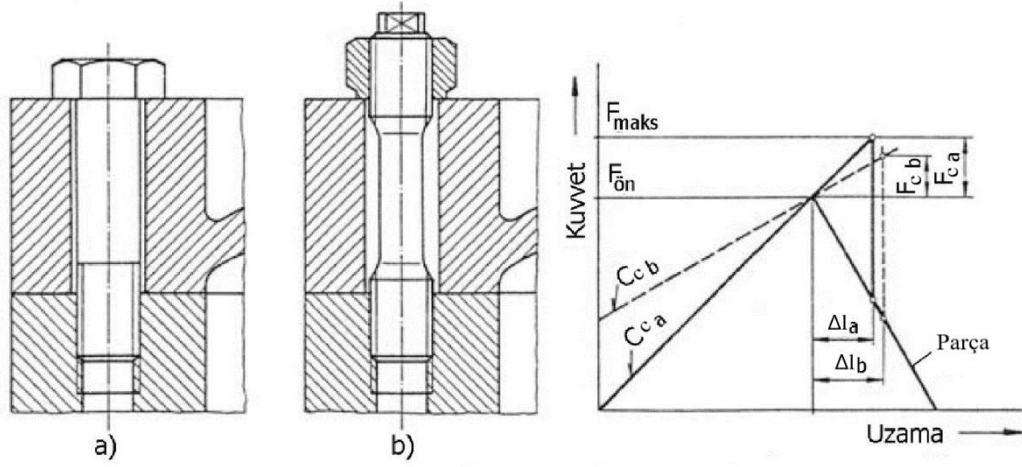
$$F_G = \frac{F_c}{2} \quad (2.17)$$

Genlik gerilmesi kontrolü;

$$\sigma_g = \frac{F_G}{A_1} = \frac{F_c}{2 \cdot A_1} = \frac{2 \cdot F_c}{\pi \cdot d_1^2} \leq \frac{\sigma_G}{S} \approx (0,6 - 0,8) \cdot \sigma_G \quad (2.18)$$

Ön gerilme üçgeninde de görüldüğü üzere cıvata ve somunlara işletme ortamında gelen kuvvet F_c 'ye parça ve cıvatanın yayılanma rijitlikleri etki etmektedir. Şekil 2.8.'de görüldüğü üzere c_p/c_c oranı yani parça rijitliğinin cıvata rijitliğine oranı büyüdükçe işletme kuvveti F_c ($F_{c_a} > F_{c_b}$) azalmaktadır. Bu durum seçilen montaj parçalarının rijit, cıvatanın ise esnek olmasının gelen işletme kuvvetlerine karşı alınabilecek bir önlem olduğunu göstermektedir.

Şekil 2.8. Normal Cıvata (a) Ve Esnek Cıvata (b) Ön Gerilme Üçgenlerinin Karşılaştırılması.



Kaynak: V. Temiz, 2015 'den uyarlanmıştır.

2.1.4. Esnek Cıvata Üzerine Yapılan Çalışmalar

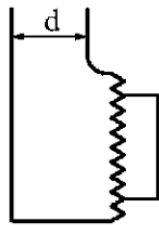
Peletleme prosesi esnasında karşılaşılan en önemli problemler, kalıp diskte bulunan deliklerinin tıkanması ve çalışma sıcaklığının yükselmesi olarak belirlenmiştir. Güneş yaptığı çalışmada, pelet makinesinde bulunan kalıp disk ve sıkıştırma rulolarının uzun süreli kullanıma bağlı olarak aşınması ile aralarında bırakılmış mesafenin değiştiğini belirtmiştir. Bunun sonucunda üretilen peletlerin kalitesinde farklılıklar oluştuğunu, bu mesafenin zaman içerisinde azalması ile kalıp disk ve sıkıştırma ruloları arası metal-metal sürtünmesine sebep olduğunu böylece aşınmayı artırdığını hatta bazı durumlarda makinenin tıkanmasına neden olduğunu saptamıştır. Ayrıca biyokütle türü, boyutu ve nem durumlarının kalıp disk ve sıkıştırma rulosu arasındaki basıncı çok etkilediğini ve bu basıncın regüle edilmesi gerektiğini belirtmiştir (Güneş, 2016). Belirlenen problemlerin değişken işletme yükü sebebi ile oluştuğu düşünülmektedir. Pelet makinesinde hali hazırda bulunan montaj cıvatalarına eklenmiş yaylar ile basınç regülasyonu sağlanmaya çalışılsa da yeterince başarı elde edilememektedir. Bu çalışmada pelet makinesi tasarımında, gövde bağlantısı için özel bir cıvata çeşidi olan esnek cıvataların kullanılması ile söz konusu problemlerin aşılması amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda esnek cıvata üzerine yapılmış önceki çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Junker ve Wallace, cıvata gövde çapının azaltılması ile cıvatanın esnekliğini değiştirerek bağlantının yorulma mukavemetinde belirli bir oranda iyileşme elde edilebildiğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, bağlantıda esneklik nedeniyle büyük şekil değiştirmelerin olduğu ve ayrıca telafi edilmesi gereken farklı termal genleşmelerin olduğu durumlarda gövde çapı düşürülmüş cıvataların kullanılması gerektiğine dikkat çekmişlerdir (Junker ve Wallace, 1986).

Eccles yaptığı çalışmada, cıvatalı bağlantılarda doğru montaj için gerekli şartlar ve bunlar üzerinde etkisi olan faktörleri açıklamıştır. Çalışmasında çapı azaltılmış cıvataların uygulanması gereken tork ve ön yükleme kuvvetine etkisinden bahsetmiş, esnek cıvataların genellikle yüksek performanslı uygulamalarda kullanıldığını belirtmiş bu sebeple genelde daha yüksek mukavemetli bir sonuç elde etmek için bir üst kalite cıvata kullanımına dikkat çekmiştir. Bu tür cıvatalarda gerilmenin dış dibinde yoğunlaşmaması için, gövde çapının dış dibi çapının %10 azaltılmış ölçüde olması gerektiğini belirtmiştir. Fakat dışlardaki çentik etkisinin yine de daha etkin olacağını dolayısıyla çentik etkisinin gövdeye çekilmemesi için daha az bir pürüzlülük değerine sahip son yüzey sağlanması gerektiğini de belirtmiştir (Eccles, 1993).

Venkatesan ve Kinzel esnek cıvatalar ile ilgili yaptıkları çalışmada cıvata çapındaki azalmanın gerilme konsantrasyonu üzerine etkisini göstermişlerdir. Şekil 2.9.'da bu çalışmada elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. İnceltilmiş çap değerleri λ olarak verilmiştir ayrıca K, gerilme konsantrasyonunu ifade etmektedir. Her model için, gerilme konsantrasyon faktörü (K); somun-cıvata sistemindeki maksimum asal gerilmenin, cıvatanın gövdesindeki nominal gerilmeye oranı olarak hesaplanmıştır (Venkatesan ve Kinzel, 2006).

Şekil 2.9. İnceltilmiş Çapın Gerilme Üzerine Etkisi.

Gövde çapı (d) (inç)	K	Çizim
D (– 0.8797)	7.63	
0.9D (– 0.7917)	5.92	
0.8D (= 0.7037)	4.38	
0.7D (– 0.6158)	3.17	
0.6D (= 0.5278)	2.20	
0.5D (– 0.4398)	1.51	
0.25D (– 0.2199)	1.10	

Kaynak: Venkatesan ve Kinzel, 2006.

Benzer şekilde Suzuki ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, 7 farklı cıvatalı bağlantı durumunu karşılaştırmışlardır. Çalışma, inceltmiş gövdeli cıvataların daha çok şekil değiştirme yapabildiğini ve daha sünek davranış gösterdiklerini ortaya koymuştur (Suzuki vd., 2001).

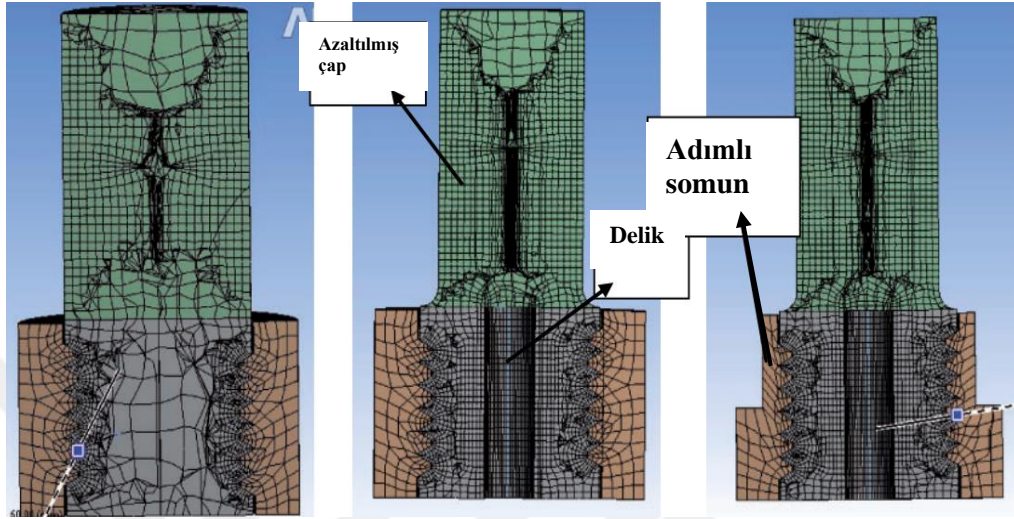
Pedersen yaptığı çalışmada, bağlantı rijitlik faktörünün, cıvata rijitliğini azaltan düşürülmüş gövde çapı ile iyileştirildiğini belirtmiştir. Bu nedenle optimize edilmiş tasarımın, yalnızca gerilme seviyesini değil, aynı zamanda bağlantı rijitlik faktörünü de iyileştirdiğini ve bunun da yorulma ömründe genel olarak daha büyük bir iyileşme sağladığını belirtmiştir (Pedersen, 2013).

İsviçre federal demiryolları mühendisleri, yüksek bakım ve arıza süresi maliyetlerine neden olan cıvata sisteminin yerine dengeli ve verimli bir çözüm bulmak için esnek cıvataların kullanıldığı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Esnek cıvata kullanımı ile sıkma kuvvetindeki kayıplar azaldığı için, kendiliğinden çözülme problemi büyük oranda ortadan kaldırılmıştır. Eğilmeye karşı olan dayanımı sebebi ile termal gerilmeler esnasından ortaya çıkan ek kuvvetleri düşürmüşlerdir. Esnek cıvata kullanımı ile titreşimli yük altında bile normal cıvatalara oranla daha yüksek dayanım sağlanmıştır (Boughton, 2013).

Majzoobi ve arkadaşları cıvatalar üzerinde yaptıkları üç farklı değişikliğin (Şekil 2.10.) cıvatalar üzerindeki yorulma, kırılma, gerilme gibi etkileri incelemişlerdir. Çalışma sonuçları, aksenal delik açılan veya çapı azaltılmış cıvataların yorulma ömrünü geliştirdiğini göstermiştir fakat buna ilave olarak her cıvata için optimum delik çapı ve gövde çapı belirlenmesi gerektiğine dikkat çekmişlerdir. Bunun yanı sıra, somuna adım

ilave edilmesi de yorulma dayanımına katkı sağlamaktadır. Sonuç olarak bu üç modifikasyonun birlikte uygulanması sonucunda cıvata-somun bağlantısı için en yüksek yorulma değerleri elde edilmiştir (Majzoobi vd., 2014).

Şekil 2.10. Çalışmada Yapılan Değişikliklerin Ağ Yapısı Ve Kırılma Şekilleri.



Değişiklik yapılmayan



Gövde çapı azaltılmış cıvata



Eksenel delik açılan



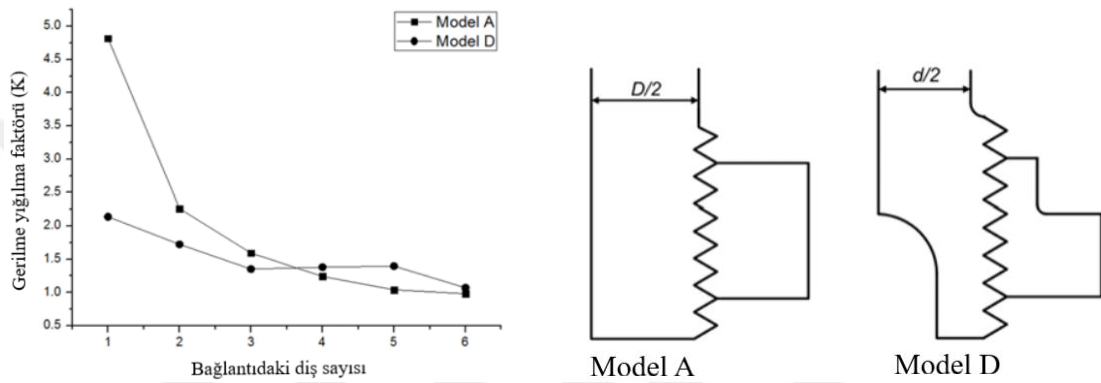
Eksenel delik+Düşük çap+Adımlı somun

Kaynak: Majzoobi vd., 2014.

Lee ve arkadaşları, cıvata somun bağlantılarında meydana gelen gerilmeler için optimum tasarımı belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada tasarımında değişiklik yapılmış üç cıvata modeli üzerinde çalışmışlardır. İşletme ortamında cıvatalarda gerilme ilk dişte yoğunlaştığından, kırılma ilk diş üzerinden gerçekleşmektedir. Çalışma

sonucunda üçüncü model (Model D) üzerinde yapılan analizler, standart cıvataya (Model A) oranla cıvata gövdesinin %20 azaltılması ile ilk dişe gelen gerilmelerin %55 oranında düşürülebileceğini göstermiştir (Şekil 2.11.). Bu çalışma, tasarım üzerinde yapılan değişikliklerin dişlere gelen gerilmeler üzerinde rol oynayabileceğini göstermiştir (Lee vd., 2014).

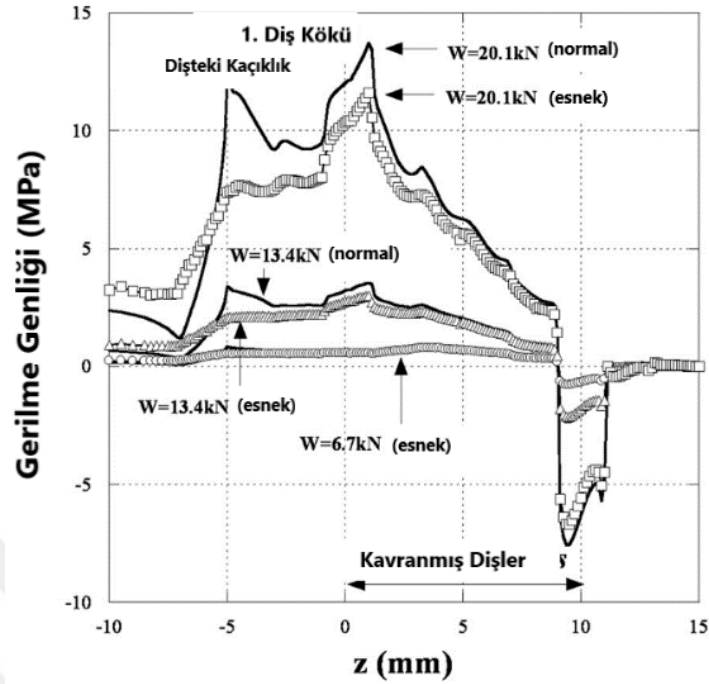
Şekil 2.11. Standart Cıvata Ve Çapı Azaltılmış Cıvata Üzerindeki Dişlerde Oluşan Gerilme Konsantrasyonları.



Kaynak: Lee vd., 2014.

Fukuoka ve arkadaşları bağlantı elemanları üzerinde yaptıkları çalışmada, çeşitli şartlar altında bulunan bağlantı elemanlarının gerilme genliklerini sonlu elemanlar analizi yöntemi ile incelemiştir. Çapı azaltılmış cıvataların yorulma mukavemetinin daha fazla olduğunu, aynı zamanda bu tür cıvataların büyük eğilme momentlerine maruz kalan cıvatalı bağlantılarda da kullanıma uygun olduklarını belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada cıvatalı bağlantılarda en yüksek gerilmelerin oluştuğu ilk dişte, normal cıvataya oranla esnek cıvatanın gerilme genliklerini düşürdüğü bulunmuştur. Bunun yanı sıra grafiklerde (Şekil 2.12.) görülen esnek olmayan cıvata dişlerinde meydana gelen kaçıklık tepelerinin de ortadan kalktığı görülmüştür (Fukuoka vd., 2011). Kaçıklık (run – out), cıvata dişlerinde meydana gelen ve somun cıvata dişli kısmının sonuna kadar sıkılsa dahi cıvatanın bağlantıya dahil olmayan diş miktarı olarak tanımlanmaktadır (Thread Runout, 2021).

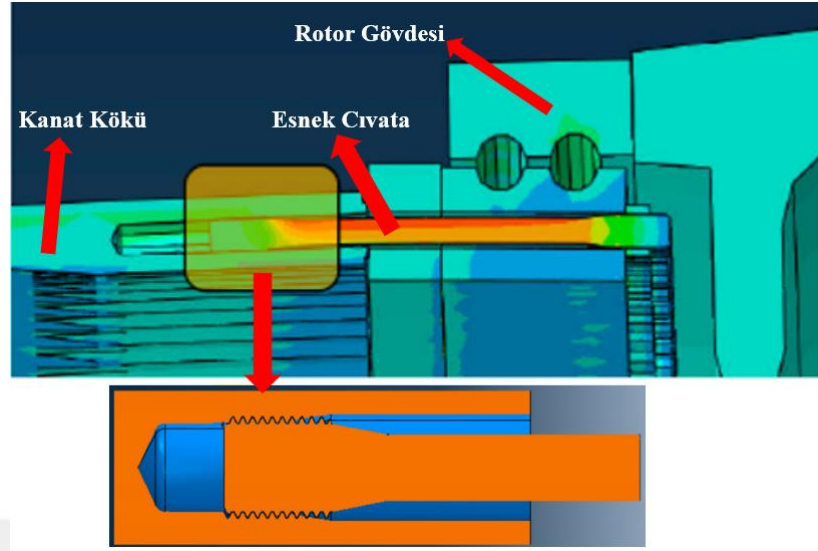
Şekil 2.12. Gerilme Genliğinin Diş Sayısına Ve Cıvata Türüne Göre Değişimi.



Kaynak: Fukuoka vd., 2011.

Rüzgar türbin kanatlarının ana gövde ile montajının yapıldığı cıvatalı bağlantılarda yorulma kaynaklı meydana gelen gerilmeler üzerine yaptığı çalışmada Ha, çapı azaltılmış M42 cıvatalar üzerinde tasarım değişiklikleri yapmış ve sonlu elemanlar yöntemi ile gerilme sonuçlarını elde ederek karşılaştırmıştır (Şekil 2.13.). Yaptığı çalışmada montajda çapı azaltılmış esnek cıvata kullanımının somun tipinden bağımsız olarak stres konsantrasyon faktörünü %41 azalttığını göstermiştir. Farklı cıvata gövdesi, somun tipi ve cıvata yuva tasarımlarını incelediği çalışmada stres konsantrasyonu üzerindeki en önemli etkenin, çapı azaltılmış esnek cıvata olduğunu belirtmiştir (Ha, 2020).

Şekil 2.13. Rüzgar Türbini Kanat Kökü Ve Rotor Gövdesinin Esnek Cıvata İle Montajı.



Kaynak: Ha, 2020.

Esnek cıvatalar üzerine yapılan çalışmalarda çeşitli çalışma şartlarında esnek cıvataların; daha sünek davranış gösterdiği, montajlanan parçalara gelen yüklerden dolayı oluşan gerilmeleri düşürdüğü, eğilmeye maruz kalan bağlantılarda kullanıma uygun olduğu, yorulma dayanımlarının daha yüksek olduğu, standart cıvataya oranla dişlerde meydana gelen gerilmeleri düşürdüğü belirtilmiştir. Tüm bu avantajlarına rağmen esnek cıvataların kullanımına literatürde oldukça az rastlanmaktadır.

Yapılan literatür değerlendirmeleri esnek cıvatanın peletleme esnasında oluşan ani basınç değişimlerini regüle etmek için kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Yapılan literatür çalışmalarında pelet makineleri üzerindeki çalışmalarda biyokütle hammaddesi türlerinin, nem ve boyut durumlarının, ön işlemlerin peletleme prosesi üzerindeki etkilerine odaklanılmaktadır. Ayrıca peletleme maliyetleri, enerji tüketimi, pelet yakıtlarının yanma emisyonları ve çevre etkileri konusunda da yoğun çalışmalara rastlanılmaktadır. Bu çalışmaların geneli laboratuvar ölçekli tek hazneli peletleme işlemi ile gerçekleştirilmiştir veya bilgisayar destekli analizler sonucunda tasarım çalışmaları yapılmıştır. Gerçek üretim şartlarındaki pelet preslerinde yoğun karşılaşılan tıkanma, basınç artışları ve konstrüktif çözüm önerilerine yönelik çalışmalara yeterince rastlanılmamıştır. Güneş ve Çelik'in çalışmasında basınç değişimlerinin ayarlanması disk yaylar ile sağlanmıştır (Güneş ve Çelik, 2017). Bu çalışmada ise basınç regülasyonu gövde montajında esnek cıvataların kullanılması ile bu sayede literatüre esnek cıvata kullanımı üzerine önemli bir katkı sunulması amaçlanmıştır.



ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
YAPILAN ÇALIŞMA

3.1. ESNEK CIVATA HESAPLAMALARI VE SEÇİMİ

Biyokütlenin peletlenmesi esnasında karşılaşılan en önemli problem, proses şartlarının çok sık değişebilmesi nedeniyle kalıp deliklerinde sürtünmenin artması, deliklerin tıkanması ve dönmekte olan sıkıştırma rulolarının kilitlenmesidir. Bu yüzden pelet üretimi sık sık kesintiye uğrayabilmektedir. Pelet presi ilk çalıştırıldığında, peletlenecek biyokütle türü değiştirildiğinde, biyokütlenin nem oranı ve boyutu değiştiğinde bu problem sık sık yaşanmaktadır. Güneş, yaptığı çalışmasında bu konuyu açıklamış ve sıkıştırma rulosu ile kalıp disk arasındaki basıncın dengelenmesinin önemini vurgulamıştır (Güneş, 2016). Junker ve Wallace, anlık olarak gelen maksimum dinamik yüklemelere karşı gerçekleşecek olan yer değişimlerinde, gövde çapı azaltılmış civataların yeterli uzama miktarını verebileceğini belirttikleri için (Junker ve Wallace, 1986) bu çalışmada montaj civatalarında standart M12 civatalar yerine gövde çapı azaltılmış esnek civata kullanılmıştır.

3.1.1. Maksimum Dinamik Yükün Hesaplanması

Civatalara gelen maksimum dinamik yüklerin elde edilebilmesi için sıkıştırma rulolarının yatakladığı rulmanlara gelen maksimum dinamik yüklerden ve nominal ömür hesabından yola çıkılmıştır. Nominal ömür;

L_h = Nominal ömür

n = Devir sayısı

C = Rulmana gelen maksimum dinamik yük

$F_{eş}$ = Eşdeğer kuvvet

p = Rulman tipine göre değişkenlik gösteren üstel sayı

$$L_h = \frac{10^6}{60.n} \cdot \left(\frac{C}{F_{eş}} \right)^p \quad *p = \text{bilyeli yataklar için 3 alınır.} \quad (3.1)$$

Açısal hız;

$$w = \frac{\pi.n}{60} \quad (3.2)$$

eşitlikleri ile hesaplanmaktadır (Şekercioğlu, 2017). Açısal hızın yarıçap değeri ile çarpılması çizgisel hızı vermektedir. Bilindiği üzere temas noktasında çizgisel hızlar eşittir (Şekil 3.1.). Şekilde görüldüğü üzere;

r_r = Rulonun yarıçapı

v_r = Rulonun doğrusal hızı

w_r = Rulonun açısal hızı

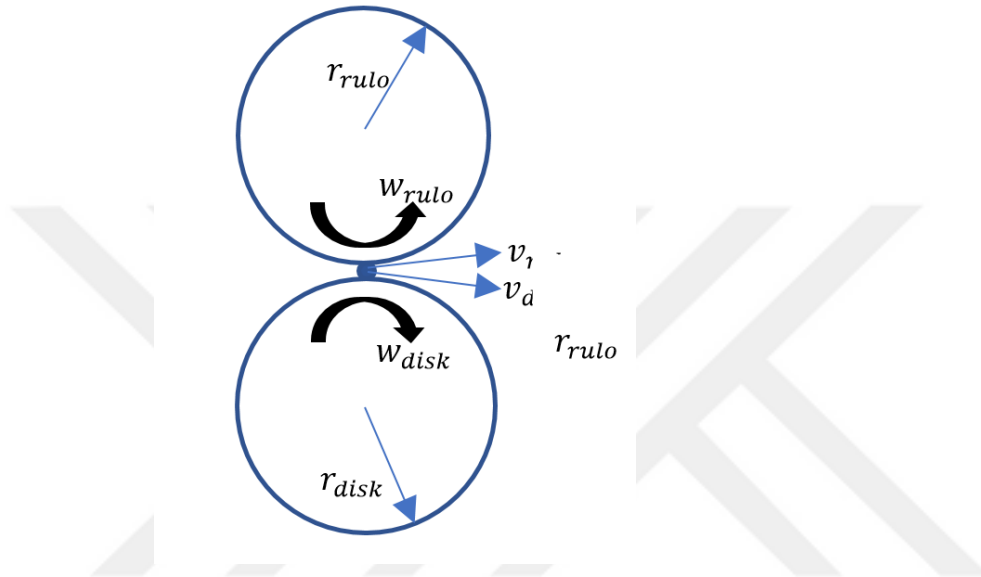
n_r = Rulonun devir sayısı

r_d = Diskin yarıçapı

v_d = Diskin doğrusal hızı

w_d = Diskin açısal hızı

Şekil 3.1. İki Dairesel Cisim Arasındaki Hareket Esnasında Oluşan Hızlar.



$$v_{disk} = v_{rulo} \quad (3.3)$$

$$v_r = w_r \cdot r_r \quad (3.4)$$

$$v_d = w_d \cdot r_d \quad (3.5)$$

eşitlikleri ile hesaplanmaktadır. Ayrıca emniyet katsayısı belirlenen durumlar için;

$$S = \frac{C}{F_{eş}} \quad (3.6)$$

verilmektedir (Şekercioğlu, 2017).

Makinede kullanılan rulmanlar sabit bilyeli 6206 Z2 C3 serisine ait rulmanlardır. Verilen seriye ait rulman özelliklerinin;

- Sabit bilyeli rulman (6)
- Çap dizisi 2 (D=62 mm)
- Mil çapı d=30 mm

- Çift kapaklı
- Artırılmış radyal boşluklu (C3)
- $C=20,3$ kN

olduğu bilinmektedir (Şekercioğlu, 2017). Belirtilen rulman özellikleri için;

$F_{eş} = F_r$ olur. Burada;

F_r = Radyal kuvveti temsil etmektedir.

Disk devir sayısı (n)=60 dev/dk'dır. Diskin açısal hızı (w) eşitlik 3.2'den;

$$w_d = \frac{\pi \cdot n}{60} = 3,14 \text{ rad/sn bulunur.}$$

Verilen eşitliklerden 3.4 ve 3.5 arasında $w_r \cdot r_r = w_d \cdot r_d$ bağıntısı oluşturularak yarıçap değerleri bu bağıntıda yerine konulursa; (Burada r_d değeri iki elamanın temas noktasındaki çizgisel hızı bulmak için temasın merkeze olan uzaklığının tam orta noktası olarak kabul edilmiştir.)

$$w_r \cdot 49 \text{ mm} = 3,14 \frac{\text{rad}}{\text{sn}} \cdot 75 \text{ mm}$$

$$w_r = 4,8 \text{ rad/sn olarak bulunur.}$$

Buradan rulonun devir sayısı;

$$n_r = \frac{4,8 \cdot 60}{\pi} = 91,8 \text{ dev/dk}$$

$$n_r \cong 92 \frac{\text{dev}}{\text{dk}} \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Rulman ömrü 5000 saat olarak alınmıştır.

Nominal ömür eşitliğinde (eşitlik 4.1) değerler yerine konulursa;

$$5000 = \frac{10^6}{60 \cdot 92} \cdot \left(\frac{20,3}{F_{eş}} \right)^3 \text{ buradan } F_{eş} = F_r = 6717 \text{ N olarak bulunur.}$$

Makine gövdesinde 4 adet cıvata ve aks yataklanmasında 4 adet rulman bulunmaktadır. Her bir rulmana gelen kuvvet 6717 N olarak bulunmuştur. Rulman ve cıvataların simetrik yerleşiminden dolayı yük dağılımı da simetrik gerçekleşir ve her bir cıvataya gelen işletme kuvveti de 6717 N olur (Şekil 3.2.).

Şekil 3.2. Rulmanlar Ve Gövde Cıvatalarının Yerleşimi.



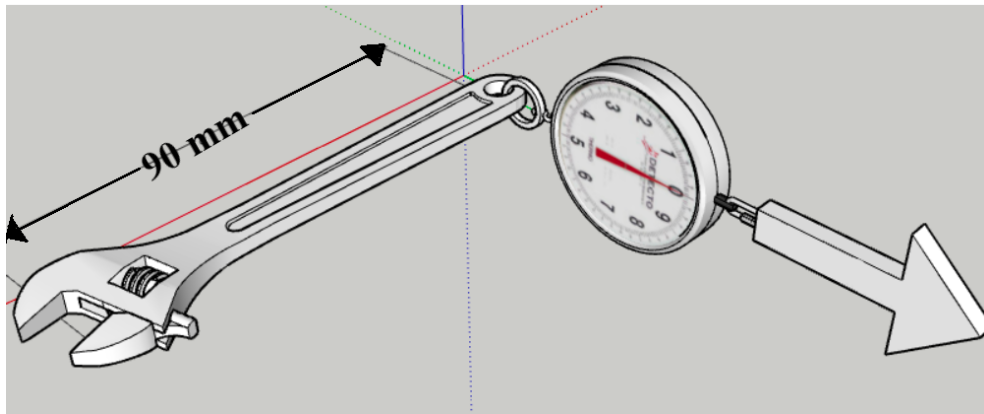
Sarsıntılı yükler veya çok düzenli rulman çalışması için emniyet katsayısı $S = 1,5-2,5$ arasında olmalıdır (Şekercioğlu, 2017). Buradan 3.6. eşitliğinde değerler yerine konulursa;

$$S = \frac{20,3}{6,72} = 3 \text{ olarak bulunur ve emniyet şartlarını sağlamaktadır.}$$

3.1.2. Ön Yükleme Kuvvetinin Hesaplanması

Cıvatalara gelen ön yükleme kuvvetini elde etmek için sıkma momentinden yola çıkılır. Şekil 3.3'te cıvatanın sıkılması ve el kantarıyla uygulanan kuvvetin ölçümü gösterilmektedir. El kantarında değer 10 kg olarak okunmuştur.

Şekil 3.3. Cıvatanın Sıkma Tork Değerinin Hesaplanması İçin Uygulanan Yöntem.



Kaynak: (Sümer, H., 2021)

Hatve açısı;

$$\tan \alpha = \frac{z.h}{\pi.d_2} = \frac{1.1,75}{\pi.10,863} \text{ hesaplaması yapılarak } \alpha = 2,93^\circ \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Sürtünme katsayısı $\mu_s=0,20$ kabul edilmiştir.

Metrik cıvata tepe açısı 60° olduğu için sürtünme katsayısı 1,15 ile çarpılarak işleme devam edilmelidir. Böylece;

$$\mu' = 1,15 \cdot \mu_s = 0,23 \text{ bulunmuştur.}$$

$$\rho = \text{sürtünme açısı } \rho = \arctan(\mu') = 12,95^\circ$$

$$\text{Tork değeri } M_s = 90\text{mm} \cdot 100\text{N} = 9000 \text{ Nmm}$$

Sıkma momenti $M_s = 9000 \text{ Nmm}$ 'dir. Bu durumda değerler gerekli eşitlikte (eşitlik 2.3) yerine konulduğunda;

$$9000\text{Nmm} = F_{\text{ön}} \cdot \left[\frac{10,863}{2} \cdot \tan(2,93 + 12,95) + 0,20 \cdot \frac{14+18}{4} \right]$$

$$F_{\text{ön}} = 2861,5 \text{ N olarak bulunmuştur.}$$

3.1.3. Cıvata ve Sıkılan Parçaların Mekanik Davranışları

Normal cıvata ve parçanın sıkılması durumunda gerçekleşen uzamalar ile esnek cıvata ve manşonun sıkılması durumunda gerçekleşen uzamalar bu bölümde ayrı ayrı hesaplanmıştır.

3.1.3.1. Normal Cıvata ve Parça

Normal parçanın rijitlik hesabı için;

Alan hesabı yapılırken geniş sıkma alanları için geliştirilen yaklaşımlardan Weiß ve Walner eşitliği kullanılmıştır.

$$A_p = \frac{\pi}{4} \left[\left(1,5 \cdot 12 + 0,2 \cdot \frac{18}{2} \right)^2 - 14^2 \right] = 154 \text{ mm}^2$$

$$E_p = 1,7 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2 \text{ (Dökme demir için) (Şekercioğlu, 2017)}$$

$l_p = 18 \text{ mm}$ 'dir. Şekil 3.4'te sıkılmaya maruz kalan parça gösterilmektedir.

Şekil 3.4. Sıkılan Parça.



Bu durumda parça rijitlik eşitliğinde (eşitlik 2.6) bu değerler yerine konulduğunda;

$\tan\beta = c_p = 1454,4 \cdot 10^3 N/mm$ bulunur. Bulunan rijitlik değeri ve ön kuvvet değerleri yine aynı eşitlikte yerine koyulduğunda;

$$c_p = 1454,4 \cdot 10^3 N/mm = \frac{2861,5N}{\Delta l_p} \text{ ve buradan uzama değeri çekilirse;}$$

$$\Delta l_p \cong 0,00196 \text{ mm} \cong 2 \mu\text{m} \text{ bulunur.}$$

Normal gövde çapı azaltılmamış M12 cıvatanın (Şekil 3.5.) rijitlik hesabı için;

Katalog değerlerinde M12 için $A_1 = 76,3 \text{ mm}^2$ olarak verilmiştir.

$$E_c = 2,1 \cdot 10^5 N/mm^2 \text{ 'dir.}$$

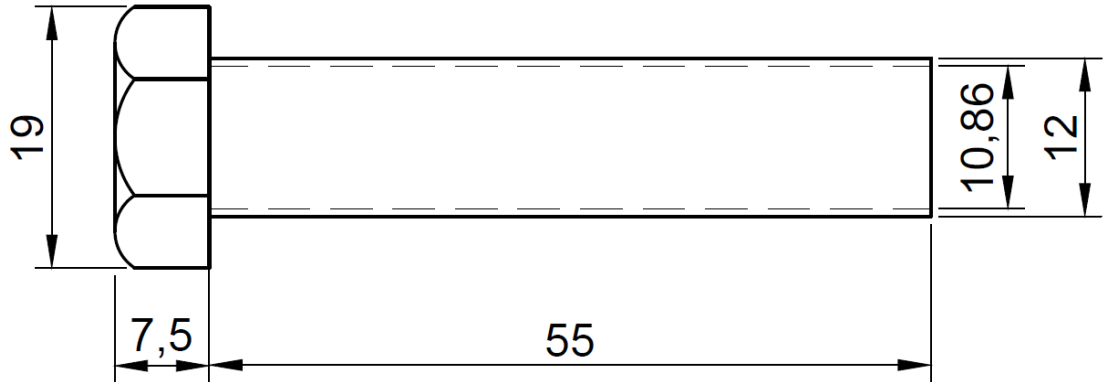
Cıvata boyu 55 mm'dir ancak parça içinde kalan kısım $l_c = 18 \text{ mm}$ 'dir. Eşitlik 2.15'ten cıvata başı ve somunun da uzadığı kabul edilmiştir. Normal cıvatanın tamamı dişli olduğu için diş dibi çapı ve diş dibi alanı esas alınmıştır. Eşitlik 2.15'te değerler yerine konulursa;

$$\frac{1}{c_c} = \frac{1}{2,1 \cdot 10^5 N/mm^2} \left(\frac{0,49,852}{76,3} + \frac{18}{76,3} + \frac{0,49,852}{76,3} \right)$$

Buradan $c_c = 619 \cdot 10^3 N/mm$ olarak bulunur. Bu değer eşitlik 2.5'te yerine konulup $619 \cdot 10^3 N/mm = \frac{2861,5N}{\Delta l_c}$ buradan

$\Delta l_c \cong 0,0046 \text{ mm} \cong 4,6 \text{ } \mu\text{m}$ bulunur.

Şekil 3.5. Normal Cıvata Teknik Resim.



Bu değerler ön gerilme kuvvetinden kaynaklanan uzama ve kısalma değerleridir. İşletme kuvveti etki ettiği andan itibaren cıvata ve parça için bu değer tekrar hesaplanacak olursa 2.13 eşitliğinden;

$$\Delta l' = \frac{6717 \text{ N}}{2073 \cdot 10^3 \text{ N/mm}} \cong 0,00324 \text{ mm} \cong 3,24 \text{ } \mu\text{m} \text{ bulunur. Fakat yukarıdaki}$$

hesaplarda da görüleceği üzere parça 2 μm kısalmaktadır. Yani işletme kuvveti ön gerilme kuvvetinden büyüktür. Gelen işletme kuvveti parçayı ancak bu noktaya kadar etkileyebilir. Daha sonra parça eski haline yani hiç ön gerilme kuvveti uygulanmamış durumuna döner ve bu noktadan sonra gelen kuvvet tamamen cıvataya etki eder. Bu durumda cıvata ve parçaya etki eden işletme kuvveti, bu uzama miktarı ve toplam rijitlik çarpılarak;

$F_{i\dot{s}} = (2 \cdot 10^{-3}) \cdot (2073 \cdot 10^3) \cong 4146 \text{ N}$ bulunur. İşletmeden gelen bu kuvvetin ne kadarının parçaya ne kadarının cıvataya etki ettiğini bulmak için rijitlik katsayısından faydalanılır. Normal cıvata ve parçanın rijitlik katsayıları için bulunan değerler (eşitlik 2.7) rijitlik katsayısı eşitliğinde yerine konulduğunda $k \cong 0,3$ bulunur. Bu değer işletmeden sadece cıvataya ve sadece parçaya gelen yükü belirlemek için gerekli eşitliklerde (eşitlik 2.8 ve 2.9) yerine yazılırsa;

$$F_c = 4146 \cdot 0,3 = 1284,5 \text{ N ve } F_p = 4146 \cdot (1-0,3) \cong 2861,5 \text{ N olarak bulunur.}$$

Tüm işletme kuvvetinin cıvataya etki eden kısmı yani cıvataya gelen ek kuvvet, bu değer toplam işletme kuvvetinden çıkarılması ile;

$F_{c_{ek}} = 6717 - 4146 = 2571 \text{ N}$ olarak bulunur. Bu durumda cıvataya gelen toplam kuvvet;

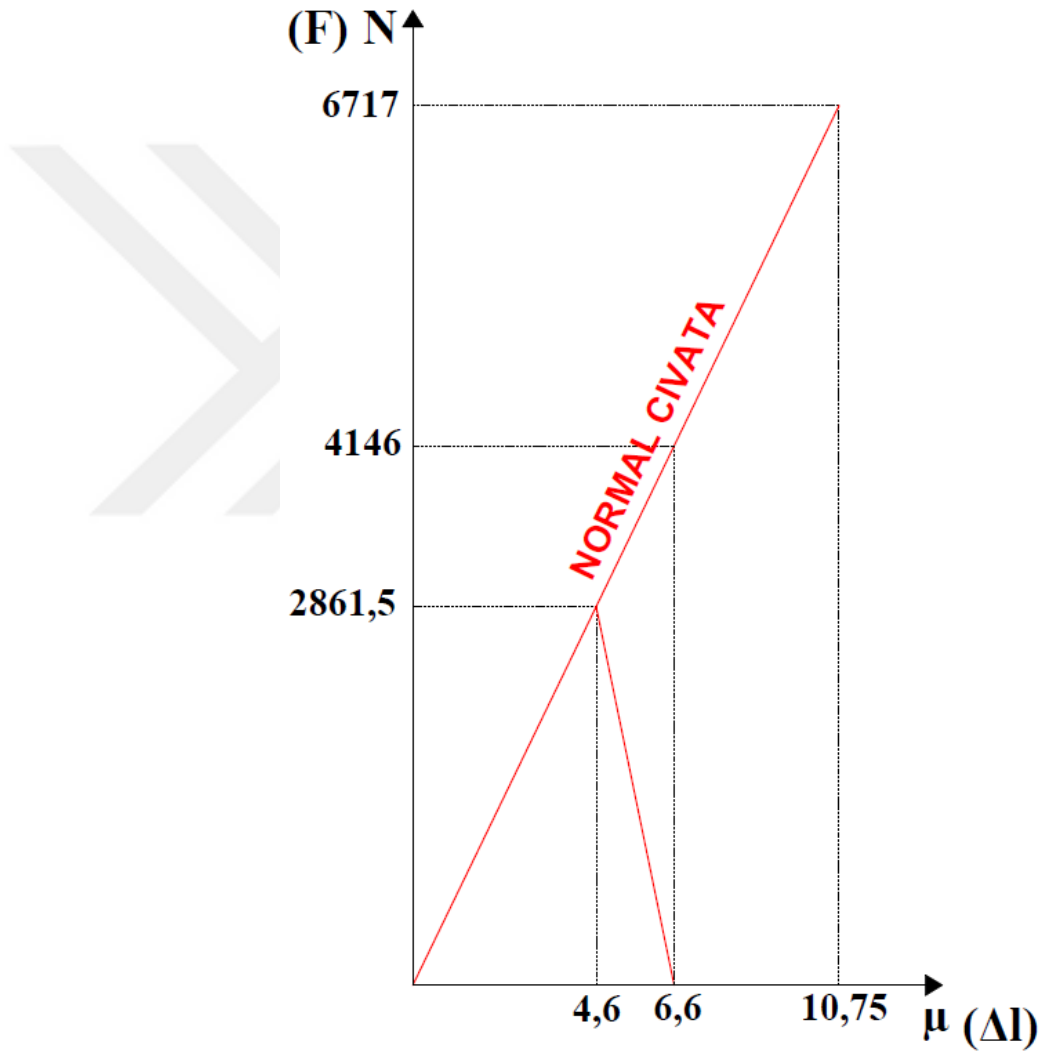
$$F_{c_{top}} = F_{c_{ek}} + F_c = 2571 + 1284,5 = 3855,5 \text{ N' dur.}$$

Cıvataya etkiyen ek işletme kuvvetinin cıvatada meydana getirdiği ek uzama miktarı;

$$\Delta l_{c_{ek}} = \frac{2571 \text{ N}}{619 \cdot 10^3 \text{ N/mm}} \cong 0,00415 \text{ mm} \cong 4,15 \text{ } \mu\text{m} \text{ bulunur. Normal cıvatanın}$$

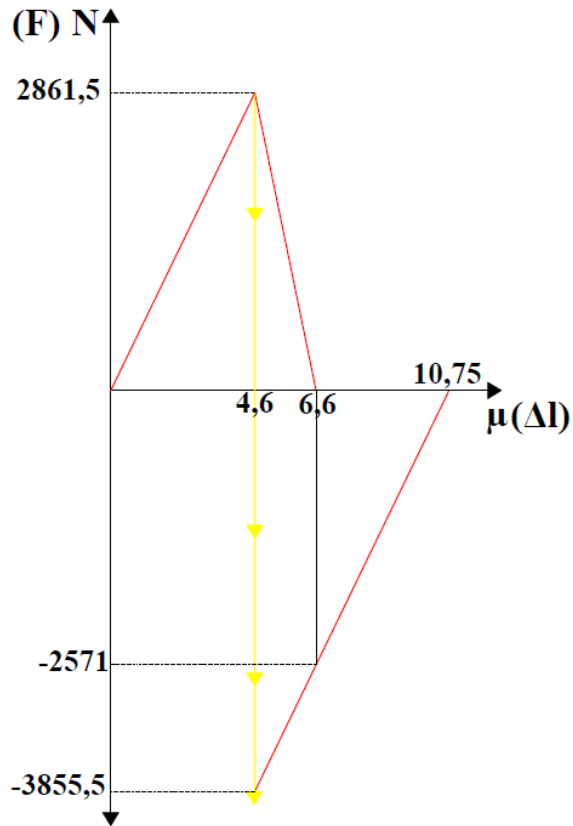
kuvvet-uzama grafiği şekil 3.6'da verilmektedir.

Şekil 3.6. Normal Cıvata Kuvvet-Uzama Grafiği.



Bu grafiğin yanı sıra Şekil 3.7'de, işletmeden gelen kuvvetin sıkılan parça için ön yükleme kuvvetine zıt yöndeki etkisinin daha net görülebilmesi adına farklı bir yaklaşım ile çizilen kuvvet-uzama grafiği verilmiştir (Cürgül, 2015). İşletmeden gelen kuvvet sarı renkte gösterilmiştir. Bu grafikte de aynı uzama değerleri elde edilir.

Şekil 3.7. Normal Cıvata İçin Kuvvet-Uzama Grafiğinin Farklı Bir Yaklaşım İle Çizilmiş Hali.



Ölçekli olarak çizilmiş her iki şekilde de görüldüğü üzere cıvataya gelen kuvvet sonucunda, cıvata maksimum 10,75 μm uzama yapabilmektedir. Bu miktar kalıp disk ve rulolar arası mesafeyi ayarlamakta yetersiz kalmaktadır. Üretim esnasında oluşan basınç artışlarını anlık olarak düzenleyebilmek için uzama miktarının daha fazla olması gerekmektedir.

3.1.3.2. Esnek Cıvata ve Parça

Esnek cıvatanın kullanıldığı durumda parça ve cıvata arasına manşon eklenmiştir (Şekil 3.8). Manşonun uzama hesapları aşağıda verilmiştir. Manşonun rijitlik hesabı için gerekli olan değerler;

$$A_m = \frac{\pi(17^2 - 13^2)}{4} = 94 \text{ mm}^2$$

$$E_m = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$$

$l_m = 96$ mm olarak verilmiştir. Bu durumda parça rijitlik eşitliğinde (eşitlik 2.6) bu değerler yerine konulduğunda;

$$\tan\beta = c_m = 205,6 \cdot 10^3 \text{ N/mm bulunur.}$$

Şekil 3.8. Esnek Cıvata Ve Parça Arasına Eklenen Manşonlar.



Fakat manşon ve parça birlikte sıkıldığı için ikisinin rijitliği birlikte hesaplanmalıdır. Parça rijitliği daha önce belirlenmiştir. Birlikte sıkılan parçaların toplam yaylanma rijitliği eşitlik 2.14'ten;

$$\frac{1}{c_{top}} = \frac{1}{1454,4 \cdot 10^3} + \frac{1}{205,6 \cdot 10^3}$$

$c_{top} = 180 \cdot 10^3$ N/mm olarak bulunur. Buna göre toplam kısalma miktarı;

$$\Delta l_{top} = \frac{2861,5 \text{ N}}{180 \cdot 10^3 \text{ N/mm}} = 0,0158 \text{ mm} = 15,8 \text{ } \mu\text{m} \text{ olarak bulunur.}$$

Esnek cıvata için standartlarda belirtildiği üzere azaltılmış gövde çapı $d=10,7$ mm olduğundan (Şekil 3.9.);

$$A_c = 90 \text{ mm}^2 \text{ olarak bulunur.}$$

$$E_c = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$$

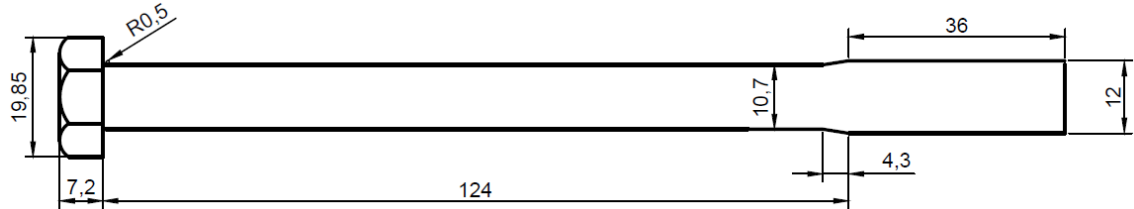
$l_c = 124$ mm şeklinde verilmiştir. Bu durumda cıvata rijitlik eşitliğinde (eşitlik 2.15) bu değerler yerine konulduğunda;

$$\frac{1}{c_c} = \frac{1}{2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2} \left(\frac{0,4 \cdot 12}{90} + \frac{124}{90} + \frac{0,4 \cdot 9,852}{76,3} \right)$$

Buradan $c_c=141,6.10^3 N/mm$ olarak bulunur. Bu değer eşitlik 2.5'te yerine konulup $141,6.10^3 N/mm = \frac{2861,5N}{\Delta l_c}$ buradan

$$\Delta l_c \cong 0,020 \text{ mm} \cong 20 \text{ } \mu\text{m} \text{ bulunur.}$$

Şekil 3.9. Çalışmada Kullanılan Esnek Cıvata Teknik Resmi.



İşletme kuvveti ile oluşan uzama miktarı ise;

$$\Delta l' = \frac{6717}{180.10^3 + 141,6.10^3} = 0,020 \text{ mm} \cong 20 \text{ } \mu\text{m} \text{ olur.}$$

Fakat parça ve manşon kısılması $15,8 \text{ } \mu\text{m}$ bulunmuştu. Bu değerden sonra parça ve manşon eski haline döner ve kalan kuvvet cıvatayı uzatmaya devam eden ek kuvvet olarak gelir. Bu noktaya kadar etki eden işletme kuvveti;

$$F_{i\dot{s}} = (180.10^3 + 141,6.10^3).0,0158 = 5081 \text{ N'dur.}$$

İşletmeden gelen bu kuvvetin ne kadarının parçaya ne kadarının cıvataya etki ettiğini bulmak için rijitlik katsayısından faydalanılır. Esnek cıvata ve manşonun rijitlik katsayıları için bulunan değerler (eşitlik 2.7) rijitlik katsayısı eşitliğinde yerine koyulduğunda $k \cong 0,44$ bulunur. Bu değer işletmeden sadece cıvataya ve sadece parçaya gelen yükü belirlemek için gerekli eşitliklerde (eşitlik 2.8 ve 2.9) yerine yazılırsa;

$$F_c = 5081.0,44 = 2219,5 \text{ N ve } F_p = 5081.(1-0,44) \cong 2861,5 \text{ N olarak bulunur.}$$

Bu durumda kalan işletme kuvveti cıvataya ek kuvvet olarak gelir;

$$F_{c_{ek}} = 6717 - 5081 = 1636 \text{ N olarak bulunur.}$$

Bu durumda cıvataya gelen toplam kuvvet;

$$F_{c_{top}} = F_{c_{ek}} + F_c = 1636 + 2219,5 = 3855,5 \text{ N'dur.}$$

Cıvataya etkiyen ek işletme kuvvetinin cıvatada meydana getirdiği ek uzama miktarı;

$$\Delta l_{c_{ek}} = \frac{1636}{141,6.10^3 \text{ N/mm}} \cong 0,0115 \text{ mm} \cong 11,5 \text{ } \mu\text{m} \text{ bulunur.}$$

Grafikte (Şekil 3.10.) ;

$$F_{c_N} = 3855,5 \text{ N} = \text{Normal cıvataya gelen işletme yükü}$$

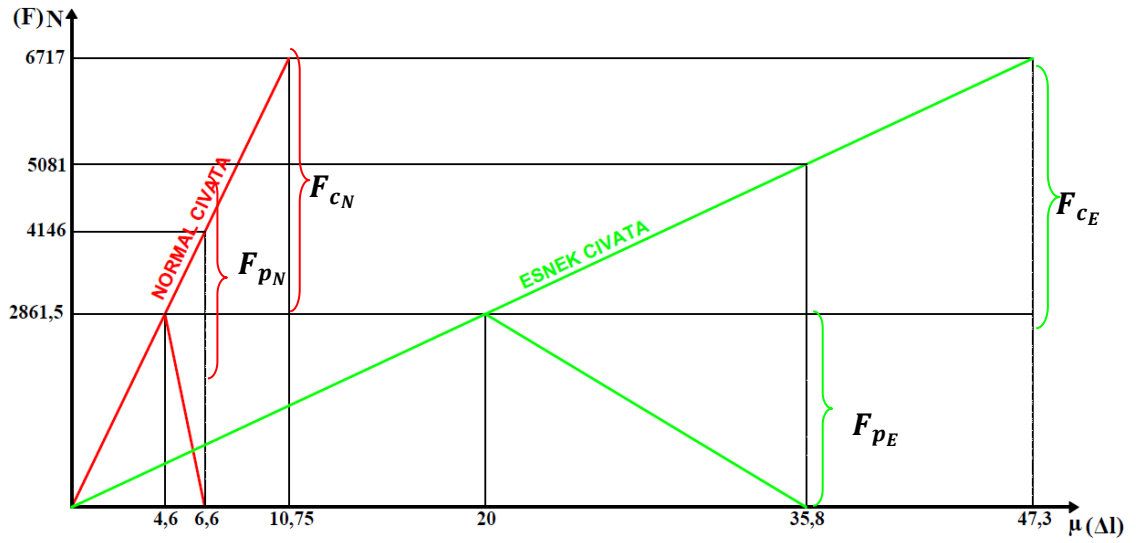
$F_{pN} = 2861,5 \text{ N} = \text{Normal cıvata kullanımında parçaya gelen yük}$

$F_{cE} = 3855,5 \text{ N} = \text{Esnek cıvataya gelen işletme yükü}$

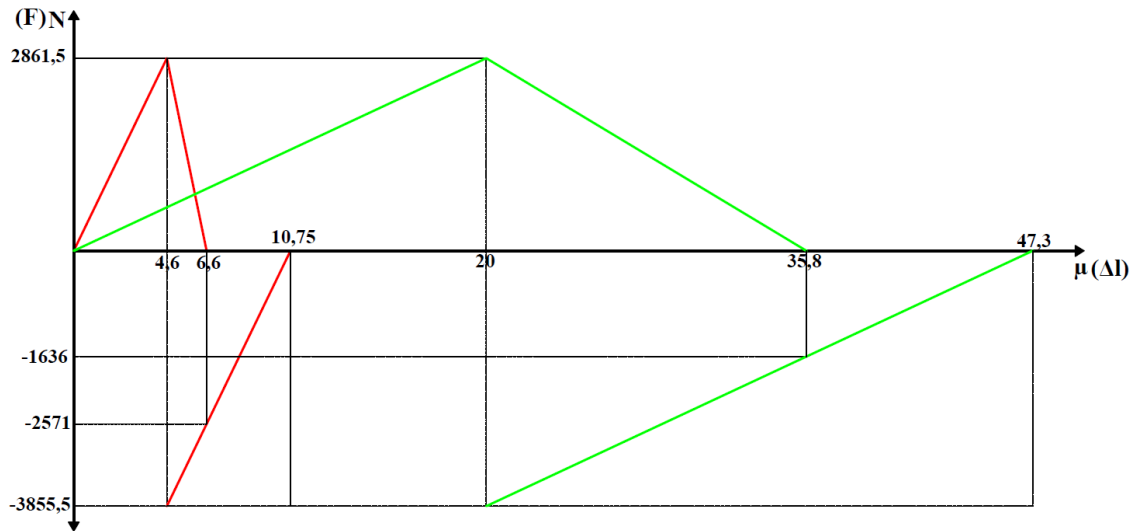
$F_{pE} = 2861,5 \text{ N} = \text{Esnek cıvata kullanımında parçaya gelen yük}$

olarak verilmektedir.

Şekil 3.10. Normal Cıvata Ve Esnek Cıvata Uzama Grafiği.



Şekil 3.11. Normal Cıvata Ve Esnek Cıvata İçin Kuvvet-Uzama Grafiğinin Farklı Bir Yaklaşım İle Çizilmiş Hali.



Yapılan hesaplamalar ve grafiklerden de anlaşılacağı üzere; işletmeden gelen kuvvet her iki cıvata da eşit, fakat cıvataların uzama miktarları farklıdır. Normal cıvata sistemi kullanıldığında işletmeden gelen kuvvetin etkisi ile 4,15 μm uzama elde edilirken, esnek cıvata sistemi kullanıldığında bu değerin yaklaşık 7 katı uzama elde edilmiştir. Esnek cıvata kullanımı ile hem işletmeden cıvataya gelen yük aynı tutulabilmiş hem de uzama miktarı artırılarak makinedeki anlık yüksek basınçlar dengelenmiştir.

3.1.4. Cıvataların Dayanımının Hesaplanması

Kesiti daraltılmış cıvata için ISO 4015 standardı gereği gövde çapı $d=10,7$ mm olarak belirlenmiştir (ISO, 2020). Buna göre cıvata gövdesi için alan;

$$A_c = 90 \text{ mm}^2 \text{ olur.}$$

Dinamik yükleme durumunda mukavemet şartlarının kontrolü bir önceki bölümde verilen 2.8, 2.16, 2.17 ve 2.18 eşitlikleri ile hesaplanarak yapılmaktadır. Cürgül, dinamik yükleme durumunda en önemli kontrolün değişken gerilme genliğine göre yapılması olduğunu belirtmiştir (Cürgül, 2015).

M12 ve 10.9 kalitede bir cıvata için, elde edilen değerler emniyet katsayısı (S) 2 alınarak gerekli eşitliklerde yerine koyulduğunda;

$$F_{cE} = 3855,5 \text{ N}$$

$$\sigma_{max} = \frac{6717 \text{ N}}{90 \text{ mm}^2} = 74,63 \text{ N/mm}^2 \leq 0,5 \cdot 900 = 450 \text{ N/mm}^2$$

M12 ölçüsünde 10.9 kalitede ıslah edilmiş ve tekrar yuvarlama işlemi görmüş cıvata için $\sigma_G = 90 \text{ N/mm}^2$ alınmıştır.

$$\sigma_g = \frac{1927,75 \text{ N}}{90 \text{ mm}^2} = 21,42 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq 0,5 \cdot 90 = 45 \text{ N/mm}^2$$

Bu hesaplamalar doğrultusunda istenilen uzamaları sağlamakla birlikte gelen kuvvetlere karşı gerekli dayanımı sağlayabildiğinden parçaların montajı için 10.9 kalitede M12 cıvata seçilmiştir.

3.2. ESNEK CIVATANIN MAKİNE ÜZERİNDE UYGULANMASI

Bu çalışmada en çok kömür karışımlı biyokütlenin peletlenmesi esnasında basınç artışlarıyla karşılaşmıştır. Bu karışımlar makinedeki sıkışmaları artırmıştır. Sıkıştırma ruloları ve kalıp disk arasındaki mesafelerin ayarlanarak basınç regülasyonunun sağlanması amacıyla gerçekleştirilen çalışmanın temeli, bu tür problemlerin yaşanmamasıdır.

Çalışmada kullanılan linyit kömür tozları Kütahya-Tunçbilek bölgesi Kayasu mevkiinden alınmıştır. Alınan numune boyutları deneysel çalışmalar için işlem görmeden önce 5-10 mm arasında değişiklik göstermiştir. Kömür karakteristik bilgileri Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Kömür Numunesi Karakteristik Bilgileri.

Test Tipi	Orijinal Baz	Kuru Baz
Toplam Nem (%)	20,43	
Kül (%)	11,93	14,99
Uçucu madde(%)	30,23	37,99
Sabit Karbon(%)	37,41	47,02
Üst Isıl Değeri (kCal/kg)	4985	6265
Alt Isıl Değeri (kCal/kg)	4662	6013

Not: G.L.İ. Laboratuvarları

Çalışmada kullanılan biyokütle Karaçam ve Kızılçam kesim atıkları olan talaşların karışımından elde edilmiştir. Tomrukların işlenmesinde ortaya çıkan atık durumundaki talaşlar, tomruk hacminin yaklaşık %14 ila %16 arasını oluşturmaktadır (Saraçoğlu, 2002). Bu oran kullanılabilir olmayan bir ürün için çok fazladır bu sebeple biyokütle olarak değerlendirilmesi açısından uygundur. Erten ve Önal'ın yaptığı çalışma sonucu Karaçam ve Kızılçam ağaçlarının nemsiz tabana göre üst ısıl değerleri sırasıyla 5.266 (kCal/kg) ve 5.096 (kCal/kg) olarak bilinmektedir (aktaran Temiz vd., 2008). Karışımdaki Karaçam talaşlarının oranı yaklaşık %70 iken, Kızılçam talaşlarının oranı %30 civarındadır. Talaş 3mm boyutundaki elekte elenmiş ve tane boyutları 3 mm'den

küçük olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmaların öncesinde biyokütle nem oranı yaklaşık %31 olarak ölçülmüştür (Şekil 3.12.).

Şekil 3.12. Talaş Nem Ölçümleri.



Peletleme işleminde nem içeriği oldukça önemlidir. Su, peletleme sırasında hem bağlayıcı hem de yağlayıcı görevi görür. Parçacıklar arasındaki temas alanını artırarak Van der Waals kuvvetlerinin gelişmesine yardımcı olur (Grover ve Mishra, 1996). Yapılan birçok çalışma nem oranının önemine işaret etmektedir. Reece, nem içeriği % 10–23 olan yonca otunun % 80–90 dayanıklılığa sahip plakalar ürettiğini tespit etmiştir ve nem içeriği % 25 ve üzeri olduğunda plaka yapmanın zor olduğunu gözlemlemiştir (Floyd N. Reece, 1966).

3.3. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI

Atık kömür tozlarının işlem öncesi nem oranı %20 olarak belirlenmiştir. Bu nem oranı peletleme için fazla görüldüğünden sererek kurutma işlemi gerçekleştirilmiş ve nem %17'ye kadar düşürülmüştür (Şekil 3.13.).

Şekil 3.13. Serilerek Kurutma Yapılan Atık Kömür Tozları.



Daha iyi peletleme işlemi sağlayabilmek için literatür çalışmalarında da bahsedildiği üzere işlem görmeyen atık kömür tozlarının 5-10 mm arası olan tane boyutunu daha küçük boyutlara düşürmek amacı ile tozlar öğütülmüştür. Öğütme işlemi için Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Maden Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan çeneli kırıcıdan faydalanılmıştır (Şekil 3.14.).

Şekil 3.14. Çeneli Kırıcı.



Öğütme işleminin ardından elde edilen kömür tozları 3 mm'lik elekte elenmiş ve yapılan çalışma sonucunda tane boyutları 3 mm'nin altına düşürülmüştür (Şekil 3.15).

Şekil 3.15. Çeneli Kırıcıda Öğütülmüş Kömür Tozları.



Pelet kalitesini artırmak için literatürde önerilen oranların üzerinde (%30) nem oranına sahip biyokütleye sererek kurutma işlemi uygulanmış nem oranı %18'in altına düşürülmüştür. Ardından 3 mm'lik elekten geçirilerek tane boyutlarının 3 mm'den küçük olduğu doğrulanmıştır (Şekil 3.16.).

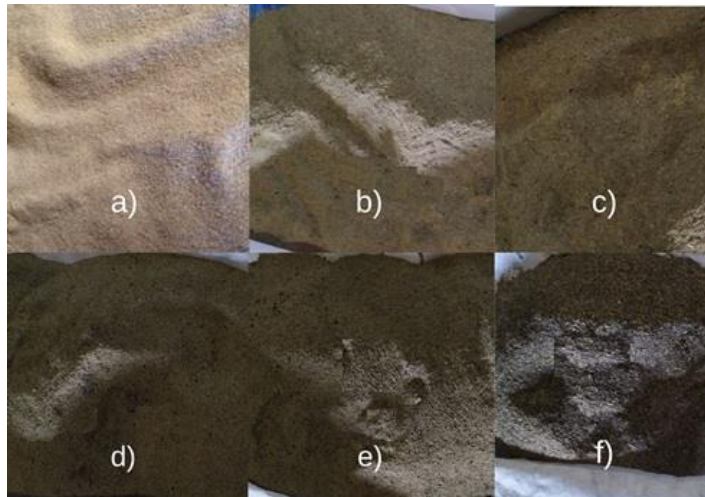
Şekil 3.16. Kurutma Ve Eleme İşlemleri Uygulanmış Biyokütle.



3.4. KARIŞIMLARIN HAZIRLANMASI

Kurutma ve eleme işlemlerine tabi tutulan kömür tozu ve biyokütle, peletlenmek üzere içeriğinde sırasıyla ağırlıkça %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında kömür tozu bulunduran 15'er kilogramlık karışımlar hazırlanmıştır. Daha doğru sonuçlar elde edilebilmesi adına karışımların homojen olmasına dikkat edilmiştir. Karışımlar sırasıyla B90C10, B80C20, B70C30, B60C40, B50C50 şeklinde adlandırılmıştır. Elde edilen karışımların nem oranları ölçülmüş ve %20'nin altında olması sağlanmıştır (Şekil 3.17.).

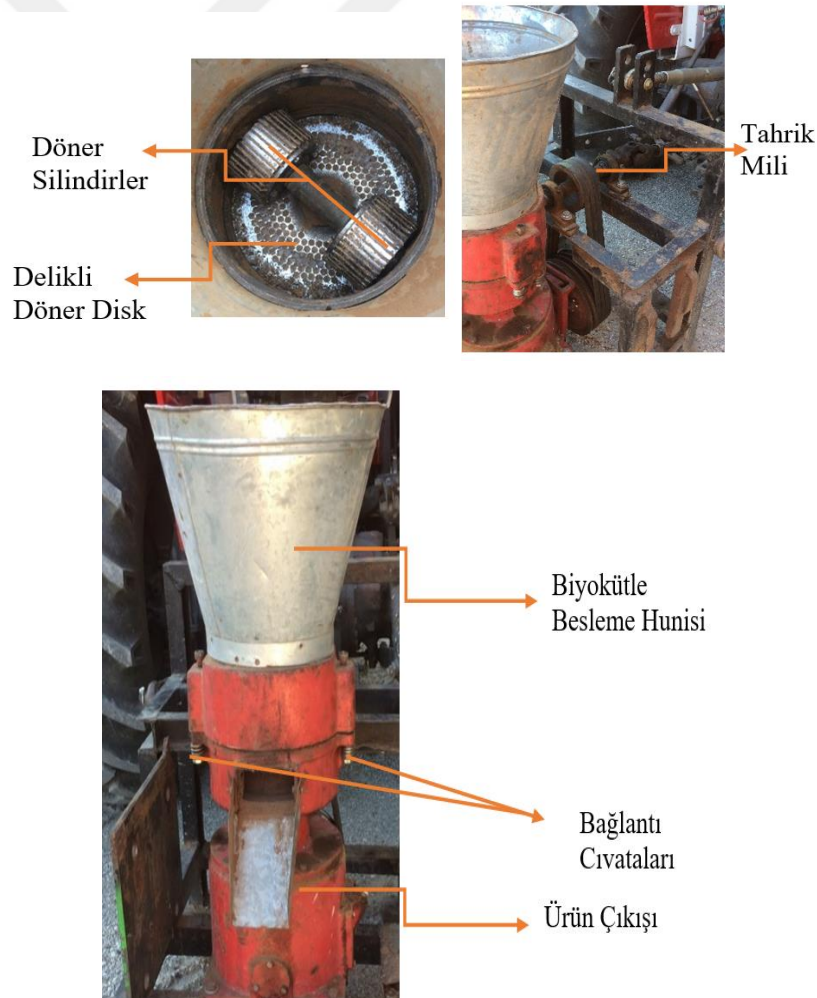
Şekil 3.17. Biyokütle Ve Kömür Tozu Karışımları. a) %100 Biyokütle b) %10 Kömür Tozu İçeren Karışım c) %20 Kömür Tozu İçeren Karışım d) %30 Kömür Tozu İçeren Karışım e) %40 Kömür Tozu İçeren Karışım f) %50 Kömür Tozu İçeren Karışım.



3.5. KULLANILAN EKİPMANLAR

Peletleme ekipmanında, besleme malzemesi döner bir disk üzerinde açılan açık uçlu silindirik deliklerden (kalıplar) preslenir. İki küçük döner rulo, besleme malzemesini halkanın içinden, halkanın dışına doğru kalıp deliklerine iter. Partiküller ile kalıbın duvarı arasındaki sürtünme, beslemenin serbest akışına direnir ve bu nedenle parçacıklar, peletler oluşturmak için kalıbın içinde birbirlerine karşı sıkıştırılır. Halkanın dışına yerleştirilen bir bıçak, peletleri istenen uzunluklarda keser. Bu çalışmada KL 260 model 22 HP döner kalıp disk tahrikli iki rulolu pelet makinesi kullanılmıştır (Şekil 3.18.). Disk üzerindeki kalıp delikleri 6 mm çapına sahiptir.

Şekil 3.18. Peletleme Makinesi Bölümleri.



Numunelerin nem ölçümleri için Yieryi marka TK TK-100W model dijital nem ölçer kullanılmıştır. %0-84 ölçüm aralığına, doğruluk ± 5 %, 0.1 çözünürlük değerlerine ve 460mm \times 75mm \times 35mm boyutlarına sahiptir (Sawdust Moisture Meter,

2020). Kömür numunelerin öğütülmesi için Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Maden Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan Ünal markalı 100x100 mm çene giriş açıklıklı, ürün besleme boyutu: < 100 mm, ürün çıkış inceliği: 0-20 mm, kırma kapasitesi: < 150 kg/h özelliklere sahip çeneli kırıcıdan faydalanılmıştır (Ünal, y.y.). Karışımların ağırlıklarının ölçümü için Techmaster marka 50 kg kapasiteli, ölçüm hassasiyeti:10 g. olan dijital el kantarı kullanılmıştır (Techmaster, 2020). Termal görüntülerin alınması için FLIR marka GF335 model termal kamera kullanılmıştır (Teledyne Flir, 2020).

3.6. PELETLEME PROSESİ

Peletlenecek 15'er kilogramlık karışımların nem değerleri ölçülmüş ve %20'nin altında olması sağlanmıştır. İlk önce tamamı biyokütleden oluşan numune peletlenmeye başlanmış ve ardından sırasıyla en az kömür içerenden en çok kömür içerene doğru peletleme işlemi devam etmiştir. Makinenin üretim debisi, makine belirli bir çalışma rejimine ulaştıktan sonra birer dakikalık olarak ayrı ayrı üç kez ölçülmüş ve ortalamaları alınarak bulunmuştur.

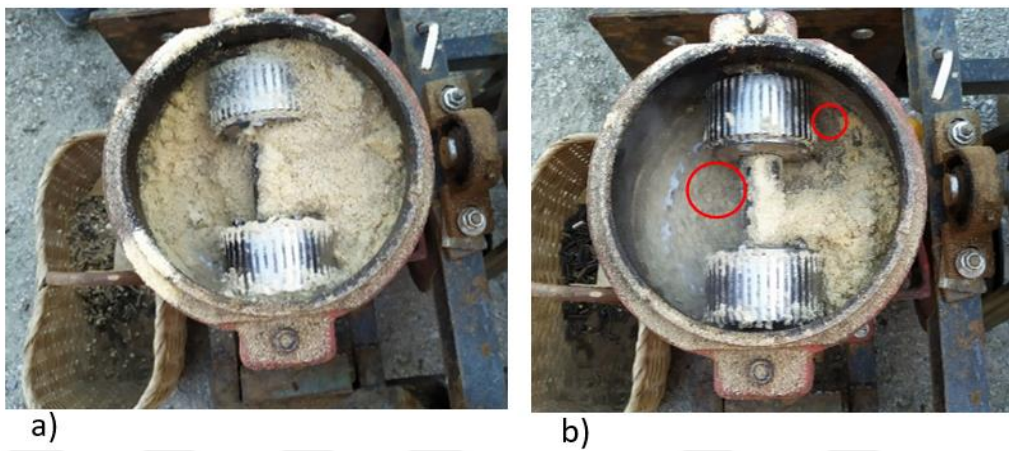
3.6.1. Biyokütlenin Peletlenmesi

Pelet makinesi belirli bir çalışma rejimine ulaşıncaya kadar çalıştırılmıştır. İlk olarak %100 biyokütle peletleme yapılmıştır. Üretimden önce nem oranı ölçülmüş ve %17,7 nem içeriğine sahip olduğu belirlenmiştir. Literatürde çoğu biyokütle türü için %10-20 aralığındaki nem içeriğinin kabul edilebilir olduğu belirtilmiştir (Cui vd., 2021). Biyokütle hammadde besleme hunisinden yavaş yavaş eklenirken aynı anda makinenin termal kamera ile termal ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Makine debisi yaklaşık olarak 243 gr/dk ölçülmüştür.

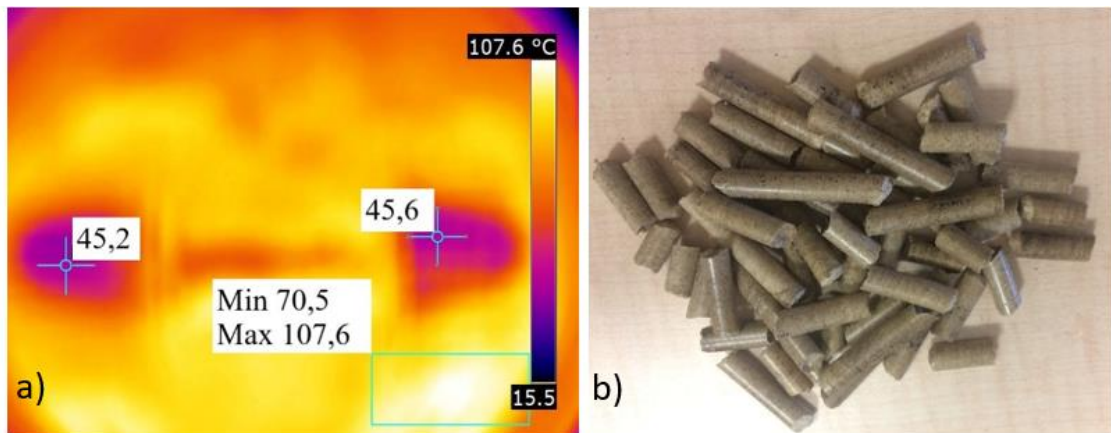
Döner disk ve döner silindirlere arası sürtünmeden dolayı oluşan sıcaklık sonucu biyokütlerde renk değişimi gözlenmiştir (Şekil 3.19.). Makinenin optimum pelet üretiminin disk sıcaklığı 70-110 °C aralığında iken gerçekleştiği belirlenmiştir (Şekil 3.20.). Bu değer literatürde de en iyi pelet yoğunluğu ve gerilme dayanımının elde edildiği optimum sıcaklık olarak belirtilmiştir (M. D. Shaw vd., 2009; X Zhang vd., 2016). Üretimin sürekliliği durumunda ise makinede ara ara sıkışmalar olmuştur. Bu sıkışmalar basınç artışına sebep olduğundan kalıp disk ve rulolar arası sürtünme artmış

ve makine çalışma sıcaklığı artmıştır. Sıcaklık 120 °C'nin üzerine çıktığı andan itibaren peletler kırıntılı biçimde çıkmaya başlamıştır (Şekil 3.21.). Bunun sebebi parçacıkların elastikiyet modülünü düşüren ve onlara esneklik veren lignoselülozik liflerin plastikleşmesi olarak açıklanmaktadır (Mostafa vd., 2019). Aynı zamanda yüksek sıcaklıklarda materyal içeriğindeki nemin buharlaşarak azalmasının, üretilen peletlerde kırılmalığa yol açtığı belirtilmiştir.

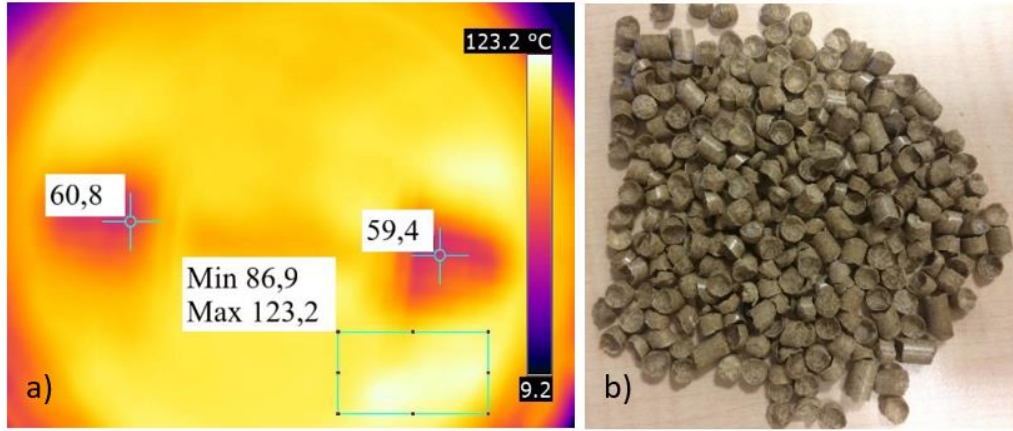
Şekil 3.19. Biyokütlenin Peletlenme Aşamasında Görülen Renk Değişimleri. a) Çalışma Başlangıcında b) Çalışmaya Başladıktan Belirli Bir Süre Sonra.



Şekil 3.20. a) Optimum Pelet Üretim Sıcaklığını Gösteren Termal Kamera Çekimi. b) Bu Sıcaklıkta Üretilmiş Doğru Formda Peletler.



Şekil 3.21. a) Yüksek Sıcaklıkta Çalışan Disk Termal Çekimi. b) Bu Sıcaklıkta Üretilmiş Kırıntılı Peletler.



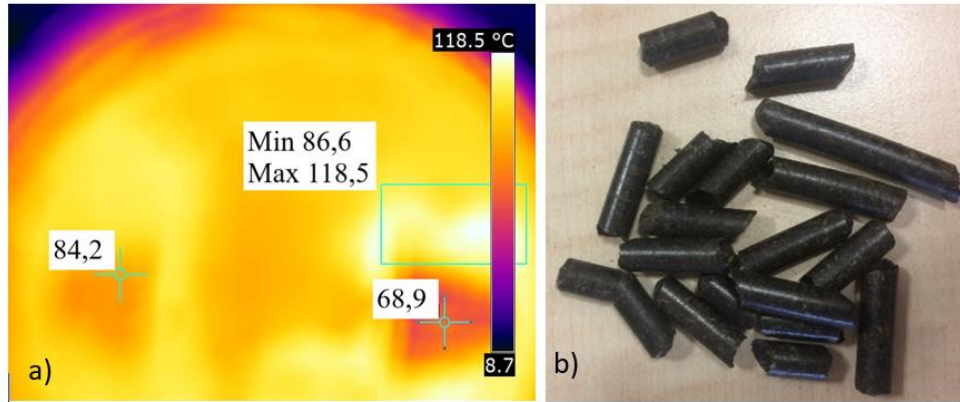
Bu aşamada makinede meydana gelen sıkışmaları ve basınç artışlarını regüle edebilmek için makinenin normal M12 gövde montaj cıvataları, çapı düşürülmüş M12 esnek cıvatalar ile değiştirilmiştir. Böylece üretimde sıkışma ve durma olmadan sürekli üretim sağlanmıştır. Makinede sıcaklık artışı gözlenmemiş ve aynı zamanda üretilen peletler standartlar dahilinde, kırıklıksız üretilmiştir.

3.6.2. B90C10 Karışımının Peletlenmesi

İkinci olarak %90 biyokütle ve %10 kömür içeren karışımın (B90C10) nem içeriği 16,8 olarak ölçülmüştür ve besleme hunisine yavaş yavaş eklenmiştir. Fakat makine gövde montaj cıvataları esnek cıvatalar ile değiştirilmeden peletleme gerçekleşmemiştir. Esnek cıvatalar gövdeye takıldıktan sonra bu karışım başarılı fakat verim daha düşük bir şekilde peletlenebilmiştir. Dakikada üretim yaklaşık olarak 175 gr ölçülmüştür.

Pelet makinesinin üretim esnasındaki termal çekimi ve üretilen peletler şekil 3.22.'de verilmiştir. Sadece biyokütle peletlenmesi durumunda sıkıştırma rulolarının maksimum 61°C olan sıcaklığı, şekilde de görüldüğü üzere karışımda kömür bulunması durumunda önemli bir oranda yükselerek yaklaşık 85°C'ye çıkmıştır. Bu artışın, kömür parçacıklarının daha sert bir yapıda olması sebebiyle sürtünmenin artması sonucu gerçekleştiği düşünülmektedir.

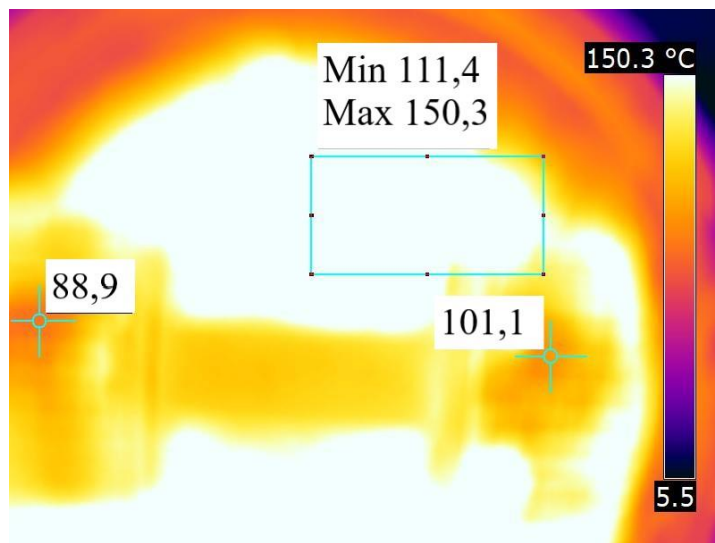
Şekil 3.22. a) B90C10 Karışımının Peletlenme Esnasındaki Termal Çekimi. b) B90C10 Karışımından Üretilmiş Peletler.



3.6.3. B80C20 Karışımının Peletlenmesi

Son olarak %80 biyokütle ve %20 kömür içeren karışımın (B80C20) karışımın nem içeriği 19,6 olarak ölçülmüş ve besleme hunisine yavaş yavaş eklenmiştir. Deneyin bu aşamasında ilk denemede disk üzerindeki pelet çıkış deliklerinin tıkandığı ve çalışma sıcaklığında ciddi bir artış gözlenmiştir (Şekil 3.23.). Pelet üretimi gerçekleştirilememiştir. Rulolar üzerindeki sıcaklık 100°C'lere, disk üzeri sıcaklık ise 150°C'lere kadar çıkmıştır.

Şekil 3.23. Normal Cıvatalar İle Çalışan Pelet Makinesinin Termal Çekimi.

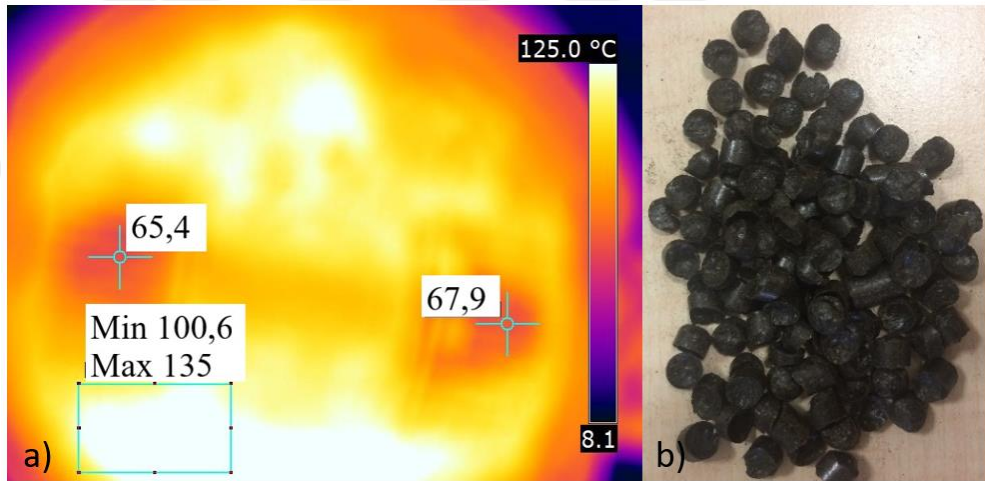


İkinci denemede montaj cıvataları esnek cıvatalar ile değiştirilmiştir. Ayrıca disk 60 dev/dk'da dönerken aşırı ısınma gözlemlendiği için parçalar arası ısı transferinin

gerçekleşmesine izin vermek amacıyla devir sayısı 50 dev/dk'ya düşürülmüştür. Devir düşürülmesinin ve esnek cıvatalara geçilmesinin ardından makinenin çalışma sıcaklığında düşüş gözlenmiş ve daha düzgün bir rejimde üretim gerçekleştirdiği görülmüştür. Literatür çalışmalarında da belirtildiği üzere silindirlerin dönme hızında görülen artışla, ürününün kalitesinde önemli bir düşüş gözlemlendiği doğrulanmıştır (Janewicz vd., 2019). Ölçümler bu düzgün rejimli üretime başlanmasının ardından gerçekleştirilmiştir. Debi yaklaşık 150 gr olarak ölçülmüştür.

Bu aşamada genel olarak çalışma sıcaklığı ilk denemeye göre düşmüş olsa bile %10 oranında kömür içeren karışıma kıyasla kalıp disk ve rulolar üzerindeki sıcaklık çok yüksek ölçülmüştür. Düzenli rejimde üretim elde edilse bile B80C20 karışımında peletler standartlar dahilinde değil kırıntılı bir şekilde üretilmiştir (Şekil 3.24.).

Şekil 3.24. a) Esnek Cıvatalar İle Düşük Devirde Çalışan Pelet Makinesinin Termal Çekimi. b) Bu Esnada Üretilen B80C20 Karışımından Elde Edilmiş Peletler.



SONUÇ, DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Dünyada artan nüfus ile birlikte gıda, barınma, enerji gibi temel ihtiyaçlara olan talep de artış göstermiştir. Artan enerji ihtiyacına cevap verebilmek adına geliştirilen kaynaklardan birisi de yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları çevre açısından sürdürülebilir olmakla birlikte sürekli kaynak sağlayabilme açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan biyokütle enerjisi üzerine yapılan çalışmalar her geçen gün artmakta ve farklı şekillerde devam ettirilmektedir.

Yapılan çalışmada, biyokütle yoğunlaştırma yöntemlerinden birisi olan peletleme prosesi esnasında gerçek bir pelet pres makinesinde karşılaşılan problemlere çözüm bulmak amacı ile özel bir cıvata türü olan esnek cıvata ile uygulamalar gerçekleştirilmiştir.

Esnek cıvatalar kullanımı kısıtlı olan fakat büyük bir kullanım potansiyeline sahip makine elemanlarıdır. İşletme koşullarında plastik deformasyona uğramadan istenilen şekil değişimini sağlayarak, kuvvet etkisi ortadan kaldırıldığında eski konumuna dönebilen özel cıvatalardır. Çalışmada ISO 4015 standardında belirtilen; gövde çapı 10.7 mm ve boyu 160 mm olan M12 esnek cıvata kullanılmıştır. Yapılan dayanım hesapları sonucunda 10.9 kalitede esnek cıvata seçilmiştir. Pelet presinde kalıp disk ve sıkıştırma ruloları arasında malzeme geçişi esnasında; farklı materyal, nem içeriği veya değişken partikül boyutu gibi sebeplerle oluşan ani basınç değişimlerini karşılama açısından çalışmada kullanılan esnek cıvatalar oldukça olumlu sonuçlar vermişlerdir.

- Yapılan hesaplamalar normal cıvataya gelen işletme yükünün, esnek cıvataya gelen işletme yükü ile aynı olduğunu göstermiştir.
- İşletmeden gelen 6717 N'luk kuvvetin uygulanması durumunda normal cıvata elde edilemeyen 47,3 µm'lik uzama esnek cıvata elde edilmiştir.
- Sadece işletme kuvvetinin etkisi ile esnek cıvata yaklaşık 5 kat fazla uzama gerçekleşmiştir.
- Elde edilen uzama makinede meydana gelen ani basınç değişimlerini dengelemiştir.

- Tıkanma ve değişken basınç sonucunda pres kalıp diskinde ve sıkıştırma rulolarında oluşan deformasyonlar esnek cıvata kullanımı sayesinde uzun vadede engellenmiştir.
- Esnek cıvata kullanımı sonucunda makinede değişken dinamik yüklemeler sonucunda oluşan titreşim azalmıştır.
- Esnek cıvata kullanımı sürekli rejimde üretim imkanı sağlayarak makine verimini artırmıştır.
- Normal cıvata kullanımına göre, esnek cıvata entegre edilmiş üretimden daha kaliteli peletler elde edilmiştir.
- Literatürde de kullanımı son derece kısıtlı olan esnek cıvatanın kullanım potansiyeline dikkat çekilmiştir.
- Esnek cıvata kullanımı ile biyokütle peletlenmesi problemsiz ve sürekli bir şekilde gerçekleştirilmiştir.
- Atık durumdaki kömür tozları, biyokütle ile birlikte peletleme prosesi sayesinde değerlendirilmiştir. Mevcut pelet preslerinde esnek cıvata kullanımı ile %10 kömür içeren karışım peletlenebilmiştir fakat bu aşamada makine verimi düşmüştür.
- Biyokütle ve kömür tozlarının birlikte peletlenmesinin çevre açısından olumlu bir prosedür olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- Adeleke, A. A., Odusote, J. K., Lasode, O. A., Ikubanni, P. P., Malathi, M., & Paswan, D. (2019). Densification of coal fines and mildly torrefied biomass into composite fuel using different organic binders. *Heliyon*, 5(7), 1–6.
- Adapa, P. K., Schoenau, G. J., Tabil, L. G., Sokhansanj, S., & Crerar, B. (2003). Pelleting of fractionated alfalfa products. In *2003 ASAE Annual Meeting* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Al–Widyan, M. I., & Al–Jalil, H. F. (2001). Stress–density relationship and energy requirement of compressed olive cake. *Applied Engineering in Agriculture*, 17(6), 749–753.
- Atay, O.A., Ekinci, K., Kaçar, H., Üçok, S., & Kumbul, B.S. (2018). Thermal properties of pellets made of peach pit and Lignite Coal Dust. *Scientific Papers. Series E. Land Reclamation, Earth Observation Surveying, Environmental Engineering, VII*, 53–57.
- Atay, O. A., Ekinci, K., & Umucu, Y. (2016). Measurement of flue gas emission of pellets obtained from the mixture of rose oil processing wastes, lignite coal dust and pine barks. *Journal of Tekirdag Agricultural Faculty*, 13(2), 1-9.
- Atay, O. A., & Ekinci, K. (2020). Characterization of pellets made from rose oil processing solid wastes/coal powder/pine bark. *Renewable Energy*, 149, 933–939.
- Balraj, A., Krishnan, J., Selvarajan, K., & Sukumar, K. (2021). Potential use of biomass and coal-fine waste for making briquette for sustainable energy and environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(45), 63516–63522.
- Beker, Ü. G. (2000). Briquetability of lignite and woody wastes composite fuel. *Energy Sources*, 22(2), 99–107.
- Bergman, P. C., & Kiel, J. H. (2005, October). Torrefaction for biomass upgrading. In *Proc. 14th European Biomass Conference, Paris, France. 2005*, 17-21.
- Bergström, D., Israelsson, S., Öhman, M., Dahlqvist, S.-A., Gref, R., Boman, C., & Wästerlund, I. (2008). Effects of raw material particle size distribution on the characteristics of Scots pine sawdust fuel pellets. *Fuel Processing Technology*,

89(12), 1324–1329.

- Boughton, P. (2013). Bolts with waisted shanks put rail company back on track. *Engineer Live*. Retrieved from: <https://www.engineerlive.com/content/bolts-waisted-shanks-put-rail-company-back-track>
- BP Statistical Review of World Energy. (2020, 27 Temmuz). Retrieved from: www.bp.com/statisticalreview.
- Breese Jones, D. (1931). Percentages of nitrogen in foods and feeds. *United States Department of Agriculture*, 167–168.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2011). *Shigley's mechanical engineering design* (9th ed.). New York: McGraw-Hill.
- Castellano, J. M., Gómez, M., Fernández, M., Esteban, L. S., & Carrasco, J. E. (2015). Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions on the quality and properties of pellets obtained from different woody and non woody biomasses. *Fuel*, 139, 629–636.
- Celik, H. K., Yilmaz, H., Rennie, A. E. W., Cinar, R., & Firat, M. Z. (2018). Determination of the failure susceptibility of a flat die used in biomass pelletizing machines by means of fea-based design exploration. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 18(5), 1099–1110.
- Cıvata nedir?. (2020). Erişim adresi: <https://www.makinaegitimi.com/civata-nedir-civata-cesitleri-ve-ozellikleri/>
- Cui, X., Yang, J., Shi, X., Lei, W., Huang, T., & Bai, C. (2019). Experimental investigation on the energy consumption, physical, and thermal properties of a novel pellet fuel made from wood residues with microalgae as a binder. *Energies*, 12(18), 3425.
- Cui, X., Yang, J., Wang, Z., & Shi, X. (2021). Better use of bioenergy: A critical review of co-pelletizing for biofuel manufacturing. *Carbon Capture Science & Technology*, 1, 100005.
- Cürgül, İ. (2015). Cıvata Bağlantıları. İçinde *Çözümlü Problemlerle Makina Elemanları* (ss. 199–201). Birsen Yayın Dağıtım Ltd. Şti.
- Dai, J., Cui, H., & Grace, J. R. (2012). Biomass feeding for thermochemical reactors. In

Progress in Energy and Combustion Science, 38(5),716–736.

- Demirsoy, Ö. (2018). Dişli bağlantılar neden gevşer?. Erişim adresi: <https://www.entekegitim.com.tr/blog/disli-baglantilar-neden-gevser>
- Eccles, W. (1993). Design guidelines for torque controlled tightening of bolted joints (No. 930578). *SAE Technical Paper*.
- Esler, B. (2017). MiTek enters into North American sales and distribution agreement with OZCO Building Products | Woodworking Network. Retrieved from: <https://www.woodworkingnetwork.com/news/woodworking-industry-news/mittek-enters-north-american-sales-and-distribution-agreement-ozco>
- European Committee for Standardization/Technical Committees 335 Solid Biofuels (2014) *Business Plan*.
- Fasina, O. O., & Sokhansanj, S. (1996). Storage and handling characteristics of alfalfa pellets. *Powder Handling and Processing*, 8(4), 361–366.
- Field, C. B., Campbell, J. E., & Lobell, D. B. (2008). Biomass energy: the scale of the potential resource. *Trends in Ecology and Evolution*, 23(2), 65–72.
- Floyd N. Reece. (1966). Temperature, pressure, and time relationships in forming dense hay wafers. *Transactions of the ASAE*, 9(6), 749–751.
- Franke, M., & Rey, A. (2006). Pelleting quality. *World Grain*, 24(5), 78–79.
- Fukuoka, T., Nomura, M., & Fuchikami, T. (2011). Finite element analysis of the cyclic stress amplitude of threaded fasteners using helical thread models. *Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME*, 133(6), 1–7.
- García-Maraver, A., Popov, V., & Zamorano, M. (2011). A review of European standards for pellet quality. *Renewable Energy*, 36(12), 3537–3540.
- Ghorbani, Z., Masoumi, A. A., & Hemmat, A. (2010). Specific energy consumption for reducing the size of alfalfa chops using a hammer mill. *Biosystems Engineering*, 105(1), 34–40.
- Gilbert, P., Ryu, C., Sharifi, V., & Swithenbank, J. (2009). Effect of process parameters on pelletisation of herbaceous crops. *Fuel*, 88(8), 1491–1497.
- Grover, P. D., & Mishra, S. K. (1996). Biomass briquetting: technology and practices.

FAO Regional Wood Energy Development Program In Asia, Field Document No. 46. Bangkok, Thailand.

- Güneş, E. C. (2016). Dikey eksenli çalışan pelet yakıt makinelerinde disk yayların kullanılması ve basınç regülasyonu, Yüksek lisans tezi, Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kütahya, 86s.
- Güneş, E. C., & Çelik, İ. (2017). Use of disc springs in a pellet fuel machine. *Acta Polytechnica*, 57(2), 89–96.
- Ha, K. (2020). Reduction of stress concentration factor (SCF) on the bolted joint connection for a large wind turbine rotor blade through various design modifications. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(18), 6588.
- Holley, C. (1983). The densification of biomass by roll briquetting. İçinde *Proceedings of the Institute for Briquetting and Agglomeration (IBA)*, 95–102.
- Hossain, N., & Morni, N. A. H. (2020). Co-pelletization of microalgae-sewage sludge blend with sub-bituminous coal as solid fuel feedstock. *Bioenergy Research*, 13(2), 618–629.
- Hosseinizand, H., Sokhansanj, S., & Lim, C. J. (2018). Co-pelletization of microalgae *Chlorella vulgaris* and pine sawdust to produce solid fuels. *Fuel Processing Technology*, 177, 129–139.
- Industrial Pipe Flanges. *St. Louis Pipe & Supply*. Retrieved from: <https://www.stlpipesupply.com/product/flanges/>
- International Energy Agency. (2021). World Energy Outlook 2021. Retrieved from: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
- International Organization for Standardization. (2020). Slovenski Standard Itih Standard Preview Itih Standard Preview. Retrieved from: <https://standards.itih.ai/catalog/standards/sist/27f20116-8ef5-4e32-b734-354812c6e935/osist-pren-iso-4015-2020>
- Janewicz, A., Kosturkiewicz, B., & Magdziarz, A. (2019). Briquetting lignite-biomass blends to obtain composite solid fuels for combustion purposes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 214(1), 012053.
- Junker, G. H., & Wallace, P. W. (1986). The bolted joint: economy of design through

- improved analysis and assembly methods. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 200(1), 73–76.
- Kaliyan, N., & Morey, R. V. (2010). Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. *Bioresource Technology*, 101(3), 1082–1090.
- Kaliyan, N., & Morey, R. V. (2005). Densification of corn stover. In *2005 ASAE Annual Meeting* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Kaliyan, N., & Vance Morey, R. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *İçinde Biomass and Bioenergy*, 33 (3), 337–359.
- Kirsten, C., Lenz, V., Schröder, H.-W., & Repke, J.-U. (2016). Hay pellets — The influence of particle size reduction on their physical–mechanical quality and energy demand during production. *Fuel Processing Technology*, 148, 163–174.
- Komarek, R. K. (1991). Binderless briquetting of peat, lignite, sub-bituminous and bituminous coals in roll press. Retrieved from: <https://patents.google.com/patent/US7892302B2/en>
- Köser, H. J. K., Schmalstieg, G., & Siemers, W. (1982). Densification of water hyacinth — basic data. *Fuel*, 61(9), 791–798.
- Kutay, M. G. (2009). *Civatalar ve Somunlar* [PDF Belgesi]. http://www.guvenkutay.ch/civata/08a_civata.pdf adresinden edinilmiştir.
- Lam, P. S., Sokhansanj, S., Bi, X. T., Lim, C. J., & Larsson, S. H. (2012). Drying characteristics and equilibrium moisture content of steam-treated Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* L.). *Bioresource Technology*, 116, 396–402.
- Lee, C. H., Kim, B. J., & Han, S. Y. (2014). Mechanism for reducing stress concentrations in bolt-nut connectors. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 15(7), 1337–1343.
- Li, Hanjian, Chi, H., Han, H., Hu, S., Song, G., Wang, Y., He, L., Wang, Y., Su, S., & Xiang, J. (2021). Comprehensive study on co-combustion behavior of pelletized coal-biomass mixtures in a concentrating photothermal reactor. *Fuel Processing Technology*, 211, 106596.

- Li, Hanjian, Chi, H., Hu, S., Wang, Y., Song, G., Abdulmajid, A. S., He, L., Wang, Y., Su, S., & Xiang, J. (2021). Comprehensive study on intrinsic combustion behavior of non-premixed coal-biomass pellet at rapid heating rate. *Fuel*, 287, 119496.
- Li, Hui, Jiang, L.-B., Li, C.-Z., Liang, J., Yuan, X.-Z., Xiao, Z.-H., Xiao, Z.-H., & Wang, H. (2015). Co-pelletization of sewage sludge and biomass: The energy input and properties of pellets. *Fuel Processing Technology*, 132, 55–61.
- Li, Y., & Liu, H. (2000). High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. *Biomass and Bioenergy*, 19(3), 177–186.
- Lindley, J. A., & Vossoughi, M. (1989). Physical properties of biomass briquets. *Transactions of the ASAE*, 32(2), 361-0366.
- Liu, Z., Quek, A., & Balasubramanian, R. (2014). Preparation and characterization of fuel pellets from woody biomass, agro-residues and their corresponding hydrochars. *Applied Energy*, 113, 1315–1322.
- Love Jr., J., & Pringle, O. A. (1956). The influence of shank area on the tensile impact strength of bolts. *University of Missouri bulletin*, 58(28), 1489-1496.
- Lu, D., Tabil, L. G., Wang, D., Wang, G., & Emami, S. (2014). Experimental trials to make wheat straw pellets with wood residue and binders. *Biomass and Bioenergy*, 69, 287–296.
- MacBain, R. (1966). Pelleting animal feed. *American Feed Manufacturers Association, Arlington, VA*, 1-28.
- Majzoobi, G. H., Dabbagh, M. A. M., Asgari, P., Pipelzadeh, M. K., & Hardy, S. J. (2014). Improvement of performance of bolt-nut connections, Part II: Experimental investigation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 228(17), 3078–3089.
- Mani, S., Tabil, L. G., & Sokhansanj, S. (2004). Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. *Biomass and Bioenergy*, 27(4), 339–352.
- Mišljenović, N., Čolović, R., Vukmirović, Đ., Brlek, T., & Bringas, C. S. (2016). The effects of sugar beet molasses on wheat straw pelleting and pellet quality. A

comparative study of pelleting by using a single pellet press and a pilot-scale pellet press. *Fuel Processing Technology*, 144, 220–229.

Mostafa, M. E., Hu, S., Wang, Y., Su, S., Hu, X., Elsayed, S. A., & Xiang, J. (2019). The significance of pelletization operating conditions: An analysis of physical and mechanical characteristics as well as energy consumption of biomass pellets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105(June 2018), 332–348.

Nielsen, S. K., Mandø, M., & Rosenørn, A. B. (2018). 1D model for investigation of energy consumption and wear in die designs used for biomass pelleting. *European Biomass Conference and Exhibition Proceedings, 2018(26thEUBCE)*, 550–558.

Obernberger, I., & Thek, G. (2004). Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 653–669.

Obidzinski, S., Dolzynska, M., Kowczyk-Sadowy, M., Jadwisienczak, K., & Sobczak, P. (2019). Densification and fuel properties of onion husks. *Energies*, 12(24).

Ojomo, A. O., Falayi, F. R., & Ogunlowo, A. S. (2018). Development of a densification equipment for organic biomass solid fuel pellets. *FUOYE Journal of Engineering and Technology*, 3(1), 108–112.

Özyuğuran, A., & Açma, H. H. (2016). Afşin - Elbistan linyitinin biyokütle ve bağlayıcı katkısıyla briketlenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C*, 4(3), 103–113.

Paredes-Rojas, J. C., Torres San Miguel, C. R., Flores Vela, A. I., Bravo-Díaz, B., De La Cruz Alejo, C., Ramírez, D. P., & Bejinariu, C. (2020). Design proposal of a prototype for sawdust pellet manufacturing through simulation. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 10 pages.

Patil, D. P., Taulbee, D., Parekh, B. K., & Honaker, R. (2009). Briquetting of coal fines and sawdust - Effect of particle-size distribution. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 29(5), 251–264.

Pedersen, N. L. (2013). Overall bolt stress optimization. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 48(3), 155–165.

Pellet Plant Process Flow Chart | Gemco Energy. (2020, 04 Ağustos). Erişim adresi:

<http://www.biomass-energy.org/blog/pellet-plant-process-flow-chart.html>

- Phanphanich, M., & Mani, S. (2011). Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource Technology*, *102*(2), 1246–1253.
- Pietsch, W. B. (2008). *Agglomeration processes: phenomena, technologies, equipment*. Retrieved from: <https://www.google.com/books?hl=tr&lr=&id=MkyCiSna9QUC&oi=fnd&pg=PP2&dq=Agglomeration+processes:+phenomena,+technologies,+equipment&ots=9IS9BPeZ-h&sig=8V7Tr8yytrsYe-2fTkA7FAobNtc>
- Reece, F. N. (1966). Temperature, pressure, and time relationships in forming dense hay wafers. *Transactions of The ASABE*, *9*, 749–751.
- Rejdak, M., Robak, J., Czardybon, A., Ignasiak, K., & Fudała, P. (2020). Research on the production of composite fuel on the basis of fine-grained coal fractions and biomass—the impact of process parameters and the type of binder on the quality of briquettes produced. *Minerals*, *10*(1).
- Rhén, C., Gref, R., Sjöström, M., & Wästerlund, I. (2005). Effects of raw material moisture content, densification pressure and temperature on some properties of Norway spruce pellets. *Fuel Processing Technology*, *87*(1), 11–16.
- Richards, S. R. (1990). Physical testing of fuel briquettes. *Fuel Processing Technology*, *25*(2), 89–100.
- Rupp, S. (2020). Why Use ARP Bolts? Don't Skimp on Fasteners Holding Your Engine Together. Retrieved from: <https://www.motortrend.com/how-to/why-use-arp-bolts>
- Sah, P. C., Singh, B. P. N., & Agarwal, U. S. (1981). Compaction behaviour of straw. *Journal Of Agricultural Engineering.*, *18*(1), 89 – 96.
- Said, N., Abdel Daiem, M. M., García-Maraver, A., & Zamorano, M. (2015). Influence of densification parameters on quality properties of rice straw pellets. *Fuel Processing Technology*, *138*, 56–64.
- Saraçoğlu, N., (2002). Orman Hasılat Bilgisi. *Bartın Orman Fakültesi Yayınları*. Bartın.
- Sawdust Moisture Meter. (2020). Retrieved from: <http://www.yieryitools.com/sale-9697294-tk100w-sawdust-moisture-meter-lightweight-with-automatic->

temperature-compensation.html

- Shang, L., Nielsen, N. P. K., Stelte, W., Dahl, J., Ahrenfeldt, J., Holm, J. K., Arnavat, M. P., Bach, L. S., & Henriksen, U. B. (2014). Lab and bench-scale pelletization of torrefied wood chips—process optimization and pellet quality. *BioEnergy Research*, 7(1), 87–94.
- Shaw, M. D., Karunakaran, C., & Tabil, L. G. (2009). Physicochemical characteristics of densified untreated and steam exploded poplar wood and wheat straw grinds. *Biosystems Engineering*, 103(2), 198–207.
- Shaw, M., & Tabil, L. (2007). Compression and relaxation characteristics of selected biomass grinds. *2007 ASABE Annual International Meeting, Technical Papers*, 12.
- Sierra, R., Smith, A., Granda, C., & Holtzaple, M. T. (2008). Producing fuels and chemicals from lignocellulosic biomass. *Chemical Engineering Progress*, 104(8), 10-18.
- Smith, I. E., Probert, S. D., Stokes, R. E., & Hansford, R. J. (1977). The briquetting of wheat straw. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 22(2), 105–111.
- Stelte, W., Holm, J. K., Sanadi, A. R., Barsberg, S., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (2011a). Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. *Fuel*, 90(11), 3285–3290.
- Stelte, W., Holm, J. K., Sanadi, A. R., Barsberg, S., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (2011b). Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. *Fuel*, 90(11), 3285–3290.
- Stelte, W., Sanadi, A. R., Shang, L., Holm, J. K., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (2012). Recent developments in biomass pelletization - a review. *BioResources*, 7(3), 4451–4490.
- Sümer, H. Tork hesabı. (2021, 14 Aralık). Erişim adresi: <https://argevetasarim.com/civata-torku-hesaplayici/>
- Sungur, B. (2019). Biyokütle/Sıvı Yakıt Ve Biyokütle/Kömür Karışımlarından Üretilen Peletlerin Kazanda Yakılmasının Deneysel Ve Sayısal İncelenmesi, Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 177s.

- Suzuki, Y., Yamaguchi, T., Kitada, T., & Akiyama, H. (2001). Mechanical behavior of high strength bolted tensile joints for steel box members subjected to tension and bending. *Memoirs of the Faculty of Engineering Osaka City University*, 42, 61-69.
- Şekercioglu, T. (2017). *Makine Elemanları* (3. Baskı). İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Tabil, L. G. (1996). Binding And Pelleting Characteristics Of Alfalfa, Ph. D. Dissertation, Saskatoon, Saskatchewan (CA): Department of Agricultural and Bioresource Engineering, University of Saskatchewan, 184p.
- Taulbee, D., Patil, D. P., Honaker, R. Q., & Parekh, B. K. (2009). Briquetting of coal fines and sawdust part I: Binder and briquetting-parameters evaluations. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 29(1), 1–22.
- Techmaster. (2020). Erişim adresi: <https://www.techmaster.com.tr/50-kg-led-isikli-el-kantari-bavul-kurban-el-terazisi-2-adet-pil-P22803>
- Teledyne Flir. (2020). *Cooled MWIR High-Sensitivity Camera FLIR GF335*. (2021,15 Kasım). Retrieved from: <https://www.flir.eu/products/gf335/>
- Temiz, V. (2015). *Vidalı Bağlantılar (Civatalar)*. 56–62. [PDF Belgesi] <https://web.itu.edu.tr/temizv/Sunular/Civata.pdf> adresinden edinilmiştir.
- Theerarattananoon, K., Xu, F., Wilson, J., Staggenborg, S., Mckinney, L., Vadlani, P., Pei, Z., & Wang, D. (2012). Effects of the pelleting conditions on chemical composition and sugar yield of corn stover, big bluestem, wheat straw, and sorghum stalk pellets. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 35(4), 615–623.
- Thread Runout. (2021, 06 Aralık). Erişim adresi: <https://www.portlandbolt.com/technical/faqs/thread-runout/>
- TS EN 24015. (1998). Erişim adresi: <https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?081118051115108051104119110104055047105102120088111043113104073097100078047065103103081104054052>
- Tumuluru, J. S., Sokhansanj, S., Hess, J. R., Wright, C. T., & Boardman, R. D. (2011). A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. *Industrial Biotechnology*, 7(5), 384-401.
- Turner, R. (1995). Bottomline in feed processing: achieving optimum pellet quality.

Feed Management, 46, 30–33.

US20110197501A1 - Method for producing fuel briquettes from high moisture fine coal or blends of high moisture fine coal and biomass. *Google Patents*. (2021, 13 Şubat). Retrieved from: <https://patents.google.com/patent/US20110197501A1/en>

US5916826A - Pelletizing and briquetting of coal fines using binders produced by liquefaction of biomass. *Google Patents*. (2021, 13 Şubat). Retrieved from: <https://patents.google.com/patent/US5916826A/en>

Ünal. (2020). Erişim adresi: <https://unal Muhendislik.com/index.php/anasayfa/urunler/kiricilar/ceneli-kirici/>

Van Der Stelt, M. J. C., Gerhauser, H., Kiel, J. H. A., & Ptasinski, K. J. (2011). Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass and Bioenergy*, 35(9), 3748–3762.

Venkatesan, S., & Kinzel, G. L. (2006). Reduction of stress concentration in bolt-nut connectors. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 128(6), 1337–1342.

Vinterbäck, J. (2004). Pellets 2002: The first world conference on pellets. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 513–520.

Wang, C., Bi, H., Jiang, X., Jiang, C., & Lin, Q. (2020). Experimental study on ignition and combustion of coal-rice husk blends pellets in air and oxy-fuel conditions. *Journal of the Energy Institute*, 93(4), 1544–1558.

Wilson, T. O. (2010). Factors affecting wood pellets durability, Master Thesis, The Pennsylvania State University, Department of Agricultural and Biological Engineering, 74p.

World Energy Council. (2019). World Energy Trilemma Index 2019. 1–79. Retrieved from: <https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-trilemma-index-2019>

Wu, M. R., Schott, D. L., & Lodewijks, G. (2011). Physical properties of solid biomass. *Biomass and Bioenergy*, 35(5), 2093–2105.

Xu, Y., Wang, Y., Chen, Y., Tian, C., Feng, Y., Li, J., & Zhang, G. (2016). Characterization of fine and carbonaceous particles emissions from pelletized

biomass-coal blends combustion: Implications on residential crop residue utilization in China. *Atmospheric Environment*, 141, 312–319.

Yaman, S., Şahan, M., Haykiri-Açma, H., Şeşen, K., & Küçükbayrak, S. (2001). Fuel briquettes from biomass-lignite blends. *Fuel Processing Technology*, 72(1), 1–8.

Zhang, X, Cai, Z., Chen, L., Zhang, D., & Zhang, Z. (2016). Effects of moisture content and temperature on the quality of water hyacinth pellets. *BioResources*, 11(1), 1407–1416.

Zhang, Xianglan, Xu, D., Xu, Z., & Cheng, Q. (2001). The effect of different treatment conditions on biomass binder preparation for lignite briquette. *Fuel Processing Technology*, 73(3), 185–196.

35 Facts About Climate Change. (2020, 27 Temmuz). Erişim adresi: <https://www.conserve-energy-future.com/various-climate-change-facts-php.php>

DİZİN

B

Bağlayıcı, 7, 15, 18, 19, 23, 24, 25, 26, 29, 30, 32, 33, 65
 Basınç, 8, 9, 11, 13, 16, 20, 21, 23, 24, 26, 28, 29, 30, 33, 43, 49, 59, 63, 70, 72, 75, 76
 Biyokatı, 2
 Biyokütle, 2, 5, 7, 9, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 43, 49, 51, 64, 67, 68, 70, 72, 73, 75, 76, 84, 86
 Briket, 7, 12, 13, 15, 24, 25, 29, 30
 Briketleme, 3, 7, 29

C

Cıvata, 3, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 51, 53, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 75, 76, 78

D

Difüzyon, 8
 Dünya, 1

E

Ekstrüzyon, 3
 Enerji, 1, 2, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 25, 32, 35, 49, 75
 Esnek Cıvata, 3, 36, 37, 38, 43, 44, 45, 48, 49, 50, 51, 55, 61, 62, 63, 75, 76

F

Fosil, 1, 2
 Fosil Yakıt, 1, 2

H

Hammadde, 14
 Hatve, 55

İ

İklim Değişikliği, 1, 2

K

Kalite, 10, 11, 37, 44
 Karbon, 1, 2, 26, 31
 Karbondioksit, 1
 Kaynak, 1, 34, 75
 Kömür, 7, 12, 13, 15, 22, 23, 24, 26, 27, 29, 31, 32, 33, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 70, 72, 73, 76
 Küresel Isınma, 1

L

Lignin, 19, 29
 Lignoselüloz, 27
 Linyit, 15, 23, 24, 29, 30, 31, 64

M

Manşon, 59, 60, 61
 Metrik Cıvata, 55

P

Pelet, 3, 5, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 24, 33, 43, 49, 51, 68, 70, 71, 73, 74, 75, 76
 Pelet Presi, 3, 5
 Peletleme, 3, 5, 10, 19, 20, 43, 65, 68, 69
 Proses, 5, 6, 17, 30, 51

R

Rijitlik, 45, 55, 56, 57, 59, 60, 61
 Rötischer Diyagramı, 39

S

Selüloz, 29
 Sera Gazı, 2
 Standart, 1, 12, 37, 47, 49, 51

Sürtünme Katsayısı, 38, 55

T

Talaş, 11, 23, 24, 30, 32

Tasarım, 17, 20, 21, 34, 35, 36, 47, 48,
49

Torifikasyon, 25

Tüketim, 22

V

Van Der Waals, 8, 15, 19

Verim, 1, 72

Viskozite, 9

Y

Yenilenebilir Enerji, 1, 2, 75



